

ПРИБОРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОЛНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА ДИОДНОГО ТИПА НА ОСНОВЕ ТОНКИХ ПЛЁНОК С ВЫСОКИМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ПОГЛОЩЕНИЯ

Гурбо А.Д., Боровик А.М.

*Научный руководитель - канд. техн. наук Стемпницкий В. Р.*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Беларусь

Солнечные элементы диодного типа создаются на основе обширного класса материалов: полупроводников (Si, Ge), многокомпонентных полупроводниковых соединений A_3B_5 и A_2B_6 , а также органических материалов. В данном типе солнечных элементов разделение зарядов, созданных внешним освещением, происходит на границе раздела двух сред с p - и n -типом электропроводности. В зависимости от толщины активной области, солнечные элементы диодного типа подразделяются на системы на основе объёмных кристаллических подложек и на основе тонких плёнок различной структуры (кристаллической, микрокристаллической, аморфной) [1-4].

Основной недостаток монокристаллических кремниевых солнечных элементов – большой расход сравнительно дорогого высокочистого кремния, большая часть которого играет роль пассивной подложки. Аморфные солнечные элементы используют в качестве поглощающего слоя аморфные вещества, обладающие только ближней упорядоченностью структуры. Наиболее распространенным аморфным материалом для использования в качестве поглотителя является аморфный кремний (a -Si). Значение его запрещенной зоны может быть изменено путем введения примеси водорода (гидрогенизации) [5]. К достоинствам a -Si:H относятся дешевизна устройств на его основе и их технологическая совместимость с устройствами на основе монокристаллического кремния; возможность получения тонких пленок практически на любых подложках – в отношении как материала, так и размеров; радиационная стойкость, обеспечивающая стабильную работу приборов в условиях воздействия жесткого ионизирующего излучения; более высокие по сравнению с монокристаллическим кремнием коэффициент поглощения и фоточувствительность, обусловленные разупорядоченностью структуры a -Si:H и наличием в ней водорода [6].

Наибольшей эффективности солнечных элементов удалось достичь при использовании p - i - n -структур. Широкая нелегированная i -область a -Si:H обеспечивает поглощение света и соответственно эффективную работу элемента. Солнечный элемент на основе ячейки Si-HIT является одним из вариантов снижения стоимости вырабатываемой солнечной энергии [7]. На первых этапах производства солнечных элементов на основе ячейки Si-HIT происходит очистка поверхности пластины кристаллического кремния n -типа электропроводности и придание ей текстурированной формы посредством жидкостного химического травления. Слои аморфного кремния осаждаются на пластину посредством химического осаждения из паровой фазы (PECVD). Оксид индия-олова (ITO) наносится на переднюю и заднюю стороны импульсным DC-реактивным распылением из плоских керамических мишеней. Лицевая контактная решетка представляет собой серебряную сетку.

С использованием программного комплекса компании Silvaco осуществлено компьютерное моделирование технологического процесса изготовления солнечного элемента диодного типа на основе ячейки Si-HIT (рисунок 1). Моделирование технологического процесса формирования приборной структуры солнечного элемента включает следующие этапы: задание расчетной сетки и параметров пластины; профилирование поверхности пластины; нанесение слоев аморфного гидрогенизированного кремния a -Si:H с собственным (толщина слоя – 5 нм) и p -типом электропроводности (15 нм), оксида индия-олова (100 нм); последовательное нанесение на обратную сторону пластины слоев

аморфного гидрогенизированного кремния $a\text{-Si:H}$ с собственным (5 нм) и n -типом электропроводности (20 нм), оксида индия-олова (40 нм), серебра; определение контактов.

