

(<sup>1</sup>Национальная нанотехнологическая лаборатория открытого типа КазНУ

им. аль-Фараби МОН РК, г. Алматы, Казахстан;

<sup>2</sup>Физико-технический институт, г. Алматы, Казахстан)

## **ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И НАНОСТРУКТУР**

### **Аннотация**

В настоящей работе приведен обзор литературы по исследованиям в области создания и применения полупроводниковых приборных структур. Рассмотрены методы модификации и создания наноструктур, такие, как ионные пучки, лазерная литография и инжиниринг дефектов. Рассмотрены методы синтеза наноструктур: рост из газовой фазы по самокаталитическому механизму и с участием катализаторов, лазерное распыление, химическое осаждение из газовой фазы и молекулярно-лучевая эпитаксия, синтез с использованием наншаблонов (например, нанопористый оксид алюминия), электроспиннинг, травление и др. Проведен обзор работ в области создания детекторов для регистрации света и заряженных частиц, резонансных туннельных диодов для работы при больших токах и частотах до 1 ТГц; по созданию тонкопленочных транзисторов для дисплеев с активной матрицей на светодиодах и органических светодиодах, по развитию методов улучшения светодиодов и формирования светового потока из активной области, по разработке подстраиваемых полупроводниковых лазеров и источников на терагерцовых частотах для различных применений. Приведены сведения по развитию молекулярной электроники и органическим полупроводникам по полупроводниковым датчикам и сенсорам, термоэлектрическим и пьезоэлектрическим генераторам, фотоэлектрохимическим ячейкам для расщепления воды, по использованию полупроводниковых квантовых точек. Значительное развитие в последние годы получили фотоника и плазмоника, синтез фотонных кристаллов и плазмонных структур. Наиболее интенсивно развивающимся направлением в полупроводниковой электронике является совершенствование и создание солнечных элементов. Приведен обзор работ по солнечным элементам на основе кремния, на соединениях  $A^{III}B^V$ , на теллуриде кадмия, широкого класса тонкопленочных солнечных элементов на основе  $CuIn_xGa_{(1-x)}Se_2$ .

**Ключевые слова:** полупроводники, наноструктура, модификация, электроника.

**Кілт сөздер:** жартылай өткізгіштер, нанокұрылым, түрлендіру, электроника.

**Keywords:** Semiconductors, nanostruktura, updating, electronics.

## 1 Введение

Полупроводники и полупроводниковые приборные структуры являются основой современной техники и промышленности. Уменьшение размеров приборных структур в микроэлектронике много лет следует известному закону Мура по удвоению транзисторов на одном кристалле каждые 24 месяца, и в настоящее время число транзисторов в процессорах достигло  $\sim 5 \times 10^9$ . На их основе разработаны полупроводниковые устройства для широкого спектра применений. Наблюдается рост исследований по разработке полупроводниковых наноструктур, структур с квантовым ограничением носителей, структур для плазмоники и фотоники. Новые полупроводниковые материалы и наноструктуры позволяют получать более совершенные транзисторы, диоды, солнечные элементы, сенсоры и другие приборные структуры, которые находят применение во многих отраслях. В настоящей работе мы приведем краткий обзор исследований последних лет в области создания и применения полупроводниковых материалов.

## 2 Методы модификации и создания приборных структур

Существуют два подхода синтеза наноструктур: традиционный для полупроводниковой электроники метод изготовления «сверху вниз» и более характерный для нанотехнологий подход «снизу вверх». Первый подход реализуется в процессе изготовления микросхем с применением литографии, ионной имплантации, диффузии, травления и т.д. Второй подход использует синтез наноразмерных структур путем упорядоченной сборки или самоорганизации атомов и молекул.

Наноструктуры могут быть получены методами «сверху вниз», такими, как ионные пучки, лазерная литография, инжиниринг дефектов. Эти методы используются для структурных и химических модификаций твердых тел и поверхностей, для селективного травления, активации и деформации поверхности, ионной имплантации, ионного перемешивания, синтеза на поверхности и в приповерхностных областях, аморфизации и пр. [1-2]. Путем ионно-стимулированного осаждения из газовой фазы возможно контролируемое с высокой точностью нанесение тонких пленок либо наноструктур с диаметром от 7 нм [3-4]. Радиационные эффекты в наноструктурах значительно отличаются от объемных [5], что можно использовать для модификации свойств материала. Методы лазерного создания трафаретов не требуют вакуума, в отличие от электронной и ионной литографии, имеют низкую стоимость, позволяют получать 2D [6-8] и 3D [9, 10] наноструктуры большой площади. С применением различных методов синтеза «снизу вверх» - химическое осаждение из газа (CVD) [11], синтез из газовой фазы по механизму «газ-твердое» и «газ-жидкость-твердое», молекулярно-лучевая эпитаксия, синтез с использованием наншаблонов, электроспиннинг, травление [12], лазерное распыление [13] - могут быть получены различные наноструктуры.

Одномерные наноструктуры (1D) часто применяются в сенсорах и перспективны для солнечных элементов (СЭ), пьезогенераторов, фотоники и оптоэлектроники. Преимуществами 1D структур является высокое кристаллическое совершенство и меньшее влияние границ зерен, большая удельная поверхность, более простые методы функционализации, возможность подгонки чувствительности и селективности к внешним

воздействиям путем управления диаметром 1D структуры либо с использованием полевого эффекта.

Электронный транспорт в 1D-структурах отличается от объемного из-за размерных эффектов и влияния поверхности, на которой имеются локализованные состояния - доноры или акцепторы, ловушки и центры рассеяния носителей [14]. Поэтому электрические свойства нанонитей могут контролироваться путем модификации поверхности, например, ее пассивацией [15, 16] или нанесением слоев адсорбированных молекул. В случае осаждения карбоксильных групп проводимость нанонитей изменялась на фактор  $10^6$  и выпрямляющий контакт превращался в омический [17]. Методы контролируемого изменения свойств поверхностными дефектами разработаны для GaAs, SnO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub> и других материалов [18]. Вариацией режимов роста можно управлять свойствами материала.

### **3 Диоды, транзисторы, тонкопленочные транзисторы**

Технология полупроводниковых кремниевых детекторов, широко применяемых для регистрации света и заряженных частиц, достигла высокого уровня. Детекторы выполняются в виде плоского и тонкого  $n^+p$ -перехода с малым мертвым слоем. Толщина базы определяется назначением прибора и при необходимости регистрации частиц высоких энергий база может достигать в толщину несколько миллиметров. Компактные кремниевые энергодисперсионные детекторы потеснили фотоумножители (ФЭУ), поскольку могут работать в режиме счета фотонов при комнатной температуре с высоким отношением сигнал/шум [19-20].

Улучшается конструкция резонансных туннельных диодов, состоящих из квантовых барьеров, разделенных квантовой ямой, в которой есть один или несколько уровней. Структуры на квантовых ямах могут работать при комнатной температуре, на больших токах и частотах до 1 ТГц [21-22].

Плоские дисплеи вытеснили электронно-лучевые трубки с рынка мониторов, и оптимизация технологий создания матриц для дисплеев весьма актуальна. Разрабатываются тонкопленочные транзисторы для дисплеев с активной матрицей на светодиодах (LED) и органических светодиодах (OLED), перспективные для замены поликристаллических кремниевых транзисторов, имеющих недостаточно однородные свойства. Созданы тонкопленочные ZnO-транзисторы [23] и аморфные транзисторы In-Ga-Zn-O (IGZO) (с соотношением In:Ga:Zn=1.1:1.1:0.9) [24] с высокими подвижностями носителей и однородными свойствами на большой площади гибких подложек, перспективные для применения в плоских дисплеях с диагональю более 70 дюймов (170 см и более), с высоким разрешением (4000×2000) и быстрым откликом (>240 Гц). Для исключения дорогостоящего индия разрабатываются растворы Zn-Sn-O, Ga-Zn-Sn-O и др. [23], оптимизируются свойства слоев [25-26]. Для увеличения экономической эффективности производства активных матриц большой площади исследуются простые методы синтеза (химическое осаждение из водных растворов, струйная печать и метод центрифугирования) [27-29].

#### 4 Светодиоды, лазеры и терагерцовые ( $10^{12}$ ) излучатели

Полупроводниковые светодиоды (LED) в настоящее время широко используются для подсветки, например, в дисплеях, в специализированном, общем и декоративном освещении, постепенно вытесняя лампы накаливания. LED могут собираться в панели большой площади и произвольной формы, обеспечивают выбор любого цвета и цветовых температур, имеют высокие к.п.д., скорости включения и выключения, широкий диапазон рабочих температур ( $-20^{\circ}\text{C} \div 85^{\circ}\text{C}$ ), длительный срок службы - до 50000 часов.

Основными факторами повышения эффективности LED является достижение максимального выхода света из области генерации за счет уменьшения полного внутреннего отражения, внутреннего поглощения и блокирование света контактами. Методы повышения выхода эмиссии света из LED включают создание оптических резонаторов, брегговских решеток, нанотекстурирование внешней и внутренней поверхности LED, нанесение упорядоченных слоев микросфер, микропирамид, наностержней, микролинз, фотонных кристаллов и использование поверхностного плазмонного резонанса [30].

Лазеры на квантовых точках (КТ) имеют высокие характеристики, поскольку энергетический спектр КТ подобен атомарному, и процессы поглощения или излучения света в КТ очень интенсивны из-за большой плотности состояний в узких зонах. КТ позволяют создать полупроводниковые лазеры с пороговым током для генерации стимулированного излучения до  $\sim 1 \text{ А/см}^2$ , что на 2 порядка ниже обычных величин [31].

Дополнительные эффекты появляются при упорядоченной сборке КТ в 1D÷3D сверхструктуры – искусственные кристаллы для создания следующего поколения приборов нанoeлектроники и оптоэлектроники [32]. Технологические методы получения упорядоченных массивов КТ включают спонтанный синтез при росте напряженных материалов, синтез методами молекулярной и химической эпитаксии, CVD, электронно- и ионно-лучевую литографию, синтез с помощью атомно-силового микроскопа, химическое и электрохимическое травление и многие другие методы [33].

На ИК-диапазон 1.9÷6 микрон, весьма важный для спектроскопии и передачи информации, разработаны материалы  $A^2B^6$  (ZnSe, ZnS, CdSe, CdS, ZnTe) и тройные растворы (CdMnTe, CdZnTe, ZnSSe), легированные атомами переходных металлов, для изготовления лазеров с эффективностью до 70% и пиковой мощностью до 1 ГВт [34].

Весьма актуальна разработка компактных, перестраиваемых и когерентных источников на терагерцовых ( $10^{12}$ ) частотах [35]. Соответствующий диапазон длин волн 0.03÷3 мм расположен между СВЧ и ИК диапазонами. Благодаря проникновению терагерцового излучения через легкие материалы такие источники могут найти применение в системах сканирования, медицинских томографах, системах контроля качества материалов. Для создания терагерцовых источников излучения перспективным является использование двумерных плазмонов в полупроводниковых наногетероструктурах. Пока одночиповый плазмонный ТГц-источник имеет мощность примерно в 30 раз меньше, чем ртутная лампа, но потребляет энергии на три порядка

ниже [35]. Поэтому возможно дальнейшее повышение мощности излучения на несколько порядков при сохранении разумной мощности потребления.

## **5 Молекулярная электроника и органические полупроводники**

Биоэлектроника и биофотоника являются быстро развивающимися областями [36]. Среди большого количества белков, изученных для создания биоэлектронных устройств, внимание привлекают бактериородопсин (белок, преобразующий световую энергию в химическую) и бактериальные фотосинтетические реакционные центры. Бактериородопсин в отсутствие специфической для растений светособирающей системы позволяет использовать только 0.1-0.5% солнечного света по сравнению с его эффективностью 5% в растениях. Нано-биотехнологический подход с применением полупроводниковых и металлических наночастиц, сопряженных с биосистемой, может повысить потенциал светочувствительных белков. Достигнутые на сегодня значения фототока не превышают 0.4 мкА/см<sup>2</sup>, однако имеется значительный резерв для развития.

