ВЛИЯНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ОБРАТНЫМ СМЕЩЕНИЕМ НА ПАРАМЕТРЫ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ CIGS

А.Г. Камилов*

Физико-технический институт АН РУз, ул. Чингиза Айтматова 2Б, 100084 Ташкент, Узбекистан

Получена 25.08.2020

* Corresponding author: asliddin@rambler.ru

Приведены результаты лабораторных экспериментов по изучению влияния воздействия обратного смещения длительностью 60, 600 и 2000 с. на параметры солнечных элементов (СЭ) на основе поглощающего слоя, состоящего из Cu, In, Ga и Se (CIGS) с различными толщинами буферного слоя CdS. Показано, что для обеспечения стабильной работы СЭ CIGS в естественных условиях эксплуатации толщина их буферного слоя должна быть рассчитана с учетом влияния обратного смещения. Результаты измерений вольтамперных характеристик СЭ CIGS показали, что СЭ с меньшей толщиной буферного слоя CdS более устойчив к воздействию обратного смещения. По результатам измерений вольт-фарадных характеристик выяснено, что при воздействии обратным смещением в темноте емкость структуры увеличивается, что соответствует классической модели влияния обратного смещения, и одинакова для элементов с различной толщиной буферного слоя. После воздействия обратным смещением при освещении емкость структуры и концентрация носителей заряда уменьшается, при этом в меньшей степени в элементах с тонким буферным слоем, что также свидетельствует об их устойчивости к обратному смещению.

Ключевые слова: солнечные элементы, буферный слой, CIGS, обратное смещение, концентрация носителей, КПД, ВАХ, ВФХ.

The results of laboratory experiments to study the effect of reverse bias with a duration of 60, 600 and 2000 s. on the parameters of solar cells (SC) based on an absorbing layer consisting of Cu, In, Ga and Se (CIGS) with different thicknesses of the CdS buffer layer are shown. Experiments have shown that for the stable operation of CIGS SCs under natural operating conditions, the thickness of their buffer layer should be calculated taking into account the effect of reverse bias. The results of measuring the current-voltage characteristics of CIGS SCs with different thicknesses of the CdS layer before and after the exposure to the reverse bias showed that SCs with a smaller buffer layer thickness are more resistant to the effect of reverse bias. Based on the results of measuring the capacitance-voltage characteristics, it was found that when exposed to reverse bias in the dark, the capacitance of the structure increases, which corresponds to the classical model of the effect of reverse bias, and is the same for elements with different thicknesses of the buffer layer. After exposure to reverse bias under illumination, the capacitance of the structure and the concentration of charge carriers decrease, and to a lesser extent in elements with a thin buffer layer, which also indicates their resistance to reverse bias.

Keywords: solar cells, buffer layer, CIGS, reverse bias, carrier concentration, efficiency, I-V, C-V.

I. Introduction

Солнечные элементы $Cu(In,Ga)Se_2$ (или CIGS) привлекли большое внимание благодаря их высокой эффективности и способности адаптироваться к низкотемпературным процессам производства с большой площадью [1-3]. Однако существует несколько задач [4], которые должны быть решены прежде, чем технология CIGS сможет стать жизнеспособным конкурентом традиционной фотоэлектрической технологии на основе c-Si в промышленном масштабе. В частности, они включают проблемы, определяющие производительность панели и долгосрочную надежность в полевых условиях [5]. Одной из таких ключевых проблем надежности является частичное затенение панелей. Исследования показали, что частичное затенение преимущественно вызывает обратное напряжение на затененных элементах [6], что может вызвать долговременное ухудшение рабочих характеристик панели. Когда тень падает на некоторые элементы в цепочке фотоэлектрических модулей, находящихся под напряжением, освещенные элементы продолжают вырабатывать ток. Элементы в тени пропускают этот ток за счет обратного смещения [7, 8]. При этом затенённый элемент действует как нагрузка, потребляет энергию и значительно снижает ток нагрузки [9]. Микроскопические дефекты в слое устройства модуля действуют как слабые шунты, которые подвергаются тепловому пробою при обратном смещении, что приводит к постоянным макроскопическим шунтам [10, 11]. Эти шунты приводят к общей потере сопротивления шунта, снижая эффективность модуля.

Учитывая его важность, это явление широко изучалось в элементах c-Si [12], но для тонкопленочных СЭ проблема остается менее понятной.

Локальные дефекты от обратного смещения в модулях CIGS часто оптически видимы и имеют вид «червячного следа» [13, 14]. Эти дефекты возникают в локальных слабых местах [15, 16] и относительно легко распространяются, если не принять меры. Дефекты могут возникать даже за счет тени людей или инструментов при осмотре или очистке панелей [17, 18] и могут в стандартных условиях испытаний (STC) вызывать уменьшение максимальной мощности на 10% и более 30% соответственно в случае тени от человека и инструментов для чистки [19].

При наблюдении с помощью тепловизора [7, 20] дефект имеет вид движущейся горячей точки, которая оставляет след, состоящий из отдельных островков пористого материала, которые возникают на границе раздела CdS/ZnO в результате неоднородностей в пленке CIGS [7]. Другие авторы наблюдали такую пористость на границе CIGS/CdS с прозрачным проводящим оксидом и у обратного контакта CIGS/Mo [7, 11]. Однако до сих пор нет реального понимания механизма образования и распространения этих дефектов [21].

