

Министерство образования и молодежной политики Чувашской республики
Ассоциация молодых физиков Чувашии
при финансовой поддержке
Российского Фонда Фундаментальных Исследований (РФФИ)
при поддержке
Физико-технического института имени А.Ф. Иоффе РАН (г. Санкт-Петербург)
Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ"
им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ)

СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ

I Всероссийской научной конференции

Наноструктурированные материалы и преобразовательные устройства для солнечных элементов 3-го поколения



Чебоксары, 2013

**Министерство образования и молодежной политики
Чувашской республики
Ассоциация молодых физиков Чувашии
при финансовой поддержке
Российского Фонда Фундаментальных Исследований (РФФИ)
при поддержке
Физико-технического института имени А.Ф. Иоффе РАН
(г. Санкт-Петербург)
Санкт-Петербургского государственного электротехнического
университета "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ)**

СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ

I Всероссийской научной конференции

**Наноструктурированные материалы и
преобразовательные устройства для
солнечных элементов 3-го поколения**

19-20 июля 2013

Чебоксары, 2013

УДК 621.472-022.53(082)
ББК 3635Я43

Наноструктурированные материалы и преобразовательные устройства для солнечных элементов 3-го поколения. Материалы I Всероссийской научной конференции (Чебоксары, 19-20 июля 2013 года) / Под редакцией А.В. Кокшиной, А.В. Смирнова, В.Д. Кочакова, В.П. Афанасьева, Е.И. Терукова, А.В. Бобыля – Чебоксары: типография «Полиграфика», 2013 – 129 с.

Сборник выпущен при финансовой поддержке РФФИ (проект 13-08-06832).

Сборник материалов включает тезисы докладов участников I Всероссийской научной конференции «Наноструктурированные материалы и преобразовательные устройства для солнечных элементов 3-го поколения (Чебоксары, 19-20 июля 2013 года)».

Сборник содержит современные данные о состоянии и перспективах развития солнечной энергетики на территории Российской Федерации. Особое внимание уделено фундаментальным и прикладным исследованиям в области наноструктурированных солнечных элементов, фотоэлектрических преобразователей и преобразовательных устройств на основе тонкопленочных наноструктур.

Сборник предназначен для исследователей и специалистов в области нанотехнологий, солнечной и водородной энергетики, а также для широкого круга читателей, интересующихся состоянием исследований по данной теме. Авторы надеются, что представленный материал будет также служить основой для выработки предложений для представителей власти и бизнеса по широкому внедрения фотоэнергетических систем на территории России.

УДК 621.472-022.53(082)
ББК 3635Я43

© Ассоциация молодых физиков Чувашии

ПРЕДИСЛОВИЕ

Ассоциация молодых физиков Чувашии при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (РФФИ) и Министерства образования и молодежной политики Чувашской Республики на базе ФГБОУ ВПО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова» провела первую всероссийскую конференцию «Наноструктурированные материалы и преобразовательные устройства для солнечных элементов 3-го поколения»

Конференция посвящена перспективам развития солнечной энергетики, как одного из видов альтернативных источников энергии, в Российской Федерации и, в свете последних событий (строительство завода по производству солнечных батарей и монтаж пилотных солнечных электростанций на территории Чувашии, Алтайского края, Санкт-Петербурга и др., открытие нового направления обучения по направлению "фотовольтаика" и лаборатории по фотовольтаике для мониторинга количества и качества вырабатываемой электроэнергии).

Основной тематикой конференции являлись фундаментальные и прикладные исследования в области наноструктурированных солнечных элементов, фотоэлектрические преобразователи и преобразовательные устройства на основе тонкопленочных наноструктур.

Основной задачей конференции являлось выявление наиболее актуальных и перспективных разработок, стимулирование и дальнейшее развитие научных исследований аспирантов и молодых ученых, специалистов отрасли, привлечение внимания представителей власти и бизнеса.

Конференция проходила по следующим направлениям:

- тонкопленочные фотоэлектрические преобразователи на основе углеродных наноструктур;

- технологии тонких пленок аморфного гидрогенизированного кремния (*в том числе, уменьшение размеров солнечных элементов и расходов на их производство, увеличение эффективности СЭ, поверхностные эффекты - квантовые точки Si, внедрение концепции плазмоники для увеличения коэффициента поглощения*);

- фотоэлектрические преобразователи на основе тонких пленок халькогенидов металлов;

- преобразовательные устройства (*инвертеры, счетчики качества вырабатываемой электроэнергии, системы мониторинга и т.д.*).

Авторы надеются, что данный сборник окажется полезным для исследователей и специалистов в области нанотехнологий и солнечной и водородной энергетики, а также для широкого круга читателей, интересующихся текущим состоянием исследований по данной теме.

От коллектива Ассоциации молодых физиков Чувашии

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

КОМПЛЕКС ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ ПОДГОТОВКИ И ПЕРЕПОДГОТОВКИ КАДРОВ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СОЛНЕЧНЫХ МОДУЛЕЙ

¹Афанасьев В.П., ²Забродский А.Г., ³Охоткин Г.П., ⁴Теруков Е.И.

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Санкт-Петербург

²Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, Санкт-Петербург

³Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, Чебоксары

⁴ООО «НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике при ФТИ им. А.Ф.Иоффе», Санкт-Петербург

VPAfanasjev@mail.ru

Характерной особенностью технической деятельности человечества во второй половине XX и в начале XXI веков является быстрый рост энергопотребления. По оценкам [1,2] потребности человечества в энергии по сравнению с существующим уровнем потребления (~ 13 ТВт) к середине XXI в. более чем удвоятся (~ 30 ТВт), а к концу XXI в. — более чем утроятся (~ 46 ТВт). Одним из самых привлекательных и перспективных возобновляемых источников энергии всегда считалась фотовольтаика, т. е. прямое преобразование солнечной энергии в электрическую. Солнце может обеспечить растущие потребности в энергии в течение многих сотен лет. Общее количество солнечной энергии, поступающей на Землю в течение часа, превышает количество потребляемой человечеством энергии в течение года.

За последние 20–30 лет темпы роста солнечной энергетики составляли в среднем примерно 25 %. Согласно прогнозам в XXI веке развитие солнечной энергетики будет оставаться основным среди всех альтернативных источников. По оценкам к 2050 г. солнечная энергия может обеспечить 20–25 % мирового производства энергии, а к концу XXI века солнечная энергетика должна стать доминирующим источником энергии с долей, достигающей 60 % [3].

Последние годы в России запущен ряд крупных проектов по развитию солнечной энергетики. Так группы компаний «РЕНОВА», в которую входит ООО «Хевел», приняла решение наладить производство 1 млн. солнечных модулей в год (120 МВт/год) в Чувашии (г. Новочебоксарск). Успешная реализация этого и других проектов требует решения кадровых проблем на вновь организуемых производствах.

В 2010 году ГК «Роснотех» объявила конкурс на выполнение работ и оказание услуг по разработке и апробации программы опережающей профессиональной переподготовки и учебно-методического комплекса, ориентированных на инвестиционные проекты ГК «Роснотех» по производству солнечных модулей на базе технологии «тонких пленок» Oerlikon Solar, победителем которого стал Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ». В сентябре 2010 года был подписан договор №6967/КЭОП-271 между ГК РОСНАНО и СПбГЭТУ, а в январе 2011 года, в связи реорганизацией РОСНАНО в ОАО, был подписан новый договор с №7007/КЭОП-272 с Фондом инфраструктурных и образовательных программ для решения той же задачи.

На IV Международном форуме по нанотехнологиям «Роснанотех 2011», который прошел в Москве с 26 по 28 октября 2011 года, еще раз отмечалась необходимость обеспечения условий для развития проектных компаний ОАО «РОСНАНО», испытывающих потребность в кадрах определенной квалификации. Особое внимание уделялось созданию и распространению программ профессиональной переподготовки и повышения квалификации, «заточенных» под потребности конкретного работодателя.

Таким образом, необходимость развития системы опережающего обучения в условиях формирования nanoиндустрии очевидна и должна обеспечить решение двух задач профессиональной подготовки и переподготовки: закрыть кадровые потребности инвестиционных проектов, поддерживаемых ОАО «Роснанотех», и создать кадровый потенциал nanoиндустрии Российской Федерации, гарантирующий поступательное развитие отрасли, базирующейся на новых научных достижениях и открытиях.

Поэтому основной целью новой образовательной программы была переподготовка специалистов для обеспечения нужд ООО «Хевел» с производством в г. Новочебоксарске и ООО «НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике при ФТИ им. А.Ф.Иоффе» в г. Санкт-Петербурге (рис.1).



Рис. 1. Технологическое оборудование ООО «НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике при ФТИ им.А.Ф.Иоффе» в г. Санкт-Петербурге

Понятно, что при формировании образовательной программы главная роль отводилась представителям ООО «Хевел», которые, определяя в техническом задании перечень необходимых трудовых функций, формулировали заказ на подготовку кадров для работы на новом современном оборудовании.

Обучение 25 слушателей по направлению «Физика, технология и диагностика тонкопленочных солнечных модулей на основе аморфного и микрокристаллического кремния» включало десять дисциплин с общей трудоёмкостью 380 часов. Занятия проводились в Санкт-Петербурге на базе СПбГЭТУ и ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН в соответствии с учебным планом и графиком занятий, которые были утверждены руководством проектных организаций.

Как показал анализ кадровых потребностей ООО «Хевел» на площадке в г. Новочебоксарске, сохраняется необходимость дальнейшей не только переподготовки, но и подготовки кадров для предприятия с привлечением жителей региона. Для решения этой задачи в СПбГЭТУ была открыта магистерская программа «Солнечная гетероструктурная фотоэнергетика» (код: 210144.68) в рамках направления Электроника и нанoeлектроника. Учебный план программы в существенной мере базировался на тех дисциплинах, которые были подготовлены и апробированы в ходе выполнения проекта с Роснано. В 2011 году была сформирована первая группа численностью 10 человек, среди которых 6 человек – представители Чувашии, выпускники Чувашского государственного университета, а в 2012 году – вторая группа численностью 13 человек, из которых восемь – были представителями Чувашии.

Магистры, обучающиеся по новой программе, имеют доступ к современному технологическому и метрологическому оборудованию, размещенному в ООО «НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике при ФТИ им. А.Ф.Иоффе», проводят реальные научные исследования в интересах работодателя. Следует отметить высокую заинтересованность ребят в усвоении теоретических и практических знаний, их хорошую успеваемость.

В 2013 году состоялся первый выпуск магистров по магистерской программе 210144.68 «Солнечная гетероструктурная фотоэнергетика». Из 10 выпускников группы 7294 восемь человек защитили диссертации на «отлично», из них четыре человека получают по итогам обучения в магистратуре дипломы с отличием (рис.2). Студент этой группы Иванов Алексей, отлично защитивший магистерскую диссертацию на тему «Спектроскопические исследования тонких пленок a-Si:H, полученных методом плазмохимического осаждения в различных режимах», признан лучшим выпускником магистратуры факультета электроники СПбГЭТУ в 2013 году.

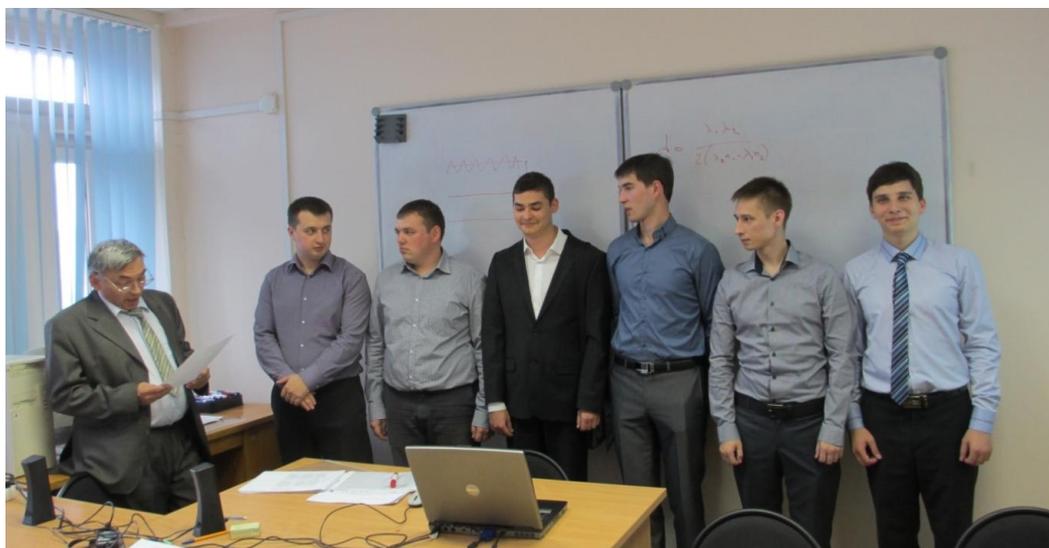


Рис.2. Первый выпуск магистров по магистерской программе 210144.68 «Солнечная гетероструктурная фотоэнергетика». Магистерские диссертации защитили на «отлично» посланцы Чувашии: Егоров Федор, Иванов Геннадий, Зотов Марат, Иванов Алексей, Никитин Андрей, Васильев Александр.

Таким образом, СПбГЭТУ реализует комплексный подход в развитии образовательных программ подготовки и переподготовки специалистов для производства солнечных модулей, что, на наш взгляд, позволит решать проблему профессиональной подготовки кадров для тонкопленочной солнечной энергетики России.

Работа выполнена в рамках Государственного контракта №16.526.12.6017 и поддержана Программой стратегического развития СПбГЭТУ на 2012-2016 годы (проект 2.1.3).

Список литературы

1. Афанасьев В. П., Тербунов Е. И., Шерченков А. А - Тонкопленочные солнечные элементы на основе кремния: СПб, 2011. – 168 с.
2. Де Роза А. Возобновляемые источники энергии. Физико-технические основы: Учебн. пособие / Пер. с англ. Долгопрудный: Изд. дом «Интеллект»; М.: Изд. дом МЭИ, 2010. 704 с.
3. Thin-film silicon solar cells. Editor: Arvind Shah // EPFL Press, 2010. 430 p.

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ НА КРЕМНИИ

Тербунов Е.И.
Санкт-Петербург, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
ООО «НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике
при ФТИ им.А.Ф.Иоффе»

Бурное развитие солнечной энергетики ставит вопрос, на основе какого материала будет реализован спрос на фотоэлектрические модули?

Современные солнечные модули можно изготавливать на основе следующих полупроводниковых материалов :GaAs,c-Si,a-Si,CIS и CdTe.

Солнечные элементы на красителях и органике мы не рассматриваем как кандидатов для применения в большой энергетике в связи с низким КПД и нерешенностью проблем с их долговременной стабильностью.

На сегодняшний день, основное количество рынка солнечной энергетики обеспечивается солнечными элементами на кристаллическом (41 %) и поликристаллическом кремнии (45 %).Остальные 14 % рынка занимают СЭ на a-Si,CIS иCdTe.

Исходя из перспектив развития рынка, учитывая такие факторы как наличие исходных компонент в земной коре и вопросы связанные с экологией, как получения ,так и утилизации солнечных модулей мы придерживаемся точки зрения о бесперспективности решения задач большой наземной энергетики, ориентируясь наCdTe,CIS иGaAs.На наш взгляд, кремний был и остается основным материалом на рынке солнечной энергетики и имеет перспективы, как в плане увеличения эффективности, так и снижения стоимости вырабатываемой энергии.

Развитие солнечной энергетики на кремнии основывается на совершенствовании «классических» кристаллических кремниевых элементов, эффективность которых достигает 25 %,разработке гетероструктурных солнечных элементов n-c-Si/p-a-Si:H (HIT-heterojunction with intrinsic thin layers) с КПД 24,7 % и совершенствовании тонкопленочных, многокаскадных СЭ на основе аморфного кремния.

В перспективе возможно решение вопросов перенесения (нанесения) тонких пленок кристаллического кремния на стекло или другие подложки методами spin-off или плазмохимического осаждения, что позволит снизить стоимость за счет уменьшения толщины СЭ и увеличить эффективность за счет возможности формирования многопереходных СЭ на базе кристаллического кремния.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВНОСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В РАЗЛИЧНЫХ РЕГИОНАХ СНГ

Ю.В. Крюченко¹, А.В. Саченко¹, В.П. Костылев¹, И.О. Соколовский¹,
¹Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева НАН Украины
03028 Киев, Украина
sach@isp.kiev.ua

Для солнечных элементов (СЭ) на основе α -Si:H рассчитаны годовые зависимости мощностей и энергий, генерируемых единицей площади СЭ на широтах 45°N , 50°N , 55°N , 60°N и в конкретных географических пунктах России, Казахстана, Украины и Беларуси. Нормировка этих зависимостей позволяет получить представление о соответствующих годовых зависимостях для СЭ на основе других полупроводников. В совокупности с данными о среднем числе солнечных дней в году (или о суммарной продолжительности солнечного сияния за год) для конкретных географических регионов это позволяет, в частности, судить о перспективности этих регионов для строительства солнечных электростанций. В результате определены районы России, Казахстана и Украины, для которых превышение над усредненными величинами электроэнергетики может достигать 30 и более процентов.

Так как солнечные электростанции, работающие в земных условиях при неконцентрированном солнечном освещении, обычно не имеют системы автоматической ориентации на Солнце, то вырабатываемая ими мощность изменяется как на протяжении светового дня, так и в течение года. В существующих в настоящее время стандартах имеется достаточно ограниченная информация о временных зависимостях мощности солнечных элементов (СЭ), привязанная к нескольким географическим широтам. В то же время в ряде случаев необходимо значительно более детальное знание временных зависимостей вырабатываемой мощности. В частности, при небольших углах нахождения Солнца над горизонтом интенсивность освещения сильно уменьшается, и важно знать, связано ли уменьшение вырабатываемой мощности лишь с уменьшением освещенности вследствие увеличения атмосферной массы, или также и с физическими процессами, ответственными за механизмы токопрохождения и рекомбинации.

В настоящей работе на основе подхода, развитого в [1], проведено теоретическое моделирование временных зависимостей выходной мощности, коэффициента полезного действия (КПД) фотопреобразования и других характеристик солнечных элементов на базе α -Si:H. Получены общие выражения, позволяющие описать указанные зависимости на протяжении любого из 365 дней в году для произвольной географической широты между 30° и 60° . В соответствии с нашими оценками, рассчитанные для СЭ на основе α -Si:H относительные (нормированные на значение в 12 часов дня) дневные временные зависимости ключевых характеристик СЭ остаются справедливыми и для СЭ (либо солнечных батарей) на основе других полупроводниковых материалов с реализующимся на практике КПД фотопреобразования.

Кроме того, в настоящей работе на основе модели [1] рассчитаны годовые зависимости максимально возможной (т.е. без учета облачности и других неблагоприятных факторов) мощности фотопреобразования СЭ на основе α -Si:H для широт 45°N , 50°N , 55°N и 60°N . Расчет проведен для 8-часового промежутка дня с шагом в 1 час, начиная с момента нахождения Солнца в зените. Поскольку конкретное значение долготы в этом случае несущественно, то этот промежуток соответствует 12 - 20 часам дня гринвичскому GMT(UTC)-времени на нулевом меридиане. Кроме

этого, для этих широт рассчитаны годовые зависимости максимально возможной энергии, генерируемой единицей площади таких СЭ. В совокупности полученные результаты дают возможность судить о перспективности строительства солнечных электростанций в тех или иных районах России, Казахстана, Украины и Белоруссии.

В случае конкретных географических пунктов величины электроэнергии E_Y , генерируемой за год единицей площади СЭ на основе a -Si:H, рассчитывались для СЭ с рельефной поверхностью. В таблице 1 указаны населенные пункты России, для которых производились расчеты в данной работе. Их выбор в основном осуществлялся исходя из имеющегося на данный момент дефицита выработки электроэнергии в соответствующих регионах России. Приведенные в этой таблице величины E_Y получены с учетом помесечно-трехчасовых данных по облачности и другим параметрам, приведенным на сайте NASA. В таблице 1 приведены также высота пункта над уровнем моря H , разница во времени Δt между моментами нахождения Солнца в зените на нулевом меридиане и на долготе населенного пункта, среднегодовой коэффициент солнечного сияния \bar{K}_{ss} и рассчитанное с учетом облачности количество часов солнечного сияния за год T_{ss} .

В таблицах 2-4 приведены аналогичные данные для населенных пунктов Казахстана, Украины и Белоруссии.

Приведенные выше результаты при знании фактического среднего числа солнечных дней в году или фактической суммарной продолжительности солнечного сияния за год для выбранных географических мест позволяют судить о перспективности тех или иных районов для строительства солнечных электростанций. По России в качестве примеров перспективности (на базе рассчитанных по данным NASA помесечно-почасовых коэффициентов солнечного сияния и суммарной продолжительности солнечного сияния за год) можно назвать район Усть - Кана, для которого рассчитанная годовая электроэнергия E_Y , производимая единицей площади СЭ на основе a -Si:H, превышает $8 \text{ Вт}\cdot\text{ч}/\text{см}^2$, а также районы Анжеро-Судженска, Барнаула, Бийска, Большеречья, Ишима, Лениногорска, Новокузнецка, Северного и Тайги, для которых эта энергия превышает $7 \text{ Вт}\cdot\text{ч}/\text{см}^2$. Если ограничиться величинами E_Y , превышающими $7.5 \text{ Вт}\cdot\text{ч}/\text{см}^2$, то превышение производимой за год электроэнергии над усредненными значениями составит от 8 до 24 %. На полученные значения годового производства электроэнергии в основном влияют два фактора. Первый из них – географическая широта, а второй – среднегодовое количество часов солнечного сияния. Последняя величина в основном связана с характером климата. Так, резко континентальный климат с малым количеством осадков, характерный для регионов, удаленных от океанов и морей, более благоприятен в этом отношении, чем умеренно континентальный климат. Это видно, в частности, из сравнения результатов, полученных для регионов России и Белоруссии (см. таблицы 1 и 4). В среднем, при близких географических широтах населенных пунктов, приведенных в этих таблицах, большие значения произведенной за год электроэнергии получены для регионов России.

Для населенных пунктов, расположенных в Казахстане (см. таблицу 2), действуют оба названных фактора, вследствие чего значения произведенной за год электроэнергии оказываются наибольшими. Для Украины, как видно из таблицы 3, перспективными для строительства солнечных электростанций являются Крым (Бахчисарай) и юг Украины (Николаев и Вилково). Таким образом, приведенные в данной работе результаты дают возможность определить конкретные регионы в России, Казахстане и Украине, наиболее перспективные для строительства солнечных электростанций с позиций максимальной производимой электроэнергии.

Таблица 1

№	Населенный пункт	Координаты	H , m	Δt , h	\bar{K}_{ss}	E_Y , W·h/cm ²	T_{ss} , h
1	Абакан	53.72°N, 91.43°E	250	6.095	0.340	6.53	1451
2	Анжеро-Судженск	56.08°N, 86.04°E	230	5.736	0.375	7.17	1631
3	Ачинск	56.28°N, 90.50°E	220	6.033	0.362	6.80	1569
4	Барнаул	53.36°N, 83.75°E	190	5.585	0.379	7.66	1654
5	Бийск	52.57°N, 85.25°E	180	5.683	0.379	7.91	1665
6	Большеречье	56.09°N, 74.62°E	80	4.975	0.393	7.60	1727
7	Ишим	56.11°N, 69.49°E	80	4.630	0.394	7.51	1721
8	Канск	56.20°N, 95.71°E	200	6.381	0.346	6.38	1489
9	Кызыл	51.70°N, 94.45°E	630	6.297	0.340	6.27	1396
10	Лениногорск	54.60°N, 52.46°E	230	3.500	0.396	7.56	1703
11	Нижнеангарск	55.78°N, 109.55°E	470	7.303	0.351	6.05	1456
12	Нижневартовск	60.93°N, 76.57°E	50	5.105	0.359	6.12	1549
13	Новокузнецк	53.76°N, 87.11°E	200	5.807	0.374	7.38	1616
14	Петропавловск-Камчатский	53.02°N, 158.65°E	150	10.577	0.313	5.77	1313
15	Северное	56.35°N, 78.36°E	120	5.224	0.392	7.60	1725
16	Тайга	56.06°N, 85.62°E	250	5.708	0.380	7.25	1648
17	Тайшет	55.93°N, 97.99°E	320	6.533	0.337	6.36	1455
18	Тобольск	58.20°N, 68.27°E	100	4.551	0.377	6.83	1636
19	Усть – Кан	50.93°N, 84.76°E	1060	5.651	0.445	8.67	1850
20	Ханты-Мансийск	61.00°N, 69.00°E	50	4.600	0.355	6.11	1537

Таблица 2.

№	Населенный пункт	Координаты	H , m	Δt , h	\bar{K}_{ss}	E_Y , W·h/cm ²	T_{ss} , h
1	Актау	43.65°N, 51.20°E	0	3.413	0.416	10.03	1873
2	Алма-Ата	43.25°N, 76.95°E	860	5.130	0.403	9.23	1745
3	Астана	51.18°N, 71.45°E	340	4.763	0.423	8.38	1835
4	Караганда	49.80°N, 73.10°E	530	4.873	0.432	8.82	1870
5	Костанай	53.16°N, 63.58°E	160	4.239	0.412	7.86	1791
6	Петропавловск	54.88°N, 69.16°E	140	4.611	0.403	7.52	1761
7	Тургай	49.63°N, 63.50°E	100	4.233	0.442	9.21	1939
8	Уральск	51.23°N, 51.37°E	30	3.425	0.435	8.70	1900
9	Усть-Каменогорск	49.98°N, 82.61°E	290	5.507	0.418	8.13	1779
10	Шымкент	42.30°N, 69.60°E	530	4.640	0.517	12.54	2297

Таблица 3.

№	Населенный пункт	Координаты	H , m	Δt , h	\bar{K}_{ss}	E_Y , W·h/cm ²	T_{ss} , h
1	Бахчисарай	44.75°N, 33.87°E	220	2.258	0.396	9.82	1818
2	Вилково	45.40°N, 29.58°E	0	1.972	0.388	8.61	1703
3	Винница	49.23°N, 28.48°E	250	1.899	0.343	7.02	1489

4	Луганск	48.57°N, 39.33°E	70	2.622	0.359	7.37	1559
5	Николаев	46.97°N, 32.00°E	50	2.133	0.401	8.86	1779
6	Ровно	50.62°N, 26.25°E	200	1.750	0.337	6.65	1453
7	Ужгород	48.62°N, 22.30°E	120	1.487	0.329	6.74	1424
8	Харьков	50.00°N, 36.25°E	110	2.417	0.359	6.99	1533
9	Чернигов	51.50°N, 31.30°E	110	2.087	0.343	6.68	1486
10	Черновцы	48.30°N, 25.93°E	220	1.729	0.285	5.64	1213

Таблица 4.

№	Населенный пункт	Координаты	H , m	Δt , h	\bar{K}_{ss}	E_Y , W·h/cm ²	T_{ss} , h
1	Брест	52.10°N, 23.70°E	150	1.580	0.331	6.24	1416
2	Витебск	60.93°N, 76.57°E	150	2.013	0.374	6.52	1594
3	Гродно	53.68°N, 23.81°E	130	1.587	0.329	5.89	1395
4	Могилев	53.91°N, 30.34°E	190	2.023	0.334	6.07	1434
5	Мозырь	52.05°N, 29.27°E	120	1.951	0.329	6.20	1408

Литература

1. U.V. Kryuchenko, A.V. Sachenko, A.V. Bobyl, V.P. Kostylyov, et al. *Efficiency of a-Si:H solar cell. Detailed theory* // Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics 2012. V. 15. N. 2. P. 91-116.

DATA MINING В НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

В.С. Аbruков, С.В. Аbruков, А.В. Смирнов, Е.В. Карлович
 Чебоксары, Чувашский госуниверситет им. И.Н. Ульянова
abrukov@yandex.ru

Введение

Что значит, что вы провели экспериментальные научные исследования? Это означает, что у вас есть таблицы и графики в которых содержатся значения целевой функции эксперимента и факторов (параметров, переменных), от которых зависит целевая функция.

Вопрос заключается в следующем, как мы можем увеличить значение полученных таблиц и графиков? Как мы можем обобщить их? Как мы можем использовать их для решения обратных задач – определения факторов, обеспечивающих требуемое значение целевой функции?

Другой вопрос, как мы можем выйти за рамки эксперимента, который мы завершили, как мы можем выйти за пределы таблиц и графиков? Можем ли мы предсказать результаты экспериментов в заданной области исследований, которые еще не были проведены?

Методология

В данной работе представлены примеры применения методов интеллектуального анализа данных (Data Mining - DM), в частности искусственных нейронных сетей

(ИНС) для создания многофакторных вычислительных моделей экспериментальных данных, которые показывают, как мы можем решить вышеупомянутые проблемы.

DM включает в себя такие средства, как: деревья решений, искусственные нейронные сети (ИНС), самоорганизующиеся карты Кохонена и другие. ИНС играют ведущую роль для создания многофакторных вычислительных моделей. Все эти средства включены в аналитическую платформу «Deductor» отечественного производства (разработчик - ООО «Аналитические технологии» – BaseGroup Lab, г. Рязань, www.basegroup.ru), которая содержит в себе также средства организации совокупности баз данных в виде «хранилища данных», средства подготовки данных к моделированию (очистка данных – выявление дубликатов и противоречий, фильтрация, факторный и корреляционный анализ), разнообразные средства визуализации результатов анализа и моделирования.

На этом же сайте BaseGroup Lab приведены основные теоретические и практические положения основ применения средств Data Mining для реализации так называемого информационного подхода к моделированию.

ИНС, которые являются в настоящее время единственно возможным «аппроксиматором» многомерных экспериментальных функций (с числом переменных более двух), играют ведущую роль при моделировании экспериментальных данных. В основе их применения лежит теорема Колмогорова – Арнольда, адаптированная применительно к ИНС теоремой Хехт-Нильсена. ИНС позволяют использовать разнородные данные (качественные и количественные), «непредставительные» (неполные) выборки, анализировать сильно нелинейные связи.

Реальный компьютерный эмулятор ИНС, работает (вычисляет) как обычная компьютерная программа. Разница в том, что создание ИНС основано не на программировании с помощью какого-либо языка, а на использовании процедуры обучения на наборе примеров (таблице примеров, базе данных примеров).

Основным преимуществом моделирования экспериментальных данных с помощью ИНС является то, что ИНС могут быть использованы для решения проблем, которые не имеют алгоритмического решения.

В целом, ИНС применяются в трех случаях:

1. Когда невозможно аналитическое описание задачи.
2. Когда аналитическое описание возможно, но нет алгоритма его решения. Пример - уравнение Шредингера или дифференциальное уравнение распространения волны горения.
3. Когда аналитическое описание возможно и есть алгоритм ее решения, но нет времени для программной реализации алгоритма (например, в случае управления быстропротекающими процессами), не хватает вычислительных ресурсов (например, когда для решения задачи требуется применение суперкомпьютеров), просто - «неудобно».

Практические правила применения ИНС при моделировании данных можно свести к следующим основным положениям.

1. Считается, что проблемы любой сложности может быть решена с помощью двух скрытых слоев ИНС, поэтому установка конфигурации с более чем двумя скрытыми слоями вряд ли может быть оправдано.
2. Одного скрытого слоя нейронной сети достаточно для решения 80% задач.
3. Двух- и более слойные ИНС с малым числом нейронов в каждом слое обучаются намного быстрее, чем однослойная с тем же числом нейронов, но "схватывают" зачастую общее направление, не обращая внимания на «мелочи». Однослойная с другой стороны, чаще просто запоминает примеры, не делая аппроксимации.
4. При выборе числа нейронов в скрытом слое необходимо соблюдать следующее правило: количество соединений между нейронами (вычислительных путей) должно

быть значительно меньше, чем количество примеров в обучающем наборе. Количество соединений рассчитывается как количество соединений каждого нейрона со всеми нейронами соседних слоев, в том числе соединений с входным и выходным слоем. Вопрос, сколько нейронов должно быть в скрытом слое решается следующим образом. Для ИНС с входным слоем из 5 нейронов (пяти входных сигналов) и одним нейроном в выходном слое (одна выходная целевая функция) для числа примеров для обучения – 100, число нейронов в одном скрытом слое будет примерно равно 4 ($5*4=20$ связей со входным слоем плюс $1*4=4$ связи с выходным слоем, всего 24 связи, и тогда $100/24$ равно примерно 4, что достаточно, чтобы считать, что число примеров «значительно» превышает число связей). Если число нейронов в скрытом слое будет больше, чем надо, может наступить "переобучение" ИНС, когда она будет выдавать хорошие прогнозы на входных данные, соответствующих одному из примеров, но давать плохие прогнозы в остальных случаях. Т. е. фактически она будет работать как повторитель (что, возможно, и не плохо, если мы хотим просто запомнить «экспериментальные данные, а не выходить за пределы обучающей выборки, то есть у нас не стоит задача прогнозирования результатов непроверенных еще экспериментов).

5. Для повышения качества обучения следует стремиться к статистической независимости входов, то есть к отсутствию корреляций между ними.

Примеры применения искусственных нейронных сетей в научных исследованиях и представлении результатов исследований.

1. Вычислительная модель вольтамперной характеристики наноплёнок линейно-цепочечного углерода (ЛЦУ) с внедрёнными в них атомами металлов и неметаллов (ЛЦУ-АМН).

Представлены только два экрана (скриншота) вычислительной модели (два примера вычисления и визуализации), содержащей в себе все связи между всеми переменными задачи. Данная модель, может мгновенно вычислить и представить в виде графиков несколько десятков, существенно отличающихся друг от друга, случаев внедрения в ЛЦУ атомов различных элементов, а также спрогнозировать вольтамперные характеристики для тех случаев, для которых эксперименты еще не проводились.

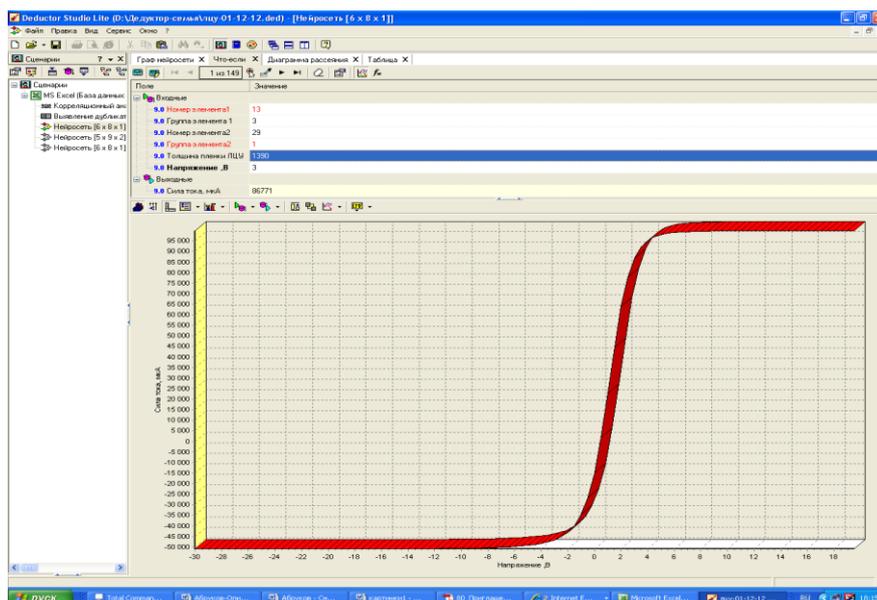


Рис. 1. Прогноз вольтамперной характеристики ЛЦУ АМН в случае внедрения в ЛЦУ атомов алюминия и меди (прямая задача). Реально эксперименты не проводились. Номера элементов и групп, внедренных в ЛЦУ атомов, соответствуют периодической таблице Менделеева.

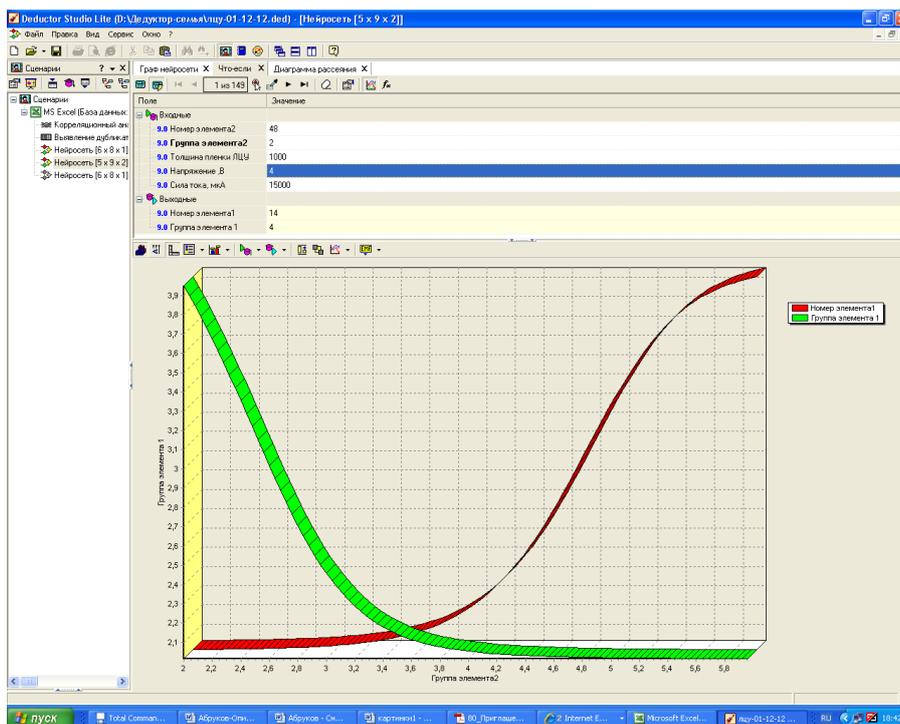


Рис. 2. Решение обратной задачи: определение группы и номера элемента 1, которые при заданном элементе 2 (номер и группа) и толщине пленки 1000 ангстрем обеспечивают силу тока – 15000 мкА при напряжении 4 В. По оси ординат слева указан номер группы элемента 1 (ему соответствует зеленая кривая), красная кривая соответствует номеру элемента 1 (она нормирована в пределах от 3 до 82).

2. Вычислительная модель эксплуатации солнечной электростанции.

Представлен только один экран (скриншот) вычислительной модели (один пример вычисления и визуализации), содержащей в себе все связи между всеми переменными задачи. Данная модель, может мгновенно вычислить и представить в виде графиков несколько десятков, существенно отличающихся друг от друга, случаев эксплуатации солнечной электростанции при различных метеоусловиях и выдать прогноз на оптимальные условия эксплуатации солнечной электростанции.

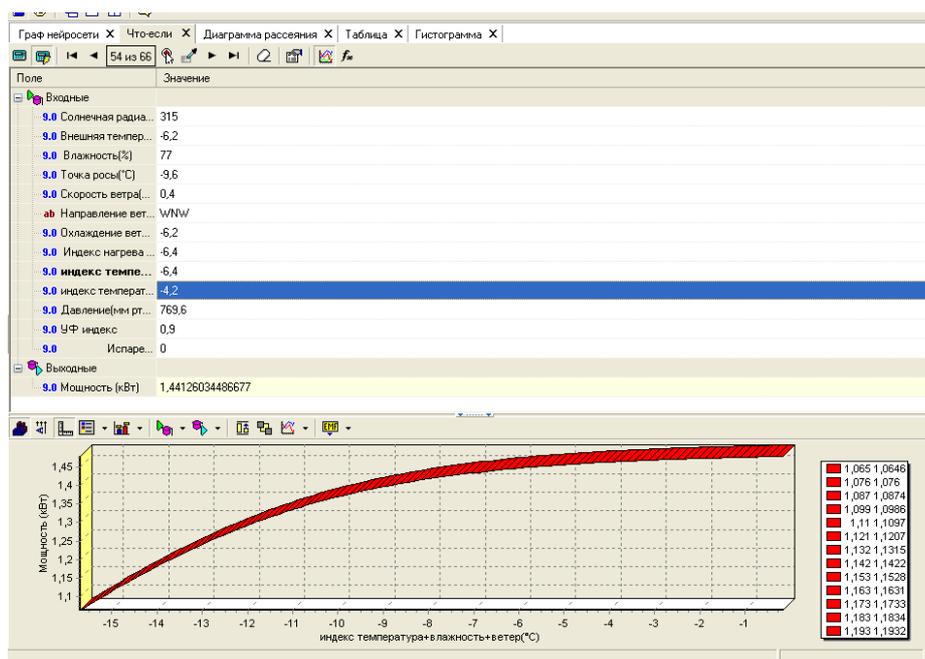


Рис. 3. Зависимость мощности солнечной электростанции от индекса температура+влажность+ветер.

3. Вычислительные модели горения катализированных топлив.

Представлен один экран вычислительной модели, содержащей в себе все связи между такими переменными задачи, как: эффективность катализатора - Z ($Z = U_k / U_0$, где U_0 - скорость горения без катализатора, U_k - скорость горения с катализатором), содержанием нитроцеллюлозы (NC), нитроглицерина (NGL), гексогена (RDX), катализатора SnO₂, содержанием сажи и давлением. Эти модели позволяют прогнозировать скорость горения топлива для любого набора из шести переменных, а также прогнозировать количество двух катализаторов для любого набора из пяти других переменных. Другие примеры - в [2].

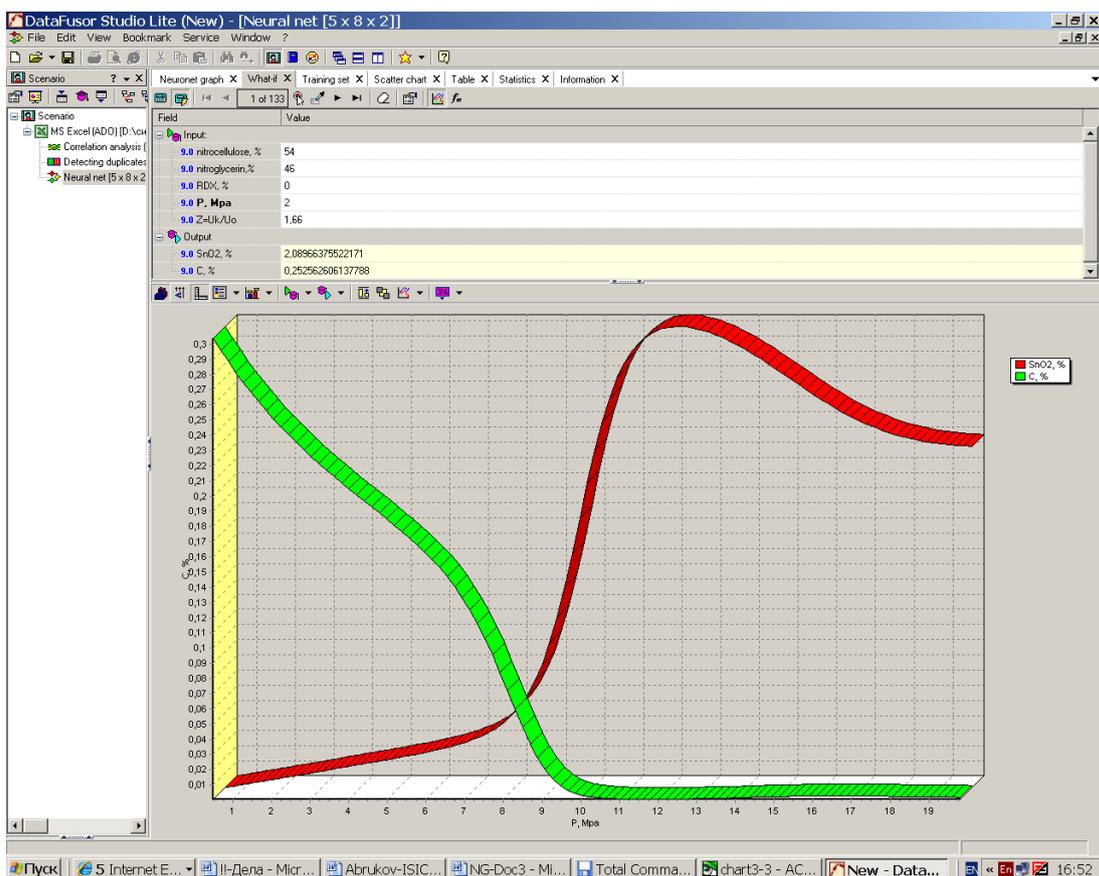


Рис. 4. Нормализованное (от 10% до 0) количество катализатора SnO₂ - красная линия и количество сажи - зеленая линия, которые обеспечивают эффективность катализатора $Z = 1,66$ при различных значениях давления (другие переменные: NC - 54%, NGL - 46%, RDX - 0%).

4. Вычислительные модели образовательного процесса в вузе.

Представлен экран вычислительной модели, содержащей в себе связи между такими переменными, как: количество различных оценок в первую сессию студентов от результатов ЕГЭ по математике. Эта модель позволяет прогнозировать успеваемость студентов в первую сессию в зависимости от качества приема (баллов полученных абитуриентами на ЕГЭ). Подробнее результаты работы по созданию разнообразных многофакторных вычислительных моделей в области создания интеллектуальной системы поддержки принятия решений и управления вузом представлены на сайте <http://mfi.chuvsu.ru/opros/>

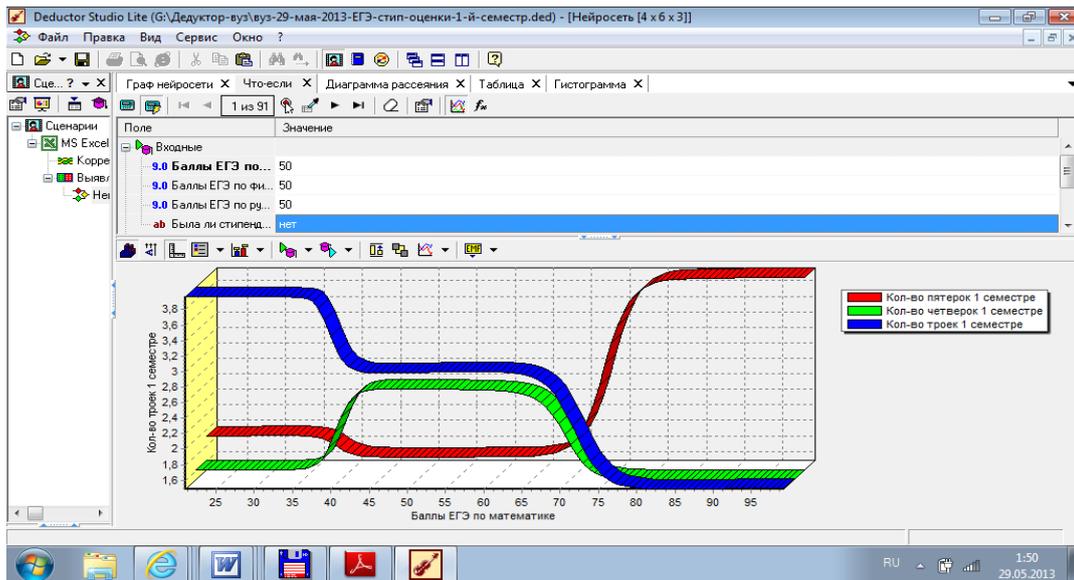


Рис. 5. Зависимости количества различных оценок в первую сессию от результатов ЕГЭ по математике (в случае, когда студент не получал стипендию)

5. Вычислительные модели семейных отношений.

Представлен экран вычислительной модели, содержащей в себе связи между переменными, определяющими продолжительность брака. Эта модели позволяют прогнозировать продолжительность брака в зависимости от 12 факторов. Подробнее результаты работы в области создания моделей семейных отношений представлены на сайте <http://www.chuvsu.ru/2008/proekt.html> и в [1]. Работа проводилась по гранту Российского фонда фундаментальных исследований (проект 07-06-00277).

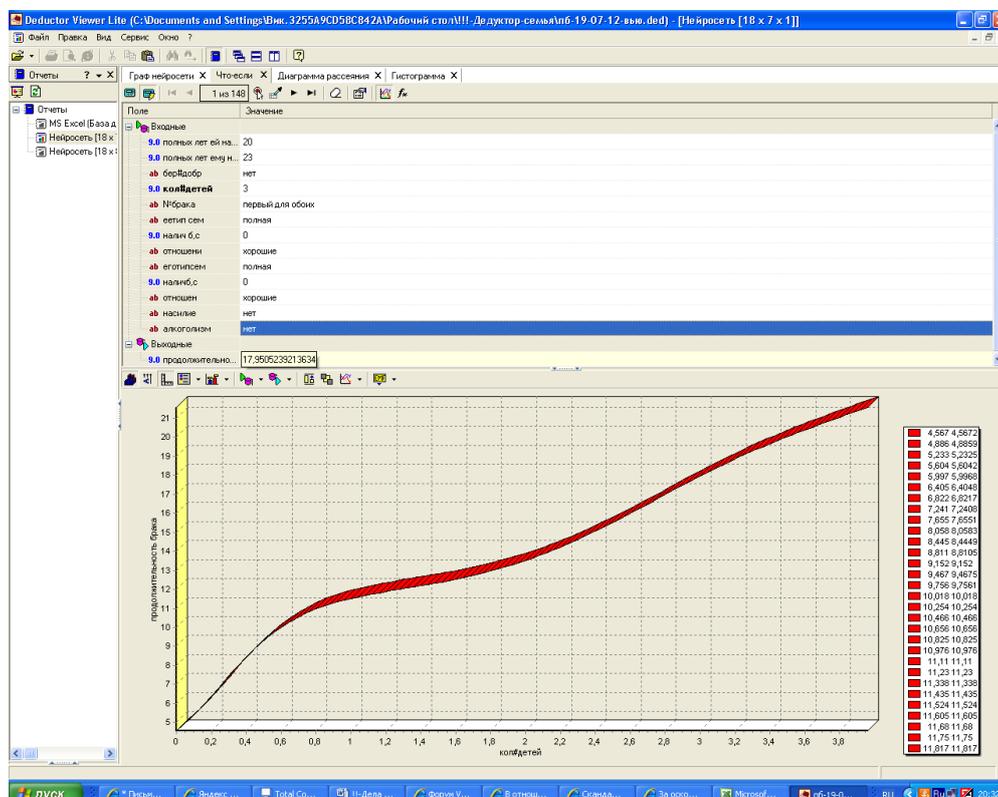


Рис. 6. Зависимости продолжительности брака от параметров партнеров, планирующих вступить в брак (представлен график зависимости продолжительности брака от количества «согласованных» партнерами детей.

Заключение

Возможно, уже в ближайшем будущем, появится принципиальное изменение в форме представления результатов экспериментальных научных исследований в научных журналах.

В качестве требования к форме представления результатов экспериментальных исследований может появиться требование представления (в качестве приложения к статье) исполняемого компьютерного модуля многофакторной вычислительной модели проведенного эксперимента, полученной с помощью искусственных нейронных сетей, обобщающей все данные эксперимента и позволяющей читателю быстро вычислять целевые функции эксперимента при любом наборе конкретных значений параметров (переменных), визуализировать любые зависимости, содержащиеся в экспериментальных данных, прогнозировать (аппроксимировать, экстраполировать) выявленные в работе закономерности за пределы обучающей выборки.

Если сравнить традиционную форму представления результатов экспериментальных исследований в научной статье (в виде таблиц и графиков) и в виде компьютерного модуля многофакторной вычислительной модели, то можно отметить следующее.

Таблицы позволяют видеть значения целевой функции и значения параметров, ей соответствующих. Но она не позволяет непосредственно определить промежуточные значения целевой функции при другом наборе параметров, интересующих читателя, а также выходить за пределы диапазонов табличных данных.

График (семейство графиков для функции двух переменных) позволяет видеть зависимость в целом, но он (оно) не позволяет видеть зависимость функции при всех наборах 2-х переменных. И очень трудно представить графически экспериментальную функцию трех переменных и, тем более, функцию большего числа переменных.

Компьютерный модуль многофакторной вычислительной модели эксперимента позволяет решать все вышеперечисленные задачи мгновенно, а кроме того, еще и ряд других задач, в частности, обратные задачи и задачи получения новых «экспериментальных» результатов без проведения дополнительных экспериментов (задачи прогнозирования).

Среди задач обработки экспериментальных данных, которые в некоторых случаях могут являться обязательными элементами экспериментальных работ и которые ждут своего решения с помощью ИНС, можно отметить, например, задачу нахождения касательной к кривой экспериментальных данных, а также способы нахождения точек пересечения кривых экспериментальных данных, а также другие задачи нахождения особенностей экспериментальных данных.

