

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХСЛОЙНОГО ПРОСВЕТЛЯЮЩЕГО ПОКРЫТИЯ SiO₂/ITO ДЛЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ АМОРФНОГО КРЕМНИЯ

П. А. Скулова¹, Г. А. Лоскутов²

¹ Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана,
105005, Москва, 2-я Бауманская, д.5

² Московский финансово-промышленный университет «Синергия»,
125190, Москва, Ленинградский пр, 80

Статья поступила в редакцию 9 марта 2019 г.

Аннотация. В статье приведено исследование двухслойного просветляющего покрытия SiO₂/ITO для солнечных элементов на основе аморфного кремния. В качестве вводной части описано устройство современных солнечных элементов, а также раскрыт принцип их работы. Дается информация о сути и функции просветляющих покрытий, излагаются методы получения наноразмерных слоев в лабораторных условиях. Описано моделирование покрытия с рассчитанными в специальной компьютерной программе толщинами слоев SiO₂ и ITO. Моделирование (наращивание слоев) производилось на установках двух типов: вакуумного магнетронного напыления и плазмохимического осаждения. Построены вольт-амперные характеристики образцов с нанесенным покрытием SiO₂ и без него, проведено сравнение результатов. Был проведен анализ полученных экспериментальных данных с помощью измерения спектральных характеристик (с напылением на солнечный элемент и без). Результаты исследований показывают, что эффективность преобразования света в области больших длин волн увеличивается, но при этом уменьшается в средней области длин волн для данного солнечного элемента.

Ключевые слова: солнечный элемент, аморфный кремний, просветляющее покрытие, магнетронное распыление, pin-переход, плазменно-химическое осаждение, оптика, длина волны, полупроводник.

Abstract. The article presents a study of a two-layer anti-reflective coating SiO₂/ITO for solar cells based on amorphous silicon. As an introductory part, the device of

modern solar elements is described, the principle of their operation is revealed. Information on the nature and function of antireflection coatings is given, and methods for producing a nano-scale layer under laboratory conditions are outlined. Coating modeling with thickness of SiO₂ and ITO layers calculated in a special computer program is described. Modeling (build-up of layers) was carried out on installations of two types: vacuum magnetron sputtering and plasma chemical deposition. As a result of the vacuum magnetron sputtering method, it is possible to obtain metals and dielectrics with antireflection coatings and contact pads. In the second case, the plasma-chemical deposition method was used. The installation allows the application of dielectric and semiconductor layers to the elements consisting of SiO₂, Si₃N₄, a-Si: H, a-SiC: H. The current-voltage characteristics of the samples with and without SiO₂ coated were built, and the results were compared. The analysis of the experimental data was carried out by measuring spectral characteristics (with and without deposition on a solar cell). Research results show that the efficiency of light conversion in the region of large wavelengths increases, but it decreases in the middle region of wavelengths for a given solar cell.

Keywords: solar cell, amorphous silicon, antireflection coating, magnetron sputtering, pin-junction, plasma-chemical deposition, optics, wavelength, semiconductor.

Устройство солнечных элементов

В представленной работе полупроводник представляет собой две пластины, присоединенные друг к другу. Пластины изготовлены из кремния с добавлением в каждую из них определенных примесей, благодаря которым получают элементы с нужными свойствами: первая пластина имеет избыток валентных электронов, у второй же, наоборот, их недостаточно. В итоге, в полупроводнике есть слой отрицательно заряженный и слой положительно заряженный, т.е. слои «n» и «p».

На самой границе соприкосновения этих пластин находится зона запирающего слоя. Этот слой препятствует переходу избыточных электронов

из слоя «n» в слой «p», где электронов не хватает (места с отсутствующими электронами называют дырками).

Если подключить к подобному полупроводнику внешний источник питания («+» к «p» и «-» к «n»), то внешнее электрическое поле заставит электроны преодолеть замыкающую зону и через проводник потечет ток (рис. 1). Нечто подобное происходит и при действии солнечного излучения на солнечный элемент. В итоге, слой «n» приобретает дополнительный отрицательный заряд, а «p» - положительный. Результатом этого явления будет появление в полупроводнике разности потенциалов (напряжения) между двумя пластинами близкой к 0,5 В.

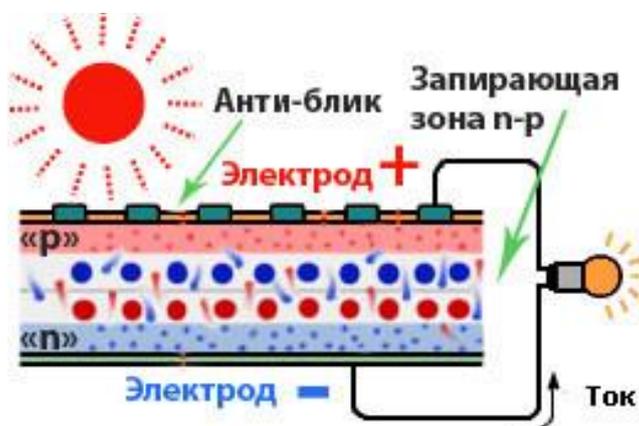


Рис. 1. Действие солнечного излучения на полупроводник.

