

УДК 621.383.51

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ СОЕДИНЕНИЯ $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$

А.К. Есман, В.А. Потачиц, Г.Л. Зыков

Белорусский национальный технический университет, Минск

ENERGY EFFICIENCY OF THIN-FILM SOLAR CELL ON THE BASIS OF THE $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$

A.K. Esman, V.A. Potachits, G.L. Zykov

Belarusian National State University, Minsk

Рассмотрены вопросы влияния температуры тонкопленочных солнечных элементов на основе соединения $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ на их характеристики при различных значениях толщины поглощающего слоя и концентрации галлия. Определены оптимальные значения толщины поглощающего слоя, проведено моделирование вольт-амперных характеристик для рассматриваемой конструкции солнечного элемента. Показано, что при толщине поглощающего слоя, равной 3 мкм, КПД солнечного элемента может достигать 22,65 % с коэффициентом заполнения $FF = 82,31$ %, напряжением холостого хода $V_{oc} = 0,81$ В и током короткого замыкания $J_{sc} = 33,93$ мА/см².

Ключевые слова: тонкопленочный солнечный элемент $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$, прозрачный проводящий слой, буферный слой, поглощающий слой, концентрация галлия, AMPS-1D, SCAPS-1D, Comsol Multiphysics.

The problems of the temperature effects of thin-film solar cells on the basis of $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ compound on their characteristics at the different values of the thickness of the absorbing layer and the gallium concentration are considered. The optimal values of the absorbing layer thickness are determined. The simulation of the current-voltage characteristics of the considered design of the solar cell are carried out. It is shown that the efficiency of the solar cell can reach 22.65 % with the fill factor $FF = 82.31$ %, open circuit voltage $V_{oc} = 0.81$ V, short circuit current $J_{sc} = 33.93$ mA/cm² when the optimal thickness of the absorbing layer is equal to 3 μm.

Keywords: $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ thin-film solar cell, transparent conductive layer, buffer layer, absorption layer, gallium concentration, optimization, AMPS-1D, SCAPS-1D, Comsol Multiphysics.

Введение

В настоящее время проводятся исследования, направленные на оптимизацию технологических процессов производства солнечных элементов и на повышение их энергоэффективности с целью снижения стоимости фотоэлектрических модулей. Применение компьютерного моделирования позволяет без существенных финансовых затрат провести оценку работоспособности солнечных элементов, нагреваемых в процессе их эксплуатации. Как правило, для тонкопленочных солнечных элементов используются три материала – CIGS, CdTe и аморфный кремний (a-Si). Лидером по эффективности среди тонкопленочных солнечных элементов является технология CIGS (на основе соединения $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$). По сравнению с кремнием соединение $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ является полупроводником с прямой запрещенной зоной, это означает, что для производства солнечного элемента требуется меньшее количество материала.

В настоящее время экспериментально установленный коэффициент полезного действия тонкопленочного солнечного элемента Cu(In,Ga)Se_2 составляет 21,7 % [1]. Для повышения эффективности многопереходных солнечных элементов нужно согласовать токи в отдельных слоях и

общий ток. Варьируя соотношение Ga/(In+Ga) в поглощающем слое за счет изменения ширины запрещенной зоны $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ можно согласовать генерируемый в нем ток и оптимизировать зону проводимости. Как следует из [2], увеличение плотности дефектов в материалах происходит в результате увеличения концентрации галлия. Если концентрация галлия $x < 0,6$, то эти дополнительные дефекты уже не оказывают значительного влияния на эффективность исследуемой структуры.

В данной работе рассмотрены структуры тонкопленочных солнечных элементов $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ с концентрациями галлия в пределах $0,183 \leq x \leq 0,529$.

Целью работы является определение оптимальных значений толщины поглощающего слоя и концентрации галлия тонкопленочных солнечных элементов $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ в диапазоне рабочих температур от 300 до 330 К.

1 Структура тонкопленочного солнечного элемента $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$

Исследуемая структура солнечного элемента Cu(In,Ga)Se_2 представлена на рисунке 1.1.

На подложку из нержавеющей стали толщиной 3 мм, нанесен тонкий слой молибдена (Mo), который образует металлический электрод 5.