Гибкие структуры на органических полупроводниках демонстрируют хорошие перспективы применения в различных областях. Их можно создавать путем струйной печати, что является весьма привлекательным для крупномасштабного производства. Производство активных дисплеев на органических светодиодах (OLED) в настоящий момент вышло на промышленный уровень, созданы прототипы гибких и прозрачных дисплеев. Эффективность OLED сравнима с эффективностью LED на неорганических полупроводниках [37], хотя процессы фотонных потерь и замораживание экситонов все еще ограничивают эффективность и яркость OLED.

## **6 Полупроводниковые датчики и сенсоры**

Наноструктуры имеют широкие возможности в области аналитики и создания сверхчувствительных сенсоров, для биомолекулярного распознавания и сепарации [38]. Чувствительность сенсоров может быть улучшена при использовании 1D-архитектуры как обладающей большим отношением поверхности к объему, с использованием легирования, функционализации металлическими наночастицами. Например, газовые датчики на TiO<sub>2</sub>, с высокой чувствительностью к этанолу, парам монооксида углерода, водорода, метана, ацетона и пр., находят применение в различных областях: биомедицина, химия, охрана окружающей среды, продукты питания и пр. [39-41].

## **7 Термоэлектрические и пьезоэлектрические генераторы**

Известно, что термоэлектрическая эффективность повышается при понижении теплопроводности материала. Термоэлектрическая эффективность нанонити может быть на порядок выше, чем в объемном материале [42] за счет поверхностного рассеяния фононов. Поэтому 1D структуры перспективны для термогенераторов [43]. Кремниевые 1D нанонити 20×20 нм имеют в 100 раз большую термоэлектрическую эффективность,

чем объемный материал [44]. Коэффициент термо э.д.с. нанонити ZnO диаметром 20-40 нм почти в два раза выше, чем в объемном материале [45]. Солнечные термоэлектрические генераторы могут быть по эффективности сравнимы с СЭ [46-47]. Достигнута эффективность термоэлектрического генератора 4.6% при освещении AM1.5 (1000 Вт/м<sup>2</sup>) [46]. В [48] описан простой способ изготовления термоэлектрического генератора на основе наноструктурированных порошков в полимерной матрице с напряжением холостого хода 51 мВ и мощностью 48 нВт при разности температур 14°C.

## **8 Фотоэлектрохимические ячейки, фотоэлектролиз воды.**

В [49] приведен обзор наноструктурированных фотоэлектрохимических ячеек для расщепления молекул воды на кислород и водород под действием солнечной радиации. Для фотоэлектролиза воды необходимо, по крайней мере, 1.23 эВ энергии. В оптимальной фотоэлектрохимической ячейке зоны полупроводника должны иметь подходящее расположение. Теоретически эффективность преобразования солнечной энергии в электрическую может достигать 30.7% при использовании систем с одним переходом [50]. Однако достигнутая на сегодня эффективность (10-12%) [51] намного ниже теоретического предела. Идеальный материал для фотохимической ячейки пока не разработан, проводятся исследования 1D÷3D наноструктур из TiO<sub>2</sub> [52], нано  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CdSe [53], WO<sub>3</sub> [54], InP [55]. Подбираются комбинации других материалов с взаимно дополняющими свойствами для повышения эффективности и стабильности функционирования [56-58].

## **9 Квантовые точки в медицине**

КТ используются *in vivo* (в организме) и *in vitro* (в лабораторных условиях) исследованиях. Неполный, но впечатляющий список возможного применения КТ в биомедицине включает: перенос лекарств и создание меток для маркировки, отслеживание переноса веществ внутри организма, маркеры для генной терапии, агенты для гипертермии и контрастные вещества для магнитно-резонансной томографии, *in vivo* обнаружение и локализация заболеваний, избирательная тепловая обработка патогенных клеток, фотосенсибилизация лекарства и селективное повреждение ткани-мишени, резонансная передача энергии флуоресценции для фотодинамической терапии [59]. Полупроводниковые КТ все более широко используются для получения *in vivo* изображений внутренних тканей и органов [60]. Нетоксичные, стойкие к фотообесцвечиванию, с большим сечением поглощения света, с узкой полосой фотолуминесценции (ФЛ), высоким квантовым выходом и большим стоксовским сдвигом КТ могут быть изготовлены из С [61] и Si [62], CdTe/CdSe/ZnSe и CdSeTe/CdZnS [63], CdTe/CdS [64] CdTe/CdSe [65], CuInSe<sub>2</sub>/ZnS [66], InAs/ZnCdS [67], InAs/ZnS [68], InP/ZnS [69], PbS/CdS [70]. КТ в ближнем ИК-диапазоне успешно применяются для получения изображения опухолей [71-73]. Перспективно применение КТ для медицинских *in vitro* исследований и тестов на различные биомаркеры, протеины, метаболиты, нуклеиновые кислоты [74].

## 10 Фотоника

Со времени появления концепции фотонных кристаллов [75-76] исследование их свойств и методов получения ведется весьма интенсивно. Фотонные кристаллы характеризуются периодическим изменением оптических свойств по объему кристалла с таким периодом, что возникает [брэгговская дифракция](#) света. Благодаря своей структуре фотонные кристаллы обладают уникальными свойствами, такими как фотонная запрещенная зона, фотонная локализация, замедление света и др. [77-78]. Синтез осуществляется различными методами [79]. Фотонные кристаллы находят применение в качестве основы устройств фотоники для создания лазеров, волноводов, фокусирующих элементов, дисплеев, запоминающих и логических устройств, а также разнообразных сенсоров [80-81], перспективны для создания оптического компьютера [82]. Применение фотонных кристаллов в качестве сенсоров основано на сильном изменении их свойств при внешних воздействиях. Например, колориметрические датчики влажности с высокой чувствительностью созданы на основе мезопористого фотонного кристалла  $\text{TiO}_2$  [83] и магнитных частиц  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$  в полимерной матрице [84]. Сенсоры из фотонных кристаллов имели чувствительность к ксилолу в воде на уровне  $10^{-7}$  [85] и предел обнаружения около  $1 \cdot 10^6$  молекул [86]. Фотонный биомолекулярный сенсор создан из чередующихся слоев  $\text{TiO}_2$  и  $\text{SiO}_2$  [87]. Реализованы высокочувствительные фотонные датчики температуры [88], ионные детекторы, детекторы пара, датчики поверхностных волн и др. [79, 89, 90]. Для формирования элементов фотоники и создания лазеров, сенсоров, оптических резонаторов и усилителей предложены тубулярные гетероструктуры  $\text{In}(\text{Ga})\text{As}/\text{GaAs}$  на квантовых точках [91].

## 11 Плазмоника

Плазмонные колебания наблюдаются при взаимодействии света с проводником, когда высокочастотное переменное поле, падающее на поверхность металла, вызывает соответствующее движение свободных носителей в приповерхностной области на глубине, не превышающей толщину скин-слоя. Плазмонные колебания в частицах размерами 50-100 нм приводят к резонансному поглощению света в видимой области спектра и к люминесценции. На основе плазмонных колебаний возможно построение приборных структур и логических схем, плазмонных волноводов, резонаторов и концентраторов света [92]. Плазмоны видятся единственной альтернативой для передачи информации внутри будущих оптических компьютеров, поскольку длина плазмонной волны очень короткая по сравнению с соответствующей длиной волны света. В обзоре [93] описан плазмонный лазер с излучением при 489 нм на волноводе, созданном нанонитью из  $\text{CdS}$ . Для ближнего ИК-диапазона в качестве плазмонных материалов перспективны такие полупроводники, как оксид олова (ITO), оксид олова, легированный фтором (FTO,  $\text{SnO}_2:\text{F}$ ), оксид цинка, легированный алюминием (AZO) или галлием (GZO), обладающие малыми потерями и малой величиной действительной части диэлектрической проницаемости [94]. Различные типы плазмонных модуляторов металл-полупроводник-металл на основе активных сред  $\text{InGaAsP}$  рассмотрены в [95].

## 12 Наноантенны

Солнечная энергия может быть преобразована в электрическую с помощью антенны и выпрямителя, аналогично принципу действия детекторного радиоприемника, который преобразует энергию электромагнитного излучения в постоянный (в смысле направления движения) ток. Система, работающая на частотах, соответствующих солнечному спектру, сможет «выпрямлять» световые электромагнитные колебания при освещении и генерировать ток. Для эффективного поглощения солнечного света антенна должна иметь характерный размер от 0.4 до 1.6 микрон, что нетрудно сделать при нынешнем развитии микроэлектроники, и в ней возникает плазмонный резонанс [96]. Теоретическая эффективность таких устройств превышает к.п.д. солнечных элементов, однако на практике такие устройства до сих пор не разработаны. Основная причина заключается в отсутствии эффективных выпрямляющих приборов для максимума солнечного спектра на частотах 200-750 ТГц. Пока антенны разработаны только для длинноволнового ИК-диапазона и имеют эффективность около 1% [97]. Перспективны для детектирования света туннельные диоды со структурой металл-диэлектрик-металл [98] и углеродные нанотрубки (УНТ) [99].

## 13 Солнечные элементы

Солнечные элементы осуществляют прямое преобразование энергии солнечного излучения в электричество. Солнечная фотовольтаика является одной из самых наукоемких видов возобновляемой энергетики и развивается высокими темпами. Кремниевые СЭ занимают более 90% рынка. Разработаны конструкции СЭ на монокристаллическом, поликристаллическом, аморфном кремнии, соединениях группы  $A^3B^5$ ,  $A^2B^6$  и  $A^4B^6$ , твердых растворах типа  $Cu(In,Ga)(S,Se)_2$  и  $Cu_2ZnSn(S,Se)_4$ , экситонные солнечные элементы на основе полимеров, красителей, квантовых точек и др. [100,101]. В таблице представлены опубликованные данные по эффективности преобразования СЭ из некоторых материалов и даты сообщений [102].

Таблица 1 – Эффективность (%) СЭ из некоторых материалов (год)

Материал	Малая площадь, кпд в %	Большая площадь, кпд в %
c-Si	25 (1998)	22.5 (2006)
a-Si	10.1 (2009)	7 (2003)
μc-Si:H	13.3 (2008)	
poly-Si		10.4 (2007)
CdTe	16.5 (2004)	11 (2007)

GaAs	26.4 (2009)	
In <sub>1-x</sub> Ga <sub>x</sub> P/In <sub>1-y</sub> Ga <sub>y</sub> As/Ge	41.6 (2009)	
CuInSe <sub>2</sub>	20.1 (2009)	15.1 (2010)

### 13.1 Кремниевые солнечные элементы

Хотя технологии создания кремниевых СЭ хорошо отработаны, предлагаются различные улучшения конструкции. Например, двухсторонний кремниевый СЭ с контактами из проводящего оксида и проволочной контактной сетки имел эффективность 17.7% [103] с перспективой достижения к.п.д 21%. Ячейки на аморфном кремнии с отражателем из периодической структуры имели кпд 9.7% [104], полученные методом CVD с индуктивно-связанной плазмой, имели низкую ( $3 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ) концентрацию дефектов и к.п.д. 9.6%, были стабильны под освещением. В [105] описан кремниевый СЭ с тыльным гетеропереходом на аморфном кремнии с к.п.д. 20.6% на площади  $2 \times 2 \text{ см}^2$ . Тонкие кремниевые СЭ с двойным гетеропереходом на аморфном кремнии TCO-(p-a-Si)-(i-a-Si)-(n-c-Si)-(i-a-Si)-(n-a-Si)-TCO, где TCO – прозрачный оксид, a-Si – аморфный слой, c-Si – кристаллический слой, имели эффективность 23% на площади  $100 \text{ см}^2$ , а на пластине толщиной менее 100 мкм получено  $U_{\text{xx}}=743 \text{ мВ}$  и к.п.д. 22.8% [106]. Для уменьшения отражения солнечного излучения предлагается текстурирование СЭ [107], нанотекстурирование с характерным размером меньше, чем длина волны падающего света [108-109]. Предлагаются конструкции СЭ на нанонитях [110], в виде нанопроводов, полученных травлением [111] или выращенных из газовой фазы на дешевых подложках [112-114]. Пока параметры этих устройств остаются более низкими, чем у планарных кремниевых СЭ [115-118].