Принцип работы просветляющих покрытий

Принцип работы солнечного элемента на основе кремния заключается в следующем: при освещении кремниевый солнечный элемент генерирует электрическое напряжение величиной 0,5 В. Независимо от типа и схемы включения все (большие и малые), кремниевые солнечные элементы генерируют напряжение 0,5 В.

По-иному обстоит дело с выходным током элемента. Он зависит от интенсивности света и размера элемента, под которым подразумевается площадь поверхности. Сила тока зависит также от длины волны света и его интенсивности, причем она прямо пропорциональна интенсивности излучения. Чем ярче свет, тем больший ток генерируется солнечным элементом. Также

зависит от времени эксплуатации КПД устройства и от температуры (при ее повышении, проводимость фотоэлемента значительно падает).

Солнечные элементы можно соединять последовательно и параллельно с целью увеличения выходных характеристик. Будем рассматривать солнечные элементы как обычные батарейки. В сущности, при последовательном включении батареек увеличивается полное напряжение (рис. 2). То же самое можно проделать с солнечными элементами. Соединяя положительный вывод одного элемента с отрицательным выводом другого, от двух элементов можно получить напряжение величиной 1 В.



Рис. 2. Последовательное включение батареек.

Получение полупроводников легированием кремния

Современные технологии позволяют изменять свойства кремния. Так, например, путем легирования можно превратить кремний в проводник. Процесс легирования состоит в том, что к кристаллу кремния подмешивается небольшое количество примеси.

Имеется два типа примесей:

- Полупроводник типа N – для его формирования к кремнию добавляются небольшие количества фосфора или мышьяка. Фосфор и мышьяк имеют на внешней электронной орбите по пять электронов, поэтому при их попадании в кремний нарушается структура его кристаллической решетки. Пятому электрону атома примеси не к чему присоединяться, поэтому он остается свободным и может перемещаться в материале полупроводника. Чтобы образовалось достаточное количество свободных электронов и, через кремний мог протекать электрический ток, достаточно добавить очень маленькое количество примеси. Кремний типа N является хорошим проводником. Электроны имеют отрицательный (по-

английски negative) заряд, отсюда произошло и название «полупроводник N-типа».

- Полупроводник P-типа – для его создания в качестве примеси используется бор или галлий. Во внешнем электронном слое атомов галлия и бора имеется всего по три электрона. Если такие атомы добавить в кристаллическую решетку кремния, они образуют в этой решетке «дырки», в местах, где соответствующим электронам кремния не к чему присоединяться. Отсутствие электрона приводит к появлению такого же эффекта, какой вызвало бы действие положительного (positive) заряда, поэтому такой полупроводник называют «полупроводником P-типа». Дырки могут проводить электрический ток. Дырка может успешно перехватывать электрон у соседнего атома, при этом получается такой эффект, как будто по материалу перемещаются сами дырки. Кремний P-типа является хорошим проводником.

Просветление оптики

Просветление оптики - процесс нанесения покрытий на поверхности линз, граничащих с воздухом. Целью просветления является увеличение светопропускания оптической системы. Просветляющие плёнки уменьшают отражение и светорассеяние, увеличивают разрешающую способность объектива, отчего получаемое изображение становится более детализированным, увеличивается контрастность оптического изображения (рис. 3).

Чем выше показатель преломления материала линзы, тем больше света отражается от ее поверхности. Именно эту проблему устраняют с помощью нанесения качественных просветляющих покрытий.

В просветляющей оптике, как правило, применяются методы катодного распыления или плазменного осаждения методом бомбардировки ионизированными атомно-молекулярными элементами выбранным составом материала. Процесс осаждения проводится в глубоком вакууме и под действием постоянного электростатического поля. Данными способами можно

создать пленку расчетной толщины, возможно нанесение нескольких пленок одна поверх другой. Толщины пленок измеряются в нанометрах и зависят от расчетной величины длины волны проходящего луча света.

