

СОЛНЕЧНЫЕ БАТАРЕИ НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ Si-ITO

Б.В. Ширяев, Е.Е. Воронюк, Ю.С. Жидик студенты кафедры ФЭ

*Научный руководитель: П.Е. Троян, профессор кафедры ФЭ, доктор технических наук
Томск, ТУСУР, harger.net@mail.ru*

Проект ФЭ-1301 "Расчет и технология формирования проводящего прозрачного покрытия для светодиодов"

Введение

Солнечная энергетика в настоящий момент является одним из перспективных направлений развития экологически чистых источников электроэнергии, поскольку солнечный свет является основным и общедоступным источником энергии на Земле для живых организмов. Стремясь обуздать эту энергию, можно снизить общее воздействие человека на окружающую среду: загрязнение воздуха продуктами сгорания топлива, нарушение течения рек перегораживанием их гидроэлектростанциями.

Основная проблема состоит в том, что вся основная энергонесущая волна света поглощается земной атмосферой, пропуская лишь малую долю от всего излучения. Поэтому требуется улучшить показатель преобразования падающего солнечного света в электроэнергию, т. е. увеличить коэффициент полезного действия (КПД) солнечных элементов.

В данной работе рассматривается один из способов повышения КПД солнечных элементов, а именно использование плёнки ITO.

Описание структур

Плёнка ITO (indium-tin-oxide) представляет собой проводящее прозрачное покрытие оксида индия, легированного оловом, донорного типа проводимости с шириной запрещённой зоны 3,6...4,3 эВ [1]. Плёнка ITO обладает благоприятным спектром пропускания солнечного света (рис. 1), не влияющим на уменьшение КПД солнечного элемента с этой плёнкой.

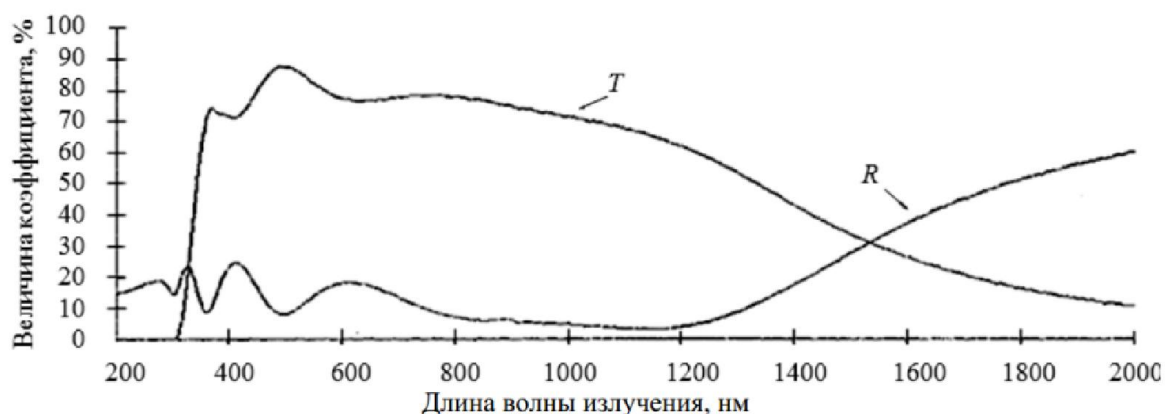


Рис. 1. Спектр пропускания (T) и отражения (R) образца стекла с нанесённой плёнкой ITO сопротивлением 40 Ом/□ [1]

Первый вариант использования плёнок ITO в качестве просветляющего покрытия для кремниевого элемента. Сама плёнка не участвует в преобразовании солнечной энергии в электрическую, но может служить прозрачной обкладкой кремниевой структуры, для улучшения протекания тока от кремния. Причины, по которым пленки ITO следует использовать в качестве просветляющего покрытия:

1) Благодаря хорошей проводимости, пленка ITO является отличным токопроводящим слоем;

2) Благодаря низкому показателю преломления, пленку ИТО можно использовать как поверхность для уменьшения коэффициента отражения и снижения выхода непоглощенных фотонов света из кремния.

