

## Проблемы метода ионно-плазменного распыления цветных металлов на установке УВН-1М

А. Д. Купцов, С. В. Сидорова  
Москва, МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2-я Бауманская ул., д. 5, кафедра МТ-11  
E-mail: alex-kouptsov@yandex.ru

Показана актуальность использования источников альтернативной энергетики – солнечных фотоэлементов (СФЭ). Изучены методы формирования нижнего слоя проводящего электрода СФЭ. Выявлены проблемы при работе методом ионно-плазменного распыления. Предложена конструкторская модернизация установки для нивелирования проблем ухудшающих качества получаемых покрытий. Изготовлена внутрикамерная оснастка. Проведена пуско-наладка модуля на установке УВН-1М.

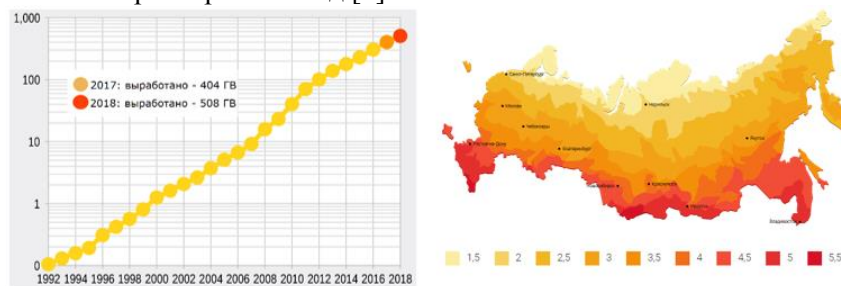
***Ion-plasma sputtering of non-ferrous metals on the vacuum unit UVN-1M. A.D. Kuptsov, S.V. Sidorova. The urgency of using alternative energy sources - solar cells (SC) is shown. The methods of forming the lower layer of the SC conductive electrode are studied. Problems of using the method of ion-plasma sputtering are identified. A design upgrade of the installation for leveling problems impairing the quality of the coatings is proposed. Equipment for vacuum camera is made. The module on the vacuum unit UVN-1M is implemented.***

### Введение

Исчерпание полезных ископаемых Земли и развитие общества в численности и интеллектуально, заставляют находить все более эффективные, дешевые и простые источники энергии. Благодаря инновационным технологиям и развитому инженерному делу, человек смог придумать большое количество решений, как получать электричество. Так в 20-ом веке люди смогли преобразовывать бесконечную (по сравнению с жизнью на Земле) солнечную энергию в пригодную для человека тепло- и электроэнергию.

На рис. 1 представлена инсоляция солнечной энергии по России. В результате реакции синтеза на Солнце, звезда производит 180...386 трлн. кВт [1]. Большая часть излучается в пространство. Из-за отражения, рассеивания и поглощения атмосферой и аэрозолями проходит и достигает поверхности Земли лишь малая часть [2].

При этом объем солнечной энергии, которую получает Россия за три дня, больше произведенной ею электроэнергии за год [3].



а) б)  
Рис. 1. Инсоляция солнечной энергии по России [2].

а – кривая роста выработки солнечной энергетики; б – уровень солнечной энергии, получаемый российскими регионами ( $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ ).

Для преобразования энергии используют множество различных конвертеров (солнечные коллекторы и концентраторы, фотоэлементы, жидкостные и химические конвертеры), в которых содержится большое число элементов микро- и нанoeлектроники [4–6]. Например, металлизированные контактные слои, передающие поток электронов – электроэнергию, которая через инвертор солнечной батареи трансформируется из постоянного тока в переменный [7].

### Технологический анализ солнечного фотоэлемента

В рамках данной работы рассматривался однокаскадный солнечный фотоэлемент, структура которого представлена на рисунке 2. Объектом исследования СФЭ является нижний электрод. Материал нижнего электрода – медь [8].

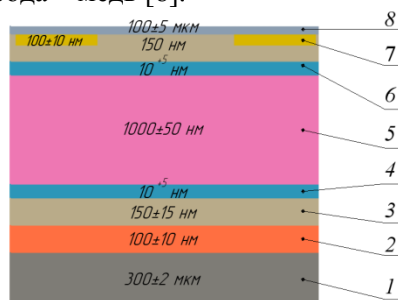


Рис. 2. Структурная схема однокаскадного фотоэлемента.

