

Исследование фотоэлектрических преобразователей на основе различных полупроводниковых материалов

Ю.В. Натарова, А.С. Гнатенко, А.Б. Галат

Харьковский национальный университет радиоелектроники, пр. Науки, 14, 61166 Харьков, Украина

(Получено 09.05.2018; опубликовано online 25.08.2018)

В работе исследуются наиболее перспективные материалы для производства солнечных батарей. Основной целью работы является исследование поглощающей способности различных материалов используемых в производстве солнечных батарей и определение материалов для изготовления батарей с наибольшим КПД. Расчеты и методики, представленные в работе, позволяют сравнить эффективность поглощения спектра 0,3-1,4 мкм для многослойных тонкопленочных структур. В результате расчетов и моделирования получены зависимости поглощающей способности гетероструктур от толщины активного и буферного слоев. Для исследования в работе были выбраны наиболее перспективные солнечные элементы, которые используют гетеропереходы на основе кристаллического кремния (с-Si) и гидрогенизированного аморфного кремния (а-Si:H), теллурида кадмия (CdTe), диселенида индия (CuInSe₂-CIS), диселенида галлия (CuInSe₂-CIS), а также твердых растворов CuIn_{1-x}Ga_xSe₂-CIGS.

Ключевые слова: Энергия, Спектр поглощения, Фотопреобразователь, Полупроводник.

DOI: [10.21272/jnep.10\(4\).04023](https://doi.org/10.21272/jnep.10(4).04023)

PACS numbers: 84.60.Jt, 82.47.Jk

1. ВВЕДЕНИЕ

Солнечная энергетика приобретает все большую популярность в мировом сообществе как эффективная замена нефтяным, газовым и угольным энергоносителям. Однако на пути внедрения солнечных элементов в программы энергообеспечения разных уровней стоит несколько проблем. Наиболее значительными из них являются: высокая себестоимость солнечной энергии, низкая эффективность (КПД) фотопреобразователей, сложность и высокая стоимость утилизации отработавших элементов.

Снижение себестоимости солнечной энергии, как и повышение эффективности фотопреобразователей зависит, прежде всего, от их поглощательной способности и коэффициента конверсии солнечной энергии в электрическую. Оценки поглощательной способности солнечных элементов, изготовленных на основе различных материалов [1-3], требуют знания спектральных распределений коэффициентов поглощения используемых материалов в диапазоне основного потока солнечного излучения. Необходимо подчеркнуть, что для адекватного сравнения эффективности поглощения света материалами, следует учитывать их коэффициент поглощения в диапазоне 0,3...1,6 мкм, в котором находится более 99 % солнечной энергии, достигающей поверхности Земли. Соответственно и эффективность фотопреобразователя должна рассчитываться с учетом отношения значений поглощенной мощности к падающей на структуру в указанной области спектра. Очевидно, что такой широкий диапазон требует применения нескольких активных слоев (тандемных фотопреобразователей) для максимального эффекта поглощения [8].

Для производства солнечных элементов используют структуры на основе кристаллического (с-Si) и гидрогенизированного аморфного кремния (а-Si:H), теллурида кадмия (CdTe), диселенида индия (CuInSe₂-CIS), диселенида галлия (CuGaSe₂-CGS), а также твердых растворов CuIn_{1-x}Ga_xSe₂-CIGS и др.

Основной целью работы является рассмотрение

поглощающей способности различных материалов используемых в производстве солнечных батарей и определение материалов для их изготовления с максимальной поглощающей способностью и соответственно с наибольшим КПД.

В данной работе представлены результаты моделирования и расчетов поглощательной способности наиболее перспективных материалов солнечных фотопреобразователей. Расчеты выполнены на основе усовершенствованной методики с использованием нелинейных уравнений [1-7] и позволяют сравнивать эффективность поглощения спектра 0,3...1,4 мкм для многослойных тонкопленочных структур.

2. ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТОВ ПОГЛОЩАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Проблемы поиска наиболее эффективных материалов для изготовления солнечных элементов (СЭ) является предметом многих научных исследований. В настоящее время в производстве солнечных элементов используют гетеропереходы на основе кристаллического кремния (с-Si) и гидрогенизированного аморфного кремния (а-Si: H), теллурида кадмия (CdTe), диселенида индия (CuInSe₂-CIS), диселенида галлия (CuGaSe₂-CGS), а также твердых растворов CuIn_{1-x}Ga_xSe₂-CIGS и др [9]. Все эти и другие материалы широко исследуются во всем мире.

Эффективность преобразования энергии излучения – наиболее важный параметр, характеризующий солнечный элемент, а, следовательно, работу батареи. Эффективность фотопреобразователей в основном зависит от поглощающей способности материала в диапазоне 0,3-1,6 мкм, что соответствует максимуму солнечного излучения. Таким образом, исследования поглощающей способности материалов CGS, CIS и CIGS, а также тандемных структур на их основе являются актуальными на сегодняшний день.

Поглощающая способность многослойной структуры зависит от ряда факторов. К ним можно отне-

сти текстуру поверхностей раздела (коэффициенты отражения с учетом поляризации и угла падения света), свойства слоев материалов (коэффициенты поглощения и преломления), толщины слоев.

Для моделирования и расчетов полупроводниковой структуры фотопреобразователя используем граничные условия: поверхность фотопреобразователя идеально плоская, отражение $R = 0$, излучение падает по нормали к поверхности.

При моделировании в работе используется упрощенная структура фотопреобразователя, включающая функциональные материалы, рис. 1.

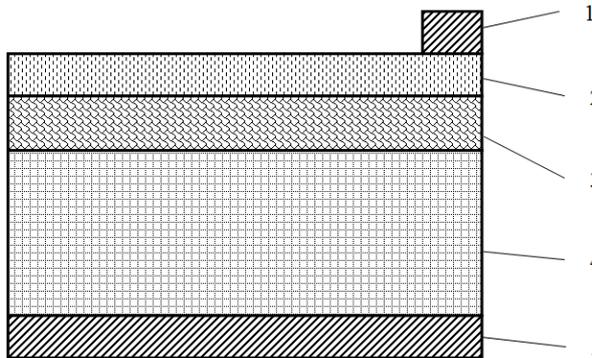


Рис. 1 – Структура исследуемого фотопреобразователя: 1 – фронтальный контакт, 2 – слой ZnO; Zn_{1-x}Mg_xO, 3 – буферный слой (CdS, In_xS₃, ZnS, ZnSe и др.), 4 – основной поглощающий слой, 5 – тыльный контакт (Mo 0,5-3 мкм)

Структура фотопреобразователя [1-2], используемая в расчетах может содержать несколько $p-n$ структур, состоящих из тонкого буферного слоя широкозонного полупроводника и сравнительно толстого основного поглощающего слоя. Каждая $p-n$ структура рассчитана на свой диапазон поглощения, причем эффективность конверсии света в электроэнергию максимальна, вблизи красной границы фотоэффекта. Более глубокие слои рассчитаны на большую длину волны (имеют меньшую ширину запрещенной зоны). Для расчета поглощающей способности структуры (рис. 1) учитывается только поглощение солнечной энергии слоями 3 и 4.

Для расчета поглощения, рассматривается поглощение солнечного излучения, которое пересекает фронтальную плоскую поверхность фотоэлектрического активного слоя. В этом случае при нормальном падении лучей на поглощающий слой, исходя из закона Бугера-Ламберта, выражение для поглощающей способности может быть представлено в виде:

$$A_{\phi}(d) = \frac{\sum_i \frac{\Phi_i + \Phi_{i-1}}{2} \left[1 - \exp\left(-\frac{\alpha_i + \alpha_{i-1}}{2} d\right) \right] \Delta\lambda_i}{\sum_i \frac{\Phi_i + \Phi_{i-1}}{2} \Delta\lambda}, \quad (1)$$

где Φ_i – спектральная плотность мощности излучения на длине волны при стандартных условиях AM1.5, λ_i – интервал между соседними длинами волн в таблице ISO 9845-1: 1992 [10], α_i – коэффициент поглощения на длине волны.