Для модулей на основе кремниевых пластин для оптимальной защиты от повреждения обратного смещения используются байпасные диоды. В тонкопленочных панелях используется схема монолитного соединения, образующая длинные узкие элементы, где величина обратного смещения зависит от формы тени, геометрической структуры модуля и интенсивности тени [22]. Фотоэлектрические модули CIGS, как правило, гораздо более устойчивы к затенению в отношении потерь мощности, чем модули c-Si [23]. Однако недостатком монолитно соединенного фотоэлектрического модуля является то, что почти невозможно интегрировать байпасные диоды для защиты отдельных ячеек от воздействия обратного смещения [13], и возникает необходимость поиска других средств защиты от обратного смещения и уменьшения его последствий.

Кроме образования дефектов, мало изучены механизмы влияния обратного смещения на параметры СЭ CIGS. Известно, что обратное смещение приводит к уменьшению коэффициента заполнения и метастабильному увеличению емкости перехода и значительным изменениям профилей пространственного заряда [24, 25] и таким образом является одним из механизмов возникновения метастабильных состояний в гетеропереходах $ZnO/CdS/Cu(In,Ga)Se_2$ [24, 26].

Основой расчета оптимальной толщины буферного слоя является модель, представленная Kay Orgassa [27], основанная на балансе между снижением коэффициента отражения и увеличением поглощения света в синей части спектра с увеличением толщины буферного слоя. Такое объяснение влияния буферного слоя понятно, вследствие чего дальнейшие исследования проводились для сравнения СЭ CIGS с буферным слоем

© Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2020 г.

CdS и альтернативными [28] буферными слоями ZnO, ZnS(O,OH), ZnSe, InS и ZnMgO [29], изучения влияния толщины буферного и поглощающего слоев на квантовую эффективность СЭ CIGS [30], изучения влияния толщины буферного слоя на квантовую эффективность и электрические параметры СЭ CIGS для CdS, ZTO, ZnS and InS [31] с помощью моделирования СЭ с использованием SCAPS-1D. Экспериментальные исследования проводили для сравнения СЭ CIGS с буферным слоем CdS и ZnS [32] и определения оптимальной толщины CdS [33, 34]. Во всех случаях влияние толщины буферного слоя на характеристики СЭ CIGS изучено в основном с точки зрения оптического влияния.

В данной статье мы представляем результаты экспериментов по изучению влияния обратного смещения на СЭ CIGS с различными толщинами буферного слоя CdS. Исследуется влияние обратного смешения на выходные параметры и на плотность и распределение носителей заряда с помощью измерения и анализа вольтамперных и вольтфарадных характеристик солнечных элементов. Целью является изучение механизмов влияния обратного смещения на СЭ CIGS и их зависимости от толщины буферного слоя.

II. Методы и материалы

Основная часть экспериментов проведена в лаборатории халькогенидных солнечных элементов Ольденбургского университета Германии. Структура экспериментальных солнечных элементов представлена на рис. 1а. Она состоит из пяти компонентов: стекла, слоя молибдена, слоя CIGS, слоя CdS и слоя оксида цинка, легированного алюминием. Солнечные элементы изготовлены по стандартной технологии испарением поглощающего слоя и химическим осаждением из ванны (CBD) с раз личной толщиной буферного слоя CdS порядка 60 и 30 нм, которые обозначены соответственно как нормальная (N-norm) и тонкая

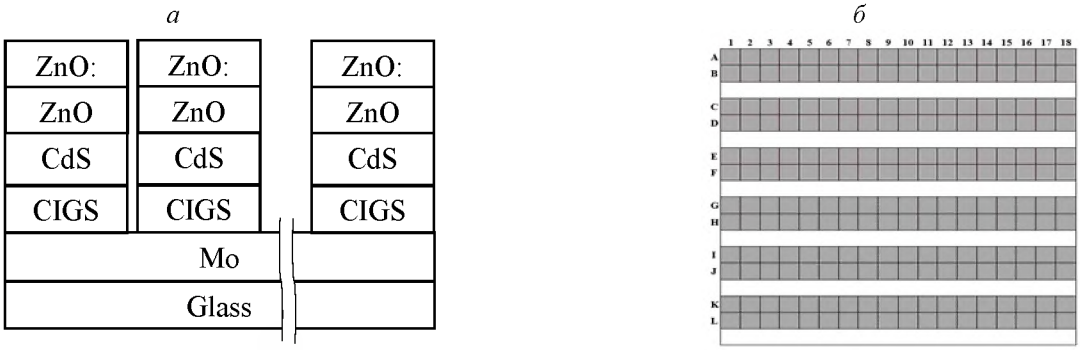


Рисунок 1. Структура (*а*) и схема разделенного солнечного элемента (*б*).

(T-thin). Для обеспечения достоверности и сопоставимости данных единый солнечный элемент размером 10×10 см был разделен на 216 ячеек размерами 5×5 мм и пронумерован (рис. 1б).

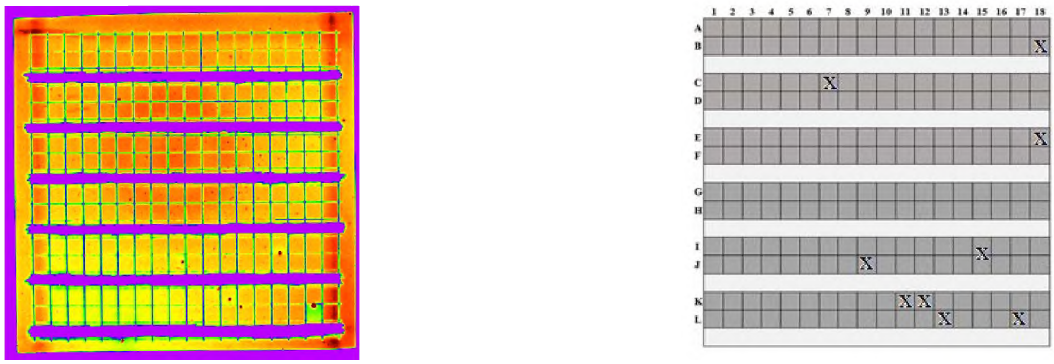


Рисунок 2. Тепловой снимок СЭ (слева) и схема определенных дефектов (справа).

© Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2020 г.

Чтобы определить повреждения, возникшие при лазерной резке, было исследовано тепловое изображение СЭ (рис. 2а), исходя из которого дефектные ячейки были исключены из дальнейших испытаний (рис. 2б). В табл. 1 представлены перечень и характеристики основного оборудования, использованного при экспериментах

Таблица 1. Перечень и характеристики основного оборудования, использованного при экспериментах.

№	Наименование	Назначение	Диапазон	Точность
1	Solartron 1260	Анализатор частотного отклика для измерения амплитудно-фазовых характеристик	от 10 мкГц до 32 МГц.	0.1% 0.1°
2	SS100AAA	Солнечный симулятор с регулируемой температурой подставки	250 nm÷>2,200 nm	Класс AAA
3	Keithley 2400	Источник-измеритель: измерения тока/сопротивления/напряжения, источник тока/напряжения	±200 мВ до ±200 В ±1мкА до ±1А 0.2 Ом до 200 Мом	0.012%

Номенклатура экспериментов. Одна ячейка 0.5×0.5 мм использовалась только для одного эксперимента. Эксперименты проводили при воздействии обратного смещения длительностью 60, 600 и 2000 секунд при температуре ячейки 25°C и при освещении 1.5 AM. Все эксперименты с соответствующими измерениями проводились в темноте и освещенных условиях.

Организация и иллюстрация результатов. Результатами экспериментов являются наборы данных содержания вольтамперных характеристик (ВАХ) и вольт-фарадных характеристик (ВФХ), характеризующие каждый отдельный солнечный элемент. Мы использовали общие методы обработки данных ВАХ и ВФХ с поправками (по востребованности), представленными в книге [35].

Учитывая множественность данных, были введены следующие сокращения:

L-light – измерение или воздействие проводится при освещении;

D-dark – измерение или воздействие в темноте;

T-thin – СЭ с тонким слоем CdS;

N-norm – СЭ с нормальным слоем CdS;

C –непрерывный режим напряжения: напряжение подается непрерывно;

I – прерывистый режим напряжения: напряжение подается периодически;

pre – предварительные данные, полученные до проведения какой-либо обработки (первоначальное измерение);

aft – данные, полученные после некоторой обработки (измерение после процедуры);

s – секунды, продолжительность воздействия.

III. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Как видно из табл. 2, после обработки обратным смещением в СЭ с нормальной толщиной CdS наблюдается значительное увеличение последовательного сопротивления (Rs, ом), тогда как в СЭ с тонким слоем CdS увеличение Rs более слабое. Вследствие этого фактор заполнения (FF) в СЭ с нормальной толщиной CdS при воздействии обратного смещения значительно уменьшается, а в СЭ с тонким слоем CdS практически остается неизменным (рис. 3).

Эта разница становится более заметной с увеличением времени воздействия. Аналогично, в СЭ с нормальной толщиной CdS мы отмечаем увеличение коэффициента идеальности (n) и тока насыщения (I_0, ампер), что приводит к уменьшению напряжения холостого хода (V_{oc}, вольт) (рис. 3). В то же время воздействие обратного смещения на сопротивление шунта (Rp, ом) и тока короткого замыкания (I_{sc}, ампер) мало и неоднозначно.

ВАХ, представленные на рис. 3, свидетельствуют, что с увеличением времени воздействия обратного смещения в СЭ с нормальной толщиной CdS снижается V_{oc} и ухудшается FF, что является следствием ухудшения Rs и n, и при воздействии обратного смешения при освещении 2000 с приводит к снижению КПД более чем на 25% СЭ с

© Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2020 г.

нормальной толщиной CdS. В то же время в СЭ с тонким слоем CdS изменения мало заметны. Таким образом, как видно, уменьшение толщины буферного слоя CdS способствует выработке устойчивости к воздействию обратного смещения.

Таблица 2. Изменение параметров СЭ CIGS после обратного смещения с различным временем воздействия.

	Rp	*Rs*	*n*	I_0	I_{sc}	V_{oc}	FF	КПД
N60s_pre	210108	1.63	1.16	9.92E-13	-6.53E-03	0.67	0.79	0.14
N60s_aft	209282	2.63	1.18	1.33E-12	-6.55E-03	0.67	0.78	0.14
N600s_aft	169070	4.30	1.25	3.92E-12	-6.44E-03	0.64	0.78	0.13
N2000s_aft	153901	9.70	1.35	1.48E-11	-6.50E-03	0.55	0.72	0.10
T60s_pre	175903	1.48	1.41	1.23E-10	-6.54E-03	0.64	0.76	0.13
T60s_aft	176344	2.39	1.43	1.37E-10	-6.63E-03	0.64	0.76	0.13
T600s_aft	347580	2.68	1.44	1.26E-10	-6.61E-03	0.64	0.75	0.13
T2000s_aft	73754	4.74	1.65	6.70E-10	-6.62E-03	0.63	0.76	0.13