Для повышения эффективности просветляющего покрытия, с плёнкой ИТО рекомендуют применять плёнку оксида кремния (SiO_2) для плавного перехода между коэффициентами преломления сред [2]. Предлагаемая структура солнечного элемента приведена на рис. 2.

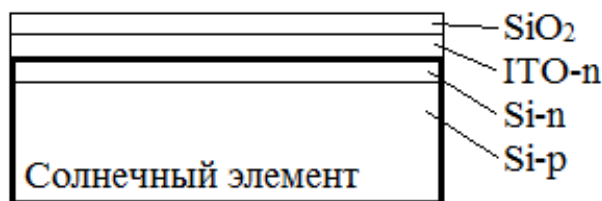


Рис. 2. Структура солнечного элемента с использованием просветляющего покрытия из плёнок ИТО и оксида кремния

Коэффициент преломления оксида кремния равен 1,46-1,52, коэффициент преломления кремния приблизительно - 3,4. Отсюда следует, что для повышения эффективности поглощения фотонов солнечным элементом следует разместить дополнительный просветляющий слой с показателем преломления, находящийся между 1,52 и 3,4. Показатель преломления ИТО колеблется в пределах 1,97-2,06, в зависимости от параметров получения плёнок магнетронным распылением [3]. Помещая плёнку ИТО между кремнием и оксидом кремния, мы запираем фотоны внутри просветляющих покрытий, используя эффект внутреннего отражения. Изменение показателя отражения солнечного элемента при использовании просветляющего покрытия показано на рис. 3.

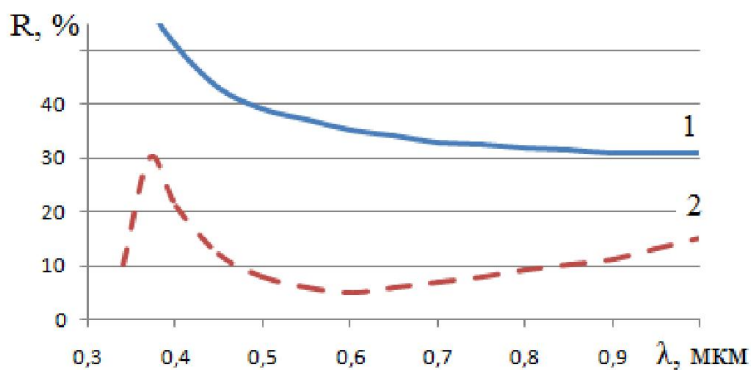


Рис. 3. Спектральная зависимость коэффициента отражения от поверхности кремниевых солнечных элементов (1—без просветляющего покрытия, 2—просветляющее покрытие ИТО)[2]

Из графиков видно, что коэффициент отражения света видимого спектра с просветляющим покрытием ИТО меньше, за счет чего КПД на 40% выше, чем у структур без просветляющих покрытий [2].

Второй вариант использования плёнок ИТО. Данный метод используется для получения гетероструктур типа Si-ИТО. Таких типов может быть два: как с подслоем из оксида кремния, так и без него.

Рассмотрим гетероструктуру без подслоя оксида кремния. Структура представляет собой гетеропереход: ИТО-п/Si-р. Зонная структура такого перехода изображена на рис. 4.

Эту структуру можно уподобить структуре типа Шоттки, особенно если слой ИТО значительно вырожден. Диффузионный потенциал в значительной степени зависит от свойств исходного кремния и от уровней состояния у поверхности раздела между двумя

полупроводниками, и, следовательно, условия получения гетеропереходов существенно влияют на получение максимального напряжения холостого хода.