Выражение (1) используется как основное для

дальнейших расчетов и моделирования.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Расчеты выполнялись с использованием разработанной программы в MathCad. Размеры стандартной конфигурации солнечного элемента брались из источника [9]. При этом толщина основного поглощающего слоя составляет 1,5-4 мкм, чаще всего – 2,5-3,5 мкм. Толщина буферного слоя выбиралась в пределах от 10 до 100 нм. За 100 % принимали мощность излучения AM 1.5 в диапазоне 300-1400 нм.

Кривые поглощения c-Si и a-Si показаны на рис. 2

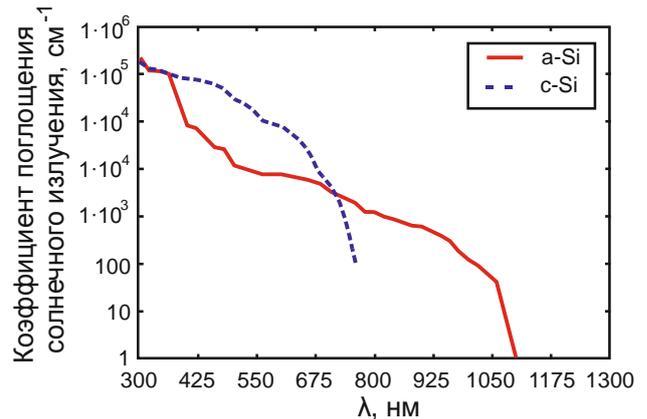


Рис. 2 – Зависимости коэффициентов поглощения от длины волны: A_1 – коэффициент поглощения солнечного излучения c-Si в i -м спектральном диапазоне; A_2 – коэффициент поглощения солнечного излучения a-Si в i -м спектральном диапазоне

Для расчета поглощения слоев 3 и 4, рис. 1, где слой 3 будет a-Si:H, а слой 4 – c-Si, использовали выражение (1). Коэффициент поглощения для слоя 4 был рассчитан по формуле [1-2]:

$$A_1 = \left[\frac{\sum_{k=0}^{n1} FY_k \cdot \lambda_k (1 - e^{-A1_k \cdot d1})}{\sum_{k=0}^{n1} (FY_k \cdot \lambda_k)} \right], \quad (2)$$

где FY – плотность мощности солнечного излучения i -го спектрального диапазона, $n1$ – количество учтенных при расчете спектральных диапазонов для c-Si слоя, $A1$ – коэффициент поглощения солнечного излучения c-Si в i -м спектральном диапазоне, $d1$ – толщина слоя c-Si.

Используя (2) рассчитан коэффициент поглощения для слоя 3.

Для расчетов с изменением толщины слоя, найдена общая поглощательная способность слоев 3 и 4, рис. 1, по формуле:

$$A_3 = \left[\frac{\sum_{k=0}^{n1} FY_k \cdot \lambda_k (1 - (e^{-A1_k \cdot dd1} \cdot e^{-A2_k \cdot dd2}))}{\sum_{k=0}^{n1} (FY_k \cdot \lambda_k)} \right], \quad (3)$$

где $dd1$ – толщина слоя c-Si, $dd2$ – толщина слоя a-Si:H.

На рис. 3 представлены зависимости поглощательной способности структуры (p) -a-Si:H/(n)-c-Si [11], GaAs/GaAs, CdS/CdTe, CIS/CGS, CuInSe₂/CdS при изменении толщины основного слоя от 1 нм до 100 мкм.