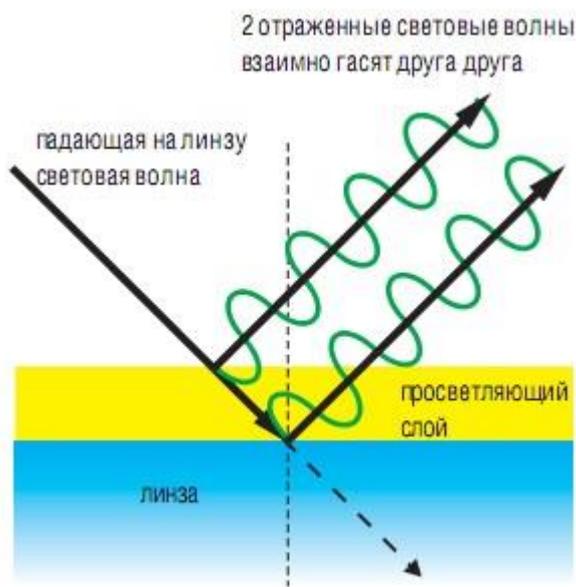


Рис. 3. Взаимное гашение двух волн, отраженных от поверхности линзы с одним просветляющим слоем

Просветляющие покрытия бывают:

- Однослойные, в которых толщина просветляющего слоя (например, кремниевой кислоты) равняется $1/4$ длины световой волны. В этом случае лучи, отражённые от её наружной и внутренней сторон, погасятся вследствие интерференции и их интенсивность станет равной нулю. Для наилучшего эффекта коэффициент преломления просветляющей плёнки должен равняться квадратному корню коэффициента преломления оптического стекла линзы, но реально применимые материалы с таким показателем преломления отсутствуют.
- Двухслойные, состоящие из двух просветляющих слоёв. Слой снаружи имеет меньший коэффициент преломления. Имеет более высокие показатели, чем однослойное покрытие.

P-i-n переход происходит на элементе с двухсторонним электродным покрытием на основе оксида цинка (рис. 4). P-i-n переход или тонкопленочная

фотопреобразующая ячейка включает i -слой находящийся между p -слоем и n -слоем (p -слой положительно легированный, n -слой отрицательно легированный). i -слой, который по существу является основным слоем, занимает значительную часть толщины p - i - n перехода.

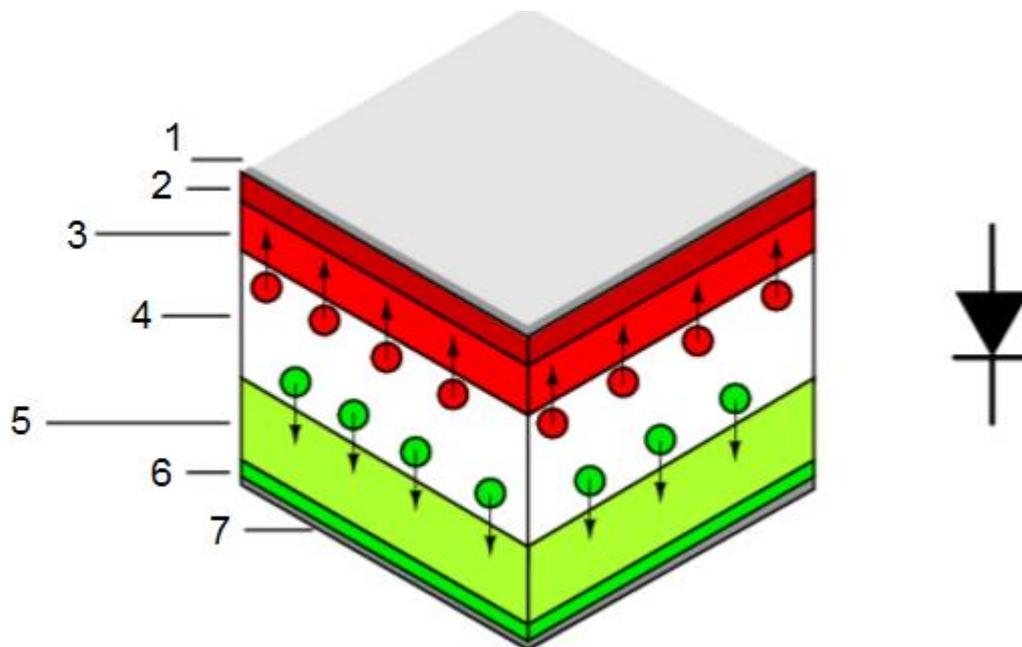


Рис. 4. P-i-n переход.

Условные обозначения: 1 – верхний металлический контакт; 2 – слой p ; 3 – p -переход; 4 – внутренняя область; 5 – n -переход; 6 – слой n ; 7 – нижний металлический контакт.