Спектральная характеристика такого солнечного элемента (рис. 4) имеет в области коротких волн значения выше, чем для обычных кремниевых солнечных элементов с диффузионным p-n переходом [4]. КПД такого гетероперехода слишком низка по сравнению с обычными кремниевыми p-n элементами. Так как ИТО дополнительно выполняет роль просветляющего покрытия и изготовление этих прозрачных плёнок не составляет труда, эти структуры конкурируют с кремниевыми элементами. В настоящее время встречается много литературы, где вместо слоёв ИТО используют IFO (indium-fluorine-oxide) – плёнки оксида индия, легированные фтором. Принцип действия солнечных элементов с таким слоем такой же, как и с плёнкой ИТО, за исключением того, что плёнка IFO p-типа проводимости и, следовательно, кремний следует выбрать донорного типа проводимости (Si-n/IFO-p).

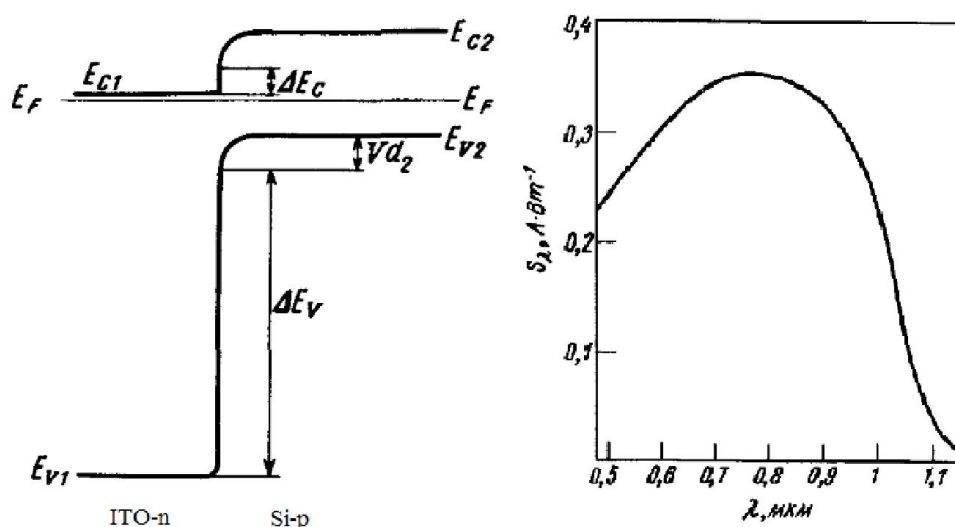


Рис. 4. Зонная структура и спектральная характеристика солнечного элемента с гетеропереходом ИТО-n/Si-p [4]

Если между плёнкой ИТО и кремнием в предыдущей структуре добавить слой оксида кремния, то получится ещё одна разновидность солнечных гетероструктурных элементов, принцип работы которых похож на МДП-структуру [5]. Зонная диаграмма и спектральная чувствительность такой структуры представлена на рис. 5.