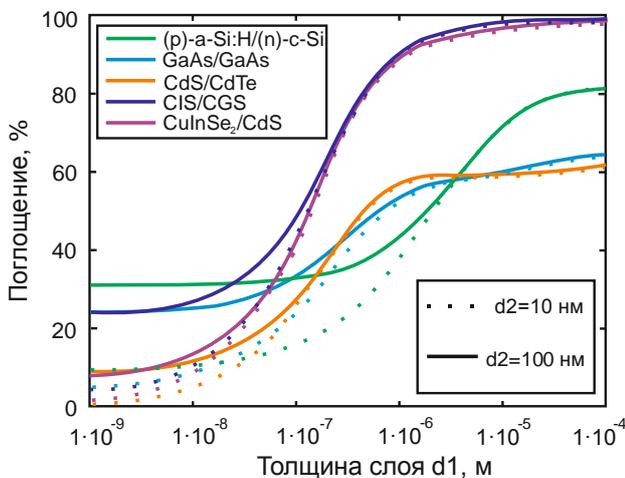


Рис. 3 – Изменение поглощательной способности гетероструктур: (p) -a-Si:H/(n)-c-Si, GaAs/GaAs, CdS/CdTe, CIS/CGS, CuInSe₂/CdS в зависимости от толщины основного слоя d_1 при значении толщины буферного слоя $d_2 = 10$ нм и 100 нм

Из рис. 3 можно сделать вывод, что для структуры (p) -a-Si:H/(n)-c-Si толщина буферного слоя влияет на поглощение до значения толщины основного слоя 40-50 мкм. Для стандартных значений толщины активного слоя около 10 мкм поглощается 60 % излучения. При увеличении толщины основного слоя до 100 мкм получим 81,7 %, 1 мм – 84,8%, 1 см – 85.32% – максимум поглощения.

Для структуры GaAs/GaAs при изменении толщины основного слоя от 1 нм до 100 мкм. Видно, что толщина буферного слоя влияет на поглощение до значения толщины основного слоя 10-20 мкм. Для стандартных значений толщины активного слоя около 3 мкм поглощается 58 % излучения. При увеличении толщины до 10 мкм поглощение увеличивается до 60 %, до 100 мкм – 65 %, до 4 мм – 68.4 % – это максимум поглощения световой энергии.

Для структуры CdS/CdTe [12, 13] при изменении толщины основного слоя от 1 нм до 100 мкм. Видно, что толщина буферного слоя влияет на поглощение до значения толщины основного слоя 200 – 230 нм. Для стандартных значений толщины активного слоя около 1 мкм поглощается 56.3 % излучения световой энергии. При увеличении толщины до 2 мкм поглощающая способность растет до 58 %, 3 мкм – 58.2 % – что является максимум для такой структуры.

Для структуры CIS/CGS при изменении толщины основного слоя от 1 нм до 100 мкм. Видно, что толщина буферного слоя влияет на поглощение до значения толщины основного слоя 400-500 нм. Для стандартных значений толщины активного слоя около 1 мкм поглощается 91 % излучения. При увеличении толщины до 2 мкм получим 95 %, 10 мкм – 98.6 %, 100 мкм – 99.9 % – максимум поглощения.

Для структуры CuInSe₂/CdS при изменении толщины основного слоя от 1 нм до 100 мкм. Видно, что

толщина буферного слоя влияет на поглощение до значения толщины основного слоя 100-200 нм. Для стандартных значений толщины активного слоя около 1 мкм поглощается 91 % излучения. При увеличении толщины до 2 мкм получим 95 %, 10 мкм – 98.6 %, 50 мкм – 99.8 % – максимум поглощения.

На рис. 4 приведены расчеты поглощательной способности структуры (p) -a-Si:H/(n)-c-Si при изменении толщины буферного слоя и нескольких значений толщины основного слоя. Показано, что при толщине основного слоя более 40 мкм толщина буферного слоя не влияет на поглощение в указанном диапазоне размеров. Нижняя кривая на рис. 4 показывает фактическое поглощение только буферного слоя, так как при такой толщине активного слоя его поглощения менее 1 %. В результате расчетов можно отметить тот факт, что при толщине буферного слоя более 1 мм поглощающая способность достигает максимума поглощения (около 52 %) и более не растет.

