

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-105-123>

УДК 620.97

Солнечные элементы: современное состояние и перспективы развития

И. И. Марончук¹⁾, Д. Д. Санникович²⁾, В. И. Мирончук³⁾

¹⁾ООО «Генезис-Таврида» (Севастополь, Российская Федерация),

²⁾Севастопольский государственный университет (Севастополь, Российская Федерация),

³⁾Белорусский государственный аграрный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Реферат. Проанализированы основные тенденции развития мирового рынка солнечной фотоэнергетики за последние несколько лет. Показано, что она является одной из самых быстроразвивающихся среди отраслей возобновляемой энергетики и современной промышленности в целом. Очевидно, что себестоимость производимой солнечной энергии стремительно приближается к цене за электроэнергию, генерируемую традиционными методами на АЭС и ТЭС. Отмечены аспекты развития эффективности современных исследовательских солнечных элементов, изготовленных из различных материалов, использующих инновационные технологические решения на основе данных, предоставленных Национальной лабораторией по возобновляемой энергетике (NREL, США) в 2017 г. Для удобства анализа исследовательские солнечные элементы разделены на четыре технологические группы. Рассмотрены преимущества и недостатки солнечных элементов в отдельности по каждой взятой группе, включая особенности их производства и перспективы развития, оценена максимальная эффективность за 2017 г. Возможной альтернативой перспективного развития современных высокоэффективных однопереходных солнечных элементов является использование принципиально новых материалов на основе наногетероэпитаксиальных структур с квантовыми точками. Продемонстрированы возможности поглощения (переработки) такими структурами как коротковолнового излучения, так и длинноволновой части спектра солнечного излучения с целью выработки электрической энергии при увеличении эффективности солнечных элементов на их основе. Рассмотрены оптимальные материалы для их изготовления и принципы действия на их основе высокоэффективных солнечных элементов. Обоснована перспективность изготовления наногетероэпитаксиальных структур с квантовыми точками методом жидкофазной эпитаксии с импульсным охлаждением подложки.

Ключевые слова: солнечная фотоэнергетика, элемент, модуль, эффективность, концентрированное излучение, технологическая группа, концентратор, структура, жидкофазная эпитаксия

Для цитирования: Марончук, И. И. Солнечные элементы: современное состояние и перспективы развития / И. И. Марончук, Д. Д. Санникович, В. И. Мирончук // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2019. Т. 62, № 2. С. 105–123. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-105-123>

Адрес для переписки

Мирончук Виктор Иванович
Белорусский государственный
аграрный технический университет
просп. Независимости, 99,
220023, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 267-37-01
viktor.mhtc@gmail.com

Address for correspondence

Mironchuk Viktor I.
Belarusian State
Agrarian Technical University
99 Nezavisimosty Ave.,
220023, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 267-37-01
viktor.mhtc@gmail.com

Solar Cells: Current State and Development Prospects

I. I. Maronchuk¹⁾, D. D. Sanikovich²⁾, V. I. Mironchuk³⁾

¹⁾“Genesis-Tavrida” LLC (Sevastopol, Russian Federation),

²⁾Sevastopol State University (Sevastopol, Russian Federation),

³⁾Belarusian State Agrarian Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper considers the main trends in the development of the world market of solar photovoltaics over the past few years. It is shown that the industry is a very rapidly evolving one among the branches of renewable energy and modern industries as a whole. It is obvious that the prime cost of the solar energy being produced is rapidly approaching the price of electricity generated by traditional methods at nuclear power plants and thermal power plants. The aspects of the development of the efficiency of modern research solar cells made of various materials using innovative technological solutions based on the data provided by the National Laboratory for Renewable Energy (NREL, USA) in 2017 are noted. For the convenience of analysis, the research solar cells are divided into four technological groups. The advantages and disadvantages of solar cells, including the specific features of their production and prospects for development are considered separately for each group; the maximum efficiency for the year 2017 is estimated. A possible alternative to the future development of modern high-performance single-transition solar cells is the use of fundamentally new materials based on nanoheteroepitaxial structures with quantum dots. The possibilities of absorption (processing) by such structures of both short-wave radiation and long-wave part of the solar radiation spectrum for the purpose of generation of electric energy by increasing the efficiency of solar cells on their basis have been demonstrated. The optimal materials for their production and the principles of action of high-performance solar cells on their basis have been considered. The prospects of manufacturing nanoheteroepitaxial structures with quantum dots by liquid-phase epitaxy with pulse cooling of the substrate have been substantiated.

Keywords: solar photovoltaics, element, module, efficiency, concentrated radiation, technological group, concentrator, structure, liquid-phase epitaxy

For citation: Maronchuk I. I., Sanikovich D. D., Mironchuk V. I. (2019) Solar Cells: Current State and Development Prospects. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 62 (2), 105–123. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-105-123> (in Russian)

Введение

Мировой рынок солнечной фотоэнергетики (ФЭ) растет с 2005 г. в среднем на 40 % в год. Это гораздо больше, чем для любой другой отрасли промышленности [1]. Ожидается, что в ближайшие 20 лет солнечная ФЭ создаст более 2 млн рабочих мест, сократит выбросы парниковых газов в атмосферу на 350 млн т CO₂, что эквивалентно остановке 140 угольных электростанций. Общая мощность солнечной ФЭ до 2030 г. превысит 650 ГВт [2, 3].

Седьмой год подряд в мировой рынок солнечной ФЭ инвестируется средств больше, чем в другие отрасли возобновляемой энергетики. В 2016 г. инвестиции составили 57 % от общего объема и равнялись 113,7 млрд дол. США. Несмотря на ежегодное снижение общих глобальных инвестиций в солнечную энергетику, например на 34 % по сравнению с 2015-м, вновь установленная мощность солнечной фотоэлектрической энергии увеличилась на 38 % и превысила в 2016 г. 80 ГВт.

Зарегистрированные данные о производстве солнечных элементов (СЭ) для солнечных станций в 2016 г. варьируются между 79 и 84 ГВт, а оценки на 2017 г. сводятся к диапазону от 90 до 95 ГВт. Значительная неопределенность в этих данных обусловлена высококонкурентной рыночной средой, а также тем фактом, что некоторые компании сообщают данные о производстве, в то время как другие – о продажах, а третьи – о перевозках. В 2018 г. мировой рыночный прогноз по производству СЭ варьируется от 58 ГВт по низкому сценарию Solar Power Europe до 106 ГВт в обзоре Глобального PV-рынка BNEF [3]. Диаграммы, описывающие мировое производство солнечных фотоэлементов в диапазоне развития с 2005 по 2017 г., представлены на рис. 1.

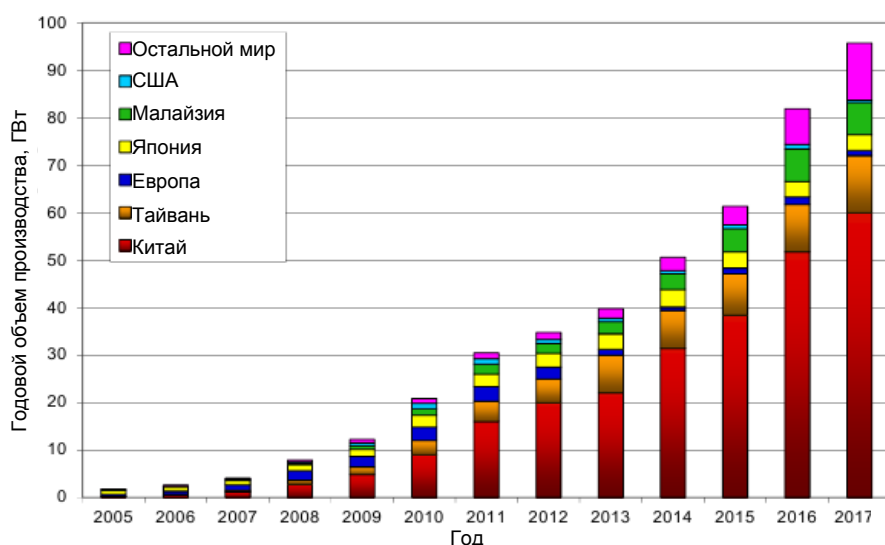


Рис. 1. Мировое производство солнечных элементов/модулей с 2005 по 2017 г. [3]

Fig. 1. World production of solar cells/modules from 2005 to 2017 [3]

Установленная мощность мировой солнечной ФЭ в 2016 г. составила 315 ГВт, и, согласно прогнозам рынка, она может удвоиться к 2019-му. В конце 2017 г. установленная мощность мировой солнечной ФЭ превысила 400 ГВт и перекрыла примерно 2 % мирового спроса на электроэнергию.