Литература

1. Аbruков В.С., Николаева Я.Г., Макаров Д.Н., Сергеев А.А., Карлович Е.В. Применение средств интеллектуального анализа данных (Data Mining) для исследования неполно определенных систем // Вестник Чувашского университета, № 2, 2008, с. 233-241.

2. Abruков V.S., Karlovich E.V., Afanasyev V.N., Semenov Yu.V., Abruков S.V. Creation of propellant combustion models by means of data mining tools // International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion. 2010. № 9(5). P. 385-396.

РОЛЬ КОМПАНИИ «ХЕВЕЛ» В ФОРМИРОВАНИИ РЫНКА ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ МОДУЛЕЙ

Козлов В.А.
ООО «Хевел»
v.kozlov@hevelsolar.com

В последние годы солнечная энергетика демонстрирует быстрые темпы прироста при одновременном снижении себестоимости солнечного киловатт-часа. На начало 2013 года совокупная мощность всех фотоэлектрических электростанций мира, по данным Европейской ассоциации солнечной энергетике, превысила 100 ГВт. За 2012 год рост мощности составил 30 тыс. МВт. Доля Европы в общемировом объеме установленных мощностей составляет более 70%.

Абсолютный мировой лидер по установленной мощности — Германия, у которой почти 18 000 МВт, причем 7400 МВт она сумела запустить только в прошлом году.

Развитие отечественной фотовольтаики прошло несколько этапов. В советский период отрасль развивалась за счет сегмента космических программ. После распада СССР часть профильных оборонных предприятий и ряд вновь созданных компаний занялись развитием сегмента наземной фотовольтаики. Период развития последнего десятилетия можно охарактеризовать развитием мелкосерийного производства и практически полным отсутствием рынка внутри страны. Около пяти лет назад экспортная составляющая превышала 90% от всего объема отечественного производства фотовольтаики. Внутренний рынок составлял примерно 1 МВт, сохранив этот уровень до сегодняшнего дня.

Компания «Хевел» была основана летом 2009 года с целью развития в России солнечной энергетике и последующего вывоза российской высокотехнологичной продукции на зарубежные рынки. ООО «Хевел» - совместное предприятие Группы компаний «Ренова» и ОАО «РОСНАНО». Доля «Реновы» в уставном капитале ООО «Хевел» составляет 51%, РОСНАНО 49%. Предприятие мощностью 130 МВтпик (более 1 миллиона солнечных модулей в год) расположено в городе Новочебоксарске (Чувашия). Поставщиком технологической линии для производства является швейцарская компания Oerlikon Solar (входит в Oerlikon Corporation).

Компания «Хевел» уделяет особое внимание научно-исследовательской работе в целях повышения эффективности, снижения себестоимости и расширения сфер применения солнечных модулей. Для достижения поставленных целей компанией в Санкт – Петербурге совместно с ФТИ им. Иоффе создан Научно-технический центр, который в декабре 2010 года получил статус участника Инновационного центра «Сколково».

Технология производства компании базируется на использовании наноструктур на основе кремния. Микроморфные фотоэлектрические модули являются следующим поколением технологии, уже зарекомендовавшей себя на рынке – фотоэлектрических модулей на основе аморфного кремния. Типичная конструкция гетероструктурного солнечного элемента на основе аморфного и микроморфного кремния отличается от технологии прошлого поколения – аморфного кремния наличием наноструктурированного «микроморфного слоя», позволяющего преобразовывать более широкий спектр длин волн излучения, падающего на фотоэлектрический модуль, увеличивая тем самым КПД модуля.

Рынок тонкопленочных солнечных модулей всех типов (не только микроморфных) пока выглядит значительно скромнее по сравнению с традиционной технологией на поликристаллическом кремнии и составляет примерно четверть

от общего фотоэлектрического промышленного производства. Модули на поликристаллическом кремнии начали осваиваться значительно раньше, их средний КПД в полтора-два раза выше, чем у тонкопленочных 15 — 19 % против примерно 10%. Но несмотря на сравнительно низкий КПД, тонкопленочная технология обеспечивает сопоставимые объемы выработки электроэнергии. Происходит это потому, что поликристаллические фотоэлементы воспринимают только прямое падение солнечных лучей, для эффективной работы им необходимы еще и системы ориентации на Солнце, а тонкопленочные умеют улавливать и рассеянный свет. К тому же их КПД не так зависим от перепада температуры на поверхности, как у кремниевых модулей. Пиковая мощность каждого модуля площадью 1,4 кв. м. составляет 125 Вт.

ООО «Хевел» представляет полный комплекс услуг – от производства фотоэлектрических (солнечных) модулей до строительства «под ключ» солнечных электростанций, включая проектирование, комплектацию и поставку основного (фотоэлектрические модули) и вспомогательного оборудования, выполнение строительно-монтажных и пуско-наладочных работ.

Продуктовая линейка компании "Хевел" представлена широким спектром продуктов и решений: промышленные установки; крупные и малые крышные установки; фасадные установки; полностью и частично автономные системы; фотоэлектрические модули оптовыми партиями.

Компанией «Хевел» осуществлен ряд пилотных проектов. Одна из первых фотоэлектрических (солнечных) систем мощностью 70 кВт. была установлена в июне 2012 года на кровле железнодорожного вокзала города Анапа. Пилотный проект реализован ОАО «Российские железные дороги» в рамках инвестиционного проекта «Внедрение ресурсосберегающих технологий на железнодорожном транспорте».

В марте 2013 года в Республике Алтай завершено строительство одной из первых в мире автономных дизель-солнечных электростанций. Гибридная установка мощностью 100 кВт расположена в поселке Яйло взамен устаревшего дизельного генератора и предназначена для автономного бесперебойного снабжения населенного пункта электроэнергией.

Как показали результаты мониторинга, проведенного специалистами Российского научно-технического центра тонкопленочных технологий в энергетике при ФТИ им. Иоффе, реальные показатели работы большинства объектов оказались выше на 20-40% от прогнозных значений. А эксплуатация дизель-солнечной электростанции позволила снизить на 40-50% ежегодное потребление дизельного топлива.

В 2009 году, когда ГК «Ренова» и ОАО «РОСНАНО» запускали проект по строительству завода тонкопленочных солнечных модулей, предполагалось экспортировать практически весь объем выпуска модулей. В настоящий момент в качестве приоритетных рынков сбыта компания рассматривает Российские регионы, договоренности о строительстве первых солнечных электростанций мощностью 25 МВт каждая достигнуты с Астраханской и Оренбургской областями, Республиками Калмыкия, Алтай, Дагестан, Башкортостан. Бизнес-стратегия компании предусматривает также экспорт продукции в Южную Африку, Индию, Чили, Пакистан и другие страны.

НАПРАВЛЕНИЕ
«Тонкопленочные фотоэлектрические преобразователи на основе
углеродных наноструктур»

ПЛЕНКИ УГЛЕРОДА В СОСТОЯНИИ Sp^1 В ЭЛЕКТРОНИКЕ

¹Кочаков В.Д., ²Александров А.Ф.

¹Чебоксары, Чувашский госуниверситет им. И.Н. Ульянова

²Москва, МГУ, кафедра Физ. электроники

¹kocherishca@mail.ru, ²afalexandrov@gmail.com

Синтез аллотропной формы углерода в состоянии Sp^1 впервые был осуществлен в ИНЭОС АН СССР в 1959 году методом окислительной дегидрополиконденсации ацетилена [1]. По данным электронной микродифракции [2] были проинтерпретированы две модификации, названные α - и β -карбином. Параметры гексагональной ячейки были определены соответственно: $a_\alpha = 5.08 \text{ \AA}$, $c_\alpha = 7.80 \text{ \AA}$, $a_\beta = 4.76 \text{ \AA}$, $c_\beta = 2.58 \text{ \AA}$. Авторы предположили, что α -карбин - это полииновая форма углеродной цепочки ($-C\equiv C-C\equiv C-$)_n, а β -карбин - кумуленовая форма ($=C=C=C=$)_n. Продолжение исследований карбинов как природных, так и полученных синтетически, существенно расширило спектр возможных модификаций карбина. Карбин получается в виде квазиаморфных порошков и пленок с размером микрокристаллических включений, не превышающих 1 мкм, что делает невозможным фундаментальное исследование их методом рентгеновской дифракции.

Позднее в межвузовской лаборатории Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова (ЧГУ) и Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (МГУ) коллективом во главе с профессором Александровым А.Ф. ионно-плазменным методом была синтезирована пленка углерода в состоянии Sp^1 . Позднее научились ионно-плазменным методом выращивать кристаллы карбина размером до 100 микрон. Один из образцов представлен на рис. 1.

Его кристаллическую структуру подтверждает электроннограмма, которая приведена на рис. 1(2). Обращают на себя внимание шесть рефлексов характеризующие гексагональную структуру расположения молекул линейно-цепочечного углерода (ЛЦУ) в кристалле карбина.

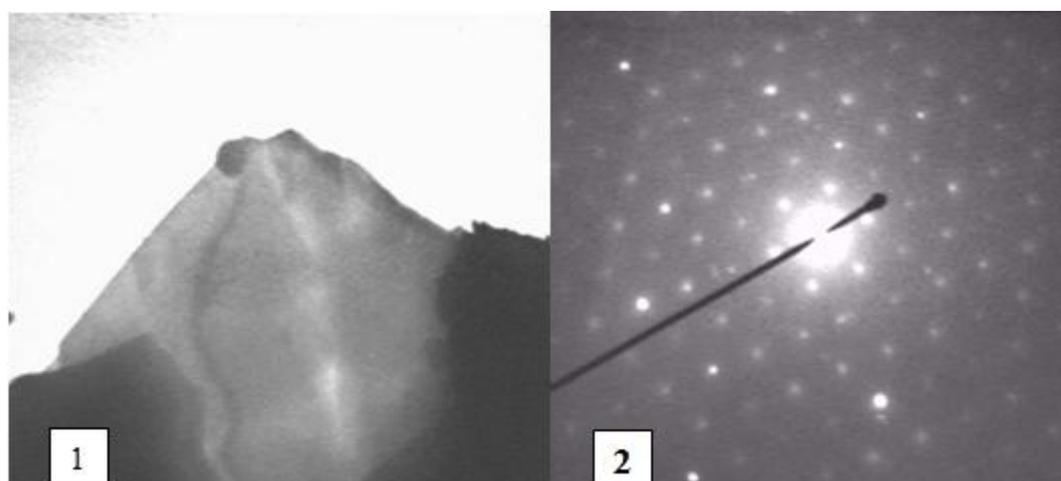


Рисунок 1. Образец и электроннограмма кристалла карбина

Электронно-спектроскопические исследования сыграли решающую роль в утверждении линейно-цепочечной структуры карбина. Наиболее информативные и убедительные сведения о карбине были получены при изучении его электронной структуры методом Оже-спектроскопии и спектроскопии характеристических потерь энергии электронов (СХПЭ) [3-5].

Электронная структура молекулы линейно-цепочечного углерода (ЛЦУ) показана на рисунке 2. Сигма (σ) связь обеспечивает механическую устойчивость молекуле углеродного полимера, а пи (π) связь, кроме механической устойчивости, обеспечивает электрические свойства данного материала, поскольку π -электроны делокализованы и принадлежат всей цепочке атомов.

Валентная зона цепочки состоит из двух энергетических подзон (π и σ). Поскольку высоколежащая π -подзона заполнена только наполовину, углеродная цепочка должна иметь металлическую проводимость. Но, согласно теореме Л.Ландау – одномерный металл неустойчив относительно структурной перестройки, приводящей к увеличению периода цепочки. Поэтому энергетически выгодным является цепочка с чередующимися (одиночная и тройная) связями. Валентная зона оказывается полностью заполненной, а на границе зоны возникает щель (запрещенная зона). Это приводит к выигрышу в энергии и появляются не металлические свойства.

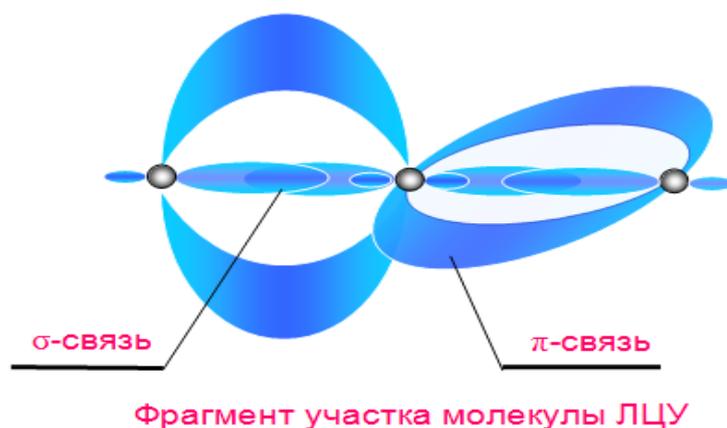


Рисунок 2. Электронная структура молекулы линейно-цепочечного углерода

Такая структура подтверждена многочисленными исследованиями. На рис.3 представлен спектр комбинационного рассеяния от пленки ЛЦУ.

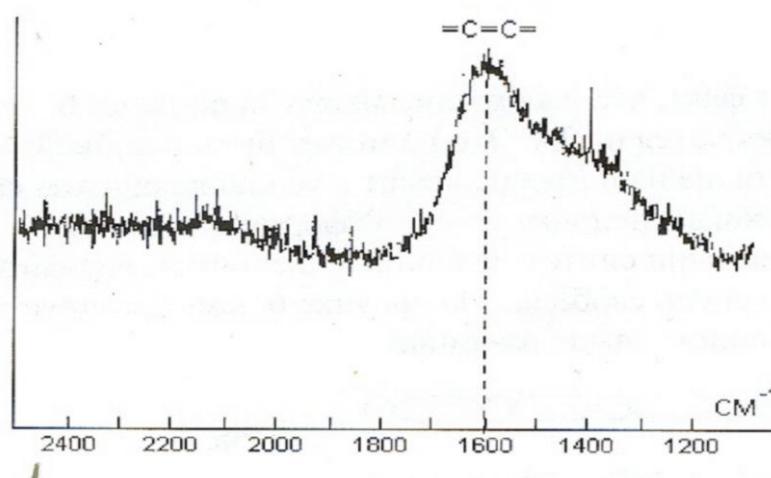


Рисунок 3. Спектр комбинационного рассеяния на пленке ЛЦУ с характерной линией 1600 см^{-1} и 2100 см^{-1} . Эти пики относятся к двойным (кумуленовым) связям

Дифракционная картина от пленки ЛЦУ показана на рис. 4, при этом картина от тонкой пленки (до 60 нм) представляет собой шесть точечных рефлексов, соответствующих гексагональной структуре (а), картина от более толстых пленок содержит единственное узкое дифракционное кольцо (б).

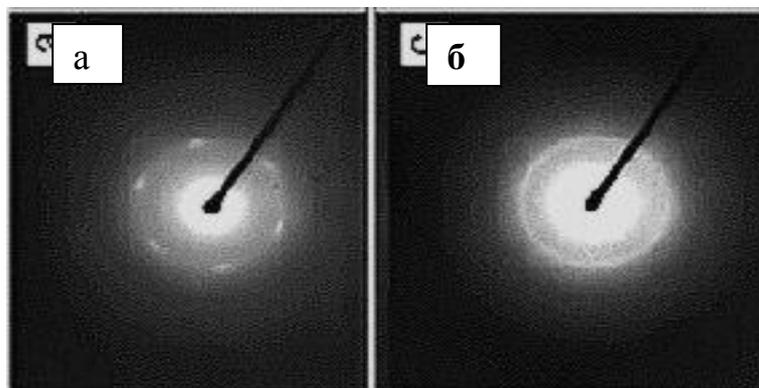


Рисунок 4. Дифракционная картина от пленки ЛЦУ

Ещё более убедительным подтверждением обсуждаемой структуры плёнки ЛЦУ может служить прямая регистрация расположения молекул на подложке при синтезе. На рис. 5 изображена поверхность пленки ЛЦУ, полученная на атомно-силовом микроскопе.

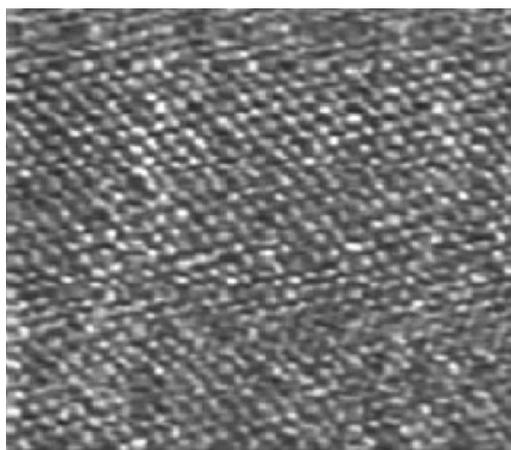


Рисунок 5. Топография поверхности пленки ЛЦУ полученная в режиме AFM (получена в МГУ профессором Яминским И.В.)

В соответствии с проведенными исследованиями, пленку ЛЦУ можно представить в виде модели, которая приведена на рис. 6

Как уже указывалось выше, наличие делокализованных электронов, принадлежащих всей молекуле ЛЦУ, обеспечивает суперпроводимость вдоль цепочки. Отсутствие связи между цепочками (только Ван-дер-Ваальсовы силы) делает пленку в перпендикулярном направлении диэлектриком. Удельное сопротивление в указанных направлениях различаются в 10^6 раз.

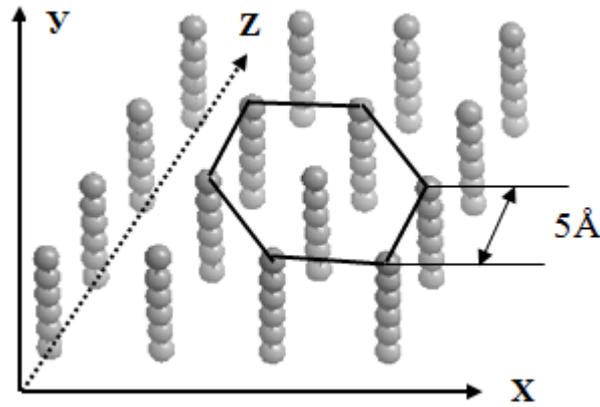


Рисунок 6. Удельная проводимость вдоль углеродной цепочки σ_1 и перпендикулярно σ_2 различаются на шесть порядков. $\sigma_1 / \sigma_2 = 10^6$

Как видно из описания структуры свойств пленки ЛЦУ, она обладает свойствами интересными для практического применения в электронике.

В качестве примера применения пленок ЛЦУ в электронике рассмотрим переход Шоттки Si(n)-Cd. На рисунке 7 представлена вольт-амперная характеристика диода Шоттки.

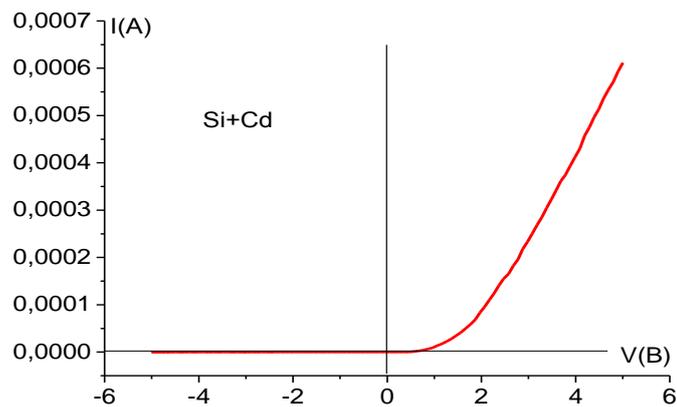


Рисунок 7. Вольт-амперная характеристика перехода Si(n)-Cd

Если систему Si-Cd отжечь на воздухе при 350°C в течение 20 минут, то она превращается в систему Si-CdO, которая проявляет фотоактивность. На рисунке 8 представлена ВАХ фотодиода Шоттки.

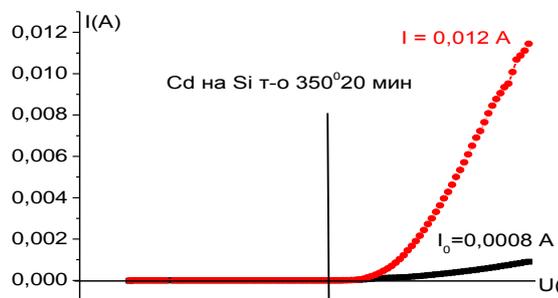


Рисунок 8. Фотоактивность перехода Si-CdO. Кривая темного тока выделена черным цветом, фотоактивная – красным.

Если на переход Si-Cd нанести пленку ЛЦУ и отжечь, то фотоактивность несколько возрастает, о чем свидетельствует ВАХ на рисунке 9.

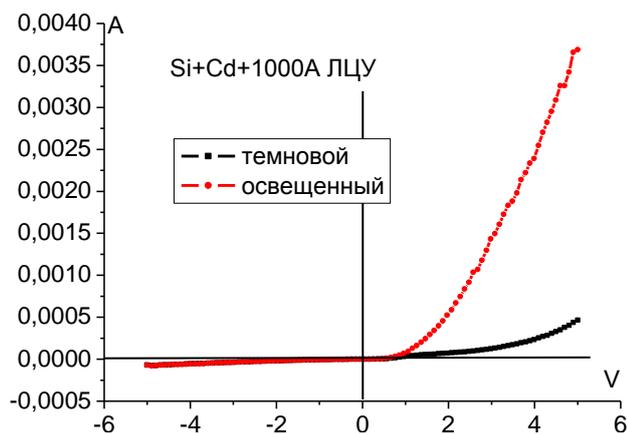


Рисунок 25 – Фотоактивность пленочной системы Si-Cd- ЛЦУ после отжига.

Одновременно возрастает и темновой ток. Использование пленки ЛЦУ, легированной азотом с последующим отжигом при 450°C в атмосфере азота приводит к существенному возрастанию фотоактивности, как показано на рисунке 10.

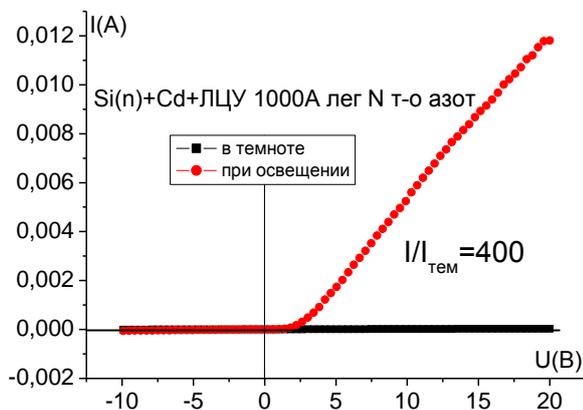


Рисунок 26 – Фотоактивность перехода кремний-Cd-ЛЦУ легированный азотом.

Таким образом, применение легированной азотом углеродной пленки ЛЦУ улучшает чувствительность фотодиода Шоттки.

Литература

- 1 Сладков, А. М. Полисопряженные полимеры / А. М. Сладков. – М. : Наука, 1989. – 120 с.
- 2 Первый высоко-ориентированный линейно-цепочечный углеродный материал / Н. Д. Новиков [и др.] // Тезисы докладов всероссийской конференции «Углерод и его применение». – Санкт-Петербург, 1998. С. 76-78.
- 3 Исследование электронной структуры карбина методом Оже-спектроскопии / В. В. Хвостов [и др.] // Физика твердого тела. – 1985. – т. 7. – № 3. – С. 887-891.
- 4 Экспериментальное подтверждение новой структурной гипотезы карбина / В. В. Коршак [и др.] // Доклады Академии наук СССР. – 1987. – № 2. – С. 393-396.
- 5 Electronic structure of carbynes studied of Auger and electron energy loss spectroscopy Carbon / V.V.Korshak [et al.] // Carbon. – 1987. – v.25. – P. 735-738.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОНИКНОВЕНИЯ ИОНОВ ВНУТРЬ ЗАКРЫТЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

Степанов А.В.
Чебоксары, Чебоксарский политехнический институт (филиал)
МГОУ имени В. С. Черномырдина
for.anton_step@mail.ru

Введение

Проникновение ионов, в массивы углеродных нанотрубок (УНТ) представляет интерес с точки зрения запасаения веществ внутри таких структур и с точки зрения возможной транспортировки ионов в каналах УНТ - каналирования. В процессе моделирования проникновения ионов внутрь углеродных нанотрубок возникает необходимость учитывать реальное строение УНТ и массивов, которые они составляют. Как правило, углеродные нанотрубки полученные путем осаждения из плазмы (PCVD) обладают закрытым крышкой-концом, представляющим собой, в зависимости от хиральности УНТ, нечто среднее между половинкой фуллерена и конусом из 5- и 6-членных колец углерода. При этом как отмечено рядом авторов [1], такие структуры являются наиболее выгодными энергетически, таким образом, их появление вполне обосновано. Однако, при бомбардировке массива УНТ ионами, крышки могут являться препятствием для проникновения частиц внутрь УНТ. Целью данного исследования являлось моделирование инжектирования ионов внутрь однослойных УНТ через их крышки.

Методика

Моделирование проводилось методом молекулярной динамики в программе LAMMPS [2], для моделирования взаимодействия атомов трубки между собой использовался потенциал REBO [3], для взаимодействия ионов и атомов УНТ использовался потенциал ZBL [4]. Потенциал REBO позволяет учесть на основе параметров полученных квантово-механическими методами (*ab initio*) образование и разрушение ковалентных связей УНТ. Потенциал ZBL является отталкивательным потенциалом, представляет собой экранированное кулоновское взаимодействие.

Начальные условия для системы ион-нанотрубка выбирались так, что частица влетала равномерно по сечению трубки с углом 0.5° к оси УНТ со случайной ориентацией по азимутальному углу. Энергии частиц (аргона, неона, гелия) выбирались равными 100, 500 и 1000 эВ, что соответствует переходным энергиям, для которых значительными являются потери на соударениях иона с атомами УНТ. Для моделирования была выбрана УНТ типа «кресло» (10-10), диаметром 1.4 нм, закрытая с обоих концов крышками (Рис. 1). Температура УНТ поддерживалась на уровне 300 К в течение всего времени моделирования с помощью термостата Берендсена [5].

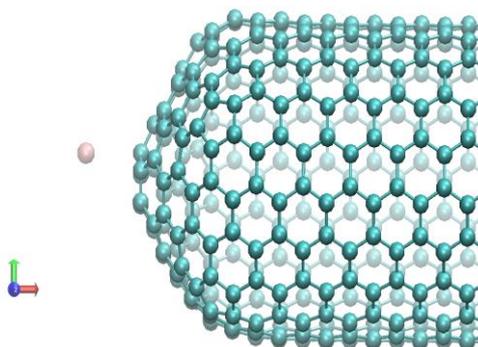


Рис. 1. Торцев УНТ с крышкой и влетающая в него частица

Для иона и углеродной нанотрубки с целью корректировки ошибок счета применялись условия постоянства числа частиц, объема и энергии.

Результаты и их обсуждение

В результате моделирования получены характеристики потока частиц инжестрированных внутрь углеродной нанотрубки. При этом было получено распределение по фракциям ионов: 1) прошедших внутрь и оставшихся в УНТ на время моделирования, 2) вошедших внутрь УНТ, но вышедших через ее боковую стенку, 3) рассеявшихся о крышку УНТ при влете.

Для энергий 100 и 500, 1000 эВ распределения по фракциям частиц различных сортов рассмотрены ниже. Причем следует отметить, что для энергий 500 и 1000 эВ большинство ионов попадают во фракцию 1) (например, для Ar см. Таблицу 1), тогда как для ионов низких энергий (100 эВ) фракция 1) не является преобладающей в большинстве рассмотренных случаев. Для легких ионов, обладающих при малых начальных энергиях, относительно большими скоростями в продольном направлении движения все еще преобладает фракция 1, но ее доля заметно (на 30 %) ниже, чем для ионов того же рода с начальной энергией 1000 эВ. Это свидетельствует о том, что около половины частиц рассеивается на значительный (превышающий критический) угол после влета в УНТ либо на подлете к УНТ, при столкновении с атомами крышки. Для относительно тяжелых ионов (Ar, Ne) большая часть частиц (около 60 %) рассеивается после вхождения в УНТ (фракция 2), а проходит лишь около 30 % всех частиц (фракция 1). Следует отметить, что фракция рассеянных крышкой частиц во всех случаях составляет около 10 %, что связано, прежде всего, с попаданием таких частиц на влете под малым углом к стенке УНТ и последующим «скольжением» ионов вдоль внешней поверхности УНТ.

Таблица 1. . Распределение по фракциям ионов Ar с начальной энергией 1000 эВ.

Фракция	1	2	3
Доля частиц, %	85	5	10

Особо следует отметить наличие различных по характеру потерь энергии частицами, влетающими в УНТ. Так, для легких ионов энергетические потери малы и сосредоточены в области малых энергий. Для относительно тяжелых ионов из рассмотренных, низкоэнергетические ионы Ar (100 эВ) теряют свою энергию почти полностью (Рис. 2), а более высокоэнергетические (500 эВ) являются переходными по потерям энергии и имеют распределение по потерям во всем диапазоне энергий от малых до полной начальной энергии (Рис. 3). Для энергии 1000 эВ потери имеют такой же характер распределения, как и для легких ионов (Рис. 4).

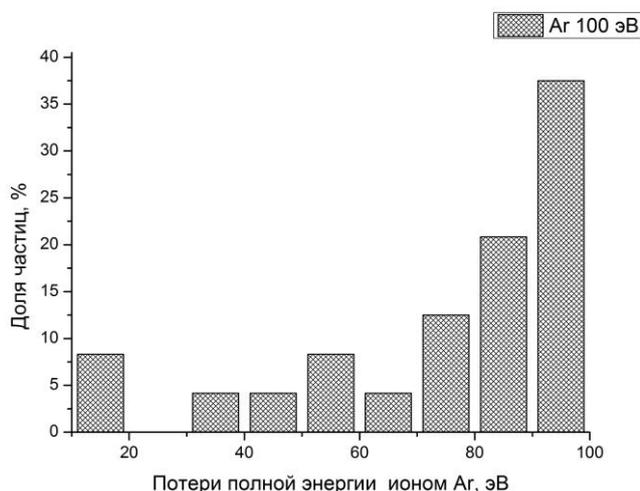


Рис. 2. Потери полной энергии ионом Ar с начальной энергией 100 эВ

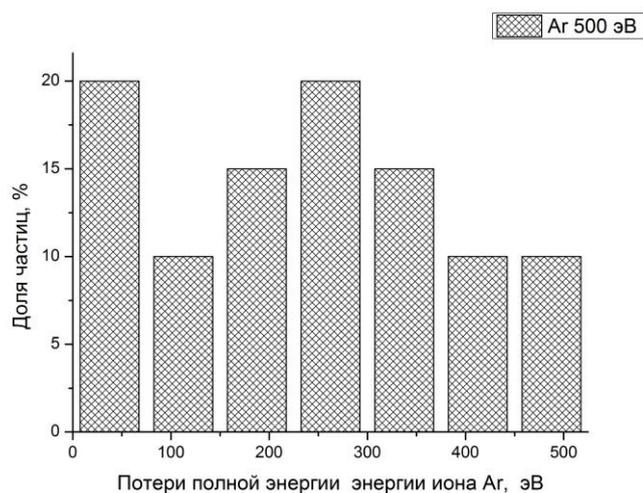


Рис. 3. Потери полной энергии ионом Ar с начальной энергией 500 эВ

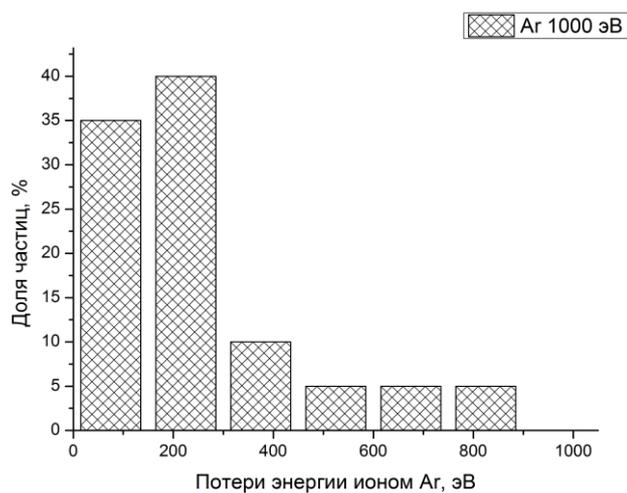


Рис. 4. Потери полной энергии ионом Ar с начальной энергией 1000 эВ

Литература

1. *R. Saito, Gene Dresselhaus, Mildred S. Dresselhaus.* Physical Properties of Carbon Nanotube. Imperial College Press, 1998.
2. *S. Plimpton.* // J Comp Phys. 1995. V. 117. P. 1.
3. A second-generation reactive empirical bondorder (REBO) potential energy expression for hydrocarbons/DonaldW Brenner [и др.]/J. Phys.: Condens. Matter.-2002.- Vol. 14.- P. 783–802
4. *Ziegler, J.F.* The Stopping and Range of Ions in Matter / J.F. Ziegler, J.P. Biersack, U. Littmark.- New York : Pergamon, 1985.
5. *Berendsen, Postma, van Gunsteren, DiNola, Haak,*// J Chem Phys, 81, 3684 (1984)

СЕРЕБРОСОДЕРЖАЩИЕ УГЛЕРОДНЫЕ ПЛЕНКИ КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Гималдинов Д.В.¹, Смирнов А.В.², Васильев А.И.²

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ)

²Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова

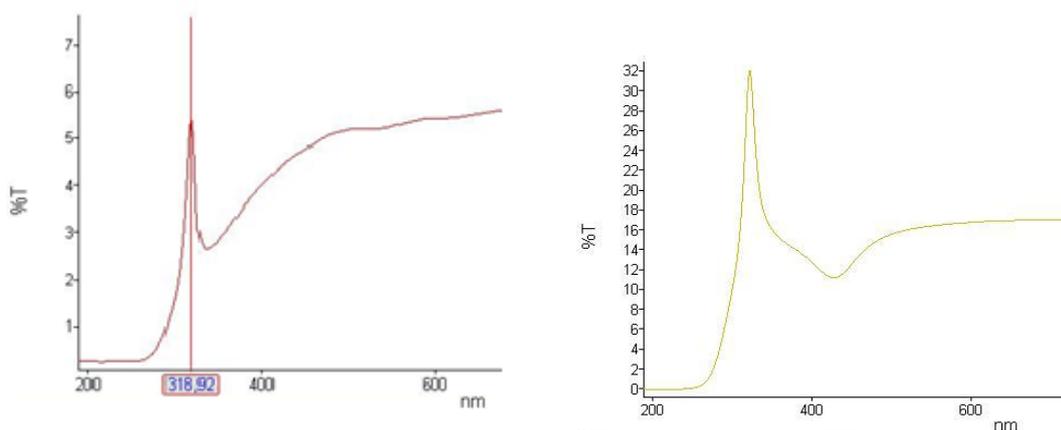
Плазмонные резонансные эффекты на кластерах благородных металлов в последнее рассматриваются как эффективный метод для повышения КПД фотодиодов и тонкопленочных фотоэлементов, механизм для увеличения захвата света в видимой и ближней ИК-области. В настоящее время ведется активный поиск наноматериалов с подобными эффектами и рассматриваются различные пути интеграции в реальные фотовольтаические системы (фотодиоды и солнечные фотоэлементы). Имеются работы [1,2], в которых экспериментально рассматривается формирование кластеров Au и Ag на прозрачном проводящем контакте (TCO) a-Si:H p-i-n структурах и в качестве обратного контакта тандемных фотоэлементов.

Ранее отработан процесс внедрения металлов в пленку линейно-цепочечного углерода (ЛЦУ) в состоянии Sp¹ (термическое интеркалирование без образования химической связи) [3]. Стоит отметить, что по общепринятому мнению прямого взаимодействия металлов (к примеру, Ag и Cd) с углеродом химической реакции не происходит. Однако, подавляющее количество подобного рода исследований относится к углероду в состоянии sp² (графит). Имеется принципиальная возможность внедрения атомов металлов в пленку ЛЦУ с реакцией присоединения путем разрыва π-связи.

Модификация кластеров Ag за счет их внедрения в пленку ЛЦУ и алмазоподобную пленку ta-C даст возможность отработать технологию, при которой возможно варьировать параметры поверхностного и объемного плазмонного резонансов. В этом свете имеет большой научный и практический интерес представляет получение фоточувствительных элементов кремниево - углеродной электроники за счет формирования гетероперехода металлоуглерод - полупроводник и как независимая задача создание плазмонных наноустройств.

На монокристаллический кремний, в виде пластин толщиной 0,8 мм с удельным электрическим сопротивлением 10-100 Ом*см и стеклянные подложки размером 10*10 см. На вакуумной установке с предельным вакуумом 10⁻⁴ Па, содержащей, систему очистки ионами аргона, на подложки кремния и покровного стекла были нанесены пленки Ag различной толщины, затем поверхность металлов покрывалась слоем линейно-цепочечного углерода толщиной 100-200нм. Углерод в sp¹ состоянии синтезируется в виде одномерных поликумуленовых цепей [4], расположенных перпендикулярно подложке. Далее образцы отжигались на воздухе или в атмосфере азота в вакуумной печи марки МИМП-ВМ при температурах 450⁰-550⁰С. Измерение вольтамперных характеристик проводилось на приборе KEITHLEY Source Meter 2400.

Также были исследованы пленки Ag с алмазоподобным углеродом ta-C. Выбраны образцы с проявлением поверхностного и объемного резонанса. На рисунке 1 представлены спектры пропускания системы Ag+ta-C при разной толщине углеродной пленки.



(а) Ag+ta-C2000

(б) Ag+ta-C500

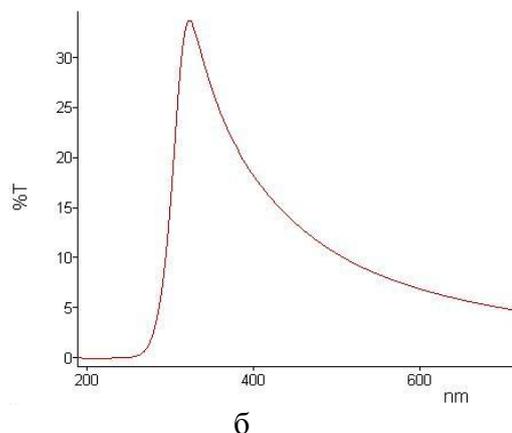
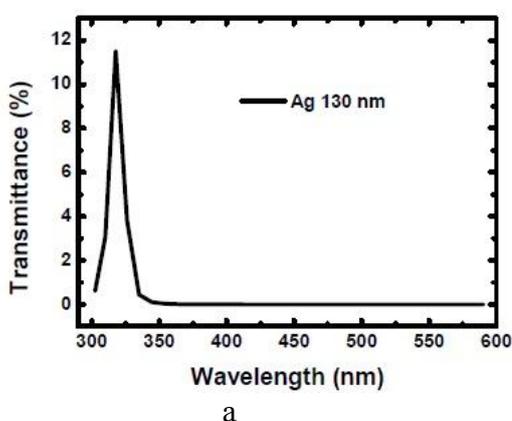
Рисунок 1. Спектры пропускания Ag+ta-C после отжига в азоте:
 (а) температура 550 °С время 20 мин, (б) температура 550 °С 20 мин

Положение плазмонных резонансов (PR1 и PR2), ширина на полувысоте плазмонной полосы (FWHM) отражены в таблице 1.

Таблица 1. Основные характеристики плазмонов Ag+ta-C при изменении технологических условий.

Образец	PR1 на длине волны, нм	PR2 на длине волны, нм	Время и температура термообработки	FWHM, нм
Ag+ta-C500	318,92нм	327,14нм	азот 450 °С 10мин	33нм (PR2)
Ag+ta-C2000	329,54нм	436,33нм	азот 550 °С 20 мин	40нм (PR2)
Ag+ta-C2000	319,68нм	–	азот 450 °С 10мин	13 нм(PR1)

Можно отметить, что образец Ag+ta-C2000 имеет характерный узкий пик полушириной 13нм. Анализ полученных нами ранее спектров пропускания серебряносодержащих углеродных пленочных систем дает основание утверждать, что характеристики по полуширине пропускания и по отношению сигнал/фон у металлоуглеродных пленок лучше (рис.2).



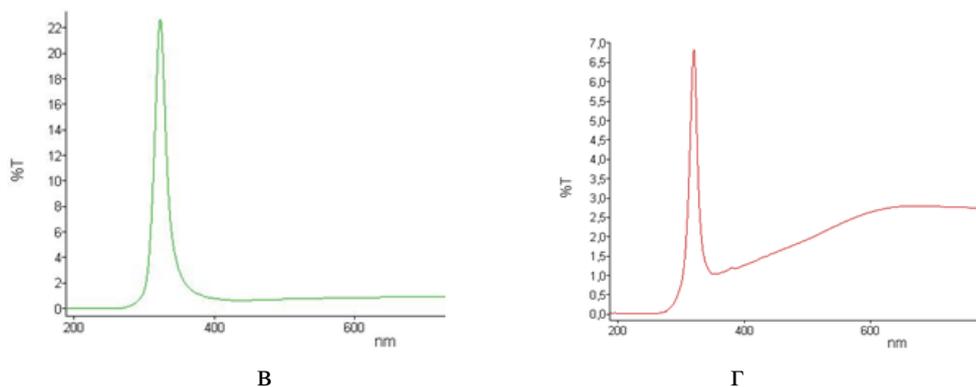


Рисунок 2. Спектры пропускания пленок Ag (а) [5], полупрозрачной Ag (б), Ag-ЛЦУ2000 (в), системы Ag-taC (г) после термообработки

Коэффициент пропускания полученных нами пленок на длине волны детектирования выше в 2-2,5 раза, а чувствительность детектирования прямо пропорционально длине волны детектирования и дается выражением [5]:

$$R = T\mu_{int} \left(e \frac{\lambda}{hc} \right) [1 - e^{-\alpha_{si}t}] \quad (1)$$

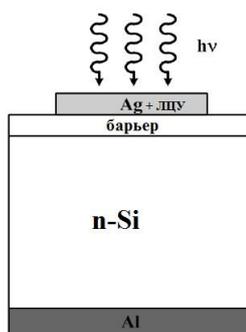


Рисунок 3. Схема ультрафиолетового сенсора на основе МДП-структуры

В перспективе можно ожидать практическую значимость улучшения параметров УФ-детекторов без потери селективности излучения заданной энергии на основе уже имеющихся МДП-структур за счет внедрения атомов серебра в углеродные пленки (ЛЦУ, ta-C). В качестве барьера использовался естественный термический оксид SiO₂ толщиной примерно 7 нм.

На рисунке 4 показан характерный спектр чувствительности для данного типа УФ-фотодетекторов.

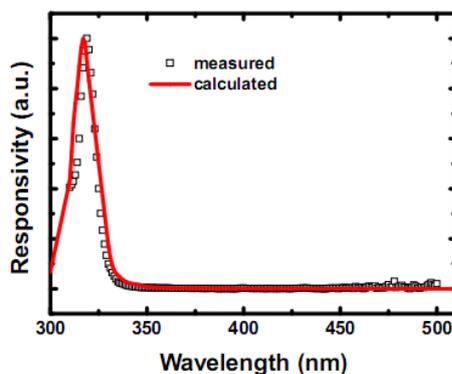


Рисунок 4. Зависимость чувствительности фотодетектора в абсолютных единицах по длинам волн

На рисунке 5 показана вольтамперная характеристика образца, изготовленного по схеме (рисунок 4) при освещении кварцевым ультрафиолетовой бактерицидной лампой ДКБ-9 со спектром излучения 205-400 нм.

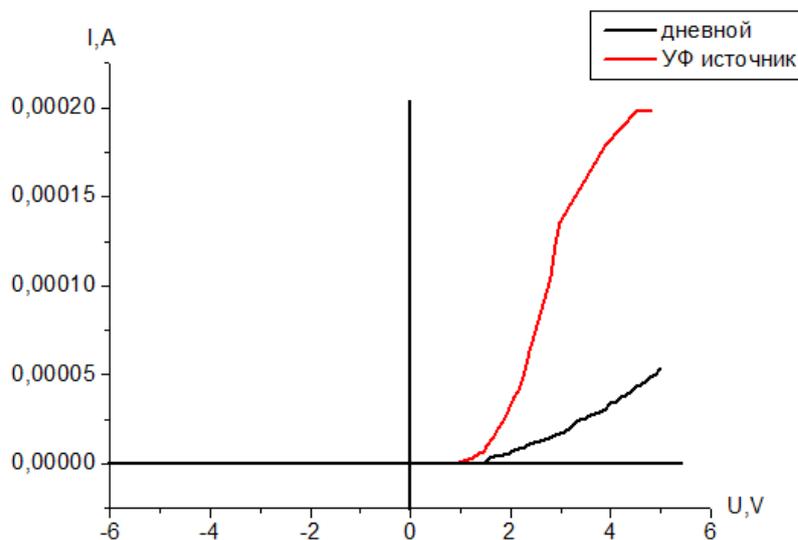


Рисунок 5. Вольтамперная характеристика образца n-Si/ SiO₂ /Ag+ЛЦУ1000 т-о 4500С 20мин (T_{max} на длине волны плазмонного резонанса для чистой пленки серебра составило 72,3%)

Изучение технологических условий регулирования положений данных нелинейных оптических эффектов и применение их в фотодетектировании и фотоэнергетике является актуальной прикладной задачей, в частности, при создании селективных высокочувствительных УФ-сенсоров, широко использующихся в системах мониторинга метеопараметров солнечных электростанций для постоянного контроля за УФ-индексом.

Литература

1. F. Lükermann, U. Heinzmann, H. Stiebig, Plasmon enhanced resonant defect absorption in thin a-Si:H n-i-p devices, Appl. Phys. Lett. 100 (25) (2012) 253907.
2. V. E. Ferry, M. A. Verschuuren, H. B. T. Li, E. Verhagen, R. J. Walters, R. E. I. Schropp, H. A. Atwater, A. Polman, Light trapping in ultrathin plasmonic solar cells, Opt. Express 18 (102) (2010) A237–A245.
3. Кочаков В.Д., Новиков Н.Д., Яблоков М.Ю., Ерёмкин А.В., Васильев А.И. Способ модификации металлами пленок углерода в sp¹ состоянии. // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2009. с. 11.
4. Гусева, М.Б. Первый высоко-ориентированный линейно-цепочечный углеродный материал/ М. Б. Гусева, В.Г. Бабаев, В. М. Бабина, Н.Д.Новиков Н.Д., В. В. Хвостов // Тезисы докладов. –Санкт-Петербург. – 1998.
5. Y. Ishikawa, K. Wada, D. D. Cannon, J. Liu, H. C. Luan, and L. C.Kimerling, “Strain-induced band gap shrinkage in Ge grown on Si substrate,” Appl. Phys. Lett., vol. 82, no. 13, pp. 2044-2046, Mar. 2003.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВОЛЬТАМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО БАРЬЕРА ШОТТКИ НА ОСНОВЕ ТОНКОПЛЕНОЧНОЙ СТРУКТУРЫ n-Si/Ag, ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО МЕТАЛЛОУГЛЕРОДНОГО МАТЕРИАЛА И ПРОМЫШЛЕННОГО ФОТОРЕЗИСТОРА

Егоров А.А.
Чебоксары, МБОУ Лицей №2
anton9696@inbox.ru

Введение

Явлением фотопроводимости называется увеличение электропроводности полупроводника под воздействием электромагнитного излучения.

При освещении полупроводника в нем происходит генерация электронно-дырочных пар за счет перебросов электронов из валентной зоны в зону проводимости. Вследствие этого проводимость полупроводника возрастает на величину:

$$\Delta\sigma = e (\mu_n \Delta n_i + \mu_p \Delta p_i) \quad (1)$$

где e – заряд электрона; μ_n – подвижность электронов; μ_p – подвижность дырок; Δn_i – концентрация генерируемых электронов; Δp_i – концентрация генерируемых дырок.

Существует ряд фотоустройств, работа которых основана на эффекте фотопроводимости. Эти устройства можно разделить на 3 вида: устройства для регистрации света, устройства для преобразования света, светоизлучающие устройства. К наиболее распространенным и применяемым фотоприборам относятся фоторезистор, фотодиод, фототранзистор и др.

Следует отметить, что переход к тонкопленочным технологиям в производстве, к примеру, фотодиодов и фоторезисторов позволили улучшить их физические характеристики, уменьшить габариты и вес.

Методика напыления металлов

Тонкопленочные структуры Ag получали на подложках из стекла и кремния n-типа проводимости методом термического испарения и конденсации в вакууме при остаточном давлении воздуха 2×10^{-3} Па, на вакуумной установке УВР-3М. Далее на поверхность пленки Ag ионно-плазменным способом в импульсном режиме с ионной стимуляцией синтезировалась пленка линейно-цепочечного углерода толщиной 200 нм. Затем образцы подвергались термической обработке - отжигу в печи марки ВИМП-ВМ в течении 10 минут при температуре 450 градусов Цельсия в атмосфере азота для предотвращения образования на поверхности пленочной системы окисного слоя.

В настоящей работе был применен металлоуглеродный материал, основанный на линейно-цепочечном sp^1 -углероде (ЛЦУ). В первых экспериментах монокристаллические линейно-цепочечные углеродные пленки были получены методом ионно-стимулированной конденсации углерода в вакууме.

Методика напыления углеродных плёнок

В межвузовской лаборатории (ЧГУ-МГУ) высоких технологий, на базе которой выполнялась работа, напыление пленок линейно-цепочечного углерода производилось на модернизированной вакуумной установке, которая состоит из вакуумной камеры с

откачкой диффузионным насосом (2500 л/сек), блока управления вакуумной системой и блока управления углеродным испарителем. Вакуумная камера имеет объем 0,1 м³ и изготовлена из нержавеющей стали.

Таблица 1. Паспортные данные для промышленного фоторезистора ФСД-Г1.

Тип ФР	Uраб, В	Rт, ом.	Iт, мкА	Iсв, мкА	dI=Iсв-Iт, мкА	Rт/Rсв	Удельная чувств., мкА/лм-В	Интегральная чувствительн., а/лм	Мощность рассеяния, Вт
ФСД-Г1	20	20*10 ⁶	1	2000	2000	2000	40000	-	0,05

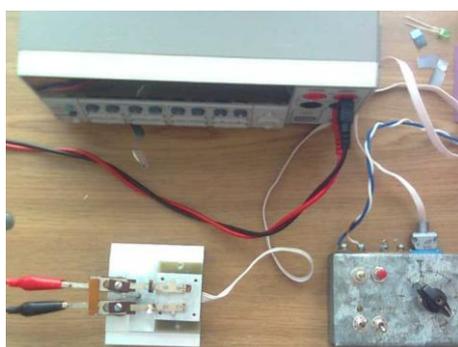


Рисунок 1. Мультиметр цифровой KEITHLEY, измерительная установка, электронагреватель.

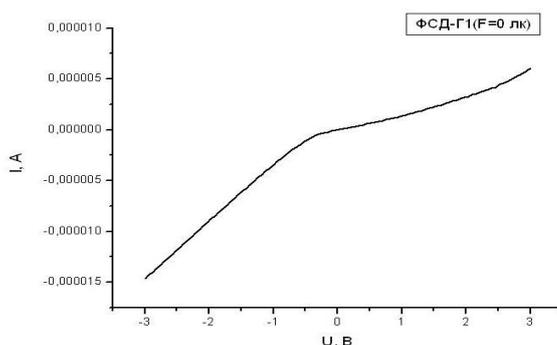


Рисунок 2. Вольтамперная характеристика для промышленного фоторезистора ФСД-Г1(темновой режим).

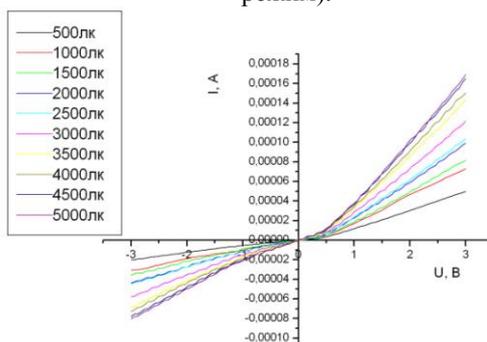


Рисунок 3. ВАХ для ФСД-Г1 при разных уровнях освещённости.