Способы повышения эффективности СЭ [119] находятся в стадии постоянных разработок. Например, предложен СЭ на горячих носителях с оже-процессом термализации горячего электрона на дырке и генерацией дополнительного электрона в зоне проводимости [120]. Использование в СЭ света с энергией меньше, чем запрещенная зона полупроводника, может осуществляться через двухфотонное поглощение на квантовых точках из узкозонных полупроводников в матрице широкозонного полупроводника [121] либо через ИК-люминесценцию на локальных центрах [122].

### 13.2 Солнечные элементы на соединениях A<sup>III</sup>B<sup>V</sup>

Свойства арсенид галлия делают этот материал подходящим для создания более эффективных СЭ, чем кремниевые СЭ. Прямая зона GaAs вызывает сильное поглощение солнечного излучению при толщине слоя в несколько микрон. Радиационная и термическая стойкость GaAs делает СЭ на его основе оптимальными для космических применений. Ограничением широкого наземного применения СЭ на A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> является высокая стоимость. Понизить стоимость СЭ на GaAs можно при использовании пленок, выращенных на подложках из Si или Ge, а также выращивая тонкие пленки GaAs на монокристаллической подложке с последующим отделением пленки и повторным

использованием подложки [102]. В настоящее время многопереходные СЭ на основе полупроводников III-V (GaInP/GaInAs/Ge) имеют рекордные КПД более 40% [123], четырехпереходные СЭ AlGaInP/AlGaInAs/GaInAs/Ge могут иметь максимальную эффективность до 57%. Наземное использование СЭ на GaAs вследствие высокой стоимости материала оправдано при использовании концентраторных (~1000 солнц) систем, оснащенных трекерами [124], которые, как показано [125], имеют срок службы около 30 лет.

### **13.3 Солнечные элементы на основе $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{Se}_2$ (CIGS)**

Полупроводниковый материал  $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{Se}_2$  (CIGS) имеет ширину запрещенной зоны от 1.04 эВ при  $x=0$  до 1.7 эВ при  $x=1$ , и высокий коэффициент поглощения, поэтому хорошо подходит для создания тонкопленочных солнечных элементов. В настоящее время эффективность СЭ на CIGS достигла ~20% [126]. Характерная структура СЭ из CIGS состоит из стеклянной подложки, тонкого (0.3-0.4 мкм) слоя молибдена, активного слоя  $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$  толщиной от 1.5 до 2.5 мкм, лицевого контакта на основе CdS (0.05 мкм) и ZnO (0.1 мкм), и прозрачного контакта из ZnO:Al (0.3-0.4 мкм). Близкие к CIGS полупроводники имеют ширину запрещенной зоны 1.54 эВ ( $\text{CuInS}_2$ ), 1.68 эВ ( $\text{CuGaSe}_2$ ) и 2.5 эВ ( $\text{CuGaS}_2$ ). Это позволяет конструировать СЭ с оптимальными параметрами [127]. СЭ на CIGS уже выпускаются в промышленном масштабе [128]. Ограниченные запасы индия и галлия стимулируют разработку родственных материалов. СЭ из  $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{Se,S})_4$  продемонстрировали к.п.д. более 9% [129], СЭ из  $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S,Se})_4$  с Ge - 8.4%, разрабатываются пленочные СЭ  $\text{Cu}_2\text{S}/\text{CdS}$  [130].

### **13.4 Солнечные элементы на теллуриде кадмия**

Оптимальная ширина запрещенной зоны теллурида кадмия 1.45 эВ, высокое оптическое поглощение, низкая стоимость и достаточно простая и низкзатратная технология синтеза делают СЭ на CdTe перспективными. Среди недостатков CdTe как материала для СЭ необходимо отметить трудность получения р-типа CdTe, трудность создания низкоомных контактов к р-типу CdTe, рекомбинационные потери в р-п-переходе, высокую токсичность кадмия и малые запасы теллура. В недавних работах предлагается использовать буферный слой  $\text{MoO}_x$  для оптимизации свойств омического тыльного контакта к р-CdTe, имеющего высокую работу выхода [131], формировать слой р-CdTe методом сублимации компонентов в замкнутом объеме, а n-CdS лицевой контакт – гидротермальным методом [132], создавать КТ ядро-оболочка CdTe/CdS и сенсibilизировать ими фотоэлектрод из  $\text{TiO}_2$  [133], использовать дешевые стеклянные подложки для получения СЭ n-CdS/p-CdTe с эффективностью более 15% [134]. Это демонстрирует имеющийся потенциал СЭ на CdTe в плане получения высокой эффективности при низких затратах.

### **13.5 Солнечные элементы, сенсibilизированные красителями**

В 1991 году [135] создан сенсibilизированный красителем СЭ с к.п.д. преобразования 7.1%, простая конструкция и низкочатратная технология его создания стимулировали огромный интерес к данным устройствам. Ячейка Гретцеля состоит из 1) стеклянного анода, покрытого проводящим и прозрачным слоем оксида, 2) мезопористого слоя оксида, часто из  $TiO_2$ , нанесенного на анод, 3) тонкого слоя красителя на поверхности мезопористого слоя для поглощения света, 4) электролита, содержащего редокс- медиатор для восстановления красителя, и 5) катода из слоя платины, нанесенного на подложку, обычно на стекло, для сбора электронов.

СЭ, сенсibilизированные красителями, достигли эффективности 11.4% [136] и 12.3 % [137]. Теоретический предел СЭ, сенсibilизированных красителями, составляет ~20% [138-139]. Повышение эффективности может быть достигнуто за счет разработки новых фотосенсibilизаторов с более высоким коэффициентом поглощения и широкой спектральной характеристикой, электролитов с лучшим согласованием энергии окисления красителя, подавлением рекомбинации зарядов, захвата электронов, подбором слоя полупроводника с зоной проводимости, расположенной по энергии между нижними свободными энергетическими состояниями адсорбера и редокс-уровнями электролита, с высокой подвижностью электронов и химической устойчивостью. Этим проблемам посвящено большое количество работ [140-150].

### **13.6 Другие типы солнечных элементов**

В настоящее время тонкопленочные СЭ на гибкой основе находятся в фокусе исследователей и разрабатывается целый ряд СЭ, принцип действия которых значительно отличается от работы классических СЭ на полупроводниковых р-п-переходах [151-153].

СЭ на полупроводниковых квантовых точках (КТ) являются перспективной альтернативой благодаря уникальным свойствам КТ и технологичности СЭ на КТ [154-161]. За 5 лет разработок к.п.д. СЭ на КТ поднялся с 0.5% в 2008 в 10 раз [156], достигнута эффективность 6% [157].

СЭ на основе полимеров и органических материалов [162-172] имеют низкую стоимость и хорошие механические свойства. В настоящее время на органических СЭ с одним переходом достигнут к.п.д. 8.4 % [168], на tandemных СЭ – 8.6 % [169]. Ожидается, что к.п.д. можно превысить до 10% [170]. Теоретические расчеты предсказывают для оптимизированных СЭ к.п.д. до 11% при относительно низкой стоимости [171]. Еще более перспективны полимерные СЭ с двойным гетеропереходом [172], которые могут иметь эффективность более 16% при ширине запрещенной зоны первой полуячейки ~1.6 эВ и второй полуячейки ~1 эВ.

СЭ на основе нанокуглеродных материалов, таких как фуллерены, УНТ и графен, имеют малый вес, низкую стоимость исходного сырья и гибкую конструкцию. Поэтому много исследований посвящено разработке эффективных СЭ на основе этих материалов [173-177]. В [174] описан СЭ с объемным гетеропереходом на полимере донорного типа и фуллеренах. Достигнута эффективность около 4%, область фоточувствительности находилась в диапазоне от 300 до 650 нм.

Для эффективного рассеяния света в тонкопленочных СЭ предлагается применять 1D фотонные кристаллы [178, 179], которые могут действовать как брегговские отражатели и значительно уменьшать непродуктивную часть света, которая доходит до тыльного контакта и теряется.

**Выводы.** Таким образом, в последнее время объем исследований в мире в области полупроводников не снизился и акцент постепенно смещается в область разработки приборных наноструктур инаноструктурированных материалов. Это открывает новые возможности для создания новых материалов и приборов, для улучшения характеристик существующих устройств, для расширения области их применения.

## ЛИТЕРАТУРА

- 1 *Baglin J.E.E.* // *Applied Surface Science*. 2012. 258. P. 4103–4111.
- 2 *Ronning C., Borschel C., Geburt S., Niepelt R.* // *Materials Science and Engineering R*. 2010. 70. P. 30–43.
- 3 *Alkemade P., Chen P., van Veldhoven E., Maas D., Vac J.* // *Sci. Technol. B*. 2010. 28 (6). P. C6F22-5.
- 4 *Chen P., van Veldhoven E., Sanford C., Saleminck H., Maas D., Smith D., Rack P., Alkemade P.* // *Nanotechnology*. 2010. 21. P. 455302-1-455302-7.
- 5 *Schrimpf R.D., Fleetwood D.M., Alles M.L., Reed R.A., Lucovsky G., Pantelides S.T.* // *Microelectronic Engineering*. 2011.88. P. 1259–1264.
- 6 *Gu Y., Dong C.S., Zhong M.L., Ma M.X., Li L., Liu W.J.* // *Applied Surface Science*. 2011. 257. P. 3211-3215.
- 7 *Marconi M.C., Wachulak P.C.* // *Progress in Quantum Electronics*. 2010. 34. P. 173-190.
- 8 *Leen J.B., Hansen P., Cheng Y.-T., Gibby A., Hesselink L.* // *Applied Physics Letters*. 2010. 97. P. 073111.
- 9 *Malinauskas M., Ukauskas Z., Bichauskaite G., Gadonas R., Joudkazis S.* // *Optics Express*. 2010. 18(10). P. 10210–10221.
- 10 *Rill M.S., Plet C., Thiel M., Staude I., Freymann G.V., Linden S., Wegener M.* // *Nature Materials*. 2008. 7. P. 543–546.
- 11 *Hannah J. Joyce, Qiang Gao, Hoe Tan H., Jagadish C., Yong Kim, Jin Zou, Leigh M. Smith, Howard E. Jackson, Jan M. Yarrison-Rice, Patrick Parkinson, Michael B. Johnston.* // *Progress in Quantum Electronics*. 2011. 35. P. 23–75.
- 12 *Sven Barth, Francisco Hernandez-Ramirez, Justin D. Holmes, Albert Romano-Rodriguez.* // *Progress in Materials Science*. 2010. 55. P. 563–627.
- 13 *Shen Y., Hong J., Xu S., Lin S.S., Fang H., Zhang S., Ding Y., Snyder R.L., Wang Z.L.* // *Advanced Functional Materials*. 2010. 20. P. 703–707.
- 14 *Juan A. Anta.* // *Current Opinion in Colloid & Interface Science*. 2012. 17. P. 124–131.
- 15 *Keem K., Kang J., Yoon C., Jeong D.Y., Moon B.M., Kim S.* // *Jpn. J. Appl. Phys.* 2007. 46. P. 6230–6232.
- 16 *Chang P.C., Fan Z., Chien C.J., Stichtenoth D., Ronning C., Lu J.G.* // *Appl. Phys. Lett.* 2006. 89. P. 133113-1-133113-3.
- 17 *Lao C., Li Y., Wong C.P., Wang Z.L.* // *Nano Lett.* 2007. 7. P. 1323–1328.
- 18 *Edmund G. Seebauer, Kyong Wook Noh.* // *Materials Science and Engineering R*. 2010. 70. P. 151–168.