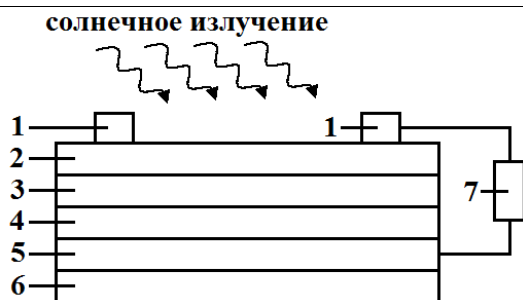


Рисунок 1.1 – Структура тонкопленочного солнечного элемента $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$, где:
 1 и 5 – металлические электроды,
 2 – прозрачный проводящий слой,
 3 – буферный слой, 4 – поглощающий слой,
 6 – подложка, 7 – внешняя нагрузка

Он расположен под поглощающим слоем 4 тонкопленочного солнечного элемента $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$, собирает от него носители и передает их внешней нагрузке 7. Оптические свойства материала электрода 5 не оказывают существенного влияния на характеристики тонкопленочного солнечного элемента, поскольку при толщине более 1,5 мкм (в расчетах мы использовали 2 мкм) падающие фотоны не достигают металлического электрода 5. До настоящего времени наилучшие результаты были получены при использовании металлического электрода 5 из молибдена, который использовался в расчетах. Указанный электрод формирует неблокирующий контакт с поглощающим слоем 4, что является преимуществом по сравнению с солнечными элементами на основе CdTe , в котором образуется барьер Шоттки и является основным препятствием для коммерциализации из-за проблем со стабильностью. На электрод 5 нанесен поглощающий слой 4 – прямозонный полупроводник с коэффициентом поглощения $\sim 10^5 \text{ см}^{-1}$, поглощающий солнечное излучение и генерирующий фотоэдс. Толщину данного слоя варьировали в пределах 1–3 мкм. Буферный слой 3 из CdS толщиной 50 нм и прозрачный проводящий слой 2 из ZnO толщиной 50 нм нанесены на верхнюю часть поглощающего слоя 4. В [3] оптимальная толщина буферного слоя из CdS составляла 50–60 нм. Буферный слой 3 повышает производительность солнечного элемента, обеспечивает формирование хорошего перехода, низкую рекомбинацию на границе раздела и уменьшает утечку. Солнечные элементы с буферным слоем из CdS , по сравнению с другими используемыми материалами, наиболее эффективны при длительной эксплуатации. Для увеличения числа фотонов, поглощаемых в слое $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$, в качестве материала прозрачного проводящего слоя 2 был выбран ZnO , имеющий большую ширину запрещенной зоны (3,3 эВ) и являющийся прозрачным для спектра солнечного излучения. Данный слой толщиной 50 нм расположен на верхней поверхности исследуемого солнечного

элемента для уменьшения потерь на отражение. Металлические электроды 1, располагающиеся на прозрачном проводящем слое 2, определены функцией работы и скоростью поверхностной рекомбинации носителей заряда. Внешняя нагрузка 7 подключена между отрицательным 1 и положительным 5 электродами. Исследуемая конструкция солнечного элемента освещается излучением со спектром стандарта AM1.5G, плотность суммарного потока энергии которого равна 1 кВт/м^2 .

2 Численное моделирование основных характеристик

Для моделирования основных характеристик тонкопленочного солнечного элемента CIGS при варьировании толщины поглощающего слоя и концентрации галлия и индия использовались программы AMPS-1D и SCAPS-1D, которые позволяют численно решать уравнение Пуассона и уравнения непрерывности для электронов и дырок и могут применяться даже для расчета наноструктурированных тонкопленочных солнечных элементов [4].

Одним из важных условий надежной работы солнечных элементов является температурный режим. С повышением температуры эффективность работы солнечных батарей, как и почти всех других полупроводниковых приборов, снижается. При температурах выше $100\text{--}125^\circ\text{C}$ они вообще могут временно потерять работоспособность, а ещё больший нагрев грозит их необратимым повреждением.

Для анализа тепловых процессов и их влияния на основные характеристики тонкопленочных солнечных элементов CIGS мы использовали программную среду Comsol Multiphysics (модуль Heat Transfer), которая обеспечивает все этапы моделирования, начиная от определения геометрических параметров и заканчивая визуализацией полученных результатов. В данной программной среде процесс теплообмена представлен в виде системы дифференциальных уравнений теплопроводности в частных производных.