1 – подложка (Si); 2 – нижний электрод (Cu); 3 – прозрачный проводящий оксид (ITO);  
4 – n-слой (Si+P); 5 – i-слой (a-Si:H); 6 – p-слой (Si+B); 7 – сетка верхнего электрода (Al);  
8 – антиотражающее покрытие (SiO<sub>2</sub>).

Таким образом, структура солнечного элемента содержит 8 слоев. Каждый слой имеет свою толщину и допуск на размер.

### Выбор метода формирования токопроводящего слоя фотоэлемента

Покрытие нижнего электрода солнечной панели является не менее важной частью всего каскада на подложке. Поскольку толщина данного слоя находится в пределах 100 нм, то необходимо обеспечить малую неравномерность ( $\pm 5 \dots 7$  нм) по всей площади покрытия, чтобы покрытия не имели ступенчатую форму.

Чистота покрытия очень важна, ведь наличие окислов и диэлектрических загрязнений может пагубно влиять на протекания тока через контакты.

Адгезия слоя к подложке монокристаллического кремния должна быть такой, чтобы составляющие фотоэлемента не отслаивались друг от друга от перепадов температуры.

Скорость роста пленки нижнего электрода не играет ключевой роли, но плотность упаковки всех атомов в совокупности окажет влияние на величину адгезии, неравномерности и проводящих свойств покрытия.

В таблице 1 представлены характеристики наиболее распространенных методов металлизации.

Таблица 1. Методы металлизации.

Принцип осаждения	Ионное распыление	Дуговой разряд	Термическое испарение	Взрыв
Рабочее давление, Па	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-2}$	$10^{-4}$
Скорость осаждения, нм/сек	1 ... 500	100 ... 50000	100 ... 1000	$\leq 1000$
Энергия осаждения, эВ	3 ... 5	0,1 ... 10	0,1 ... 0,3	1 ... 1000
Коэффициент ионизации	0,01	0,2 ... 1	0	0,1 ... 0,5
Нагрев подложки, К	293 ... 693	293 ... 693	373 ... 973	293

Продолжение таблицы 1

Наличие капельной фазы	Нет	Да	Нет	Нет
Равномерность покрытия	Хорошая	Низкая	Плохая	Плохая
Степень чистоты пленки	Не высокая	Хорошая	Высокая	Хорошая
Адгезия пленок	Хорошая	Удовл.	Удовл.	Хорошая
Ресурс мишени	Многократное использование	Многократное использование	Единичное использование	Многократное использование
<b>Σ по весовым коэффициентам</b>	3,30	2,70	2,65	3,00

Расшифровка:	Весовые коэффициенты	
	Высокий показатель	0,5
	Средний показатель	0,35
	Удовлетворительный показатель	0,15

Проанализировав данные из таблицы 1 и работ [9, 10], выберем для дальнейшего использования метод магнетронного напыления, т.к. он обладает теми характеристиками, которые необходимы для получения хорошего токопроводящего покрытия в солнечных панелях: малая толщина покрытия, равномерная и чистая структура с малым коэффициентов неравномерности.

#### **Технологическое оборудование УВН-1М**

На кафедре МТ11 МГТУ имени Н. Э. Баумана имеется установка УВН-1М. Модель установки представлена на рис. 3.



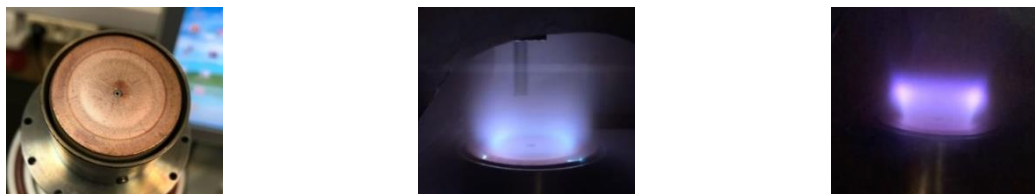
*Рис. 3. Вакуумная технологическая установка УВН-1М.*

*1 – насос механический; 2 – датчик Пирани APG; 3 – насос турбомолекулярный; 4 – заслонка «бабочка»; 5 – датчик широкодиапазонный WRG; 6 – камера вакуумная; 7 – модуль магнетрона; 8 – баллон с газом; 9 – компьютер; 10 – шкаф питания.*

В процессе нанесения пленок и формирования полупроводниковых и проводниковых структур на данной установке насос 1 сухой спиральный XDS 10 обеспечивает в камере 6 объемом 1,5 литра низкий вакуум, датчик 2 Пирани APG обеспечивает контроль при предварительной откачке насоса 1. При достижении определенного давления в камере включается насос 3 турбомолекулярный EXT75DX, контролируемый датчиком 5 широкодиапазонным WRG. Заслонка «бабочка» 4 обеспечивает безопасность турбомолекулярного насоса. При достижении высокого вакуума в камеру из баллона 8 подается инертный газ аргон, после чего через управление программой на компьютере 9 зажигается плазма на магнетроне 7. Питание установки обеспечивается электрическим шкафом 10 [8].