- 19 *Stewart A. V. et al.* // IEEE Journal of Quantum Electronics. 2008. 44(2). P. 157-164.
- 20 *Guerrieri F., Tisa S., Tosi A., Zappa F.* // Proceedings of SPIE. 2010. 7536. 753605.1-753605.10, ISBN 0-8194-7929-2, San Jose, USA, January 2010, SPIE, Bellingham, WA, USA.
- 21 *Sugiyama H., Yokoyama H., Teranishi A., Suzuki S., and Asada M.* // Jpn. J. Appl. Phys. 2010. 49. P. 051201-1-051201-6.
- 22 *Suzuki S., Sawada K., Teranishi A., Asada M., Sugiyama H. and Yokoyama H.* // Electronics Lett. 2010. 46. P. 1006–1007.
- 23 *Joon Seok Park, Wan-Joo Maeng, Hyun-Suk Kim, Jin-Seong Park.* // Thin Solid Films. 2012. 520. P. 1679–1693.
- 24 *E. Fortunato, P. Barquinha, R. Martins.* // Advanced Materials. 2012. 24. P. 2945; *K. Nomura, H. Ohta, A. Takagi, T. Kamiya, M. Hirano, H. Hosono.* // NATURE. 2004. 432. P. 488-492.
- 25 *Hyun-Suk Kim, Kyung-Bae Park, Kyoung Seok Son, Joon Seok Park, Wan-Joo Maeng, Tae Sang Kim, Kwang-Hee Lee, Eok Su Kim, Jiyoul Lee, Joonki Suh, Jong- Baek Seon, Myung Kwan Ryu, Sang Yoon Lee, Kimoon Lee, Im S.* // Appl. Phys. Lett. 2010. 97. P.102103-1-102103-5.
- 26 *Ghaffarzadeh K., Nathan A., Robertson J., Kim S., Jeon S., Kim C., Chung U.-I., Lee J.-H.* // Appl. Phys. Lett. 2010. 97. P. 143510-1-143510-3.
- 27 *Kim M.G., Kim H.S., Ha Y.G., He J., Kanatzidis M., Facchetti A., Marks T.J., Am J.* // Chem. Soc. 2010. 132. P. 10352-10364.
- 28 *Yang Y.H.* // IEEE Electron Device Lett. 2010. 31. P. 329-331.
- 29 *Banger K.K., Yamashita Y., Mori K., Peterson R.L., Leedham T., Rickard J., Sirringhaus H.* // Nat. Mater. 2011. 10. P. 45-50.
- 30 *Zhmakin A.I.* // Physics Reports. 2011. 498. P. 189–24.
- 31 *Dieter Bimberg and Udo W. Pohl.* // Materials Today. 2011, 14. P. 388-397.
- 32 *Lin Li, Minghui Hong, Michael Schmidt, Minlin Zhong, Ajay Malshe, Bert Huis in 'tVeld, Volodymyr Kovalenko.* // CIRP Annals - Manufacturing Technology. 2011. 60. P. 735–755.
- 33 *Hongbo Lan, Yucheng Ding.* // Nano Today. 2012. 7. P. 94—123.
- 34 *Mirov S., Fedorov V., Moskalev I., Mirov M., Martyshkin D.* // J. Lumin. 2011. doi:10.1016/j.jlumin.2011.09.040.
- 35 *Taiichi Otsuji, Hiromi Karasawa, Takayuki Watanabe, Tetsuya Suemitsu, Maki Suemitsu, Eiichi Sano, Wojciech Knap, Victor Ryzhii.* // C. R. Physique. 2010. 11. P. 421–432.
- 36 *Sergei Yu. Zaitsev, Daria O. Solovyeva, Igor Nabiev.* // Advances in Colloid and Interface Science. 2012. 183–184. P. 14–29.
- 37 *Capelli R. et al.* // Nat. Mater. 2010. 9. P. 496-503.
- 38 *de Dios A.S., Diaz-Garcia M.E.* // Analytica Chimica Acta. 2010. 666. P. 1–22.
- 39 *Wang D., Zhou W., Hu P., Guan Y., Chen L., Li J., Wang G., Liu H., Wang J., Cao G., Jiang H.* // Journal of Colloid and Interface Science. 2012. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcis>.
- 40 *Hu P. G., Du G. J., Zhou W. J., Cui J. J., Lin J. J., Liu H., Liu D., Wang J. Y., Chen S.W.* // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2010. 2 (11). P. 3263–3269.
- 41 *Zhou W., Liu H., Boughton R. I., Du G., Lin J., Wang J., Liu D.* // J. Mater. Chem. 2010. 20. P. 5993-6008.
- 42 *Zhang Y., Shi Y., Pu L., Wang J., Pan L., Zheng Y.* // Physics Letters A. 2011. 375. P.2728–2732.
- 43 *Vomiero A., Concina I., Comini E., Soldano C., Ferroni M., Faglia G., Sberveglieri G.* // Nano Energy. 2012. 1. P. 372–390.
- 44 *Boukai A.I., Bunimovich Y., Tahir-Kheli J., Yu J.-K., Goddard W.A. and J.R. Heath* // Nature. 2008. 451. 168–171.
- 45 *Liu Y., Zhang Z., Wei X., Li Q., Peng L.-M.* // Adv. Func. Mat. 2011. 21. P. 3900–3906.
- 46 *Kraemer D., Poudel B., Feng H.-P., Caylor J.C., Yu B., Yan X., Ma Y., Wang X., Wang D., Muto A., McEnaney K., Chiesa M., Ren Z., Chen G.* // Nature Materials. 2011. 10. P. 532–538.

- 47 Karni J. // *Nature Materials*. 2011. 10. P. 481–482.
- 48 Delaizir G., Monnier J., Soulier M., Grodzki R., Villeroy B., Testard J., Simon J., Navone C., Godart C. // *Sensors and Actuators A*. 2012. 174. P. 115–122.
- 49 Yongjing Lin, Guangbi Yuan, Rui Liu, Sa Zhou, Stafford W. Sheehan, Dunwei Wang. // *Chemical Physics Letters*. 2011. 507. P. 209–215.
- 50 Bolton J.R., Strickler S.J., Connolly J.S. // *Nature*. 1985. 316. P. 495-500.
- 51 Cook T.R., Dogutan D.K., S.Y. Reece, Surendranath Y., Teets T.S., Nocera D.G. // *Chem. Rev.* 2010. 110. P. 6474-6502.
- 52 Suzhen Liang, Jingfu He, Zhihu Sun, Qinghua Liu, Yong Jiang, Hao Cheng, Bo He, Zhi Xie and Shiqiang Wei. // *J. Phys. Chem. C*. 2012. 116. P. 9049–9053.
- 53 Frank E. Osterloh and Bruce A. Parkinson. // *MRS BUL.* 2011. 36. P. 17-22.
- 54 Su J., Feng X., Sloppy J.D., Guo L., Grimes C.A. // *Nano Lett.* 2011. 11. P. 203-208.
- 55 Nann T., Ibrahim S.K., Woi P.M., Xu S., Ziegler J., Pickett C.J. // *Angew. Chem. Int. Ed.* 2010. 49. P.1574-1577.
- 56 Liu R., Lin Y., Chou L.Y., Sheehan S.W., He W., Zhang F., Hou H.J., Wang D. // *Angew Chem Int Ed Engl.* 2011. 50. P. 499-502.
- 57 Zhang J., Bang J.H., Tang C., Kamat P.V. // *ACS Nano*. 2010. 4. P.387-395.
- 58 Simamora A.-J., Hsiung T.-L., Chang F.-C., Yang T.-C., Liao C.-Y., Paul Wang H. // *International journal of hydrogen energy*. 2012. 37. P. 13855-13858.
- 59 Nguyen T.K. Thanh, Luke A.W. Green. // *Nano Today*. 2010. 5. P. 213-230.
- 60 Cassette E., Helle M., Bezdetnaya L., Marchal F., Dubertret B., Pons T. // *Advanced Drug Delivery Reviews*. 2012 <http://dx.doi.org/10.1016/j.addr.2012.08.016>.
- 61 Faklaris O., Joshi V., Irinopoulou T., Tauc P., Sennour M., Girard H., Gesset C., Arnault J.C., Thorel A., Boudou J.P., Curmi P.A., Treussart F. // *ACS Nano*. 2009. 3. 3955–3962.
- 62 Erogbogbo F., Tien C.A., Chang C.W., Yong K.T., Law W.C., Ding H., Roy I., Swihart M.T., Prasad P.N. // *Bioconjug. Chem.* 2011. 22. P. 1081–1088.
- 63 Blackman B., Battaglia D., Peng X.G. // *Chem. Mater.* 2008. 20. P. 4847–4853.
- 64 Deng Z., Schulz O., Lin S., Ding B., Liu X., Wei X., Ros R., Yan H., Liu Y. // *J. Am. Chem. Soc.* 2010. 132. P. 5592–5593.
- 65 Pons T., Pic E., Lequeux N., Cassette E., Bezdetnaya L., Guillemain F., Marchal F., Dubertret B. // *ACS Nano*. 2010. 4. P. 2531–2538.
- 66 Cassette E., Pons T., Bouet C., Helle M., Bezdetnaya L., Marchal F., Dubertret B. // *Chem. Mater.* 2010. 22. P. 6117–6124.
- 67 Allen P.M., Liu W.H., Chauhan V.P., Lee J., Ting A.Y., Fukumura D., Jain R.K., Bawendi M.G. // *J. Am. Chem. Soc.* 2010. 132. P. 470–471.
- 68 Choi H.S., Ipe B.I., Misra P., Lee J.H., Bawendi M.G., Frangioni J.V. // *Nano Lett.* 2009. 9. P. 2354–2359.
- 69 Tamang S., Beaune G., Texier I., Reiss P. // *ACS Nano*. 2011. 5(12). P. 9392-9402.
- 70 Zhao H.G., Wang D.F., Zhang T., Chaker M., Ma D.L. // *Chem. Commun.* 2010. 46. P. 5301–5303.
- 71 Chauhan V.P., Popović Z., Chen O., Cui J., Fukumura D., Bawendi M.G., Jain R.K. // *Angew. Chem. Int. Ed.* 2011. 50. P. 11417–11420.
- 72 Nicolas J., Brambilla D., Carion O., Pons T., Maksimovic I., Larquet E., Le Droumaguet B., Andrieux K., Dubertret B., Couvreur P. // *Soft Matter*. 2011. 7. P. 6187–6193.
- 73 Louie A.Y. // *Chem. Rev.* 2010. 110. P. 3146–3195.
- 74 Zongwen Jin and Niko Hildebrandt. // *Trends in Biotechnology*. 2012. 30 (7). P. 394-403.
- 75 Yablonovitch E. // *Physical Review Letters*. 1987. 58 (20). P. 2059–2062.
- 76 John S. // *Physical Review Letters*. 1987. 58 (23), 2486–2489.
- 77 Cheng S.C., Wu J.N., Yang T.J. et al. // *Physical Review A*. 2009. 79 (1). P. 013801.
- 78 Adachi N. Ishikura, Sasaki H. et al. // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 2010. 16 (1). P. 192-199.