3 Анализ полученных результатов

Согласно результатам моделирования, исследуемый солнечный элемент CIGS может нагреваться от 300 до 330 К в течение $\sim 0,5$ секунды. При этом разность температур на границах раздела CdS/CIGS и CIGS/Мо составляет ~ 30 К и $\sim 0,3$ К соответственно. В начальный момент нагрева тонкопленочного солнечного элемента CIGS скорость изменения температуры прозрачного проводящего слоя составляет $0,95 \text{ К/мс}$ (рисунок 3.1). При продолжении нагрева тонкопленочного солнечного элемента CIGS скорость изменения температуры прозрачного проводящего слоя снижается, а поглощающего слоя – возрастает и в момент времени 2,5 мс (кривые 1 и 2, рисунок 3.1)

и 19 мс (кривые 1 и 3, рисунок 3.1) эти скорости становятся равными. Последующий нагрев приводит к дальнейшему увеличению скорости изменения температуры до величин 0,78 К/мс и 0,13 К/мс на глубину соответственно 0,5 мкм и 1,5 мкм от границы раздела CdS/CIGS. После достижения максимальных значений данные скорости (кривые 2 и 3, рисунок 3.1) снижаются, но при дальнейшем нагреве они превышают скорость изменения температуры прозрачного проводящего слоя. Скорость изменения температуры внутри поглощающего слоя на глубине 2,5 мкм (кривая 4, рисунок 3.1) и более 2,5 мкм (на рисунке не показано) от границы раздела CdS/CIGS в течение всего времени воздействия солнечного излучения не превышает скорости изменения температуры прозрачного проводящего слоя.

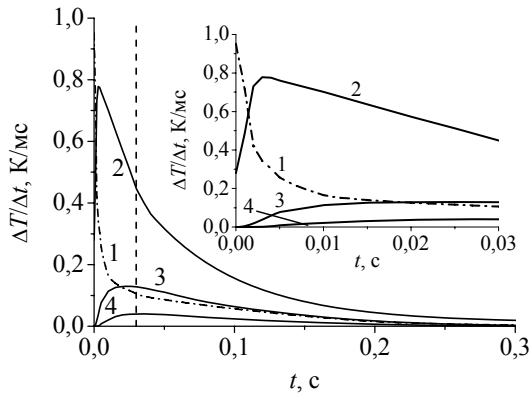


Рисунок 3.1 – Временная зависимость скорости изменения температуры прозрачного проводящего слоя (1) и внутри поглощающего слоя на глубине 0,5 (2), 1,5 (3) и 2,5 (4) мкм от границы раздела CdS/CIGS при воздействии солнечного излучения. На вставке показан увеличенный фрагмент данной зависимости во временном интервале от 0 (начало отсчета) до 0,03 с (штриховая линия)

В прозрачном проводящем и буферном слоях практически мгновенно устанавливается равномерное распределение температуры по толщине (рисунок 3.2). В поглощающем слое температурный профиль характеризуется определенным градиентом. Температура заднего контакта и подложки в процессе нагрева тонкопленочного

солнечного элемента CIGS солнечным излучением не изменялась и была равна 300 К.

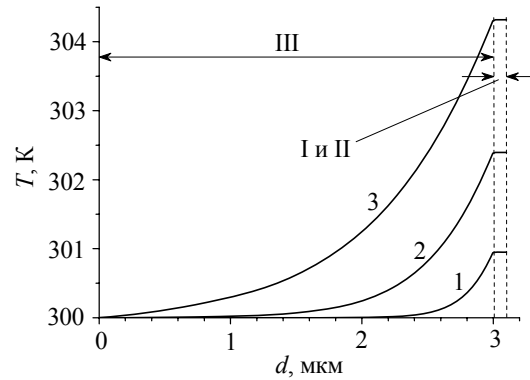


Рисунок 3.2 – Температурный профиль прозрачного проводящего (I), буферного (II) и поглощающего (III) слоя тонкопленочного солнечного элемента CIGS в моменты времени 1 (1), 5 (2) и 15 (3) мс после начала воздействия солнечного излучения

Проведенные расчеты (таблица 3.1) показывают, что напряжение холостого хода V_{OC} и ток короткого замыкания J_{SC} возрастают с увеличением толщины поглощающего слоя $CuIn_{1-x}Ga_xSe_2$ (рисунок 3.3). Максимальное расчетное значение КПД солнечных элементов CIGS с толщиной 3 мкм составило 22,65 % (таблица 3.1), что согласуется с [1], где экспериментально полученное значение КПД составляло 21,7 %. В [5] КПД солнечного элемента $CuIn_{1-x}Ga_xSe_2$ с концентрацией галлия $x = 0,3$ достигает 19,5 %.