Рисунок 4. Прибор для измерения люксамперной характеристики (люксметр)

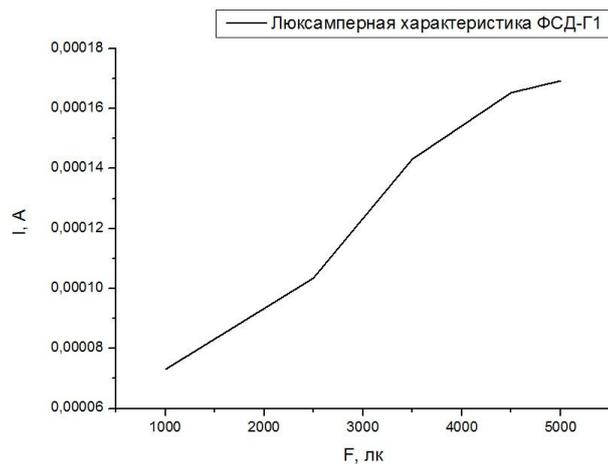


Рисунок 5. Люксамперная характеристика для ФСД-Г1.

Измерения ВАХ n-Si/Ag

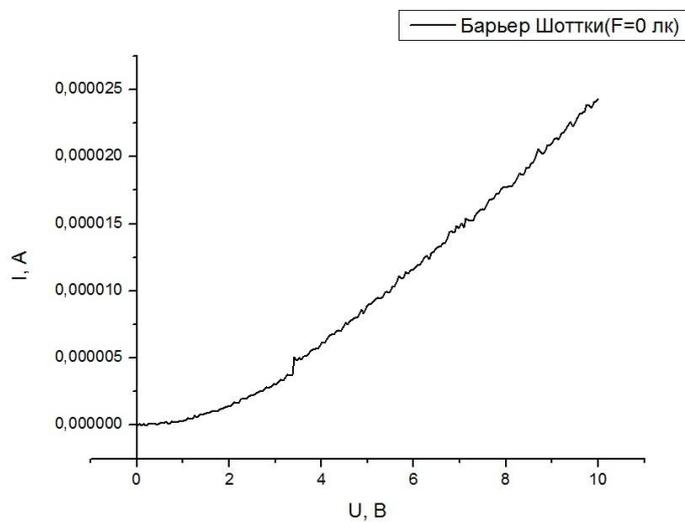


Рисунок 6. Вольтамперная характеристика для фоточувствительного барьера Шоттки n-Si/Ag в тёмновом режиме.

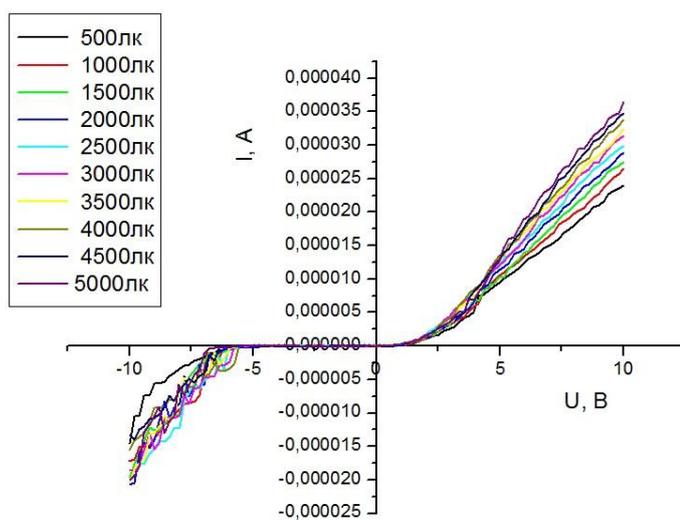


Рисунок 7. ВАХ для барьера Шоттки n-Si/Ag при разных уровнях освещённости.

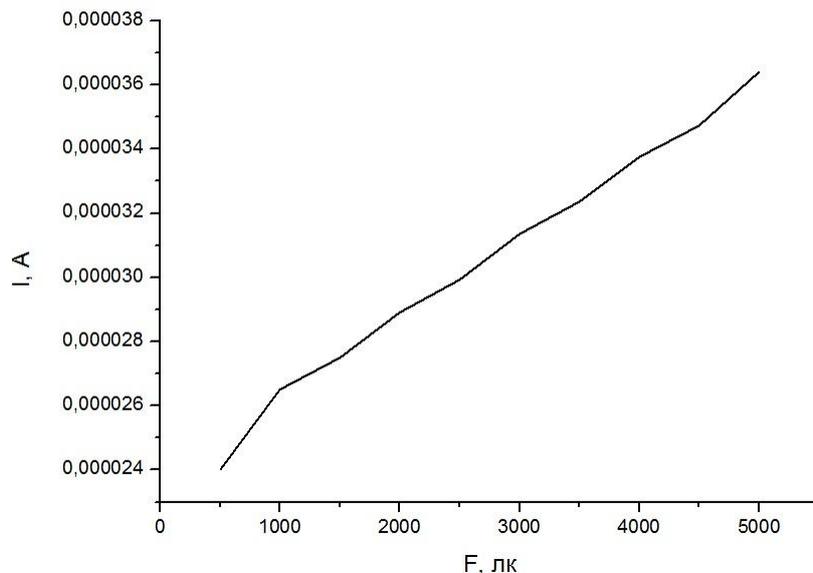


Рисунок 8. Люксамперная характеристика для n-Si/Ag.

Измерения по n-Si/Ag+ЛЦУ

Из рис. 9 видно, что при освещенности 5000 лк сопротивление перехода при напряжении 20 вольт уменьшилось в $\sim 10^2$ раз при темновом токе 0,20 мА, при увеличении прикладываемого напряжения коэффициент фотототклика возрастает. Легирование пленки ЛЦУ азотом привело к возрастанию фоточувствительности на порядок.

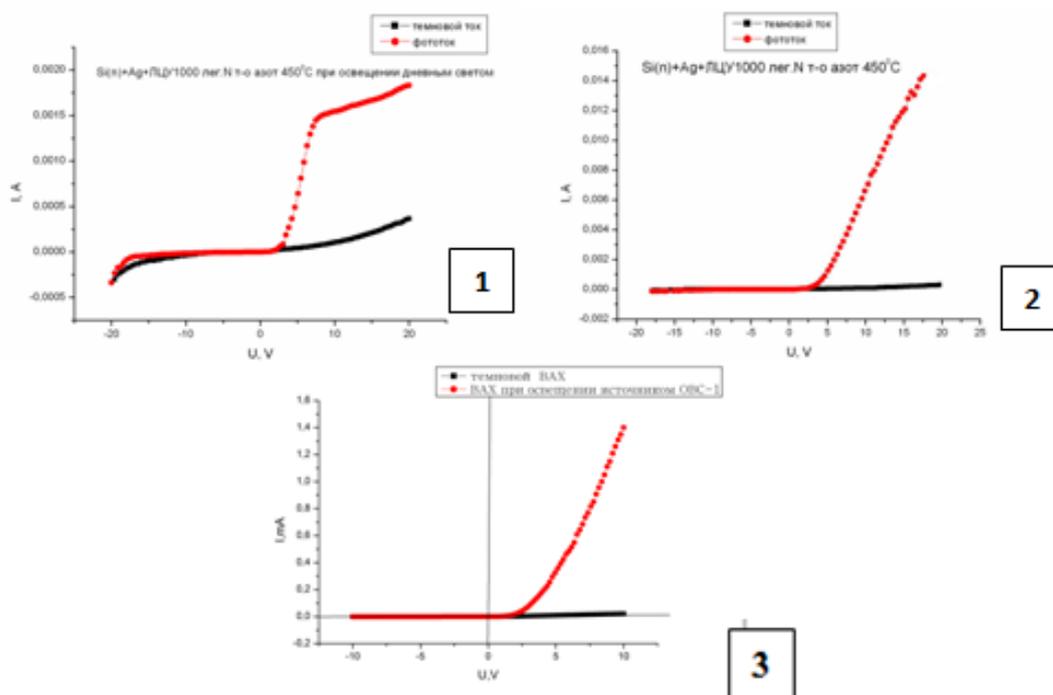


Рисунок 9. Вольтамперная характеристика образца Ag-ЛЦУ / Si(n) при дневном освещении (200 люкс) – 1,

Ag-ЛЦУ / Si(n) при освещении источником ОВС-1 (5000 люкс) – 2,
Ag-ЛЦУ (N) / Si(n) при освещении источником ОВС-1 (5000 люкс) – 3

Сравнение

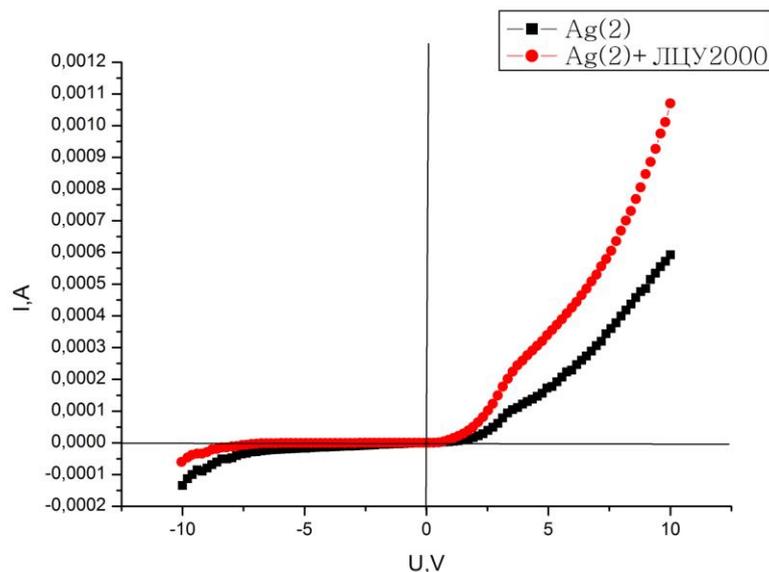


Рисунок 10. График сравнительной вольтамперной характеристики n-Si/Ag и n-Si/Ag+ЛЦУ в темновом режиме

Измерения показали, что n-Si/Ag+ЛЦУ больше проводит ток, следовательно у него лучше отношение фототока к темновому току. Контакт металлуглерод-кремний (n-Si/Ag-ЛЦУ) может быть использован при создании фоточувствительных устройств (фоторезистор, фотодиод и т.д.). Он обладает хорошими выпрямляющими характеристиками и показали фотоактивные свойства. При этом, по сравнению, по сравнению с исследуемым образцом промышленного фоторезистора, показавший с течением времени деградацию электрофизических свойств, заявленных в техническом паспорте, для синтезируемого нами материал этого отрицательного качества не обнаружено и требует дополнительного исследования, что можно считать перспективой для дальнейшей экспериментальной работы.

Литература

1. Гершунский Б. С. Основы электроники и микроэлектроники. - К.: Вища школа. 1989. - 423 с.
2. Опадчий Ю.Ф. и др. Аналоговая и цифровая электроника: Учебник для вузов / Ю.Ф.Опадчий, О.П.Глудкин, А.И.Гуров; Под.ред. О.П.Глудкина. М.: Горячая Линия – Телеком, 2002. – 768 с.
3. Кочаков В.Д., Новиков Н.Д. Способ получения углеродного наноматериала, содержащего металл. Патент на изобретение RU 2360036 22.10.2007
4. Васильев А.И., Кочаков В.Д. Влияние отжига на физические свойства металлуглеродных пленок. Вестник Чувашского университета. 2011. № 3. С. 189-192.
5. Кочаков В.Д., Новиков Н.Д. Интеркалирование серебра в пленку линейно-цепочечногоуглерода Вестник Чувашского университета. 2007. № 2. С. 20-25.

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОПЛЕНОК ЛИНЕЙНО-ЦЕПОЧЕЧНОГО УГЛЕРОДА

Абруков С.В.
Чебоксары, Чувашский государственный университет
имени И.Н. Ульянова

В работе представлены результаты применения искусственных нейронных сетей (ИНС), для создания вычислительных моделей вольтамперных характеристик наноплёнок линейно-цепочечного углерода (ЛЦУ) с внедрёнными в них атомами металлов и неметаллов (ЛЦУ АМН). Впервые ЛЦУ АМН были получены в Чувашском государственном университете [1-8] с использованием ряда ноу-хау. ЛЦУ АМН могут представлять большой интерес для активных и пассивных элементов твердотельной электроники, элементов солнечных батарей, сенсоров, медицинских приложений и т.д.

ИНС являются единственным инструментом аппроксимации экспериментальных функций нескольких переменных.

Вычислительные ИНС - модели позволяют на основе обобщения экспериментальных данных вычислять вольтамперные характеристики ЛЦУ АМН в зависимости от количества видов атомов (один или два вида) внедрённых в ЛЦУ, вида атомов (номер и группа атомов в соответствии с периодической таблицей Менделеева) и толщины ЛЦУ АМН, а также прогнозировать вольтамперную характеристику новых видов ЛЦУ АМН. Они способны также решать обратную задачу: определять количество видов атомов, виды атомов и толщину ЛЦУ АМН, которые обеспечивают требуемое значение тока при заданном напряжении.

Рассмотрим схему создания моделей на примере модели «Вольтамперная характеристика ЛЦУ АМН».

Сначала экспериментальные данные по вольтамперным характеристикам различных ЛЦУ АМН взятые из [1-8] были представлены в виде базы данных. Пример представлен в таблице 1.

Таблица 1. Пример данных, использованных для создания модели «Вольтамперная характеристика ЛЦУ АМН»

Номер элемента 1 внедренно го в ЛЦУ АМН	Группа элемен та 1	Номер элемента 2 внедренно го в ЛЦУ АМН	Групп а элемен та 2	Толщин а пленки внедрен ного в ЛЦУ АМН, нм	Напря жение, В	Сила тока, мкА
14	4	48	2	1000	-3,0	-26
14	4	48	2	1000	-2,5	-24
...
14	4	48	2	1000	2,9	15 0
48	2	52	6	1000	-3,0	-8
48	2	52	6	1000	-2,9	-5
48	2	52	6	1000	-2,6	-

							3,5
...
48	2	52	6	1000	2,9		5,7
14	4	81	3	2000	-30		-50942
14	4	81	3	2000	-28,8		-36869
14	4	81	3	2000	-15,4		-3721
14	4	81	3	2000	-12,4		-2144
...

Затем была выбрана соответствующая собранной базе данных архитектура ИНС и проведено ее обучение.

Обучение заключалось в том, что различные наборы значений первых шести столбцов табл. 1 подавались на входной слой ИНС, а соответствующие значения тока устанавливались в выходном слое ИНС и с помощью известного метода обучения ИНС – метода «обратного распространения ошибки» создавалась вычислительная ИНС-модель вольтамперной характеристики.

Эта модель представляет собой модель типа «чёрного ящика». Полученный «чёрный ящик» может использоваться для определения (прогнозирования) вольтамперной характеристики ЛЦУ для различных комбинаций, внедренных в ЛЦУ атомов без проведения экспериментов следующим образом. Номера и группы атомов (в соответствии с периодической таблицей элементов Менделеева), толщина пленки ЛЦУ и одно интересующее значение напряжения устанавливаются во входном слое ИНС. После этого «черный ящик» мгновенно вычисляет соответствующее этому набору данных значение тока, а также (!) непосредственно всю вольтамперную характеристику.

Примеры представлены на рис. 1, 2.

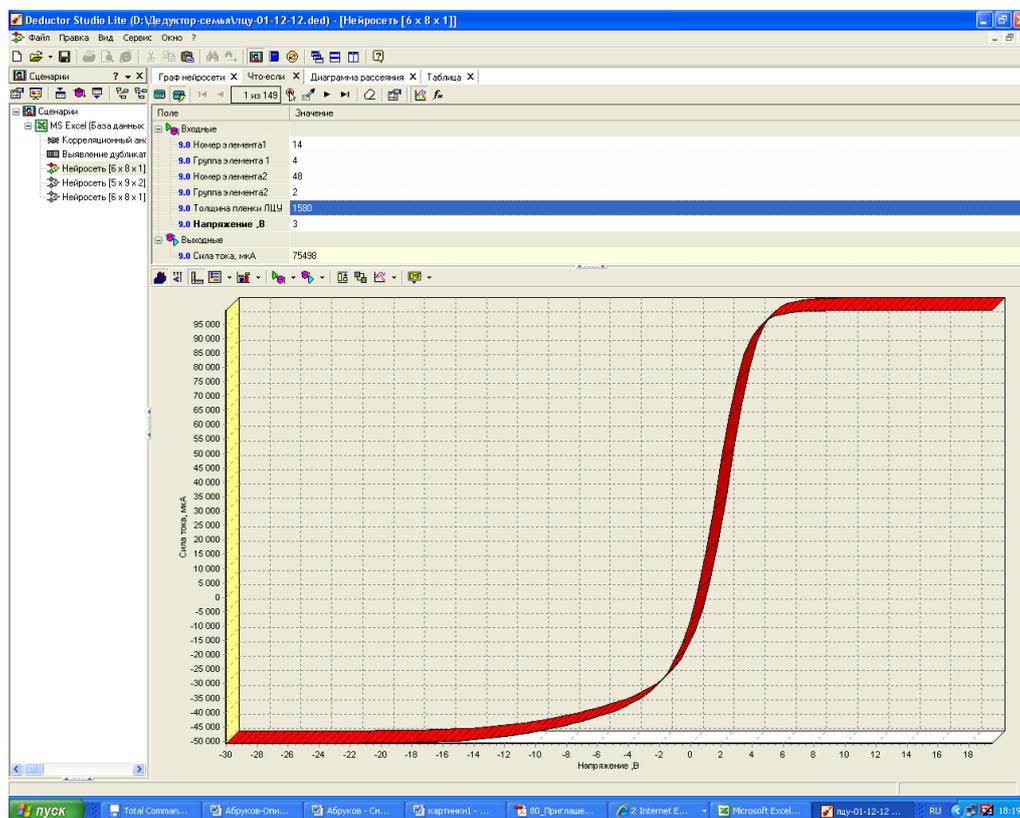


Рис. 1. Аппроксимация вольтамперной характеристики ЛЦУ АМН с внедренными атомами кремния и кадмия (толщина 1580 ангстрем).

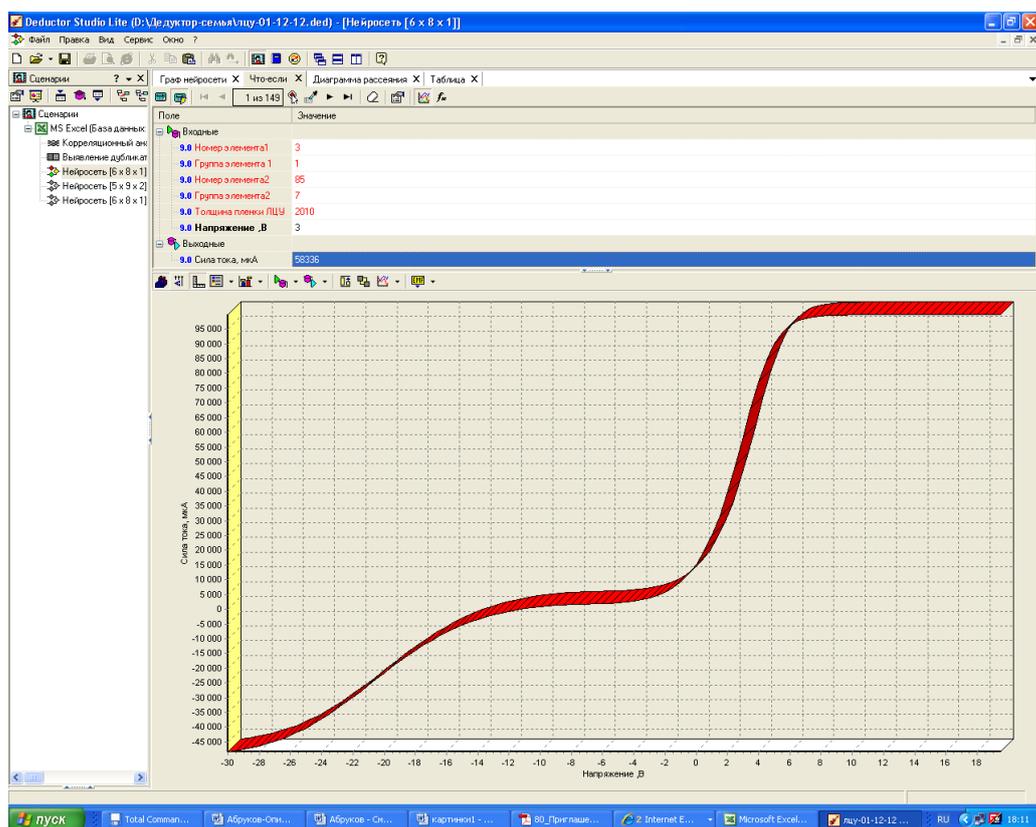


Рис. 2. Прогнозирование вольтамперной характеристики ЛЦУ АМН в случае внедрения в ЛЦУ атомов лития и астата (толщина 2010 ангстрем).

Здесь важно отметить следующее. Если рис. 1 отражает способности ИНС – модели аппроксимировать вольтамперную характеристику в пределах обучающей выборки при изменении толщины пленки (в экспериментах пленки с толщиной 1580 ангстрем не исследовались), то рис. 2 отражает способность ИНС – модели прогнозировать вольтамперную характеристику для случая гипотетического внедрения в пленку атомов лития и астата (эти эксперименты реально не проводились, так как это пока трудно выполнимо технически).

Работу по моделированию электрофизических характеристик ЛЦУ при различных комбинациях атомов элементов периодической таблицы Менделеева внедряемых в ЛЦУ планируется продолжить. Цель ее – создание базы знаний характеристик пленок ЛЦУ, позволяющей определять перспективные с точки зрения твердотельной электроники, солнечной энергетики и различного типа сенсоров направления исследований.

Выводы

В целом анализ полученных результатов показывает следующее:

1. Полученные ИНС-модели «правильно» определяют вольтамперную характеристику ЛЦУ АМН и является хорошим инструментом аппроксимации многомерных экспериментальных функций, и хорошим средством обобщения и прогнозирования связей между переменными.
2. Полученные ИНС-модели мгновенно вычисляют значения необходимых характеристик и представляет собой специализированный инженерный калькулятор характеристик ЛЦУ АМН, который является самым недорогим способом получения «новых» экспериментальных данных без непосредственного проведения эксперимента.
3. Совокупность полученных ИНС-моделей в будущем будет представлять собой базу знаний ЛЦУ АМН.

Литература

2. Белова А.Г., Краснова А.Г., Кокшина А.В., Кочаков В.Д. Особенности взаимодействия углерода в состоянии sp^1 с некарбидообразующими металлами. Вестник Чувашского университета. 2012. № 3. С. 41-43.
3. Васильев А.И., Кочаков В.Д. Влияние отжига на физические свойства металлоуглеродных пленок. Вестник Чувашского университета. 2011. № 3. С. 189-192.
4. Кочаков В.Д., Новиков Н.Д. Интеркалирование серебра в пленку линейно-цепочечного углерода Вестник Чувашского университета. 2007. № 2. С. 20-25.
5. Кочаков В.Д., Новиков Н.Д. Углеродная электроника. Вестник Чувашского университета. 2007. № 2. С. 25-28.
6. Кочаков В.Д., Новиков Н.Д. Способ получения углеродного наноматериала, содержащего металл. Патент на изобретение RUS 2360036 22.10.2007.
7. Кочаков В.Д., Новиков Н.Д., Васильев А.И., Смирнов А.В. Элементы электроники на основе пленок линейно-цепочечного углерода. Вестник Чувашского университета. 2011. № 3. С. 194-197.
8. Кокшина А.В., Белова А.В., Краснова А.Г., Кочаков В.Д. Особенности взаимодействия пленок селена с углеродом в состоянии sp^1 . Вестник Чувашского университета. 2012. № 3. С. 44-46.
9. Краснова А.Г., Кокшина А.В., Белова А.В., Кочаков В.Д. Исследование взаимодействия $pbse$ с углеродом в состоянии sp^1 . Вестник Чувашского университета. 2012. № 3. С. 46-47.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕОДНОРОДНОГО ПОТОКА ЧАСТИЦ В УГЛЕРОДНОЙ НАНОТРУБКЕ

Михайлов А. Н.¹, Лысова И. В.²
Чебоксары, Чувашский государственный педагогический
университет им. И. Я. Яковлева
¹michailov88@mail.ru, ²arina@mail.ru

В настоящий момент синтез углеродных нанотрубок (УНТ) и специальных химических соединений (нафион) и веществ (водород) рассматриваются как будущие топливные элементы с уникальными характеристиками высокоэффективности и энергоёмкости. И сейчас можно видеть огромное количество работ в деталях начинающих изучать механизм взаимодействия частиц с УНТ [1].

Одним из важных направлений во взаимодействии частиц становится изучение их поведения внутри углеродной нанотрубки. Особенно, данное взаимодействие во многих деталях описано для молекул воды[2]. В нашей работе мы рассмотрели некоторые характеристики энергий, одних из распространенных в данном роде исследовании молекул, основные из которых аргон, азот, кислород, угарный газ и углекислый газ. С использованием молекулярной динамики был изучен процесс каналирования в УНТ для неоднородного потока. И определены энергетические параметры в течении всего процесса каналирования рис 1.

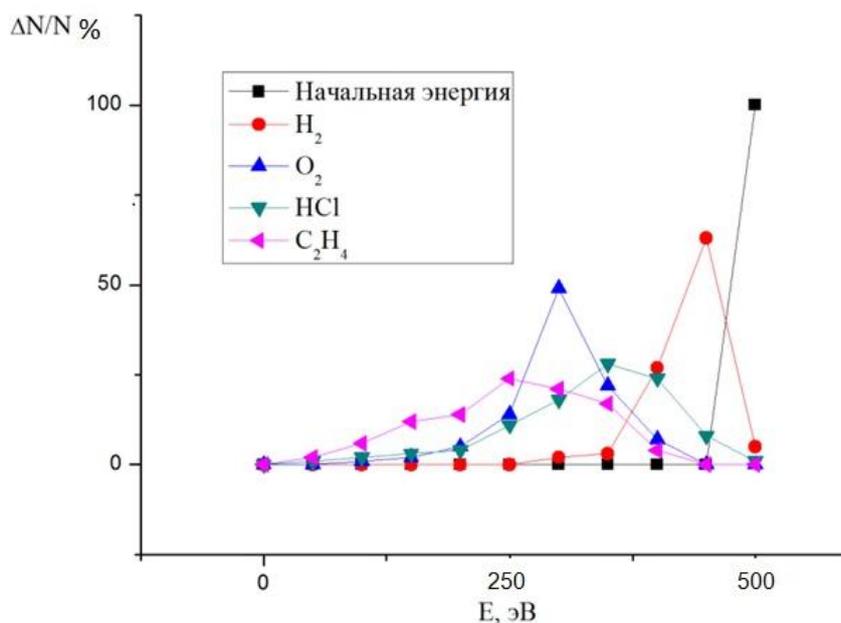


Рис 1. Распределение по потерям энергии частиц, прошедших УНТ (10,10) длиной 200 нм с начальной энергией 500 эВ

Мы проводили расчеты с использованием молекулярной динамики в пакете LAMMPS¹. На первоначальном этапе углеродные нанотрубки моделировались с использованием потенциала Терсоффа-Бреннера. Взаимодействие между атомами УНТ и атомами отдельных молекул моделировалось с использованием потенциала Леннарда-Джонса. На данный момент для расчетов используется потенциал reaxFF² учитывающий более широкий спектр взаимодействий.

Литература

1. Вахрушев А.В., Липанов А.М., Суетин М.В. Моделирование процессов аккумуляции водорода и углеводородов наноструктурами. Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2008. 120 с.
2. Sridhar Kumar Kannam, B. D. Todd, J. S. Hansen, and Peter J. Davis, J. Chemical Physics 138 (2013) 094701.

ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ КАРБИНА С ПОМОЩЬЮ КЛАССИЧЕСКИХ И КВАНТОВО-ХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

Михайлов Ф. Н.

Чебоксары, Чувашский государственный
педагогический университет им. И.Я. Яковлева,
fedormihailov@yandex.ru

Одной из задач нанотехнологий, имеющей большое прикладное значение, является создание покрытий, состоящих из упорядоченных цепочек линейно-

¹ <http://lammps.sandia.gov>

² <http://www.engr.psu.edu/adri/ReaxffManual.aspx>

цепочечного углерода (ЛЦУ). Планируется широкое применение таких покрытий во многих сферах деятельности и в перспективных устройствах, например, в высокоэффективных холодных катодах с очень низкой работой выхода – до 0.5 эВ [1,2].

В работе исследуются две модели карбина: углеродная и углерод – водородная.



Рис. 1. Слева углеродная, справа углерод – водородная модели карбина

Показано что добавление буферного газ в модель меняет картину формирования ЛЦУ в “зародыше”.



Рис. 2. Слева структура с буферным газом, справа без буферного газа

Также изучается стабильность углеродной и углерод – водородной моделей на примере потенциалов межмолекулярного взаимодействия *Airebo* и *ReaxFF*.

С помощью полуэмпирического квантово – химического метода *PM6* установлено оптимальное межцепочечное расстояние.

Литература:

1. Ю.Е. Праздников, А.Д. Божко, М.Б. Гусева, Н.Д. Новиков // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 2004. Вып. 5, С. 40.
2. Yu.E. Prazdnikov, A.D. Bozhko, N.D. Novikov. // Journal of Russian Laser Research, V. 26, No. 1, 2005, P. 61.

НАПРАВЛЕНИЕ

«Технологии тонких пленок аморфного гидрогенизированного кремния (в том числе, уменьшение размеров солнечных элементов и расходов на их производство, увеличение эффективности СЭ, поверхностные эффекты - квантовые точки Si, внедрение концепции плазмоники для увеличения коэффициента поглощения)»

МЕТОДЫ ОЦЕНИВАНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СОЛНЕЧНЫХ МОДУЛЕЙ

Богомолова С.А.^{1,2}

¹Чебоксары, ФГБОУ ВПО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»;

²Москва, ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы»
s_bogomolova@mail.ru

Активное развитие фотоэлектрической отрасли энергетики в России требует разработки единых методов и подходов к оценке качества фотоэлектрических модулей, к определению допустимых значений показателей точности измерений. При производстве солнечных модулей большое внимание уделяется оценке выходных нормируемых фотоэлектрических параметров (ВНФП), которые характеризуют эффективность преобразования энергии солнечного излучения в электроэнергию. К ВНФП относятся: ток короткого замыкания (I_{sc}), напряжение холостого хода (U_{oc}), максимальная (номинальная) мощность (P_{mpp}), напряжение (U_{mpp}) и ток (I_{mpp}) в точке оптимальной нагрузки (при номинальной мощности), фактор заполнения (FF) и коэффициент полезного действия (η).

В различных источниках [1-2] описаны методы оценки точности измерений ВНФП модулей, изготовленных на основе кристаллического кремния ($c-Si$), в лабораторных условиях. Однако развитие технологий производства многопереходных фотоэлектрических модулей, выполненных на основе тонких пленок аморфного и микрокристаллического гидрогенизированного кремния ($\alpha-Si:H/\mu c-Si:H$), создает необходимость разработки методов оценки показателей точности, учитывающих особенности измеряемых изделий, методики измерения, измерительной техники, параметров окружающей среды, свойств эталонных модулей. В качестве показателей точности в [3] рекомендуется использовать оценки неопределенности измерения. В данной работе рассмотрим методику оценивания неопределенности измерения фотоэлектрических параметров тонкопленочных модулей в производственных условиях.

Общие требования к методу измерения вольт-амперной характеристики (ВАХ) солнечных элементов, фотоэлектрических модулей изложены в IEC 60904-1 [4]. В производственных условиях измерения ВНФП полноразмерных (1300 мм × 1100 мм) тонкопленочных модулей выполняют с использованием имитатора солнечного излучения. В данной работе рассмотрена модель имитатора импульсного горения PVS1114i (NISSHINBO Mechatronics Inc.), которая входит в состав промышленной линии ООО «Хевел» (г. Новочебоксарск) и экспериментальной линии научно-технического центра тонкопленочных технологий при ФТИ им. А.Ф. Иоффе (г. Санкт-

Петербург). Имитатор позволяет выполнять измерения ВАХ при воздействии стандартного излучения: облученность 1000 Вт/м², спектральный состав *AMI.5G*, однородный и стабильный световой поток. Имитатор *PVS1114i* обеспечивает воспроизведение параметров потока излучения по классу *ABA* в соответствии с *IEC 60904-9* [5]. В качестве эталонных используются полноразмерные (1300 мм × 1100 мм) модули, изготовленные на основе аморфного кремния (α -Si). Измерения выполняются в помещениях, где организована чистая зона 100.000 или в соответствии с *ISO 14644-1* [6] класс 8, температура поддерживается в пределах 10...30 °С, влажность воздуха менее 70% , без конденсации. Операторы, выполняющие измерения на имитаторе должны иметь соответствующую квалификацию, а также пройти обучение правилам эксплуатации данного оборудования.

Процедура оценки неопределенности измерения ВНФП состоит из следующих этапов:

- 1) анализ источников неопределенности измерения;
- 2) определение составляющих неопределенности измерения;
- 3) выбор метода расчета (оценивания) составляющих неопределенности измерения;
- 4) расчет суммарной (результатирующей) неопределенности измерения;
- 5) оценка интервала допустимых значений при заданном уровне вероятности.

В данной работе в качестве анализируемого ВНФП фотоэлектрического модуля рассмотрен ток короткого замыкания (I_{sc}) в виду чувствительности данного параметра к колебаниям характеристик излучения.

Для анализа источников неопределенности была построена древовидная диаграмма (рисунок 1). Древовидная диаграмма - «новый» инструмент управления качеством, предназначенный для выявления и наглядного представления связей между предметом (проблемой) рассмотрения и его компонентами (элементами, причинами). Использование данной диаграммы позволяет определить составляющие неопределенности (погрешности) измерения, связанные с определенными источниками.

В соответствии с *GUM* [3] существуют два метода оценивания неопределенности измерения: по типу *A*; по типу *B*.

Оценивание неопределенности по типу *A* предполагает статистический анализ рядов наблюдений. При оценивании неопределенности по типу *B* используется вся доступная информация о возможной изменчивости измеряемой величины: данные предварительных измерений; данные полученные в результате опыта, или общие знания о поведении и свойствах соответствующих материалов и приборов; спецификации изготовителя; данные, которые приводятся в свидетельствах о калибровке и других сертификатах; неопределенности, приписываемые справочным данным, взятым из справочников.

В данной работе предложен комбинированный метод оценивания неопределенности измерения ВНФП тонкопленочных фотоэлектрических модулей, предполагающий определение составляющих по типу *A* и *B*.

Оценивание неопределенности по типу *A* позволяет учесть изменчивость результата измерения тока короткого замыкания, связанную со следующими факторами:

- спектральное рассогласование (спектральная чувствительность эталонного модуля, спектральная чувствительность исследуемого модуля, спектральное несоответствие излучения имитатора);
- неравномерность распределения освещенности в рабочей области имитатора;
- отклонение от плоскостности расположения эталонного и исследуемого модулей;

- нестабильность освещенности во времени.

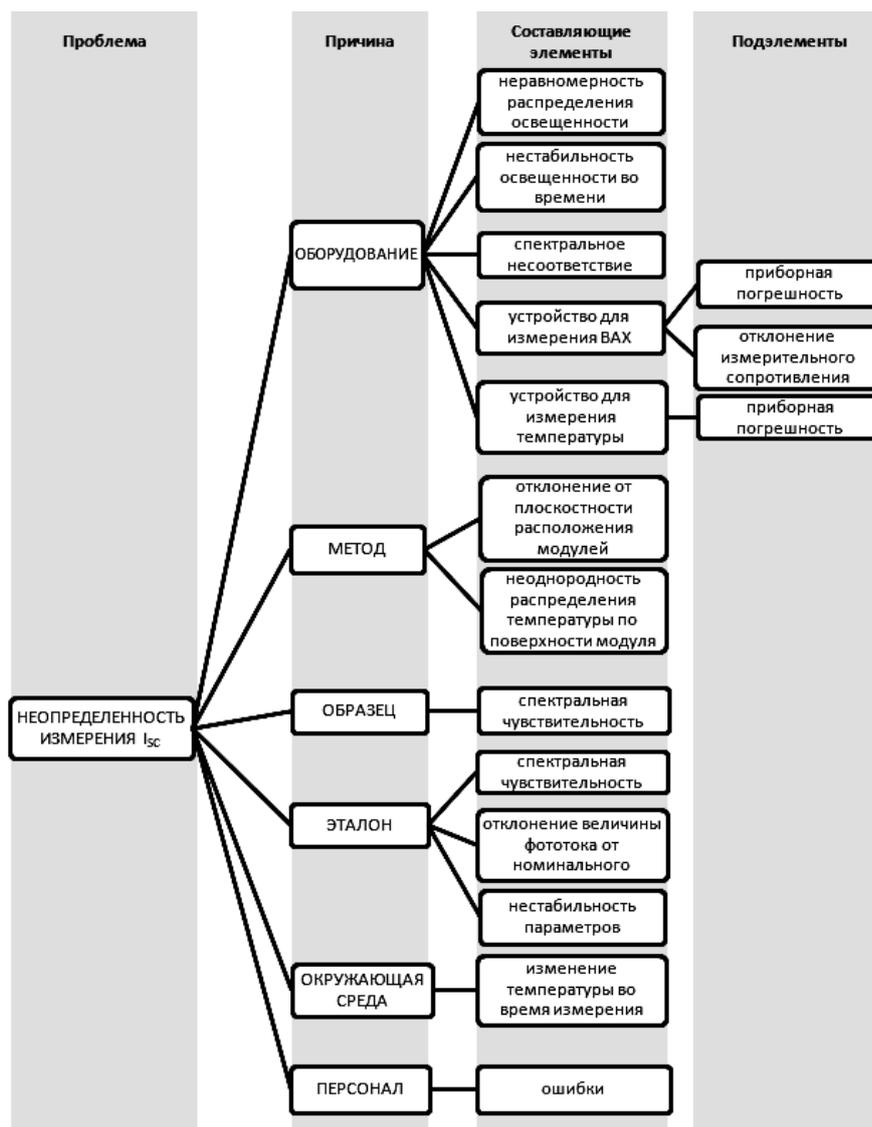


Рисунок 1. Древовидная диаграмма

Для оценивания неопределенности по типу А были получены результаты измерения 28 модулей в условиях повторяемости. Однако при оценивании неопределенности на основании статистического анализа ряда наблюдений не учитывается влияние следующих источников неопределенности:

- приборная погрешность устройства для измерения ВАХ;
- отклонение шунтирующего сопротивления в измерительной схеме для датчика освещенности;
- приборная погрешность устройства для измерения температуры (термопары T -типа);
- изменение температуры во время измерения;
- неоднородность распределения температуры по поверхности модуля;
- отклонение величины фототока от номинального значения для эталонного модуля;
- нестабильность параметров эталонного модуля.

Для определения степени влияния вышеперечисленных источников неопределенности на результат измерения тока короткого замыкания выполняется оценивание неопределенности по типу В, которое предполагает использование

информации, приведенной в технической документации на измерительное оборудование (технические характеристики имитатора), эталонные модули (сертификат о калибровке).

Расчет результирующей стандартной неопределенности измерения выполняется путем геометрического суммирования составляющих (в случае некоррелированных величин). Значение суммарной расширенной неопределенности (интервала допустимых значений), U , вычисляют по формуле (1):

$$U_{Isc} = \pm k \sqrt{u_A^2 + u_B^2}, \quad (1)$$

где u_A – стандартная неопределенность, оцененная по типу A ;

u_B – стандартная неопределенность, оцененная по типу B ;

k – коэффициент охвата; для нормального (Гаусса) закона распределения $k=2$ при уровне доверительной вероятности $P = 95\%$.

Результаты расчета суммарной расширенной неопределенности измерения тока короткого замыкания приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Расчет суммарной расширенной неопределенности измерения I_{sc}

Составляющие неопределенности	Закон распределения	Коэффициент охвата, k^*	Стандартная неопределенность, %
Оценка стандартной неопределенности по типу A			
Разброс экспериментальных результатов измерений относительно среднего			0,105
Оценка стандартной неопределенности по типу B			
Точность устройства для измерения ВАХ ($\pm 0,20\%$)	нормальный (Гаусса)	2,586 ($P=99\%$)	0,077
Отклонение шунтирующего сопротивления в измерительной схеме для датчика освещенности ($\pm 0,10\%$)	равномерный	$\sqrt{3}$	0,058
Точность устройства для измерения температуры (термопары T -типа) ($\pm 1^\circ\text{C}$)	равномерный	$\sqrt{3}$	0,035
Изменение температуры во время измерения ($\pm 1^\circ\text{C}$)	равномерный	$\sqrt{3}$	0,035
Неоднородность распределения температуры по поверхности модуля ($\pm 0,5^\circ\text{C}$)	равномерный	$\sqrt{3}$	0,017
Отклонение величины фототока от номинального значения для эталонного модуля ($\pm 2,5\%$)	нормальный (Гаусса)	2	1,250
Нестабильность параметров эталонного модуля ($\pm 0,19\%$)	равномерный	$\sqrt{3}$	0,110
Суммарная расширенная неопределенность ($k=2$)			2,53

В результате оценивания неопределенности измерения с использованием комбинированного метода (по типу A и B) были определены показатели точности измерения тока короткого замыкания в производственных условиях: $\pm 2,53\%$. Таким образом, результат измерения в абсолютных величинах может быть представлен в форме: $I_{sc} = (2,67 \pm 0,07) \text{ A}$.

Данная методика оценивания неопределенности может быть использована для определения показателей точности результатов измерения других ВНФП тонкопленочных фотоэлектрических модулей в промышленных условиях: напряжение холостого хода (U_{oc}), максимальная (номинальная) мощность (P_{mpp}), напряжение (U_{mpp}) и ток (I_{mpp}) в точке оптимальной нагрузки, фактор заполнения (FF) и коэффициент полезного действия (η).

Литература:

1. Mullejans H., Zaaiman W., Galleano R. Analysis and mitigation of measurement uncertainties in the traceability chain for the calibration of photovoltaic devices// Meas. Sci. Technol. 20, 2009, 075101 (12 pp)
2. Emery K. Uncertainty analysis of certified photovoltaic measurements at the National Renewable Energy Laboratory// Technical report NREL/TP-520-45299, 2009. 58 p.
3. Руководство по выражению неопределенности измерения/пер. с англ. Санкт-Петербург, ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, 1999.
4. IEC 60904-1: 2006 Photovoltaic devices: Part 1. Measurement of photovoltaic current-voltage characteristics. 2nd edn
5. IEC 60904-9: 2007 Photovoltaic devices - Part 9: Solar simulator performance requirements. 2nd edn
6. ISO 14644-1: 1999 Cleanrooms and associated controlled environments: Part 1. Classification of air cleanliness. 1st edn

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛЕГИРОВАННЫХ МОНОКРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ

Лепав А. Н., Ксенофонтов С. И.
Чебоксары, ФГБОУ ВПО «Чувашский государственный педагогический
университет им. И. Я. Яковлева»
lepaev@mgou.infanet.ru

Микроэлектронная оптика тонкослойных покрытий, гетерогенный анализ и другие направления современных технологий предъявляют все более высокие требования к уровню знаний о природе поверхности твердых тел [1-3].

Под поверхность твердого вещества принято понимать приповерхностный слой некоторой толщины, находящийся под воздействием как данного вещества в объеме, так и внешней среды. Основные свойства поверхности связаны с особенностями атомно-молекулярного строения приповерхностного слоя, взаимодействия его атомов с другими атомами вещества в объеме и внешней средой [4,5].

Современная технология предъявляет к методам исследования поверхности дополнительные требования: неразрушающий контроль, оперативность измерений. Этим требованиям удовлетворяет эллипсометрический метод исследования. Комплексный и трансцендентный характер основного уравнения эллипсометрии существенно усложняет анализ экспериментальных данных [5].

В данной работе предложен метод определения оптических свойств полупроводниковых материалов методами эллипсометрии.

Экспериментальная установка состояла (рис.1) из гониометра 1, на столике которого устанавливается исследуемый образец 2.

Оптический квантовый генератор 3 типа ЛГ-109 создавал узкий пучок света. Поляризатор 4 выделял *p*-волну. Фотоприемник 5 типа ФД-24К, установленный на столике гониометра, принимал отраженный луч. Сигнал фотоприемника регистрировался аналоговым прибором 6 типа Ф-136. Пошаговый поворот гониометра позволял получать зависимость интенсивности отраженного луча от угла падения $J_p(\varphi)$.

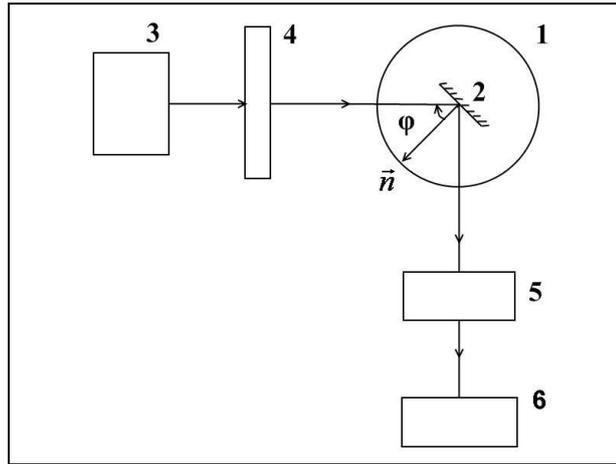


Рис. 1 Блок схема экспериментальной установки

При угле Брюстера $\varphi = \varphi_{Br}$ интенсивность отраженного луча для диэлектриков стремится к нулю, а для металлов и полупроводников стремится к некоторому минимальному значению $J = J_{min}$. Значение минимальной интенсивности отраженного луча J_{min} зависит от природы материала. Для металлов отношение минимальной интенсивности к интенсивности отраженного луча при угле равно нулю J_{min}/J_0 не менее 0,8. Для полупроводников это отношение занимает промежуточное значение от нуля до 0,5.

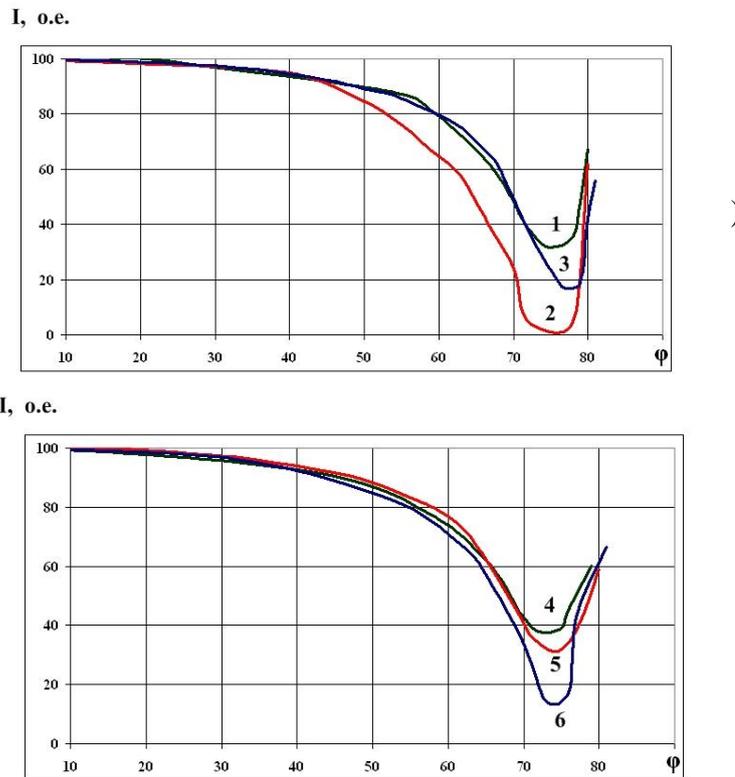


Рис. 2 – Зависимость $J_p(\varphi)$ для кремниевых легированных полупроводников:

- а) n – типа: 1 – КЭФ-4,5; 2 – КЭФ-2; 3 – КЭС-0,01;
- б) p-типа: 1 – КДБ-12; 2 – КДБ-7,5; 3 – КДБ-0,5

Надо отметить, что само значение угла Брюстера $\varphi = \varphi_{Br}$ зависит от вида примеси и типа проводимости. Кремний легированный фосфором имеет показатель

преломления $n = 3,73$ ($\lambda = 0,6328$ мкм), а уровень минимальной интенсивности зависит от удельной проводимости материала. Чем ниже проводимость, тем меньше значение J_{\min} . Зависимости интенсивности отраженного луча от угла падения $J_p(\varphi)$ приведены на рис.2а. для кремниевых пластин, легированного фосфором (кривые 1.2) и серой (кривая 3). Эти полупроводники относятся n -типу. Угол Брюстера для кремния, легированного серой оказался равным 77° , что соответствует показателю преломления равным $n=4,33$.

Примесь бора (рис.2б) в кремнии образует полупроводник p -типа. Закономерности убыли J_{\min} от удельной проводимости соблюдаются. Показатель преломления оказался равным $n = 3,27$.

Изучение спектральной зависимости поглощения от длины волны показывают, что в инфракрасной области вплоть до 20 мкм коэффициент пропускания постоянен и равен 0,5 для образцов КЭФ легированных фосфором. Для образца КЭС-0,01 коэффициент пропускания равен 0,2 во всем диапазоне длин волн.

Результаты экспериментов описывают основные свойства легированного кремния. Поверхностный слой пластинки, покрытый окисью кремния, на оптические свойства основы не оказывает влияния.

Литература

1. Физические величины. Справочник/ под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова.– М.: Энергоатомиздат, 1991 –1232 с.
2. Гавриленко, В.И. Оптические свойства полупроводников/ В.И. Гавриленко, А.М. Грехов и др. – Киев: Наукова думка, 1987 – 900 с.
3. Таиров, Ю.С. Технология полупроводниковых и диэлектрических материалов/ Ю.С. Таиров, В.Ф. Цветков. – М.: Высшая школа, 1990. – 423 с.
4. Кисилев, В.Ф. Поверхностные явления в полупроводниках и диэлектрических материалов / В.Ф. Кисилев. – М.: Наука, 1970. – 399с.
5. Кольцов, С.И. Эллипсометрический метод исследования поверхности твердых веществ/ С.И. Кольцов. – Л.: Наука, 1983. – 54 с.

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО И ЛАЗЕРНОГО ОТЖИГА НА СВОЙСТВА ПЛЕНОК ZnO:V, ВЫРАЩЕННЫХ МЕТОДОМ ГАЗОФАЗНОЙ ЭПИТАКСИИ

Семерухин М.Ю.^{1,4}, Кукин А.В.^{2,4}, Терукова Е.Е.^{2,3}, Соколов Е.В.², Аблаев Г.М.^{1,4},
Теруков Е.И.^{3,4}

¹Санкт-Петербургский Академический Университет – научно - образовательный центр нанотехнологий РАН

²Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

³НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике при ФТИ им. А.Ф. Иоффе

⁴Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН
msemerukhin@mail.ru

Одной из многочисленных возможностей применения тонких пленок оксида цинка (ZnO) является их использование в качестве прозрачных электрических контактов и буферных слоев в тонкопленочных солнечных элементах (ТПСЭ) [1]. Важным параметром таких контактов является их удельное сопротивление.

Цель данной работы состояла в сравнении методик термического отжига и лазерного отжига слоёв ZnO:В выращенных химическим газофазным осаждением при пониженном давлении (LPCVD). К тому же, важной задачей было нахождение оптимального режима отжига (времени, температуры отжига, мощности лазерного излучения) слоёв ZnO:В, приводящего к снижению удельного сопротивления. Дополнительно проводились измерения оптических свойств слоёв ZnO:В для оценки влияния отжига на их значения. Такие исследования позволят разработать рекомендации по оптимизации технологического процесса для получения слоев ZnO с пониженным сопротивлением слоёв, способных привести к улучшению характеристик ТПСЭ.

Термический отжиг образцов проводился на установке JETFIRST JPELEC при давлении $5 \cdot 10^{-2}$ мбар и температуре 100-400 °С с шагом 50 градусов. Время отжига варьировалось от 5 до 30 минут.

Лазерный отжиг проводился на установке LSS1200 при мощностях лазерного излучения от 0 до $4 \cdot 10^8$ Вт. Используемый лазер Y3Al5O12:Nd3+ (YAG).

Оптические характеристики (спектры пропускания, степень рассеяния) ZnO:В измерялись спектральной установкой на основе монохроматора M266 и галогенной лампы КГМ24-250 в диапазоне длин волн 300-1200 нм и спектрофотометре Varian Cary 5000. Измерение удельного сопротивления осуществляли четырехзондовым методом с помощью прецизионного программируемого источника питания KEITHLEY 2400.