### Изучение проблем метода МР

При анализе литературы [11–13] и работе на установке УВН-1М основные проблемы при отработке технологии в рамках исследовательских и научных работ можно разделить на три группы: окисление мишеней; искровой разряд; смещение плазмы и ее пульсации. Проблемы магнетронного распыления, обнаруженные при работе источника магнетронного распыления на УВН-1М, представлены на рис. 4.



а) окисление мишени; б – искровой разряд; в – смещение плазмы.  
Рис.4. Иллюстрации проблем метода магнетронного распыления

### Конструкторское решение проблем метода МР

Вышеперечисленные проблемы можно решить с помощью изготовления дополнительной оснастки – заслонка с вводом вращения. Заслонка позволит выполнять тренировку мишени, а также будет происходить выход на режим модуля распыления. Изготовленная оснастка представлена на рис. 5.



Рис. 5. Оснастка установка УВН-1М.  
1 – система ввода вращения заслонки; 2 – камера вакуумная; 3 – подложкодержатель;  
4 – заслонка; 5 – модуль магнетрона.

Было принято решение, что ввод вращения заслонки будет обеспечивать шаговый двигатель компании «Электропривод». Также необходимо подобрать соответствующие компоненты (контроллер и блок питания) для правильного управления двигателем.

После изготовления и сбора оснастки была проведена серия из 12 экспериментальных откачек вакуумной системы до давления  $5,00 \cdot 10^{-3}$  Па. По 6 откачек с новым и старым фланцем. По результатам откачек были построены кривые откачек (рис. 6) на холодную (установка и насосы имели комнатную температуру, до начала эксперимента не запускались) и на горячую (насосы были разогреты и выведены на режим, соответственно имели ббольшую температуру, чем в серии на холодную).

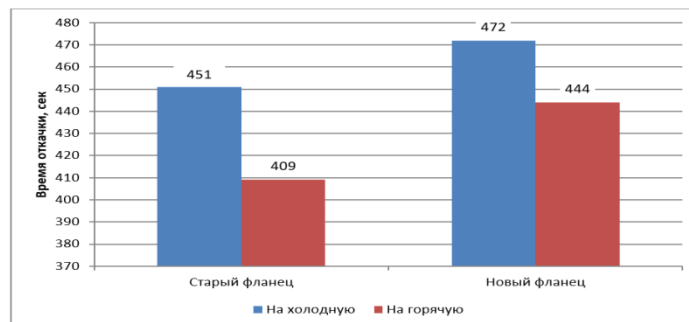


Рис. 6. Сравнение времен откачки вакуумной системы с новым и старым фланцами.

Таким образом, опыт показал, что  $\delta_1 = 42$  с,  $> \delta_2 = 28$  с, где  $\delta_1, \delta_2$  – разница времен откачки старого и нового фланцев. Разница времен с новым фланцем уменьшилась на  $\sim 35\%$ , что говорит о более стабильной работе установки в различных температурных режимах, что обеспечит воспроизводимость получаемых покрытий.

### Заключение

В результате тестирования и анализа работы источника магнетронного распыления выявлены такие проблемы, как окисление мишени, смещение и пульсация плазмы, искровой разряд. Для улучшения качества получаемых покрытий проведена модернизация технологической оснастки – разработан и изготовлен новый фланец-подложкодержатель с вводом вращения заслонки посредством шагового двигателя. Проведен анализ и выбор подходящего ШД – FL57STH76-1006A, а также компонентов: источник питания – EDR-75, контроллер управления – SMSD-1.5. В результате проведенных пуско-наладочных работ модернизированного технологического модуля выявлено, что дельта времен откачки с новым фланцем уменьшилась на 35 %.