В ходе исследования были проведены сравнения различных просветляющих покрытий. Мы выяснили, что по имеющимся данным, самое простое и наименее дорогое просветляющее покрытие состоит из одного слоя фторида магния (MgF_2). Так как MgF_2 имеет очень низкий показатель преломления (приблизительно 1.38 на длине волны 550 нм), то при нанесении на обычное оптическое стекло (показатель преломления 1.45-1.85) слоя данного материала толщиной в четверть длины волны проявляются привлекательные просветляющие свойства. Один слой покрытия на основе MgF_2 позволяет уменьшить потери на отражение с 4 % (без покрытия) до менее 1% (с покрытием).

Методы формирования наноразмерных слоев

Формирование слоев проводилось на двух установках, основанных на двух принципиально разных подходах, но позволяющих получить диэлектрические покрытия требуемых толщин.

В первом случае, опыт основывался на вакуумном магнетронном напылении (рис. 5). В результате возможно получение металлов и диэлектриков с просветляющими покрытиями и контактными площадками. Преимущества данного метода состоят в высокой адгезии покрытий и скорости напыления.



Рис. 5. Установка вакуумного магнетронного напыления.

Во втором случае использовался метод плазмохимическое осаждения (рис. 6). Установка позволяет наносить на элементы диэлектрические и полупроводниковые слои состоящие из SiO_2 , Si_3N_4 , $\alpha\text{-Si:H}$, $\alpha\text{-SiC:H}$.



Рис. 6. Установка плазмохимического осаждения.

Расчет толщин просветляющего покрытия на основе SiO₂/ITO

В представленной работе был создан солнечный элемент, имеющий следующую структуру (рис. 7):

- 1) слой ITO , толщина: 80 нм
- 2) слой p-aSiH, толщина 40 нм
- 3) слой i-aSiH ,толщина 3-5 нм
- 4) подложка TopSil сопротивление 2-5 Ом · см n-типа обработка

NF(Плавиковая кислота)

- 5) слой n-aSiH , толщина 40 нм
- 6) слой серебра (Ag), толщина 100 нм

Структура прогревалась при 170°С , t = 20мин.



Рис. 7. Структура солнечного элемента.

В результате были получены элементы, представленные на рисунке 8.

После подсчета наилучшей толщины слоев, интегрировании графика, мы пришли к такому выводу: при переходе от теплых цветов на графике к холодным у нас уменьшается интегральный коэффициент отражения (рис. 9).

Расчеты проводились при помощи компьютерной программы Epitaxy project.

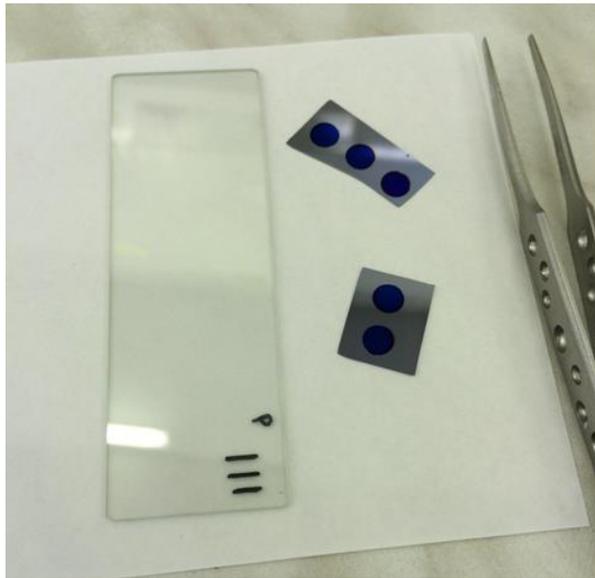


Рис. 8. Солнечные элементы.