Более 90 % ныне действующих мировых производств современных солнечных фотоэлектрических панелей используют технологию кристаллического кремния на основе пластин.

Проектные мощности по производству кремния на 2017 г. варьируются от 450000 до 508000 т. Из них примерно 30000 т используется электронной промышленностью [4, 5]. В настоящий момент средние затраты такого материала, как кремний, при производстве СЭ составляют около 4,7 г/Вт [3].

Несмотря на бурное развитие солнечной ФЭ, себестоимость производства электроэнергии на солнечных электростанциях остается одной из

высоких среди альтернативных способов генерации. Однако в последние несколько лет отмечается снижение себестоимости электроэнергии, производимой солнечными фотоэлектрическими преобразователями энергии (ФЭП). Так, за 2008–2017 гг. средняя стоимость солнечной энергии снизилась с 0,210 до 0,086 дол./(кВт·ч) при средней стоимости электроэнергии, получаемой ТЭС и АЭС, порядка 0,050 дол./(кВт·ч) [3]. Это на 15 % меньше по сравнению с 2016-м, причем стоимость солнечных модулей в солнечных ФЭ станциях уменьшилась по сравнению с 2016 г. на 40 %.

Тенденции к снижению стоимости солнечной энергии предвидятся и в дальнейшем. Уже в 2016 г. на мировом рынке солнечной ФЭ заключали ряд контрактов на покупку электроэнергии, цены на которую опустились ниже 30,0 дол./(МВт·ч), а самый низкий уровень закупки составил 24,2 дол./(МВт·ч) (тендер на электроэнергию для водного хозяйства Абу-Даби в сентябре 2016 г.). Такой уровень цен, особенно в Объединенных Арабских Эмиратах и Чили, возможно, обусловлен сочетанием превосходного солнечного ресурса в этих странах с высокими ставками долговых обязательств и очень низкими долговыми издержками, а также тем фактом, что некоторые тарифы индексируются под инфляцию [3].

Современные технологии производства солнечных батарей хорошо зарекомендовали себя и обеспечивают надежный продукт с гарантированным выходом энергии в течение как минимум 25–30 лет. Надежность, растущий спрос на электроэнергию в странах с развивающейся экономикой, возможность снятия нагрузки при перегрузках сети, а также рост цен на электроэнергию, генерируемую традиционными источниками энергии, добавляют привлекательность в развитие рынка солнечной ФЭ.

Проблема развития солнечной энергетики носит глобальный характер и является весьма актуальной задачей для изучения. Исходя из вышесказанного, очевидно, что любые технологические решения, способные понизить стоимость солнечной энергии, приблизив ее и сделав более дешевой, чем энергия, генерируемая классическими методами, весьма актуальны. Поэтому, на наш взгляд, крайне необходимы отслеживание и контроль за даже незначительными изменениями в области технологического прогресса на рынке солнечной электроэнергии с целью улучшения уже имеющихся характеристик солнечных элементов.

Цель исследований – краткое описание основных аспектов развития мировой солнечной фотоэнергетики; изучение солнечных элементов, относящихся к различным технологическим группам, оценка их преимуществ и недостатков, особенностей производства, перспектив развития и максимальной эффективности; рассмотрение возможной альтернативы в развитии современных высокоэффективных солнечных элементов на основе наногетероэпитаксиальных структур с квантовыми точками, обсуждение методов их получения.

Основная часть

Данные Национальной лаборатории по возобновляемой энергетике (NREL, США) о разработках солнечных элементов с максимальной эффективностью за 2017 г. [6] представлены на рис. 2. Для удобства обсуждения рассмотрим четыре технологические группы, как и на рис. 2.

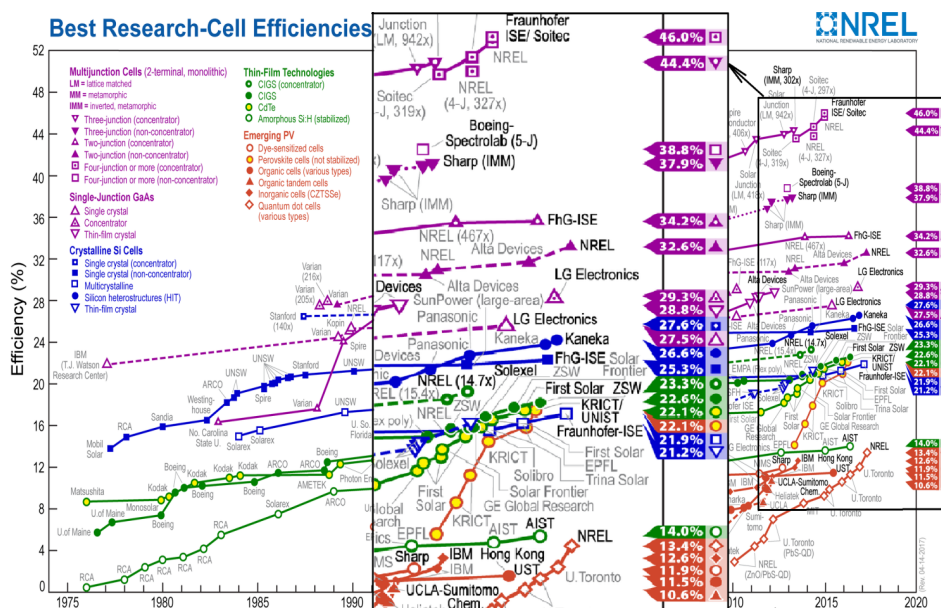


Рис. 2. Данные Национальной лаборатории по возобновляемой энергетике (NREL, США) о разработках солнечных элементов с максимальной эффективностью за 2017 г.

Fig. 2. Data submitted by the National Renewable Energy Laboratory (NREL, USA) on the development of solar cells with maximum efficiency for 2017

К первой технологической группе можно отнести СЭ на основе соединений III и V групп периодической системы, имеющих от одного до пяти каскадов (многоступенчатые СЭ), которые могут использоваться как с применением концентраторов, так и без них. Согласно рис. 2, сегодня они имеют максимальную эффективность.

Каскадные СЭ формируют путем либо выращивания монокристаллической структуры, либо механического стыкования готовых элементов.

Большинство высокоэффективных СЭ, относящихся к этой группе, изготавливают на основе многослойных (каскадных) гетероструктур. Их получают методами молекулярно-пучковой эпитаксии (МВЕ) или эпитаксией из газовой фазы, содержащей металлоорганические соединения (MOCVD-технология). Пример структуры трехкаскадного СЭ и энергетическая схема преобразования им солнечной энергии [7] продемонстрированы на рис. 3.