Проведенные исследования выявили значительное влияние температуры отжига на удельное сопротивление тонких пленок ZnO:В выращенных методом LPCVD. Увеличение температуры отжига до 200 °С снижает величину удельного сопротивления до $2,46 \cdot 10^{-3}$ Ом*см. Дальнейшее повышение температуры приводит к резкому увеличению сопротивления пленки оксида цинка. Похожая зависимость, но при более высоких температурах, наблюдалась для ZnO, легированного алюминием, полученного магнетронным распылением [2]. Снижение сопротивления при отжиге (200 °С) может быть связано с пассивацией дефектов на границах зерен, что приводит к значительному снижению рассеяния электронов на границах зерен. Таким образом, при этой температуре может происходить незначительная рекристаллизация, приводящая к улучшению электрических свойств. С увеличением времени отжига наблюдается возрастание удельного сопротивления оксида цинка.

Эксперименты по лазерному отжигу выявили не линейную зависимость сопротивления плёнки от мощности лазерного излучения. При этом с повышением мощности сопротивление плёнок падает и при значении мощности излучения $4 \cdot 10^8$ Вт достигает $1,5 \cdot 10^{-3}$ Ом*см. К тому же характер зависимости позволяет предположить, что дальнейшее увеличение мощности лазерного излучения приведет к ещё большему уменьшению удельного сопротивления плёнки. Толщины исследуемых плёнок проверялись на профилометре, изменения толщины и рельефа поверхности не выявлено.

Были измерены спектры пропускания термически отожженных образцов ZnO:В в диапазоне длин волн 300-1200 нм, где происходит основное поглощение в микроморфных кремниевых ТПСЭ. Какого-либо значительного влияния температуры отжига на пропускание пленок ZnO:В не было обнаружено.

Таким образом для термической обработки, был определен оптимальный режим отжига плёнок LPCVD ZnO:В – 5 мин. при температуре 200 °С, приводящий к снижению удельного сопротивления и не влияющий на оптические свойства образцов. Для лазерного отжига пока не найден оптимальный режим, приводящий к максимальному снижению удельного сопротивления. Но показано, что при увеличении мощности лазерного излучения сопротивление падает и может достигать

значений меньших, чем в случае термического отжига. Дальнейшие работы будут направлены на изучение оптических свойств (пропускание, рассеяние), электрических свойств (подвижность и концентрация носителей), структурных свойств (комбинационное рассеяние, рентгеноструктурный анализ) отожженных образцов. Данные исследования позволят более точно описать механизмы, происходящие в процессе отжига пленок ZnO:V.

Работа была выполнена при финансовой поддержке РФФИ (№ 12-08-01257а)

Литература

1. C.G. Granqvist, *Solar Energy Materials & Solar Cells* **91**, 1529 (2007).
2. Kim, Yumin et al., *Applied Physics Letters* **V96 №17**, 171902 (2010).

ПЛАЗМОНИКА КАК ПЕРСПЕКТИВНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ СОВРЕМЕННОЙ ФОТОЭНЕРГЕТИКИ

Смирнов А.В

Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова

fizteh21@yandex.ru

В начале 21 века, вследствие стремительного прогресса в технологии изготовления частиц наноразмеров, стал толчком к развитию научного интереса в области нанотехнологии — плазмоника. В металлах поддерживаются поверхностные плазмоны, при возбуждении которых происходит коллективные колебания свободных электронов, характеризуется резонансной частотой. Плазмоны могут быть как локализованными для металлических наночастиц, так и в случае поверхности тонкой пленки металла. Геометрией конструкции поверхностного или объемного плазмонного резонанса (плазмона) возможно варьировать в зависимости от применений.

В последнее время существует концепция внедрения плазмоники в фотовольтаические приложения, поиск способа их управления широко обсуждается в научном мире и проводятся соответствующие эксперименты в научно-исследовательских лабораториях мира. Имеются работы [1,2], в которых обосновываются требования к размерам кластеров атомов серебра или иных благородных металлов, оптимальный подбор которых послужит решением задачи повышения эффективного сечения поглощения.

В межвузовской лаборатории высоких технологий (Чувашского и Московского госуниверситетов) производилось напыление тонких пленок серебра в вакуумной установке УВР-3М при остаточном давлении около 10^{-2} Па терморезистивном методом испарения. Напыление пленок линейно-цепочечного углерода (ЛЦУ) производилось на модернизированной вакуумной ионно-плазменной установке «УРМ.3.279.070 Алмаз».

На рисунке 1-2 представлены спектры пропускания системы Ag-ЛЦУ при разной толщине углеродной пленки и металлической пленки при неизменной температуре обработки $T=550^{\circ}\text{C}$ в течение 20 минут.

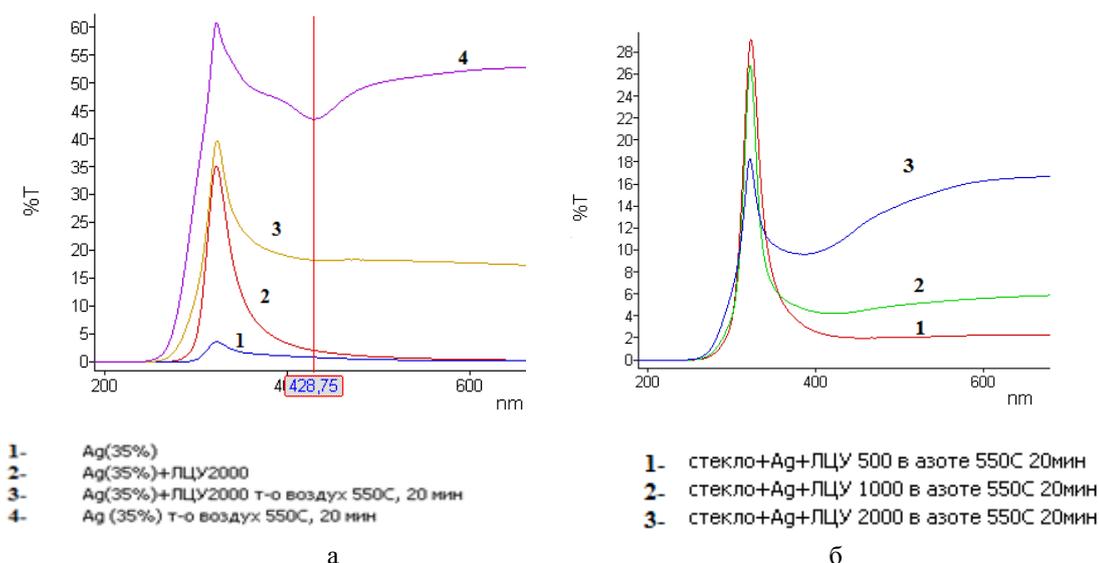


Рисунок 1. Спектры пропускания Ag-ЛЦУ после отжига на воздухе (а) и в атмосфере азота (б) при различных толщинах ЛЦУ с полупрозрачной пленкой серебра ($T_{\max}=35\%$ в области поверхностного плазмона)

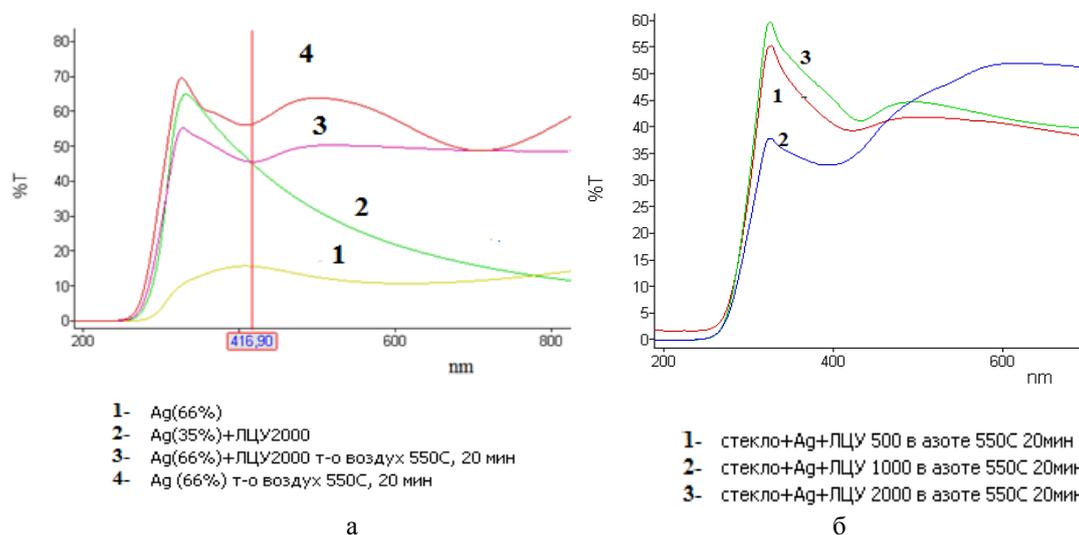


Рисунок 2. Спектры пропускания Ag-ЛЦУ после отжига на воздухе (а) и в атмосфере азота (б) при различных толщинах ЛЦУ с полупрозрачной пленкой серебра ($T_{\max}=66\%$ в области поверхностного плазмона)

Из анализа таблицы 1, стоит отметить, что отмечается “голубой” сдвиг поверхностного резонанса для пленок Ag-ЛЦУ (по сравнению с чистыми пленками Ag). Данное обстоятельство может быть связано с тем, что 5s-электроны частично передаются углероду, плотность 5s-электронов в кластерах серебра снижается. Из теории Ми снижение энергии коллективной осцилляции валентных электронов приводит к смещению ППР в длинноволновую область.

С увеличением времени термообработки пленок происходит смещение в область коротких волн и уменьшением ширины ПР, то есть с увеличением размеров агрегатов частиц при термообработке.

Таблица 1. Основные характеристики плазмонов для Ag и Ag+ЛЦУ 2000Å при изменении технологических условий.

Образец	PR1 на длине волны, нм	PR2 на длине волны, нм	Время и температура термообработки	FWHM, нм
T%=35%				
Ag	322,63	—	—	30,31 (PR1)
Ag	322,82	428,21	воздух 20 мин 550 ⁰ С	250,4 (PR2)
Ag+ЛЦУ 2000Å	323,55	—	—	38,58 (PR1)
Ag+ЛЦУ 2000Å	323,55	—	воздух 20 мин 550 ⁰ С	74,51 (PR1)
T%=66%				
Ag	332,54	—	—	332,54 (PR1)
Ag	1) 326,74 2) 502,63	1) 407,24 2) 710,31	воздух 20 мин 550 ⁰ С	1)125,94 (PR2) 2)197,77 (PR2)
Ag+ЛЦУ 2000Å	407,70	612,89	—	127,57 (PR2)
Ag+ЛЦУ 2000Å	329,06	417,24	воздух 20 мин 550 ⁰ С	163,72 (PR2)

Рассмотрим топографию поверхности для двух пленок серебра разной толщины с термообработкой. Данные образцы по оптическим спектрам проявили объемный плазмонный резонанс. Отжиг в воздухе при температуре 550⁰С, время отжига 20мин.

Ширина поверхностного плазмонного резонанса составила 123,38 нм (PR1).

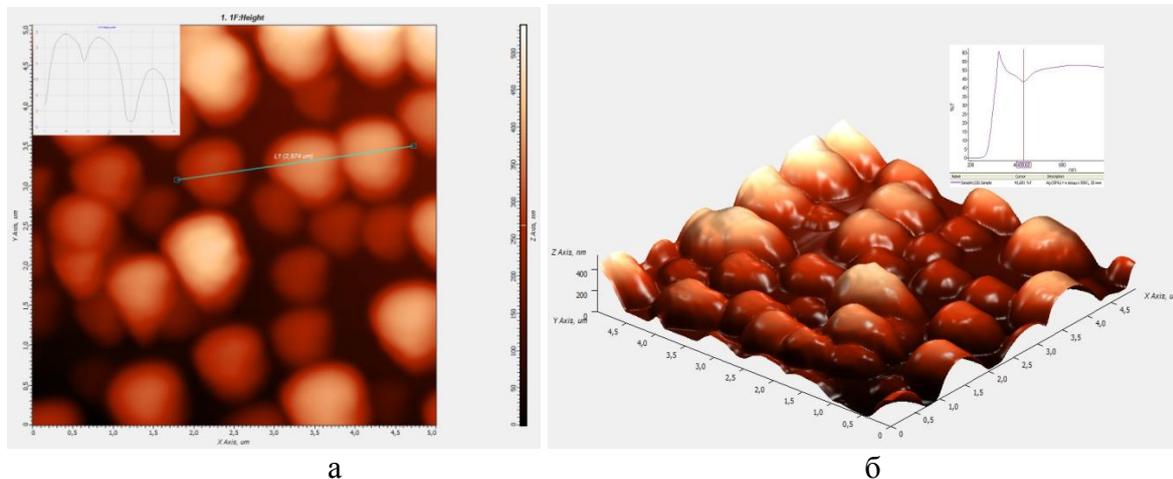


Рисунок 3.Топография поверхности образца стекло+Ag после термообработки: (а) 2D–изображение с профилем поверхности, (б) 3D–изображения в масштабе 5*5 с вставкой графика пропускания

Спектр пропускание пленка серебра без термообработки 35%. По 2D и 3D–изображению (рис.3 а,б) видно, что после термообработки покрывается оксидным слоем. Диаметр нанокластеров больших – 1,236 микрон, меньших – 0,853 микрон. Высота около 500нм. По графику пропускания после отжига проявляется объемный плазмонный резонанс на длине волны 438,21нм.

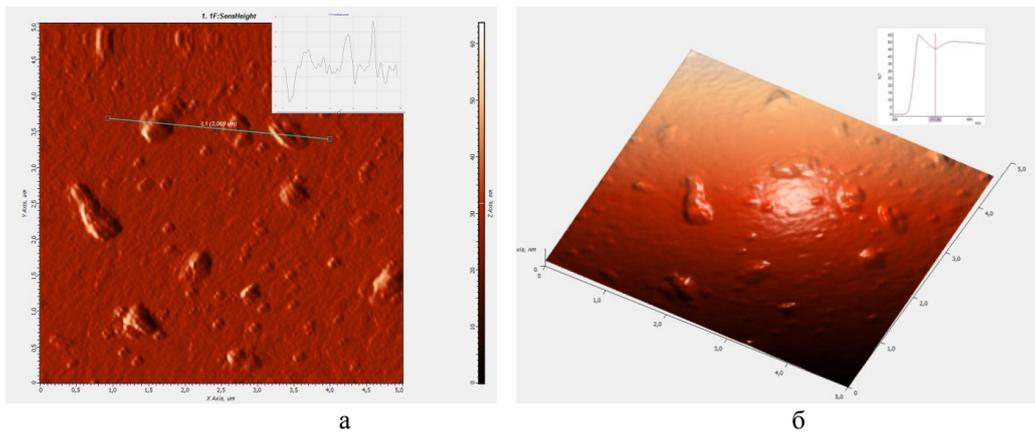


Рисунок 4. Топография поверхности образца стекло+Ag+ЛЦУ2000Å после термообработки: (а) 2D–изображение с профилем поверхности, (б) 3D–изображение, масштаб 5*5 нм с вставкой графика пропускания

Пропускание в чистом виде в области PR1 образец 66%. Топография (рис.4 а,б) образца имеет нечеткое расположение нанокластеров по поверхности. Толщина образца 60нм. Диаметр больших нанокластеров 0,417нм, малых – 0,05нм. По графику пропускания происходит возбуждение объемного плазмонного резонанса на длине волны 426,82нм

Аналогичные чистые пленки серебра с коэффициентом пропускания в области поверхностного плазмона - 35% и 66%. На образцы напылен ЛЦУ2000 Å, после чего отжигался в атмосфере воздуха при температуре 550⁰С при времени отжига 20 мин.

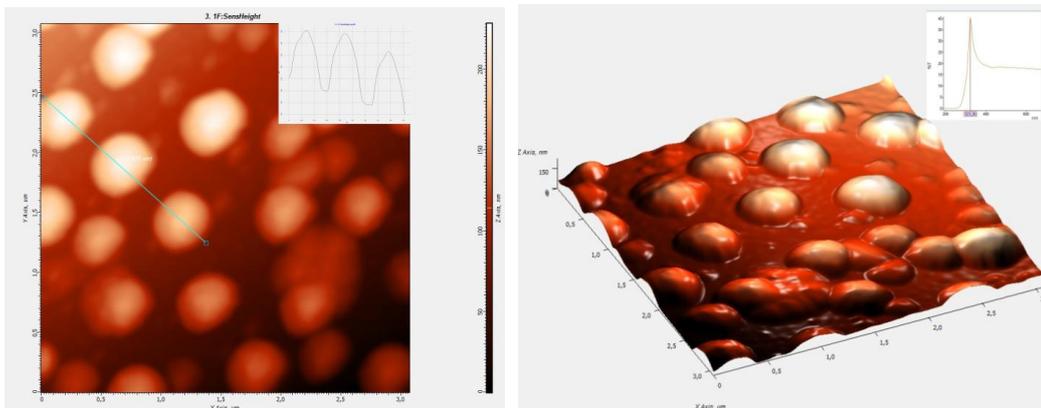


Рисунок 5. Топография поверхности образца стекло+Ag+ЛЦУ2000Å после термообработки: (а) 2D–изображение с профилем поверхности, (б) 3D–изображение масштаб 3*3 нм с вставкой графика пропускания

В чистом виде образец в области 322 нм имел коэффициент пропускания 35%. Топография поверхности (рис.5 а,б) имеет зернистую периодичную структуру, расстояние между полученными нанокластерами полусфероидальной формы 0,6 микрон. Толщина пленки около 200 нм. Диаметр больших нанокластеров 689нм, малых – 497нм.

Литература

1. Michael G. Deceglie, Vivian E. Ferry, A. Paul Alivisatos and Harry A. Atwater, Design of Nanostructured Solar Cells Using Coupled Optical and Electrical Modeling, Nano Lett. 2012, 12, 2894–2900
2. V. E. Ferry , L. A. Sweatlock , D. Pacifici , H. A. Atwater , Nano Lett., 2008 , 8 , 4391

ПОЛУПРОЗРАЧНЫЕ МОДУЛИ НА ОСНОВЕ АМОРФНОГО И МИКРОАМОРФНОГО КРЕМНИЯ

Г.М. Аблаев^{*o}, Д.В. Жилина^{*x}, А.И. Косарев^{*}, А.В. Кукин^{+x},
М.Ю. Семерухин^{*o}, М.З. Шварц^{*+}, Е.И. Теруков^{*+}

Санкт-Петербург, ^{*} Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН
Санкт-Петербург, ⁺ ООО «НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике при
ФТИ им. А.Ф. Иоффе»

Санкт-Петербург, ^o Санкт-Петербургский академический университет –
научно-образовательный центр нанотехнологий Российской академии наук
Санкт-Петербург, ^x Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

gani.ablay@gmail.com

В последнее время весьма актуальной становится задача по разработке нового типа фотоэлектрических преобразователей энергии, обладающих прозрачностью в видимом диапазоне, но при этом несильно уступающих в значении коэффициента полезного действия (энергетической эффективности), по сравнению с классическими - непрозрачными аналогами.

Над решением этой задачи работает немало компаний и научно-исследовательских центров по всему миру. Осенью 2012 года *Sharp* представила на внутреннем рынке Японии полупрозрачные солнечные панели. КПД этих панелей составила 6.8% [1]. Одна из китайских компаний - *TianWei SolarFilms Co. Ltd*, занимающаяся производством солнечных модулей, по швейцарской технологии *Oerlikon*, выпускает модули на основе аморфного кремния с прозрачностью 20% и 30% в диапазоне 400-800 нм с КПД 4.9% и 4.2% соответственно (*TW-ST*) [2].

Обзор российских компаний занимающихся производством солнечных модулей, не выявил ни одной компании, которая бы вела разработки по созданию полупрозрачных модулей. Этот факт, подчеркивает необходимость скорейшей разработки отечественных полупрозрачных модулей, что позволит наладить производство, не имеющее прямых конкурентов на российском рынке, а в случае успеха в достижении оптимального соотношения цены, качества и эффективности, так же составит серьезную конкуренцию и на зарубежных рынках.

Цель работы: получить полупрозрачный солнечный модуль и оценить его характеристики.

Материалы и методы

НТЦ ТПТ при ФТИ им. А.Ф. Иоффе использует оборудование и технологию швейцарской компании «*Oerlikon Solar*».

На рисунке 1 представлена структура одиночного и tandemного элементов на основе аморфного и микроморфного кремния. На переходе *a-Si:H* поглощается коротковолновая часть спектра, а на *mc-Si:H* – длинноволновая. Толщина пленки *a-Si:H* составляет 0.3 мкм, *mc-Si:H* – 2 мкм.

Используемый ламинирующий материал «*NovoVellum® HiPo FW01*» (в основе *EVA* - этиленвинилацетат) имеет эффективность отражения в диапазоне длин волн 400-1100 нм выше 96%. За счет отражения от этой пленки увеличивается длина оптического пути, увеличивается вырабатываемая модулем мощность.

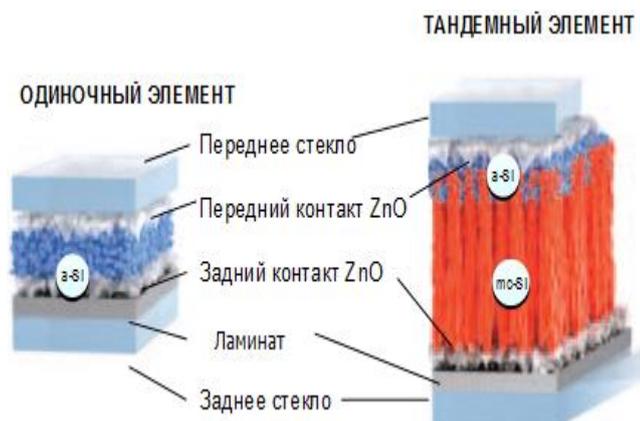


Рис. 1. Структура солнечных модулей на основе аморфного и микроморфного кремния.

Для достижения цели работы, мы модифицировали технологию «Oerlikon», заменив ламинирующий материал «NOVOVELLUM» на выпускаемый Московской компанией НПО «Пластик» материал «РАДЭВА», обладающий после ламинирования высокой оптической прозрачностью в диапазоне от видимого до ближнего ИК спектра.

Были изготовлены два экспериментальных образца солнечных модулей, размерами 10x10 см, отличающихся тем, что этапе плазмохимического осаждения слоев кремния в одном случае была выращена pin структура только на базе аморфного кремния, а в другом случае – каскад из последовательно выращенных p-i-n структуры на базе аморфного кремния и p-i-n структуры на базе микрокристаллического кремния. Изготовление образцов завершилось нанесением ламинирующего материала «РАДЭВА».

Для сравнения полученных образцов со стандартными, были изготовлены еще два таких же образца, но в качестве ламинирующего материала был использован стандартный материал «NOVOVELLUM».

Для того что бы оценить возможность использования «РАДЭВА» для создания полупрозрачных СМ, были исследованы спектральные характеристики коэффициентов пропускания и определены КПД полученных образцов СМ.

Спектральные характеристики коэффициента пропускания были получены с помощью двулучевого спектрофотометра UV-VIS-NIR Cary-5000 фирмы Varian.

Для получения ВАХ был использован имитатор солнечного излучения, построенный на основе ксеноновой лампы постоянного горения мощностью 700 Вт. Излучение имитатора по своему спектральному составу достаточно воспроизводит спектр Солнца AM 1.5G, а несоответствие интегральной плотности потока излучения в спектральном диапазоне 360 - 1650 нм не превышает 3%.

Таким образом, в ходе работы были изготовлены и исследованы четыре экспериментальных образца солнечных модулей:

1. Структура из аморфного кремния с ламинатом «NOVOVELLUM» (КПД=7.5%)
2. Структура из аморфного кремния с ламинатом «РАДЭВА» (КПД=6.5%)
3. Структура из микроморфного кремния с ламинатом «NOVOVELLUM» (КПД=8.7%)
4. Структура из микроморфного кремния с ламинатом «РАДЭВА» (КПД=6.7%)

На рисунке 2 представлена фотография образцов 2 и 4, изготовленных с применением ламинирующего материала «РАДЭВА», из которых видно, что эти образцы обладают оптической прозрачностью, в отличие от образцов 1 и 3, изготовленных с применением ламинирующего материала «NOVOVELLUM».

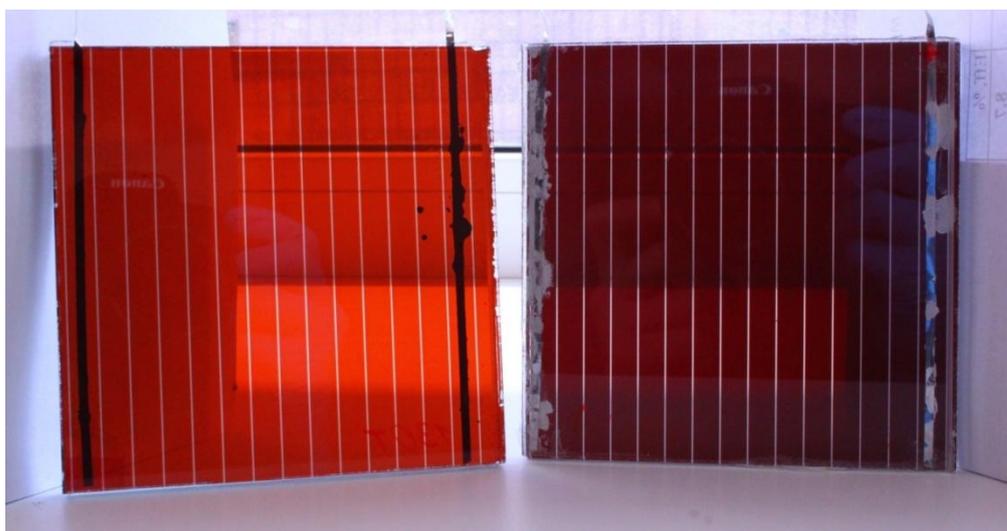


Рис. 2. Фотография образцов, изготовленных с применением ламинирующего материала «РАДЭВА». (Слева структура из аморфного кремния - образец 2. Справа структура из микроморфного кремния - образец 4.)

Результаты

1. Были изготовлены полупрозрачные модули на основе аморфного и микроморфного кремния с применением прозрачного ламината «Радэва» с КПД 6.5% и 6.7%, прозрачностью в видимом диапазоне (380-780 нм [3,4]) 17.5% и 7.2%, в диапазоне 400-800 нм 19.8% и 8.4% соответственно.
2. КПД нашего экспериментального образца из аморфного кремния (6.5%) с прозрачностью 20% в диапазоне 400-800 нм больше КПД зарубежного аналога (4.9%) на 1.6%.
3. Было показано, что в случае применения ламинирующего материала «РАДЭВА» прирост КПД (0.2%) за счет второго каскада на основе микрокристаллического кремния несущественен.
4. Полупрозрачные модули на основе аморфного кремния показали снижение КПД с 7.5% до 6.5% (по сравнению с непрозрачными модулями традиционной технологией). При этом достигается прозрачность 20% в диапазоне 400-800 нм. Полученные результаты превосходят результаты, приведенные в научной литературе.

Заключение

В связи с полученными результатами мы планируем продолжить работу по полупрозрачным СМ и изготовить модуль большой площади - 1.43 м².

Литература

1. <http://www.computerra.ru/40954/poluprozrachnyie-solnechnyie-batarei-mo/>
2. <http://www.btw-solarfilms.com>
3. ГОСТ 7601-78. Физическая оптика. Термины, буквенные обозначения и определения основных величин.
4. Гагарин А. П. Свет // Физическая энциклопедия / Д. М. Алексеев, А. М. Балдин, А. М. Бонч-Бруевич, А. С. Боровик-Романов, Б. К. Вайнштейн, С. В. Вонсовский, А. В. Гапонов-Грехов, С. С. Герштейн, И. И. Гуревич, А. А. Гусев, М. А. Ельяшевич, М. Е. Жаботинский, Д. Н. Зубарев, Б. Б. Кадомцев, И. С. Шапиро, Д. В. Ширков; под общ. ред. А. М. Прохорова. - М.: Советская энциклопедия, 1994. - Т. 4. - С. 460. - 704 с.

РАМАНОВСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ АМОРФНОГО И МИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

В.С. Левицкий, А.В. Семенов, Е.И. Теруков
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет им.
В.И. Ульянова-Ленина. («ЛЭТИ»)
Lev-vladimir@yandex.ru

Диагностика слоев, входящих в состав солнечных элементов (СЭ) является важным элементом в технологической цепочке создания высококачественных СЭ на основе a-Si:H. Рамановская спектроскопия является эффективным локальным неразрушающим методом для анализа структур. С использованием этой методики можно определить размер кристаллитов, изменение ближнего и среднего порядка структуры, наличие напряжений в структуре, а также соотношение долей кристаллической и аморфной составляющих в аморфных пленках, содержащих нанокристаллические включения.

В настоящей работе производились измерения тонких пленок аморфного и микрокристаллического кремния с помощью Рамановской спектроскопии. Данный метод позволяет разделить вклад различных структурных составляющих фоточувствительного слоя в Рамановских спектрах.

Суммарная интенсивность рассеяния $I(\omega)$ в исследуемой области частот определяется как:

$$I(\omega) = I_c(\omega) + I_a(\omega), \quad (1)$$

где $I_c(\omega)$ – интенсивность «нанокристаллической» составляющей, а $I_a(\omega)$ – интенсивность «аморфной» составляющей.

Доля кристаллической части в аморфной матрице определяется из соотношений интегральных интенсивностей «аморфной» и «кристаллической» составляющих: $\rho = I_c / (I_c + \sigma^* I_a)$, где $\sigma^*(L) = 0.1 + \exp^{-L/250}$ зависит от размеров кристаллита L .

Структура современных СЭ постоянно усложняется, путем создания микро- и нанокристаллических включений в фоточувствительном слое, поэтому наибольший интерес представляет обработка смешанного типа данных, включающая в себя разложение на аморфную и кристаллическую составляющие Рамановского спектра.

ФОРМИРОВАНИЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ СЛОЕВ КРЕМНИЯ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ В СРЕДЕ СИЛАНА И АРГОНА С ДОБАВЛЕНИЕМ КИСЛОРОДА

А.В. Кукин², О.Б. Гусев¹, В.Ю. Давыдов¹, А.Н. Смирнов¹, Е.И. Теруков^{1,3},
Ю.К. Ундалов¹

1 – Санкт-Петербург, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

2 – Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет им. В.И. Ульянова (Ленина)

3 – Санкт-Петербург, ООО «НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике при
ФТИ им. А.Ф. Иоффе»

Kukin_av@mail.ru

Одной из актуальных задач солнечной энергетики, связанной с улучшением параметров тонкопленочных солнечных модулей, является поиск новых

наноструктурированных материалов на основе кремния и методов их получения. Использование этих материалов может способствовать уменьшению деградационных процессов, связанных с эффектом Стеблера-Вронского, а так же улучшению оптического дизайна двух каскадных солнечных модулей. Получение аморфных нанокластеров кремния, в отличие от нанокристаллов, не требует высоких температур или высокотемпературного отжига, что является важным для современной кремниевой микроэлектронной технологии. Известно, что электронный спектр аморфного кремния характеризуется существованием трех групп состояний: делокализованные, слаболокализованные и сильно локализованные (расположенные глубоко в хвостах зон). Размерное квантование может влиять на энергетический спектр этих трех групп. Целью работы было получение аморфных нанокластеров кремния в матрице субоксида кремния и исследование их оптических свойств.

В работе показано, что при dc- магнетронным распылении кремния в атмосфере силана и аргона с добавлением кислорода можно варьировать состав пленок от аморфного гидрогенизированного кремния (при больших концентрациях кислорода) до субоксида кремния с нановключениями кремния.

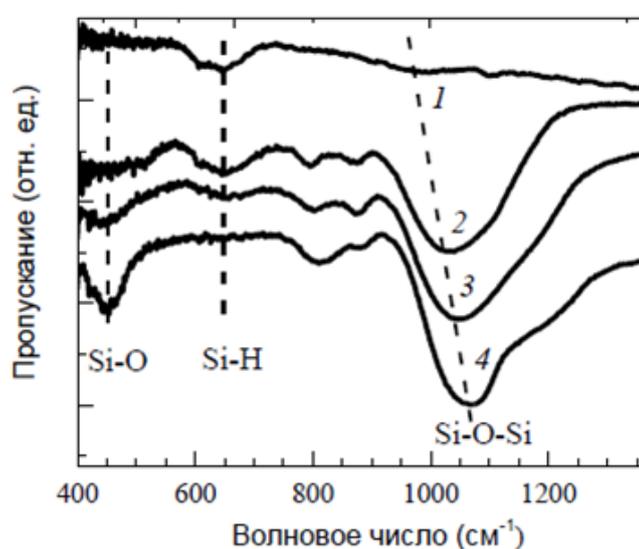


Рис. 1 Спектры ИК пропускания пленок SiO_x <ncl-a-Si> выращенных при концентрации кислорода на входе в рабочий объем магнетрона: 1) 0.15 мол % (остаточный кислород), 2) 17 мол %, 3) 22 мол %, 4) 25 мол. %.

Исследование ИК-поглощения (рис. 1) и рамановского рассеяния показало, что при в ведении в атмосферу больших концентрациях кислорода, получают пленки представляющие собой матрицу не стехиометрического оксида кремния содержащую аморфные нанокластеры кремния. Обнаружено, что в спектрах рамановского рассеяния пленок, содержащих аморфные нанокластеры кремния, в области меньшей 100 см^{-1} появляется, так называемый “бозонный пик” характерный для стёкл. Появление этого пика связывают с избыточной плотностью колебательных состояний (ПКС) вызванной присутствием наноразмерных включений в неупорядоченных твердых телах на масштабах 1-2 нм.

При повышении концентрации кислорода больше 16 мол. % в пленках наблюдается фотолюминесценция (ФЛ) при комнатной температуре. Обнаружено, что в спектрах ФЛ относительно больших нанокластеров (размером $\sim 2 \text{ нм}$) наблюдаются две полосы излучения, в отличие от одной полосы ФЛ нанокристаллов кремния этого же размера. При увеличении концентрации кислорода в рабочем объеме магнетрона и, соответственно, в выращенных пленках обе полосы ФЛ нанокластеров смещаются в коротковолновую область. Это связано с уменьшением размера нанокластера в

результате окисления. Форма спектров ФЛ при изменении размеров нанокластеров хорошо согласуется с результатами теоретических работ [1,2], в которых расчет энергетического спектра аморфных нанокластеров производился с учетом размерного квантования как делокализованных и слабо локализованных, так и сильно локализованных состояний. Сопоставление экспериментальных результатов с теоретическими расчетами показывает, что пик с меньшей энергией обусловлен слабо локализованными состояниями с размерами в пространстве, порядка размеров нанокластеров. Пик с большой энергией обусловлен размерным квантованием делокализованных состояний. При размерах нанокластеров меньше 1.5 нм в спектре ФЛ остается пик связанный только с делокализованными состояниями.

Литература

1. G. Allan, C. Delerue, and M. Lannoo, Phys. Rev. Lett. 78, 3161 (1997).
2. C. Delerue, G. Allan, and M. Lannoo, J. Luminescence, 80, 65 (1999).

ФЕМТОСЕКУНДНАЯ ЛАЗЕРНАЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ АМОРФНОГО КРЕМНИЯ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ФОТОВОЛЬТАИКЕ

А.В. Емельянов¹, А.Г. Казанский¹, М.В. Хенкин¹, П.А. Форш^{1,2}, С.В. Заботнов¹,
П.К. Кашкаров^{1,2}, Р. Kazansky³

¹ Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Москва

² Национальный Исследовательский Центр «Курчатовский Институт», Москва

³ Optoelectronics Research Centre, University of Southampton, UK
av.emelyanov@physics.msu.ru

Гидрогенизированный аморфный кремний (a-Si:H) успешно используется в тонкопленочной солнечной энергетике. Одной из проблем, связанных с солнечными элементами на основе a-Si:H является наблюдаемый в них эффект Стеблера-Вронского, который приводит к деградации электрофизических свойств материала при его длительном освещении. С целью уменьшения данного эффекта разработаны тандемные элементы на основе пленок аморфного и нанокристаллического кремния. При этом отмечается, что для оптимизации технологического процесса при создании подобных структур целесообразно использовать лазерную кристаллизацию a-Si:H.

В большинстве работ, посвященных лазерной кристаллизации a-Si:H, использовались пико- и наносекундные лазерные импульсы с энергиями квантов излучения, существенно превышающими оптическую ширину запрещенной зоны a-Si:H (~1.8 эВ). В этом случае кристаллизация возникает в результате возбуждения приповерхностного слоя пленки лазерным излучением, ее плавления и последующей кристаллизации, так называемая взрывная кристаллизация a-Si:H [1]. В последние годы внимание исследователей привлекает процесс кристаллизации пленок a-Si:H в результате их облучения мощными фемтосекундными лазерными импульсами [2]. Малая длительность импульса позволяет при данной энергии в импульсе получить большие значения интенсивностей излучения. В этом случае, согласно [3], кроме термического разогрева, наблюдаемого при небольших интенсивностях, возможно оптическое возбуждение значительного числа валентных электронов в зону проводимости, что приводит к ослаблению межатомных связей и так называемому «холодному» плавлению материала. При этом, поскольку длительность импульсов меньше времени обмена энергией между электронами и атомной решеткой, во время импульса не происходит возбуждения колебательных мод в атомной структуре. Это

позволяет ожидать, что при кристаллизации пленок a-Si:H фемтосекундными лазерными импульсами эффузия водорода из пленок будет минимальной, что может существенно улучшить фотоэлектрические характеристики получаемого материала [4].

В работах, опубликованных в последние годы и посвященных влиянию фемтосекундного лазерного облучения a-Si:H на его свойства, исследовалось изменение структуры пленок при данном воздействии. При этом было обнаружено, что облучение пленок a-Si:H мощными фемтосекундными лазерными импульсами не только изменяет структуру материала, но и существенно влияет на структуру поверхности пленки, приводя к образованию остроконечных наношероховатостей [3]. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению коэффициента отражения и, соответственно, к значительному увеличению коэффициента оптического поглощения в области энергий квантов света, меньших 1.8 эВ. Однако в литературе практически отсутствуют данные об изменении электрических, фотоэлектрических и оптических свойств пленок a-Si:H при изменении структуры пленок в результате воздействия на них фемтосекундных лазерных импульсов. В то же время, подобные исследования представляют интерес для анализа возможности использования фемтосекундной лазерной кристаллизации для формирования слоев нанокристаллического кремния в tandemных солнечных элементах. Таким образом, цель данной работы состояла в изучении изменений как структурных, так и оптических и фотоэлектрических свойств пленок аморфного гидрогенизированного кремния в результате их облучения фемтосекундными лазерными импульсами, и в установлении корреляции этих изменений.

Пленки a-Si:H толщиной ~0.3 мкм были получены методом плазмохимического осаждения из газовой фазы смеси газов моносилана SiH₄ и аргона Ar при температуре кварцевой подложки 250°C в Физико-техническом Институте имени А.Ф. Иоффе (Санкт-Петербург). Обработка пленки a-Si:H фемтосекундными лазерными импульсами осуществлялась излучением Yb:KGW лазера с длиной волны 1030 нм и длительностью импульсов 300 фс. Использовался сканирующий метод обработки пленок a-Si:H со скоростью сканирования 5 мм/с. Диаметр лазерного пучка составлял 2 мкм. Шаг сканирования составлял 2 мкм. Плотность энергии лазерных импульсов изменялась от 0 до 60 мДж/см². Детальное описание методики облучения представлено в [5].

Для исследования поверхностей облученных пленок a-Si:H был использован метод атомной силовой микроскопии (АСМ). Микрофотографии АСМ показали наличие субмикронных шероховатостей на поверхности облученных пленок a-Si:H. При этом несмотря на 85 % перекрытие лазерного пучка при сканировании, распределение шероховатостей по поверхности пленок было неоднородным. Такая неоднородность может быть связана с гауссовым распределением плотности энергии в лазерном импульсе.

Структура облученных пленок a-Si:H была исследована методом спектроскопии рамановского рассеяния света. Спектры облученных пленок содержали два характерных максимума: вблизи 480 см⁻¹, соответствующего поперечным оптическим (ТО) фононным модам в структуре аморфного кремния, и вблизи 520 см⁻¹, соответствующего ТО фононам в кристаллическом кремнии. Для определения доли кристаллической фазы в пленках данные максимумы были численно аппроксимированы согласно формулам, представленным в [6]. Спектры исследованных пленок также содержали характерную линию вблизи 625 см⁻¹, приписываемую колебаниям Si-H связей. По изменению интегральной интенсивности данной линии была произведена оценка относительного изменения содержания водорода в пленках, облученных фемтосекундными лазерными импульсами с

различной плотностью энергии. Результаты характеризации исследованных пленок методом рамановской спектроскопии представлены на рис. 1. Как видно из рисунка, при увеличении плотности энергии лазерных импульсов доля кристаллической фазы в пленках увеличивается, содержание водорода при этом уменьшается.

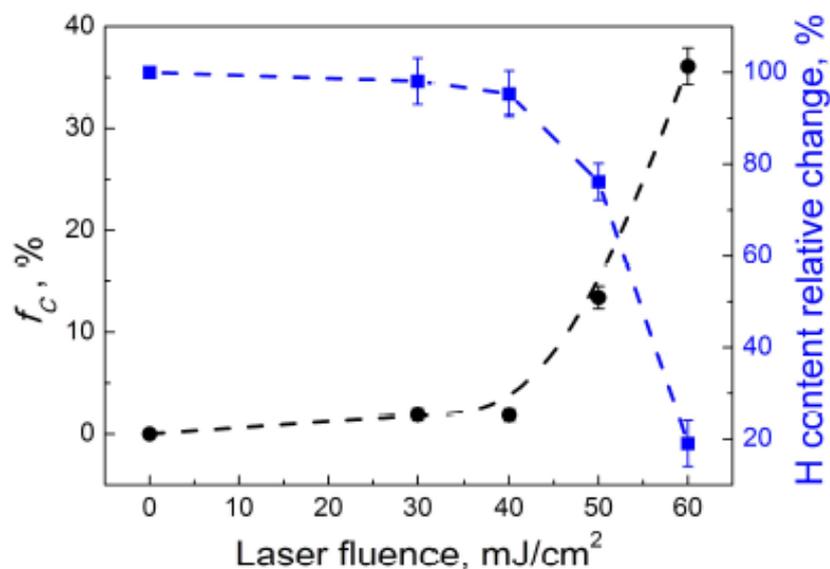


Рис. 1. Зависимость доли кристаллической фазы (черные круги, левая шкала) и относительного содержания водорода в пленке (синие квадраты, правая шкала) от плотности энергии лазерных импульсов.

При исследовании темновой проводимости полученных образцов был обнаружен резкий рост проводимости (на 6 порядка) для пленок, облученных лазерными импульсами с плотностью энергии более 50 мДж/см². Данный рост был связан с изменением пути переноса носителей заряда с аморфной части пленки на нанокристаллическую. Фотопроводимость исследованных образцов практически не изменилась. Спектральные зависимости коэффициента поглощения исследованных пленок имели вид характерный для a-Si:H. При этом обработка пленок лазерным излучением привела к увеличению относительного поглощения при энергиях квантов $h\nu < 1.4$ эВ, связанного с переходами носителей заряда в зону из состояний дефектов типа оборванных связей. Указанные результаты представляют большой интерес для практического применения фемтосекундной лазерной обработки пленок a-Si:H, например, в фотоэлектрических устройствах.

Работа была выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант # 12-02-33033). Авторы признательны О. И. Конькову за предоставление пленок нелегированного a-Si:H.

Литература

1. M.O. Thompson, G.J. Galvin, J.W. Mayer, et al., Phys. Rev. Lett. 52, 2360 (1984).
2. В.А. Володин, А. С. Качко, ФТП, **45**, 268 (2011).
3. В.К. Nayak, М.С. Gupta, Appl. Phys. A 89 663 (2007).
4. А.В. Емельянов, А.Г. Казанский, П.К. Кашкаров и др., ФТП 46, 769 (2012).
5. A.V. Emelyanov, A.G. Kazansky, M.V. Khenkin, et al., Appl. Phys. Lett. 101, 081902 (2012).
6. А.В. Емельянов, Е.А. Константинова, П.А. Форш, и др. Письма ЖЭТФ 97, 536 (2013).

ДЕФЕКТНО-ПРИМЕСНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ СТРУКТУРЫ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ЗАРЯДОВЫМИ НАСОСАМИ

Гостева Е.А.¹, Гусев В.А.², Старков В.В.³, Герасименко Н.Н.⁴

1) Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС"
Ленинский просп., 4, г. Москва

2) Севастопольский национальный технический университет ул.
Университетская, 33, г. Севастополь, Украина

3) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук (ИПТМ РАН) ул. Институтская, 6, ИПТМ РАН, г.Черноголовка, Московская область,

4) Национальный исследовательский университет «МИЭТ» проезд 4806, 5, Зеленоград, Москва
Gos-3@mail.ru

Разработка недорогих методов производства солнечных элементов (СЭ) с удовлетворительным КПД ($\geq 20\%$) на основе «солнечного» кремния и мультикремния, содержащих высокие концентрации структурных дефектов и остаточных примесей, требует уточнения механизмов транспорта фотогенерированных носителей заряда в материале с гетерогенно распределенными пространственными дефектами типа преципитатно-дислокационных комплексов или колоний (ПДК). Пространственная неоднородность рекомбинационно-генерационных свойств поглощающего излучение объема базы фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) затрудняет применение традиционной оценки характеристик СЭ с помощью усредненного значения времени жизни τ_{ef} и диффузионной длины L_{ef} . Большой размер пластин СЭ (до 200 см²) приводит дополнительно к макроскопической флуктуации характеристик СЭ в различных участках фронтальной поверхности [1]. Тем не менее, опыт производства и эксплуатации коммерческих СЭ наземного применения показал, что ФЭП, изготовленные из менее совершенных пластин «солнечного» кремния не только не уступают, но и превышают в некоторых случаях по эффективности преобразования СЭ из более совершенных монокристаллических пластин. Кроме того, например, при изготовлении ФЭП на основе RGS (Ribbon Growth on Substrate) процесса при значениях $L_{ef} \sim 20$ мкм для пленочного кремния наблюдается «аномально» высокая плотность тока короткого замыкания, более 30 мА/см², что характерно для СЭ на основе монокристаллического кремния с диффузионной длиной в десятки раз большее [2]. Эти факты свидетельствуют о том, что процесс коллектирования фотогенерированных носителей в структуре ФЭП не является исключительно диффузионным. Параллельно с диффузионным током, который доставляет носители к разделяющему р-п-переходу, аналогичную функцию выполняют и другие механизмы, например дрейфовый механизм тока по так называемым металлическим шунтам, а также коллектирующим токовым каналам (current collecting channels) [2, 3]. Наличие дрейфовой компоненты коллектирования фотогенерированных носителей тока значительно уменьшает время разделения и снижает рекомбинационные потери. Наиболее адекватное объяснение повышения эффективности СЭ содержится в предложенной физической теории фотоэлектрической конверсии в однопереходных ФЭП с зарядовыми насосами [4,5]. В качестве зарядовых насосов в структуре ФЭП могут быть встроенные локальные n^+ и p^+ области с плавающим потенциалом (в р- и п- базе соответственно), системы металл-полупроводник (барьер Шоттки), диэлектрик-полупроводник, МДП, локальные гетеропереходы, квантовые ямы,

квантовые нити и квантовые точки. В традиционной структуре n^+p-p^+ типа носители генерируются по всей толщине базы и диффундируют от тыльного электрода к фронтальному. При этом время пролета структуры с толщиной ≈ 200 мкм составляет единицы мкс. Если время жизни неравновесных носителей тока составляет менее 10 мкс, то приблизительно, третья часть фотовозбужденных носителей тока разделяется фронтальным переходом. Эта оценка приводит к значению КПД (9...12)%.

Время пролета электронами p -базы с зарядовыми насосами определяется диффузионным пролетом слоя W (неосновные носители) (рисунок 1) и временем дрейфа электронов (основных носителей) в n^+ -области толщиной h . Время заряда локальной n^+ -области генерируемым фотонапряжением составляет величину менее 10^{-10} с, поэтому основная инерционность обусловлена временем диффузии через слой W , составляющий десятые или сотые доли общей толщины базы d . Поэтому, по сравнению с традиционной структурой, время разделения зарядов снижается на полтора-два порядка, что существенно уменьшает рекомбинационные потери.

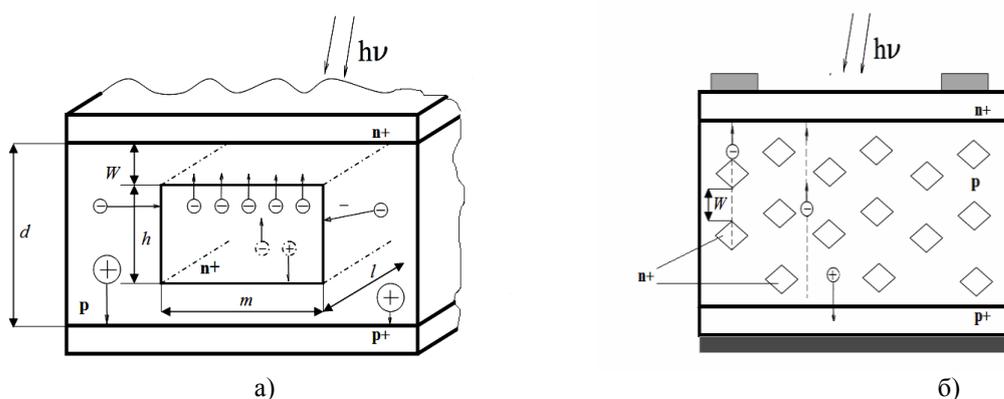


Рисунок 1. Фрагменты структуры элемента фотопреобразователя с зарядовым насосом: а) полосково-столбчатого типа; б) с дискретной топологией

Проведенные в [5] оценки показывают, что в структуре, у которой половина площади (объема) занята зарядовыми насосами с $W=0,1d$, а другая имеет толщину p -базы d , эффективность возрастает с 15% до 21% при одинаковых рекомбинационных свойствах. При увеличении объема, занятого зарядовыми насосами до $0,7 V_0$, КПД возрастает до 23,4 %. Форма зарядовых насосов может быть различной: столбчатого вида, полоскового, дискретного. Топология размещения насосов в p -базе должна обеспечить малое последовательное сопротивление R_s тыльного электрода («булка с изюмом» рисунок 1б). Для этого по высоте дискретные элементы должны быть расположены вдоль перпендикуляров к тыльной поверхности (колоннами, столбами) с суммарной толщиной вертикальных зазоров $(0,1...0,2) d$. Токотенос в такой структуре будет обеспечиваться двумя потоками: диффузией электронов в объеме p -базы с толщиной d и параллельно дрейфом электронов в n^+ -областях насоса с последовательной инжекцией и диффузией через зазор p -базы (W_i) вплоть до коллектирующей фронтальной n^+ -области, формирующей внешнюю фотоэдс.

В качестве практических примеров влияния зарядовых насосов на характеристики СЭ в работе обсуждаются два способа формирования зарядовых насосов.

Прежде всего, это методика создания структуры полосково-столбчатого типа (рис.1а) с помощью формирования n^+ -областей локальным введением в область p -базы быстро диффундирующей примеси Li . Введение в структуру ФЭП зарядовых насосов по предложенной схеме позволяет увеличить величину тока короткого замыкания с $I_{кз} = 274$ мА у исходной структуры до $I_{кз} = 354$ мА в структуре СЭ с

зарядовыми насосами (СЭЗН). Величина напряжения холостого хода у исходных структур $U_{xx} = 0,565$ В и несколько выше для СЭЗН структур, $U_{xx} = 0,577$ В [6].

В качестве другого способа создания структуры СЭЗН рассматривается схема формирования n^+ -областей в объёме кремния локальным фотонным отжигом (ЛФО). Представлены результаты влияния ЛФО на световые вольт амперные характеристики кремниевых ФЭП с различным конструктивно-технологическим исполнением.