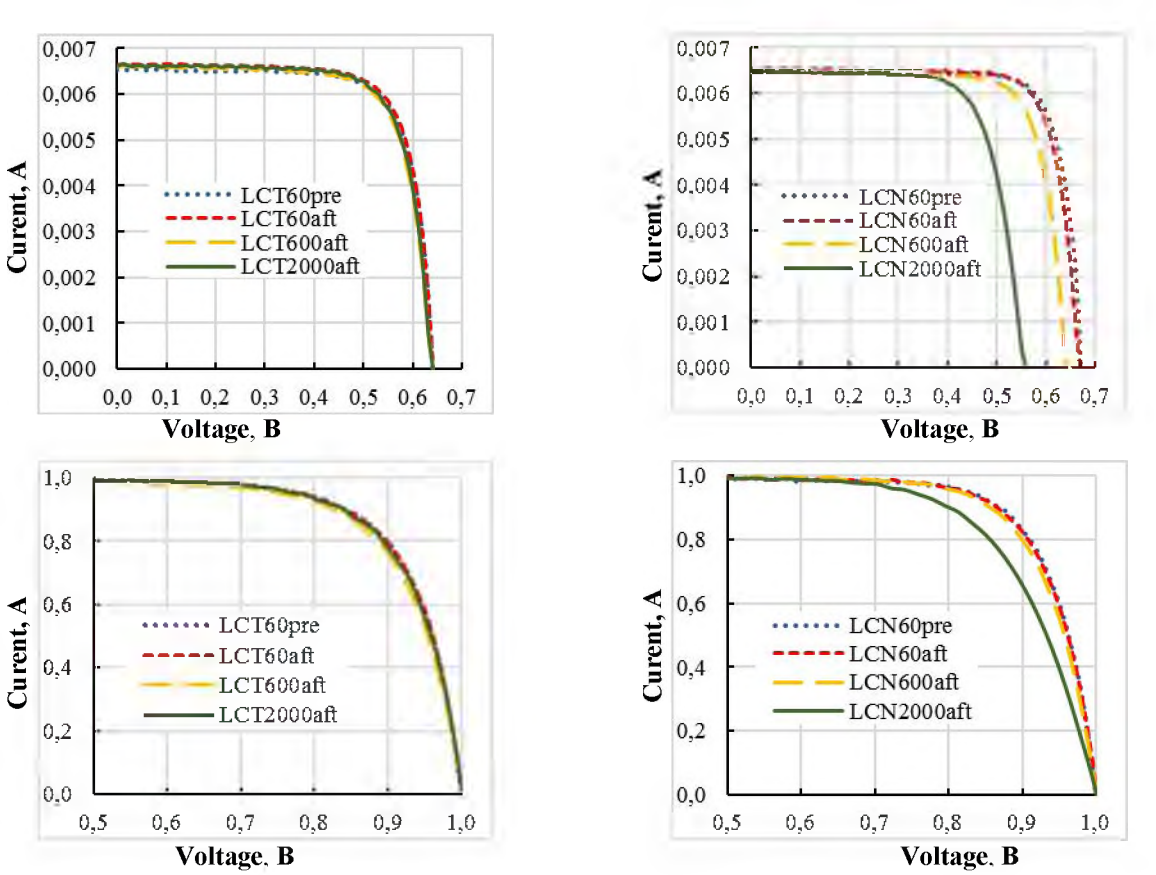


Рисунок 3. Кривые ВАХ СЭ CIGS до и после обратного смещения с различным временем воздействия.

С целью выявления природы этой устойчивости нами были проведены более детальные исследования ВФ характеристик данных структур, измерения которых проводили до и после воздействия обратного смещения при освещении (рис. 4) и в темноте (рис. 5). Следует отметить существенное отличие характера воздействия обратного смещения, поданного в темноте и при освещении,

© Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2020 г.

в частности, при воздействии обратного смещения в темноте емкость структуры увеличивается, тогда как при воздействии обратного смещения при освещении емкость структуры, наоборот, уменьшается.

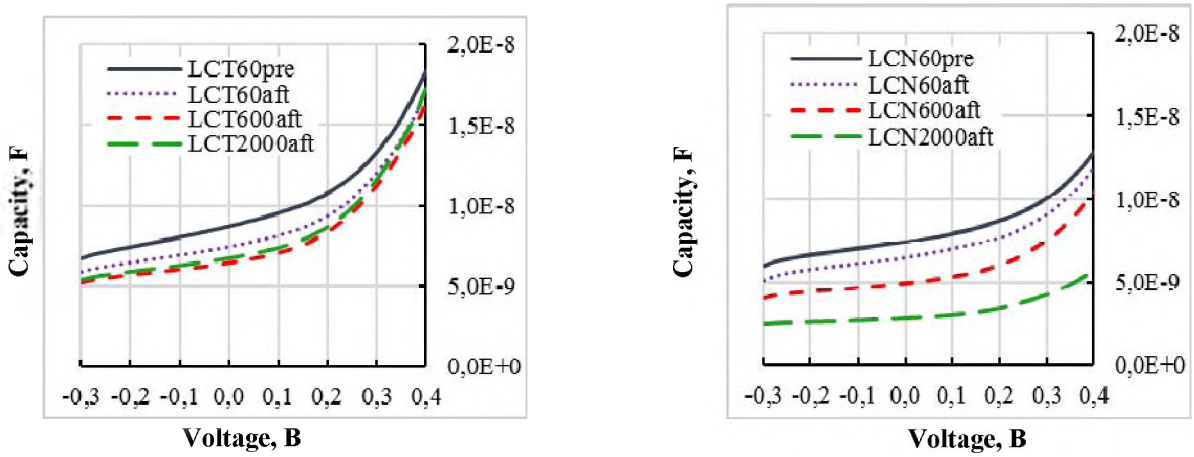


Рисунок 4. Кривые ВФХ СЭ CIGS до и после обратного смещения с различным временем воздействия при освещении.