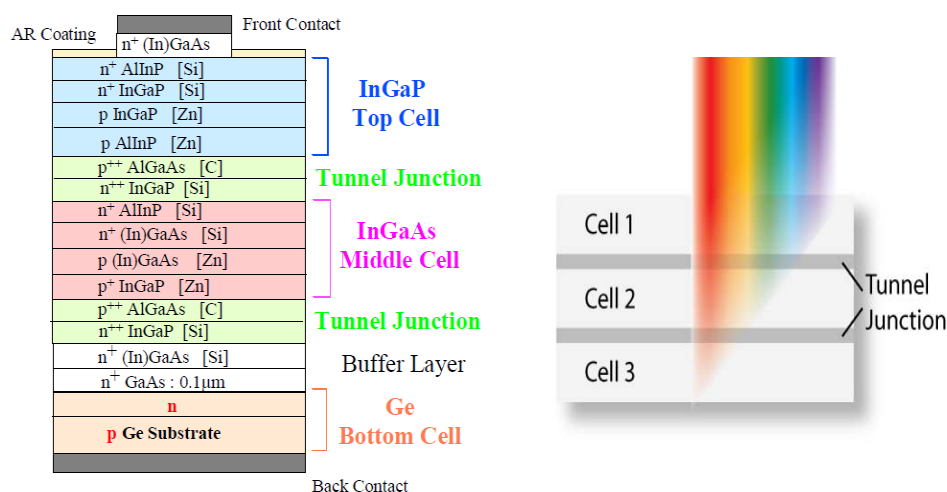


Рис. 3. Многопереходный солнечный элемент и энергетическая схема преобразования солнечной энергии

Fig. 3. Multijunction solar cell and energy scheme for the conversion of solar energy

Изготовленные в Германии (Fraunhofer ISE/Soitec) четырехкаскадные СЭ достигли эффективности 46,0 % при использовании концентрирования солнечного излучения со степенью 500 ед. 14 января 2015 г. в GOLDEN (штат Колорадо – Министерство энергетики США, NREL) объявили о демонстрации эффективности преобразования для четырехпереходного СЭ в 45,7 % при степени концентрации 234 ед. NREL заявила, что это один из самых высоких достигнутых КПД для СЭ любых типов. При этом максимальная эффективность трехкаскадных СЭ, полученных еще в 2013 г. компанией Solar Junction со степенью концентрации 942 ед., составила 44,4 %.

Однако применение концентраторов (линз Френеля) для получения высокой эффективности приводит к большим оптическим потерям. Необходимо помнить, что исследуются лабораторные элементы при специальных условиях освещения. Сами концентраторные многокаскадные элементы при использовании в натуральных условиях требуют применения механически сложных опорных конструкций, включающих схемы слежения, имеют плохую работоспособность при освещении рассеянным светом и требуют необходимости эффективного охлаждения структуры вследствие локального нагрева.

Максимальная эффективность многокаскадных безконцентраторных СЭ, полученных компаниями Boeing-Spectrolab и Sharp, составила соответственно 38,8 % (пять каскадов) и 37,9 % (три каскада). Недостатками получения многокаскадных СЭ являются сложность технологического процесса, использование дорогостоящих оборудования, подложек монокристаллического Ge, GaAs и других основных материалов и компонентов.

Ж. И. Алферов отмечает [8], что каскадные СЭ являются наиболее сложными в структурном отношении по сравнению со всеми другими полупроводниковыми приборами.

При изготовлении двухкаскадных СЭ путем механической состыковки готовых элементов для верхнего каскада применялись материалы на основе GaAs, а для нижнего – из Ge [9]. Авторы [10] для верхнего каскада использовали СЭ из AlGaAs ($E_g \sim 1,7$ eV), а для нижнего – из Si. Однако рекордные значения с эффективностью 37 % [11] были достигнуты на механически состыкованных СЭ, состоящих из верхнего каскада на основе GaAs и нижнего на основе GaSb, при преобразовании солнечного излучения со степенью концентрации 100 ед.

Достоинством механически состыкованных СЭ является то, что они создаются на основе хорошо разработанных однопереходных СЭ. При этом нет необходимости согласовывать электрический ток в каскадах. К недостаткам относятся достаточно сложная система коммутации каскадов, высокие оптические потери на границах каскадов, требование минимизации поглощения верхним каскадом излучения, которое будет преобразовываться в нижнем каскаде [12].

Несмотря на вышеуказанные негативные стороны, многокаскадные СЭ нашли свой рынок применения в солнечной ФЭ. Они не только эффективно используются в космосе, но и в наземной концентраторной солнечной ФЭ. Компании Boeing, Emcore, Spectrolab Inc. уже к 2008 г. имели отработанные технологии изготовления многокаскадных СЭ с производственными мощностями более 1 МВт/год каждая, налаженную систему сбыта и сформированный рынок наземной концентраторной солнечной ФЭ с эффективностью СЭ 36–39 %.

Однокаскадные элементы первой технологической группы имеют максимальную эффективность до 27,5 %, однако это незначительно выше, чем на кремнии (25,6 %), при существенно более сложном технологическом процессе и высокой цене на материалы и оборудование, повышающими цену на генерируемую электрическую энергию. Таким образом, основным недостатком этой группы является высокая стоимость.

Ко второй технологической группе относят СЭ, изготавливаемые на основе кремниевых технологий. Как мы уже говорили ранее, кремний в настоящий временной период является основным материалом солнечной ФЭ, на основе которого выполняется более 90 % СЭ. Высокие темпы развития фотоэлектрической промышленности вынуждают производителей высокочистого кремния уделять больше внимания исследованию и развитию процессов его получения. Как правило, кремний для ФЭ получают методом на основе химического осаждения паров, известного как Сименс-процесс, и по технологической схеме производства на основе реакторов кипящего слоя [13, 14]. Технологические приемы и процессы для этой группы наиболее отработаны, и мы не будем заострять на них свое внимание.

Классическая конструкция СЭ, изготавливаемая из моно- и мультикристаллического кремния [15], показана на рис. 4а. Согласно рис. 2, максимальная эффективность для СЭ из монокристаллического кремния составляет 25,3 %. При использовании 92-кратной концентрации компанией

Атомix получена максимальная эффективность 27,6 %. Применение в такой конструкции СЭ мультикристаллического кремния приводит к уменьшению эффективности до 21,9 %.

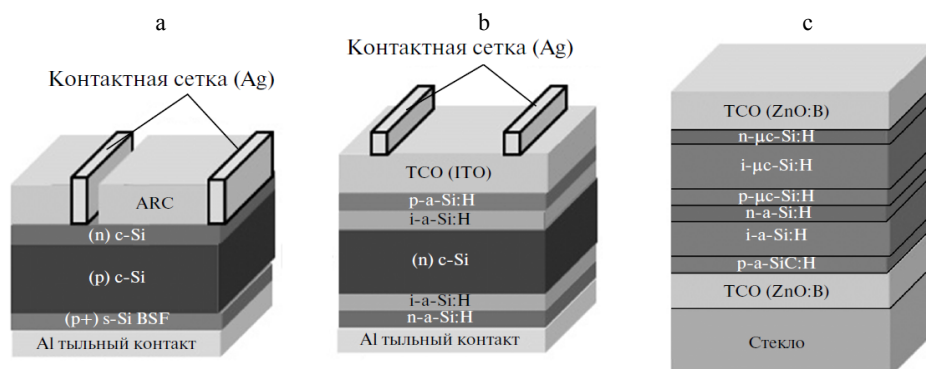


Рис. 4. Классическая конструкция солнечных элементов:

a – на основе c-Si; b – на основе гетероперехода a-Si:H/c-Si (HIT-технологии);
c – тонкопленочные на основе a-Si:H/μc-Si:H; TCO – прозрачный проводящий оксид
(обычно индий-титановый оксид (ITO)); ARC – просветляющее покрытие

Fig. 4. A classical construction of solar cells:

a – based on c-Si; b – on the basis of a heterojunction a-Si:H/c-Si (HIT-technologies);
c – thin-film solar cells based on a-Si:H/μc-Si:H; TCO – transparent conducting oxide
(usually indium titanium oxide (ITO)); ARC – antireflective coating

Без применения концентраторов максимальную эффективность в этой группе имеют кремниевые СЭ, изготавливаемые по НИТ (Heterojunction with Intrinsic Thin Layer Structure) технологии (26,6 %) [16]. На рис. 4b представлена общая концепция технологии формирования гетероструктурных СЭ на основе кристаллического кремния. На структурированной и очищенной поверхности, предварительно подготовленной с помощью химической обработки подложки, методом плазмохимического осаждения формируют омический и гетероконтакт, состоящие из слоев собственного и легированного аморфного кремния. На лицевую сторону напыляют прозрачное проводящее покрытие, а методом трафаретной печати наносят серебряную контактную сетку, обеспечивающую токосъем. Тыльный контакт формируют напылением слоев индий-титанового оксида (ИТО) и серебра. Технологический процесс состоит из семи операций, что значительно меньше, чем в технологии IBC (фирмы Sun Power) получения кристаллических кремниевых СЭ, имеющей 18 операций [15].