- 79 *Yong Zhao, Ya-Nan Zhang, Qi Wang.* // *Sensors and Actuators B.* 2011. 160. P. 1288–1297.
- 80 *Xiangsheng Xie, Yikun Liu, Mudong Zhang, Jianying Zhou, Kam Sing Wong.* // *Physica E.* 2012. 44. P. 1109–1126.
- 81 *Nair R.V., Vijaya R.* // *Progress in Quantum Electronics.* 2010. 34. P. 89–134.
- 82 *Joannopoulos J.D., Meade R.D., Winn J.N.* // Princeton University Press. 1995.
- 83 *Matthew M. Hawkeye, Michael J. Brett.* // *Advanced Functional Materials Volume.* 2011. 21. P. 3652–3658.
- 84 *Ruyang Xuan, Qingsheng Wu, Yadong Yin and Jianping Ge.* // *J. Mater. Chem.* 2011. 21. P. 3672-3676.
- 85 *Lai W.C., Chakravarty S., Wang X.L. et al.* // *Applied Physics Letters.* 2011. 98 (2). 023304.
- 86 *Jagerska J., Le Thomas N., Zhang H., Diao Z., Houdre R.* // 12th International Conference on [Transparent Optical Networks \(ICTON\) 2010](#) Digital Object Identifier: 10.1109/ICTON.2010.5549037.
- 87 *Yunbo Guo, Jing Yong Ye, Charles Divin, Baohua Huang, Thommey P. Thomas, James R. Baker, Jr, and Theodore B. Norris.* // *Anal Chem.* 2010. 82 P. 5211–5218.
- 88 *Bozolan A., Gerosa R.M., de Matos C.J.S., Romero M.A.* // *Sensors Journal. IEEE* 2012. 12. P. 195-200.
- 89 *Pergande D., Geppert T.M., Rhein A.V. et al.* // *Journal of Applied Physics.* 2011. 109 (8). P. 083117.
- 90 *He L., Hu Y.X., Kim H. et al.* // *Nano Letters.* 2010. 10 (11). P. 4708–4714.
- 91 *Zetian Mi., Pablo Bianucci.* // *Current Opinion in Solid State and Materials Science.* 2012. 16. P. 52–58.
- 92 *Cai W., Shalaev V.* // *Optical Metamaterials: Fundamentals and Applications,* Springer Verlag. 2009.
- 93 *YinYin, Teng Qiu, Jiaqi Li, Paul K. Chu.* // *Nano Energy.* 2012. 1. P. 25–41.
- 94 *Gururaj V. Naik, Alexandra Boltasseva.* // *Metamaterials.* 2011. 5. 1–7.
- 95 *Viktoriia E. Babicheva, Irina V. Kulkova, Radu Malureanu, Kresten Yvind, Andrei V. Lavrinenko.* // *Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications.* 2012. 10. P. 389–399.
- 96 *Lukas Novotny.* // *Phys. Rev. Lett.* 2007. 98. P. 266802.
- 97 *Mark W. Knight, Heidar Sobhani, Peter Nordlander, Naomi J. Halas.* // *Science* 2011. 332. P. 702-704 DOI: 10.1126/science.1203056.
- 98 *Lukas Novotny, Niek van Hulst.* // *Nature Photonics.* 2011. 5. P. 83–90 doi:10.1038/nphoton.2010.237.
- 99 *Слюсар В.* Наноантенны: подходы и перспективы. *Электроника: Наука, Технология, Бизнес* 2/2009, С. 58-65.
- 100 *Parida B., Iniyar S., Goic R.* // *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2011. 15. P. 1625–1636.
- 101 *El Chaar L., Lamont L.A., El Zein N.* // *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2011. 15. P. 2165–2175.
- 102 *Avrutin V., Izyumskaya N., Morko? H.* // *Superlattices and Microstructures.* 2011. 49. P. 337–364.
- 103 *Унтила Г.Г., Кост Т.Н., Чеботарева А.Б., Закс М.Б., Ситников А.М., Солодуха О.И.* // *ФТП.* 2005. 39. P. 1393-1398.
- 104 *Ching-Mei Hsu, Corsin Battaglia, Celine Pahud, Zhichao Ruan, Franz-Josef Haug, Shanhui Fan, Christophe Ballif, Yi Cui.* // *Advanced Energy Materials.* 2012. 2. P. 628-633.
- 105 *Martin Bivour, Marc R?diger, Christian Reichel, Kurt-U. Ritzau, Martin Hermle, Stefan W. Glunz.* // *Energy Procedia.* 2011. 8. P. 185–192.
- 106 *Takahiro Mishima, Mikio Taguchi, Hitoshi Sakata, Eiji Maruyama.* // *Solar Energy Materials and Solar Cells.* 2011. 95. P. 18-21.

- 107 Zeman M., Isabella O., J?ger K., Santbergen R., Solntsev S., Topic M. and Krc J. // *Energy Procedia*. 2012. 15. P. 189 – 199.
- 108 Sanjay K. Srivastava, Dinesh Kumar, Vandana, Mukul Sharma, Ravi Kumar, Singh P.K. // *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 2012. 100. P. 33–38.
- 109 O'Donnell B., Yu L., Foldyna M., Cabarrocas P.R. // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2012. 358. P. 2299–2302.
- 110 Tang J., Huo Z., Britzman S., Gao H., Yang P. // *Nature Nanotechnology*. 2011. 6. P. 568–72.
- 111 Lu Y.R., Lal A. // *Nano Lett.* 2010. 10. P. 4651–4656.
- 112 Kendrick C.E., Yoon H.P., Yuwen Y.A., Barber G.D., Shen H.T., Mallouk T.E., Dickey E.C., Mayer T.S., Redwing J.M. // *Appl. Phys. Lett.* 2010. 97. P. 143108.
- 113 Yu L., O'Donnell B., Alet P.J., Roca i Cabarrocas P. // *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. 2010. 94. P. 1855–1859.
- 114 Gau C., Kuo C.Y., Dai B.T. // *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. 2011. 95. P. 154–157.
- 115 Stelzner T., Pietsch M., Andra G., Falk F., Ose E., Christiansen S. // *Nanotechnology*. 2008. 19. P. 295203.
- 116 Putnam M.C., Boettcher S.W., Kelzenberg M.D., Turner-Evans D.B., Spurgeon J.M., Warren E.L., Briggs R.M., Lewis N.S., Atwater H.A. // *Energy Environ. Sci.* 2010. 3. P. 1037–1041.
- 117 Cho J., O'Donnell B., Yu L., Kim K.-H., Ngo I., Roca i Cabarrocas P. // *Prog. Photovoltaics*. 2012. doi:10.1002/pip.1245.
- 118 Rathi S.J., Jariwala B.N., Beach J.D., Stradins P., Taylor P.C., Weng X.J., Ke Y., Redwing J.M., Agarwal S., Collins R.T. // *J. Phys. Chem. C*. 2011. 115. P. 3833–3839.
- 119 Adolf Goetzberger, Joachim Luther, Gerhard Willeke. // *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 2002. 74. P. 1–11.
- 120 Hans J. Queisser. // *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 2010. 94. P. 1927–1930.
- 121 Luque A., Marti A., Stanley C. // *Nature Photonics*. 2012. 6. P. 146–52.
- 122 Zheng J., Tao Y., Wang W., Ma Z., Zuo Y., Cheng B., et al. // *Journal of Luminescence*. 2012. 132. P. 2341–4.
- 123 Cotal H., Fetzer C., Boisvert J., Kinsey G., King R., Hebert P., Yoon H., Karam N. // *Energy Environ. Sci.* 2009. 2. P. 174–192.
- 124 Dimroth F. // *Phys. stat. sol.* 2006. 3(3). P. 373–379. DOI 10.1002/pssc.200564172.3
- 125 Carlos Algora. // *Microelectronics Reliability*. 2010. 50. P. 1193–1198.
- 126 Chirilă A., Buecheler S., Pianezzi F., Bloesch P., Gretener C., Uhl AR., Fella C., Kranz L., Perrenoud J., Seyrling S., Verma R., Nishiwaki S., Romanyuk Y.E., Bilger G., Tiwari A.N. // [Nat Mater](#). 2011, 10. P. 857-61. doi: 10.1038/nmat3122.
- 127 Green M.A., Emery K., Hishikawa Y., Warta W. // *Photovolt.: Res. Appl.* 2010. 18. P. 346–352.
- 128 Arnulf Jager-Waldau. // *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 2011. 95. P. 1509–1517.
- 129 Todorov T.K., Reuter K.B., Mitzi D.B. // *Adv. Mater.* 2010. 22. P. 1–4.
- 130 Sam M., Bayati M.R., Mojtahedi M., Janghorban K. // *Applied Surface Science*. 2010. 257. P. 1449–1453.
- 131 Hao Lin, Wei Xia, Hsiang N. Wu, and Ching W. Tang. // *Applied Physics Letters*. 2010. 97. P. 123504.
- 132 Ferekides C.S. and Morel D.L. // *Subcontract Report* 2011. NREL/SR-5200-51605. <http://www.osti.gov/bridge>.
- 133 Xiao-Yun Yu, Bing-Xin Lei, Dai-Bin Kuang and Cheng-Yong Su. // *Chem. Sci.* 2011. 2. P. 1396-1400.
- 134 Colegrove E., Banai R., Blissett C., Buurma C., Ellsworth J., Morley M., Barnes S., Gilmore C., Bergeson J. D., Dhere R., Scott M., Gessert T., Siva Sivananthan. // *Journal of Electronic Materials*. 2012. 41. P. 2833-2837.
- 135 O'regan B., Gr?tzl M. // *Nature*. 1991. 353. P. 737–740.

- 136 Han, L., et al. // Energy Environ. Sci. 2012. 5. P. 6057–6060.
- 137 Yella A., et al. // Science. 2011. 334. P. 629–634.
- 138 Snaith H.J. // Adv. Funct. Mater. 2010. 20. P. 13–19.
- 139 Qifeng Zhang, Guozhong Cao. // Nano Today. 2011.6. P. 91–109.
- 140 Sahin C., Dittrich Th., Varlikli C., Icli S., Lux-Steiner M.Ch. // Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 2010. 94. P. 686–690.
- 141 Monica Lira-Cantu, Amine Chafiq, Jeremy Faissat, Irene Gonzalez-Valls, Youhai Yu. // Solar Energy Materials & Solar Cells. 2011. 95. P. 1362–1374.
- 142 Rajab F., Loaring D. and Ziegler K.J. // Thin Solid Films. 2011. 519. P. 6598.
- 143 Meng S., Kaxiras E. // Nano Lett. 2010. 10. P. 1238–1247.
- 144 da Silva R., Rego L.G.C., Freire J.A., Rodriguez J., Laria D., Batista V.S. // J. Phys. Chem. C. 2010. 114. P. 19433–19442.
- 145 Jiawei Gong, Jing Liang, Sumathy K. // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2012. 16. P. 5848–5860.
- 146 Chakrapani. V., Tvrdy. K., Kamat P.V. // J. Am. Chem. Soc. 2010. 132. P. 1228–1229.
- 147 Barea E.M., Shalom M., Gimeñez S., Hod I., Mora-Sebero I., Zaban A., Bisquert J. // J. Am. Chem. Soc. 2010. 132. P. 6834–6839.
- 148 Gong J., Liang J., Sumathy K. // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2012. 16. P. 5848–5860.
- 149 Wang B., Kerr LL. // Solar Energy Materials and Solar Cells. 2011. 95. P. 2531–5.
- 150 Gong F., Wang H., Wang Z.-S. // Phys. Chem. Chem. Phys. 2011. 13. P. 17676–17682.
- 151 Thomas Dittrich, Abdelhak Belaidi, Ahmed Ennaoui. // Solar Energy Materials & Solar Cells. 2011. 95. P. 1527–1536.
- 152 Zou D., Wang D., Chu ZLv., Zh., Fan. X. // Coordination Chemistry Reviews. 2010. 254. P. 1169–1178.
- 153 Rui Yu., Qingfeng Lin., Siu-Fung Leung., Zhiyong Fan. // Nano Energy. 2012. 1. P. 57–72.
- 154 Röhle S., Shalom M., Zaban A. // Chem. Phys. Chem. 2010. 11. P. 2290–2304.
- 155 Emin S., Singh S.P., Han L., Satoh N., Islam. A. // Solar Energy. 2011. 85. P. 1264–1282.
- 156 Sargent E.H. // Nature Photonics. 2012. 6. P. 133–135.
- 157 Tang J., et al. // Nature Mater. 2011. 10. P. 765–771.
- 158 Olson J.D., Rodriguez Y.W., Yang L.D., Alers G.B., Carter S.A. // Appl. Phys. Lett. 2010. 96. P. 242103.
- 159 Wang X., Koleilat G.I., Tang J., Liu H., Kramer I.J., Debnath R., et al. // Nature Photonics. 2011. 5. P. 480–484.
- 160 Debnath R., Greiner M.T., Kramer J.J., Füscher A., Tang J., Barkhouse D.A.R., Wang X., Levina L., Lu Z.-H., Sargent E.H. // Appl. Phys. Lett. 2010. 97. P. 023109.
- 161 Zhou Y., Röhle F.S., Yuan Y., Schleiermacher H.-F., Niggemann M., Urban G.A., Krüger M. // Appl. Phys. Lett. 2010. 96. P. 013304.
- 162 Cai W., Gong X., Cao Y. // Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 2010. 94. P. 114–127.
- 163 Chandrasekaran J., Nithyaprakash D., Ajjan K.B., Maruthamuthu S., Manoharan D., Kumar S. // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2011. 15. P. 1228–1238.
- 164 Liang Y., Xu Z., Xia J., Tsai S.T., Wu Y., Li G., Ray C., Yu L. // Adv. Mater. 2010. 22. P. 135–138.
- 165 Jenny Nelson. // Materials Today. 2011. 14. P. 462–470.
- 166 Dilek Celik, Michael Krueger, Clemens Veit, Hans F. Schleiermacher, Birger Zimmermann, Sybille Allard, Ines Dumsch, Ullrich Scherf, Frank Rauscher, Phenwisa Niyamakom. // Solar Energy Materials & Solar Cells. 2012. 98. P. 433–440.
- 167 Yanmin Wang, Wei Wei, Xin Liu, Yijie Gu. // Solar Energy Materials & Solar Cells. 2012. 98. P. 129–145.
- 168 He Z., et al. // Adv. Mater. 2011. 23. P. 4636–4643.
- 169 Dou L., et al. // Nature Photonics 2012. 6. P. 180–185.