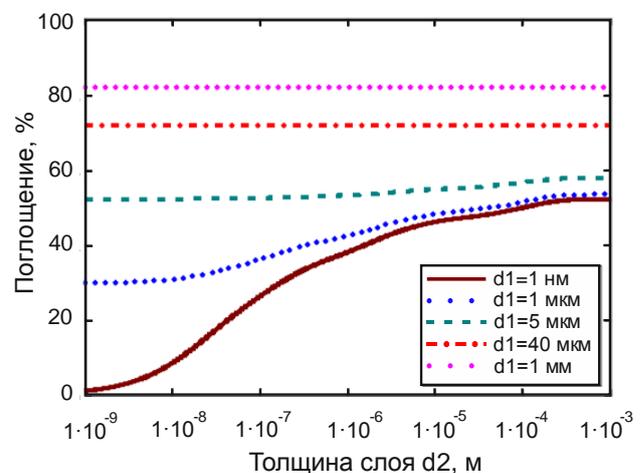


Рис. 4 – Изменение поглощательной способности гетероструктуры в зависимости от толщины слоя d_2 (кривые соответствуют значениям толщины слоя $d_1 = 1$ нм, 1 мкм, 5 мкм, 40 мкм, 1 мм (снизу вверх))

Расчеты поглощательной способности многослойных структур также выполнены для структур GaAs/GaAs, CdS/CdTe, CIS/CGS, CdS/CIS. Результаты расчетов позволяют более адекватно оценить поглощение излучения в спектральном диапазоне 0,3...1,4 мкм, а также обоснованно сравнить поглощательную способность различных материалов, используемых для солнечных преобразователей.

На рис. 5 приведены расчеты поглощательной способности структуры GaAs/GaAs при изменении толщины буферного слоя и нескольких значений толщины основного слоя. Показано, что при толщине основного слоя более 4 мкм толщина буферного слоя не влияет на поглощение в указанном диапазоне размеров. Нижняя кривая на рис. 5 показывает фактически поглощение только буферного слоя, так как при такой толщине активного слоя его поглощающая способность менее 1 %. При толщине буферного слоя более 1 мкм поглощающая способность достигает максимума поглощения (около 50,2 %) и более не растет.

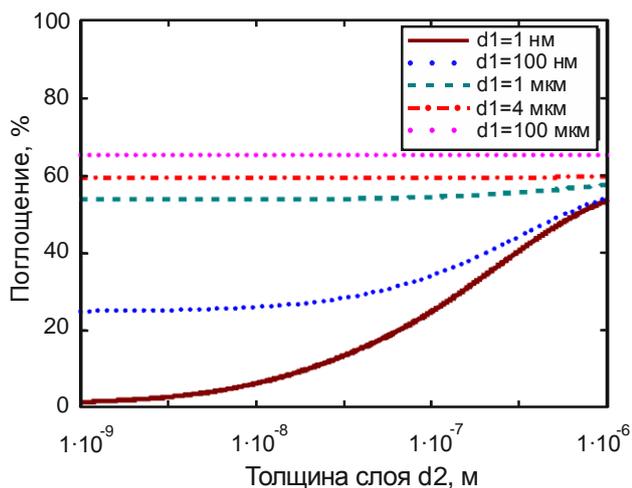


Рис. 5 – Изменение поглощательной способности гетероструктуры GaAs/GaAs в зависимости от толщины слоя d_2 (кривые соответствуют значениям толщины слоя $d_1 = 1$ нм, 100 нм, 1 мкм, 4 мкм, 100 мкм (снизу вверх))

На рис. 7 приведены расчеты поглощающей способности структуры при изменении толщины буферного слоя и нескольких значений толщины основного слоя. Показано, что при толщине основного слоя более 300 нм толщина буферного слоя не влияет на поглощение в указанном диапазоне размеров. Нижняя кривая на рис. 7 показывает фактически поглощения только буферного слоя, так как при такой толщине активного слоя его поглощение света менее 2 %. В результате расчетов можно отметить, что при толщине буферного слоя более 1 мкм поглощающая способность достигает максимума (около 19 %) и более не растет.

