

Металлические тонкопленочные покрытия для солнечных панелей

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

Рассмотрены преимущества солнечной энергетики. Показана структура однокаскадного солнечного фотоэлемента (ФЭ). Выбран материал металлизации контактного слоя – нижнего электрода ФЭ. Выбран метод получения контактного слоя (КС). Построена математическая модель, описывающая зависимость получения КС от влияния параметров времени и расстояния.

Thin film metal coatings for solar panels. A. D. Kuptsov, S. V. Sidorova. The advantages of solar energy are considered. The structure of a single-stage solar cell is shown. The metallization material of the contact layer – the lower electrode of the solar cell – is selected. The method of obtaining the contact layer is selected. A mathematical model describing the dependence of the contact layer on the influence of time and distance parameters is constructed.

Введение

Для преобразования энергии используют множество различных конвертеров, в которых содержится большое число элементов микро- и наноэлектроники. В частности, для преобразования солнечной энергии в тепловую или электрическую используют солнечные панели на основе фотоэлементов или многие другие каскады солнечных панелей.

Солнечная энергия позволяет получать энергию тепловую и электрическую многими способами. К основным типам относятся: фотоэлементы, концентраторы солнечной энергии (параболический и объемный), солнечные коллектора, фотохимические элементы.

Фотоэлемент – элемент, состоящий из двух соединенных между собой кремниевых пластин. Свет, попадающий на верхнюю пластину, выбивает из нее электроны, посылая их на нижнюю пластину. Благодаря р–n-переходу, создается ЭДС элемента. Последовательно соединенные элементы являются источником постоянного тока. Несколько объединенных фотоэлектрических преобразователей представляют собой солнечную батарею.

Поскольку использование фотоэлементов является наиболее распространенным и доступным методом, далее рассмотрим данный метод преобразования более подробно.

На рис. 1 рассмотрены преимущества солнечной энергетики над остальными видами преобразования энергии в электричество [1].



Рис. 1. Преимущества солнечной энергетики.

Наиболее важными преимуществами являются: обильность и постоянство, низкие расходы и бесшумность, а также экологическая чистота.

Таким образом, данная область исследования является очень перспективной и полезной для современного общества.

Описание структуры фотоэлемента

При анализе фотоэлемента была рассмотрена однокаскадная структура солнечного элемента [2]. Для ее создания используют некоторые вакуумные методы нанесения покрытий. Необходимые толщины и методы получения покрытий приведены на рис. 2.

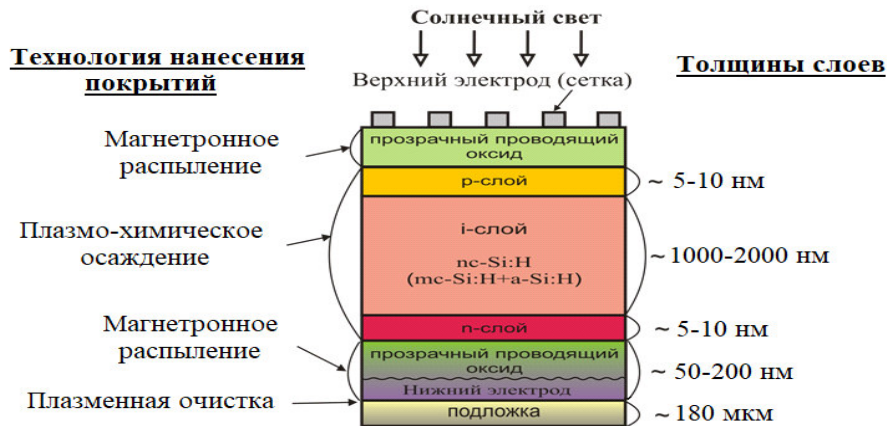


Рис. 2. Однокаскадная структура солнечного элемента [2].

Объектом исследования является нижний электрод. Для его создания можно использовать токопроводящие металлизированные тонкопленочные покрытия на основе меди, алюминия, серебра, золота.