Литература:

1. Рейви К.// Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии — М.: Мир, 1984. .475 с.
2. T. Buonassisi, O. F. Vyvenko, A. A. Istratov, et al.// Journal of Applied Physics. V.95. N.3. 2004. P.1556-1558.
3. T. Buonassisi, O. Vyvenko, A. Istratov, et al.// Assessing the role of metals in shunting mechanisms using synchrotron-based techniques. World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-3), Osaka, Japan (2003). P.1-4.
4. Гусев В.А., Старков В.В.// Солнечные элементы с зарядовой подкачкой. XII Международная конференция «Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности». 10 декабря 2011г., Санкт-Петербург. Сб. статей. том 2, стр. 157-158 .
5. Гусев В.А., Старков В.В., Шоферистов С.Е.// Повышение эффективности фотопреобразователей с зарядовыми насосами. Вестник СевНТУ: сб. научн. трудов Сер. Информатика, электроника, связь: сб. научн. трудов Вып. 131, 2012, стр.102-107.
6. Гусев В.А., Старков В.В., Тетерский А.В. // Солнечные элементы с зарядовой подкачкой: теоретические перспективы и технологические аспекты применения. IX Международная конференция КРЕМНИЙ-2012, Санкт-Петербург, 9-13 июля 2012, стр.126-127.

ИЗУЧЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ ПРОПУСКАНИЯ ПЛЕНОК АМОРФНОГО ГИДРОГЕНИЗИРОВАННОГО КРЕМНИЯ

Севастьянов М.Г.¹, Шульгин Д.А.¹, Матухин В.Л.¹, Лобков В.С.²,
Шмелев А.Г.², Леонтьев А.В.², Теруков Е.И.³, Бобыль А.В.³

¹ Казанский государственный энергетический университет,

² Казанский физико-технический институт

Казанского научного центра Российской академии наук,

³ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,

sebas87@mail.ru

Плётки аморфного гидрогенизированного кремния широко используются в солнечной энергетике и при создании различных тонкоплёночных оптоэлектронных и электронных приборов. Основной метод получения таких плёнок – плазмохимическое разложение смеси моносилана с инертными газами. В частности при формировании плёнок nc -Si:H используется смесь моносилана с водородом с различным процентным соотношением [1], в результате чего получают плётки с двухфазной структурой, состоящей из аморфной и нанокристаллической фазы. Это подтверждается исследованиями с использованием техники просвечивающей электронной микроскопии [2] и рамановской спектроскопии [3]. Варьируя соотношение газов, можно изменять процентное содержание той или иной фазы [4].

Важнейшими параметрами тонкоплёночных материалов являются коэффициент амбиполярной диффузии и время релаксации неравновесных носителей заряда, информацию о которых можно получить из исследований методами фемтосекундной спектроскопии [5]. В данной работе для измерения коэффициента диффузии неравновесных носителей применялся метод наведённой решётки, способный селективно создавать и затем исследовать флуктуации зарядовой плотности [6].

Плёнки аморфного гидrogenизированного кремния толщиной 200 – 400 нм были получены в Физико-техническом институте им А.Ф. Иоффе Российской академии наук (Санкт-Петербург, Россия) при плазмохимическом разложении смеси моносилана с водородом в плазме высокочастотного тлеющего разряда (PECVD) при температуре стеклянной подложки 250°C.

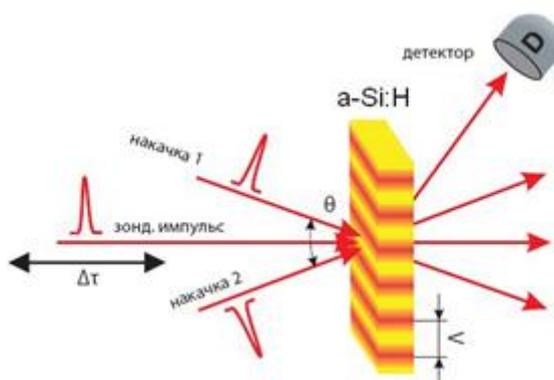


Рис. 1. Схема наблюдения дифракции лазерного импульса на наведённой решётке населённости.

Исследуемые плёнки отличались типом проводимости: одна из плёнок имела собственный тип проводимости (i-a-Si:H), другая – электронный тип проводимости (a-Si:H n-тип). Для получения информации о размере кристаллической фазы в образцах использовались методы сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Информация о коэффициенте диффузии получалась из экспериментов, проводимых по методике дифракции пробного луча на наведённой в образце дифракционной решётке [7]. Два лазерных импульса, падая одновременно на образец, интерферируют, создавая тем самым периодическую пространственную модуляцию плотности частиц в возбуждённом состоянии (Рис. 1.). Период такой наведённой «решётки» Λ зависит от длины волны возбуждающего света λ и угла θ через соотношение $\Lambda = \lambda / 2 \sin (\theta/2)$. Третий импульс, задержанный относительно первых двух на время Δt , дифрагирует на этой наведённой дифракционной решётке. Регистрируя интенсивность продифрагировавшего зондирующего луча в зависимости от времени его задержки Δt , можно отслеживать процесс «затухания» наведённой решётки. В предположении, что процесс «затухания» обусловлен в основном процессами релаксации и диффузии носителей заряда, скорость разрушения решётки выражается через Λ следующим образом:

$$\frac{1}{T_{gr}} = \frac{8\pi^2}{\Lambda^2} D + \frac{2}{T_r}, \quad (1)$$

где T_r – время жизни носителей заряда в возбуждённом состоянии (время жизни уровня), D – коэффициент диффузии носителей, T_{gr} – время спада сигнала дифрагирующего пучка. Таким образом, построив график зависимости скорости распада решётки $(T_{gr})^{-1}$ от величины $8\pi^2\Lambda^{-2}$, по тангенсу угла наклона можно определить коэффициент диффузии, а экстраполировав эту зависимость до нулевого значения по оси абсцисс, можно определить T_r . Для построения такой зависимости необходимо изменять период дифракционной решётки Λ . Для этого надо изменять

угол между падающими лучами θ , что можно осуществить сменой линзы с другим фокусным расстоянием.

В нашем эксперименте в качестве источников фемтосекундных лазерных импульсов использовался титан-сапфировый лазер (Cascade, Картеун-Murnane Laboratories Inc или Finessee 4, Laser Quantum Ltd). Импульсы длительностью порядка 60 фс имели спектр шириной порядка 20 нм с максимумом интенсивности на длине волны 790 нм, интегральная интенсивность импульса варьировалась в пределах 260 – 700 ГВт/см².

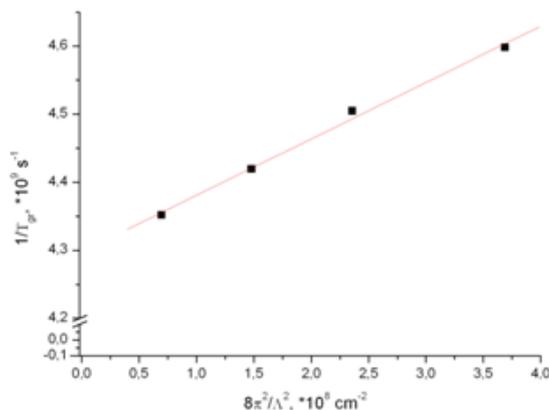


Рис. 2. Зависимость скорости распада наведённой решётки от периода решётки для плёнки i-a-Si:H

При исследовании дифракции на наведённой решётке было обнаружено, что график зависимости интенсивности дифрагирующего луча от времени задержки пробного импульса имеет два характерных времени спада τ_1 и τ_3 .

Согласно (1), тангенс угла наклона аппроксимирующей прямой к оси абсцисс равен коэффициенту диффузии, а длина отрезка, отсекаемого этой прямой на оси ординат, определяет скорость релаксации $(T_r)^{-1}$. Вычисленные таким способом характеристики плёнок представлены в таблице 1. Используя полученные значения коэффициента диффузии, можно оценить подвижности носителей заряда: μ (i-a-Si:H) = 400 см²/В·с, μ (a-Si:H n-тип) = 40 см²/В·с. Полученное значение подвижности носителей заряда для образца с собственным типом проводимости (i-a-Si:H) оказалось близким к верхней границе диапазона (10-20 см²/В·с), указанного в литературе [8].

Таблица 1. Электронные характеристики плёнок

Тип плёнки	i-a-Si:H	a-Si:H n-тип
Время релаксации (T_r), пс	1040±75	465±20
Коэффициент диффузии (D), см ² /с	0,54±0,04	0,083±0,01

Литература

1. А.Г. Казанский, Е.И. Теруков, П.А. Форш, М.В. Хенкин. ФТП, **45**, 518 (2011).
2. D.V. Tsu, B.S. Chao, S.R. Ovshinsky, S.J. Jones, J. Yang, S. Guha, R. Tsu. Phys. Rev. B, **63**, 125 338 (2001).
3. S. Muthamann, F. Kohler, R. Carius, A. Gordijn. Phys. Status Solidi A, **207**, 544 (2010).
4. A.G. Kazanskii, G. Kong, X. Zeng, H. Hao, F. Liu. J. Non-Cryst. Sol., **354**, 2282 (2008).
5. С.Ф. Галяутдинов, В.С. Лобков, С.А. Моисеев, И.В. Неграшов. ФТП, **35**, 1428 (2001).
6. N. Gedik, J. Orenstein. Optics Lett., **29** (18), (2004).
7. Woerdman. Opt. Commun., **2** (5), 212 (1970).
8. J. Poortmans, V. Arkhipov, Thin film solar cells fabrication, characterization and applications, Chichester, England, John Wiley & Sons Ltd, 2006, 184.

НАПРАВЛЕНИЕ
«Фотоэлектрические преобразователи на основе тонких пленок
халькогенидов и оксидов металлов»

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ФОТОЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО
ПОЛУЧЕНИЯ ВОДОРОДА

Иванов А.В.
г. Чебоксары, ФГБОУ ВПО «ЧГПУ им. И.Я. Яковлева»
alexputen@rambler.ru

Гематит является перспективным материалом для недорогого преобразования солнечной энергии с помощью расщепления воды, но он ограничен большим перенапряжением (0,5-0,6 V), которое должно быть приложено для получения высокого фототока разложения воды. В работе исследуются подходы для значительного снижения перенапряжения. Используя данные, полученные для гематитовых электродов, на которые при помощи атомного осаждения слоев наносился тонкий слой оксида [1], мы создали компьютерную модель такого электрода.

Процедура моделирования электрода разбивалась на несколько этапов. На первом этапе в программе *HyperChem* создавалась кристаллическая структура гематита на основе данных, полученных при помощи монокристаллического дифрактометра [2].

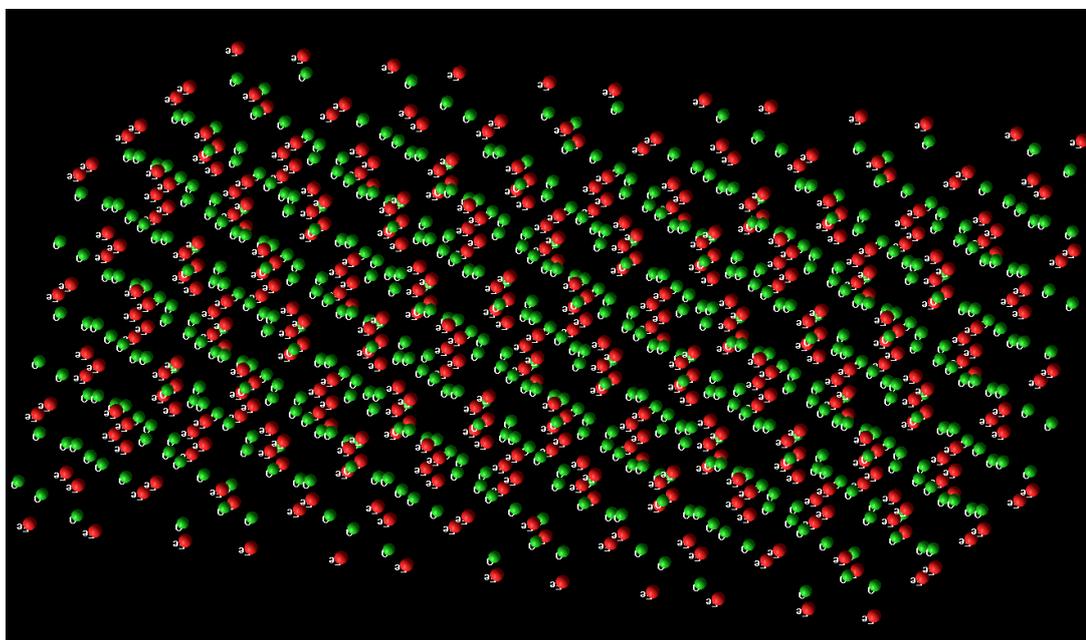


Рисунок 1. Кристаллическая структура гематита (зеленым цветом обозначен кислород, красным - железом).

На втором этапе на полученную модель накладывалось 3 слоя молекул корунда. Полученная структура помещалась в воду и координаты такой системы сохранялись в отдельном файле. На третьем этапе в свободном пакете для классической молекулярной динамики *LAMMPS* (*Large-scale Atomic/Molecular Massively Parallel*

Simulator), используя полученные координаты системы, моделировалось взаимодействие молекул воды со структурой гематит-корунд. Подбирался согласованный набор межатомных потенциалов, позволяющий корректно воспроизвести структурные и термодинамические характеристики всех чистых компонентов изучаемой системы.

Параметры самосогласованных между собой парных потенциалов уточнялись с использованием структур и термодинамических свойств чистых компонентов. Короткодействующие вклады в парные потенциалы были выбраны в форме алгебраической суммы потенциалов Морзе (1) и Букингема (2) [3]:

$$V_M = D_{ij} \left\{ 1 - e^{-\beta_{ij}(R_{ij}^0 - R_{ij})} \right\}^2 - D_{ij}, \quad (1)$$

$$V_B = \lambda_{ij} e^{-\frac{R_{ij}}{\rho_{ij}}} - \frac{C_{ij}}{R_{ij}^6}, \quad (2)$$

где λ_{ij} и D_{ij} являются эмпирическими параметрами, R_{ij} – расстояние между парой атомов; R_{ij}^0 – оптимальное для данной атомной пары расстояние. Параметр мягкости потенциала Морзе β_{ij} и параметр жесткости потенциала Букингема ρ_{ij} определяют характер взаимодействия атомов, образующих химическую связь, но также могут быть уточнены в процессе оптимизации. Член C_{ij}/R_{ij}^6 уравнения (2) описывает дисперсионное взаимодействие. Энергия сцепления выражается как сумма кулоновского взаимодействия и всех парных потенциалов. Эффективные заряды атомов также являются дополнительными полуэмпирическими параметрами, которые оптимизировались при выборе модели потенциала с учетом электронейтральности элементарной ячейки.

На четвертом этапе планируется создание в полученной системе электрического поля и моделирование процесса электролиза. Варьируя количество слоев корунда подобрать наилучшие условия для электролиза воды.

На пятом этапе предполагается моделирование облучения данной системы солнечным излучением. Солнечное излучение может быть заменено бомбардировкой поверхности корунда ионами или электронами.

В данной работе моделируется структура гематита с тонким слоем оксида в рамках молекулярно-динамического и континуального подхода. Рассчитываются свойства поверхности и особенности ее взаимодействия с ионами, растворенными в водной среде. Выясняются критерии обработки поверхности моделируемой структуры, влияющие на снижение перенапряжений.

Литература

1. Florian Le Formal, Nicolas Tetreault, Maurin Cornuz, Thomas Moehl, Michael Gratzel, Kevin Sivula // *Chemical Science*, 2011, № 2, pp. 737-743.
2. R. L. Blake, R. E. Hessevick, Tibor Zoltai, Larry W. Finger // *The American Mineralogist*, 1966, vol. 51, pp. 123-129.
3. Н. Н. Еремин, Р. А. Талис, В. С. Урусов // *Кристаллография*, 2008, том 53, № 5, с. 802-810.

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ТОНКИХ ПЛЕНОК ОКСИДА КАДМИЯ (CdO)

Белова А.В., Кокшина А.В., Петров Д. В., Кочаков В.Д.
Чебоксары, ЧГУ имени И.Н. Ульянова
sevenzvetov@yandex.ru

Интерес к прозрачным электропроводящим оксидам возник в середине 60-х годов и не ослабевает до настоящего времени. Прозрачные электропроводящие оксиды используются в качестве электродов в дисплеях на жидких кристаллах, фотодиодах, солнечных батареях и других устройствах.

Число известных токопроводящих широкозонных оксидов невелико. Наиболее широко известными являются оксид индия и оксид олова. Оба материала имеют n-тип проводимости и оптическую ширину запрещенной зоны $\Delta E > 3\text{эВ}$. Оксид кадмия представляет собой малоисследованный материал. Он является широкозонным полупроводником класса A_2B_6 , и его свойства отличаются от свойств широко применяемых оксидов [1]. В зависимости от условий и методов получения, ширина запрещенной зоны данного полупроводника принимает значения от 2,3 до 2,7 эВ [2].

В работе [1] были исследованы пленки CdO, полученные магнетронным распылением кадмиевой мишени в смеси азота с кислородом. Спектры пропускания и отражения данных пленок CdO были измерены на двулучевом спектрофотометре. Эти зависимости показаны на рисунке 1. На рисунке представлена зависимость коэффициента отражения от длины волны. Значения коэффициента отражения R не одинаковы при разных λ , что является следствием интерференции света в пленках CdO. Ширина запрещенной зоны была определена оптическим методом и составила $\Delta E_g = 2.5\text{эВ}$.

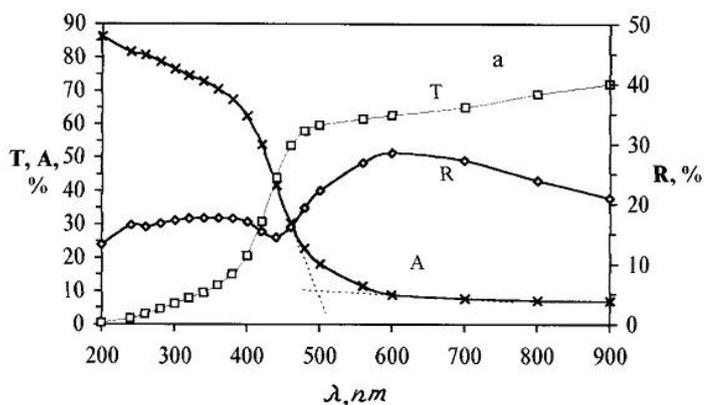


Рисунок 1. Зависимости пропускания T, отражения R и поглощения A от длины волны падающего света λ [1].

Целью данной работы являлось получение и исследование тонких пленок оксида кадмия, полученных методом термического испарения.

Пленки Cd получали следующим образом: на подложку из кремния или стекла термическим испарением в вакууме наносилась пленка Cd. Затем эти пленки отжигались в атмосфере воздуха в вакуумной печи при температуре $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 25 минут.

Оптические свойства исследовали на образцах, нанесенных на подложку из стекла. Спектры пропускания и отражения были получены с помощью спектрального эллипсометра. Графики этих спектров приведены на рисунке 2.

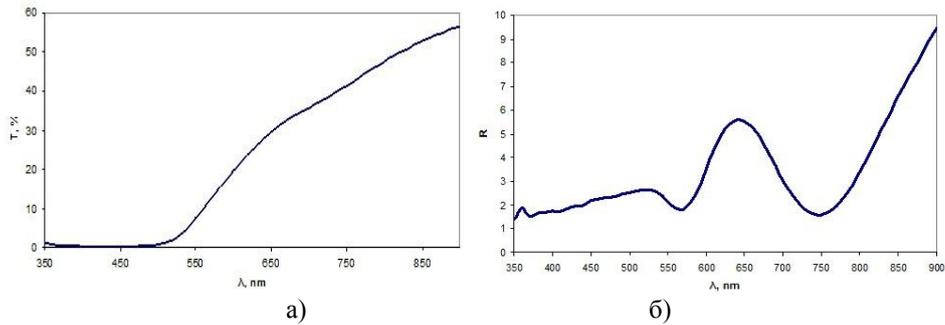


Рисунок 2. Спектры пропускания (а) и отражения (б) пленки CdO

Так как на спектре отражения (рисунок 2(б)) для данного образца присутствует интерференция, была определена толщина пленки, приблизительно равна $d=210$ нм.

По спектру, изображенному на рисунке 2 (а) видно, что полученная пленка полупрозрачна и начинает пропускать электромагнитное излучение с длиной волны $\lambda > 500$ нм.

Для определения ширины запрещенной зоны был построен график зависимости $(\alpha \cdot h\nu)^2$ от $h\nu$ [3], рисунок 3. По касательной к графику на ось x была определена ширина запрещенной зоны. Оптическая ширина запрещенной зоны составила 2,28 эВ.

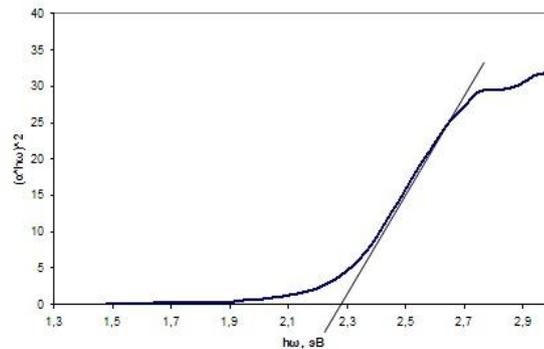


Рисунок 3. Определение ширины запрещенной зоны пленки CdO

Для изучения электрофизических свойств исследовались образцы, нанесенные на кремний n-типа проводимости. Были сняты зависимость сопротивления от температуры, вольт-амперные характеристики (ВАХ) данных образцов, а также исследована их фоточувствительность.

Графики зависимости сопротивления от температуры (рисунок 4 (а)) и ВАХ (рисунок 4(б)) показывают, что полученная нами пленка обладает полупроводниковыми свойствами. Кроме того, система CdO обладает фоточувствительностью, что показано на рисунке 5.

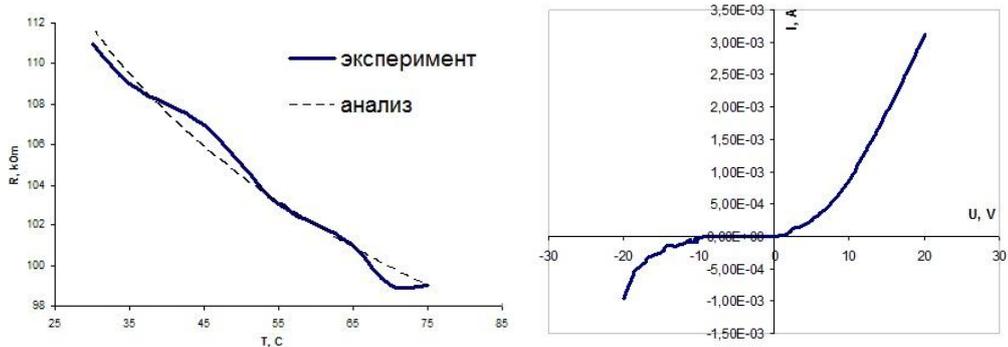


Рисунок 4. а) график зависимости сопротивления от температуры и б) вольтамперная характеристика CdO

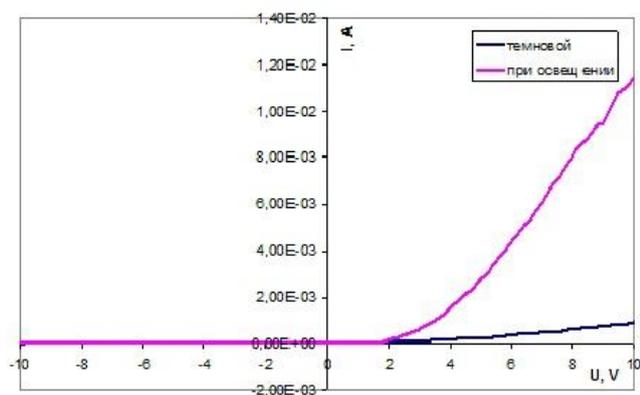


Рисунок 5. Фотоотклик пленки CdO

Топография поверхности была прописана на зондовом микроскопе Solver Next (рисунок 6).

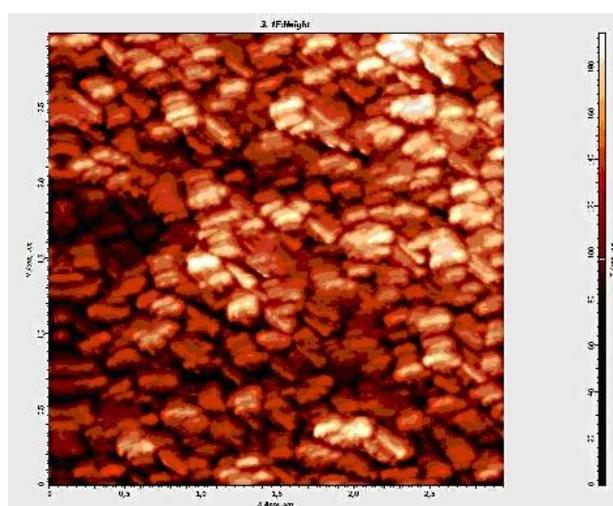


Рисунок 6. Топология поверхности пленки CdO

Таким образом, в ходе исследования были рассмотрены основные характеристики тонких пленок CdO. Пленка имеет поликристаллическую структуру. Полученный оксид кадмия является прямозонным широкозонным полупроводником, с шириной запрещенной зоны 2,28 эВ, что соответствует литературным данным. Толщина пленки составляет примерно 200 нм.

Данные пленки могут быть использованы в качестве прозрачных электродов, антиотражающих покрытий в фотоэлектрических преобразователях, солнечных элементов и других оптоэлектронных устройствах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. А.М. Баранов, Ю.А. Малов Исследование свойств CdO.// Письма в ЖТФ, том 23, № 20, 70-74 с., 1997
2. Ю.А. Загоруйко, Н.О. Коваленко Текстурированные пленки CdO, полученные методом фототермического окисления.// Письма в ЖТФ, том 33, № 4, 51-57 с., 2007
3. Василевский А.М. Оптико-физические методы исследований: методические указания к лабораторным работам / А.М. Василевский, Г.А. Коноплев, М.Ф. Панов. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ТОНКИХ ПЛЕНОК SnTe И PbTe

Кокшина А.В., Шедиков Р.В.
Чебоксары, ЧГУ имени И.Н. Ульянова
annika21@mail.ru

Полупроводниковые вещества класса A^2B^6 и A^4B^6 либо уже нашли применение, либо являются перспективными материалами для детекторов и источников ИК-излучения, термоэлектрических элементов, солнечных батарей, элементов памяти и т.д. Теллуриды свинца и олова представляют из себя узкозонные прямозонные полупроводники группы A^4B^6 с шириной запрещённой зоны 0.32 эВ и 0.18 эВ соответственно, традиционно применяемые для создания фоторезисторов, работающих в инфракрасной области спектра и элементов термогенераторов [1].

В данной работе были исследованы электрооптические свойства тонких пленок SnTe и PbTe. Тонкопленочные бинарные системы PbTe и SnTe были получены методом твердофазного синтеза в печи МИМП-ВМ при температуре 350 °С. Пленки были исследованы методами спектрофотометрии, эллипсометрии и вольтамперометрии.

Спектры пропускания и отражения для PbTe представлены на рисунке 1.

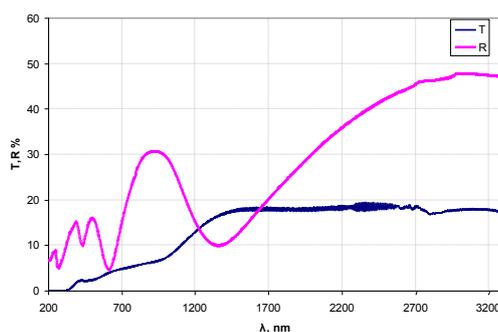


Рисунок 1. Спектры пропускания и отражения для пленки PbTe.

По интерференции на спектре отражения PbTe была определена толщина пленки, которая составила 120 нм.

Ширина запрещенной зоны была определена по методике, описанной в [2]. Проведя касательную к наиболее линейному участку графика, мы вычисляем значение ширины запрещенной зоны.

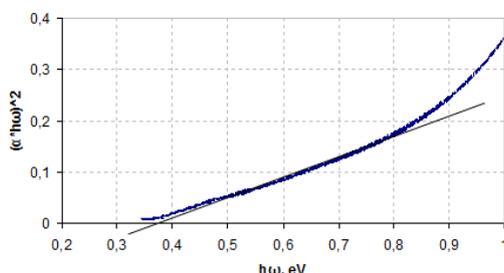


Рисунок 2. Определение ширины запрещенной зоны пленки PbTe

По рисунку 2 видно, что ширина запрещенной зоны данной системы составляет $\Delta E_g=0,37$ эВ.

Спектры пропускания и поглощения пленки SnTe показаны на рисунке 3.

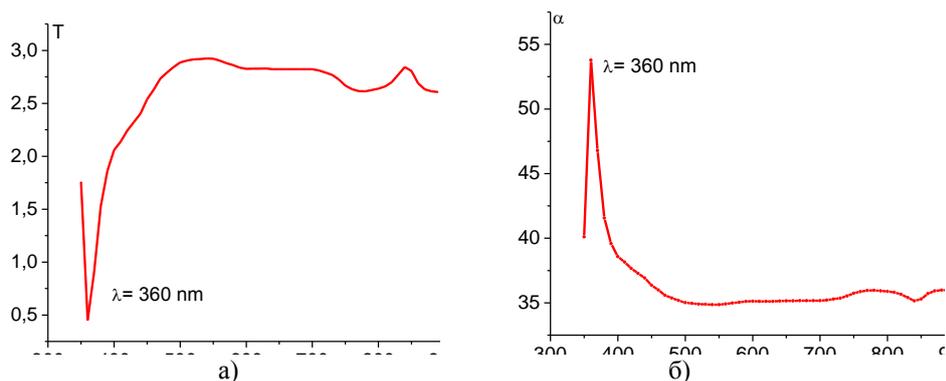


Рисунок 3. Спектры пропускания (а) и поглощения (б) пленки SnTe

Из рисунка видно, что у данной системы существует пик поглощения на длине волны 360 нм.

Так как граница поглощения лежит в ультрафиолетовой области и спектральный диапазон спектроэллипсометра не позволяет определить ширину запрещенной зоны оптическим методом, то для расчета данного параметра были проведены исследования зависимости сопротивления от температуры. Ширина запрещенной зоны для SnTe составила $\Delta E = 0,23$ эВ, что практически совпадает со значениями, описанными в литературе.

Вольтамперные характеристики исследуемых образцов были сняты при помощи цифрового мультиметра KEITHLY.

Данные образцы были исследованы на фоточувствительность. Исследования показали, что пленка PbTe обладает незначительной чувствительностью к видимой области спектра (рисунок 4(а)).

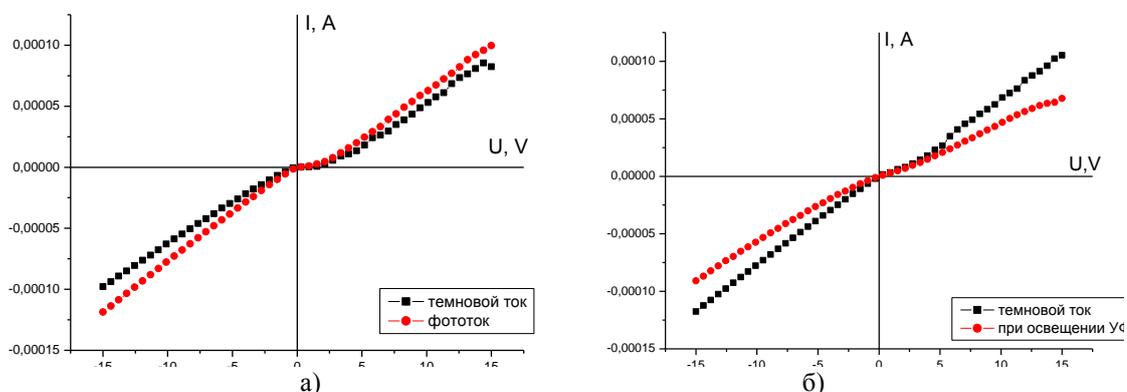


Рисунок 4. Изменение вольтамперных характеристик PbTe при освещении образца светом в видимой (а) и в УФ (б) области спектра.

На рисунке 4(б) приведено изменение ВАХ исследуемого образца в ближнем Уф диапазоне длин волн при освещении образца ртутно-кварцевой лампой ДКБ-9 с рабочим диапазоном длин волн 205-400 нм. Из рисунка видно, что данная система является чувствительной к ультрафиолетовому диапазону длин волн и может быть использована для детектирования ультрафиолета.

Вольтамперные характеристики пленки SnTe носят металлический характер. Об этом свидетельствует рисунок 5(а). Данная пленка также оказалась чувствительной к УФ диапазону длин волн, что показано на рисунке 5(б).

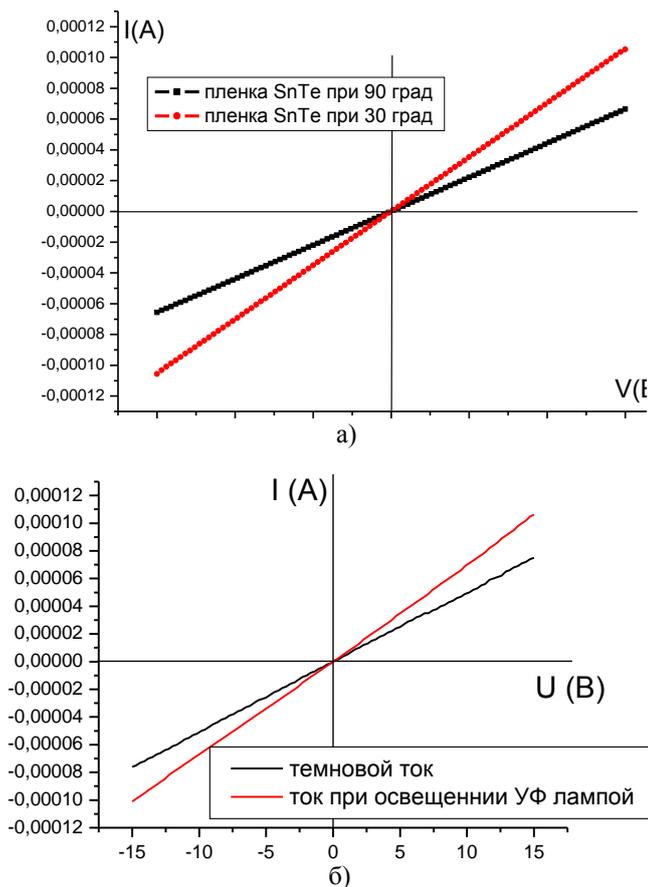


Рисунок 5. а) вольтамперная характеристика пленки SnTe при изменении температуры; б) изменение вольтамперных характеристик SnTe при освещении ртутно-кварцевой лампой ДКБ-9

Таким образом, при исследовании образцов на фоточувствительность при освещении источниками света с различными рабочими диапазонами длин волн у пленок PbTe и SnTe была обнаружена чувствительность к ультрафиолетовому диапазону длин волн. Также обнаружена незначительная чувствительность пленки PbTe к видимому диапазону длин волн.

Ранее в литературе не сообщалось о наличии у SnTe и PbTe чувствительности к УФ диапазону длин волн, что может говорить об актуальности дальнейших исследований в данном направлении.

Данные пленки могут быть применены для создания детекторов УФ излучения.

Литература:

1. Чижиков Д.М., Счастливый В.П. Теллурид и теллуриды М.: Наука.- 1966. - 278 с.
2. Василевский А.М., Коноплев Г.А., Панов М.Ф. Оптико-физические методы исследований: Лабораторный практикум по дисциплине «Оптико-физические методы исследований».- СПб.: Изд. СПбГЭТУ «ЛЭТИ».- 2011.- 96 с.
3. Белова А.В., Кокшина А.В., Кочаков В.Д. Исследование электрофизических свойств полупроводниковых тонких пленок: методическое пособие». Электронное издание №0321203867., Москва, 2012

СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ ТОНКОПЛЕНОЧНОЙ БИНАРНОЙ СИСТЕМЫ PbSe

Краснова А.Г.
г. Чебоксары, ЧГУ им. Ульянова
aliska816@mail.ru

Одним из наиболее перспективных направлений является получение солнечной энергии. В последнее время для изготовления фотоэлементов стало возможным использование новых материалов.

Целью работы является исследование электрооптических свойств бинарной тонкопленочной полупроводниковой системы PbSe, которые должны привести к созданию новых материалов для изготовления солнечных элементов. Двухслойные плёночные образцы Pb-Se были получены в вакууме термическим осаждением на стеклянные подложки с последующим отжигом в атмосфере азота при 250⁰С.

С помощью атомно-силового микроскопа были исследованы топографии поверхности образцов (рис. 1). Анализ изображений показывает, что структура поверхности пленочной системы Pb-Se микрокристаллическая, средний размер кристаллитов равен 0,2 мкм.

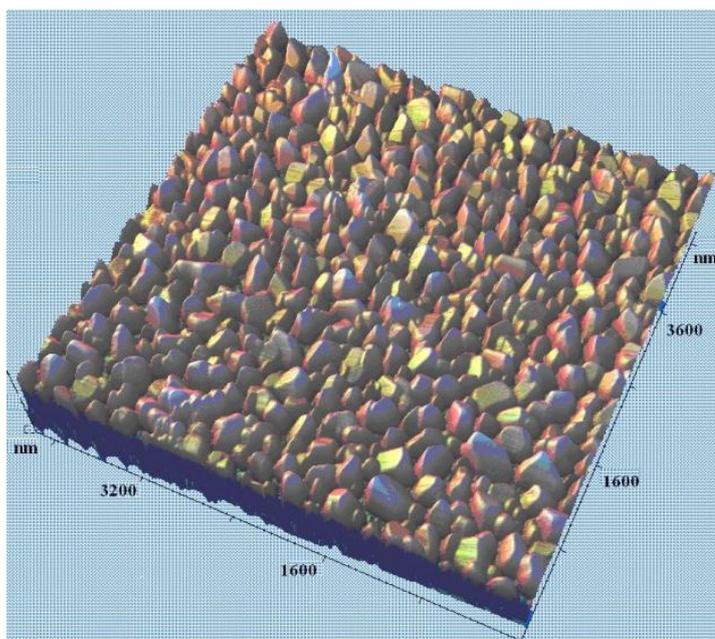


Рисунок 1. Микрокристаллическая структура пленочной системы Pb-Se после отжига в атмосфере азота при 250⁰С

Определена величина ширины запрещенной зоны образцов по краю собственного поглощения – $\Delta E=0,43$ эВ.

В работе исследовались температурные зависимости сопротивления резисторных структур на основе тонкопленочной системы PbSe. (рис. 2). Эксперимент показал зависимость присущий позистору.

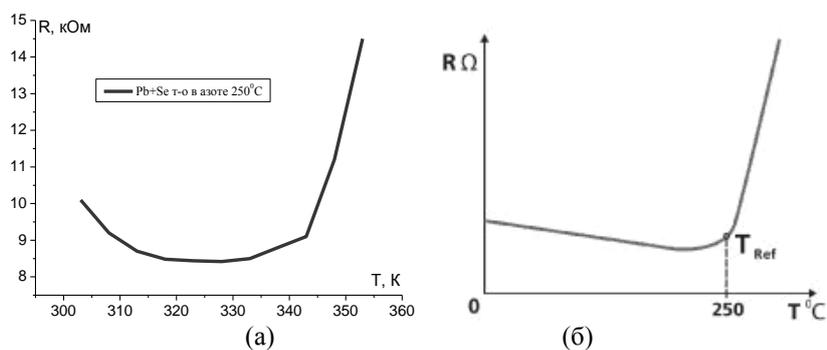


Рисунок 2. Зависимость сопротивления (а) бинарной системы PbSe и (б) зависимость [1] от температуры.

Вольтамперная характеристика данной системы имеет выраженный нелинейный характер как у позистора.

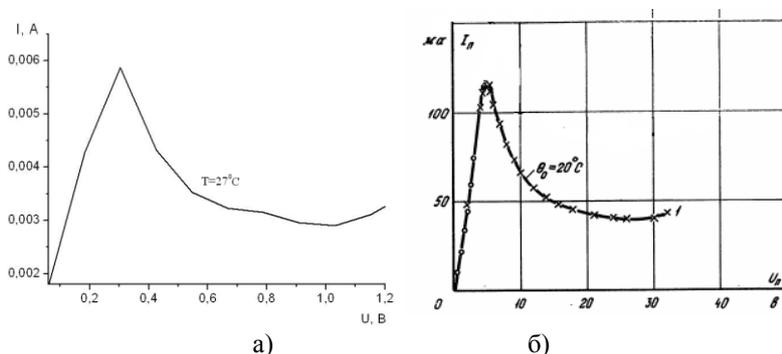


Рисунок 2. Вольтамперные характеристики бинарной системы Pb-Se (а) и позистора СТ-5 (б) [2]

Таким образом, создан наноструктурированный материал на основе тонкопленочной полупроводниковой системы PbSe с позисторными характеристиками, который можно применить как датчик температуры в системах мониторинга солнечных электростанциях.

Литература

1. <http://gtp41.blog.ru/?page=2>
2. Минкин С.Б., Шашков А.Г. Позисторы. М., «Энергия», 1973, С.-55

НАНОПРОФИЛИ ДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ ОКСИДА И НИТРИДА АЛЮМИНИЯ В АЗОТСОДЕРЖАЮЩЕМ ПЛАМЕНИ

Лепаев А. Н., Ксенофонтов С. И.
 Чебоксары, ФГБОУ ВПО «Чувашский государственный педагогический университет им. И. Я. Яковлева»
lepaev@mgou.infanet.ru

При пламенном горении углеводородов в диффузионном режиме наблюдается образование сажи. В сажистых частицах выделяют нанотрубки, фуллерены, линейно-цепочный углерод и другие образования.

В пламени конденсированных систем на основе углеводорода и окислителя с добавками металлов кроме названных частиц образуются оксиды, хлориды, фториды,

карбиды. При беспламенном горении СВС – методе синтезируются новые вещества и это направленные в горении получило самостоятельное развитие.

При горении металлического алюминия с кислородсодержащим окислителем в продуктах сгорания образуются частицы оксида алюминия. Образование других конденсированных частиц почти не наблюдается. Хлориды и фториды алюминия при температуре пламени находится в парообразном состоянии [1-3]. В последнее время появились новые работы, где описывается горение нанопорошков алюминия в воздухе с образованием нитридов алюминия [4,5]. В обзорных работах по горению металлов [1,2] об образовании нитридов металлов в пламенах порохов с добавками металлов или ракетных топлив не отмечалось.

В данной работе изучалось горение металлизированного алюминия в пламени пиропорохового состава. Компонентный состав пиропорохового образца: пироксилин 52 %, KNO_3 – 15%, порошок алюминия марки ПА-2 – 25%, порошок магния марки МПФ-4 – 8%, технологические добавки – 2%. Механическая смесь запрессовывалась в картонную оболочку диаметром 20 мм под удельным давлением 1500 кг/см^2 . Горение образцов проводилось при комнатных условиях. Газовая составляющая пламени, образующееся в основном при горении пироксилина выносит в пламя частицы металла и окислителя. Диспергирование зависит от скорости газификации пироксилина и упаковки частиц металла и окислителя в пироксилине при прессовании.

Температура поверхности горения пироксилина составляет 500-600К, максимальная температура в пламени при атмосферном давлении равна 2300К [1]. На поверхности горения состава частицы алюминия не воспламеняются, а окислителя – начинают газифицироваться. В таких условиях частица металла, находясь на поверхности горения конденсированной фазы или двигаясь в потоке, покрывается слоем оксида. Утолщенный слой оксида уменьшает скорость горения металла [3]. В более высокотемпературных зонах пламени частица металла может воспламениться. Магний, добавленный в небольших количествах, поддерживает температуру пламени пироксилина, то есть восполняет тепловые потери, вызванные разогревом частиц алюминия.

Горение алюминия происходит как в среде кислорода, так и в соединениях азота. При горении пироксилина, разложении нитрата калия и инжантированный воздух создают достаточную концентрацию азота. В такой среде возможно появление дисперсных частиц как оксидов, так и нитридов алюминия. Оптические свойства частиц оксида и нитрида сильно отличаются. Например, частицы оксида алюминия в таком пламени находятся в виде круглых частиц неправильной конфигурации. Частицы же нитрида алюминия находятся в жидком состоянии и при контакте с поверхностью пробоотборника застывают в виде прозрачных капель. Показатель преломления нитрида алюминия [6] очень близок показателю преломления тела пробоотборника. При изучении под оптическим микроскопом такие частицы не обнаруживаются (рис.1а). В поляризованных лучах на просвет тот же участок пробоотборника оказывается усеянный множеством дисперсных частиц (рис. 1б).

Также не безынтересно наблюдать дисперсные частицы и состояние их поверхности при горении одиночной крупной частицы. Фотография участка пробоотборника с крупной частицей приведена на рис.1в. Точками 1,2,3 указаны координаты исследуемых областей, проведенных на атомно-силовом микроскопе «Nano Educator» типа NT-MDT.

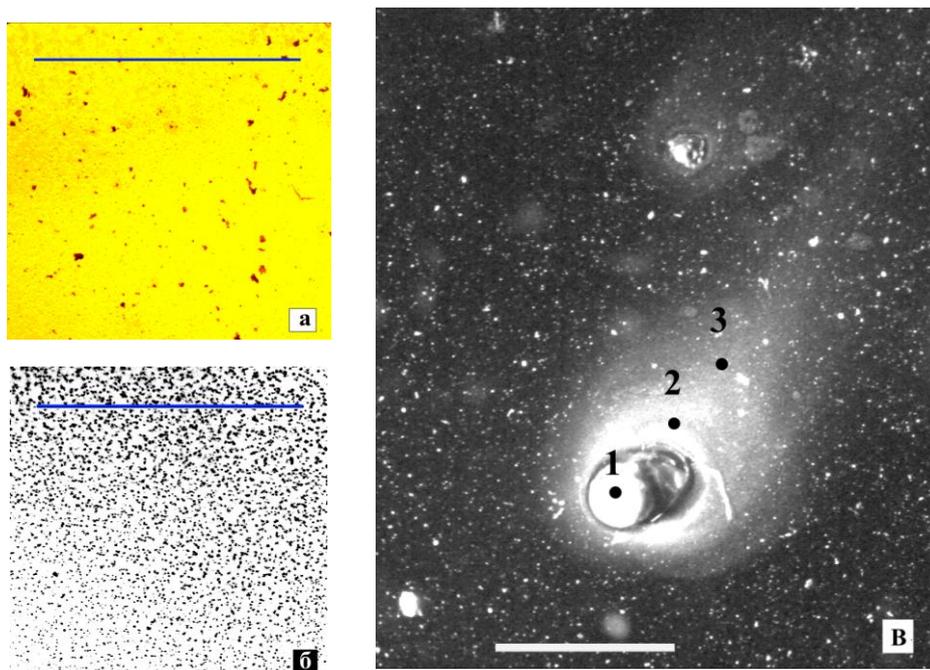


Рис. 1 – Участки пробоотборников: а – в отраженных лучах, б – в поляризованном свете, в – одиночная крупная частица. Реперная линия – 1 мм

Участок поверхности частицы алюминия (точка 1) представляет очень развитую поверхность (рис.2а). Самые мелкие неровности имеют в поперечнике $\sim 0,13$ мкм и высотой $\sim 0,1$ мкм. Такие образования сгруппированы в продолговатое образование длиной $\sim 2,5 - 3$ мкм и шириной $0,5$ мкм.

Во второй точке в окрестности большой частицы (рис. 2б) имеются как крупные частицы, так образования с небольшим выступами. Поперечные размеры крупных частиц равны $10-12$ мкм и высотой $\sim 1-1,5$ мкм, а более мелкие частицы имеют в поперечнике $2-2,5$ мкм, а их высота не превышает $0,1$ мкм.

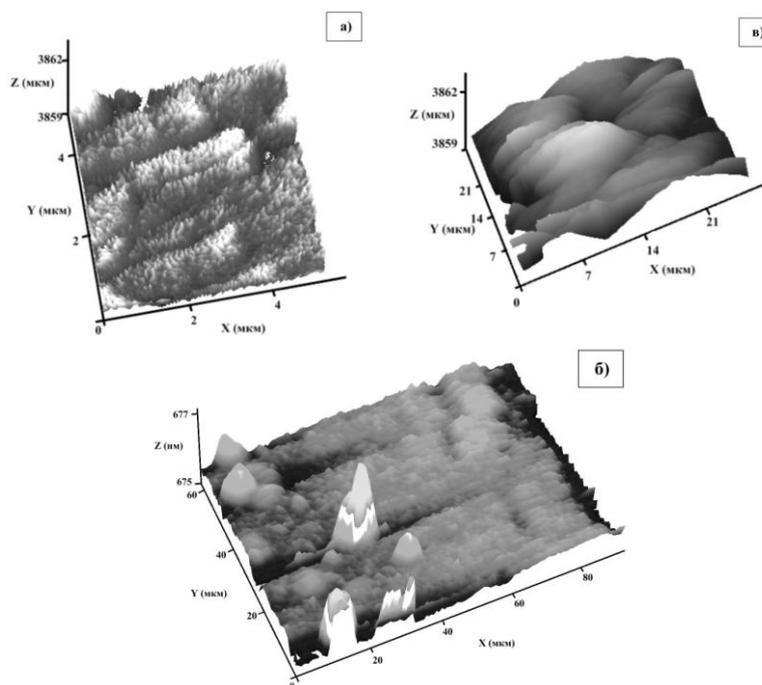


Рис. 2 – 3d-нанографи поверхности: а – в точке 1, б – в точке 2, в – в точке 3

В третьей точке (рис.2в) имеются гладкие, более крупные образования размерами в поперечнике 10-12 мкм и высотой ~ 1-2 мкм.

Таким образом, микрорельеф поверхности дисперсных частиц, образующихся в пламени при горении алюминия в азотсодержащем пламени, сильно различается по структуре.

Литература

1. Мальцев, В. М. Основные характеристики горения / В. М. Мальцев, М. И. Мальцев, Л. Я. Кашпоров. – М. : Химия, 1977. – 320 с.
2. Гетерогенное горение / под ред. В. А. Ильинского и И. Н. Садовского. – М.: Мир, 1967. – 520 с.
3. Похил, П. Ф. Горение порошкообразных металлов в активных средах / П. Ф. Похил, А. Ф. Беляев, Ю. В. Фролов, В. С. Логачев, А. И. Коротков. – М.: Наука, 1972. – 294 с.
4. Ильин, А. П. О горении сверхтонкого алюминия в воздухе / А. П. Ильин, А. А. Громов, В. И. Верещагин и др. // Физика горения и взрыва, 2001, Т.37, №6. – С. 56 – 60.
5. Ильин, А. П. Продукты горения смесей нанопорошков алюминия и вольфрама в воздухе / А. П. Ильин, Л. О. Толбанова // Физика горения и взрыва, 2007, Т.43, №4. – С. 59 – 65.
6. Самсонов, Г. В. Нитриды / Г. В. Самсонов. – Киев: Наукова думка, 1969. – 390 с.

ОБРАЗОВАНИЕ ОКСИДА МАГНИЯ В ПЛАМЕНАХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ И ЕГО ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Васильева О.В., Ксенофонтов С.И.
г.Чебоксары, ЧГПУ им. И.Я.Яковлева
dprostokvashino@rambler.ru

В пламени конденсированных систем на основе металлического магния и кислородсодержащих окислителей возможно образование дисперсных частиц различных по размеру и химическому составу. При горении магния в чистом кислороде или в воздухе образуется высокодисперсный оксид магния размерами от 0,01 до 0,85 мкм. По структуре частицы относятся к кубическим с постоянной решетки равной $a = 4,2 \text{ \AA}$. Температура плавления оксида магния равна 3073 К, а кипения – 3873 К. Максимальная температура пламени конденсированных систем не достигает температуры кипения оксида магния, поэтому частицы оксида магния находятся в конденсированном состоянии [1].

Температура воспламенения частиц магния в зависимости от дисперсности колеблется от 720 до 900 К. Температура поверхности порохов при нормальном давлении равна 552 К, тогда частицы магния могут воспламениться только вблизи поверхности горения. Воспламенение частиц облегчается тем, что оксидная пленка не защищает металл. Из-за разницы коэффициентов линейного расширения самого металла и оксида в пленке всегда существует трещины. Нагретый до температуры кипения $T_{\text{кип}} = 1378 \text{ К}$ магний испаряется, и ее пары прорываются через трещины. В окислительной среде образуется яркое пламя, по размерам превышающее в 2-3 раза размеров самой частицы [2]. Образовавшийся из паровой фазы оксид магния оседает как на поверхности «материнской» частицы, утолщая оксидную пленку, так и в окружении светящейся зоны горения. Неоднородности температуры пламени и концентрации паров оксида приводят к образованию частиц неправильной формы.