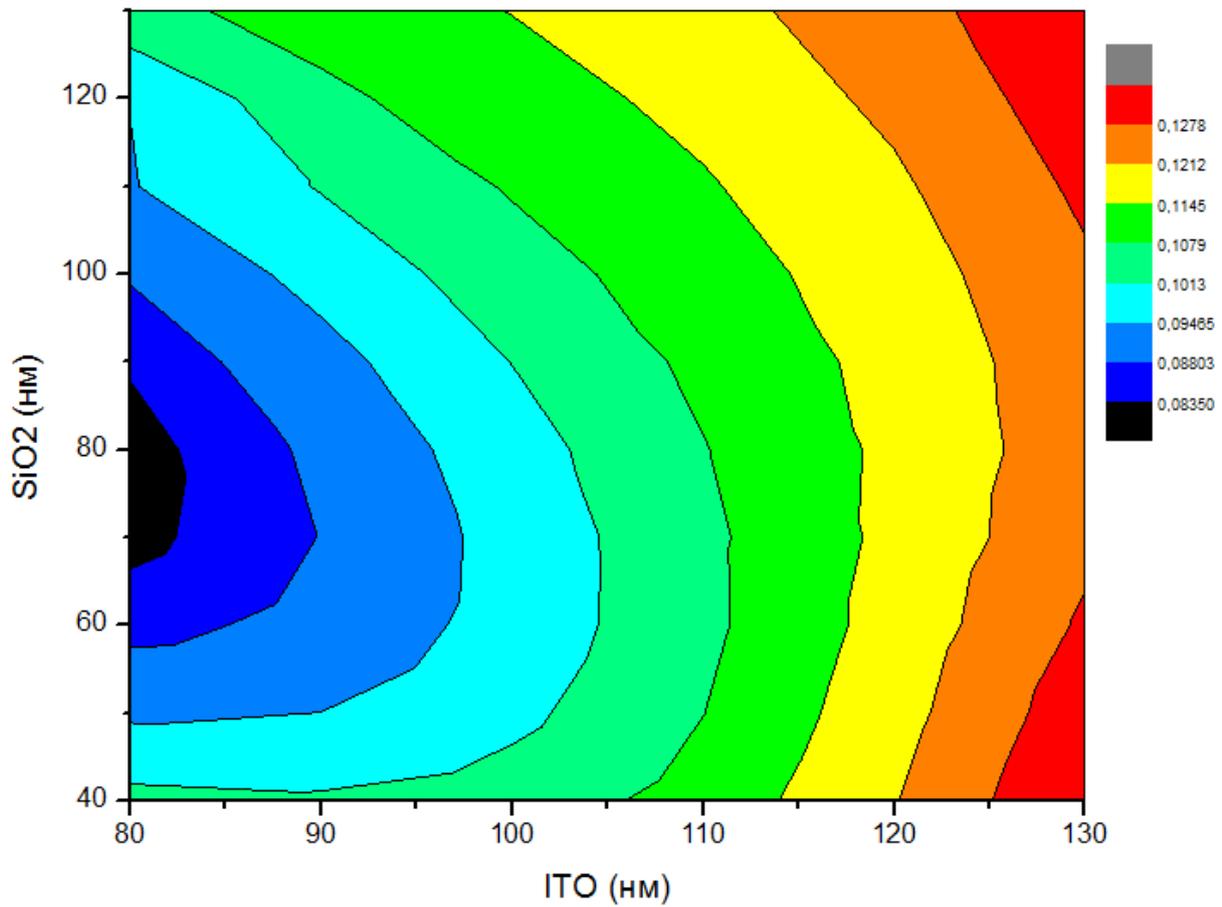


Рис. 9. Зависимость интегрального коэффициента отражения от толщин покрытий.

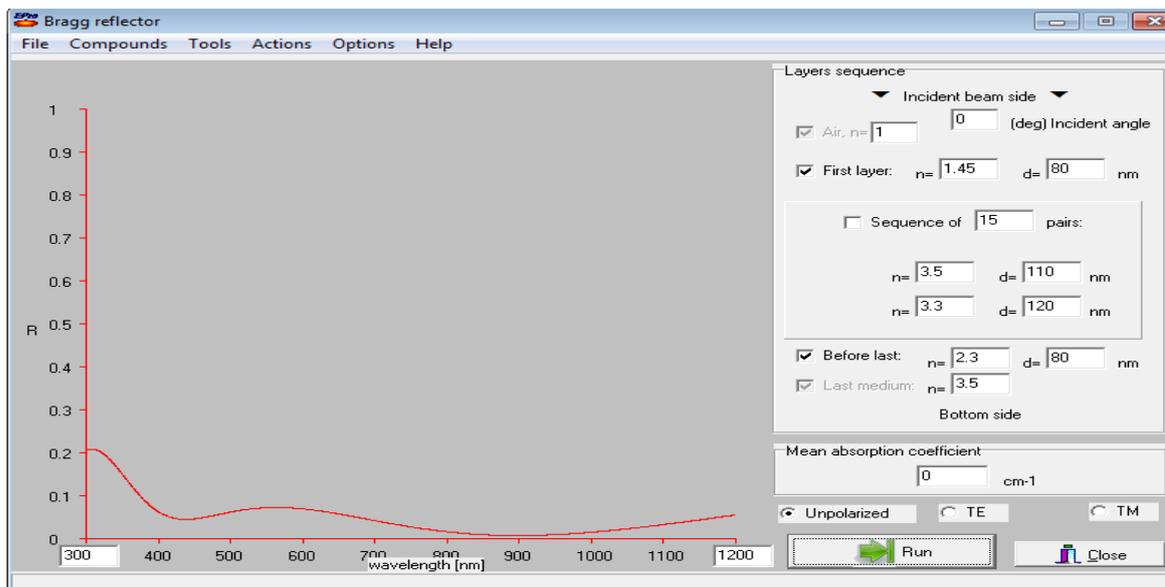


Рис.10 Результат наилучшего расчета просветляющего покрытия

В программе были смоделированы покрытия с толщинами слоев SiO₂, ITO в диапазоне 80-120нм с шагом в 10нм (25 экспериментов).