На рис. 4c показана конструкция тонкопленочного СЭ на основе a-Si:H/μc-Si:H. Как правило, технологическая цепочка получения такого прибора требует большого количества технологических шагов, а сам СЭ имеет более низкую эффективность и подвержен деградации по сравнению с НИТ-технологией. Максимальная эффективность тонкопленочных СЭ, согласно рис. 2, составляет 21,2 %. Таким образом, в этой группе в развитии солнечной ФЭ наиболее перспективными являются СЭ, производимые по НИТ-технологии.

Солнечные элементы, рассматриваемые в третьей технологической группе, как и элементы первой группы, можно отнести к элементам второго поколения. Для их изготовления требуется меньше полупроводниковых материалов, чем для СЭ на кристаллическом кремнии. Однако негативным фактором при производстве СЭ этой группы является то, что данные тонкопленочные технологии используют токсичные и редкие элементы с довольно высокой стоимостью. Кроме того, имеющиеся технологические проблемы с равномерностью нанесения тонких слоев приводят к сравнительно большой потере эффективности при переходе от элементов к модулям.

Максимальной эффективностью в этой группе обладают тонкопленочные СЭ второго поколения на основе халькопиритов $\text{Cu}(\text{In, Ga})(\text{Se, S})_2$, называемые CIGS. Они относительно легко синтезируются в лабораторных условиях, и технологические особенности их получения можно подразделить на методы с и без использования вакуума. Вакуумный вариант сказывается на стоимости СЭ, но при нем получена наибольшая эффективность в 22,6 % (согласно рис. 2), безвакуумный вариант не позволяет получать солнечные элементы с эффективностью более 17,0 % [17].

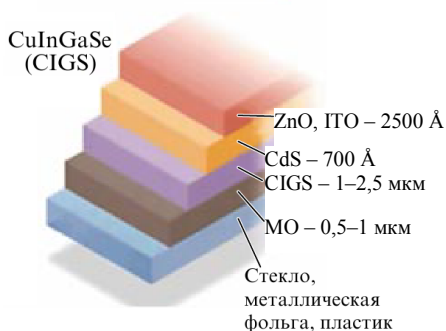


Рис. 5. Типичная структура солнечных элементов на основе CIGS

Fig. 5. A typical structure of solar cells based on CIGS

Структура типичных СЭ на основе CIGS [18] представлена на рис. 5. Здесь CIGS выступает в качестве полупроводника *p*-типа, осажденного на стеклянную подложку с тонким слоем молибдена, выполняющего функцию нижнего контакта. Нанесением слоя широкозонного полупроводника CdS, легированного под *n*-тип, создается *p-n*-структура, которая закрывается тонким слоем прозрачного оксида цинка и прозрачным проводящим индий-титановым оксидом (либо сетчатым контактом).

При использовании концентрированного солнечного излучения со степенью 14,7 ед. удалось поднять эффективность СЭ на основе CIGS до 23,3 % (рис. 2).

Следующим по результативности в этой группе выступают СЭ на основе CdTe с максимально достигнутой эффективностью 22,1 %. Типичная структура СЭ на основе CdTe представлена на рис. 6 [19]. Основными технологиями получения таких СЭ являются процессы сублимации, химического напыления, химического осаждения из газовой фазы, эпитаксия, трафаретная печать.

Ведущий мировой производитель подобных СЭ – компания First Solar, которой принадлежит рекордный показатель в 21,5 % (2016 г.). Задачей компании, по словам ее директора, является «подтверждение постоянного

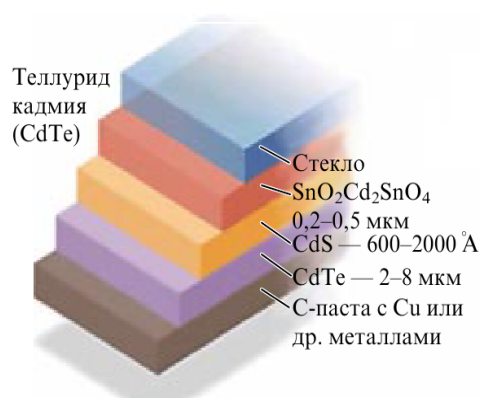


Рис. 6. Типичная структура солнечных элементов на основе CdTe

Fig. 6. A typical structure of solar cells based on CdTe

конкурентного преимущества CdTe по сравнению с традиционной технологией кристаллического кремния».

В 2014 г. Bloomberg опубликовал майские цены на наиболее используемые в Катаре СЭ с текущими ценами модулей, маржи и ценами продаж [20]. Эти данные расширены, чтобы можно было показать развитие уровня затрат на электроэнергию, получаемую по солнечной фотоэлектрической технологии в сочетании с новыми данными о солнечной эффективности. Эти данные

позволяют определить дорожную карту развития уровня затрат на электроэнергию для солнечной ФЭ Катара в будущем.

Развитие эффективности для исследовательских СЭ на основе тонких пленок CdTe движется ускоренными темпами, что может сократить уровень затрат на получаемую этими СЭ энергию до 60 %. Если переход от исследовательских СЭ к коммерческому рынку будет реализован так, как планируется, то эффективность тонкопленочных СЭ скоро может превзойти кристаллические кремниевые модули, что также приведет к уменьшению уровня затрат на электроэнергию ниже, чем для энергии, получаемой традиционными методами на АЭС и ТЭЦ на большинстве энергетических рынков. Подтверждение этих выводов можно найти в [20]. Перспективность развития тонкопленочных СЭ бросается в глаза, поскольку уровень затрат на электроэнергию, как известно, включает в себя все капитальные затраты и эксплуатационные расходы (исключая субсидии, долговое финансирование и налоговые последствия).

Наименьшей эффективностью (14,0 %) в этой группе обладают тонкопленочные СЭ на основе аморфного кремния. Главной проблемой таких модулей является деградация аморфного элемента. Рассмотренные СЭ, входящие в третью технологическую группу, применяются в основном в элементах конструкций зданий и ограждений.

К четвертой технологической группе можно отнести СЭ на материалах и технологиях, открытых достаточно недавно (в сравнении с предыдущими технологическими группами), в последние годы они получили наибольшие тенденции к развитию. К ним можно отнести технологии пленок на основе сенсibilизированных красителей, перовскитов, органические и tandemные органические пленки, а также квантовые точки, полученные по коллоидным технологиям.

Наиболее перспективными в этой группе считаются СЭ на основе перовскитов [21, 22]. Исследовательская группа во главе с научным сотруд-

ником Seo Jang-won Корейского научно-исследовательского института химической технологии зафиксировала наибольшую эффективность для перовскитового СЭ – 22,7 % (2017 г.).

Такие СЭ относятся к третьему поколению, они гибкие и легкие, их изготовление требует применения относительно простых и дешевых методов. Однако необходимо отметить, что на данный момент они подвержены временной деградации. К СЭ следует применять повышенные требования к герметизации. Сегодня производство СЭ данной технологической группы в промышленных масштабах отсутствует. Это потенциально наиболее дешевая технологическая группа изготовления СЭ, находящаяся на стадии лабораторных исследований.

Альтернативой созданию СЭ по перечисленным выше технологиям является изготовление однопереходных элементов на основе многослойных наногетероэпитаксиальных структур (НГЭС) с квантовыми точками (КТ). В этом случае дизайн элемента существенно упрощается, поскольку такой солнечный элемент однокаскадный [23]. Для его изготовления используются два полупроводниковых материала: один – широкозонный (матричный), другой – узкозонный (для изготовления КТ). Пример структуры такого солнечного элемента и его энергетическая схема показаны на рис. 7.