Например, кубические кристаллики объединяются, и выстраивается столбик, идентифицируемый как цилиндрическая частица. Окислитель в пламени, разлагаясь, также может дать компоненты, находящиеся в твердом состоянии. Если в составе используется нитрат калия (KNO_3), то продуктами разложения являются оксиды калия, которые при температуре пламени находятся в парообразном состоянии. Тогда в составе дисперсных частиц оксиды калия не будут существовать. Например, продукты распада нитрата бария могут существовать в виде частиц оксида бария. Хлорсодержащие окислители могут с металлами образовывать хлориды, однако хлориды в пламени находятся в газообразном состоянии.

Анализ возможных соединений, которые могут внедряться в частицу оксида магния, ограничен, поэтому оптические свойства дисперсных частиц должны определяться свойствами матрицы, а не примеси. Действительная часть показателя преломления $n = 1,13$ сохраняет свое значение. Мнимая часть показателя преломления, ответственная за поглощение излучения в среде, очень чувствительна к примесям. Даже небольшие количества примесей или даже дефектов кристаллической решетки могут сильно исказить оптические постоянные. Область искажений может проявляться и в видимом диапазоне спектра.

Оптические свойства кристаллов оксида магния, как сплошного тела (кривая 1), изучены в широком интервале длин волн [3], начиная с ультрафиолетового и заканчивая далекими инфракрасными волнами. Выделяются зоны поглощения, обусловленные электронными переходами ($\lambda < 0,18 \text{ мкм}$) и колебаниями самой решетки ($\lambda > 5 \text{ мкм}$). Между областями сильного поглощения имеется широкая область высокой прозрачности. В этой области поглощение возможно только примесями или дефектами кристаллической решетки.

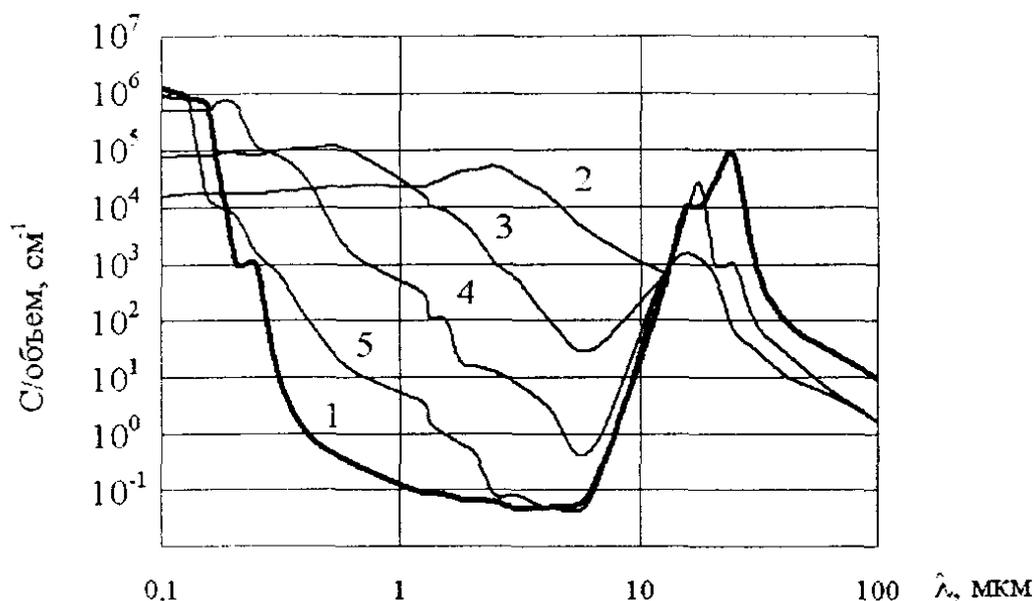


Рис.1 Зависимость объемного поглощения ($см^{-1}$) от длины волны (мкм) для сферических частиц разного размера из оксида магния: 1 - сплошное тело; частицы размерами: 2 - 1 мкм, 3 - 0,2 мкм, 4 - 0,05 мкм, 5 - 0,01 мкм.

Сказанное выше применить для частиц малых размеров нельзя. В среде с дискретными частицами затухание излучения подчиняется закону Бугера

$$I = I_0 e^{-\alpha_{экс} d}, \quad (1)$$

где d - толщина поглощающего слоя по ходу луча, $\alpha_{экс}$ - коэффициент экстинкции, I_0 - интенсивность излучения при $d = 0$.

Коэффициент экстинкции зависит от рассеяния и поглощения света частицами

$$\alpha_{\text{экс}} = N(c_{\text{погл}} + c_{\text{рас}}) = Nc_{\text{экс}}, \quad (1)$$

где N - концентрация частиц, $c_{\text{погл}}$ и $c_{\text{рас}}$ - сечения поглощения и рассеяния соответственно.

Для мелких частиц в видимой и ближней инфракрасной области преобладает экстинкция из-за рассеяния света. Вследствие этого затухание света на частицах оксида магния заметно отличается от затухания в объемном образце. Если размеры частиц малы по сравнению с длиной волны, то сечение рассеяния на графике с логарифмической шкалой представляется линейной функцией. Если же размеры частиц велики по сравнению с длиной волны, то связанная с рассеянием экстинкция почти не зависит от длины волны (кривая 2). С уменьшением размеров частиц объемное поглощение уменьшается, и при $a \leq 0,01$ мкм оптические свойства частиц приближаются к свойствам сплошного тела в области высокой прозрачности.

Несмотря на то, что теоретические расчеты позволяют оценить оптические постоянные для сферических частиц оксида магния, экспериментальные методы исследований образования частиц и их свойств остаются основными методами.

Литература

1. Мальцев В.М., Мальцев М.И. Основные характеристики горения. М.: Химия, 1977
2. Похил П.Ф., Мальцев В.М. Горение порошкообразных металлов в активных средах. М.: Наука, 1972
3. Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М.: Мир, 1986

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ В МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СОЕДИНЕНИЯХ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ, МЕТОДОМ ЯМР

Шульгин Д.А., Севастьянов М.Г., Шмидт С.В., Матухин В.Л., Корзун Б.В.
Казань, казанский государственный энергетический университет
dima.shulgin@rambler.ru

Известно, что в группу наиболее перспективных материалов для полупроводниковой гелиоэнергетики входят многокомпонентные полупроводниковые соединения. В первую очередь это относится к полупроводникам со структурой халькопирита, среди которых особое внимание привлекают соединения CuInS_2 , CuInSe_2 , CuInTe_2 , поскольку значение ширины запрещенной зоны для указанных соединений близко к максимуму интенсивности солнечного излучения (ширина запрещенной зоны для CuInS_2 , $E_g = 1,55$ эВ), а коэффициент оптического поглощения у этих полупроводников чрезвычайно велик ($\alpha > 10^5 \text{ см}^{-1}$). К настоящему времени на основе этих соединений в промышленном масштабе производятся модули размером $125 \times 65 \text{ см}^2$ и к.п.д. 7,6 % [1]. Однако серьезным сдерживающим фактором для дальнейшей разработки высокоэффективных устройств на основе многокомпонентных полупроводников являются происходящие в них процессы дефектообразования, оказывающие влияние как на электрические свойства материала, так и на к.п.д. солнечных элементов, изготовленных на основе этих материалов. Все это требует развитие методик контроля дефектности многокомпонентных соединений. Одним из эффективных методов исследования дефектов и искажений кристаллической решетки является изучение ядерных квадрупольных

взаимодействий в кристаллах методом ЯМР. Примесные атомы или молекулы, вакансии, дислокации, напряжения в кристаллической решетке создают в месте расположения ядер квадрупольных атомов градиенты электрических полей (ГЭП), меняющие свою величину и направление в различных точках решетки в зависимости от распределения нерегулярностей. В состав многих полупроводниковых соединений со структурой халькопирита входят атомы, имеющие ядерный квадрупольный момент, т.е. ядра со спином $I > 1/2$ (Cu, In, Ga, As) и эти полупроводниковые соединения могут быть исследованы методом ЯМР.

В данной работе с целью изучения влияния структурных дефектов на ближайшее окружение резонансных атомов In методом ЯМР ^{115}In исследованы синтезированные из химических элементов образцы соединения со структурой халькопирита CuInS_2 с составом, варьирующимся в пределах области гомогенности (Cu_2S -обогащенные, стехиометрические, In_2S_3 -обогащенные).

Для проведения эксперимента образцы использовали в виде поликристаллических порошков с характерным размером частиц ≤ 50 мкм. Исследования спектров ЯМР ^{115}In были выполнены на спектрометре Bruker Avance-400. Образцы имели объем 0.3 см^3 и требуемое отношение сигнал/шум было получено с использованием накопления переходных сигналов. Полученные спектры были использованы для выявления наиболее вероятных комбинаций структурных точечных дефектов в исследованных многокомпонентных полупроводниковых соединениях [2].

Литература

1. N. Meyer, A. Meeder, D. Schmid, Thin Solid Films 515, 5979 (2007).
2. Е.В. Шмидт, В. Л. Ермаков, В.Л. Матухин, О.И. Гнездилов, И.Х. Хабибуллин, Б.В. Корзун, Е.А. Фадеева, Журнал прикладной спектроскопии Т. 76. №5. С. 10 (2009).

НАПРАВЛЕНИЕ

«Преобразовательные устройства (инвертеры, счетчики качества вырабатываемой электроэнергии, системы мониторинга и т.д.)»

ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ СРАВНЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГОВЫРАБОТКИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ИЗГОТОВЛЕННЫХ ПО РАЗЛИЧНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УСЛОВИЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Вербицкий В.Н., Иванов Г.А., Бобыль А.В., Теруков Е.И.
Санкт-Петербург, ФТИ им. А.Ф. Иоффе
vnverbitskiy@mail.ru

По всему миру ведутся работы по развитию методов получения и использования возобновляемой энергии. Во многих развитых странах идет активное внедрение источников работающих на возобновляемой энергии.

В ходе работы направленной на изучение эффективности солнечных энергосистем был изготовлен испытательный комплекс на несколько солнечных модулей с раздельным мониторингом их энерговыработки и погодных условий.

Длительное использование полученной системы позволит находить зависимости энерговыработкой различных солнечных модулей и эффективность применения различных их типов от условий окружающей среды (солнечной радиации, скорости и направлении ветра, влажности, осадков, температуры и т.п.).

Основными составляющими частями системы являются: солнечные модули различного типа, контроллеры заряда с mppt алгоритмом (поддержание энерговыработки модулей в оптимальной точке), аккумуляторные батареи AGM, система нагрузок, блок АЦП LTR-EU-2 с модулями измерения токов и напряжений (измерение энерговыработки каждого модуля) и метеостанция Davis Vantage Pro 2 для мониторинга параметров окружающей среды.



Рис.1. Внешний вид установки из помещения и с крыши, на верхней консоли расположены 5 солнечных модулей и установлена метеостанция.

В системе использованы первые опытные образцы тонкоплёночных фотоэлектрических модулей тандемного типа (ТПФМ ТТ). На данный момент удалось изготовить ТПФМТТ - единичный модуль с номинальной мощностью 127 Вт при освещении 1000 Вт/м², AM 1,5, 25 0С, с площадью поверхности 1,43 м² (фоточувствительная площадь 1,36 м²). Номинальная мощность рассчитывалась с

использованием коэффициента фотоиндуцированной деградации (12%), определенного по процедуре предварительных измерений согласно МЭК 61646, значение измеренной мощности опытного образца ТПФМ ТТ равнялось 143.6 Вт, что соответствует КПД $\geq 10.5\%$.

Эксплуатация установки позволила сравнить энерговыработку солнечных модулей за апрель-май (рис.2) и влияние интегральной суточной падающей солнечной радиации на энерговыработку модулей (рис.3). Характеристики используемых модулей приведены в таблице 1.

Таблица 1: Параметры солнечных модулей, установленных на стенде на данный момент.

	ТПФМ ТТ 1	ТПФМ ТТ 2	Sharp	Si sm	SI Ig
тип	α -Si/ μ c-Si	α -Si/ μ c-Si	α -Si/ μ c-Si	c-Si	c-SI
Voc, V	72,84	73,68	62,44	21,21	42,51
Isc, A	2,62	2,6	2,23	4,17	5,13
Pmax, W	128,59	129,55	89,27	63,96	147
Vpm, V	57,38	58,12	47,68	16,62	34,3
Ipm, A	2,24	2,23	1,87	3,85	4,29

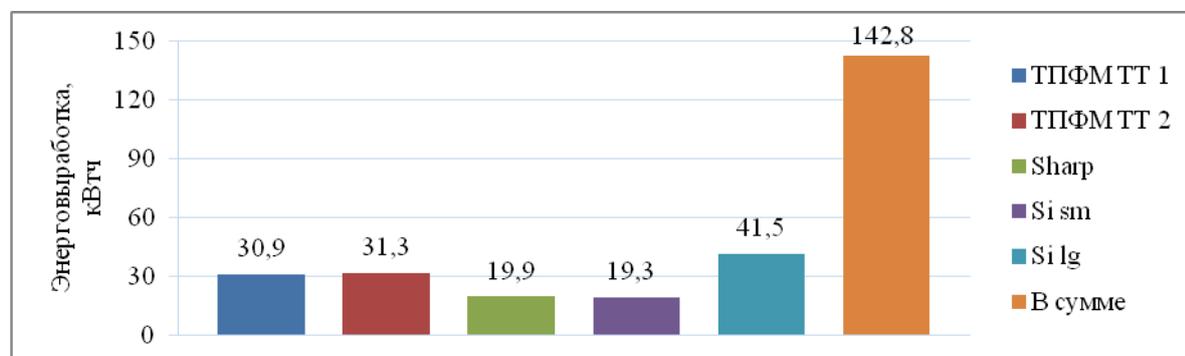


Рис.2. Энерговыработка солнечных модулей за апрель-март 2013.

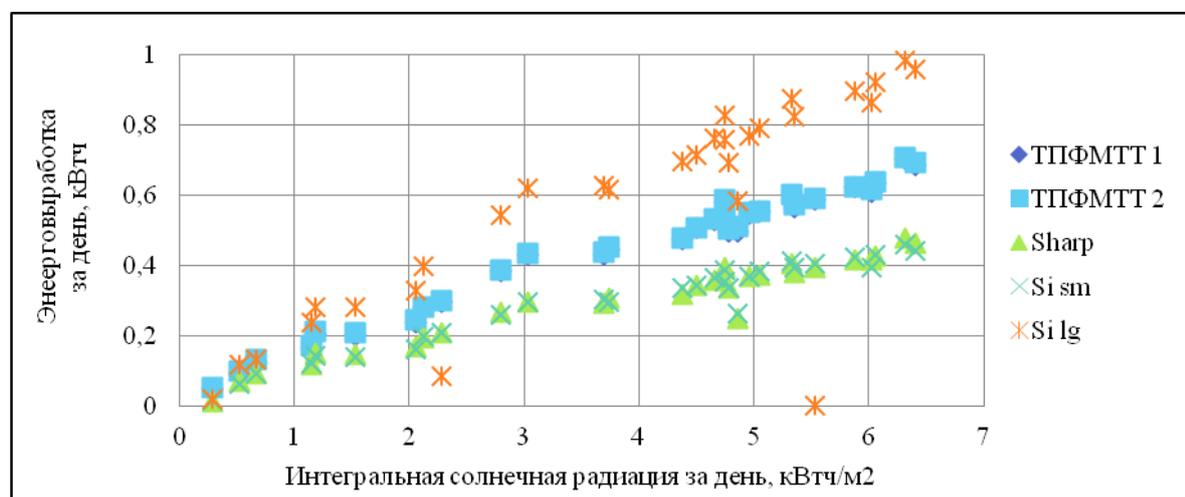


Рис.3. Влияние интегральной суточной падающей солнечной радиации на энерговыработку различных солнечных модулей.

Заключение

Испытательный стенд является полноценной энергетической системой. Его длительное использование в каком-либо из регионов позволит ставить заключения об эффективности или неэффективности применения фотоэлектрических модулей различного типа на данной местности.

Из сравнения суточной энерговыработки модулями от солнечной радиации видно: в облачные и пасмурные дни ТПФМТТ теряют в мощности меньше, чем монокристаллические кремниевые солнечные модули.

Преимущества ТПФМТТ: выработка CO_2 при производстве и утилизации в 3 раза меньше, чем от поликристаллического и почти в 5 раз меньше, чем от монокристаллического кремниевого солнечных модулей; Более дешевая технология производства в сравнении с кристаллическими модулями: сроки окупаемости примерно на треть меньше.

Улучшение методики построения теоретических зависимостей фотоэлектрических модулей позволит осуществлять выбор оптимального оборудования и типов структур модулей для различных регионов.

УСТАНОВКА НА ОСНОВЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Кудряшов С.А., Вербицкий В.Н., Иванов Г.А.,
Ершенко Е.М., Бобыль А.В., Теруков Е.И.

Санкт-Петербург, ФТИ им. А.Ф. Иоффе
stan88-88@mail.ru

Возобновляемая энергетика является одной из отраслей, которая в наше время активно развивается по всему миру. В наиболее развитых странах идет ее повсеместное внедрение. Это дает возможность уменьшать загрязнение атмосферы и делает человечество менее зависимым от ископаемых источников энергии, время восстановления которых требует большого количества времени в сравнении со временем их потребления.

Установка является общеобразовательным прибором, разработанным фирмой Heliocentris. Устройство рассчитано на проведения студентами курса различных лабораторных работ, который может давать некоторые представления о возможностях комплексного использования элементов возобновляемой энергетике.

Основными составляющими частями установки являются: кремниевые солнечные модули, ветрогенератор (400Вт), контроллеры заряда, аккумуляторные батареи, генератор водорода, водородный топливный (1,2кВт) элемент, различные конверторы и датчики (скорости ветра, инсоляции и др.). Часть перечисленных элементов коммутируется в специальные управляющие блоки (рис.1.).

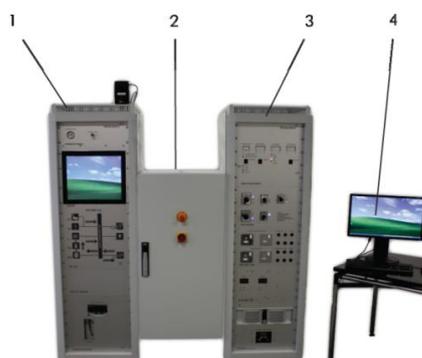


Рис.1. Внешний вид управляющей части системы (разработчик: Heliocentris).
1 – стойка с водородной составляющей системы, 2 – распределительный шкаф,
3 – регулировка и аналоговый мониторинг электрических параметров,
4 – рабочее место.

В качестве солнечных модулей используются две кристаллические панели (рис.2.) общей мощностью 400 Вт. Каждый модуль укомплектован специальной подставкой, дающей возможность осуществлять поворот модулей под различными углами. Для географической ориентации каждая панель укомплектована компасом.



Рис.2. Внешний вид солнечного модуля на подставке, дающей возможность регулировки ориентации панели на солнце под различными углами.

Установка позволяет осуществлять мониторинг всех составляющих элементов системы и проводить эксперименты с использованием различных ее составляющих.

Эксплуатация установки позволила получить влияние затененности на энерговыработку солнечного модуля, получить зависимость энерговыработки солнечных модулей от влажности а также данные по суточной энерговыработке солнечных модулей за март.

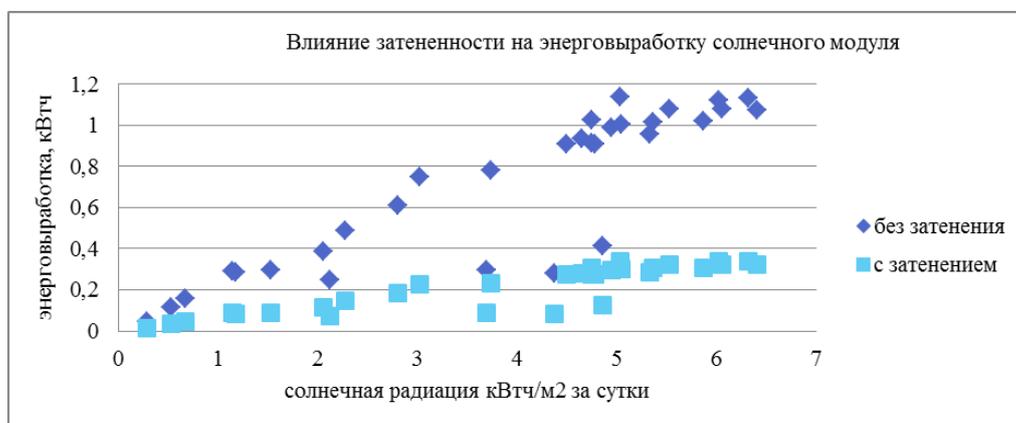


Рис.3. влияние затененности на энерговыработку солнечного модуля

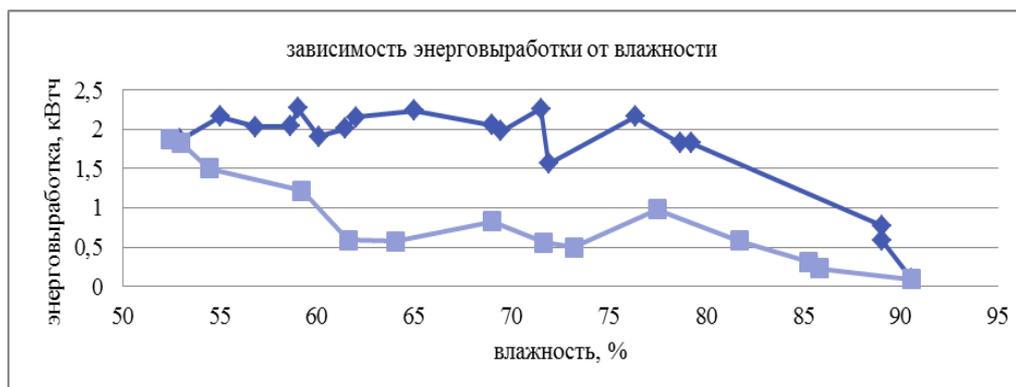


Рис.4. зависимость энерговыработки солнечных модулей от влажности



Рис.5. энерговыворотка солнечных модулей за март

Заключение

Лабораторная установка является полноценной энергетической системой для получения практических знаний в области управления энергией. Установка позволяет получать энергию от солнца, ветра и осуществлять запасание полученной энергии в виде водорода. Система позволяет получать большое количество данных по каждому из компонентов системы и анализировать особенности взаимодействия всей системы в целом.

В результате эксплуатации установки было показано что энерговыворотка не зависит от влажности воздуха

Установка такой системы в каком либо из регионов позволяет осуществлять круглогодичный мониторинг солнечной радиации, скорости ветра и может давать представление о перспективности расположения систем альтернативной энергетики на данной местности.

Наподобие такой системы можно строить гибридные электростанции и обеспечивать энергообеспечение мест удаленных от централизованных систем энергоснабжения.

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ СОЛНЕЧНЫМИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯМИ

Г.П. Охоткин¹, В.П. Афанасьев², Е.И. Теруков³

¹Чебоксары, ЧГУ; ²Санкт-Петербург, СПбГЭТУ «ЛЭТИ»; ³Санкт-Петербург, ООО «НТЦ ТПТЭ при ФТИ им. А.Ф. Иоффе»

frte@mail.ru

Выработка электроэнергии при помощи электростанций на солнечных элементах применяется сегодня практически во всем мире. Объемы использования солнечных батарей постоянно растут. По прогнозам солнечная энергетика к концу XXI века должна стать доминирующей, и обеспечивающей до 60 % вырабатываемой энергии.

Основным недостатком, сдерживающим широкое распространение электростанций на солнечных элементах, является низкий КПД солнечных батарей и высокая стоимость. Чтобы фотовольтаика могла конкурировать с традиционными источниками энергии, цена на вырабатываемую ею электроэнергию должна быть снижена относительно нынешних цен примерно в 5-10 раз. Это требует разработки эффективных, дешевых технологий и конструкций фотоэлектрических преобразователей (ФЭП), принципов построения как солнечных электростанций, так и ее элементов: аккумуляторных батарей, контроллеров заряда-разряда аккумуляторных батарей, инверторов напряжения и устройств защитного отключения. Поэтому

разработка принципов построения и алгоритмов управления солнечными электростанциями является актуальной задачей.

Целью данной работы является разработка принципов построения и алгоритмов управления солнечными электростанциями, позволяющих значительно снизить стоимость солнечных электростанций.

Солнечные электростанции (СЭ) подразделяются на автономные и комбинированные. Автономные солнечные электростанции (АСЭ), в основном, используются в районах, где источники общего энергоснабжения недоступны или слишком дороги. Также они могут быть использованы для электроснабжения дач, коттеджей, школ, лицеев, административных зданий, офисов, сотовых станций, уличного освещения и освещения рекламных щитов, систем охраны и т.д. Для питания этих потребителей может быть использовано как постоянное 12, 24, 48, 110 и 220 В, так и переменное напряжение 110 и 220 В.

К комбинированным солнечным электростанциям (КСЭ) относятся солнечные электростанции, соединенные с промышленной сетью электроснабжения. Она взаимодействует с сетью электроснабжения через выход инвертора с помощью разделительного трансформатора и устройства синхронизации, как показано на рис. 1.

Потребитель может использовать фотоэлектрическую энергию в своих целях, а когда этой электроэнергии становится недостаточно, например, ночью и в облачную погоду, то может использовать энергию электросети. В случае, когда солнечная электростанция вырабатывает избыточное количество электроэнергии, излишки электроэнергии отдается в общую сеть электроснабжения. Так, владелец солнечной электростанции, соединенной с сетью электроснабжения, может как покупать, так и продавать электроэнергию.

Наличие аккумуляторов расширяет область применения СЭ, но, в то же время, требует дополнительного технического оборудования и обслуживания. Для зарядки аккумуляторов солнечных электростанций потребуются зарядные устройства и контроллеры заряда с функцией отслеживания точки максимальной мощности (ОТММ). Такой контроллер при наличии достаточной освещенности не препятствует поступлению энергии от солнечных батарей на аккумуляторы, а при недостатке освещенности заряжает аккумулятор от сети электроснабжения. Кроме того контроллер заряда предотвращает перезаряд аккумулятора, своевременно отключая солнечную батарею (СБ) и сеть электроснабжения от аккумулятора, регулирует степень зарядки аккумуляторов и тем самым помогает продлить их эксплуатационный срок службы.

В течение дня СБ заряжают аккумуляторы и обеспечивают питанием потребителей. При этом аккумуляторные батареи являются эффективным средством борьбы с краткосрочными нагрузочными пиками. В ночное время накопленная в аккумуляторной батарее (АБ) энергия потребляется нагрузкой. Способность производить, накапливать и хранить электроэнергию делает такие солнечные электростанции надежным источником энергии в любое время, независимо от погодных условий и времени суток.

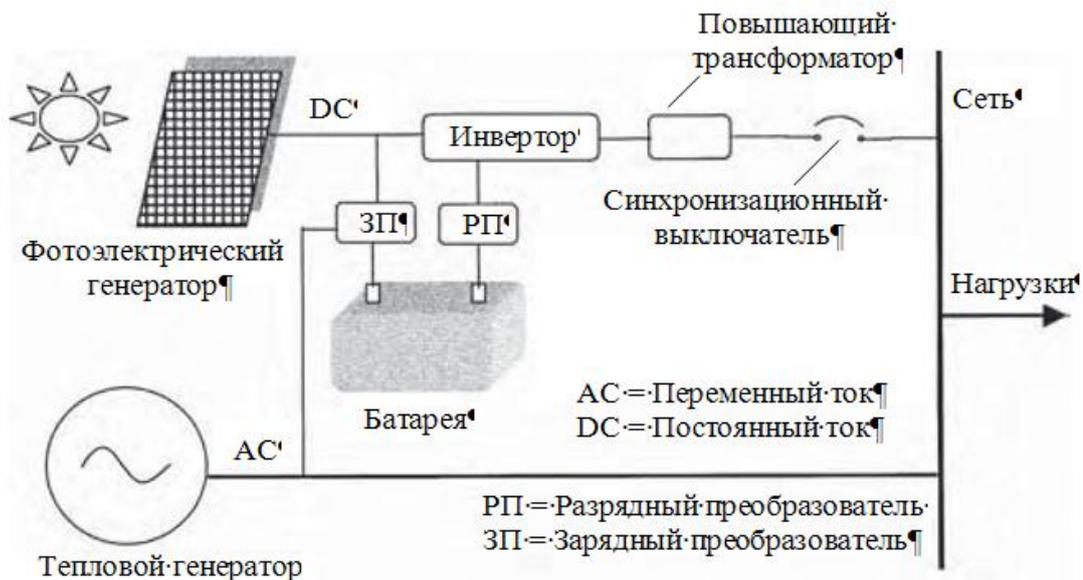


Рис. 1. Структурная схема комбинированной солнечной электростанции

Солнечные электростанции бывают со стабилизированным и нестабилизированным постоянным выходным напряжением [1]. Структурная схема СЭ со стабилизированным постоянным напряжением на выходе представлена на рис. 2. Для формирования переменного выходного напряжения схема может быть снабжена автономным инвертором напряжения (АИН), подключение которого на рис. 2 показано пунктирными линиями.

Солнечная электростанция (рис. 2) состоит из следующих основных узлов: дополнительный источник энергии (ДИЭ); солнечная батарея (СБ); импульсный преобразователь постоянного напряжения (ИППН) понижающего типов П1, П2 и повышающего типа П3; входные шины Ш1 и Ш3; выходная шина Ш2; ключи К1-К7; система управления (СУ); аккумуляторная батарея (АБ); нагрузка (Н); автономный инвертор напряжения (АИН).

Схема СЭ содержит три шины подключения: две входные Ш1, Ш3 и одну выходную Ш2. Напряжения на всех шинах Ш1-Ш3 разные. Для определенности примем $U_{Ш1} = 54$ В, $U_{Ш2} = 24$ В и $U_{Ш3} = 12$ В. Импульсные преобразователи постоянного напряжения П1 и П3, выполненные по классическим схемам понижающего и повышающего преобразователей [2], обеспечивают стабилизацию выходного напряжения электростанции на шине Ш2. ИППН понижающего типа П2 используется в качестве зарядного устройства аккумуляторных батарей. Напряжение на второй входной шине Ш3 медленно уменьшается по мере разряда аккумулятора. Система управления включает и выключает ключи К1-К7 по заданному алгоритму, обеспечивая высокую надежность электроснабжения СЭ.

Подробнее рассмотрим алгоритм управления СЭ. При наличии достаточной освещенности солнечных батарей (дневное время суток, солнечная погода) формируется достаточное количество энергии для питания нагрузки и заряда аккумуляторных батарей. В этом случае система управления включает ключи К2, К3, К4 и К6 для питания нагрузки и заряда аккумуляторных батарей от СБ. После полного заряда аккумуляторных батарей СУ выключает ключи К4 и К6.

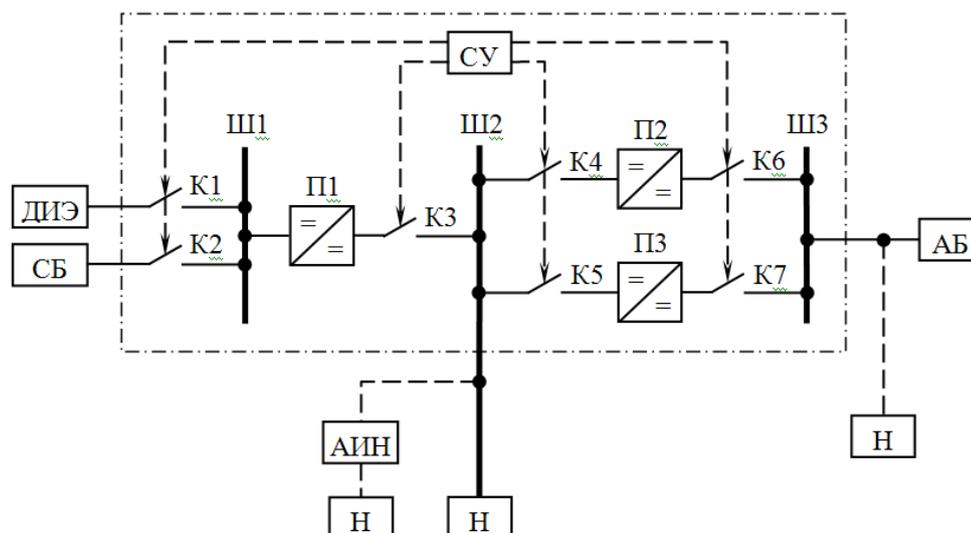


Рис. 2. Структурная схема СЭ со стабилизированным выходным напряжением

При недостаточной освещенности солнечных батарей (ночь, пасмурная погода) и достаточной степени заряженности АБ система управления включает ключи К5 и К7 для питания нагрузки от аккумуляторных батарей.

При недостаточной освещенности солнечных батарей и разряженных аккумуляторных батареях СУ включает ключи К1, К3, К4 и К6 для питания нагрузки и заряда аккумуляторных батарей от дополнительного источника энергии. После полного заряда АБ все включенные ранее СУ ключи выключаются и включаются ключи К5 и К7 для питания нагрузки от аккумуляторных батарей.

Такой алгоритм управления ключами К1-К7 позволяет обеспечить высокую надежность электроснабжения, независимо от погодных условий и времени суток. Солнечная электростанция, построенная по схеме на рис. 2, обеспечивает питание потребителей, включенных на шину Ш2, стабильным постоянным напряжением. Потребители с менее жесткими требованиями к стабильности постоянного напряжения могут быть подключены непосредственно ко второй входной шине Ш3.

Схема СЭ (рис. 2) способна формировать на шине Ш2 любые значения выходного напряжения, вплоть до 220 В. Для этого потребуется увеличить выходное напряжение солнечных батарей путем последовательного соединения солнечных модулей и выбрать преобразователи П1-П3 на требуемое выходное напряжение.

Для потребителей с менее жесткими требованиями к стабильности потребляемого напряжения может быть предложена немного измененная схема СЭ, представленная на рис. 3. В нее, в отличие от схемы на рис. 2, входит несколько последовательно соединенных аккумуляторных батарей АБ1-АБN, для заряда которых используются индивидуальные импульсные преобразователи постоянного напряжения П1-ПN и ключи К11-К1N, К21-К2N. Заметим, что все импульсные преобразователи П0-ПN в схеме на рис. 3 являются понижающего типа.

Данная схема имеет только две шины: входную Ш1 и выходную Ш2. Напряжение на входной шине Ш1 намного больше напряжения на выходной шине Ш2, которое соответствует напряжению последовательно включенных аккумуляторных батарей. Импульсные преобразователи П1-ПN могут быть выполнены в одном конструктиве в виде многоканальной схемы. Другим широко распространенным способом зарядки АБ является групповая зарядка последовательно включенных аккумуляторов от одного импульсного преобразователя. В рассматриваемой схеме для групповой зарядки аккумуляторных батарей может

использоваться ИППН повышающего типа. СУ управляет ключами K01-K04, K11-K1N, K21-K2N по заданному алгоритму.

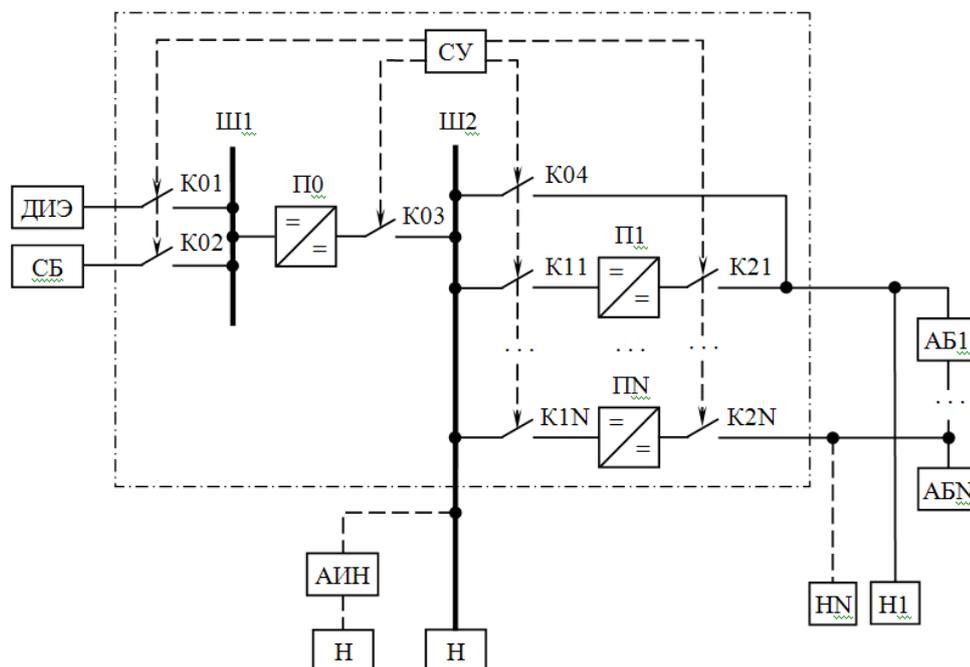


Рис. 3. Структурная схема СЭ с нестабилизированным выходным напряжением

Рассмотрим более подробно алгоритм управления СЭ, представленной на рис. 3. При наличии достаточной освещенности солнечных батарей СУ включает ключи K02, K03, K11-K1N, K21-K2N, обеспечивая питание нагрузку и заряжая аккумуляторные батареи от СБ. После полного заряда аккумуляторных батарей системой управления выключаются ключи K11-K1N, K21-K2N.

При недостаточной освещенности солнечных батарей и заряженных аккумуляторных батареях СУ включает ключ K04. При этом нагрузка питается от последовательно включенных аккумуляторных батарей.

При недостаточной освещенности солнечных батарей и разряженных аккумуляторных батареях СУ включает ключи K01, K03, K11-K1N, K21-K2N для питания нагрузки и заряда аккумуляторных батарей от дополнительного источника энергии. После полного заряда аккумуляторных батарей АБ1-АБN все ключи, включенные ранее системой управления, выключаются и включается ключ K04 для питания нагрузки от аккумуляторных батарей.

Предложенный алгоритм управления ключами также позволяет обеспечить высокую надежность электроснабжения независимо от погодных условий и времени суток. Схема солнечной электростанции способна формировать любые значения выходного напряжения как для потребителей постоянного, так и переменного тока.

Основными недостатками схемы СЭ (рис. 3) являются медленное уменьшение выходного напряжения электростанции по мере разряда аккумуляторов, достаточно сложный способ заряда аккумуляторов и, как следствие, усложнение схемы зарядного устройства.

Выводы:

1. Разработаны принципы построения и алгоритмы управления солнечными электростанциями, обеспечивающие высокую надежность электроснабжения независимо от погодных условий и времени суток.

2. Установлено, что солнечные электростанции со стабилизированным выходным напряжением выполняются на основе трех шин подключения, а с нестабилизированным выходным напряжением – на основе двух шин подключения.
3. Показано, что последовательное соединение аккумуляторных батарей усложняет как схему зарядного устройства, так и схему контроля заряда аккумуляторов.

Литература

1. Охоткин Г.П., Серебрянников А.В. Основные принципы построения автономных солнечных электростанций // Современные проблемы науки и образования. - 2012. - №6; URL: [http:// www.science-education.ru/106-7345](http://www.science-education.ru/106-7345) (дата обращения: 09.11.2012).
2. Моин В.С. Стабилизированные транзисторные преобразователи. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 376 с.

РАСЧЕТ МОЩНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ НАГРУЗКИ

Г.П. Охоткин¹, В.П. Афанасьев², Е.И. Теруков³
(¹Чебоксары, ЧГУ; ²Санкт-Петербург, СПбГЭТУ «ЛЭТИ»;
³Санкт-Петербург, ООО «НТЦ ТПТЭ при ФТИ им. А.Ф. Иоффе»)
frte@mail.ru

Для проектирования солнечных электростанций (СЭ) требуется определение номинальной мощности солнечных модулей, их количества, ёмкости аккумуляторных батарей, мощностей инвертора и контроллера заряда-разряда. При этом необходимыми данными для расчета мощности солнечной электростанции являются: район расположения; существующие подводки (если они имеются); общая площадь дома; количество помещений; используемые электроприборы; наличия отопления и горячего водоснабжения; суммарная максимальная мощность всех электроприборов; примерное время работы каждого электропотребителя.

Расчет мощности солнечных электростанций и ее элементов с учетом изменяющейся нагрузки в течение суток позволяет исключить неоправданное завышение мощности элементов электростанции и удорожание самой солнечной электростанции. Данные вопросы в доступной литературе освещены недостаточно полно, поэтому расчет мощности солнечных электростанций с учетом изменяющейся нагрузки является актуальной задачей.

Целью данного исследования является разработка методики расчета мощности солнечных электростанций с учетом изменяющейся нагрузки, которая для удобства представления разбита на несколько основных этапов:

- Этап 1. Расчет выходной мощности СЭ;
- Этап 2. Расчет емкости аккумуляторной батареи СЭ;
- Этап 3. Расчет мощности зарядного устройства СЭ;
- Этап 4. Расчет мощности основной шины СЭ;
- Этап 5. Расчет мощности солнечных батарей СЭ;
- Этап 6. Расчет КПД СЭ;
- Этап 7. Выбор автономных инверторов напряжения СЭ.

Заключение

Разработанная методика расчета мощности солнечных электростанций и ее элементов, учитывающая изменение нагрузки в течение суток, позволяет точно

определить требуемую емкость аккумуляторной батареи и исключить неоправданное завышение мощности элементов электростанции и удорожание солнечной электростанции.

Литература:

1. Особенности работы тонкопленочных солнечных модулей на основе кремния в составе электростанции на широте г. Чебоксары / Е.С. Аронова, Г.П. Охоткин, Е.И. Теруков, М.З. Шварц // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: Материалы IX Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. гос. ун-та, 2011. – С. 222-224.

2. Охоткин Г.П., Серебрянников А.В. Основные принципы построения автономных солнечных электростанций // Современные проблемы науки и образования. - 2012. - №6; URL: <http://www.science-education.ru/106-7345> (дата обращения: 09.11.2012).

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

Шиняков Ю.А., Черная М.М., Аржанов В.В., Осипов А.В., Отто А.И.
г. Томск, научно-исследовательский институт космических технологий Томского
государственного университета систем управления и радиоэлектроники
(НИИ КТ ТУСУР)

shua@main.tusur.ru, cmm91@inbox.ru, otdel11toms@yandex.ru, ossan@mail.ru,
ottoai@mail.ru.

В настоящее время множество работ по развитию солнечных фотоэлектрических энергетических установок, проводимых как в России, так и в зарубежных странах, преимущественно направлены на разработку и совершенствование технических характеристик непосредственно фотоэлектрических преобразователей, повышение их коэффициента преобразования солнечной энергии и уменьшение стоимости их производства. Однако даже при совершенных фотоэлектрических преобразователях система в целом может обладать неудовлетворительными энергетическими характеристиками из-за нерационального использования их возможностей. Поэтому необходимо решать ряд системных вопросов проектирования фотоэлектрических систем и энергетических установок с целью повышения их энергетической эффективности.

Повышение энергетической эффективности фотоэлектрических систем и установок свыше 35% по сравнению с фотоэлектрическими системами и установками, у которых фотоэлектрические панели закреплены под углом равным широте месторасположения, может быть достигнуто путем одновременной реализации режима отбора мощности в оптимальной рабочей точке вольт-амперной характеристики (ВАХ) солнечной батареи (СБ) (путем реализации режима экстремального регулирования мощности солнечных батарей (ЭРМ СБ)) и непрерывного автоматического слежения СБ за Солнцем.

Для г. Томска и Томской области были проведены теоретические исследования и расчеты значений вырабатываемой СБ мощности в зависимости от их номинальных мощностей, ориентации фотоэлектрических панелей на юг, различных углах их установки по отношению к горизонту, а так же при использовании следящих за

положением Солнца систем. Ниже приведены формулы, позволяющие определить «выигрыш» по полученному значению вырабатываемой СБ мощности:

$$\Delta P_{56\text{гр.},\text{гор.}} = 13,83 \cdot 10^{-2} \cdot P_{\text{ном}}, \quad (1)$$

где $\Delta P_{56\text{гр.},\text{гор.}}$ - «выигрыш» по полученному значению мощности при установке СБ под углом равным 56 градусам (под углом соответствующим широте месторасположения г. Томска) по сравнению с их горизонтальным положением;

$P_{\text{ном}}$ - номинальное значение мощности солнечной батареи.

$$\Delta P_{\text{двухос.},56\text{гр.}} = 28,58 \cdot 10^{-2} \cdot P_{\text{ном}}, \quad (2)$$

где $\Delta P_{\text{двухос.},56\text{гр.}}$ - «выигрыш» по полученному значению мощности при использовании двухосевой системы слежения СБ за положением Солнца по сравнению с их установкой под углом равным 56 градусам.

Эффект от реализации режима ЭРМ СБ зависит от диапазона изменения рабочей температуры панелей солнечных батарей. Это объясняется тем, что СБ фотоэлектрических энергетических установок, используются при значительно изменяющихся условиях эксплуатации. Их ВАХ отличаются нелинейностью и нестабильностью. Вольт-ваттные характеристики (ВВХ) имеют ярко выраженный максимум генерируемой мощности, положение которого существенно изменяется в зависимости от условий эксплуатации (температуры, освещенности, ресурса) [1].

В системах, в которых напряжение на СБ совпадает с напряжением на АБ, практически никогда не соблюдается режим заряда соответствующий режиму генерирования максимальной мощности СБ, так как оптимальное напряжение максимально нагретой на солнце СБ не должно быть менее максимального зарядного напряжения АБ. Иначе СБ не будет отдавать энергию в АБ. Следовательно, СБ недоиспользуется по мощности при всех других рабочих температурах фотоэлектрических панелей, отличных от максимальной расчетной температуры.

В работе [1] выявлена общая тенденция изменения выходной мощности СБ в течение дня для двух модулей КСМ-160 при изменении температуры от минус 30 до плюс 70 °С при использовании ЭРМ и стабильных напряжениях на СБ.

Были проведены оценочные расчеты при условии двух стабильных напряжений на СБ, соответствующих двум состояниям заряженности аккумуляторной батареи (22 В и 28 В). Которые показали, что в температурном диапазоне в течение дня (с 6.00 ч до 21.00 ч) от плюс 20 до плюс 70 °С и от плюс 70 до плюс 30 °С ЭРМ повышает энергетическую эффективность на 32% в сравнении с режимом стабилизации 22 В и на 8% в сравнении с режимом стабилизации 28 В. В температурном диапазоне в течение дня (с 7.00 ч до 18.00 ч) от минус 30 до 0 °С и от 0 до минус 10 °С ЭРМ повышает энергетическую эффективность на 66% в сравнении с режимом стабилизации 22 В и на 31% по сравнению с режимом стабилизации 28 В. Очевидно, что применение ЭРМ является более эффективным в холодное время года.

Таким образом, показана целесообразность применения ЭРМ СБ и двухосевых следящих за положением Солнца систем, способствующих значительному приросту получаемой от солнечных батарей мощности.

Коллективом НИИ КТ ТУСУРа разработана автономная фотоэлектрическая энергетическая установка (рисунок 2) с выходной мощностью 0,5 кВт (АФЭУ-0,5) с одновременной реализацией режима ЭРМ СБ и двухосевого автоматического слежения фотоэлектрических панелей за положением Солнца на небосводе [2].

Структурно-функциональная схема АФЭУ-0,5 приведена на рисунке 1.

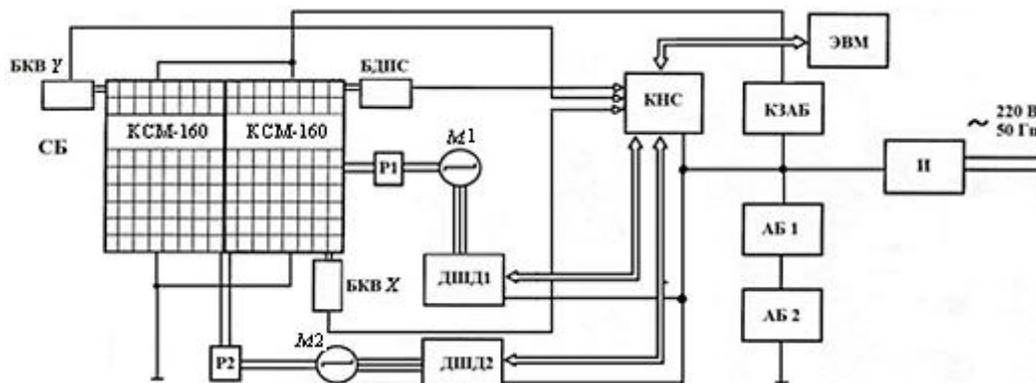


Рисунок 1 – Структурно-функциональная схема АФЭУ-0,5

На рисунке 1 приняты следующие обозначения: СБ – солнечная батарея; КНС – контроллер наведения на Солнце; ДШД1, ДШД2 – драйверы управления шаговыми двигателями; БДПС – блок датчиков положения Солнца; БКВ X, БКВ Y – блоки конечных выключателей; M1, M2 – шаговые двигатели; P1, P2 – редукторы; КЗАБ – контроллер заряда-разряда АБ с функцией ЭРМ СБ; И – инвертор; АБ1, АБ2 – аккумуляторные батареи.



Рисунок 2 – Автономная фотоэлектрическая энергетическая установка (АФЭУ-0,5)

Механическая система АФЭУ-0,5 образована двумя рамами – базовой и подвешенной, из которых базовая рама установлена с возможностью вращения вокруг вертикальной оси, опираясь на подстилающую поверхность, а подвешенная рама установлена с возможностью вращения вокруг горизонтальной оси.

Следящая система автоматического шагового управления АФЭУ-0,5 обеспечивает двухкоординатное механическое перемещение СБ по горизонтали – не менее 180 град, по вертикали – не менее 70 град, погрешность регулирования солнечного вектора не более 3 градусов. Поворот установки относительно осей вращения осуществляется дискретно на 1-5 градус за один цикл перемещения. При проведении экспериментальных исследований было установлено, что суммарная потребляемая энергия электроприводами не превышает 1% от суточного значения выработанной энергии [2].

Входящий в состав АФЭУ-0,5 контроллер заряда-разряда аккумуляторных батарей реализует ЭРМ СБ посредством шагового способа с точностью регулирования мощности солнечной батареи не ниже 98%.

Разработанная АФЭУ-0,5 с одновременной реализацией функции экстремального регулирования мощности СБ и двухосевой системой автоматического слежения фотоэлектрических панелей за Солнцем с повышенным коэффициентом преобразования солнечной энергии свыше 35% является полностью автономной и оказывает положительные энергетический, экономический и экологический эффекты.

Литература:

1. *Шиняков Ю.А.* Повышение энергетической эффективности автономных фотоэлектрических энергетических установок / *Ю.А. Шиняков, Ю.А. Шурыгин, О.Е. Аркатова* // Доклады Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2010. – № 2(22), ч. 2. – С. 102–107.
2. Минимизация энергопотребления электроприводами в фотоэлектрической энергетической установке / *В.В. Аржанов, Ю.А. Шурыгин, Ю.А. Шиняков, К.В. Аржанов* // Известия Томского государственного университета. – 2013. – Т.322. – №4. – С. 146 – 150.

СИСТЕМА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ПРЕДПРИЯТИЙ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

Тимофеев В. Н.¹, Ершова И. Г.²

¹ г. Чебоксары, ФГБОУ ВПО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова», timofeev.vitaly2010@yandex.ru

² г. Чебоксары, ФГБОУ ВПО «Чувашская государственная сельскохозяйственная академия», eig85@yandex.ru

Система преобразования солнечной энергии предназначена для предприятий сельского хозяйства и объектов, расположенных в труднодоступных, удаленных от энергосистем местах.

Система преобразования солнечной энергии решает задачу создания устройства, позволяющего помимо выработки электрической энергии обеспечивать объекты отоплением, горячим водоснабжением, а также теплотой для работы абсорбционной холодильной установки для хранения скоропортящихся продуктов.

Техническим результатом при этом является обеспечение объектов дешевой теплотой и создание абсорбционной холодильной установки без потребления электроэнергии. Технический результат достигается тем, что в известной силовой установке на солнечной энергии, содержащей генератор, испаритель, конденсатор, турбину с низкокипящим рабочим веществом, аккумулятор теплоты, она дополнительно содержит объект отопления, абсорбционную холодильную установку, связанные с теплым контуром через исполнительный механизм с четырехходовым краном, вход которого подключен к патрубку четырехходового крана, а выход: первый контур подключен к испарителю легкокипящего рабочего вещества, второй контур – к абсорбционной холодильной установке, третий - к объекту отопления с возможностью подключения этих контуров к теплomu контуру.