Наилучшим оказался результат при соотношении толщин SiO₂ и ITO, как 80нм к 80нм. При данном отношении интегральный коэффициент отражения иллюстрирован на рис. 11.

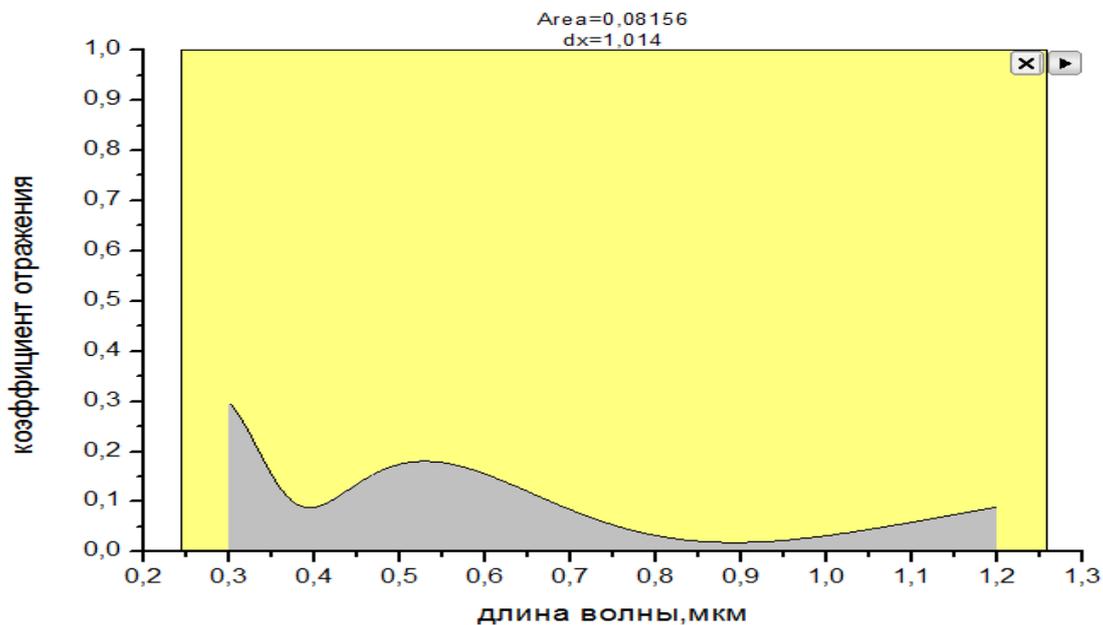


Рис.11 График зависимости коэффициента отражения от длины волны

Area = 0,08156. График зависимости коэффициента отражения от длины волны для просветляющего покрытия с толщинами 80нм для SiO₂ на 80нм для ITO показан на рисунке.

Измерение характеристик солнечного элемента с нанесенным просветляющим покрытием

После нанесения нужных нам покрытий мы измерили вольт-амперную характеристику (рис.12, рис.13).