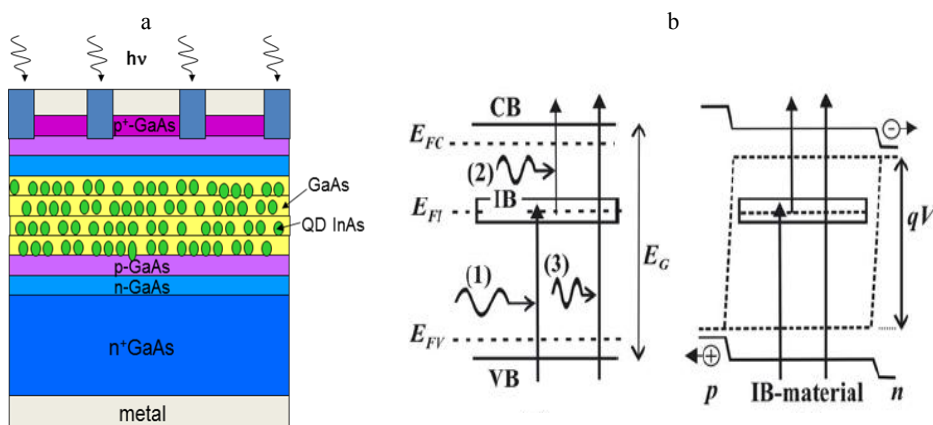


Рис. 7. Однопереходный солнечный элемент с квантовыми точками (а) и его энергетическая диаграмма (б)

Fig. 7. A unijunction solar cell with quantum dots (a) and its energy diagram (b)

Теоретически доказано [24], что введение КТ узкозонного полупроводникового материала с шириной запрещенной зоны E_{g1} в СЭ, изготовленный из широкозонного полупроводникового материала с шириной запрещенной зоны $E_{g2} > E_{g1}$, позволяет утилизировать как коротковолновое излучение с энергией $h\nu > E_{g2}$, так и излучение с энергией $h\nu < E_{g2}$, которое не поглощается в материале широкозонного полупроводника. При этом, как показано на энергетической диаграмме однопереходного солнечного элемента с КТ (рис. 7b), осуществляется утилизация длинно-

волновой части спектра солнечного излучения за счет суммирования энергии двух длинноволновых квантов света [25].

Сотрудник NREL Артур Нозик в 1990-е гг. постулировал возможность получения нескольких электронно-дырочных пар с КТ узкозонных полупроводников, облученных квантами коротковолнового спектра солнечного излучения [26]. В 2006 г. экспериментально установлено, что при облучении ультрафиолетовым излучением КТ PbSe один фотон порождает семь электронов, а в 2007-м получено, что один фотон излучения с длиной волны $\lambda = 0,48$ мкм порождает два электрона с КТ кремния. Теоретический анализ показывает, что утилизация длинно- и коротковолновой части спектра солнечного излучения с помощью КТ позволяет достичь эффективности солнечного элемента, близкой к термодинамическому пределу (более 84 %) [27]. Теоретические оценки предсказывают эффективность в 53 % для солнечных элементов с квантовыми точками Ge в Si. Повышение эффективности устройств на основе наногетероструктур Ge/Si становится возможным также благодаря эффектам пространственного квантования [28–30].

В солнечных элементах необходимы массивы квантовых точек с большей плотностью N (для увеличения коэффициента поглощения) и, по возможности, с широким распределением КТ по размерам δL , так как это обеспечит более полное использование солнечного спектра [30].

Применение широкозонных полупроводников в качестве матричного материала НГЭС с КТ позволяет изготавливать СЭ с улучшенными технико-экономическими характеристиками в связи с тем, что [31]:

1) большие значения ширины запрещенной зоны E_g определяют высокую температурную стабильность и высокий температурный рабочий предел создаваемого солнечного элемента;

2) наличие у прямозонных полупроводников групп III–V резкого края основной полосы поглощения, определяемой прямыми оптическими переходами, приводит к возможности получения высокой эффективности преобразования солнечного излучения тонкопленочными СЭ;

3) есть возможность достижения большой радиационной стойкости, так как под действием радиационного излучения в этих материалах не происходит существенного уменьшения низкого значения диффузионной длины неосновных носителей заряда, характерных для данных материалов;

4) большой потенциальный барьер в p – n -переходах на широкозонных материалах групп III–V обуславливает низкие значения токов, что, с одной стороны, обеспечивает большую область линейной зависимости выходной мощности СЭ от светового потока (в области больших световых потоков), а с другой – позволяет получать высокую эффективность при работе в диапазоне низких световых потоков и температур;

5) кроме GaAs, для получения однопереходных СЭ в качестве широкозонного полупроводника перспективно использовать GaP, а в качестве узкозонного для изготовления КТ – Ge, InAs, GaSb, а также твердые растворы на их основе (GexSi1-x, InAsP, GaInSb).

Попытки создания методами молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) и химического осаждения из паровой фазы металлоорганических соединений (МОСVD) высокоэффективных СЭ на основе НГЭС с КТ, где в качестве матричного материала используется GaAs, а материала для квантовых точек – InAs, не увенчались успехом, так как введение КТ не увеличивало, а уменьшало квантовую эффективность СЭ, причем с повышением количества массивов КТ эффективность СЭ уменьшалась [32]. Авторы связывают это с наличием в гетероструктурах деформированных напряженных «смачивающих» слоев узкозонных полупроводников, образующихся между КТ, в которых создаются генерационно-рекомбинационные центры, ответственные за безизлучательные каналы рекомбинации.

Рассмотрим методы, позволяющие получать НГЭС с массивами КТ, не содержащие «смачивающих» слоев в промежутках между КТ.

Метод жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) с импульсным охлаждением подложки (ИОП) основан на процессах кристаллизации и растворения твердого тела в жидкой и газовой фазах [33, 34] и может использоваться для получения различных полупроводниковых НГЭС с КТ.

Сущность данного метода получения эпитаксиальных структур из жидкой фазы заключается: в нагреве раствора-расплава до температуры насыщения; приведении его в контакт с рабочей поверхностью подложки, нагретой до такой же температуры; приведении поверхности подложки, противоположной рабочей, в контакт с теплопоглотителем; проведении кристаллизации многослойных эпитаксиальных структур при использовании растворов-расплавов различного состава путем многократного создания на рабочей стороне подложки импульсов охлаждения величиной, длительностью и скоростью нарастания переднего фронта в интервалах $(0,5-15,0)^\circ\text{C}$, $(5 \cdot 10^{-2} \div 5) \text{ с}$, $(5 \div 0,5) \cdot 10^3 \text{ град./с}$ соответственно; кристаллизации массивов КТ из растворенных материалов с постоянными решеток, отличающимися более чем на 0,6 % от постоянных решеток монокристаллических материалов, на которых они наращиваются.

Метод ЖФЭ с ИОП заключается в том, что тыльная сторона подложки при фиксированной температуре T соприкасается с теплопоглотителем с температурой T_p , меньшей, чем температура подложки на величину $\Delta T = T - T_p$, при этом рабочая поверхность подложки находится в контакте с раствором-расплавом, имеющим насыщение согласно данной фиксированной температуре. Спустя незначительный отрезок времени ($\tau \approx 10^{-3} \div 10^{-1} \text{ с}$), который определяет время импульса охлаждения подложки, теплопоглотитель нагревается до температуры подложки. За время τ на рабочей поверхности подложки происходит кристаллизация нанослоя или массива КТ [35, 36].

Так как постоянные решеток материалов КТ и подложки различны, выращивание КТ осуществляется по механизму Странского – Крастанова, согласно которому в начальный момент роста на подложке формируется

сплошной «смачивающий» слой, у которого с ростом толщины местами возникают механические напряжения с максимумами в середине периода нониуса совершенного строения на гетерогранице. Отсюда плотность КТ лимитируется в основном периодом нониуса совершенного строения. Поскольку кристаллизация осуществляется из жидкой фазы, наличие раствора-расплава, являющегося растворителем в процессе релаксации импульса охлаждения, приводит к формированию структурно совершенных КТ, так как в процессе низкого пересыщения происходит «залечивание» структурных дефектов в растущих КТ в связи с тем, что процесс их формирования осуществляется в условиях, близких к динамическому равновесию. При дальнейшей релаксации импульса охлаждения «смачивающий» слой в промежутке между КТ растворяется [33].

Следующий этап процесса – зарастивание массива КТ наноразмерным слоем матричного материала, называемого спейсерным слоем, выращивая его такой толщиной, которая могла бы обеспечить туннельный переход носителей заряда от одного массива КТ к другому, т. е. по вертикально связанным КТ. Размещение многослойных структур с вертикально связанными КТ в области $p-n$ -перехода приводит к разделению электростатическим полем $p-n$ -перехода носителей заряда, генерируемых этими КТ.