Ток короткого замыкания J_{SC} определяется, во-первых, оптическими потерями, т. е. тем, что отдельные фотоны спектра солнечного излучения либо не поглощаются в солнечном элементе, либо поглощаются без генерации электронно-дырочных пар. Во-вторых, не все фотогенерированные электронно-дырочные пары вносят вклад в J_{SC} , т. к. некоторые из них успевают рекомбинировать до того, как они будут собраны. Один из путей минимизации рекомбинационных потерь заключается в увеличении ширины запрещенной зоны (до 1,3 эВ) и, следовательно, концентрации галлия (до $x = 0,529$) тонкопленочного солнечного элемента $CuIn_{1-x}Ga_xSe_2$ за счет смещения

Таблица 3.1 – Параметры тонкопленочного солнечного элемента $CuIn_{1-x}Ga_xSe_2$ с различными значениями концентрации галлия и толщины поглощающего слоя d при рабочей температуре 300 К

	Концентрация галлия x в поглощающем слое $CuIn_{1-x}Ga_xSe_2$								
	$x = 0,183$			$x = 0,357$			$x = 0,529$		
	$d = 1$ мкм	$d = 2$ мкм	$d = 3$ мкм	$d = 1$ мкм	$d = 2$ мкм	$d = 3$ мкм	$d = 1$ мкм	$d = 2$ мкм	$d = 3$ мкм
J_{SC} , mA/cm^2	31,08	33,06	33,75	30,94	33,10	33,84	30,92	33,17	33,93
V_{OC} , В	0,59	0,61	0,61	0,69	0,71	0,71	0,78	0,80	0,81
FF , %	78,54	79,59	79,77	79,84	81,08	81,27	80,67	82,12	82,31
КПД, %	14,39	15,96	16,49	16,98	18,95	19,59	19,55	21,91	22,65

валентной зоны. Внутризонное смещение приводит к увеличению напряжения холостого хода, что происходит только в случае рекомбинации на границе раздела. Оптимальная толщина поглощающего слоя CIGS составила 3 мкм. Как показали проведенные расчеты, увеличение толщины этого слоя более 3 мкм лишь незначительно повышает эффективность солнечного элемента, что согласуется с результатами, полученными в работе [6].

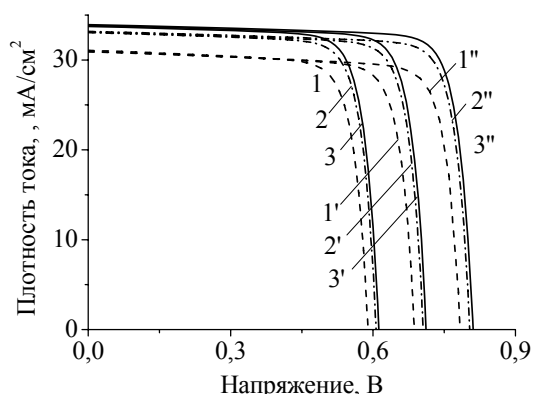


Рисунок 3.3 – Рассчитанная вольтамперная характеристика тонкопленочного $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ с толщиной поглощающего слоя 1 мкм (штриховые линии – 1, 1'), 2 мкм (штрихпунктирные линии – 2, 2') и 3 мкм (сплошные линии – 3, 3') и концентрацией галлия $x = 0,183$ (1, 2, 3), $0,357$ (1', 2', 3') и $0,529$ (1'', 2'', 3'') при рабочей температуре 300 К

Повышение температуры тонкопленочного солнечного элемента CIGS (согласно нашим расчетам от 300 до 330 К) приводит к понижению напряжения холостого хода V_{OC} (рисунок 3.4), ширина запрещенной зоны незначительно сужается и это может ускорить рекомбинацию электронно-дырочных пар между валентной зоной и зоной проводимости.