### Литература

1. Энергия нашего Солнца. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://spacegid.com/energiya-nashego-solntsa.html#ixzz5p58gyu5E> (Дата обращения: 26.05.2019).
2. Лукутин Б. В., Муравлев И. О., Плотников И. А. Системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями//Томск: Изд-во Томского политехнического университета. – 2015.
3. Кто и как занимается солнечной энергетикой в России. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://robo-hunter.com/news/skromnie-uspehi-kto-i-kak-zanimaetsya-solnechnoi-energetikoi- v-rossii8441> (Дата обращения: 26.05.2019).
4. Развитие солнечных технологий в мире. Аналитический центр Российской Федерации. Информационная справка, 2013. 10с.
5. Виды и типы солнечных батарей. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://batsol.ru/vidy-i-tipy-solnechnyx-batarej.html> (Дата обращения: 13.09.2018).
6. Солнечная энергетика. Презентация. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://portal.tpu.ru:7777/SHARED/n/NASA/Education/NiVIE/Tab/p2.pdf> (Дата обращения: 13.09.2018).
7. Инвертор для солнечных батарей. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://sovetingenera.com/eco-energy/sun/invertor-dlya-solnechnyx-batarej.html> (Дата обращения: 13.09.2018).
8. Купцов А. Д. Металлические тонкопленочные покрытия для солнечных панелей. XXV Научно-техническая конференция с участием зарубежных специалистов. // «Вакуумная наука и техника». Судак, 16 – 22 сентября 2018 г. – С. 187-192.
9. Панфилов Ю.В. Лекции по курсу «Элионные процессы и нанотехнологии»: Библиотека Наноинженерии.
10. Никитин М.М. Технология и оборудование вакуумного напыления. – М.:

- Металлургия, 1992.
11. Ефремов А. М., Светцов В. И., Рыбкин В. В. Вакуумно-плазменные процессы и технологии. – Иваново: Иван. гос. химико-технол. ун-т, 2006. – 260 с.
  12. Купцов А. Д. Проблемы магнетронного распыления при обработке технологии формирования тонкопленочных покрытий меди в вакууме. VIII Международная научная конференция для молодых ученых «Наукоемкие проекты и технологии в машино- и приборостроении, медицине». Саратов, 3 – 5 декабря 2018 г.
  13. Купцов А. Д. Анализ и решение проблем при магнетронном распылении на установке УВН-1М. [Электронный ресурс] // Всероссийская научно-техническая конференция «Студенческая научная весна: Машиностроительные технологии»: материалы конференции, 8 – 12 апреля, 2019, Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана. – М.: ООО «Квантор Форм», 2019. – № гос. регистрации 0321900970. – URL: studvesna.ru?go=articles&id=2595 (Дата обращения: 20.04.2019).

## Возможности электронно-лучевой установки «ЛУЧ» для размерной микрообработки стекла и керамических материалов

*Я. Чжо, М. Лян, К.М. Моисеев, Л.Л. Колесник, Ю.В. Панфилов  
Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1  
e-mail: k.moiseev@bmstu.ru, kolesnik@bmstu.ru, panfilov@bmstu.ru*

*В статье представлены современные применения и преимущества электронно-лучевой технологии в обработке стекла и керамических материалов. Рассмотрена конструкция и технологические возможности вакуумной установки «ЛУЧ» для электронно-лучевой плавки, сварки и размерной микрообработки электровакуумного стекла и керамических материалов, в том числе LTCC керамики.*

*Possibilities of the electron-beam machine «LUCH» for dimensional microprocessing of glass and ceramic materials. Y. Zhuo, M. Liang, K.M. Moiseev, L.L. Kolesnik, Yu. V. Panfilov. The article presents the modern applications and advantages of electron beam technology in the processing of glass and ceramic materials. The design and technological capabilities of the vacuum machine «LUCH» for electron beam melting, welding and dimensional microprocessing of vacuum glass and ceramic materials, including LTCC ceramics, are considered.*

### **Введение**

Технология электронно-лучевой обработки известна и применяется уже более 60 лет, но интерес со стороны науки и промышленности продолжает возрастать [1]. Одним из наиболее интересных, но пока малоиспользуемых применений, является микро- и наноразмерная обработка [2-4].

В электронной промышленности и приборостроении электровакуумное и оптическое стекло и керамические материалы используются при изготовлении деталей и узлов электронных приборов. Но технология плавки, сварки и размерной обработки электровакуумного стекла не всегда соответствует современным требованиям. Например: при сверлении керамических материалов, в том числе низкотемпературной совместно обжигаемой керамики (LTCC), используемых для изготовления подложек микроволновых устройств, традиционными методами (механическим и лазерным методам), диаметр отверстия составляет до 50 микрон [5], однако для дальнейшей миниатюризации электронных устройств размеры должны уменьшаться до 30 мкм и меньше [6].