Осуществляется выращивание многослойной $p-n$ -структуры с КТ в одном технологическом процессе, содержащей наноразмерные слои и массивы КТ различной толщины, что достигается путем использования теплопоглотителя, растворов-расплавов разного состава и различных импульсов охлаждения на рабочей поверхности подложки.

Имеется метод на основе ЖФЭ, сущность которого заключается в том, что рост НГЭС с КТ осуществлялся в графитовой кассете «пенального» типа в горизонтальном реакторе в процессе протаскивания подложки под раствором-расплавом при достижении заданной температуры. Эксперименты по эпитаксиальному выращиванию проводились в температурном диапазоне (420–445) °С при скорости охлаждения системы 0,3 град./мин [37].

На наш взгляд, недостатком метода является то, что в условиях проведения процессов, описанных авторами, невозможно получать качественные структуры с воспроизводимыми свойствами.

Один из перспективных методов формирования НГЭС – капельный. Сущность его состоит в том, что на первой стадии процесса на поверхности подложки образуются наноразмерные капли элемента III группы (например, In), а на второй стадии происходит растворение в этих каплях элемента V группы (например, As), в результате чего на подложке образуются наноразмерные кристаллы групп III–V.

Капельный метод, в отличие от традиционной эпитаксии по механизму Странского – Крастанова [38], дает возможность получения изолированных квантовых точек независимо от степени рассогласования периодов решеток и является одним из вариантов кристаллизации по механизму «пар – жидкость – твердое тело», напоминающему изотермическую ло-

кальную жидкофазную эпитаксию с подпиткой из газовой фазы. На качество выращиваемых НГЭС с КТ данным методом не влияет значение расогласования периодов кристаллической решетки подложки и осаждаемого вещества, что позволяет формировать КТ в изопериодных системах и без «смачивающего» слоя.

В последние годы процесс «капельной» эпитаксии активно развивался в условиях молекулярно-лучевой эпитаксии. Однако такие ограничения этого метода, как довольно низкая производительность, сложность и высокая стоимость оборудования, делают привлекательным развитие метода в условиях МОС-гидридной эпитаксии [39]. Одним из достоинств данного метода является то, что при высоком качестве полученных структур их стоимость гораздо ниже, чем в структурах, полученных методом молекулярно-лучевой эпитаксии [40].

Несмотря на явные преимущества, основные недостатки метода – сложность технологического процесса и дороговизна оборудования, комплектующих и материалов по сравнению с методом ЖФЭ с ИОП.

Метод выращивания НГЭС в процессе ЖФЭ с ИОП имеет недорогое оформление и обладает технологической простотой [41], при этом позволяет получать массивы квантовых точек, не содержащих упругонапряженных «смачивающих» слоев в промежутках между КТ, что дает возможность осуществлять процесс формирования КТ в условиях, близких к равновесию, и тем самым выращивать структуры с минимальными генерационно-рекомбинационными токами, а это способствует получению высокоэффективных СЭ с эффективностью более 30 %.

ВЫВОДЫ

1. Приведенный обзор продемонстрировал, что в современном мире одна из самых быстроразвивающихся отраслей промышленности – фотоэнергетика, которая является не только перспективным направлением возобновляемой энергетики, но и энергетической отрасли в целом. Причем себестоимость производимой солнечной энергии стремительно приближается к цене за электроэнергию, генерируемую традиционными методами. Продемонстрирована ситуация, связанная с тенденциями мирового развития отрасли за последние несколько лет.

2. Рассмотрены аспекты развития эффективности современных исследовательских солнечных элементов, изготовленных из различных материалов, использующие инновационные технологические решения на основе данных, предоставленных Национальной лабораторией по возобновляемой энергетике (NREL, США) в 2017 г. Для удобства исследовательские солнечные элементы разделяли на четыре технологические группы. Обсуждены преимущества и недостатки исследовательских солнечных элементов каждой группы, включая особенности их производства и перспективы развития, оценена их максимальная эффективность за 2017 г.

3. Показана возможная альтернатива развитию современных высокоэффективных солнечных элементов на основе наногетероэпитаксиальных структур с квантовыми точками, обсуждены преимущества и недостатки методов их получения, в том числе методом жидкофазной эпитаксии с импульсным охлаждением подложки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Jeger-Waldau, A. PV Status Report 2012 / A. Jeger-Waldau // Luxembourg: Publications Office of the European Union. 2012. 45 p.
2. Jeger-Waldau, A. PV Status Report 2014 / A. Jeger-Waldau // Luxembourg: Publications Office of the European Union. 2014. 50 p.
3. Jeger-Waldau, A. PV Status Report 2017 / A. Jeger-Waldau // Luxembourg: Publications Office of the European Union. 2017. 90 p.
4. Purification of Metallurgical Silicon up to “Solar” Mark Silicon / I. I. Maronchuk [et al.] // International Journal of Renewable Energy Research. 2016. Vol. 6, No 4. P. 1227–1231.
5. The Development of a Purification Technique of Metallurgical Silicon to Silicon of the Solar Brand / I. I. Maronchuk [et al.] // Russian Microelectronics. 2016. Vol. 45, No 8–9. P. 570–575.
6. Данные, представленные Национальной лабораторией по возобновляемой энергетике (NREL, США) о разработках солнечных элементов с максимальной эффективностью за 2017 год [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Best_Research-Cell_Efficiencies.png. Дата доступа: 20.02.2018.
7. III–V Multijunction Solar Cells for Concentrating Photovoltaics / H. Cotal [et al.] // Energy Environ. Sci. 2009. Vol. 2, No 2. P. 174–192.
8. Алферов, Ж. И. Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики / Ж. И. Алферов, В. М. Андреев, В. Д. Румянцев // ФТП. 2004. Т. 38, вып. 8. С. 937–948.
9. Fraas, L. M. Solar Cells and their Applications / L. M. Fraas, L. D. Partain. 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc., Publication. 2010. 648 p. <https://doi.org/10.1002/9780470636886>.
10. High Efficiency III–V Solar Cells / K. W. J. Barnham [et al.] // Phys. Lett. 2000. Vol. 76. P. 143.
11. Solar Cell for NASA Rainbow Concentrator / M. A. Smith [et al.] // Proc. 28th PVSC, Anchorage, Alaska, 2000. P. 1139.
12. Fan, J. C. C. Thin-Film GaAs Solar Cells / J. C. C. Fan, C. O. Bozler, R. W. McClelland // 15th IEEE Photovoltaic Spec. Conference (Kissimmee, Fla, 1981): Conf. Rec. New York. 1981. P. 375–377.
13. Грибов, Б. Г. Новые технологии получения поликристаллического кремния для солнечной энергетики / Б. Г. Грибов, К. В. Зиновьев // Известия вузов. Электроника. 2008. № 3. С. 10–17.
14. Разработка методики очистки металлургического кремния до кремния марки «солнечный» / И. И. Марончук [и др.] // Известия вузов. Материалы электронной техники. 2015. Т. 18, № 3. С. 189–194.
15. Теруков, Е. И. Перспективы солнечной энергетики в России / Е. И. Теруков, О. И. Шуткин // Вестник Российской академии наук. 2016. Т. 86, № 3. С. 195–202.
16. Sark, W. Van. Physics and Technology of Amorphous-Crystalline Heterostructure Silicon Solar Cells / W. Van Sark, L. Korte, F. Roca. Berlin: Springer, 2012. 574 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-22275-7>.
17. Солнечная фотовольтаика: современное состояние и тенденции развития / В. А. Меличко [и др.] // Успехи физических наук. 2016. Т. 186, № 8. С. 801–852.
18. Features of KF and NaF Postdeposition Treatments of Cu(In, Ga)Se₂ Absorbers for High Efficiency Thin Film Solar Cells / P. Reinhard [et al.] // Chem. of Mater. 2015. Vol. 27, No 16. P. 5755–5764.
19. Bonnet, D. Cadmium Telluride – Material for Thin Film Solar Cells / D. Bonnet, P. Meyers // J. Mater. Res. 1998. Vol. 13, No 10. P. 2740–2753.