- 170 Gr?tzl M., Janssen R.A.J., Mitzi D.B., Sargent E.H. // *Nature*. 2012. 488. 304–312.
- 171 Koster L.J.A., Mihailetschi V.D., Blom P.W.M. // *Appl. Phys. Lett.* 2006. 88. P. 093511.
- 172 Siddiki M.K., Venkatesan S., Wang M., Qiao Q. // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2012.04.028>.
- 173 Dubacheva G.V., Chih-Kai Liang., Bassani D.M. // *Coordination Chemistry Reviews*. 2012. 256. P. 2628–2639.
- 174 Troshin P.A., Hoppe H., Peregudov A.S., Egginger M., Shokhovets S., Gobsch G., Sariciftci N.S., Razumov V.F. // *ChemSusChem*. 2011. 4. P.119 – 124.
- 175 Lancellotti L., Polichetti T., Ricciardella F., Tari O., Gnanapragasam S., Daliento S., Di Francia G. // *Thin Solid Films*. 2012. doi: 10.1016/j.tsf.2012.09.040.
- 176 Wang Y. // *Appl. Phys. Lett.* 2009. 95. P. 063302.
- 177 Sh. Sun L., Gao Y. Liu. // *Appl. Phys. Lett.* 2010. 96. P.083113.
- 178 Krč J., Zeman M., Luxembourg S., Topic M. // *Appl. Phys. Lett.* 2009. 94. P. 153501.
- 179 Parvathy Devi B., Kuo-Cheng Wu, Zingway Pei. // *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 2011. 95. P. 2102–2106.

## REFERENCES

- 1 Baglin J.E.E. *Applied Surface Science*, **2012**, 258, 4103–4111.
- 2 Ronning C., Borschel C., Geburt S., Niepelt R. *Materials Science And Engineering R*, **2010**, 70, 30–43.
- 3 Alkemade P., Chen P., van Veldhoven E., Maas D., *Vac J. Sci. Technol. B*, **2010**, 28 (6), C6F22-5.
- 4 Chen P., van Veldhoven E., Sanford C., Salemink H., Maas D., Smith D., Rack P., Alkemade P. *Nanotechnology*, **2010**, 21, 455302-1-455302-7.
- 5 Schrimpf R.D., Fleetwood D.M., Alles M.L., Reed R.A., Lucovsky G., Pantelides S.T. *Microelectronic Engineering*, **2011**, 88, 1259–1264.
- 6 Gu Y., Dong CS., Zhong ML., Ma MX., Li L., Liu WJ. *Applied Surface Science*, **2011**, 257, 3211-3215.
- 7 Marconi M.C., Wachulak P.C. *Progress In Quantum Electronics*, **2010**, 34. 173-190.
- 8 Leen J.B., Hansen P., Cheng Y.-T., Gibby A., Hesselink L. *Applied Physics Letters*, **2010**, 97, 073111.
- 9 Malinauskas M., Ukauskas Z., Bichauskaite G., Gadonas R., Joudkazis S. *Optics Express*, **2010**, 18(10), 10210–10221.
- 10 Rill M.S., Plet C., Thiel M., Staude I., Freymann G.V., Linden S., Wegener M. *Nature Materials*, **2008**, 7, 543–546.
- 11 Hannah J. Joyce, Qiang Gao, Hoe Tan H., Jagadish C., Yong Kim, Jin Zou, Leigh M. Smith, Howard E. Jackson, Jan M. Yarrison-Rice, Patrick Parkinson, Michael B. Johnston. *Progress In Quantum Electronics*, **2011**, 35, 23–75.
- 12 Sven Barth, Francisco Hernandez-Ramirez, Justin D. Holmes, Albert Romano-Rodriguez. *Progress In Materials Science*, **2010**, 55, 563–627.
- 13 Shen Y., Hong J., Xu S., Lin S.S., Fang H., Zhang S., Ding Y., Snyder R.L., Wang Z.L. *Advanced Functional Materials*, **2010**, 20, 703–707.
- 14 Juan A. Anta. *Current Opinion In Colloid & Interface Science*, **2012**, 17, 124–131.
- 15 Keem K., Kang J., Yoon C., Jeong D.Y., Moon B.M., Kim S. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **2007**, 46, 6230–6232.
- 16 Chang P.C., Fan Z., Chien C.J., Stichtenoth D., Ronning C., Lu J.G. *Appl. Phys. Lett.*, **2006**, 89, 133113-1-133113-3.
- 17 Lao C., Li Y., Wong C.P., Wang Z.L. *Nano Lett.*, 2007. 7. P. 1323–1328.

- 18 Edmund G. Seebauer, Kyong Wook Noh. *Materials Science And Engineering R*, **2010**, *70*, 151–168.
- 19 Stewart A.V. et al. *IEEE Journal Of Quantum Electronics*, **2008**, *44(2)*, 157-164.
- 20 Guerrieri F., Tisa S., Tosi A., Zappa F. *Proceedings Of Spie*, **2010**, *7536*, 753605.1-753605.10, ISBN 0-8194-7929-2, San Jose, USA, January 2010, SPIE, Bellingham, WA, USA.
- 21 Sugiyama H., Yokoyama H., Teranishi A., Suzuki S., Asada M. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **2010**, *49*, 051201-1-051201-6.
- 22 Suzuki S., Sawada K., Teranishi A., Asada M., Sugiyama H. and Yokoyama H. *Electronics Lett.*, **2010**, *46*, 1006–1007.
- 23 Joon Seok Park, Wan-Joo Maeng, Hyun-Suk Kim, Jin-Seong Park. *Thin Solid Films*, **2012**, *520*, 1679–1693.
- 24 Kenji Nomura, Hiromichi Ohta, Akihiro Takagi, Toshio Kamiya, Masahiro Hirano, Hideo Hosono. *Nature*, **2004**, *432*, 488-492.
- 25 Hyun-Suk Kim, Kyung-Bae Park, Kyoung Seok Son, Joon Seok Park, Wan-Joo Maeng, Tae Sang Kim, Kwang-Hee Lee, Eok Su Kim, Jiyoul Lee, Joonki Suh, Jong- Baek Seon, Myung Kwan Ryu, Sang Yoon Lee, Kimoon Lee, Seongil Im. *Appl. Phys. Lett.*, **2010**, *97*, 102103-1-102103-5.
- 26 Ghaffarzadeh K., Nathan A., Robertson J., Kim S., Jeon S., Kim C., Chung U.-I., Lee J.-H. *Appl. Phys. Lett.*, **2010**, *97*, 143510-1-143510-3.
- 27 Kim M.G., Kim H.S., Ha Y.G., He J., Kanatzidis M., Facchetti A., Marks T.J., Am J. *Chem. Soc.*, **2010**, *132*, 10352-10364.
- 28 Yang Y.H. *IEEE Electron Device Lett.*, **2010**, *31*, 329-331.
- 29 Banger K.K., Yamashita Y., Mori K., Peterson R.L., Leedham T., Rickard J., Sirringhaus H. *Nat. Mater.*, **2011**, *10*, 45-50.
- 30 Zhmakin A.I. *Physics Reports*, **2011**, *498*, 189–24.
- 31 Dieter Bimberg, Udo W. Pohl. *Materials Today*, **2011**, *14*, 388-397.
- 32 Lin Li, Minghui Hong, Michael Schmidt, Minlin Zhong, Ajay Malshe, Bert Huis in'tVeld, Volodymyr Kovalenko. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, **2011**, *60*, 735–755.
- 33 Hongbo Lan, Yucheng Ding. *NANO TODAY*, **2012**, *7*, 94—123.
- 34 Mirov S., Fedorov V., Moskalev I., Mirov M., Martyshkin D. *J. Lumin*, **2011**, doi:10.1016/j.jlumin.2011.09.040.
- 35 Taiichi Otsuji, Hiromi Karasawa, Takayuki Watanabe, Tetsuya Suemitsu, Maki Suemitsu, Eiichi Sano, Wojciech Knap, Victor Ryzhii. *C. R. Physique*, **2010**, *11*, 421–432.
- 36 Sergei Yu. Zaitsev, Daria O. Solovyeva, Igor Nabiev. *Advances In Colloid And Interface Science*, **2012**, *183–184*, 14–29.
- 37 Raffaella Capelli, [Stefano Toffanin](#), [Gianluca Generali](#), [Hakan Usta](#), [Antonio Facchetti](#), Michele Muccini. *Nature Materials*, 2010. 9. P. 496-503.
- 38 de Dios A.S., Diaz-Garcia M.E. *Analytica Chimica Acta*, 2010. 666. P. 1–22.
- 39 Wang D., Zhou W., Hu P., Guan Y., Chen L., Li J., Wang G., Liu H., Wang J., Cao G., Jiang H. *Journal Of Colloid And Interface Science*, **2012**, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcis>.
- 40 Hu P.G., Du G.J., Zhou W.J., Cui J.J., Lin J.J., Liu H., Liu D., Wang J.Y., Chen S.W. *Acs Appl. Mater. Interfaces*, **2010**, *2 (11)*, P. 3263–3269.
- 41 Zhou W., Liu H., Boughton R. I., Du G., Lin J., Wang J., Liu D. *J. Mater. Chem.*

## Резюме

Абдуллин<sup>1</sup> Х.А., Мұқашев<sup>2</sup> Б.Н.

(<sup>1</sup>ҚР БҒМ әл-Фараби атындағы ҚазҰУ Ашық түрдегі ұлттық нанотехнологиялық зертханасы, Алматы қ.; <sup>2</sup>Физика-техникалық институты, Алматы қ., Қазақстан)

## ЖАРТЫЛАЙ ӨТКІЗГІШТЕР ЖӘНЕ НАНОҚҰРЫЛЫМДАР ФИЗИКАСЫ

Бұл жұмыста жартылай өткізгішті құрылымдарды жасау және қолдану саласындағы зерттеулерге әдеби шолу жасалған. Иондық шоктар, лазерлік литография және ақаулардың инжинирингі сияқты наноқұрылымдарды түрлендіру және жасау әдістері қарастырылған. Наноқұрылымдарды синтездеудің келесі әдістері: өзін-өзі катализдеу механизмі арқылы және катализаторлардың қатысуы арқылы газдық фазадан өсу, лазерлік тозаңдату, газдық фазадан химиялық тұндыру және молекулалық-сәулелік эпитаксия, наношаблондарды (мысалға, нанокеукті алюминий тотығын) қолданатын синтез, электроспиннинг, өңдеу және т.б. қарастырылған. Жарық және зарядталған бөлшектерді тіркеуге арналған детекторлар, үлкен токтарда және 1ТГц жиіліктерге дейін жұмыс істейтін резонансты туннельдік диодтарды, жарық шығарушы диодтарға және органикалық жарық шығарушы диодтарға негізделген белсенді матрицалы дисплейлер жасауға арналған жұқа пленкалы транзисторлар жасауға, жарық шығарушы диодтарды жетілдіру және белсенді аймақтан жарық ағынын қалыптастыру әдістерін дамыту, түрлі салада қолданылатын жиілігі келтіріле алатын терагерцтік жартылай өткізгішті лазерлер мен жарық көздерін жасауға арналған еңбектерге шолу жүргізілген. Молекулярлық электрониканы дамытуға және органикалық жартылай өткізгіштер, жартылай өткізгішті тетіктер мен сенсорлар, термоэлектрлік және пьезоэлектрлік генераторлар, суды ыдыратуға арналған фотоэлектрхимиялық ұяшықтар, жартылай өткізгішті кванттық нүктелерді қолдануға арналған мәліметтер келтірілген. Соңғы жылдары фотоника және плазмоника, фотондық кристалдар мен плазмондық құрылымдарды синтездеу қарқынды дамуда. Жартылай өткізгішті электроникада күн элементтерін жетілдіру және жасау саласы ең жедел дамып келе жатқан бағыт болып табылады. Кремний,  $A^{III}B^V$  қосылыстары, кадмий теллуридi, жұқа пленкалы  $CuIn_xGa_{(1-x)}Se_2$  негізіндегі күн элементтеріне арналған еңбектерге шолу келтірілген.