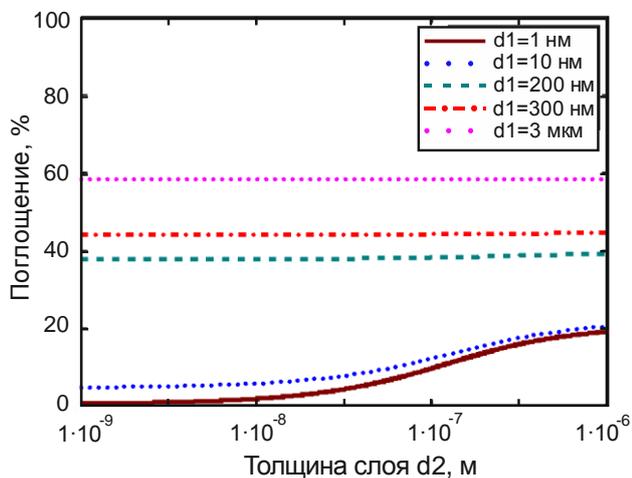


Рис. 7 – Изменение поглощательной способности гетероструктуры CdS/CdTe в зависимости от толщины слоя d_2 (кривые соответствуют значениям толщины слоя $d_1 = 1$ нм, 10 нм, 200 нм, 300 нм, 3 мкм (снизу вверх))

На рис. 8 приведены расчеты поглощающей способности структуры при изменении толщины буферного слоя и нескольких значений толщины основного слоя. Показано, что при толщине основного слоя более 400 нм толщина буферного слоя не влияет на поглощение в указанном диапазоне размеров. Нижняя кривая на рис. 8 показывает фактически погло-

щения только буферного слоя, так как при такой толщине активного слоя его поглощения менее 1 %. При толщине буферного слоя более 100 мкм поглощающая способность достигает максимума (около 40 %) и более не растет.

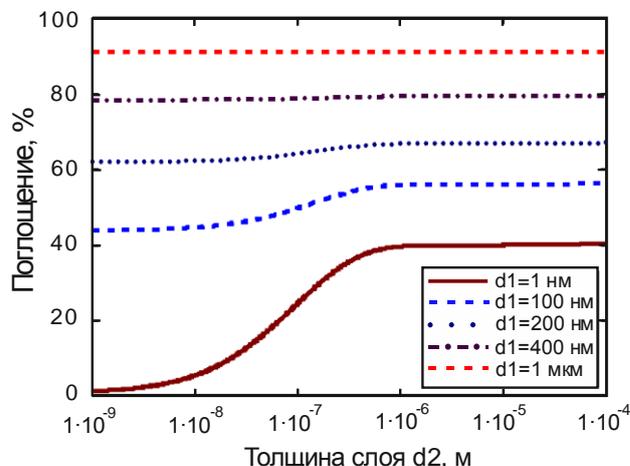


Рис. 8 – Изменение поглощательной способности гетероструктуры CIS/CGS в зависимости от толщины слоя d_2 (кривые соответствуют значениям толщины слоя $d_1 = 1$ нм, 100 нм, 200 нм, 400 нм, 1 мкм (снизу вверх))

На рис. 9 приведены расчеты поглощающей способности структуры CuInSe₂/CdS при изменении толщины буферного слоя и нескольких значений толщины основного слоя. Показано, что при толщине основного слоя более 1 мкм толщина буферного слоя не влияет на поглощение в указанном диапазоне размеров. Нижняя кривая на рис. 9 показывает фактически поглощения только буферного слоя, так как при такой толщине активного слоя его поглощения менее 1 %. При толщине буферного слоя более 1 мкм поглощающая способность достигает максимума (около 19 %) и более не растет.

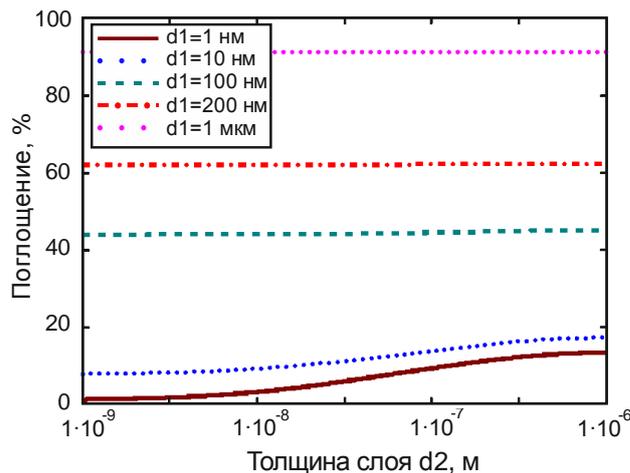


Рис. 9 – Изменение поглощательной способности гетероструктуры CuInSe₂/CdS в зависимости от толщины слоя d_2 (кривые соответствуют значениям толщины слоя $d_1 = 1$ нм, 10 нм, 100 нм, 200 нм, 1 мкм (снизу вверх))