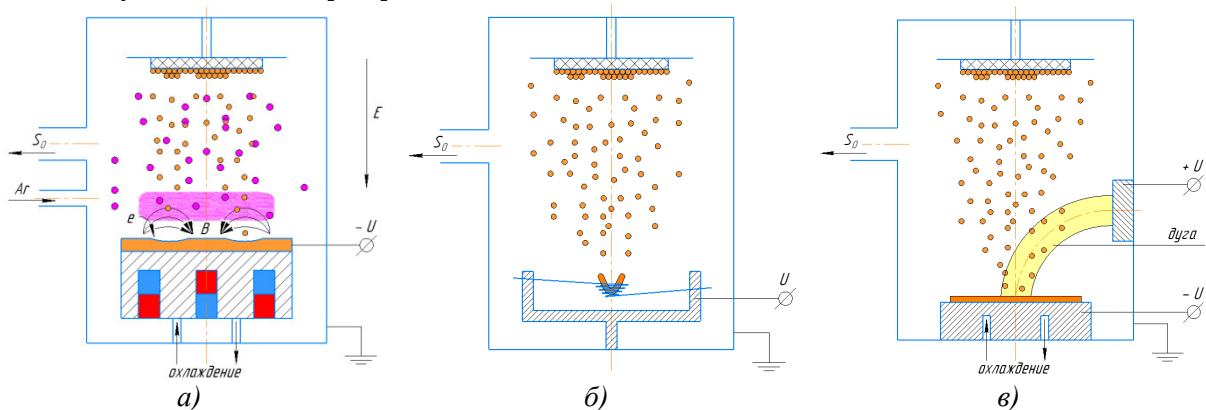
Выбор метода формирования токопроводящего слоя фотоэлемента

Проанализировав данные материалы, стало очевидным, что некоторые металлы превосходят по качеству того или иного сравниваемого параметра (стоимость за единицу материала, плотность, удельная электропроводность и т.д.) медь, но при общем анализе в данный момент медь занимает лидирующее положение, поскольку среднее значение всех параметров является наивысшим.

Следовательно, для проведения дальнейших исследований получения контактного слоя для солнечных панелей и отработки режимов его формирования будет использоваться медь.

Для получения необходимых структур – тонкопленочного покрытия из меди толщиной от 50 до 200 (нм) используют вакуумные методы получения данных структур.

На рис. 3 представлены три наиболее используемые вакуумные методы получения металлизированных слоев [3, 4].



*Рисунок 3. Методы формирования тонкопленочных покрытий
а – магнетронное напыление; б – дуговое распыление; в – термическое испарения*

В таблице 1 представлены характеристики методов, схемы которых приведены на рис.3.

Таблица 1. Параметры и характеристики методов формирования тонкопленочных покрытий

Характеристика	Магнетронное напыление	Дуговое распыление	Термическое испарение
Давление запуска напыления (Па)	10 ⁻¹	10 ⁻³	10 ⁻³
Скорость осаждения (нм/сек)	5 ... 20	10 ... 150	25 ... 125
Наличие капельной фазы	Нет	Да	Да
Равномерность покрытия	Хорошая	Низкая	Плохая
Загрязнение пленки	Малое	Существенное	Существенное
Адгезия пленок	Хорошая	Удовл.	Удовл.
Ресурс мишени	Многократное использование	Многократное использование	Единичное использование
	– высокое значение параметра/характеристики		
	– среднее значение параметра/характеристики		
	– удовлетворительно значение параметра/характеристики		

В данной работе скорость получения покрытия не является определяющим критерием, хотя скорость оправдывает чистоту и качество получаемого слоя. Отсутствие капельной фазы при магнетронном напылении увеличивает степень контроля со стороны оператора установки, поскольку процессы расплавления (скорость, вязкость) металла – не однозначны. Очевидно, что значения остальных параметров данного метода превосходят дуговой и термический метод.

Для последующего эксперимента будет использоваться метод магнетронного напыления, как обладающий необходимыми характеристиками получения хорошего токопроводящего покрытия в солнечных панелях: малая толщина покрытия, равномерная и чистая структура с малым коэффициентом неравномерности.

Проведение экспериментов и обсуждение результатов

Модуль магнетронного напыления установлен на установке УВН-1М, которая представлена на рис. 4. Это позволяет получать образцы на кафедре МТ11 «Электронные технологии в машиностроении» в МГТУ им. Н.Э.Баумана.

При процессе нанесения пленок на данной установке насос сухой спиральный обеспечивает в камере объемом 2 литра низкий вакуум, датчик Пирани APG 2 обеспечивает контроль при предварительной откачке. При достижении определенного давления в камере включается турбомолекулярный насос, контролируемый датчиком широкодиапазонным WRG. Заслонка «бабочка» обеспечивает безопасность турбомолекулярного насоса. При достижении высокого вакуума можно подавать в камеру из баллона инертный газ аргон, после чего через управление программой на компьютере зажигается плазма на магнетроне. Питание установки обеспечивается электрическим шкафом. Процесс нанесения пленки меди методом магнетронного распыления – на рис. 5.

В качестве подложек в данной работе использовали диэлектрические подложки из ситалла (СТ-50-1). Для качественного измерения толщины полученной пленки подложка устанавливалась методом «ступенька» (рис. 6). Покрытие наносили на рабочую поверхность с шероховатостью не ниже 0,032 мкм.