**Кілт сөздер:** жартылай өткізгіштер, наноқұрылым, түрлендіру, электроника.

## Summary

*H.A. Mukashev<sup>2</sup>, B.N. Abdullin<sup>1</sup>*

(<sup>1</sup>The national nanotechnological laboratory of open type TREASURY  
of al-Farabi of Ministry of Education and Science RK, Almaty, Kazakhstan;  
<sup>2</sup>fiziko-technical institute, Almaty, Kazakhstan)

## PHYSICS OF SEMICONDUCTORS AND NANOSTRUCTURES

The review of literature on researches is provided in the real work in the field of creation and application of semiconductor instrument structures. Methods of modification and creation of nanostructures, such, as ionic bunches, laser lithograph and engineering of defects are considered. Methods of synthesis of nanostructures are considered: growth from a gas phase on the self-catalytic mechanism and with participation of catalysts, laser dispersion, chemical sedimentation from a gas phase and a molecular and beam epitaxy, synthesis with use of nanotemplates (for example, nanoporous oxide of aluminum), an elektrospining, etching, etc. The review of works in the field of creation of detectors for registration of light and the loaded particles, resonant tunnel diodes for work is carried out at big currents and frequencies to 1 TGTs; on creation of thin-film transistors for displays with an active matrix on light-emitting diodes and organic light-emitting diodes, on development of methods of improvement of light-emitting diodes and formations of a light stream from active area, on development of arranged semiconductor lasers and sources at terahertz frequencies for various applications. Data on development to molecular electronics and organic semiconductors, on semiconductor sensors and sensors, thermoelectric and piezoelectric generators, photoelectrochemical cells for water splitting, on use of semiconductor quantum points are provided. Photonics and a plazmonik, synthesis of photon crystals and plazmonny structures in recent years have considerable development. Most intensively developing direction in semiconductor electronics is improvement and creation of solar elements. The review of works on solar elements on the basis of silicon, is given in AIII BV connections, in telluride of cadmium, a wide class of thin-film solar elements on the basis of  $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{by Se}^2$ .

**Keywords:** Semiconductors, nanostruktura, updating, electronics.

*Поступила 13.05.2013 г.*

*Х.А. АБДУЛЛИН<sup>1</sup>, Б.Н. МУКАШЕВ<sup>2</sup>*

(<sup>1</sup>Национальная нанотехнологическая лаборатория открытого типа КазНУ  
им. аль-Фараби МОН РК, г. Алматы, Казахстан;  
<sup>2</sup>Физико-технический институт, г. Алматы, Казахстан)

# ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И НАНОСТРУКТУР

## Аннотация

В настоящей работе приведен обзор литературы по исследованиям в области создания и применения полупроводниковых приборных структур. Рассмотрены методы модификации и создания наноструктур, такие, как ионные пучки, лазерная литография и инжиниринг дефектов. Рассмотрены методы синтеза наноструктур: рост из газовой фазы по самокаталитическому механизму и с участием катализаторов, лазерное распыление, химическое осаждение из газовой фазы и молекулярно-лучевая эпитаксия, синтез с использованием наншаблонов (например, нанопористый оксид алюминия), электроспиннинг, травление и др. Проведен обзор работ в области создания детекторов для регистрации света и заряженных частиц, резонансных туннельных диодов для работы при больших токах и частотах до 1 ТГц; по созданию тонкопленочных транзисторов для дисплеев с активной матрицей на светодиодах и органических светодиодах, по развитию методов улучшения светодиодов и формирования светового потока из активной области, по разработке подстраиваемых полупроводниковых лазеров и источников на терагерцевых частотах для различных применений. Приведены сведения по развитию молекулярной электроники и органическим полупроводникам по полупроводниковым датчикам и сенсорам, термоэлектрическим и пьезоэлектрическим генераторам, фотоэлектрохимическим ячейкам для расщепления воды, по использованию полупроводниковых квантовых точек. Значительное развитие в последние годы получили фотоника и плазмоника, синтез фотонных кристаллов и плазмонных структур. Наиболее интенсивно развивающимся направлением в полупроводниковой электронике является совершенствование и создание солнечных элементов. Приведен обзор работ по солнечным элементам на основе кремния, на соединениях  $A^{III}B^V$ , на теллуриде кадмия, широкого класса тонкопленочных солнечных элементов на основе  $CuIn_xGa_{(1-x)}Se_2$ .

**Ключевые слова:** полупроводники, наноструктура, модификация, электроника.

**Кілт сөздер:** жартылай өткізгіштер, нанокұрылым, түрлендіру, электроника.

**Keywords:** Semiconductors, nanostruktura, updating, electronics.

## 1 Введение

Полупроводники и полупроводниковые приборные структуры являются основой современной техники и промышленности. Уменьшение размеров приборных структур в микроэлектронике много лет следует известному закону Мура по удвоению транзисторов на одном кристалле каждые 24 месяца, и в настоящее время число транзисторов в процессорах достигло  $\sim 5 \times 10^9$ . На их основе разработаны полупроводниковые устройства для широкого спектра применений. Наблюдается рост исследований по разработке полупроводниковых наноструктур, структур с квантовым ограничением носителей,

структур для плазмоники и фотоники. Новые полупроводниковые материалы и наноструктуры позволяют получать более совершенные транзисторы, диоды, солнечные элементы, сенсоры и другие приборные структуры, которые находят применение во многих отраслях. В настоящей работе мы приведем краткий обзор исследований последних лет в области создания и применения полупроводниковых материалов.

## **2 Методы модификации и создания приборных структур**

Существуют два подхода синтеза наноструктур: традиционный для полупроводниковой электроники метод изготовления «сверху вниз» и более характерный для нанотехнологий подход «снизу вверх». Первый подход реализуется в процессе изготовления микросхем с применением литографии, ионной имплантации, диффузии, травления и т.д. Второй подход использует синтез наноразмерных структур путем упорядоченной сборки или самоорганизации атомов и молекул.

Наноструктуры могут быть получены методами «сверху вниз», такими, как ионные пучки, лазерная литография, инжиниринг дефектов. Эти методы используются для структурных и химических модификаций твердых тел и поверхностей, для селективного травления, активации и деформации поверхности, ионной имплантации, ионного перемешивания, синтеза на поверхности и в приповерхностных областях, аморфизации и пр. [1-2]. Путем ионно-стимулированного осаждения из газовой фазы возможно контролируемое с высокой точностью нанесение тонких пленок либо наноструктур с диаметром от 7 нм [3-4]. Радиационные эффекты в наноструктурах значительно отличаются от объемных [5], что можно использовать для модификации свойств материала. Методы лазерного создания трафаретов не требуют вакуума, в отличие от электронной и ионной литографии, имеют низкую стоимость, позволяют получать 2D [6-8] и 3D [9, 10] наноструктуры большой площади. С применением различных методов синтеза «снизу вверх» - химическое осаждение из газа (CVD) [11], синтез из газовой фазы по механизму «газ-твердое» и «газ-жидкость-твердое», молекулярно-лучевая эпитаксия, синтез с использованием наншаблонов, электроспиннинг, травление [12], лазерное распыление [13] - могут быть получены различные наноструктуры.

Одномерные наноструктуры (1D) часто применяются в сенсорах и перспективны для солнечных элементов (СЭ), пьезогенераторов, фотоники и оптоэлектроники. Преимуществами 1D структур является высокое кристаллическое совершенство и меньшее влияние границ зерен, большая удельная поверхность, более простые методы функционализации, возможность подгонки чувствительности и селективности к внешним воздействиям путем управления диаметром 1D структуры либо с использованием полевого эффекта.

Электронный транспорт в 1D-структурах отличается от объемного из-за размерных эффектов и влияния поверхности, на которой имеются локализованные состояния - доноры или акцепторы, ловушки и центры рассеяния носителей [14]. Поэтому электрические свойства нанонитей могут контролироваться путем модификации поверхности, например, ее пассивацией [15, 16] или нанесением слоев адсорбированных молекул. В случае осаждения карбоксильных групп проводимость нанонитей изменялась

на фактор  $10^6$  и выпрямляющий контакт превращался в омический [17]. Методы контролируемого изменения свойств поверхностными дефектами разработаны для GaAs, SnO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub> и других материалов [18]. Вариацией режимов роста можно управлять свойствами материала.

### **3 Диоды, транзисторы, тонкопленочные транзисторы**

Технология полупроводниковых кремниевых детекторов, широко применяемых для регистрации света и заряженных частиц, достигла высокого уровня. Детекторы выполняются в виде плоского и тонкого  $n^+p$ -перехода с малым мертвым слоем. Толщина базы определяется назначением прибора и при необходимости регистрации частиц высоких энергий база может достигать в толщину несколько миллиметров. Компактные кремниевые энергодисперсионные детекторы потеснили фотоумножители (ФЭУ), поскольку могут работать в режиме счета фотонов при комнатной температуре с высоким отношением сигнал/шум [19-20].

Улучшается конструкция резонансных туннельных диодов, состоящих из квантовых барьеров, разделенных квантовой ямой, в которой есть один или несколько уровней. Структуры на квантовых ямах могут работать при комнатной температуре, на больших токах и частотах до 1 ТГц [21-22].

Плоские дисплеи вытеснили электронно-лучевые трубки с рынка мониторов, и оптимизация технологий создания матриц для дисплеев весьма актуальна. Разрабатываются тонкопленочные транзисторы для дисплеев с активной матрицей на светодиодах (LED) и органических светодиодах (OLED), перспективные для замены поликристаллических кремниевых транзисторов, имеющих недостаточно однородные свойства. Созданы тонкопленочные ZnO-транзисторы [23] и аморфные транзисторы In-Ga-Zn-O (IGZO) (с соотношением In:Ga:Zn=1.1:1.1:0.9) [24] с высокими подвижностями носителей и однородными свойствами на большой площади гибких подложек, перспективные для применения в плоских дисплеях с диагональю более 70 дюймов (170 см и более), с высоким разрешением (4000×2000) и быстрым откликом (>240 Гц). Для исключения дорогостоящего индия разрабатываются растворы Zn-Sn-O, Ga-Zn-Sn-O и др. [23], оптимизируются свойства слоев [25-26]. Для увеличения экономической эффективности производства активных матриц большой площади исследуются простые методы синтеза (химическое осаждение из водных растворов, струйная печать и метод центрифугирования) [27-29].

### **4 Светодиоды, лазеры и терагерцовые ( $10^{12}$ ) излучатели**

Полупроводниковые светодиоды (LED) в настоящее время широко используются для подсветки, например, в дисплеях, в специализированном, общем и декоративном освещении, постепенно вытесняя лампы накаливания. LED могут собираться в панели большой площади и произвольной формы, обеспечивают выбор любого цвета и цветовых

температур, имеют высокие к.п.д., скорости включения и выключения, широкий диапазон рабочих температур ( $-20^{\circ}\text{C} \div 85^{\circ}\text{C}$ ), длительный срок службы - до 50000 часов.

Основными факторами повышения эффективности LED является достижение максимального выхода света из области генерации за счет уменьшения полного внутреннего отражения, внутреннего поглощения и блокирование света контактами. Методы повышения выхода эмиссии света из LED включают создание оптических резонаторов, брегговских решеток, нанотекстурирование внешней и внутренней поверхности LED, нанесение упорядоченных слоев микросфер, микропирамид, наностержней, микролинз, фотонных кристаллов и использование поверхностного плазмонного резонанса [30].