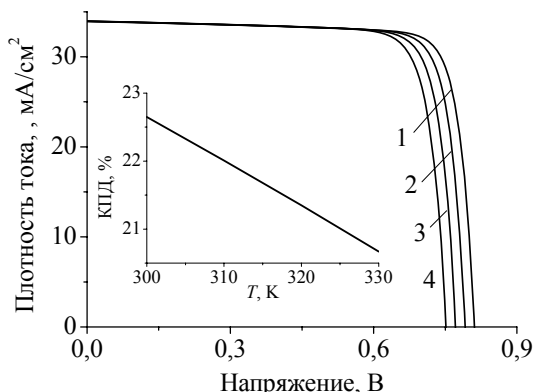


Рисунок 3.4 – Рассчитанная вольтамперная характеристика тонкопленочного $\text{CuIn}_{0,471}\text{Ga}_{0,529}\text{Se}_2$ с толщиной поглощающего слоя 3 мкм при рабочей температуре 300 (1), 310 (2), 320 (3) и 330 (4) К. На вставке приведена зависимость КПД $\text{CuIn}_{0,471}\text{Ga}_{0,529}\text{Se}_2$ от его рабочей температуры

Как видно из зависимостей на рисунке 3.4, при увеличении рабочей температуры тонкопленочного солнечного элемента $\text{CuIn}_{0,471}\text{Ga}_{0,529}\text{Se}_2$ на величину, равную 1 К, ток короткого замыкания J_{SC} повышается на $\sim 0,01$ mA/cm^2 , напряжение холостого хода V_{OC} понижается на $\sim 0,02$ В. При нагреве поглощающего слоя $\text{CuIn}_{0,471}\text{Ga}_{0,529}\text{Se}_2$ на 30 К его КПД снижается на $\sim 2\%$ (вставка на рисунке 3.4).

Заключение

В работе определены оптимальные значения толщины поглощающего слоя тонкопленочных солнечных элементов $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ с концентрацией галлия в диапазоне значений $0,183 \leq x \leq 0,529$ в условиях изменения его рабочих температур от 300 до 330 К. Показано, что при толщине поглощающего слоя, равной 3 мкм, концентрации галлия $x = 0,529$ и рабочей температуре 300 К КПД $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ может достигать $22,65\%$ с коэффициентом заполнения $FF = 82,31\%$, напряжением холостого хода $V_{OC} = 0,81$ В и током короткого замыкания $J_{SC} = 33,93$ mA/cm^2 . При повышении рабочей температуры поглощающего слоя $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ до 330 К его КПД снижается на $\sim 2\%$. Гибкость и тонкослойность открывают для солнечных батарей новые сферы применения. Тонкопленочные элементы могут быть встроены в различные электронные приборы, строительные конструкции и даже ткани.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Properties of Cu(In,Ga)Se₂ solar cells with new record efficiencies* / P. Jackson [et al.] // *Phys. Status Solidi RRL*. – 2015. – № 1. – P. 28–31.
2. *Lique, A. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering* / A Lique, S. Hegedus // John Wiley & Sons LTD, Chichester, West Sussex, England. 2003. – 1176 p.
3. *Preparation of boron-doped ZnO thin films by photo-atomic layer deposition* / Y. Yamamoto, Y. Saito, K. Takahashi, M. Konagai // *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. – 2001. – Vol. 65. P. 125–132.
4. *Burgelman, M. Modelling polycrystalline semiconductor solar cells* / M. Burgelman, P. Nollet, S. Degraeve // *Thin Solid Films*. – 2000. – Vol. 361. – P. 527–532.
5. *Diode characteristics in state-of-the-art ZnO/CdS/Cu(In_{1-x}Ga_x)Se₂ solar cells* / M.A. Contreras [et al.] // *Prog. Photovoltaics*. – 2005. – Vol. 13, Iss. 3. – P. 209–216.
6. *Chelvanathan, P. Performance analysis of copper-indium-gallium-diselenide (CIGS) solar cells with various buffer layers by SCAPS* / P. Chelvanathan, M.I. Hossain, N. Amin // *Current Applied Physics*. – 2010. – Vol. 10. – P. S387–S391.

Поступила в редакцию 28.12.15.