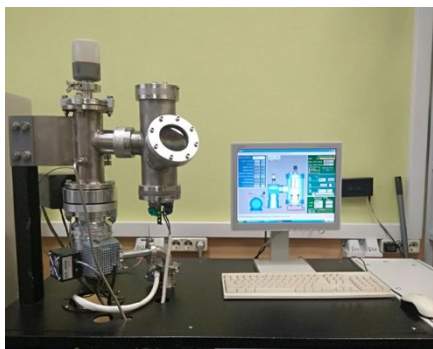


Рис. 4. Установка УВН-ИМ.

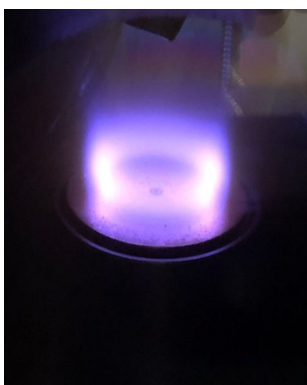


Рис. 5. Процесс нанесения покрытия методом магнетронного распыления.

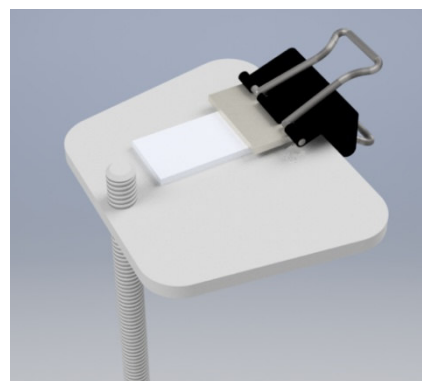


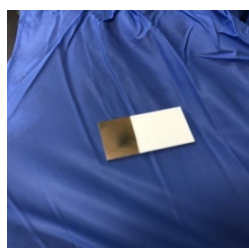
Рис. 6. Метод «ступенька». Подложка на подложкодержателе.

Были проведены эксперименты по отработке режимов напыления пленок с целью получения зависимости необходимой толщины покрытия от технологических параметров. Полученные подложки с нанесенными медными покрытиями представлены на рис. 7.

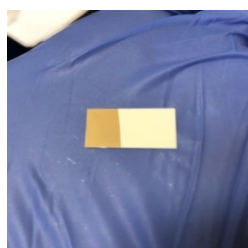
Условия и параметры процесса эксперимента представлены в таблице 2.

Таблица 2. Условия и параметры эксперимента магнетронного напыления.

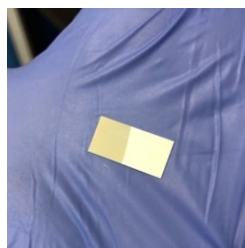
Параметр эксперимента	Значение
Высота от мишени до подложки (мм)	30 ... 60
Время напыления (сек)	180 ... 360
Напряжение на источнике магнетрона (В)	1000
Сила тока на источнике магнетрона (мА)	20
Инертный газ	Аргон
Давление в камере до напуска инертного газа (мБар)	6,0E(-5)
Давление в камере в процессе напыления (мБар)	4,0E(-3)
Поток инертного газа в камеру (мВ)	1800



а)



б)



в)



г)

*Рис. 7. Образцы ситалла с тонкопленочными покрытиями меди
а – образец №1; б – образец №2; в – образец №3; г – образец №4.*

Для обоснования воспроизводимости экспериментов была построена линейная математическая модель методом полного факторного эксперимента, описывающая зависимость толщины пленки от параметров процесса (расстояния от мишени до подложки, времени напыления) [5].

Толщина полученных образцов была измерена на профилометре-профиллографе TR-200. Измерения толщины для каждого образца проводили три раза в центре и по бокам

«ступеньки» для оценки повторяемости полученных значений. Наиболее «тонкое» покрытие получилось для образца 4 (время нанесения минимальное, расстояние от источника до подложки максимальное). Для образца 1 время нанесения было максимальным, а расстояние от источника до подложки минимальным, поэтому покрытия получилось наибольшей толщины из всей серии экспериментов.

Матрица планирования эксперимента представлена в таблице 3.

Таблица 3. Матрица планирования эксперимента

№ опыта	X0	X1	X2	X1X2	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y _{ср}	S ²
1	+1	+1	-1	-1	750	1180	850	920	925	33 767
2	+1	-1	-1	+1	500	750	800	690	685	17 233
3	+1	+1	+1	+1	137	117	98	156	127	627
4	+1	-1	+1	-1	78	94	70	83	81.25	101

После проведения необходимых расчетов и оценки коэффициентов математическая модель зависимости толщины покрытия от параметров процесса имеет вид:

$$Y = 455 + 71X_1 - 350X_2,$$

где X₁ – фактор времени; X₂ – фактор расстояния от источника до подложки.

Сравнение дисперсии адекватности и дисперсии воспроизводимости показало, что полученная математическая модель может адекватно описывать процесс роста толщины пленки в данной работе.