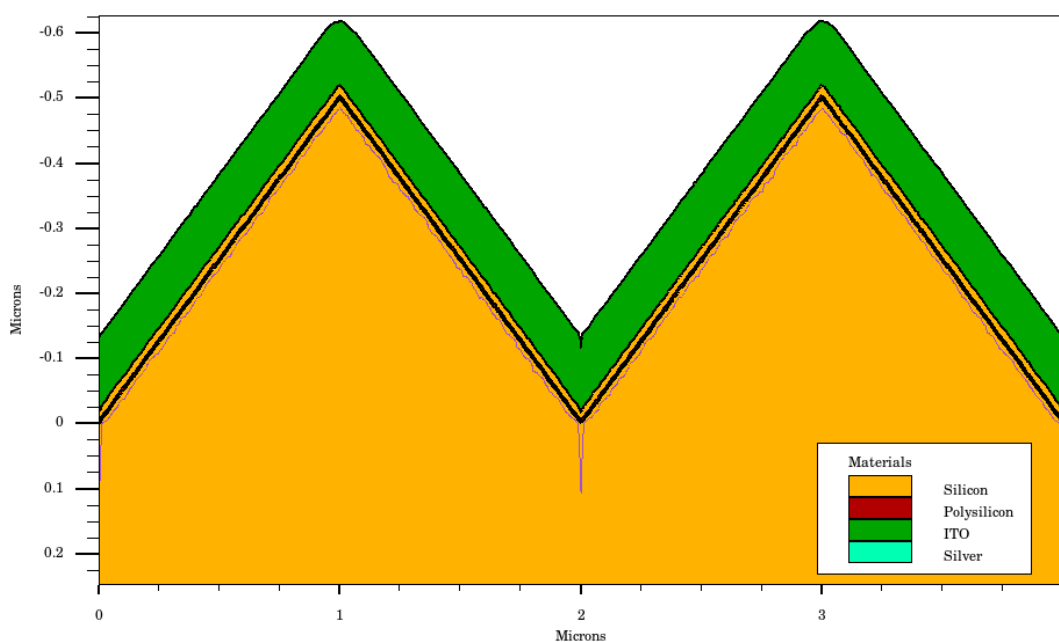


Рис. 1. Приповерхностный фрагмент солнечного элемента диодного типа на основе ячейки Si-HIT

Важным этапом при моделировании функционирования солнечных элементов на основе тонких пленок гидрогенизированного аморфного кремния является корректное определение электрофизических параметров материала ($a\text{-Si:H}$). Ширина запрещенной зоны пленок $a\text{-Si:H}$, применяемых при создании солнечных элементов, зависит от условий осаждения пленок и концентрации водорода и, как правило, изменяется в пределах 1,7–1,8 эВ. Однако, путем введения дополнительных примесей (углерода, азота) или формирования сплавов ($a\text{-Si:Ge:H}$, $a\text{-SiC:H}$, $a\text{-SiN:H}$) ширину запрещенной зоны можно изменять в широких пределах, от 1,1 эВ до 5 эВ. Плотность состояний $a\text{-Si:H}$ достигает $10^{19}\text{--}3\cdot 10^{20}\text{ см}^{-3}$. Величина подвижности электронов при комнатной температуре, как правило, находится в диапазоне $1\text{--}10\text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, величина подвижности дырок на один-два порядка меньше. Время жизни неравновесных носителей заряда в $a\text{-Si:H}$ обычно составляет $10\text{--}30\text{ мкс}$, хотя может находиться в более широком диапазоне значений ($10^{-3}\text{--}10^{-7}\text{ с}$) [3, 5, 6].

На рисунке 2 представлены результаты моделирования электрических характеристик солнечного элемента диодного типа на основе ячейки Si-HIT при наличии и отсутствии воздействия солнечного излучения. При моделировании воздействия светового потока заданы стандартные условия: солнечная иррадиация $1\text{ кВт}/\text{м}^2$, температура модуля $+25\text{ }^\circ\text{C}$, освещенность $\text{AM}=1.5$. Моделирование электрических характеристик солнечного элемента осуществлялось с использованием модели рекомбинации Шокли-Рида-Холла, статистики Ферми-Дирака, с учетом неполной ионизации примесей в статистике Ферми-Дирака и ловушек на омических контактах.

Для описания солнечных элементов применяется набор специальных параметров и характеристик, позволяющий производить сравнительную оценку солнечных элементов различного типа. К специальным характеристикам солнечного элемента относятся вольт-амперная и спектральная. Специальными параметрами солнечного элемента являются напряжение холостого хода V_{OC} , ток короткого замыкания I_{SC} или его плотность, коэффициент заполнения FF и коэффициент полезного действия (КПД). Кроме того, важными параметрами, характеризующими функционирование солнечного элемента, являются максимальная вырабатываемая солнечным элементом выходная мощность P_M , а

также соответствующие ей значения тока и напряжения I_M , V_M [5, 6]. В таблице 1 представлены полученные по результатам компьютерного моделирования значения основных параметров, характеризующих функционирование исследуемого солнечного элемента диодного типа.

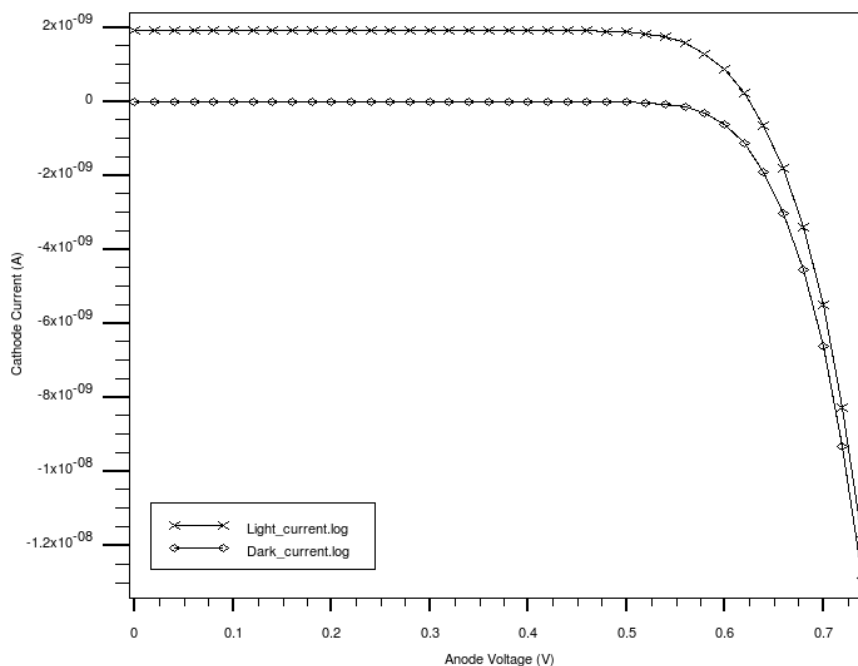


Рис. 2. Зависимости тока катода от напряжения на аноде солнечного элемента диодного типа на основе ячейки Si-HIT при наличии и отсутствии облучения световым потоком