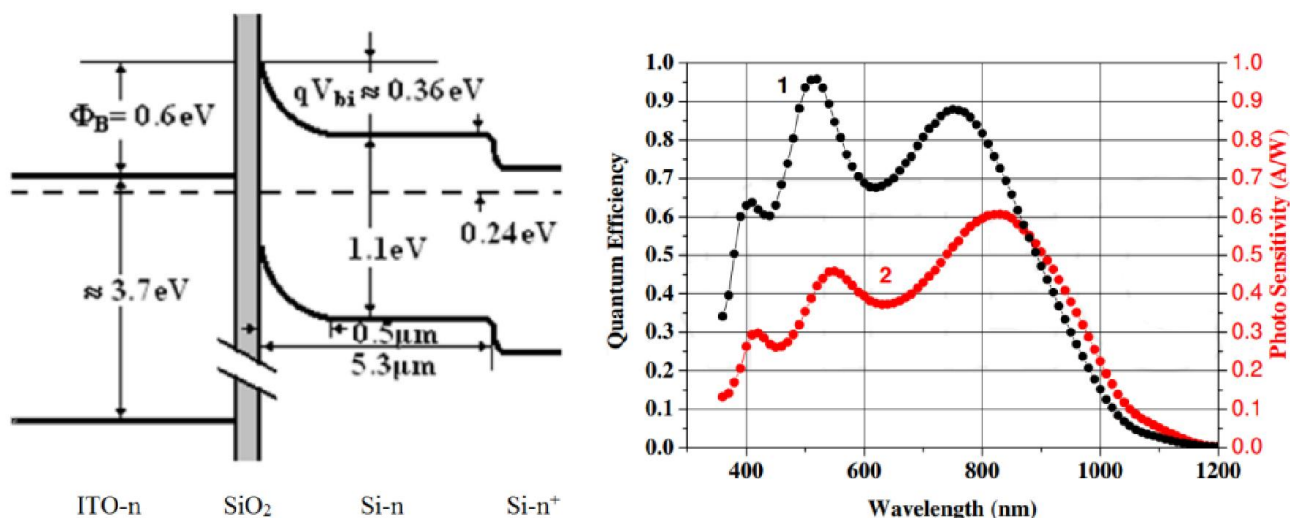


Рис. 5. Зонная структура, спектральная характеристика и квантовая эффективность солнечного элемента с гетеропереходом ИТО-n/SiO2/Si-n [5]

Инверсия кремниевого слоя вблизи оксида кремния даёт p-n переход, в котором генерируются неравновесные носители солнечным светом. Важным условием является то, что слой оксида кремния должен быть достаточно тонким для возможности туннелирования сгенерированных носителей в проводящую плёнку ИТО. Из спектральной характеристики видно, что данная структура намного эффективнее структуры без слоя оксида. К тому же КПД таких фотоэлементов достигает 10-12% [5]. Изготовление подобных гетероструктур по сложности сопоставима с изготовлением ИТО-n/Si-p.

Заключение

Рассмотрены основные структуры кремниевых солнечных элементов с нанесёнными прозрачными проводящими покрытиями ИТО. Анализируя приблизительные значения КПД каждой из структуры, можно сделать следующее заключение: применение плёнки ИТО только в качестве просветляющего покрытия не раскроет весь потенциал этой плёнки, а применение гетероструктуры ИТО-n/SiO₂/Si-p противоречит преимуществам просветляющего покрытия (повышенный коэффициент отражения света).

На текущий момент собирается подробная информация и идёт интенсивная подготовка материалов к экспериментам.

Литература:

1. Троян, П.Е. Прозрачные проводящие покрытия с контролируемыми значениями коэффициента пропускания и поверхностного сопротивления / П.Е. Троян, Ю.В. Сахаров, Ю.С. Жидик // Доклады ТУСУРа. 2014. №1. – С.99-102.
2. Колтун, М.М. Оптика и метрология солнечных элементов / М.М. Колтун. – М.: "Наука" 1985. – С.122-125.
3. Крылов, П.Н. Оптические свойства пленок ИТО, полученных высокочастотным магнетронным напылением с сопутствующей ионной обработкой / П.Н. Крылов, Р.М. Закирова, И.В. Федотова // ФТП. 2013. Т. 47. Вып. 10. С.1421-1424.
4. Фабр, Е. Солнечные элементы с гетеропереходом In₂O(n⁺) – Si(p) / Е. Фабр, Р. Тижбург // Солнечная энергетика / Пер. с англ. под ред. Ю.Н. Малевского, М.М. Колтуна. – М.: "МИР", 1979. – С. 261-266.
5. Simashevici, A. Solar cells on the base of semiconductor-insulator-semiconductor structures / A. Simashevici, D. Serban, L. Bruc [Электронный ресурс] // INTECH. 2011. Электрон. версия печат. публ. URL: <http://www.intechopen.com/books/solar-cells-silicon-wafer-based-technologies/solar-cells-on-the-base-of-semiconductor-insulator-semiconductor-structures> (Дата обращения: 16.10.2014).