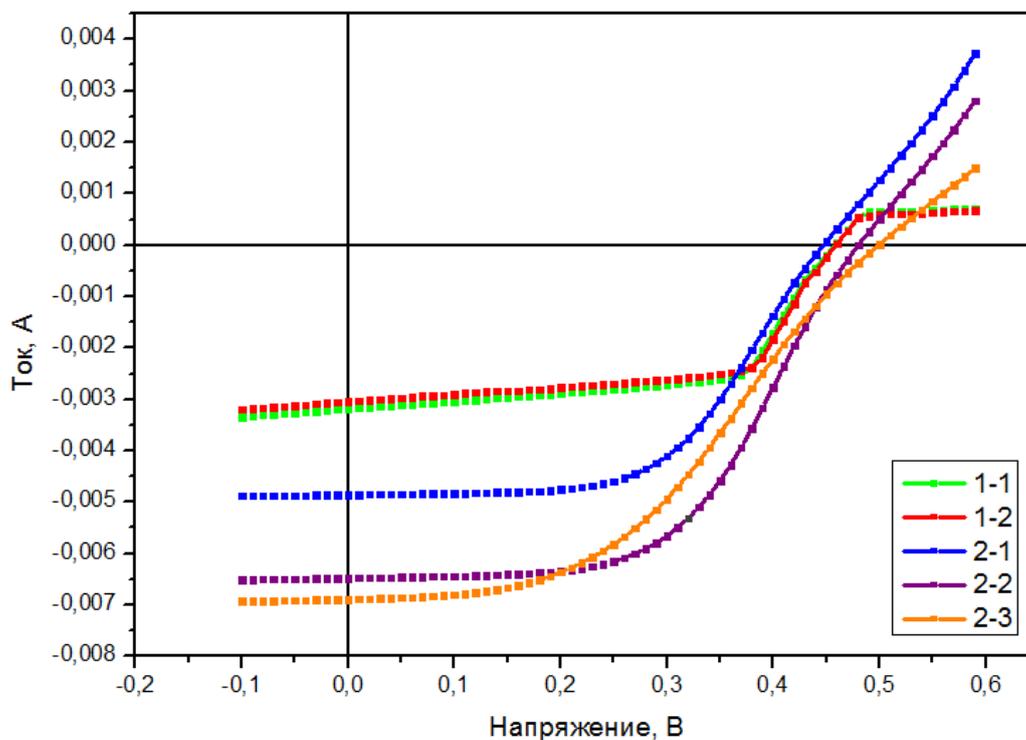


Рис.12 ВАХ без напыления SiO₂

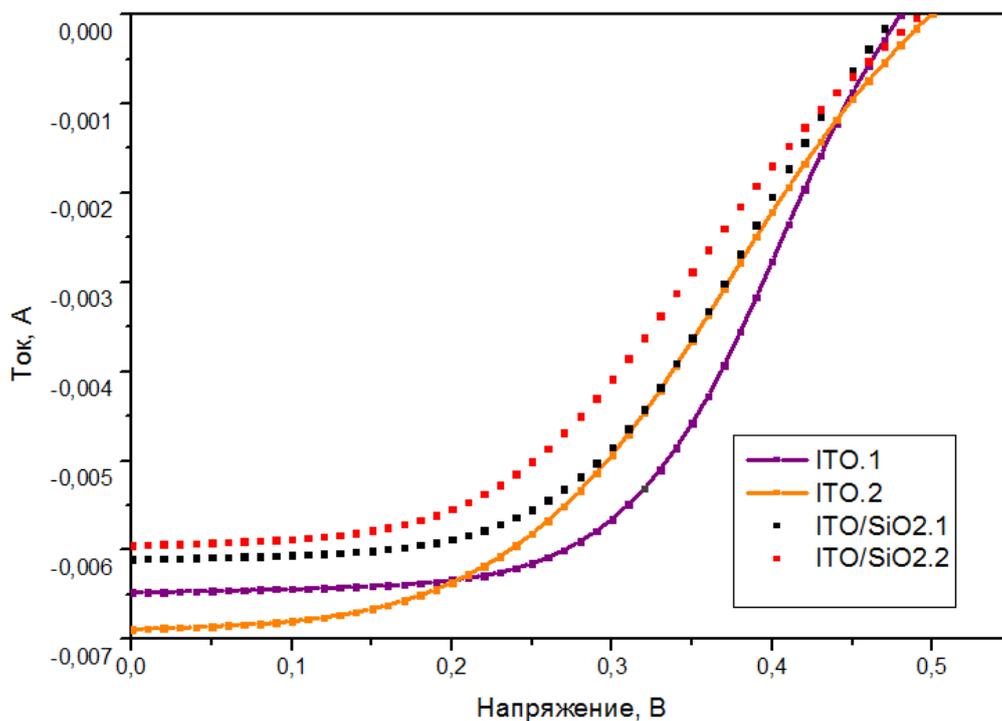


Рис.13 ВАХ с напылением SiO₂

Спектральные характеристики солнечного элемента

Спектральная характеристика солнечного элемента с нанесенным ITO(80нм).