Основные результаты расчетов сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Результаты расчетов эффективности поглощения солнечного излучения полупроводниковыми структурами: (p)-a-Si:H/(n)-c-Si, GaAs/GaAs, CdS/CdTe, CIS/CGS, CuInSe₂/CdS

Структура	Толщина основного слоя (активного слоя)	Толщина буферного слоя	Эффективность поглощения, %
(p)-a-Si:H/(n)-c-Si	1 нм	1 нм	52
	1 мм	1 мм	82
	100 мкм	10-100 нм	81,7
	1 мм	10-100 нм	84,8
	1 см	10-100 нм	85,3
GaAs/GaAs	1 нм	1 мкм	50,2
	100 мкм	1 мкм	64,9
	10 мкм	10-100 нм	60
	100 мкм	10-100 нм	65
	4 мм	10-100 нм	58,4
CdS/CdTe	1 мм	1 мкм	19
	3 мкм	1 мкм	59
	1 мкм	10-100 нм	56,3
	2 мкм	10-100 нм	58
	3 мкм	10-100 нм	58,2
CIS/CGS	1 нм	100 мкм	40
	1 мкм	100 мкм	91
	2 мкм	10-100 нм	95
	10 мкм	10-100 нм	98,6
	100 мкм	10-100 нм	99,9
CuInSe ₂ /CdS	1 нм	1 мкм	19
	1 мкм	1 мкм	93
	2 мкм	10-100 нм	95
	40 мкм	10-100 нм	98,6
	50 мкм	10-100 нм	99,8

Среди рассмотренных в работе полупроводниковых структур гетероструктуры CIS/CGS и CuInSe₂/CdS имеют максимальный КПД равный 99,9 % и 99,8 % соответственно. Результаты расчетов и моделирования данной работы показывают, что для максимальной эффективности поглощения солнечного излучения необходимо не менее 10 мкм толщины активного слоя полупроводника CIS/CGS и не менее 10 нм толщины буферного слоя фотопреобразователя. Или не менее 50 мкм толщины активного слоя полупроводника (CuInSe₂/CdS) и не менее 10 нм толщины буферного слоя фотопреобразователя.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для исследования в работе были выбраны наиболее перспективные солнечные элементы, которые используют гетеропереходы на основе кристаллического кремния (c-Si) и гидрогенизированного аморфного кремния (a-Si: H), теллурида кадмия (CdTe), диселенида индия (CuInSe₂-CIS), диселенида галлия (CuInSe₂-CIS), а также твердых растворов CuIn_{1-x}Ga_xSe₂-CIGS.

В результате расчетов и моделирования получены зависимости поглощающей способности гетероструктуры от толщины активного и буферного слоев.

Полученные результаты подтверждают адекватность выбранной модели и позволяют оценить эффективность рассмотренных типов фотопреобразователей. Таким образом, математическая модель представленная в работе может быть использована для предварительных расчетов фотопреобразователей на основе гетеропереходов из различных материалов.