20. Новая солнечная технология – дорожная карта LCOE Катар [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://bxhorn.com/2014/lcoe/>. Дата доступа: 20.02.2018.
21. Integrated Perovskite/Bulk-Heterojunction Toward Efficient Solar Cells / Y. Liu [et al.] // *Nano Lett.* 2015. Vol. 15, No 1. P. 662–668.
22. Snaith, H. J. Perovskites: the Emergence of a New Era for Low-Cost, High-Efficiency Solar Cells / H. J. Snaith // *J. Phys. Chem. Lett.* 2013. Vol. 4, No 21. P. 3623–3630.
23. Marti, A. Quantum Dot Super Solar Cell / A. Marti, L. Cuadra, A. Luque // *Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE Photovoltaic Specialists Conference-2000 (Cat. No 00CH37036)*. 363 p. <https://doi.org/10.1109/pvsc.2000.916039>.
24. Intermediate Band Photovoltaics Overview / L. Cuadra [et al.] // 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Osaka, Japan, May 11–18, 2003. PCD IPL-B2-01.
25. Жидкофазная эпитаксия и свойства наногетероструктур на основе соединений III–V / И. Е. Марончук [и др.] // *Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии: сб. наук. пр.* 2012. Т. 10, № 1. С. 77–88.
26. Nozik, A. J. Quantum Dot Super Solar Cells / A. J. Nozik // *Physica E*. 2002. Vol. 14, No 1–2. P. 115–120.
27. Nozik, A. Believes Quantum-Dot Solar Power Could Boost Output in Cheap Photovoltaics / A. Nozik. NY: *Technology Review*, 2007. 49 p.
28. Luque, A. Increasing the Efficiency of Ideal Solar Cells by Photon Induced Transitions at Intermediate Levels / A. Luque, A. Marti // *Phys. Rev. Lett.* 1997. Vol. 78, No 26. P. 5014–5017.
29. Enhanced Quantum Efficiency of Solar Cells with Self-Assembled Ge Dots Stacked in Multi-layer Structure / A. Alguno [et al.] // *Appl. Phys. Lett.* 2003. Vol. 83, No 6. P. 1258–1260.
30. Эффективность преобразования солнечной энергии солнечным элементом на основе Si с квантовыми точками Ge / А. В. Войцеховский [и др.] // *Прикладная физика*. 2010. Т. 6, № 2. С. 96–102.
31. Сверхвысокоэффективные солнечные элементы / Т. Ф. Кулюткина [и др.] // *Нові технології*. 2011. Т. 3, № 33. С. 9–16.
32. Алферов, Ж. И. История и будущее полупроводниковых гетероструктур / Ж. И. Алферов // *ФТП*. 1998. Т. 32, № 1. С. 3–18.
33. Способ выращивания эпитаксиальных наногетероструктур с массивами квантовых точек: пат. № 94699 Украины: Кл. С 30В 19/00, С 30В 29/00, Н 01L 21/20 / И. Е. Марончук, Т. Ф. Кулюткина, И. И. Марончук. Дата публ. 10.06.2011.
34. Deposition by Liquid Epitaxy and Study of the Properties of Nano-Heteroepitaxial Structures with Quantum Dots for High Efficient Solar Cells / D. Dimova-Malinovska [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series*. 2014. Vol. 558. P. 012049.
35. Study of the Morphology of Ge Quantum Dots Grown by Liquid Phase Epitaxy / D. Dimova-Malinovska [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series*. 2016. Vol. 700. P. 012043.
36. Improvement of Growing of Ge QDs by the Method of Liquid Phase Epitaxy / D. Dimova-Malinovska [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series*. 2017. Vol. 794. P. 012012.
37. Квантовые точки InSb/InAs, полученные методом жидкофазной эпитаксии / К. Д. Моисеев [и др.] // *Письма в ЖТФ*. 2007. Т. 33, № 7. С. 50–57.
38. In(Ga)As/GaAs Quantum Dots for Optoelectronic Devices / K. Sears [et al.] // *Proc. SPIE 6415, Micro- and Nanotechnology: Materials, Processes, Packaging, and Systems III*. Adelaide, Australia, 2006. Vol. 641506. <https://doi.org/10.1117/12.706526>.
39. Разработка основ капельного метода формирования массивов квантовых точек в системе InAs/GaAs применительно к условиям МОС-гидридной эпитаксии / Р. Х. Акчурин [и др.] // *Материалы электронной техники*. 2011. № 3. С. 21–26.
40. Влияние температуры осаждения индия на морфологию наноразмерных гетероструктур InAs/GaAs, полученных капельным методом в условиях МОС-гидридной эпитаксии / М. А. Сурнина [и др.] // *Прикладная физика*. 2015. № 2. С. 97–101.
41. An Obtaining of Nanoheteroepitaxial Structures with Quantum Dots for High Effective Photovoltaic Devices, Investigation of their Properties / S. Y. Bykovsky [et al.] // *ТЕКА. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. Polish Academy of Sciences. 2014. Vol. 14, No 1. P. 154–163.

REFERENCES

- Jeger-Waldau A. (2012) *PV Status Report 2012*. Luxembourg, Publications Office of the European Union. 45.
- Jeger-Waldau A. (2014) *PV Status Report 2014*. Luxembourg, Publications Office of the European Union. 50.
- Jeger-Waldau A. (2017) *PV Status Report 2017*. Luxembourg, Publications Office of the European Union. 90.
- Maronchuk I. I., Maronchuk I. E., Sanikovich D. D., Gochua K. V. (2016) Purification of Metallurgical Silicon up to “Solar” Mark Silicon. *International Journal of Renewable Energy Research*, 6 (4), 1227–1231.
- Maronchuk I. I., Maronchuk I. E., Sanikovich D. D., Shirokov I. B. (2016) The Development of a Purification Technique of Metallurgical Silicon to Silicon of the Solar Brand. *Russian Microelectronics*, 45 (8–9), 570–575. <https://doi.org/10.1134/s1063739716080102>.
- Data Presented by the National Renewable Energy Laboratory (NREL, USA) on the Development of Solar Cells of Maximum Efficiency for 2017. Available at: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Best_Research-Cell_Efficiencies.png. (Accessed 20 February 2018) (in Russian).
- Cotal H., Fetzer C., Boisvert J., Kinsey G., King R., Hebert P., Yoon H., Karam N. (2009) III–V Multijunction Solar Cells for Concentrating Photovoltaics. *Energy Environ. Sci.*, 2 (2), 174–192. <https://doi.org/10.1039/b809257e>.
- Alferov Zh. I., Andreev V. M., Rummyantsev V. D. (2004) Trends and Prospects for the Development of Solar Photovoltaics. *Semiconductors*, 38 (8), 899–908. <https://doi.org/10.1134/1.1787110>.
- Fraas L. M., Partain L. D. (2010) *Solar Cells and their Applications*. 2nd edition. John Wiley & Sons, Inc., Publication. 648. <https://doi.org/10.1002/9780470636886>.
- Barnham K. W. J., Bushnell D. B., Connolly J. P., Ekins-Daukes N., Klufinger B. G., Mazzer M., Nelson J. (2000) High Efficiency III–V Solar Cells. *Phys. Lett.*, (76), 143.
- Smith M. A., Sinharoy S., Weizer V. G., Khan O., Pal A., Clark E. B., Wilt D. M., Scheiman D. A., Mardesich N. (2000) Solar Cell for NASA Rainbow Concentrator. *Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE Photovoltaic Specialists Conference-2000* (Cat. No 00CH37036), 1139. <https://doi.org/10.1109/pvsc.2000.916088>.
- Fan J. C. C., Bozler C. O., McClelland R. W. (1981) Thin-Film GaAs Solar Cells. *15th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (Kissimmee, Fla, 1981)*. Rec. New York, 375–377.
- Gribov B. G., Zinov’ev K. V. (2008) New Technologies for Production of Polycrystalline Silicon for Solar Power Engineering. *Semiconductors*, 42 (3), 1475–1479. <https://doi.org/10.1134/s1063782608130046>.
- Maronchuk I. I., Maronchuk I. E., Sanikovich D. D., Shirokov I. B. (2015) Development of Clearing Technique of Metallurgical Silicon to Solar Grade Silicon. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Materialy Elektronnoi Tekhniki = Materials of Electronics*, 18 (3), 189–194 (in Russian). <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2015-3-189-194>.
- Terukov E. I., Shutkin O. I. (2016) Perspectives of Solar Energy in Russia. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 86 (2), 57–63. <https://doi.org/10.1134/s1019331616020052>.
- Sark W. Van, Korte L., Roca F. (2012) *Physics and Technology of Amorphous-Crystalline Heterostructure Silicon Solar Cells*. Berlin, Springer. 574. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-22275-7>.
- Melichko V. A., Shalin A. S., Mukhin I. S., Kovrov A. E., Krasilin A. A., Vinogradov A. V., Belov P. A., Simovskii C. R. (2016) Solar Photovoltaics: the Current State and Development Trends. *Physics-Uspekhi*, 59 (8), 727–772. <https://doi.org/10.3367/ufne.2016.02.037703>.
- Reinhard P., Bissig B., Pianezzi F., Avancini E., Hagendorfer H., Keller D., Fuchs P., Döbeli M., Vigo C., Crivelli P., Nishiwaki S., Buecheler S., Tiwari A. N. (2015) Features of KF and NaF Postdeposition Treatments of Cu(In, Ga)Se₂ Absorbers for High Efficiency Thin Film Solar Cells. *Chemistry of Materials*, 27 (16), 5755–5764. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.5b02335>.
- Bonnet D., Meyers P. (1998) Cadmium Telluride – Material for Thin Film Solar Cells. *Journal of Materials Research*, 13 (10), 2740–2753. <https://doi.org/10.1557/jmr.1998.0376>.
- New Solar Technology – Roadmap LCOE Qatar*. Available at: <http://bxhorn.com/2014/lcoe/> (Accessed 20 February 2018) (in Russian).
- Liu Y., Hong Z., Chen Q., Chang W., Zhou H., Song T. B., Young E., Yang Y. M., You J., Li G., Yang Y. (2015) Integrated Perovskite/Bulk-Heterojunction Toward Efficient Solar Cells. *Nano Letters*, 15 (1), 662–668. <https://doi.org/10.1021/nl504168q>.
- Snaith H. J. (2013) Perovskites: the Emergence of a New Era for Low-Cost, High-Efficiency Solar Cells. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 4 (21), 3623–3630. <https://doi.org/10.1021/jz4020162>.