Система преобразования солнечной энергии условно состоит из следующих замкнутых контуров. Контур I включает в себя: солнечный коллектор 1 с датчиком температуры 25; электронный трехходовой кран 18; электрический насос 14;

аккумулятор теплоты 3 с датчиком температуры 26; теплообменник 2; электронный трехходовой кран 17; каналы циркуляции жидкости 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33. По контуру I циркулирует теплоноситель в солнечном коллекторе 1; в результате теплообмена теплоносителя с солнечными лучами происходит нагрев теплоносителя, а в теплообменнике 2 теплота передается теплоносителю замкнутого контура II. В качестве теплоносителя может быть использован высокотемпературный теплоноситель, например силикатная жидкость.

Аккумулятор теплоты 3 во время работы контура I поддерживает температуру жидкости, которая контролируется датчиком температуры 26. В аккумуляторе теплоты имеются накопительные емкости, тщательно теплоизолированные, в пасмурную погоду и в ночное время эта теплота передается теплообменнику 2.

Контур II (теплый контур) включает в себя теплообменник 2; четырехходовой кран 16; абсорбционную холодильную машину 9; объект отопления 10; испаритель 5; каналы подачи жидкости 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40. В этом контуре теплоноситель в виде воды нагревается в теплообменнике 2 в результате теплообмена с теплоносителем контура I, например, до температуры 90-95 °С.

В электрическом исполнительном механизме 16 с четырехходовым краном происходит распределение потоков теплоносителя по каналу 35 на испаритель 5, по каналу 39 на абсорбционную холодильную машину 9, по каналу 37 на объект отопления 10.

Контур III включает в себя испаритель 5; турбину 6; конденсатор 8; электрический насос 15 и каналы циркуляции легкокипящего вещества 41, 42, 43, 44.

В контуре III насос прогоняет рабочее вещество, создавая при этом определенное давление для выработки необходимой электроэнергии.

Контур IV включает в себя конденсатор 8, вертикальный грунтовый теплообменник 11, электрический насос 13 и каналы 45, 46, 47.

По этому контуру циркулирует солевой раствор, например CaCl_2 или NaCl , температура которого в теплообменнике 11 в результате теплообмена с поверхностью грунта понижается до значения 6-8 °С. А в конденсаторе 8 этот теплоноситель отбирает тепло от отработанного пара рабочего вещества, превращая его в жидкость.

В генераторе 7 вырабатывается электроэнергия, которая по каналу 54 поступает в блок питания 20, и по каналу 56 подается к потребителю.

В ясную солнечную погоду при превышении температуры контура 1 заданного значения, а также при отсутствии необходимости работы электроэнергетической установки, излишки теплоты могут быть направлены для нагрева других объектов, например для обогрева теплицы, бассейна (позиции на чертеже не указаны).

Система преобразования солнечной энергии работает следующим образом.

Включается контакт замыкающий 63. Электрический насос 14 начинает циркулировать теплоноситель контура 1. При этом заданная температура аккумулятора теплоты 3 контролируется датчиком температуры 26, который по каналу 58 подает сигнал в блок сравнения 23, где сравнивается с сигналом датчика 24. Эти сигналы обрабатываются в блоке сравнения 23. В случае появления сигнала рассогласования этот сигнал подается в блок управления 19, который подает питание по каналу 49 на электронный трехходовой кран 18, который откроет канал 31 (при этом канал 29 остается открытым), и теплоноситель, проходя через аккумулятор теплоты 3, аккумулирует теплоту в накопительных емкостях. Затем по каналу 32 возвращается в канал 29, продолжается циркуляция в контуре I.

При аккумулировании требуемой теплоты датчик температуры 26 подачей сигнала устраняет сигнал рассогласования в блоке сравнения 23. Электронный трехходовой кран 18 закрывает канал 31.

В пасмурную погоду и в ночное время, когда солнечные лучи перестают попадать на солнечный коллектор 1, датчик температуры 25 по каналу 57 подает сигнал в блок сравнения 21. Обработанный сигнал по каналу 59 подается в блок управления 19, который по каналу 51 подает электроэнергию на электронный трехходовой кран 17, который срабатывает и закрывает канал 27, открывает канал 33.

Электронный трехходовой кран 18 закрывает канал 29, открывает канал 31 и контур I начинает работать от аккумулятора теплоты 3, минуя солнечный коллектор 1.

В контуре II в результате теплообмена между теплоносителем контура I и теплоносителем контура II в теплообменнике 2 температура теплоносителя контура II доводится до значения 90-95 °С и по каналу 34 поступает в четырехходовой кран электрического исполнительного механизма 16. Четырехходовой кран по каналу 35 направляет часть теплоносителя на испаритель 5, другую часть теплоносителя по каналу 39 - в абсорбционную холодильную установку 9, а оставшуюся часть теплоносителя по каналу 37 на объект отопления 10.

В испаритель 5 по каналу 44 одновременно поступает низкокипящее рабочее вещество в виде жидкости. Как уже было сказано выше, в испаритель 5 по каналу 35 поступает теплоноситель (вода), нагретый до температуры 90-95 °С. В испарителе 5 низкокипящее рабочее вещество отбирает теплоту от горячего теплоносителя, происходит испарение низкокипящего рабочего вещества и его превращение в пар. Далее рабочий пар поступает в турбину 6, где часть энергии рабочего пара турбина 6 с генератором 7 преобразует в электроэнергию. Отработавший пар поступает в конденсатор 8, где отдает тепло солевому раствору. Отдавая тепло, отработавший пар превращается в жидкость, которая насосом 15 прогоняется в испаритель 5. А солевой раствор, отобрав тепло от отработавшего пара, по каналу 47 возвращается в грунтовый теплообменник 11 и т.д.

В результате будет обеспечен довольно высокий перепад температур испарения и конденсации рабочего вещества соответственно и довольно высокий коэффициент полезного действия (КПД) преобразования солнечной энергии системы.

Как уже было отмечено выше, по каналу 39 часть теплоносителя контура II поступает в абсорбционную холодильную установку 9, которая является источником холода на горячей воде без потребления электроэнергии, и может быть использована для сохранения скоропортящихся продуктов.

Одновременно часть теплоносителя от четырехходового крана 16 по каналу 37 контура II, имеющего температуру 90 – 95 °С, поступает в объект отопления 10, где теплоноситель используется как для отопления, так и для горячего водоснабжения.

Таким образом, система преобразования солнечной энергии, защищенная правами на интеллектуальную собственность [1], предназначена для выработки тепловой энергии, электроэнергии, как источник холода, и позволяет получить значительную экономию энергоресурсов и обеспечить энергосбережение народного хозяйства.

Также нами разработано **второе схемное решение системы преобразования солнечной энергии** - энергоресурсосберегающая система, которая работает круглый год, независимо от погодных условий, техническая новизна которого также защищена патентом [2].

Второе схемное решение решает задачу создания системы преобразования солнечной энергии, позволяющей решить вопросы экономии топливно-энергетических ресурсов, а также вопросы защиты окружающей среды от тепловых и токсичных выбросов.

Основными источниками энергии в энергоресурсосберегающей системе являются: возобновляемый источник энергии (ВИЭ), к которому относятся солнечный

источник тепловой энергии, низкопотенциальный источник энергии (НПИЭ), и искусственный источник энергии (ИИЭ).

Таким образом, энергоресурсосберегающая система путем использования ВИЭ и ИИЭ может удовлетворить потребность в электроэнергии, источнике теплоты и холода промышленных объектов и сельхозпроизводителей, расположенных в труднодоступных районах, удаленных от централизованных линий электропередач, в течение круглого года. Применение АБХМ позволяет сохранить качество сельхозпродуктов и увеличить их срок хранения, и отличается значительно меньшим расходом электроэнергии и ее применение сельхозпроизводителями позволяет снизить как эксплуатационные расходы, так и стоимость ввода в эксплуатацию.

Литература

1. Тимофеев В. Н., Васильева И. Г. Электроэнергетическая установка на солнечной энергии. Патент 103579 Российская Федерация, МПК F03G6/00 (2006.01). - № 2010145501/28; заявл. 09.11.2010; опубл. 20.04. 2011. Бюл. № 11. – 6 с.: ил.
2. Тимофеев В. Н., Васильева И. Г. Энергоресурсосберегающая установка. Патент 109507 Российская Федерация, МПК F03G6/00 (2006.01). – № 2011119127/06; заявл. 12.05.2011; опубл. 20.10.2011. Бюл. № 29. – 9 с.: ил.

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ИНВЕРТОРОВ В СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ ДЛЯ СБРОСА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В СЕТЬ

Серебрянников А.В., Богомолова С.А.
Чебоксары, ФГБОУ ВПО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова»
alex-silver@mail.ru, s_bogomolova@mail.ru

Преимущества связи солнечных электростанций (СЭС) с сетями переменного тока приводят к новому измерению в возобновляемой энергетике путем решения проблемы временного избытка или дефицита возобновляемой энергии с помощью подключения СЭС к общей сети переменного тока [1]. Это улучшает экономику и нагрузочную способность СЭС – два важных фактора любой энергосистемы. Сеть питает потребителей СЭС, когда её мощности недостаточно (например, ночью и в облачную погоду), или принимает избыточную мощность станции, если таковая имеется. При этом потребление электроэнергии от сети в дневное время существенно снижается и часть энергозатрат компенсируется, особенно если пиковое потребление приходится как раз в весенне-летний период с преобладанием в дневное время суток.

Системы с сетевыми инверторами получили широкое применение в США, Европе, Азии благодаря возможности работать параллельно с сетью и обходиться без аккумуляторных батарей. В этих странах благодаря законам и поддержке со стороны государств потребители, установив системы с сетевыми инверторами, имеют возможность продавать излишки солнечной энергии обратно в сеть по завышенным тарифам. Поскольку стоимость переданной в сеть энергии обычно немного выше принятой от сети, в таких энергосистемах используются два счётчика электрической энергии – отдельно для измерения переданной в сеть и потреблённой от сети мощности. В России подобный закон уже принят, но находится на стадии доработки вопроса по тарификации и разрешительным документам.

Использование сетевых инверторов позволяет исключить из системы аккумуляторные батареи и сопутствующие им устройства (зарядное устройство,

контроллер заряда-разряда и т.д.). Это увеличивает долговечность и надёжность данных систем, т.к. в автономных и гибридных системах на основе возобновляемых источников энергии аккумуляторы являются самым слабым звеном. Аккумуляторные батареи являются также и самыми дорогими в энергосистеме, поэтому использование сетевых инверторов позволяют снизить затраты на установку СЭС до 60 % общей стоимости системы.

Инверторы для сброса электрической энергии в сеть называются **сетевыми инверторами** (англ. *grid-tie inverter* (GTI) или *on-grid inverter*) [2]. Это полупроводниковые устройства, предназначенные для преобразования постоянного напряжения от фотоэлектрических модулей в переменное и подающие это напряжение в сеть 220 В или 380 В (например, внутреннюю сеть предприятия или внешнюю сеть энергосбытовой компании). Сетевые инверторы являются **синхронными преобразователями**, поскольку их выходное напряжение должно быть синхронизировано с сетью для сопряжения с ней по трём параметрам напряжения сети: *частоте, амплитуде* и *фазе*. Обычно для перехода сетевого инвертора в режим передачи энергии в сеть переменного тока должны быть выполнены следующие условия для параметров выходного напряжения инвертора и напряжения сети [1]:

- разница амплитуды не более нескольких процентов;
- разница фаз не более 5°;
- разница частот не более 1/3 Гц;
- соблюдение приведённых выше трёх условий в течение 0,25-0,5 с.

Небольшая разница между выходным напряжением инвертора и сетевым напряжениями всё равно будет иметь место [1]. При подключении инвертора к сети это приводит к появлению пускового тока, протекающему между инвертором и сетью до тех пор, пока два напряжения не сравняются. Начальная амплитуда пускового тока в момент замыкания ключа зависит от степени несоответствия между двумя напряжениями. Пусковой ток, в конце концов, спадает до нуля по экспоненциальному закону.

Понятно, что сетевой инвертор постоянно должен следить за параметрами напряжения сети, т.к. они со временем по разным причинам могут меняться, поэтому такой инвертор также является **следающей системой**.

Стоит отметить, что системы на основе сетевых инверторов не нужно рассматривать в качестве резервного источника энергии при перебоях электропитания от стационарной сети, однако данные системы можно устанавливать параллельно с системами бесперебойного питания.

Классификация сетевых инверторов

Маломощные сетевые инверторы (англ. *Grid-Tie MicroInverter*) имеют мощность в пределах от 200 Вт до 1 кВт и находят широчайшее применение для домашних однофазных фотоэлектрических систем только с одной или несколькими солнечными модулями. Как правило, они не допускают конфигурирования и не оснащаются коммуникационными интерфейсами, тем не менее есть возможность параллельного их включения.

Мощные сетевые инверторы (более 1 кВт) поставляются производителями с широким набором опций, позволяющих включать их параллельно, подключать аккумуляторы, объединять изделия в сети по стандартным коммуникационным интерфейсам (RS-232/RS-485/Ethernet).

Трёхфазные промышленные сетевые инверторы используются для передачи энергии от фотоэлектрических панелей в трёхфазную сеть. В настоящее время для промышленного применения производятся сетевые инверторы мощностью до нескольких сотен киловатт. Такие преобразовательные станции строятся по

модульному принципу для минимизации потерь и получения максимальной эффективности использования солнечной энергии.

Основные параметры сетевых инверторов

Независимо от названия и терминологии сетевых инверторов от разных производителей их описания обычно включают в себя следующие параметры [2]:

1) *Номинальная выходная мощность* показывает, какую номинальную мощность преобразования можно получить от данного инвертора.

2) *Выходное напряжение* указывает, к какой сети по напряжению можно подключить инвертор. Для небольших инверторов, которые предназначены для бытового использования, выходное напряжение, как правило, равно 240 В переменного тока. Инверторы для коммерческого использования рассчитаны на 208, 240, 277, 400 или 480 В переменного тока, а также могут подключаться к трёхфазной сети.

3) *Максимальная эффективность* представляет собой наивысшую эффективность преобразования энергии, которую инвертор может достичь. Большинство сетевых инверторов имеют максимальный КПД более 94 %, некоторые из них – до 96 %.

4) *Взвешенная эффективность*, в отличие от максимальной эффективности, показывает среднюю эффективность инвертора и даёт лучшее представление об эффективности его работы.

5) *Максимальный входной ток* – максимальная величина входного тока, который инвертор может преобразовать.

6) *Максимальный выходной ток* – максимальный непрерывный переменный ток, который инвертор сможет выдавать на выходе. Это значение обычно используется для определения минимального или номинального значения перегрузки по току устройств защиты, например, выключателей и предохранителей.

7) *Диапазон отслеживания напряжения максимальной мощности* представляет собой диапазон напряжения постоянного тока, в котором точка максимальной мощности инвертора будет работать. Разработчики систем должны оптимально рассчитать цепочки из последовательно соединённых солнечных элементов так, чтобы в течение большей части года их напряжение находилось в пределах этого диапазона. Необходимо учитывать, что напряжение будет колебаться при изменении температуры.

8) *Минимальное входное напряжение* указывает минимальное напряжение, которое требуется для того, чтобы инвертор включился и начал работать. Это значение особенно важно для солнечных систем, так как проектировщик системы должен быть уверен, что достаточное количество солнечных модулей соединены последовательно в каждой цепочке, чтобы произвести это напряжение.

9) *Степень защиты IP или код исполнения* классифицирует и оценивает уровень защиты корпуса для внутренней электроники от проникновения внешних твёрдых предметов (первая цифра) и воды (вторая цифра), более высокая цифра означает более высокую защиту.

Режимы работы сетевых инверторов

Существует три режима работы сетевых инверторов:

1) *Режим длительной работы*, соответствующий номинальной мощности инвертора.

2) *Режим перегрузки*, в котором большинство моделей инверторов в течение нескольких десятков минут (до 30) могут отдавать мощность, в 1,2-1,5 раза большую номинальной.

3) *Пусковой режим*, в котором инвертор способен отдавать повышенную моментальную мощность в течение нескольких миллисекунд для обеспечения запуска электродвигателей и ёмкостных нагрузок.

Структура солнечной электростанции с сетевым инвертором

На рис. 1 представлена примерная структурная схема энергетической системы с сетевым инвертором, основные узлы которого также приведены на схеме. Сетевые инверторы имеют блок контроля мощности солнечной батареи (СБ) и включаются автоматически, как только мощность СБ становится достаточной для формирования переменного сигнала. Обычно существует возможность подключения одной или нескольких СБ (последовательно соединённых цепочек солнечных модулей). Чаще всего они подключаются к устройству защиты постоянного тока, в котором суммируются токи от отдельных СБ.

Сетевые инверторы для снижения потерь на преобразование постоянного напряжения в переменное работают при высоких входных напряжениях, соизмеримых с напряжением сети. Для получения более высокого постоянного напряжения используется повышающий импульсный преобразователь. Также сетевые инверторы обычно имеют встроенную систему слежения за точкой максимальной мощности (англ. MPPT – *Maximum Power Point Tracking*), которая способна определять оптимальное соотношение напряжения и тока, которые снимаются с фотоэлектрических модулей и позволяет получать максимум энергии при любых изменениях метеоусловий, благодаря чему генерация электрического тока происходит даже в пасмурную погоду (рис. 2).

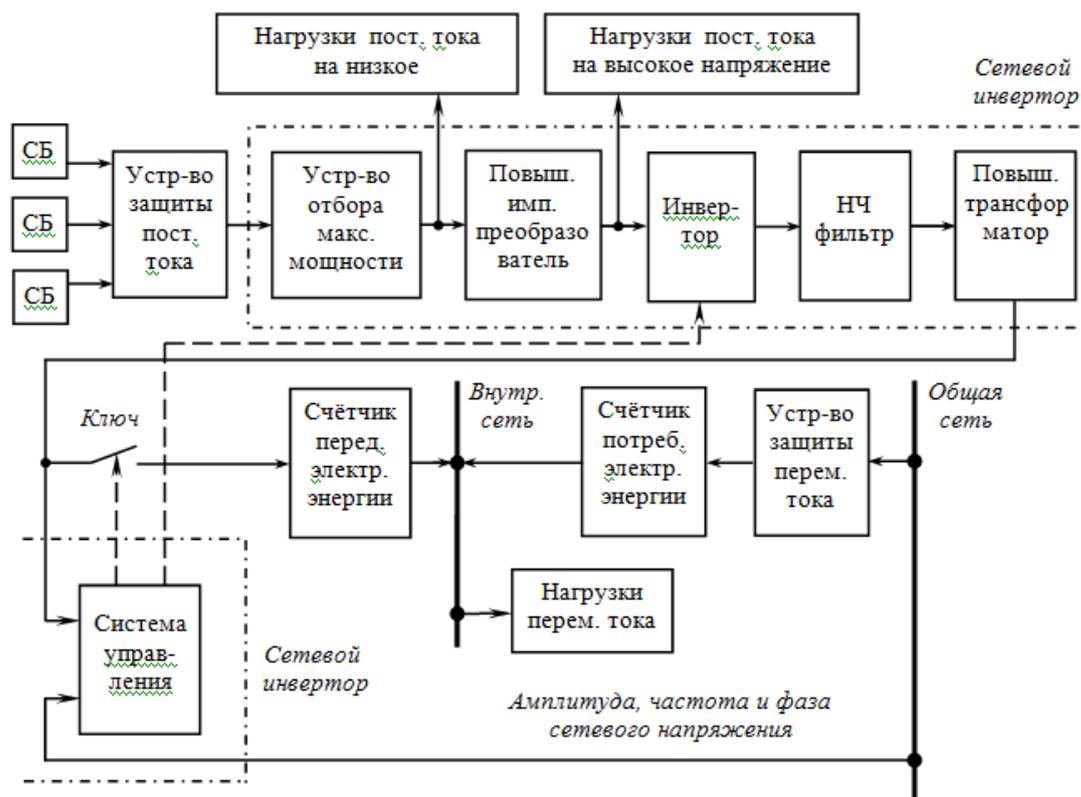


Рис. 1. Структурная схема энергетической системы с сетевым инвертором

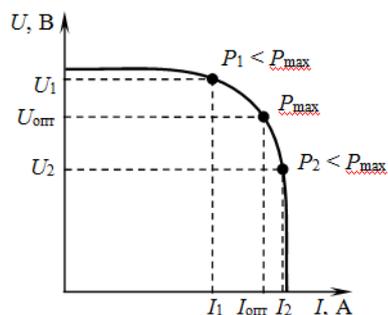


Рис. 2. Иллюстрация поиска максимальной мощности по ВАХ солнечной батареи



Рис. 3. Иллюстрация срабатывания защиты *Anti-Islanding Protection*

Напряжение на выходе инвертора должно быть немного выше, чем напряжение в сети [2]. Надо заметить, что если выходное напряжение инвертора будет значительно выше, чем напряжение в сети, то инвертор будет перегружен, если же оно будет ниже – сетевой инвертор будет нагрузкой для сети, а не источником энергии. Поэтому для того, чтобы ограничить ток в нагрузку, которой выступает сеть, на уровне номинальной мощности инвертора, выходное напряжение сетевого инвертора должна быть чуть выше, чем напряжение в сети. Обычно между выходом инвертора и сетью имеется дополнительный дроссель (индуктивность), который принимает на себя лишнее напряжение переменного тока, а также является частью фильтра низких частот (ФНЧ). Поскольку сеть выступает в качестве источника с очень низким сопротивлением, сетевой инвертор работает как источник тока, а не источник напряжения.

Сетевой инвертор следит не только за параметрами сети, но и за её наличием. При исчезновении напряжения в сети или при выходе параметров напряжения сети за допустимые пределы инвертор в целях безопасности должен гарантированно прекратить подачу электроэнергии в сеть для предотвращения поражения электрическим током работников, которые занимаются ремонтными работами в сети. Такая защита называется *Anti-Islanding Protection*. В таких случаях автоматический выключатель быстро отключает выход инвертора от сети (рис. 3). Время срабатывания такой защиты зависит от параметров сети и настроек инвертора. В худшем случае, когда напряжение в сети падает ниже 0,5 от номинального или его частота отклоняется на 0,5-0,7 Гц от номинального значения, сетевой инвертор должен прекратить генерирование электроэнергии в сеть менее, чем за 100 мс [2].

Принципы построения сетевых инверторов

Сетевые инверторы в отличие от автономных инверторов в качестве опорного напряжения, частоты и фазы выходного напряжения должны брать параметры сетевого напряжения.

Сетевые инверторы можно строить:

- 1) в виде следящей системы с достаточно сложной микроконтроллерной системой управления;
- 2) на базе зависимого инвертора, ведомого сетью, с более простой микроконтроллерной системой управления.

В следящих системах преобразование из постоянного напряжения в переменное обычно происходит с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ) (англ. *PWM – Pulse Width Modulation*) с последующей фильтрацией полученного сигнала с помощью ФНЧ (рис. 4) [2].

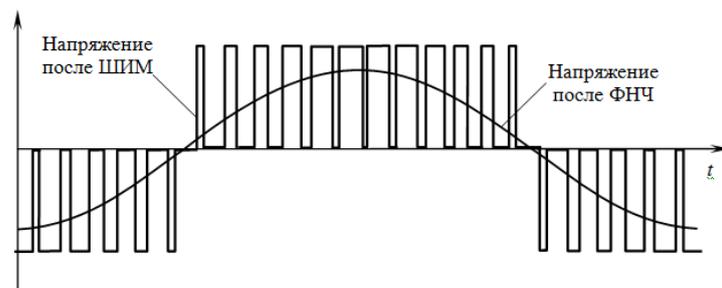


Рис. 4. Иллюстрация принципа ШИМ и фильтрации ШИМ-сигнала

ШИМ генерирует двухполярные импульсы с постоянной высокой частотой, ширина которых пропорциональна мгновенному значению сетевого напряжения в момент начала импульса. Полученный ШИМ-сигнал затем фильтруется для удаления гармоник выше первой (3-й, 5-й, 7-й и т.д.).

В обобщённом виде в следящих сетевых инверторах происходит преобразование тока и напряжения, меняющихся по значению и форме, до достижения параметров, необходимых для сопряжения с сетью.

Следящие сетевые инверторы могут быть построены по следующим топологиям:

- 1) с высокочастотным (ВЧ) трансформатором;
- 2) с низкочастотным (НЧ) трансформатором;
- 3) без трансформатора.

При использовании *ВЧ-трансформаторов* преобразование постоянного напряжения в переменное происходит в несколько ступеней. Вместо преобразования постоянного напряжения непосредственно в переменное, постоянное напряжение сначала преобразуется в переменное высокой частоты, а затем обратно в постоянное, которое уже окончательно преобразуется в переменное выходное напряжение.

Упрощенная схема сетевого инвертора с трёхступенчатым преобразованием и ВЧ-трансформатором приведена на рис. 5. Её особенностью являются низковольтный вход, а также гальваническая развязка между входом и выходом благодаря наличию ВЧ-трансформатора [2].

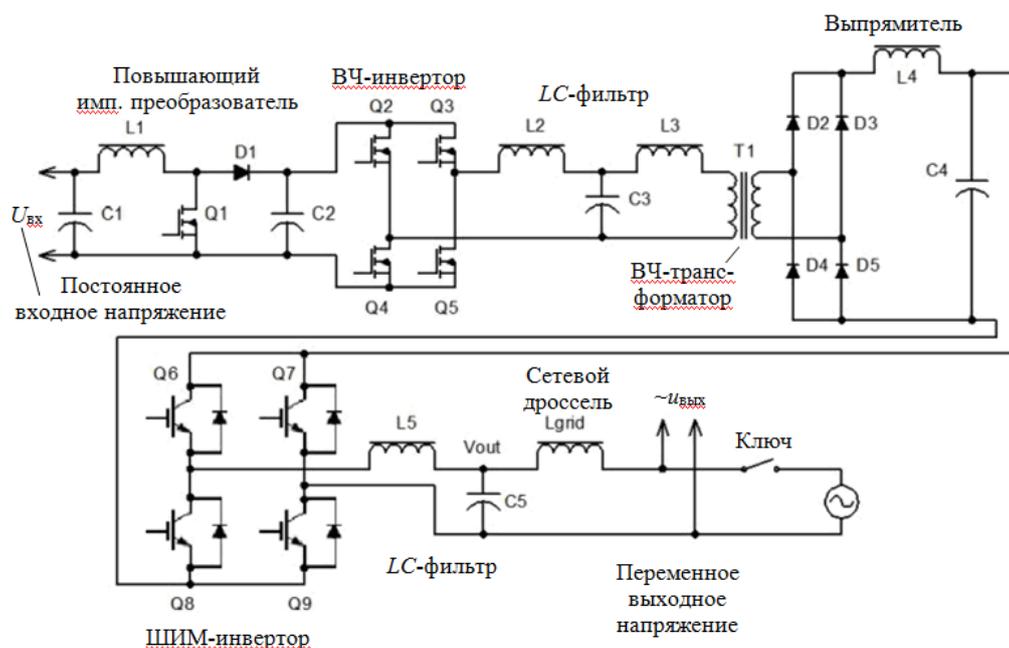


Рис. 5. Упрощенная схема сетевого инвертора с трёхступенчатым преобразованием и ВЧ-трансформатором

Полная конструкция следящих сетевых инверторов намного сложнее: алгоритмом работы преобразования управляет микроконтроллер, имеются защиты входных и выходных цепей по постоянному и переменному току, устройства мониторинга и контроля. При необходимости могут быть установлены интерфейсы передачи данных по протоколам RS-484 и Bluetooth.

Бестрансформаторная инверторы более просты и эффективны, чем схемы с трансформаторами, которые популярны в Европе. Тем не менее бестрансформаторные инверторы не спешат выходить на рынок США, что связано с отсутствием гальванической развязки между цепями постоянного и переменного тока, из-за чего в цепь переменного тока может пройти скачки напряжения из-за неисправности в цепи постоянного тока. Для примера на рис. 6 приведена принципиальная схема топологии «Coolsept» бестрансформаторного инвертора.

Сетевые инверторы также можно строить на базе *зависимых инверторов* (инверторов, ведомых сетью), которые обычно и используются в преобразовательной технике при необходимости сброса энергии в сеть. Зависимые инверторы выполняются по тем же схемам, что и управляемые выпрямители. На рис. 7, а приведена схема однофазного двухполупериодного инвертора с выводом средней точки вторичной обмотки трансформатора (однофазная нулевая схема) [3, 4].

Запирание и отпирание тиристоров происходит под воздействием напряжения вторичной обмотки трансформатора, которое создаётся сетью переменного тока. Частота и напряжение на выходе такого инвертора всегда равна частоте и напряжению сети соответственно. Поэтому такой инвертор называют инвертором, ведомым сетью.

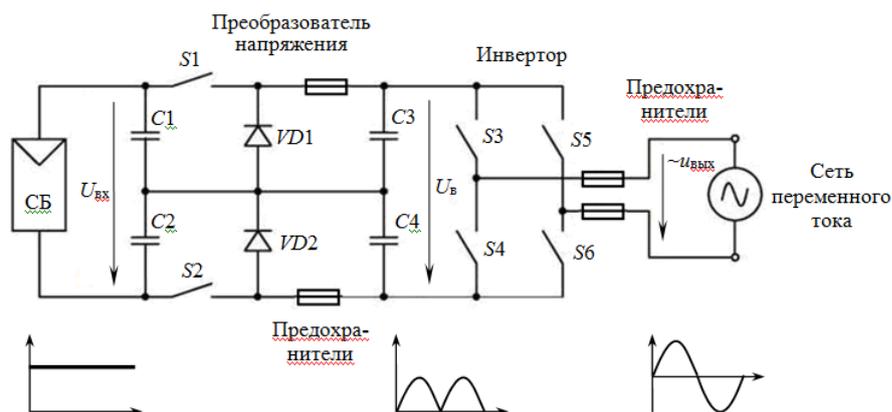


Рис. 6. Принципиальная схема топологии «Coolsept» бестрансформаторного инвертора

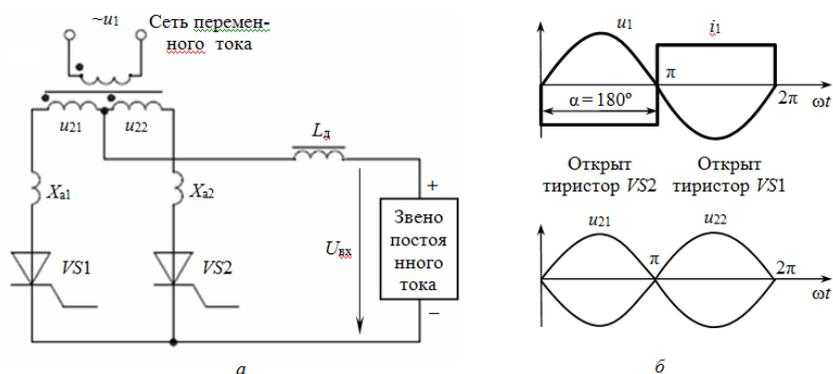


Рис. 7. Зависимый инвертор: однофазная двухполупериодная схема с выводом средней точки вторичной обмотки трансформатора (а); временные диаграммы его работы (б)

Для перехода от выпрямительного режима к инверторному (передачи электроэнергии постоянного тока в сеть переменного тока) необходимо, чтобы ток

первичной обмотки i_1 , потребляемый от сети, и напряжение на первичной обмотке u_1 находились в противофазе (с фазовым сдвигом 180°). Подобный сдвиг возможен в том случае, когда тиристоры $VS1$ и $VS2$ будут открываться поочередно при отрицательной полярности напряжений u_{21} и u_{22} (рис. 7, б), т.е. тиристоры надо открывать с углом запаздывания $\alpha=180^\circ$. При этом происходит поочередное подключение вторичных обмоток трансформатора к источнику постоянного тока.

Литература:

1. Mukund R. Patel. Wind and solar power systems. Design, Analysis, and Operation. Mechanical engineering / Second edition. Taylor & Francis, 2006. 448 p.
2. О gree-d-tie инверторах. URL: <http://www.alternative-energy.kiev.ua/o-greed-tie-invertorah/> (дата обращения: 07.07.2013).
3. Забродин Ю.С. Промышленная электроника: Учебник для вузов. М.: Высш. школа, 1982. 496 с.
4. Горбачёв Г.Н., Чаплыгин Е.Е. Промышленная электроника: Учебник для вузов / Под ред. В.А. Лабунцова. М.: Энергоатомиздат, 1988. 320 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

¹Афанасьев В.П., ²Григорьев В.Г., ²Павлова Н.В.

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Санкт-Петербург

²Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, Чебоксары

VPAfanasjev@mail.ru

В последнее время в мировой и российской энергетике уделяется повышенное внимание развитию солнечной энергетики. В частности, в г. Новочебоксарске завершается строительство завода по производству тонкопленочных солнечных модулей с применением технологий, разработанных швейцарской компанией «Qerlikon Solar». Начата подготовка специалистов с высшим образованием в области солнечной энергетики в СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) и в ЧГУ им. И.Н. Ульянова.

Обеспечение учебного процесса согласно федеральному образовательному стандарту последнего поколения требует постоянного совершенствования лабораторной базы, увеличения доли практических занятий. Для решения этой задачи на кафедре квантовой электроники и оптико-электронных приборов СПбГЭТУ подготовлен и развернут цикл практических занятий и лабораторных работ по исследованию фотоэлектрических характеристик солнечных элементов (СЭ) на основе аморфного и кристаллического кремния. Для исследования солнечных элементов разработан испытательный стенд, схема которого приведена на рис.1.

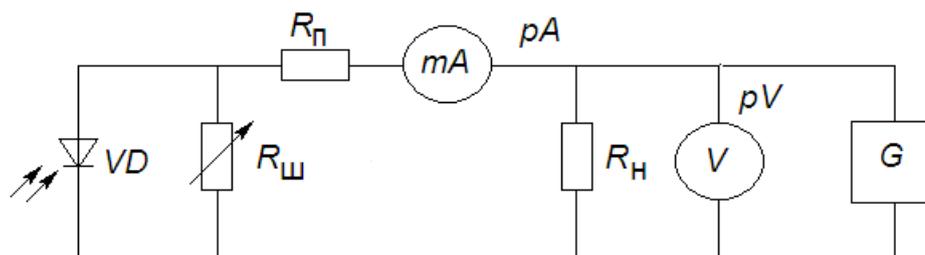


Рис.1. Электрическая схема для исследования фотоэлектрических характеристик СЭ

Схема содержит VD-солнечный элемент; G-регулируемый источник постоянного напряжения, pV- вольтметр для измерения напряжения на солнечном элементе, pА-миллиамперметр для измерения выходного тока СЭ. Резисторы Rп и Rш введены в схему для имитации значений паразитных сопротивлений структуры СЭ; Rн - сопротивление нагрузки. В качестве источника световой энергии использовалась лампа накаливания. Для исследования вольт-амперных характеристик СЭ sk установлен на радиаторе, обеспечивающем постоянство температуры элемента. Изменение светового потока, падающего на СЭ, осуществляется путем изменения напряжения, подаваемого на лампу. Измерение светового потока (Φ) осуществлялось люксметром.

В качестве объектов исследования использовались солнечные элементы на основе аморфного гидрогенизированного кремния (1) и монокристаллического кремния (2). Результаты проведенных исследований приведены на рис.2, 3 и 4.

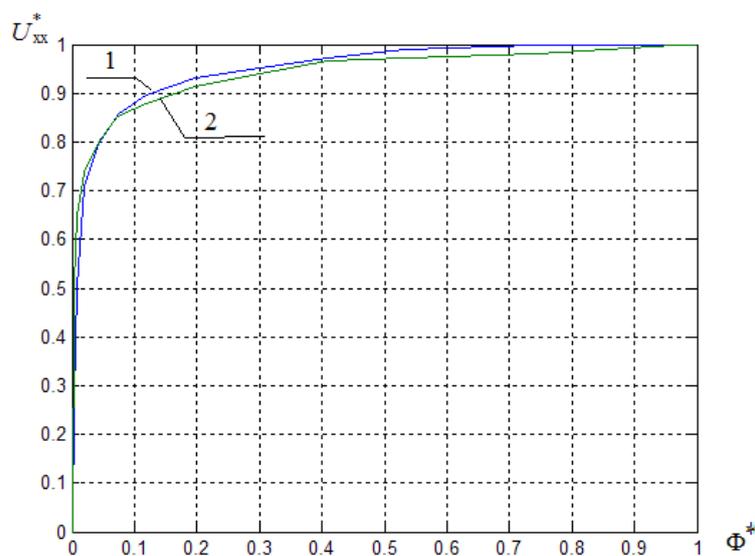


Рис.2 Зависимость напряжения холостого хода от мощности светового потока ($U_{xx}^*(\Phi^*)$) для солнечных элементов на основе аморфного гидрогенизированного (1) и монокристаллического (2) кремния.

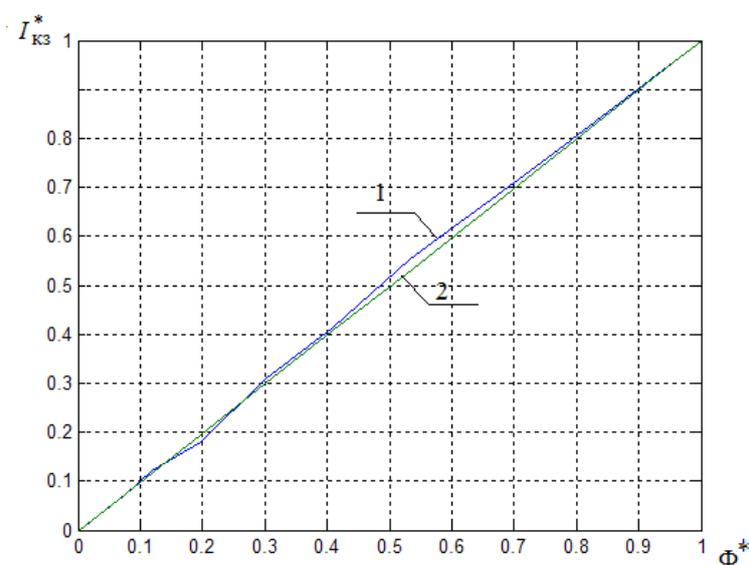


Рис. 3 Зависимость тока короткого замыкания от мощности светового потока ($I_{kz}^*(\Phi^*)$) для солнечных элементов на основе аморфного гидрогенизированного (1) и монокристаллического (2) кремния

Полученные характеристики солнечных элементов представлены в относительных единицах. На рис.2 и 3 за базовое значение светового потока Φ принято значение $\Phi_b = 100 \text{ Вт/м}^2$, а за базовые значения $I_{кз}$ и $U_{хх}$ приняты их значения, полученные при $\Phi=100 \text{ Вт/м}^2$.

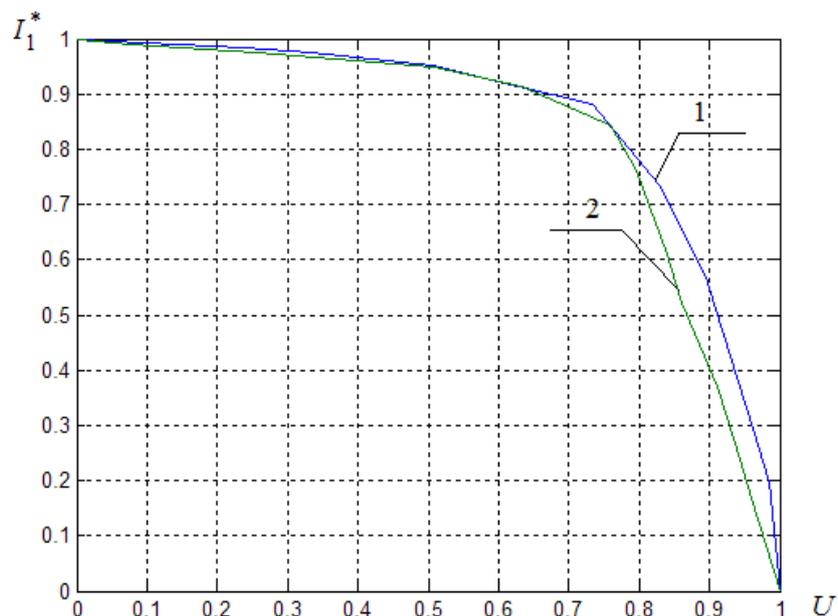


Рис. 4. ВАХ солнечных элементов на основе аморфного гидрогенизированного (1) и монокристаллического (2) при $\Phi=100 \text{ Вт/м}^2$

Результаты проведенных исследований соответствуют основным теоретическим положениям. Графики фотоэлектрических характеристик исследованных солнечных элементов на основе аморфного гидрогенизированного и монокристаллического кремния, представленные в относительных единицах достаточно близки друг к другу.

На основе выполненных исследований разработаны методические указания к лабораторным работам по исследованию фотоэлектрических характеристик солнечных элементов. Подготовленный цикл лабораторных работ позволит не только закрепить теоретические знания, полученные на лекциях и практических занятиях, но и получить практические навыки работы на современном измерительном оборудовании, освоить приемы проведения измерений спектральной чувствительности и энергетической эффективности полупроводниковых фотодиодов и солнечных элементов. Целью этих работ является, исследование электрических и оптических характеристик тонкопленочных солнечных элементов и модулей. Указания по выполнению работ содержат вводные разделы, в которых кратко описаны объекты исследования, представлены основные особенности исследуемых характеристик и изложены требования к аппаратному оснащению для создания условий корректной оценки нормируемых характеристик и параметров. Наряду с описанием экспериментальных установок приведены конкретные инструкции по выполнению лабораторных работ, управлению экспериментальными установками и обработке полученных результатов.

Подготовлены методические указания к практическим занятиям по компьютерному моделированию солнечных элементов на основе кремния, в которых содержится описание подходов к моделированию характеристик солнечных элементов и приведены примеры использования специализированного программного

обеспечения для моделирования основных характеристик солнечных элементов на основе монокристаллического и аморфного гидрогенизированного кремния.

Литература

1. Афанасьев В. П., Теруков Е. И., Шерченков А. А. Тонкопленочные солнечные элементы на основе кремния СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. 168 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОПОЛОГИИ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОГО СКРАЙБИРОВАНИЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СОЛНЕЧНЫХ МОДУЛЕЙ

Ф. С. Егоров, А.В. Кукин
Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ»
maxifedor@mail.ru

В технологии производства солнечных тонкопленочных модулей используется операция лазерного скрайбирования. Это необходимо для разделения на индивидуальные ячейки и их последовательно-параллельной коммутации. Ширина отдельных ячеек влияет на выходную мощность солнечного модуля (СМ) [1]. Однако существует ряд проблем при изменении геометрических размеров ячеек СМ, связанных с появлением "мертвой зоны" (площади, занятой скрайбированием и не участвующей в преобразовании энергии) и последовательным сопротивлением контактов [2]. При увеличении ширины скрайбов доля "мертвой зоны" повышается в процентном соотношении с площадью индивидуальной ячейки и это приводит к снижению КПД СМ. Также, при увеличении размеров самой ячейки увеличивается её последовательное сопротивление, что также негативно сказывается на эффективности работы солнечного модуля. С учетом этих двух механизмов потерь была рассчитана оптимальная ширина ячеек СМ. Получены значения оптимальной ширины ячеек в тонкопленочном солнечном модуле для различных величин поверхностного сопротивления пленок ZnO. По результатам расчета они составили для пленок с поверхностным сопротивлением 5 Ом – 8.4 мм, с сопротивлением 10 Ом - 7 мм, с сопротивлением 15 Ом - 6.2 мм и для пленок с сопротивлением 20 Ом - 5.8 мм

При скрайбировании используются три операции лазерной обработки: P1, P2 и P3 с различными параметрами лазерного излучения [3]. При скрайбировании P1 используется лазер с длиной волны 355 нм. Эта длина волны прозрачна для стекла, но сильно поглощается слоем ZnO. При скрайбировании P2 и P3 используется лазер с длиной волны 532 нм. Эта длина волны прозрачна для стекла и для слоя ZnO, но активно поглощается аморфным кремнием.

Проведен анализ тепловых процессов и выбор режимов лазерного скрайбирования для удаления требуемых слоев в многослойных тонкопленочных солнечных модулях на различных этапах их производства. Результаты моделирования показали, что материал достигает температуры испарения за время, меньшее, чем постоянная длительность лазерного импульса, равная 30 нс.

Проведен анализ и выбор оптимального режима скрайбирования P3, как наиболее ответственного и выполняющегося на завершающем этапе формирования СМ. Исследования проводились при варьировании мощности импульса лазерного излучения от максимальной (100%) до уменьшившейся в 5 раз (20%). На рис. 1

приведены профили скрайба РЗ при разной мощности лазерного излучения, полученные методом АСМ. Видно, что мере увеличения мощности лазерного импульса происходит частичное разрушение фронтального электрода оксида цинка, что приведет к увеличению последовательного сопротивления в модуле.

На основании анализа полученных результатов обоснован выбор режима лазерного скрайбирования РЗ, обеспечивающий более эффективную работу многослойных тонкопленочных солнечных модулей. Этот режим лежит в диапазоне мощности лазерного излучения от 3 Вт до 4.2 Вт.

Разработана простая методика контроля качества скрайбирования РЗ по зависимости сопротивления между двумя соседними элементами от мощности лазерного импульса. При разрушении фронтального электрода, его сопротивление

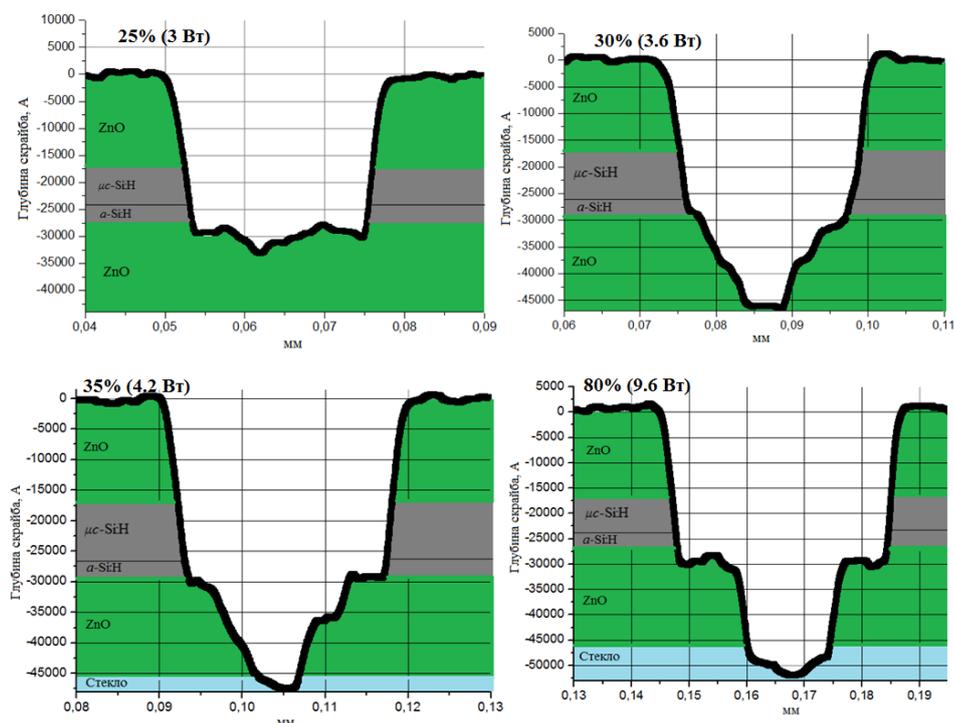


Рис. 1. Профили скрайба РЗ при разной мощности лазерного излучения

возрастает, что может быть зафиксированы по изменению сопротивления между ячейками (рис.2).

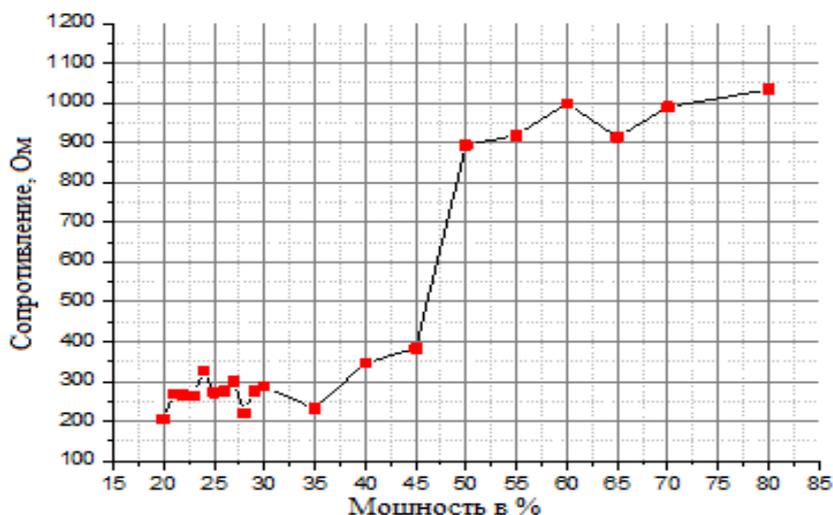


Рис.2. Зависимость сопротивления между двумя элементами от мощности лазерного излучения

Литература

1. В.П. Афанасьев, Е.И. Теруков, А.А. Шерченков. Тонкопленочные солнечные элементы на основе кремния. 2-е изд. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. 168 с.
2. Thin-film silicon solar cells. Editor: Arvind Shah EPFL Press, 2010.
3. В.А. Парфенов, Лазерная микрообработка материалов, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. 57с.

АВТОНОМНАЯ ТОНКОПЛЕНОЧНАЯ СОЛНЕЧНАЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ

О.И. Банник, Г.А. Иванов, Д.В. Плешков
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет им В.И. Ульянова (Ленина) «ЛЭТИ»

Солнечная иррадиация, на сегодняшний день, является основным источником возобновляемой энергии. Фотовольтаика, использующая экологически чистую и безопасную энергию Солнца, имеет огромный потенциал. Наряду с улучшением характеристик непосредственно солнечных модулей определенным научным интересом представляют особенности эксплуатации модулей в составе энергоустановок в реальных условиях окружающей среды. Конструкция энергоустановки должна быть оптимальна для оценки эффективности фотопреобразующих модулей, входящих в состав системы.

Разработана автономная солнечная электростанция на основе тонкопленочных фотопреобразователей. Она позволит проводить измерение мощностных, температурных характеристик двух пар солнечных модулей, находящихся в одинаковых погодных условиях, но при разных углах ориентации к горизонту (часть модулей будет размещена под прямым углом к горизонту, другая ориентируется на оптимальный угол для Санкт-Петербурга). Для установления корреляционной зависимости параметров солнечных модулей от внешних факторов предусмотрен постоянный сбор данных погодных условий: температуры воздуха, солнечной иррадиации, атмосферного давления, влажности, скорости и направлении ветра с возможностью доступа к данным через глобальную сеть интернет.

В состав электростанции входят фотоэлектрические модули, контроллеры заряда, аккумуляторные батареи, датчики иррадиации, температуры, имитатор нагрузки, электронный регистратор. Электронный регистратор фиксирует в энергонезависимой памяти значения:

- 1) вырабатываемых тока и напряжения в точке максимальной мощности фотоэлектрических модулей;
- 2) вырабатываемой электрической мощности;
- 3) температуры на тыльной поверхности фотоэлектрических модулей;
- 4) уровня солнечной иррадиации, измеренной кремниевым фотоприемником, работающим в режиме короткого замыкания.

Для мониторинга метеоданных система комплектуется метеостанцией, которая позволит осуществлять круглогодичный сбор данных с записью на локальный компьютер.

Приведена структурная схема разработанной автономной солнечной энергоустановки, а так же характеристики компонентов в ее составе.

Измерение текущей вырабатываемой мощности фотоэлектрических модулей, производится непосредственно при работе системы, при этом точка максимальной мощности фиксируется контроллером заряда аккумуляторной батареи.

Разработанную солнечную энергоустановку планируется использовать для проведения лабораторных работ в образовательном процессе на кафедре КЭОП Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ»

ДАТЧИК ПЫЛЕОТЛОЖЕНИЯ ДЛЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Смирнов А.В., Кочаков В.Д., Васильев А.И., Петров Д.В., Иванов А.Л.
Чебоксары, Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова
fizteh21@yandex.ru

В России в последнее время уделяется большое внимание развитию солнечной энергетики. Солнце обеспечивает Землю огромным количеством энергии, которое многократно превышает потребности человечества. Использование этого источника затруднено, потому что солнечное излучение на Земле – это сильно рассеянный небольшой поток энергии. Для массового применения солнечного излучения необходимо обеспечить очень эффективное его использование и значительно улучшить характеристики солнечных элементов [1].