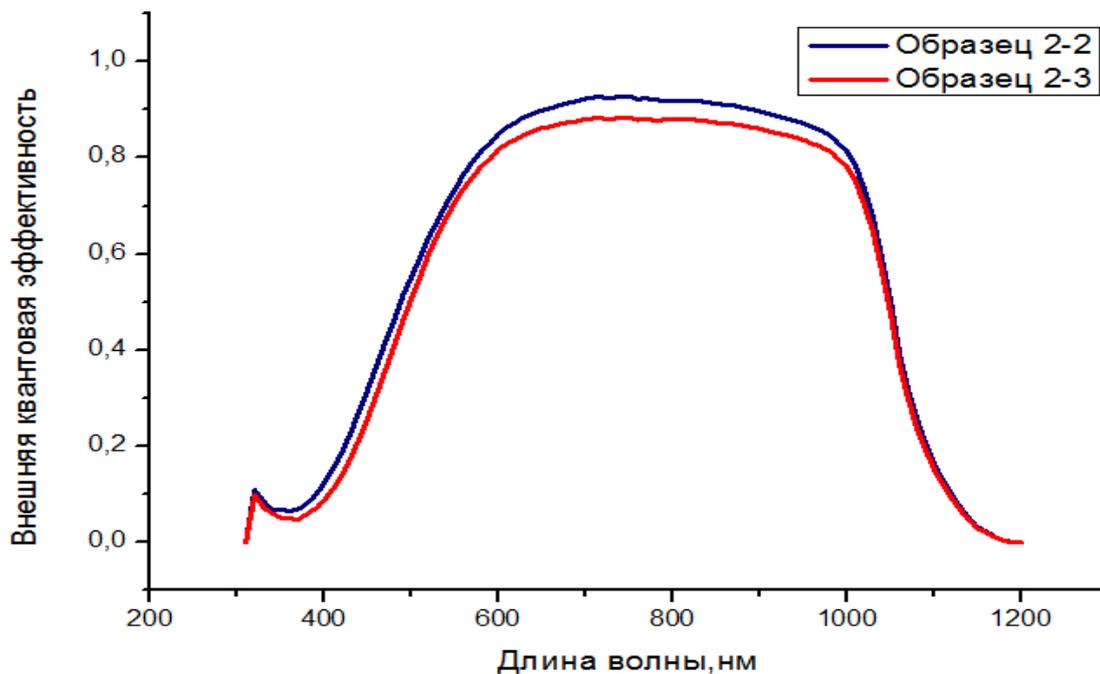


Рис.14 Спектральная характеристика солнечного элемента с нанесенным ITO

Спектральная характеристика солнечного элемента с нанесенным ITO(80нм) в сравнении со спектральной характеристикой солнечного элемента с нанесенным ITO(80нм) и SiO₂(80нм).

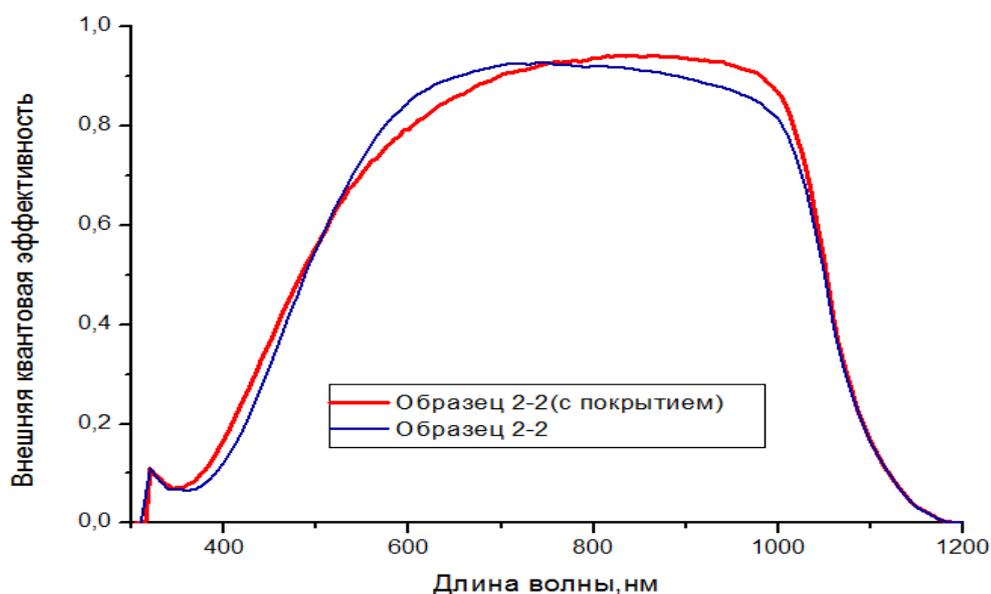


Рис. 15. Спектральная характеристика с нанесенным ITO И SiO₂.

Вывод

На основании данного исследования мы можем сделать вывод о том, что нанесение SiO_2 увеличивает эффективность преобразования света в области больших длин волн, но при этом уменьшает в средней области. При этом SiO_2 является «защитой» от «агрессивной атмосферы», из чего следует большая применимость в различных сферах жизни.

Литература

1. Солнечные батареи и из чего они сделаны. Солнечные элементы [электронный ресурс]. Режим доступа: <https://tradio.wiki> Дата обращения 21.11.2018.
2. Тонкопленочные солнечные элементы [электронный ресурс]. Режим доступа: <https://belaqimofihaja.gq/2893048/dd3e9d2-solnechnyy-element-shema-79cee1> Дата обращения 05.10.2018.

Для цитирования:

П. А. Скулова, Г. А. Лоскутов. Разработка и исследование двухслойного просветляющего покрытия SiO_2/ITO для солнечных элементов на основе аморфного кремния. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 3. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/mar19/5/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2019.3.5