23. Marti A., Cuadra L., Luque A. (2000) Quantum Dot Super Solar Cell. *Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE Photovoltaic Specialists Conference-2000 (Cat. No 00CH37036)*. 363. <https://doi.org/10.1109/pvsc.2000.916039>.
24. Cuadra L., Marti A., Lopez N., Luque A. (2003) Intermediate Band Photovoltaics Overview. *3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Osaka, Japan, May 11–18, 2003*, PCD IPL-B2-01.
25. Maronchuk I. E., Maronchuk I. I., Kulyutkina T. F., Bykovsky S. Yu. (2012) Liquid-Phase Epitaxy and Properties of Nanoheterostructures Based on III–V Compounds. *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotekhnologii: Sbornik Nauchnykh Trudov* [Nanosystems, Nanomaterials, Nanotechnologies: Collected Scientific Works], 10 (1), 77–88 (in Ukrainian).
26. Nozik A. J. (2002) Quantum Dot Super Solar Cells. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, 14 (1–2), 115–120. [https://doi.org/10.1016/s1386-9477\(02\)00374-0](https://doi.org/10.1016/s1386-9477(02)00374-0).
27. Nozik A. (2007) Believes Quantum-Dot Solar Power Could Boost Output in Cheap Photovoltaics. NY, Technology Review. 49.
28. Luque A., Marti A. (1997) Increasing the Efficiency of Ideal Solar Cells by Photon Induced Transitions at Intermediate Levels. *Physical Review Letters*, 78 (26), 5014–5017. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.78.5014>.
29. Algono A., Usami N., Ujihara T., Fujiwara K., Sazaki G., Nakajima K., Shiraki Y. (2003) Enhanced Quantum Efficiency of Solar Cells with Self-Assembled Ge Dots Stacked in Multilayer Structure. *Applied Physics Letters*, 83 (6), 1258–1260. <https://doi.org/10.1063/1.1600838>.
30. Voitsekhovskii A. V., Grigoriev D. V., Pchelyakov O. P., Nikiforov A. I. (2010) Efficiency of Conversion of Solar Energy by a Solar Cell Based on Si with Ge Quantum Dots. *Prikladnaya Fizika = Applied Physics*, 6 (2), 96–102 (in Russian).
31. Kulyutkina T. F., Maronchuk I. I., Velichko O. V. [et al.] (2011) Ultra-High-Efficiency Solar Cells. *Novi Tekhnologii = New Technologies*, 3 (33), 9–16 (in Russian).
32. Alferov Zh. I. (1998) The History and Future of Semiconductor Heterostructures. *Semiconductors*, 32 (1), 1–14. <https://doi.org/10.1134/1.1187350>.
33. Maronchuk I. E., Kulyutkina T. F., Maronchuk I. I. *Method for Growing Epitaxial NanoHeterostructures with Arrays of Quantum Dots*. Patent of Ukraine No 94699 (in Russian).
34. Dimova-Malinovska D., Lovchinov K., Maronchuk I. I., Maronchuk I. E., Sanikovich D. D. (2014) Deposition by Liquid Epitaxy and Study of the Properties of Nano-Heteroepitaxial Structures with Quantum Dots for High Efficient Solar Cells. *Journal of Physics: Conference Series*, 558, 012049. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/558/1/012049>.
35. Dimova-Malinovska D., Nichev H., Maronchuk I. I., Maronchuk I. E., Sanikovich D. D. (2016) Study of the Morphology of Ge Quantum Dots Grown by Liquid Phase Epitaxy. *Journal of Physics: Conference Series*, 700, 012043. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/700/1/012043>.
36. Dimova-Malinovska D., Nichev H., Maronchuk I. I., Sanikovich D. D., Cherkashin A. S. (2017) Improvement of Growing of Ge QDs by the Method of Liquid Phase Epitaxy. *Journal of Physics: Conference Series*, 794, 012012. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/794/1/012012>.
37. Moiseev K. D., Parkhomenko Ya. A., Ankudinov A. V., Gushchina E. V., Mikhailova M. P., Titkov A. N., Yakovlev Yu. P. (2007) InSb/InAs Quantum Dots Grown by Liquid Phase Epitaxy. *Technical Physics Letters*, 33 (7), 295–298. <https://doi.org/10.1134/s1063785007040074>.
38. Sears K., Mokkapati S., Buda M., Tan H. H., Jagadish C. (2006) In(Ga)As/GaAs Quantum Dots for Optoelectronic Devices. *Proc. SPIE 6415, Micro- and Nanotechnology: Materials, Processes, Packaging, and Systems III*, 641506. <https://doi.org/10.1117/12.706526>.
39. Akchurin R. Kh., Boginskaya I. A., Marmalyuk A. A., Ladugin M. A., Surmina M. A. (2011) Development of Fundamentals of Droplet Epitaxy for the Formation of Quantum Dot Arrays in the InAs/GaAs System under MOVPE Conditions. *Russian Microelectronics*, 41 (8), 453–458. <https://doi.org/10.1134/s1063739712080021>.
40. Surmina M. A., Sizov A. L., Akchurin R. Kh., Bagayev T. A. (2015) Influence of the Indium Deposition Temperature on the Morphology of Nano-Sized InAs/GaAs Heterostructures Obtained by the Drip Method under the Conditions of MOS Hydride Epitaxy. *Prikladnaya Fizika = Applied Physics*, (2), 97–101 (in Russian).
41. Bykovsky S. Y., Bondarec S. V., Maronchuk I. I., Velchenko A. A. (2014) An Obtaining of Nanoheteroepitaxial Structures with Quantum Dots for High Effective Photovoltaic Devices, Investigation of their Properties. *TEKA. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. Polish Academy of Sciences*, 14 (1), 154–163.