Большинство панелей разработаны с целью правильной эксплуатации в течение длительного времени, однако их производительность сокращается в зависимости от условий окружающей среды и в особенности деградация панелей связана с состоянием поверхности панелей, нуждающаяся в постоянном мониторинге. Использование самоочищающихся технологий или сбрасывание каскадным электростатическим полем [2] требуют вмешательства в технологию производства солнечных батарей, а постоянная промывка поверхности панелей водой является экономически затратным средством, особенно в регионах с нехваткой водных ресурсов, в связи с чем возникает необходимость точно фиксировать время, когда надо произвести промывку водой. Разработка системы контроля состояния солнечных панелей от загрязнения пылью и другими атмосферными явлениями является актуальной задачей для солнечной энергетики

Среди факторов, сокращающие производство электроэнергии следует выделить:

1. Пыль, оседающая на солнечные элементы, которая блокирует генерирующий слой от попадания солнечных лучей (рисунок 1).
2. Пыль, блокирующая солнечное излучение в воздухе, которая отражает солнечные лучи.
3. Атмосферные и природные отложения, затемняющие панели.



Рисунок 1. Пылеотложения на солнечных элементах

Из-за большого влияния пыли на панели, изучение деградации солнечных панелей оказывается жизненно важным. Это могло бы помочь добиться улучшений в дизайне и очистки для более эффективного предотвращения пылинакопления.

Проведена большая аналитическая работа по оценке основных методов регистрации и контроля пылеотложения и выяснено, что их условно можно подразделить на несколько методов.

1) Оптические методы регистрации пылеотложения.

Оптические методы, конструкции которых состоят из излучателя и приемника излучения. Подобные устройства и системы контроля пылеотложения имеют существенный недостаток, заключающийся в том, что фотоприемники регистрируют не только полезный сигнал, но и рассеянный свет, при разных освещенностях показания фотоприемника при одинаковом пылеотложении могут отличаться. Так же оптические методы регистрации пылеотложения напрямую не связаны с энергетическими параметрами солнечных панелей, изменение оптических характеристик не отражает однозначно проценты потерь мощности и требуют для перевода в энергетические величины решения сложной многофакторной задачи.

2) Методы регистрации пылеотложения, основанные на пьезоэффекте.

Методы контроля пылеотложения основанный на пьезоэлектрическом эффекте имеют неоднозначные выходные характеристики, потому что концентрация или масса пыли, измеренная по резонансной частоте колебаний, не дает однозначного контроля уровня запыленности, вызывающая необходимость дальнейшего математического пересчета в энергетические величины (потери в мощности). Данная процедура является сложной многопараметрической задачей и не дает представления о моменте времени, в который должна производиться очистка панелей.

Исходя из вышеприведенных недостатков, возникает задача разработки эффективной и простой в исполнении системы (устройства) контроля состояния поверхности солнечных панелей.

Предложенный нами метод основан на дифференциальном сравнении одной из основных характеристик чистой панели и панели, которая подвергается воздействию пыли и других негативных осадений, причем конструкция предполагает нахождение двух панелей при одинаковых условиях в момент измерения сигналов с тем, чтобы исключить влияние негативных параметров на измеренные значения токов.

Поставленная задача была решена применением датчиков, представляющих собой два идентичных плоских фотоэлемента размером 10×10 мм² толщиной 150 мкм и имеющих равные выходные энергетические характеристики, но у одного из них фоточувствительная поверхность сохраняется чистой, путем периодической смены защитного стекла, а другого защитное стекло сохраняется до достижения критической запыленности. Для исключения накопления электростатических зарядов на фоточувствительном датчике и предотвращения притяжения мелких частиц (пыли) целесообразно использование именно двух однородных материалов (стекло). Применение других сочетаний материалов (например, прозрачной полимерной пленки и стекла) приведет к появлению электростатических зарядов на поверхности стекла при трении пленки о стекло при перематывании для смены загрязненного участка пленки на участок чистый от загрязнений, что неприемлемо для фоточувствительного датчика. При трении одинаковых материалов заряды не образуются.

При периодическом дифференциальном сравнении фото-ЭДС от датчика с чистой поверхностью и датчика, поверхность которого подвергается воздействию пыли и других негативных атмосферных осадений, ведущих к снижению эффективности, появляется возможность установить время для промывки или очистки солнечных панелей.

Конструкция предполагает нахождение двух датчиков в момент измерения при одинаковых условиях (температура, уровень солнечной инсоляции, влажность и т.д.) для исключения влияния текущих метеоусловий на величину фото-ЭДС обоих датчиков.

На рисунке 2 показан общий вид расположения устройства мониторинга состояния поверхности солнечных панелей.

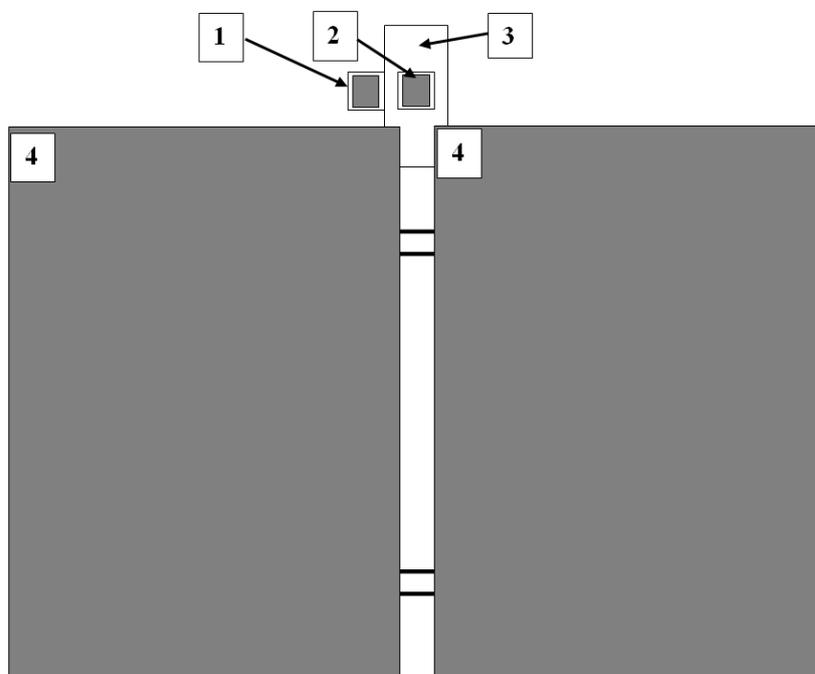


Рисунок 2. Расположение системы датчиков на солнечных панелях

- 1 - Фоточувствительный элемент не защищенный от пылеотложения
- 2 - Фоточувствительный элемент - эталон, защищенный от пылеотложения
- 3 - Корпус с механизмом, обеспечивающим чистоту эталонного фотоэлемента
- 4 - Энергоустановка, состоящая из солнечных панелей

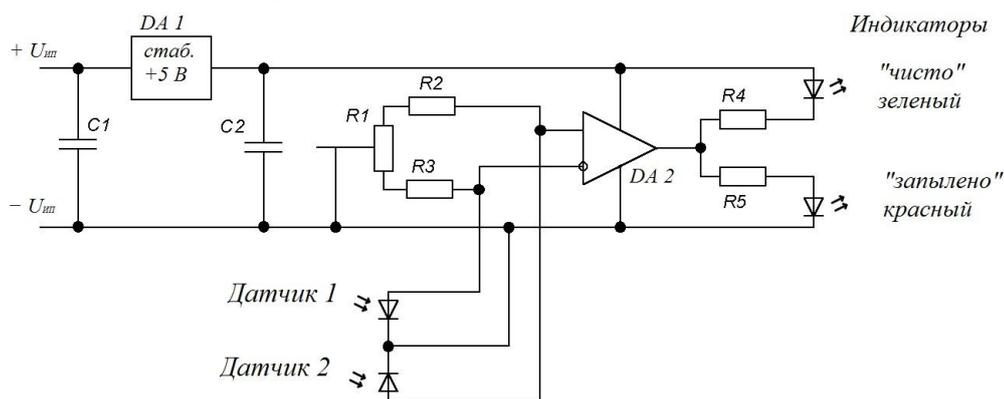


Рисунок 3. Принципиальная схема электронного блока индикации

Блок индикации работает по принципу сравнения сигналов от датчиков по схеме компаратора. Уровень срабатывания выставляется переменным резистором R_1 . После того, как по принципиальной схеме, изображенного на рисунке 2 был собран образец датчика нами апробирован его режим работы.

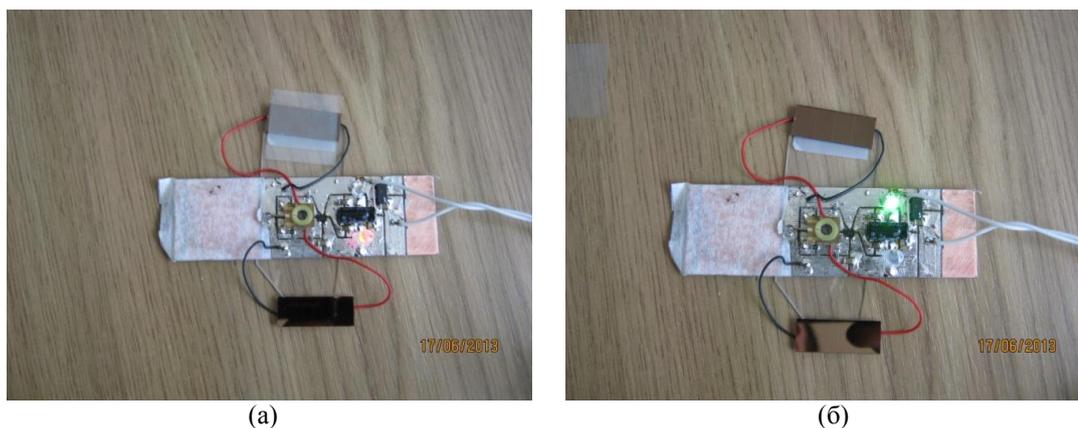


Рисунок 4. Изображение датчика в рабочем состоянии под воздействием рассеивающих лучей

На рисунке 4 показана работа датчика в лабораторных условиях под воздействием рассеивающего излучения. На нем видно, что когда обе панели «чисты» горит зеленый индикатор(а), а при загрязнении чувствительной панели и возникновении разницы ЭДС загорается красный индикатор, сообщающий о том, что необходимо произвести очистку панели.

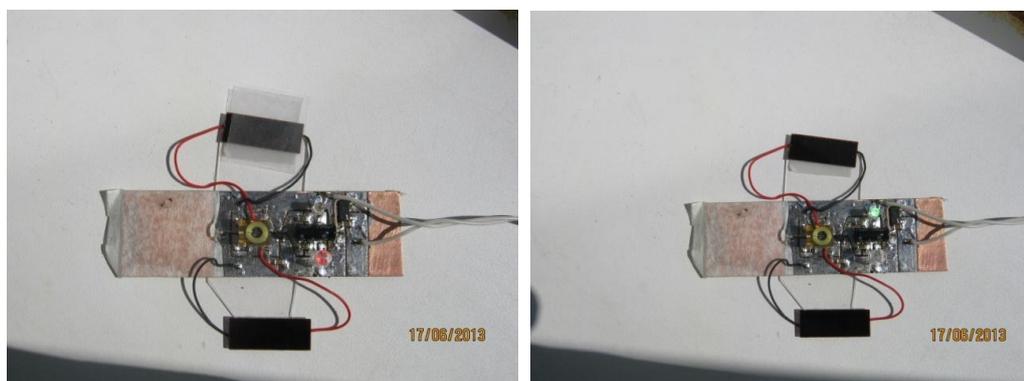


Рисунок 16. Изображение датчика в рабочем состоянии под воздействием прямых солнечных лучей

Проведены испытания работы датчика в реальных условиях эксплуатации на открытом воздухе, которые указывают на потребность в настройке номинальных сопротивлений электронного блока индикации для улучшения параметров функционирования датчика. В дальнейшем созданный прототип устройства требует определения оптимальных номинальных сопротивлений и иных действия по его модифицированию для увеличения чувствительности на загрязненность. Все это в комплексе даст возможность перейти к промышленному образцу и малосерийному производству.

Литература

1. R. E. Cab anillas, H. Munguía "Dust accumulation effect on efficiency of Si photovoltaic modules" Journal of renewable energy and sustainable energy 3, 043114 (2011)
2. M. Mani, R. Pillai. Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: Research status, challenges and recommendations, Renewable and Sustainable Energy Reviews 14, 2010, pp. 3124-3131

ИССЛЕДОВАНИЕ АГРЕГАТНЫХ СОСТОЯНИЙ ВОДОРОДА В ПРОЦЕССЕ ЗАПОЛНЕНИЯ НАНОТРУБОК

Самсонов А.М.
Чебоксары, Чувашский государственный педагогический
университет им. И. Я. Яковлева
cheb87@inbox.ru

Использование таких материалов как углерод в форме протяжённых цилиндрических структур диаметром от одного до нескольких десятков нанометров и длиной до нескольких сантиметров, состоящих из одной или нескольких свёрнутых в трубку гексагональных графитовых плоскостей - углеродных нанотрубок (далее УНТ), дают неограниченные возможности исследования и применения, с возможностью эффективного преобразования электромагнитного излучения в электричество. Модификация УНТ и их заполнение различными веществами может увеличить отношение площади поверхности солнечной батареи к объёму, в результате чего возрастает КПД солнечного элемента. Машинное моделирование хранения водорода в углеродных нанотрубках позволяет судить об изменении агрегатного состояния водорода по мере его накопления в УНТ [1]. Фазовая диаграмма водорода, приведенная на рис. 1, при наличии значительного ограничения в размерах объёма, содержащего водород, может получить заметные искажения.

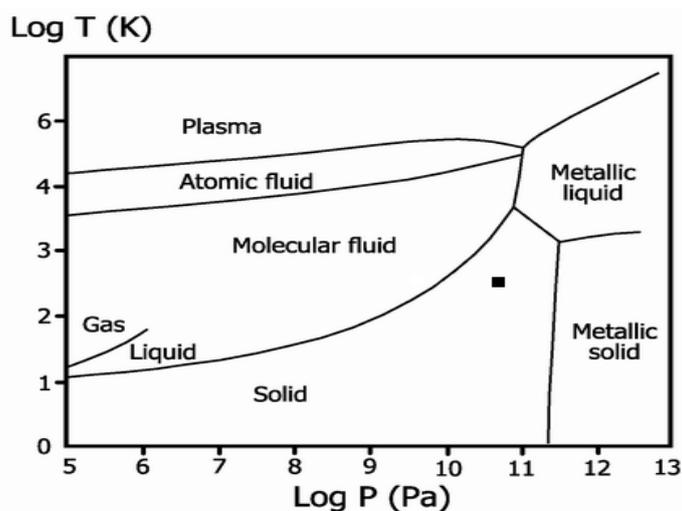


Рис.1. Фазовая диаграмма водорода

Хорошо известно, что эти искажения связаны с уменьшением размеров объёма до величин, сравнимых с рядом характерных длин, которые определяют состояние системы многих частиц. При заполнении водородом внутренности нанотрубки ограничения в размерах имеют место в плоскости, перпендикулярной оси УНТ. Наши наблюдения за состоянием водорода, помещённым внутрь УНТ, подтверждают наличие упорядоченности, характерной для твердотельной фазы, при давлениях порядка 50 ГПа, при комнатной температуре (см. чёрный квадратик на рис.1).

Для исследования упорядочения молекул водорода при заполнении УНТ применены два подхода: расчеты на основе метода молекулярной динамики и расчеты с помощью квантово-химического пакета HyperChem [2]. Расчеты позволяют обнаружить некоторые формы упорядочения молекул водорода - структуризации, как при их поочередном напуске в УНТ, так и при дальнейшем выпуске, удержании или накоплении в нанотрубке, закрытой с одного конца специальной крышкой в виде

половины фуллерена [3]. Впускаемый водород образует своеобразную цепь из молекул, вытянутую вдоль оси нанотрубки. При этом сами молекулы оказываются также ориентированными вдоль оси. Рассматриваются УНТ с различной хиральностью, приводится оценка наполняемости, увеличения длины и диаметра нанотрубок.

Для исследования накопления молекулярного водорода были выбраны УНТ armchair (5,5), имеющая радиус $R_o = 6.29$ а.е, длину $L_o = 167.95$ и armchair (10,10), имеющая радиус $R_o = 12.64$ а.е., длину $L_o = 181.35$.

Расчет производился в силовом поле MM+, которое базируется на последней модификации MM2 [4].

Потенциал, описывающий длину изменение длины связи между двумя атомами имеет вид:

$$E_{bond} = \sum \frac{1}{2} K_r (r - r_o)^2 [1 + CS(r - r_o)], \quad (1)$$

где по умолчанию $CS = -2.0$

Потенциал, описывающий изменение угла связи:

$$E_{bond\ angle} = \sum \frac{1}{2} K_\theta (\theta - \theta_o)^2 [1 + SF(\theta - \theta_o)^4], \quad (2)$$

где $SF = 7 \cdot 10^{-8}$

Как и силовое поле MM2, MM+ учитывает взаимодействие между изменением длины связи и углом:

$$E_{stretch-bend} = \sum_{angles} K_{sb} (\theta - \theta_o)_{ikj} [(r - r_o)_{ik} + (r - r_o)_{jk}] \quad (3)$$

Потенциал, описывающий изменение торсионного угла:

$$E_{dihedral} = \sum \frac{V_1}{2} (1 + \cos\phi) + \frac{V_2}{2} (1 - \cos 2\phi) + \frac{V_3}{2} (1 + \cos 3\phi) \quad (4)$$

Для учета Ван-дер-Ваальсового взаимодействия MM+ не использует потенциал LJ:

$$E_{vdW} = \sum_{ij \in vdW} \epsilon_{ij} (2.9 \times 10^5 \exp(-12.5 \rho_{ij}) - 2.25 \rho_{ij}^{-6}), \quad (5)$$

где $\rho_{ij} = \frac{R_{ij}}{r_{ij}^*}$, $\epsilon_{ij} = \sqrt{\epsilon_i \epsilon_j}$ - глубина потенциальной ямы i и j атомов, r - Ван-дер-

Ваальсовый радиус, R - расстояние на котором происходит взаимодействие.

На коротких расстояниях потенциал заменяется на:

$$E_{vdW} = \sum_{ij \in vdW} \epsilon_{ij} \rho_{ij}^{-2}, \quad (6)$$

где $\rho_{ij} = \frac{R_{ij}}{r_{ij}^*}$.

Литература:

1. Вахрушев А.В., Липанов А.М., Суетин М.В. Моделирование процессов аккумуляции водорода и углеводородов наноструктурами. Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2008. 120 с.
2. Hyper Chem Computational Chemistry. Canada: Hypercube, 1996. P. 160.
3. Самсонов А.М., Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследование 2012, № 4, с. 1-6
4. Allinger N.L. // J. Am. Chem. Soc. 1977. V. 99 . P. 8127.

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ПРИ СОЗДАНИИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ

Абруков В.С., Миронов О.В., Ефимов Н.Г.
Чебоксары, Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова
abrukov@yandex.ru

В настоящее время большое внимание уделяется исследованиям возможностей альтернативных источников энергии. К ним относится солнечная энергия, которая преобразуется в электрическую энергию с помощью солнечных электростанций. Солнечная энергия распределяется по поверхности Земли неравномерно, поэтому эффективность ее использования зависит от местоположения солнечной электростанции, погодных условий и т.д.

Задачей нашей работы было проведение мониторинга условий эксплуатации солнечной электростанции, установленной на крыше одного из корпусов Чувашского государственного университета, и получение с помощью искусственных нейронных сетей (ИНС) вычислительных моделей, позволяющих определять оптимальные условия эксплуатации солнечной электростанции.

В процессе мониторинга регистрировались следующие параметры:

- мощность электростанции, кВт
- солнечная радиация, Вт/м²
- Солнечная радиация – интенсивность солнечного излучения достигающего горизонтальной поверхности. Эта интенсивность излучения включает в себя как излучение непосредственно от солнца, так и отраженное излучение от облаков и т.п.
- температура окружающей среды, °С
- влажность окружающей среды, %
- точка росы, °С
- скорость ветра, м/с
- направление ветра
- охлаждение окружающей среды ветром - то, как скорость ветра влияет на температуру воздуха, °С
- индекс нагрева, °С. Индекс нагрева использует температуру и относительную влажность для определения чувствительности к теплоте воздуха
- TНW Index(индекс температура+влажность+ветер)(°С) и TНСW Index(индекс температура+влажность+ветер+солнце)(°С) - рассчитывается на основе влажности и температуры как и индекс нагрева, однако, учитывает и нагревающий эффект солнца, и охлаждающий эффект ветра, позволяя вычислить ощущаемую температуру на открытом воздухе.
- давление, мм. рт. ст.
- количество осадков, дюйм
- солнечная энергия, Лм
- УФ индекс - он представляет собой число от 0 до 16,отображающее текущий уровень УФ интенсивности.
- испарение, %

Пример результатов мониторинга приведен в табл.1

Таблица 1 Пример результатов мониторинга

Время	Солнечная радиация(Вт/м ²)	Внешняя температура(°С)	...	УФ индекс	Испарение(мм)	Мощность (кВт)
8:00	47	12	...	0	0.03	0.105
8:30	38	11.9	...	0	0	0.057
9:00	80	12.1	...	0.2	0.05	0.370
...
18:00	18	12.2	...	0	0.3	0

С учетом количества данных мониторинга (число столбцов и строк) была выбрана соответствующая структура ИНС (рис.1) и проведено ее «обучение» [1 – 3].

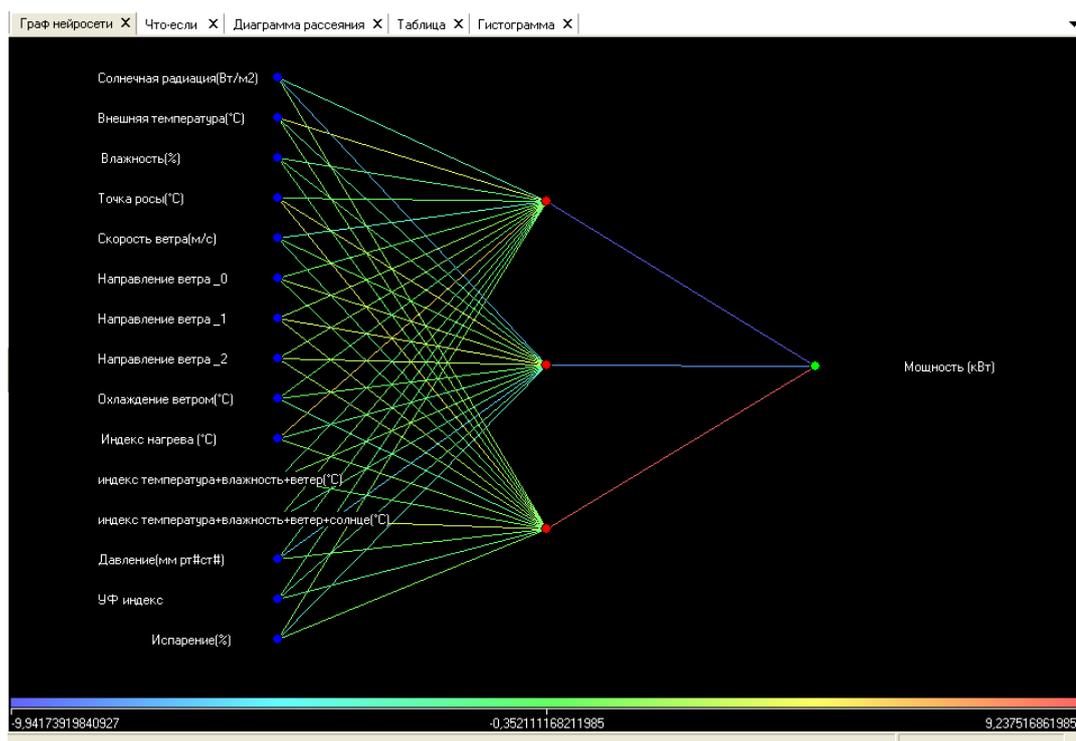


Рис. 1 Структура нейронной сети

Обучение заключалось в том, что различные наборы значений с первого по шестнадцатый столбец подавались на входной слой ИНС, а соответствующие значения мощности устанавливались в выходном слое ИНС и с помощью известного метода обучения «обратного распространения ошибки» создавалась вычислительная ИНС - модель (компьютерный эмулятор ИНС - модели).

Эта модель представляет собой модель типа «чёрного ящика». Она может использоваться для определения (прогнозирования) мощности вырабатываемой солнечными батареями при разных параметрах эксплуатации.

На рисунках 2-6 - приведены некоторые выявленные зависимости (для погодных условий характерных для февраля месяца).

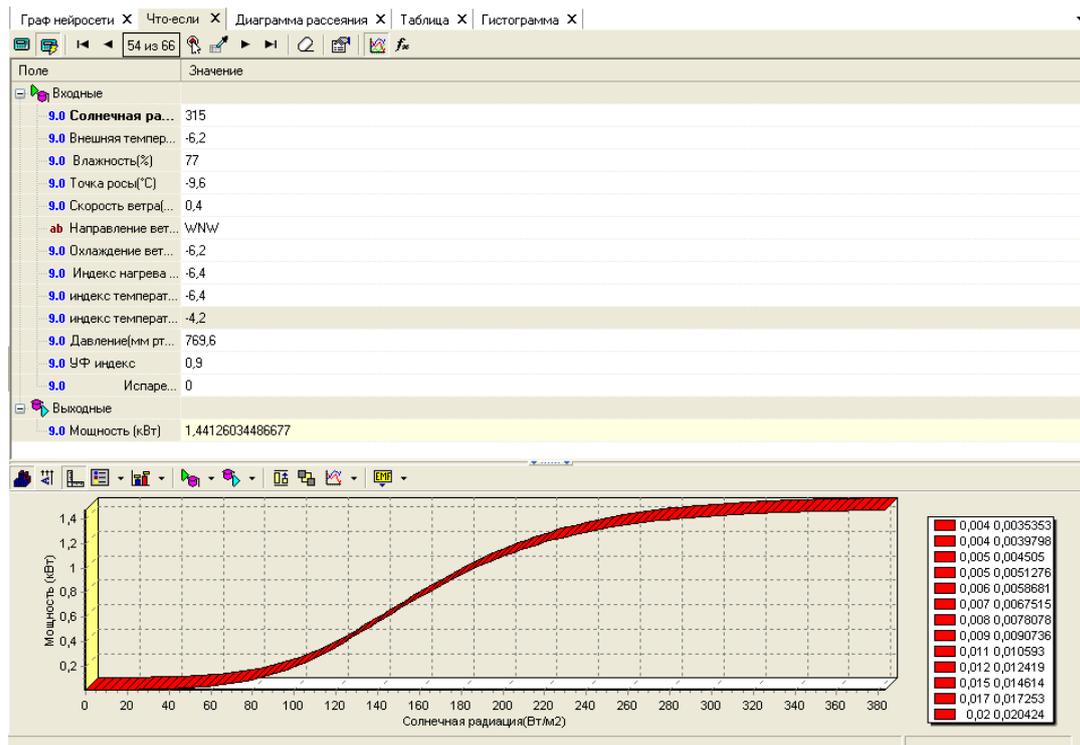


Рис.2. Зависимость мощности солнечной электростанции от солнечной радиации

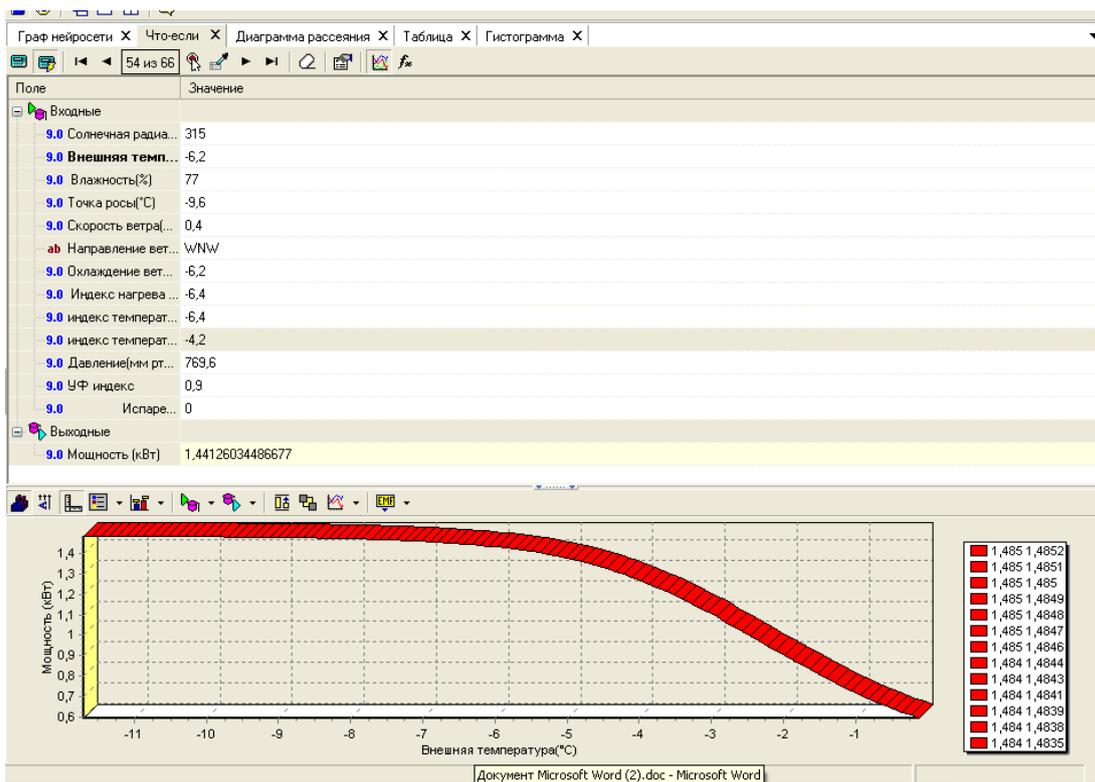


Рис.3. Зависимость мощности солнечной электростанции от внешней температуры

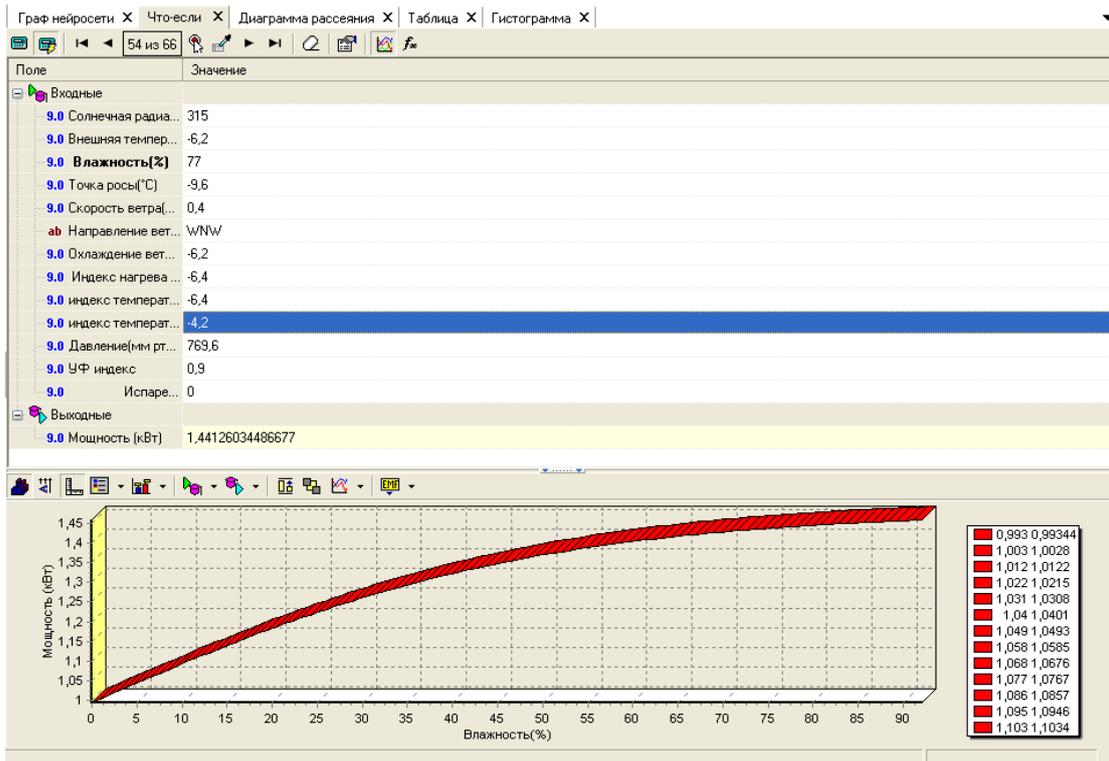


Рис. 4. Зависимость мощности солнечной электростанции от влажности

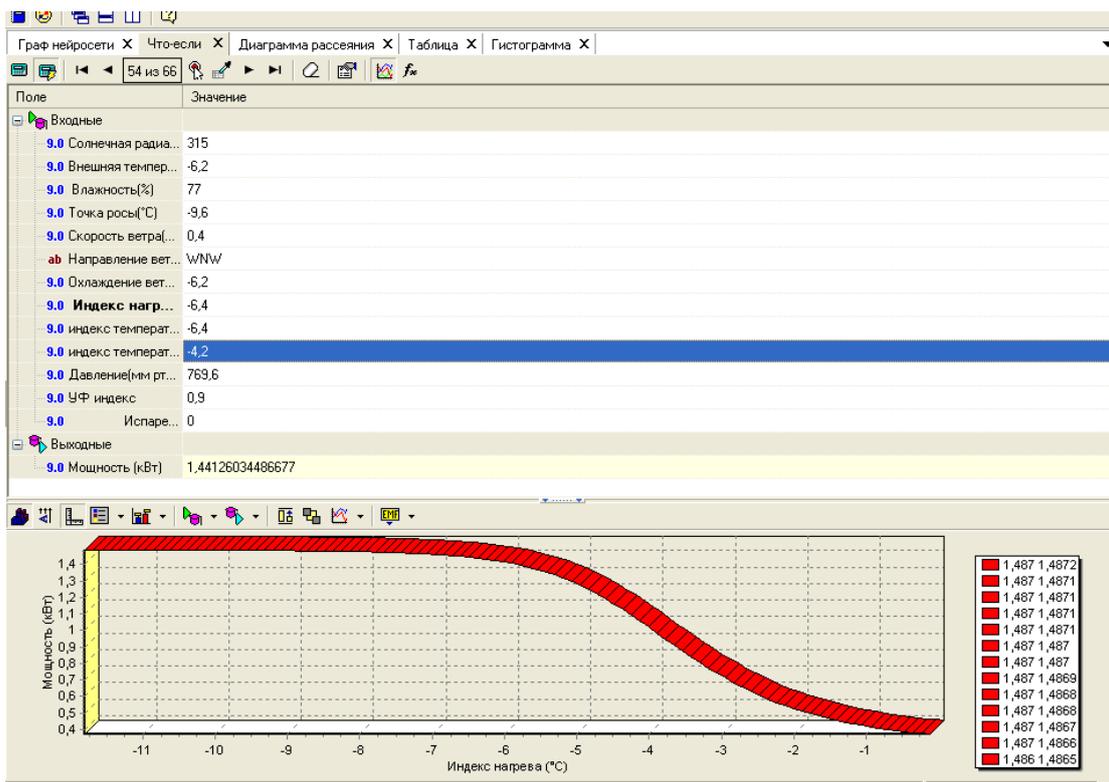


Рис. 5. Зависимость мощности солнечной электростанции от индекса нагрева

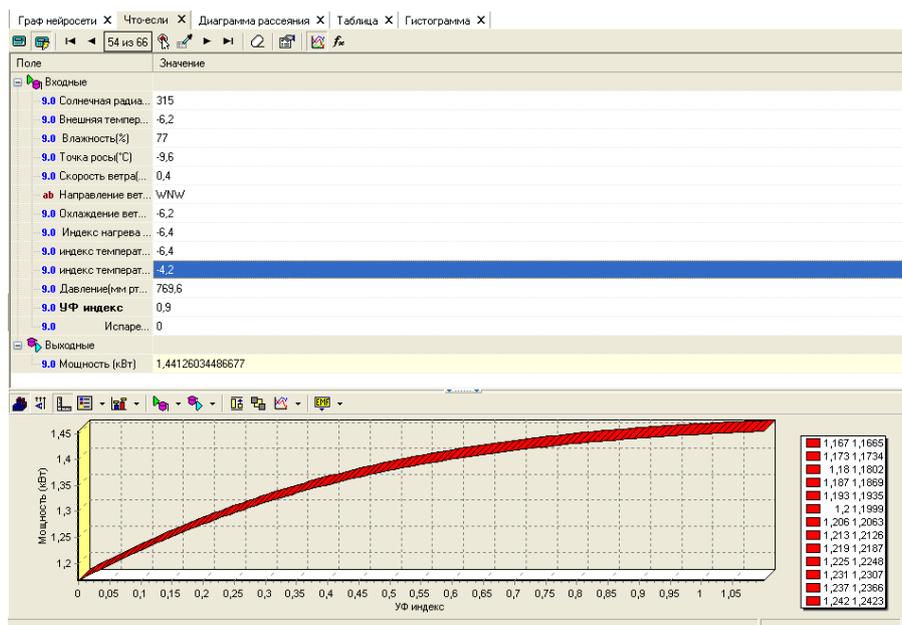


Рис. 6 Зависимость мощности солнечной электростанции от УФ индекса.

Заключение

Мы полагаем, что ИНС, являются перспективным методом анализа условий эксплуатации солнечной электростанции. Они позволяют обобщать результаты эксплуатации на качественно новом уровне (в виде многопараметрических вычислительных моделей) и прогнозировать эффективность использования солнечной электростанции в различных условиях.

Литература

1. Аbruков В.С., Николаева Я.Г., Макаров Д.Н., Сергеев А.А., Карлович Е.В. Применение средств интеллектуального анализа данных (Data Mining) для исследования неполно определенных систем // Вестник Чувашского университета, № 2, 2008, с. 233-241.
2. Abruков V.S., Karlovich E.V., Afanasyev V.N., Semenov Yu.V., Abruков S.V. Creation of propellant combustion models by means of data mining tools // International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion. 2010. № 9(5). P. 385-396.
3. Славутская Е.В., Аbruков В.С., Славутский Л.А. Интеллектуальный анализ данных психодиагностики школьников предпоздогового возраста // Вестник Чувашского университета. – 2012. – № 3. – С. 226 - 231.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МЕТОДОВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ЭКСПЛУАТАЦИИ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

М.В. Петрова
Чебоксары, Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова
vasilkovam@mail.ru

В данной работе была поставлена задача исследования возможностей методов интеллектуального анализа данных Data Mining для анализа экспериментальных

исследований, в которых свойства и характеристики объекта исследования зависят от большого числа факторов.

Главным условием применения МИАД реализующих «информационный подход» к задачам анализа и прогнозирования является сбор данных об анализируемой системе.

В процессе мониторинга регистрировались следующие параметры: мощность электростанции (кВт), солнечная радиация (Вт/м²), температура окружающей среды (°C), влажность окружающей среды (%), точка росы (%), скорость ветра (м/с), направление ветра, охлаждение окружающей среды ветром - то, как скорость ветра влияет на температуру воздуха (°C), индекс нагрева (°C), THW Index, давление (мм. рт. ст.), количество осадков (дюйм), солнечная энергия (Лм), УФ индекс, испарение (%).

Данные собирали так, чтобы время регистрации метеопараметров и время измерения мощности СЭ совпадало или же было меньше двух минут.

На рис. 1 представлены результаты корреляционного анализа.

Входные поля		Корреляция с в...
№	Поле	Мощность [кВт]
1	Солнечная радиация(Вт/...	0,948
2	Внешняя температура(°C)	-0,537
3	Влажность(%)	-0,374
4	Точка росы(°C)	-0,355
5	Скорость ветра(м/с)	0,300
6	Охлаждение ветром(°C)	-0,409
7	Индекс нагрева (°C)	-0,531
8	индекс температура+вла...	-0,408
9	индекс температура+вла...	0,384
10	Давление(мм рт#ст#)	-0,250
11	Солнечная энергия(Лм)	0,948
12	УФ индекс	0,889
13	Испарение(%)	0,383

Рис. 1 Матрица корреляции.

Из рисунка 1 можно сделать вывод, что больше всего с выходным значением коррелирует значения «солнечная радиация» («солнечная энергия») – коэффициент корреляции - 0,948. Коэффициент положителен, т.е. чем больше солнечная радиация, тем больше мощность СЭ. Другими значащими факторами является температура окружающей среды, индекс нагрева, УФ индекс.

Построим дерево решений со следующими входными данными: температура окружающей среды (°C), индекс нагрева (°C), УФ индекс, солнечная радиация (Вт/м²).

На следующих рисунках представлены результаты анализа:

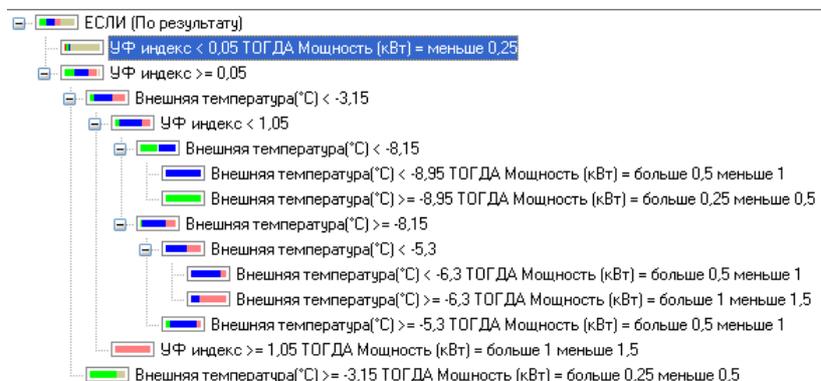


Рис. 2 Зависимость мощности солнечной электростанции от солнечной радиации, температуры окружающей среды, индекса нагрева, УФ индекса

Из результатов анализа видно, что оптимальными условиями с точки зрения мощности вырабатываемой солнечной электростанцией (диапазон от 1 до 1,5) являются следующие условия: внешняя температура меньше, либо равна $-6,3^{\circ}\text{C}$ и при этом УФ индекс больше 0,05 и меньше 1,05. Другими возможными условиями в том же диапазоне мощности являются следующие условия внешняя температура меньше $-3,15^{\circ}\text{C}$ и УФ индекс больше 1,05.

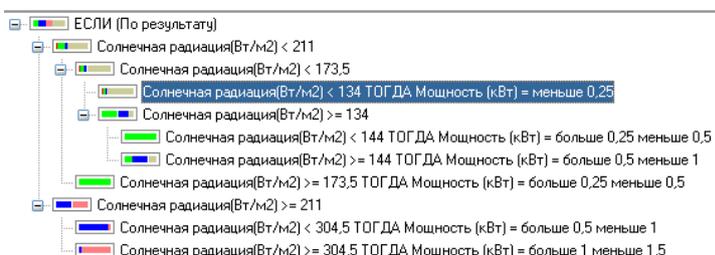


Рис. 3 Зависимость мощности солнечной электростанции от солнечной радиации

Такое дерево содержит в себе правила, следуя которым можно отнести мощность в одну из групп. Правила читаются с узлов, расположенных правее. Следует заметить, что характеристики, лежащие ближе к вершине дерева, то есть левее, являются более значимыми.

Таблица. 1 Зависимость мощности солнечной электростанции от солнечной радиации

№	Условие	Следствие (Мощность (кВт))	Поддержка		Достоверность	
			%	Кол- во	%	Кол- во
1	Солнечная радиация(Вт/м ²) < 211 Солнечная радиация(Вт/м ²) < 173,5 Солнечная радиация(Вт/м ²) < 134	И И И меньше 0,25	44,44	28	85,71	24
2	Солнечная радиация(Вт/м ²) < 211 Солнечная радиация(Вт/м ²) < 173,5 Солнечная радиация(Вт/м ²) >= 134 Солнечная радиация(Вт/м ²) < 144	И И И И больше 0,25 меньше 0,5	3,17	2	100,00	2
3	Солнечная радиация(Вт/м ²) < 211 Солнечная радиация(Вт/м ²) < 173,5 Солнечная радиация(Вт/м ²) >= 134 Солнечная радиация(Вт/м ²) >= 144	И И И И больше 0,5 меньше 1	6,35	4	50,00	2
4	Солнечная радиация(Вт/м ²) < 211 Солнечная радиация(Вт/м ²) >= 173,5	И И больше 0,25 меньше 0,5	7,94	5	100,00	5
5	Солнечная радиация(Вт/м ²) >= 211 Солнечная радиация(Вт/м ²) < 304,5	И И больше 0,5 меньше 1	19,05	12	91,67	11
6	Солнечная радиация(Вт/м ²) >= 211 Солнечная радиация(Вт/м ²) >= 304,5	И И больше 1 меньше 1,5	19,05	12	91,67	11

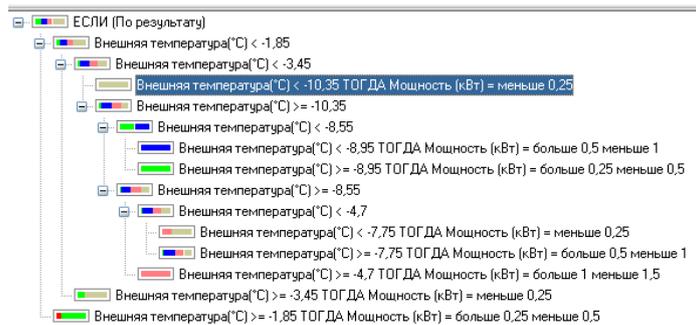


Рис. 4 Зависимость мощности солнечной электростанции от температуры окружающей среды

По результатам исследования получены многофакторные модели, позволяющие определять оптимальные условия эксплуатации солнечной электростанции.

Литература:

1. Аbruков В.С., Николаева Я.Г., Макаров Д.Н., Сергеев А.А., Карлович Е.В. Применение средств интеллектуального анализа данных (Data Mining) для исследования неполно определенных систем // Вестник Чувашского университета, № 2, 2008, с. 233-241.
2. Abruков V.S., Karlovich E.V., Afanasyev V.N., Semenov Yu.V., Abruков S.V. Creation of propellant combustion models by means of data mining tools // International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion. 2010. № 9(5). P. 385-396.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ	4
КОМПЛЕКС ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ ПОДГОТОВКИ И ПЕРЕПОДГОТОВКИ КАДРОВ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СОЛНЕЧНЫХ МОДУЛЕЙ	4
СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ НА КРЕМНИИ	7
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВНОСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В РАЗЛИЧНЫХ РЕГИОНАХ СНГ	8
DATA MINING В НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ	11
РОЛЬ КОМПАНИИ «ХЕВЕЛ» В ФОРМИРОВАНИИ РЫНКА ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ МОДУЛЕЙ	18
НАПРАВЛЕНИЕ «Тонкопленочные фотоэлектрические преобразователи на основе углеродных наноструктур»	20
ПЛЕНКИ УГЛЕРОДА В СОСТОЯНИИ Sp^1 В ЭЛЕКТРОНИКЕ	20
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОНИКНОВЕНИЯ ИОНОВ ВНУТРЬ ЗАКРЫТЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК	25
СЕРЕБРОСОДЕРЖАЩИЕ УГЛЕРОДНЫЕ ПЛЕНКИ КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ	28
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВОЛЬТАМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО БАРЬЕРА ШОТТКИ НА ОСНОВЕ ТОНКОПЛЕНОЧНОЙ СТРУКТУРЫ n-Si/Ag, ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО МЕТАЛЛОУГЛЕРОДНОГО МАТЕРИАЛА И ПРОМЫШЛЕННОГО ФОТОРЕЗИСТОРА	32
ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОПЛЕНОК ЛИНЕЙНО-ЦЕПОЧЕЧНОГО УГЛЕРОДА	37
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕОДНОРОДНОГО ПОТОКА ЧАСТИЦ В УГЛЕРОДНОЙ НАНОТРУБКЕ	40
ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ КАРБИНА С ПОМОЩЬЮ КЛАССИЧЕСКИХ И КВАНТОВО-ХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ	41
НАПРАВЛЕНИЕ «Технологии тонких пленок аморфного гидрогенизированного кремния (в том числе, уменьшение размеров солнечных элементов и расходов на их производство, увеличение эффективности СЭ, поверхностные эффекты - квантовые точки Si, внедрение концепции плазмоники для увеличения коэффициента поглощения)»	43
МЕТОДЫ ОЦЕНИВАНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СОЛНЕЧНЫХ МОДУЛЕЙ	43
ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛЕГИРОВАННЫХ МОНОКРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ	47
ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО И ЛАЗЕРНОГО ОТЖИГА НА СВОЙСТВА ПЛЕНОК ZnO:V, ВЫРАЩЕННЫХ МЕТОДОМ ГАЗОФАЗНОЙ ЭПИТАКСИИ	49

ПЛАЗМОНИКА КАК ПЕРСПЕКТИВНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ СОВРЕМЕННОЙ ФОТОЭНЕРГЕТИКИ	51
ПОЛУПРОЗРАЧНЫЕ МОДУЛИ НА ОСНОВЕ АМОРФНОГО И МИКРОАМОРФНОГО КРЕМНИЯ	55
РАМАНОВСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ АМОРФНОГО И МИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ	58
ФОРМИРОВАНИЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ СЛОЕВ КРЕМНИЯ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ В СРЕДЕ СИЛАНА И АРГОНА С ДОБАВЛЕНИЕМ КИСЛОРОДА	58
ФЕМТОСЕКУНДНАЯ ЛАЗЕРНАЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ АМОРФНОГО КРЕМНИЯ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ФОТОВОЛЬТАИКЕ	60
ДЕФЕКТНО-ПРИМЕСНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ СТРУКТУРЫ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ЗАРЯДОВЫМИ НАСОСАМИ	63
ИЗУЧЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ ПРОПУСКАНИЯ ПЛЕНОК АМОРФНОГО ГИДРОГЕНИЗИРОВАННОГО КРЕМНИЯ	65
НАПРАВЛЕНИЕ «Фотоэлектрические преобразователи на основе тонких пленок халькогенидов и оксидов металлов»	68
ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ФОТОЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ПОЛУЧЕНИЯ ВОДОРОДА	68
ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ТОНКИХ ПЛЕНОК ОКСИДА КАДМИЯ (CdO)	70
ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ТОНКИХ ПЛЕНОК SnTe И PbTe	73
СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ ТОНКОПЛЕНОЧНОЙ БИНАРНОЙ СИСТЕМЫ PbSe	76
НАНОПРОФИЛИ ДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ ОКСИДА И НИТРИДА АЛЮМИНИЯ В АЗОТСОДЕРЖАЮЩЕМ ПЛАМЕНИ	77
ОБРАЗОВАНИЕ ОКСИДА МАГНИЯ В ПЛАМЕНАХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ И ЕГО ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА	80
ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ В МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СОЕДИНЕНИЯХ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ, МЕТОДОМ ЯМР	82
НАПРАВЛЕНИЕ «Преобразовательные устройства (инвертеры, счетчики качества вырабатываемой электроэнергии, системы мониторинга и т.д.)»	84
ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ СРАВНЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГОВЫРАБОТКИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ИЗГОТОВЛЕННЫХ ПО РАЗЛИЧНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УСЛОВИЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ	84
УСТАНОВКА НА ОСНОВЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ	86
ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ СОЛНЕЧНЫМИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯМИ	88
РАСЧЕТ МОЩНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ НАГРУЗКИ	93
ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ	94

СИСТЕМА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ПРЕДПРИЯТИЙ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА	97
ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ИНВЕРТОРОВ В СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ ДЛЯ СБРОСА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В СЕТЬ	100
ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ	107
МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОПОЛОГИИ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОГО СКРАЙБИРОВАНИЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СОЛНЕЧНЫХ МОДУЛЕЙ	110
АВТОНОМНАЯ ТОНКОПЛЕНОЧНАЯ СОЛНЕЧНАЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ	112
ДАТЧИК ПЫЛЕОТЛОЖЕНИЯ ДЛЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ	113
ИССЛЕДОВАНИЕ АГРЕГАТНЫХ СОСТОЯНИЙ ВОДОРОДА В ПРОЦЕССЕ ЗАПОЛНЕНИЯ НАНОТРУБОК	117
ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ПРИ СОЗДАНИИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ	119
ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МЕТОДОВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ЭКСПЛУАТАЦИИ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ	123