Investigation of Photoelectric Converters Based on Different Semiconductor Materials

Yu.V. Natarova, A.B. Galat, A.S. Gnatenko

Kharkiv National University of Radio Electronics, 14, Nauka Ave., 61166 Kharkiv, Ukraine

The paper studies the most promising materials for the production of solar batteries. The purpose of the work is to study the absorbing power of various materials used in the production of solar cells and to determine the materials for manufacturing batteries with the highest efficiency. Calculations and techniques presented in this paper make it possible to compare the absorption efficiency of the spectrum of 0.3-1.4 μm for multilayer thin-film structures. As a result of calculations and modeling, the dependence of the absorbing capacity of the heterostructure on the thickness of the active and buffer layers was obtained. For research work we selected the most promising solar cells that use heterojunctions based on crystalline silicon (c-Si) and hydrogenated amorphous silicon (a-Si: H), cadmium telluride (CdTe), diselenide indium (CuInSe₂-CIS), diselenide gallium (CuInSe₂-CIS), and also solid solutions of CuIn_{1-x}Ga_xSe₂-CIGS.

Keywords: Energy, Absorption spectrum, Photoconverter, Semiconductor.

Дослідження фотоелектричних перетворювачів на основі різних напівпровідникових матеріалів

Ю.В. Натарова, О.Б. Галат, О.С. Гнатенко

Харківський національний університет радіоелектроніки, пр. Науки, 14, 61166 Харків, Україна

У роботі досліджуються найбільш перспективні матеріали для виробництва сонячних батарей. Основною метою роботи є дослідження поглинання різних матеріалів, які використовують у виробництві сонячних батарей і визначення матеріалів для виготовлення батарей з найбільшим ККД. Розрахунки та методики представлені в роботі дозволяють порівняти ефективність поглинання спектра 0,3-1,4 мкм для багатошарових тонкоплівкових структур. В результаті розрахунків і моделювання отримано залежності поглинання гетероструктури від товщини активного та буферного шарів. Для дослідження в роботі були обрані найбільш перспективні сонячні елементи, які використовують гетеропереходи на основі кристалічного кремнію (с-Si) і водородизированного аморфного кремнію (а-Si: H), телуриду кадмію (CdTe), діселеніда індію (CuInSe₂-CIS), діселеніда галію (CuInSe₂-CIS), а також твердих розчинів CuIn_{1-x}Ga_xSe₂-CIGS.

Ключові слова: Енергія, Спектр поглинання, Фотоперетворювач, Напівпровідник.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. A.B. Galat, *8th International Scientific Conference Functional Base of Nanoelectronics*, 139 (Kharkiv: NURE: 2013).
2. A.B. Galat, *Telecomm. Radio Eng.* **74** No 13, 1215 (2015).
3. L.A. Kosyachenko, E.V. Grusko, T.I. Mikityuk, *Semiconductors* **46** No 4, 482 (2012).
4. I.V. Guriev, I.A. Sukhoivanov, A.S. Gnatenko, V.I. Lipkina, *Telecomm. Radio Eng.* **67** No 9, 833 (2008).
5. A.S. Gnatenko, Yu.P. Machehkhin, *Telecomm. Radio Eng.* **74** No 7, 641 (2015).
6. A.S. Gnatenko, Yu.P. Machehkhin, Yu.S. Kurskoy, V.P. Obozna, *J. Nano- Electron. Phys.* **10** No 2, 02033 (2018).
7. A.S. Gnatenko, Yu.P. Machehkhin, Yu.S. Kurskoy, V.P. Obozna, A.V. Vasianovych, *Telecomm. Radio Eng.* **77** No 6, 541 (2018).
8. G.F. Novikov, M.V. Gapanovich, *Phys. Usp.* **60**, 161 (2017).
9. В.Ф. Гременок, М.С. Тиванов, В.Б. Залесский, *Альтернативная энергетика и экология* **69** No 1, 59 (2009) (V.F. Gremenok, M.S. Tivanov, V.B. Zaleskiy, *Alternativnaya energetika i ekologiya* **69** No 1, 59 (2009)) [In Russian].
10. Standard of International Organization for Standardization: *ISO 9845-1: 1992*.
11. S.G. Dorofeev, N.N. Kononov, V.M. Zverolovlev, K.V. Zinoviev, V.N. Sukhanov, N.M. Sukhanov, B.G. Gribov, *Semiconductors* **48** No 3, 360 (2014).
12. A. Morales-Acevedo, *Sol. Energy* **80** No 6, 675 (2006).
13. G.S. Khrypunov, *Functional Mater.* **12** No 3, 517 (2005).