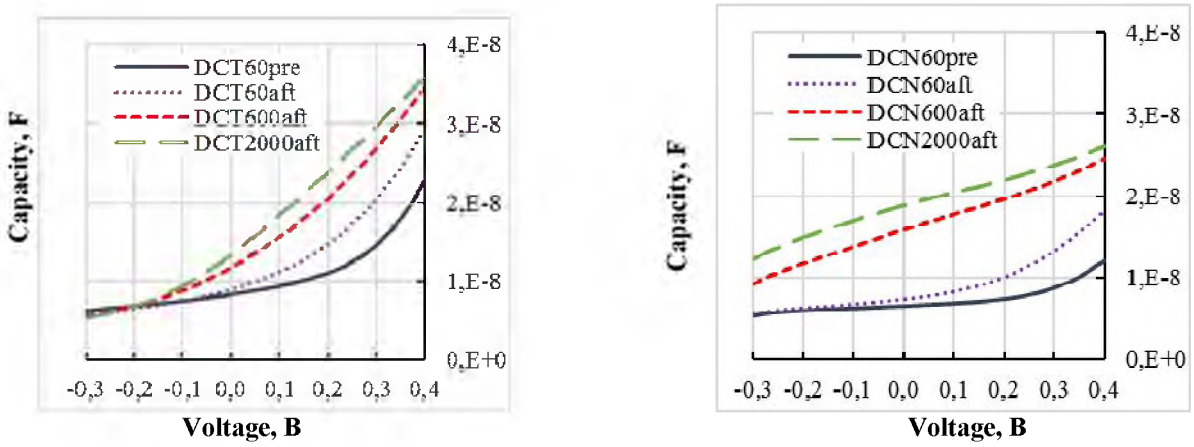


Рисунок 5. Кривые ВФХ СЭ CIGS до и после обратного смещения с различным временем воздействия в темноте.

Различие в изменении емкости в СЭ с тонкой и нормальной толщиной буферного слоя более выражено после воздействия обратного смещения при освещении, чем в темноте. Это свидетельствует о различии метастабильного изменения концентрации носителей в двух структурах за счет влияния воздействия обратного смещения, которое видно на рис. 6, 7.

Из ВФХ характеристик были вычислены распределения концентрации акцепторных примесей по глубине CIGS пленки с началом координатных осей, соответствующих границе перехода, которые представлены на рис. 6 для случая воздействия обратного смещения при освещении, а на рис. 7 для случая воздействия в темноте.

Снижение концентрации носителей после воздействия обратного смещения на рис. 6 согласуется с результатом измерения ВАХ и подтверждает увеличение Rs. Уменьшение концентрации приводит к расширению ОПЗ и изменению конфигурации дефектного комплекса (V_{Se} + V_{Cu}) [36], что объясняет увеличение n и уменьшение V_{oc}. Изменение концентрации носителей в СЭ с нормальным буферным слоем CdS пропорционально времени воздействия. Но в СЭ с тонким слоем CdS при более длительном воздействии заметно

© Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2020 г.

некое «восстановление». Такая неоднозначность в СЭ с тонким слоем CdS наблюдается также после обратного смещения в темноте (рис. 7). Данное явление интересно для будущих исследований, так как о нем ранее не сообщалось.

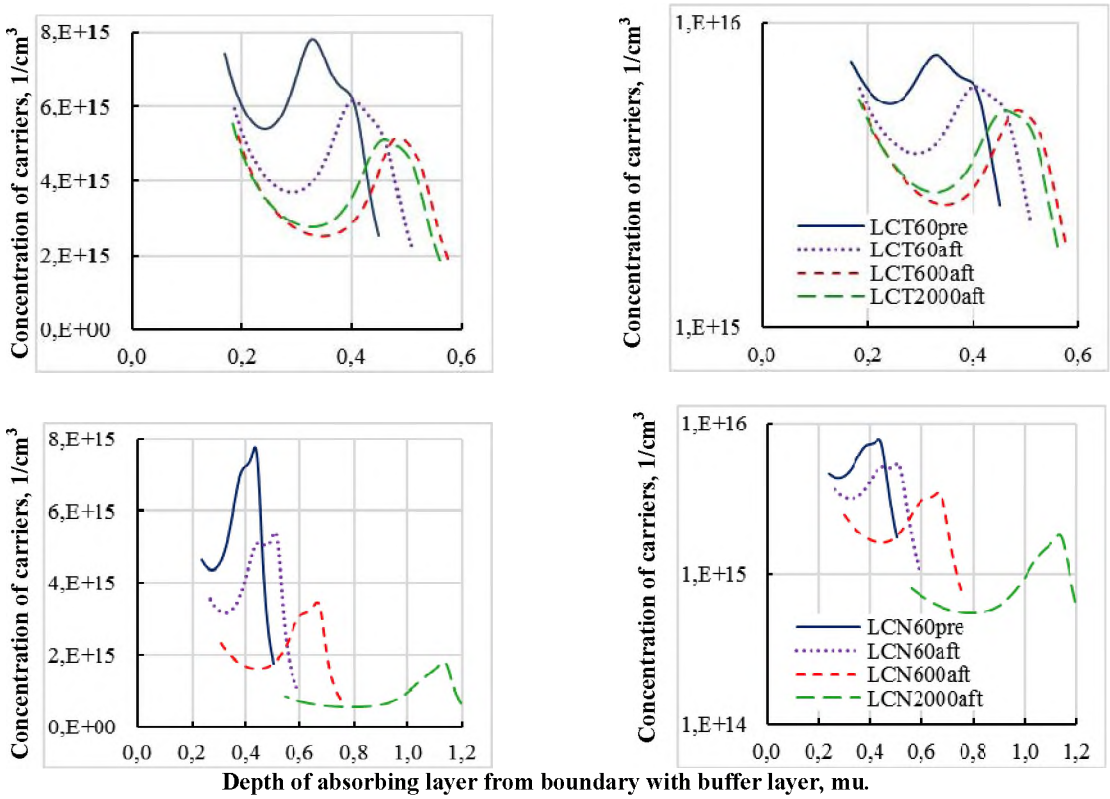


Рисунок 6. Профиль концентрации акцепторных ионов СЭ CIGS до и после обратного смещения с различным временем воздействия при освещении в линейном (слева) и полулогарифмическом (справа) масштабе.