Проанализировав полученную математическую модель процесса, можно сделать вывод о том, что время распыления и расстояние от мишени до подложки влияют на толщину пленки, а их совместное влияние на модель не значительно.

Наибольший вклад вносит изменение расстояния от мишени до подложки (фактор расстояния в 4,91 раз значительнее фактора времени). Таким образом, именно увеличение расстояния между источником распыления и подложкодержателем сделает процесс получения более тонких пленок точнее и эффективнее.

Заключение

Представлены преимущества солнечной энергетики в сравнении с другими видами преобразования энергии в электричество. Проведенный анализ вакуумных методов формирования металлизированного слоя для нижнего электрода фотоэлемента показал, что наиболее подходящим является метод магнетронного распыления.

Проведена серия экспериментальных исследований формирования медного покрытия на ситалловой подложке методом магнетронного распыления, реализованного на установке УВН-1М. В результате обработки экспериментальных данных получена математическая модель, описывающая зависимость толщины медного покрытия для электродов фотоэлемента от параметров процесса (времени и расстояния от источника до подложки).

Литература

1. Преимущества и недостатки солнечных панелей. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://solarelectro.ru/articles/preimuschestva-i-nedostatki-solnechnoj-energii> – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 25.02.2018).
2. Организация производства тонкопленочных кремниевых солнечных модулей на гибких подложках на базе нового струйного плазмохимического метода. Презентация. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.myshared.ru/slide/821681/> – Заглавие с титульного листа. – (Дата обращения: 13.05.2018).
3. Панфилов Ю.В. Конспект лекций по курсу «Элионные процессы и нанотехнологии»:

Библиотека Наноинженерии.

4. Никитин М.М. Технология и оборудование вакуумного напыления. – М.: Металлургия, 1992.
5. Булыгина Е.В. Основы научных исследований. //Краткий конспект лекций.

О роли токовых слоев в плазме дугового разряда при образовании фрактальных агрегатов

Н.А. Смоланов

Саранск, Мордовский государственный университет им.Н.П.Огарева, ул. Большевикская,
68, smolanovna@yandex.ru

В работе представлен обзор результатов исследования структур дугового вакуумного разряда. Они осажжены на стенках вакуумной камеры. Проведен анализ процессов в низкотемпературной плазме дугового разряда, отвечающих, вероятно, за появление и рост фрактальных структур. В основе анализа лежат фундаментальные теоретические и экспериментальные результаты магнитной гидродинамики (плазмодинамики). Показано, что теория фрактала приобретает основную роль при объяснении коллективного поведения сложных систем.

***The role of current layers in arc-discharge plasma by fractal units formation. N.A. Smolanov.** The paper presents a review of the investigation results of arc vacuum discharge structures. They are deposited on the walls of the vacuum chamber. The analysis of processes in a low-temperature plasma of an arc discharge, which are probably responsible for the appearance and growth of fractal structures, is carried out. The analysis is based on the fundamental theoretical and experimental results of magnetic hydrodynamics (plasmodynamics). It is shown that fractal theory acquires the main role in explaining the collective behavior of complex systems.*

Введение. К основным фундаментальным проблемам современной науки и технологии относится модификация поверхности и разработка многофазных нанокристаллических и аморфных слоев, придающих материалам новые свойства и функциональные возможности. Одними из методов их создания являются ионно-плазменные методы (вакуумно-дуговой метод, магнетронное распыление и т.д.) обработки поверхности твердого тела. Механизмы физических и химических процессов, протекающих как в источнике низкотемпературной плазмы (распыляемого катода), вблизи его, так и в поверхностном слое подложки и стенок вакуумной камеры при воздействии потока различных энергетических частиц (атомы, ионы, кластеры, макрочастицы и т.д.) до конца не выяснены. Исследование эволюции низкотемпературной плазмы дугового разряда при получении функциональных покрытий и модифицированных ионно-плазменным потоком поверхностей производится зондовыми, эмиссионными методами, а также изучением осажденных из плазмы структур.

Дуга как один из видов электрического разряда является предметом изучения в целом и катодного пятна в отдельности [1,2]. Она рассматривается как 1 - источник плазмы, 2 - объект магнитной электродинамики, 3 - источник заряженных и нейтральных микрочастиц в твердом и жидком состояниях, 4 – в процессах расширения вещества в вакуум и т.д. Основы технологических процессов в плазменных системах нанесения тонких пленок, в частности, дуговым и магнетронным методами, были заложены в работах создателя стационарного плазменного двигателя (СПД), основателя плазмооптических систем и в целом магнитной гидродинамики (МГД) А.И.Морозова. Говоря о многообразии вакуумных плазменных технологий он подчеркивал о недостаточном внимании к 2-м принципиальным моментам: «...созданию плазмы и ее гибели на стенках рабочего объема» [3, стр.12].