Таблица. 1. Значения параметров солнечного элемента диодного типа на основе ячейки Si-HIT

Параметр	Значение
V_{OC} , В	0,63
I_{SC} , А	1,91e-09
P_M , Вт	9,47e-10
V_M , В	0,52
I_M , А	1,82e-09
FF , %	79,2
КПД, %	19,7

Таким образом, исследованная конструкция солнечного элемента демонстрирует типичные электрические и эксплуатационные характеристики для этого типа изделий.

Литература

1. Green, M. A. Third Generation Photovoltaics / M. A. Green. – Berlin: Springer, 2003. – 160 p.
2. Ginley, D. S. Fundamentals of Materials for Energy and Environmental Sustainability / D. S. Ginley, D. Cahen. – Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2012. – 753 p.
3. Алферов, Ж. И. Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики / Ж. И. Алферов, В. М. Андреев, В. Д. Румянцев // Физика и техника полупроводников. – 2004. – Т. 38, № 8. – С. 937–948.
4. Bauer, T. Thermophotovoltaics: Basic Principles and Critical Aspects of System Design / T. Bauer. – Berlin: Springer-Verlag, 2011. – 222 p.

5. Гременок, В. Ф. Солнечные элементы на основе полупроводниковых материалов / В. Ф. Гременок, М. С. Тиванов, В. Б. Залесский. – Минск: Изд. Центр БГУ, 2007. – 223 с.
6. Афанасьев, В. П. Тонкопленочные солнечные элементы на основе кремния / В. П. Афанасьев, Е. И. Теруков, А. А. Шерченков. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. – 168 с.
7. Tsuda, S. Recent progress in a-Si solar cells / S. Tsuda, S. Sakai, S. Nakano // Appl. Surf. Sci. – 1997. – V. 113/114. – P. 734–740.

УДК 621.383.51

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОЛНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА
ДИОДНОГО ТИПА НА ОСНОВЕ ТОНКИХ ПЛЁНОК С ВЫСОКИМ
КОЭФФИЦИЕНТОМ ПОГЛОЩЕНИЯ**

Гурбо А.Д, Боровик А.М.

Научный руководитель - канд. техн. наук Стемпицкий В. Р.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Беларусь

Вольт-амперные характеристики солнечных элементов и отдаваемая ими мощность сильно зависят от рабочей температуры. Соответствующее изменение КПД представляет большой интерес, поскольку рабочая температура может меняться в широком интервале значений, особенно при эксплуатации солнечных элементов в космосе [1].

При увеличении температуры диффузионные длины носителей заряда в кремнии возрастают, поскольку коэффициент диффузии не изменяется либо увеличивается, а время жизни неосновных носителей возрастает при повышении температуры. Увеличение диффузионной длины неосновных носителей приводит к росту тока короткого замыкания I_{SC} . Однако этот эффект невелик и составляет порядка 0,07 %/К. Параметром, наиболее подверженным изменению температуры, является напряжение холостого хода V_{OC} , которое значительно уменьшается с увеличением температуры, (в большей степени, чем I_{SC}) и составляет порядка 0,4 %/К. Кроме того, более плавная форма вольт-амперной характеристики при повышенных температурах приводит к уменьшению коэффициента заполнения. Поэтому в целом повышение температуры приводит к снижению эффективности преобразования [2].

Следует отметить, что для солнечных элементов диодного типа на основе гетероструктуры a -Si:H/ c -Si (Si-HIT) наблюдается меньшая зависимость КПД от температуры по сравнению с обычными солнечными элементами, а также практически отсутствует деградация свойств со временем, из-за наличия собственного i -слоя a -Si:H и большого разрыва в валентной зоне на границе раздела a -Si:H/ c -Si. Кроме того, солнечные элементы на основе a -Si:H благодаря особенностям аморфного кремния обеспечивают более высокую эффективность преобразования солнечной энергии при температурах 40–60 °С и в условиях облачности [2].

Помимо указанных закономерностей в функционировании солнечных элементов увеличение температуры приводит к некоторым иным нежелательным последствиям. Так, оно увеличивает напряжение, связанное с термическим расширением, увеличивает скорость деградации изделий примерно в два раза на каждые 10 градусов температуры.

Для исследования влияния температуры на электрические и эксплуатационные характеристики солнечного элемента диодного типа на основе тонких плёнок с высоким коэффициентом поглощения использовано конструктивное решение на основе ячейки Si-HIT. Приборно-технологическое моделирование солнечного элемента осуществлялось в среде программного комплекса компании Silvaco. Приборная структура исследу-