После обратного смещения в темноте (рис. 8) происходит повышение концентрации ближе к *p-n*-переходу, тогда как после обратного смещения при освещении (рис. 7) пик концентрации отдаляется от *p-n*-перехода. При этом пик концентрации после обратного смещения в темноте также повышается со временем воздействия.

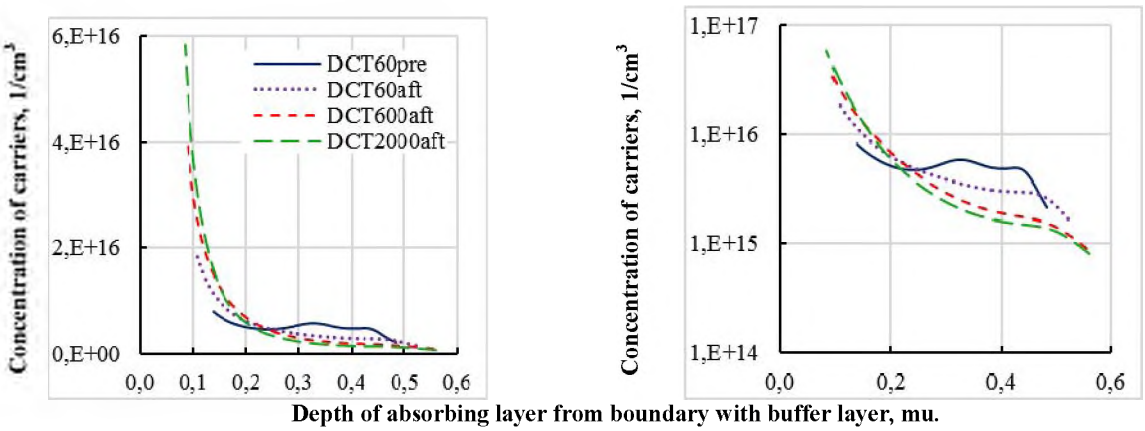


Рисунок 7а. Профиль концентрации акцепторных ионов СЭ CIGS с тонким буферным слоем до и после обратного смещения с различным временем воздействия в темноте в линейном и полулогарифмическом масштабе.

© Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2020 г.

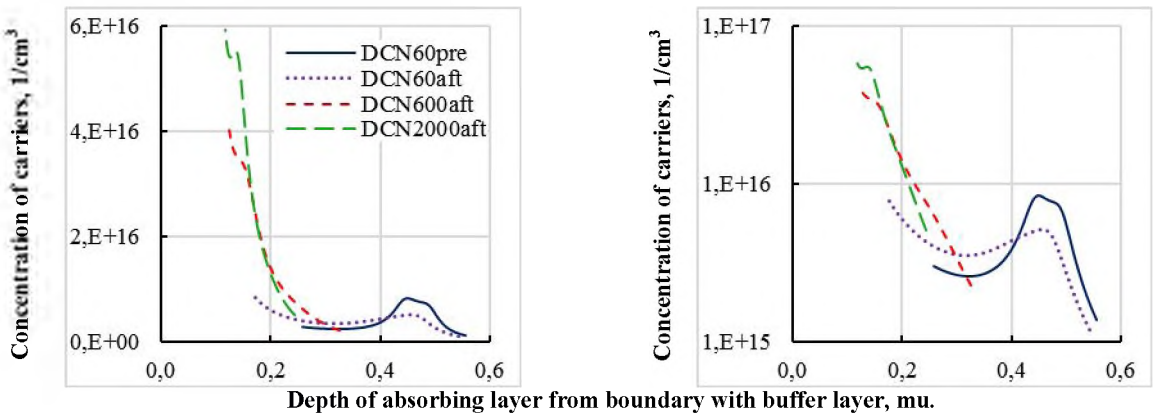


Рисунок 7б. Профиль концентрации акцепторных ионов СЭ CIGS с нормальным буферным слоем до и после обратного смещения с различным временем воздействия в темноте в линейном (слева) и полулогарифмическом (справа) масштабе

IV. Заключение

Таким образом, установлено, что воздействие обратного смешения при освещении в течение 2000 секунд приводит к снижению КПД более чем на 25% в СЭ с нормальной толщиной CdS и 0.3% в СЭ с тонким слоем CdS. Из чего следует, что уменьшение толщины буферного слоя CdS способствует устойчивости к воздействию обратного смещения.

При воздействии обратного смещения в темноте емкость структуры увеличивается, что соответствует классической модели влияния обратного смещения, и одинакова для элементов с различной толщиной буферного слоя. Воздействие обратного смещения при освещении приводит к уменьшению емкости структуры и концентрации носителей заряда. То, что это воздействие меньше для элемента с тонким буферным слоем, свидетельствует о влиянии синего спектра освещения, поглощение которого зависит от толщины буферного слоя. Так как это явление является оптическим, можно предположить, что такое поведение свойственно для СЭ с любым другим материалом буферного слоя.

Концентрация носителей в СЭ с нормальным слоем CdS изменяется пропорционально времени воздействия обратного смещения при освещении. Но в СЭ с тонким слоем CdS при более длительном воздействии заметно некоторое «восстановление».

После обратного смещения в темноте происходит повышение концентрации ближе к *p-n*-переходу, тогда как после обратного смещения при освещении пик концентрации отдаляется от *p-n*-перехода. Пик концентрации после обратного смещения в темноте также повышается со временем воздействия.

По результатам работы можно сделать вывод, что эффект обратного смещения является важным фактором для установления оптимальной толщины буферного слоя СЭ CIGS для обеспечения их стабильной работы в естественных условиях эксплуатации

Метаданные

Effect of reverse bias exposure on the parameters of solar cells based on CIGS

A.G. Kamilov

Physical-technical institute of the Uzbekistan Academy of Sciences, Chingiz Aytmatov Str., 2B, 100084 Tashkent, Uzbekistan

The results of laboratory experiments to study the effect of reverse bias with a duration of 60, 600 and 2000 s. on the parameters of solar cells (SC) based on an absorbing layer consisting of Cu, In, Ga and Se (CIGS) with different thicknesses of the CdS buffer layer are shown. Experiments have shown that for the stable operation of CIGS SCs under natural operating conditions, the thickness of their buffer layer should be calculated taking into account the effect of reverse bias. The results of measuring the current-voltage characteristics of CIGS SCs with different thicknesses of the CdS layer before and after the exposure to the reverse bias showed that SCs with a smaller buffer layer thickness are more resistant to the effect of reverse

© Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2020 г.

bias. Based on the results of measuring the capacitance-voltage characteristics, it was found that when exposed to reverse bias in the dark, the capacitance of the structure increases, which corresponds to the classical model of the effect of reverse bias, and is the same for elements with different thicknesses of the buffer layer. After exposure to reverse bias under illumination, the capacitance of the structure and the concentration of charge carriers decrease, and to a lesser extent in elements with a thin buffer layer, which also indicates their resistance to reverse bias.

Keywords: solar cells, buffer layer, CIGS, reverse bias, carrier concentration, efficiency, I-V, C-V.

Литература (References)

[1] S. Hegedus, Prog. Photovoltaics Res. Appl. **14**, No.5, 393-411 (2006); doi: 10.1002/pip.704.
[2] S. Dongaonkar, Y. Karthik, S. Mahapatra, and M.A. Alam. In 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Jun. 2011, pp. 003348–003348; doi: 10.1109/PVSC.2011.6186664.
[3] M.A. Green, J. Mater. Sci. Mater. Electron. **18**, No.S1, 15-19 (2007); doi: 10.1007/s10854-007-9177-9.
[4] C.A. Wolden et al., J. Vac. Sci. Technol. A Vacuum, Surfaces, Film. **29**, No.3, 030801 (2011); doi: 10.1116/1.3569757.
[5] C.R. Osterwald and T.J. McMahon, Prog. Photovoltaics Res. Appl. **17**, No.1, 11-33 (2009); doi: 10.1002/pip.861.
[6] S. Dongaonkar, M.A. Alam, Y. Karthik, S. Mahapatra, D. Wang, and M. Frei. In International Reliability Physics Symposium (Apr. 2011), pp. 5E.4.1-4.5; doi: 10.1109/IRPS.2011.5784535.
[7] P.-O. Westin, U. Zimmermann, L. Stolt. In 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 2009, pp. 2967-2970; doi: https://doi.org/10.4229/24thEUPVSEC2009-3BV.5.34.
[8] T.J. Silverman et al., IEEE J. Photovoltaics **5**, No.6, 1742-1747 (2015); doi: 10.1109/JPHOTOV.2015.2478071.
[9] R. Ramabadran and B. Mathur, Mod. Appl. Sci. **3**, No.10 (2009); doi: 10.5539/mas.v3n10p32.
[10] M. Nardone, S. Dahal, and J.M. Waddle, Sol. Energy **139**, 381-388 (2016); doi: 10.1016/j.solener.2016.10.006.
[11] E. Palmiotti et al., Sol. Energy **161**, 1-5 (2018); doi: 10.1016/j.solener.2017.12.019.
[12] W. Kwapil et al., J. Appl. Phys. **106**, No.6, 063530 (2009); doi: 10.1063/1.3224908.
[13] J.E. Lee et al., Prog. Photovoltaics Res. Appl. **24**, No.8, 1035-1043 (2016); doi: 10.1002/pip.2738.
[14] E.E. Van Dyk, C. Radue, and A.R. Gxasheka, Thin Solid Films **515**, No.15, 6196-6199 (2007); doi: 10.1016/j.tsf.2006.12.065.
[15] H. Guthrey et al., Prog. Photovoltaics Res. Appl. **27**, No.9, 812-823 (2019); doi: 10.1002/pip.3168.
[16] S. Johnston et al. In IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), Jun. 2017, pp. 1400-1404; doi: 10.1109/PVSC.2017.8366755.
[17] T.J. Silverman and I. Repins. In IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC) (A Joint Conference of 45th IEEE PVSC, 28th PVSEC & 34th EU PVSEC), Jun. 2018, pp. 3932-3937; doi: 10.1109/PVSC.2018.8547832.
[18] T.J. Silverman, L. Mansfield, I. Repins, and S. Kurtz, IEEE J. Photovoltaics **6**, No.5, 1333-1338 (2016); doi: 10.1109/JPHOTOV.2016.2591330.
[19] T.J. Silverman. In 33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2017, pp. 1422–1426.
[20] S. Johnston et al. In IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC) (A Joint Conference of 45th IEEE PVSC, 28th PVSEC & 34th EU PVSEC), Jun. 2018, pp. 1897-1901; doi: 10.1109/PVSC.2018.8547766.
[21] K. Bakker, H.N. Åhman, T. Burgers, N. Barreau, A. Weeber, and M. Theelen, Sol. Energy Mater. Sol. Cells **205**, 110249 (2020); doi: 10.1016/j.solmat.2019.110249.
[22] S. Dongaonkar, C. Deline, and M.A. Alam, IEEE J. Photovoltaics **3**, No.4, 1367-1375 (2013); doi: 10.1109/JPHOTOV.2013.2270349.
[23] H. Ziar, B. Asaei, S. Farhangi, M. Korevaar, O. Isabella, and M. Zeman, IEEE J. Photovoltaics **7**, No.5, 1390-1399 (2017); doi: 10.1109/JPHOTOV.2017.2711429.
[24] P. Zabierowski, U. Rau, and M. Igalson, Thin Solid Films **387**, No.1-2, 147-150 (2001); doi: 10.1016/S0040-6090(00)01850-2.
[25] M. Igalson, A. Kubiaczyk, & P. Zabierowski, (2001). Deep centers and fill factor losses in the CIGS devices. MRS Proceedings, 668. doi:10.1557/proc-668-h9.2
[26] U. Rau, A. Jasenek, R. Herberholz, H.W. Schock, J.F. Guillemoles, D. Lincot, L. Kronik, The inherent stability of Cu (In, Ga)Se2-based solar cells. Proc. 2nd World Conf. on Photovolt. Energy Con. E.C. Joint Res. Centre, Ispra, 1998 p 428.
[27] Kay Orgassa, Uwe Rau, Quang Nguyen, Hans Werner Schock and Jurgen H. Werner, Role of the CdS Buffer Layer as an Active Optical Element in Cu(In,Ga)Se2 Thin-Film Solar Cells, Prog. Photovolt: Res. Appl. 2002; 10:457–463 (doi: 10.1002/pip.438)
[28] Jingjing Qu, Linrui Zhang, Hao Wang, Xuemei Song, Yongzhe Zhang, Hui Yan, Simulation of double buffer layer on CIGS solar cell with SCAPS software. Opt. Quant. Electron. **51**, 383 (2019). https://doi.org/10.1007/s11082-019-2100-9
[29] P. Chelvanathan, M.I. Hossain, & N. Amin, (2010). Performance analysis of copper-indium-gallium-diselenide (CIGS) solar cells with various buffer layers by SCAPS. Current Applied Physics, **10**(3), S387–S391. doi:10.1016/j.cap.2010.02.018
[30] N. Khoshsirat, N.A.M. Yunus, Numerical simulation of CIGS thin flm solar cells using SCAPS-1D. In: 2013 IEEE Conference on Sustainable Utilization and Development in Engineering and Technology (CSUDET), p 63 (2013)
[31] N. Severino, N. Bednar, N. Adamovic, Buffer layer optimization for high efficiency CIGS solar cells. Journal of Physics: Conference Series 758 (2016) 012016 doi:10.1088/1742-6596/758/1/012016
[32] M.S.R. Robin, & M.M. Rahaman, (2016). A comparative performance analysis of CdS and In2S3 buffer layer in CIGS solar cell. 2016 2nd International Conference on Electrical, Computer & Telecommunication Engineering (ICECTE). doi:10.1109/icecte.2016.7879639

© Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2020 г.

[33] A.G. Komilov, Influence of CdS Buffer Layer Thickness on the Photovoltaic Parameters of Solar Cells. Appl. Sol. Energy 54, 308–309 (2018). doi:10.3103/S0003701X18050092

[34] D. KimJang, Y.-J. Jung, H.-S. Kim, M. Baek, D.Yi.J. Choi, Y. (2016). Optimization of CdS Buffer Layer for High Efficiency CIGS Solar Cells. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 16(5), 5074–5077. doi:10.1166/jnn.2016.12171

[35] Roland Scheer and Hans-Werner Schock. Chalcogenide Photovoltaics Physics, Technologies, and Thin Film Devices – WILEY-VCH Verlag & Co. KGaA, Germany, 2011. ISBN: 978-3-527-31459-1, PP. 384.

[36] S. Lany, & A. Zunger, (2006). Light- and bias-induced metastabilities in Cu(In,Ga)Se2 based solar cells caused by the (VSe-VCu) vacancy complex. Journal of Applied Physics, **100**(11), 113725. doi:10.1063/1.2388256

CIGS асосидаги қуёш элементларига тескари уланиш таъсири

А.Ғ.Комилов

ЎзР ФА Физика-техника институти, Чингиз Айтматов кўчаси 2Б уй, 100084 Тошкент, Ўзбекистон

Мақолада CdS буфер қатлами қалинлиги турлича бўлган мис, индий, галлий ва селен (CIGS) дан иборат ютувчи қатламли қуёш элементлари (ҚЭ) параметрларига 60, 600 ва 2000 сония давомийликдаги тескари уланишнинг таъсирини ўрганиш бўйича тадқиқотлар натижалари келтирилган. CdS буфер қатлами қалинлиги турлича бўлган CIGS ҚЭ нинг тескари уланиш таъсиридан олдин ва кейин ўлчанган вольт-ампер хусусиятлари (ВАХ) натижалари, ингичкароқ буфер қатламли ҚЭ ларининг тескари уланиш таъсирига бардошлироқ эканини кўрсатди. Қорон-ғуликдаги тескари уланиш таъсиридан, структуранинг электрик ҳажми ошади, ва бу тескари уланиш таъсирининг классик моделига мос келади. Ёруғликдаги тескари уланиш таъсири структуранинг сиғими ва аралашма ионлари концентрациясининг пасайишига олиб келади, ва бу ҳолат буфер қатлами юпқа бўлган элементларда камроқ бўлади, бу ҳам уларнинг тескари уланиш таъсирига бардошлироқ эканинидан далолат беради.

Калит сўзлар: қуёш элементлари, буфер қатлами, CIGS, тескари уланиш, ташувчининг концентрацияси, ФИК, ВАХ, ВФХ.

© Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2020 г.