Лазеры на квантовых точках (КТ) имеют высокие характеристики, поскольку энергетический спектр КТ подобен атомарному, и процессы поглощения или излучения света в КТ очень интенсивны из-за большой плотности состояний в узких зонах. КТ позволяют создать полупроводниковые лазеры с пороговым током для генерации стимулированного излучения до  $\sim 1 \text{ A}/\text{cm}^2$ , что на 2 порядка ниже обычных величин [31].

Дополнительные эффекты появляются при упорядоченной сборке КТ в 1D÷3D сверхструктуры – искусственные кристаллы для создания следующего поколения приборов нанoeлектроники и оптоэлектроники [32]. Технологические методы получения упорядоченных массивов КТ включают спонтанный синтез при росте напряженных материалов, синтез методами молекулярной и химической эпитаксии, CVD, электронно- и ионно-лучевую литографию, синтез с помощью атомно-силового микроскопа, химическое и электрохимическое травление и многие другие методы [33].

На ИК-диапазон 1.9÷6 микрон, весьма важный для спектроскопии и передачи информации, разработаны материалы  $A^2B^6$  (ZnSe, ZnS, CdSe, CdS, ZnTe) и тройные растворы (CdMnTe, CdZnTe, ZnSSe), легированные атомами переходных металлов, для изготовления лазеров с эффективностью до 70% и пиковой мощностью до 1 ГВт [34].

Весьма актуальна разработка компактных, перестраиваемых и когерентных источников на терагерцовых ( $10^{12}$ ) частотах [35]. Соответствующий диапазон длин волн 0.03÷3 мм расположен между СВЧ и ИК диапазонами. Благодаря проникновению терагерцового излучения через легкие материалы такие источники могут найти применение в системах сканирования, медицинских томографах, системах контроля качества материалов. Для создания терагерцовых источников излучения перспективным является использование двумерных плазмонов в полупроводниковых наногетероструктурах. Пока одночиповый плазмонный ТГц-источник имеет мощность примерно в 30 раз меньше, чем ртутная лампа, но потребляет энергии на три порядка ниже [35]. Поэтому возможно дальнейшее повышение мощности излучения на несколько порядков при сохранении разумной мощности потребления.

## **5 Молекулярная электроника и органические полупроводники**

Биоэлектроника и биофотоника являются быстро развивающимися областями [36]. Среди большого количества белков, изученных для создания биоэлектронных устройств, внимание привлекают бактериородопсин (белок, преобразующий световую энергию в химическую) и бактериальные фотосинтетические реакционные центры. Бактериородопсин в отсутствие специфической для растений светособирающей системы позволяет использовать только 0.1-0.5% солнечного света по сравнению с его эффективностью 5% в растениях. Нано-биотехнологический подход с применением полупроводниковых и металлических наночастиц, сопряженных с биосистемой, может повысить потенциал светочувствительных белков. Достигнутые на сегодня значения фототока не превышают 0.4 мкА/см<sup>2</sup>, однако имеется значительный резерв для развития.

Гибкие структуры на органических полупроводниках демонстрируют хорошие перспективы применения в различных областях. Их можно создавать путем струйной печати, что является весьма привлекательным для крупномасштабного производства. Производство активных дисплеев на органических светодиодах (OLED) в настоящий момент вышло на промышленный уровень, созданы прототипы гибких и прозрачных дисплеев. Эффективность OLED сравнима с эффективностью LED на неорганических полупроводниках [37], хотя процессы фотонных потерь и замораживание экситонов все еще ограничивают эффективность и яркость OLED.

## **6 Полупроводниковые датчики и сенсоры**

Наноструктуры имеют широкие возможности в области аналитики и создания сверхчувствительных сенсоров, для биомолекулярного распознавания и сепарации [38]. Чувствительность сенсоров может быть улучшена при использовании 1D-архитектуры как обладающей большим отношением поверхности к объему, с использованием легирования, функционализации металлическими наночастицами. Например, газовые датчики на TiO<sub>2</sub>, с высокой чувствительностью к этанолу, парам монооксида углерода, водорода, метана ацетона и пр., находят применение в различных областях: биомедицина, химия, охрана окружающей среды, продукты питания и пр. [39-41].

## **7 Термоэлектрические и пьезоэлектрические генераторы**

Известно, что термоэлектрическая эффективность повышается при понижении теплопроводности материала. Термоэлектрическая эффективность нанонити может быть на порядок выше, чем в объемном материале [42] за счет поверхностного рассеяния фононов. Поэтому 1D структуры перспективны для термогенераторов [43]. Кремниевые 1D нанонити 20×20 нм имеют в 100 раз большую термоэлектрическую эффективность, чем объемный материал [44]. Коэффициент термо э.д.с. нанонити ZnO диаметром 20-40 нм почти в два раза выше, чем в объемном материале [45]. Солнечные термоэлектрические генераторы могут быть по эффективности сравнимы с СЭ [46-47]. Достигнута эффективность термоэлектрического генератора 4.6% при освещении AM1.5 (1000 Вт/м<sup>2</sup>) [46]. В [48] описан простой способ изготовления термоэлектрического

генератора на основе наноструктурированных порошков в полимерной матрице с напряжением холостого хода 51 мВ и мощностью 48 нВт при разности температур 14°C.

## **8 Фотоэлектрохимические ячейки, фотоэлектролиз воды.**

В [49] приведен обзор наноструктурированных фотоэлектрохимических ячеек для расщепления молекул воды на кислород и водород под действием солнечной радиации. Для фотоэлектролиза воды необходимо, по крайней мере, 1.23 эВ энергии. В оптимальной фотоэлектрохимической ячейке зоны полупроводника должны иметь подходящее расположение. Теоретически эффективность преобразования солнечной энергии в электрическую может достигать 30.7% при использовании систем с одним переходом [50]. Однако достигнутая на сегодня эффективность (10-12%) [51] намного ниже теоретического предела. Идеальный материал для фотохимической ячейки пока не разработан, проводятся исследования 1D÷3D наноструктур из TiO<sub>2</sub> [52], нано  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CdSe [53], WO<sub>3</sub> [54], InP [55]. Подбираются комбинации других материалов с взаимно дополняющими свойствами для повышения эффективности и стабильности функционирования [56-58].

## **9 Квантовые точки в медицине**

КТ используются *in vivo* (в организме) и *in vitro* (в лабораторных условиях) исследованиях. Неполный, но впечатляющий список возможного применения КТ в биомедицине включает: перенос лекарств и создание меток для маркировки, отслеживание переноса веществ внутри организма, маркеры для генной терапии, агенты для гипертермии и контрастные вещества для магнитно-резонансной томографии, *in vivo* обнаружение и локализация заболеваний, избирательная тепловая обработка патогенных клеток, фотосенсибилизация лекарства и селективное повреждение ткани-мишени, резонансная передача энергии флуоресценции для фотодинамической терапии [59]. Полупроводниковые КТ все более широко используются для получения *in vivo* изображений внутренних тканей и органов [60]. Нетоксичные, стойкие к фотообесцвечиванию, с большим сечением поглощения света, с узкой полосой фотолюминесценции (ФЛ), высоким квантовым выходом и большим стоковским сдвигом КТ могут быть изготовлены из С [61] и Si [62], CdTe/CdSe/ZnSe и CdSeTe/CdZnS [63], CdTe/CdS [64] CdTe/CdSe [65], CuInSe<sub>2</sub>/ZnS [66], InAs/ZnCdS [67], InAs/ZnS [68], InP/ZnS [69], PbS/CdS [70]. КТ в ближнем ИК-диапазоне успешно применяются для получения изображения опухолей [71-73]. Перспективно применение КТ для медицинских *in vitro* исследований и тестов на различные биомаркеры, протеины, метаболиты, нуклеиновые кислоты [74].

## **10 Фотоника**

Со времени появления концепции фотонных кристаллов [75-76] исследование их свойств и методов получения ведется весьма интенсивно. Фотонные кристаллы

характеризуются периодическим изменением оптических свойств по объему кристалла с таким периодом, что возникает [брэгговская дифракция](#) света. Благодаря своей структуре фотонные кристаллы обладают уникальными свойствами, такими как фотонная запрещенная зона, фотонная локализация, замедление света и др. [77-78]. Синтез осуществляется различными методами [79]. Фотонные кристаллы находят применение в качестве основы устройств фотоники для создания лазеров, волноводов, фокусирующих элементов, дисплеев, запоминающих и логических устройств, а также разнообразных сенсоров [80-81], перспективны для создания оптического компьютера [82]. Применение фотонных кристаллов в качестве сенсоров основано на сильном изменении их свойств при внешних воздействиях. Например, колориметрические датчики влажности с высокой чувствительностью созданы на основе мезопористого фотонного кристалла  $\text{TiO}_2$  [83] и магнитных частиц  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$  в полимерной матрице [84]. Сенсоры из фотонных кристаллов имели чувствительность к ксилолу в воде на уровне  $10^{-7}$  [85] и предел обнаружения около  $1 \cdot 10^6$  молекул [86]. Фотонный биомолекулярный сенсор создан из чередующихся слоев  $\text{TiO}_2$  и  $\text{SiO}_2$  [87]. Реализованы высокочувствительные фотонные датчики температуры [88], ионные детекторы, детекторы пара, датчики поверхностных волн и др. [79, 89, 90]. Для формирования элементов фотоники и создания лазеров, сенсоров, оптических резонаторов и усилителей предложены тубулярные гетероструктуры  $\text{In}(\text{Ga})\text{As}/\text{GaAs}$  на квантовых точках [91].

## 11 Плазмоника

Плазмонные колебания наблюдаются при взаимодействии света с проводником, когда высокочастотное переменное поле, падающее на поверхность металла, вызывает соответствующее движение свободных носителей в приповерхностной области на глубине, не превышающей толщину скин-слоя. Плазмонные колебания в частицах размерами 50-100 нм приводят к резонансному поглощению света в видимой области спектра и к люминесценции. На основе плазмонных колебаний возможно построение приборных структур и логических схем, плазмонных волноводов, резонаторов и концентраторов света [92]. Плазмоны видятся единственной альтернативой для передачи информации внутри будущих оптических компьютеров, поскольку длина плазмонной волны очень короткая по сравнению с соответствующей длиной волны света. В обзоре [93] описан плазмонный лазер с излучением при 489 нм на волноводе, созданном нанонитью из  $\text{CdS}$ . Для ближнего ИК-диапазона в качестве плазмонных материалов перспективны такие полупроводники, как оксид олова (ITO), оксид олова, легированный фтором (FTO,  $\text{SnO}_2:\text{F}$ ), оксид цинка, легированный алюминием (AZO) или галлием (GZO), обладающие малыми потерями и малой величиной действительной части диэлектрической проницаемости [94]. Различные типы плазмонных модуляторов металл-полупроводник-металл на основе активных сред  $\text{InGaAsP}$  рассмотрены в [95].

## 12 Наноантенны

Солнечная энергия может быть преобразована в электрическую с помощью антенны и выпрямителя, аналогично принципу действия детекторного радиоприемника, который

преобразует энергию электромагнитного излучения в постоянный (в смысле направления движения) ток. Система, работающая на частотах, соответствующих солнечному спектру, сможет «выпрямлять» световые электромагнитные колебания при освещении и генерировать ток. Для эффективного поглощения солнечного света антенна должна иметь характерный размер от 0.4 до 1.6 микрон, что нетрудно сделать при нынешнем развитии микроэлектроники, и в ней возникает плазмонный резонанс [96]. Теоретическая эффективность таких устройств превышает к.п.д. солнечных элементов, однако на практике такие устройства до сих пор не разработаны. Основная причина заключается в отсутствии эффективных выпрямляющих приборов для максимума солнечного спектра на частотах 200-750 ТГц. Пока антенны разработаны только для длинноволнового ИК-диапазона и имеют эффективность около 1% [97]. Перспективны для детектирования света туннельные диоды со структурой металл-диэлектрик-металл [98] и углеродные нанотрубки (УНТ) [99].

### 13 Солнечные элементы

Солнечные элементы осуществляют прямое преобразование энергии солнечного излучения в электричество. Солнечная фотовольтаика является одной из самых наукоемких видов возобновляемой энергетики и развивается высокими темпами. Кремниевые СЭ занимают более 90% рынка. Разработаны конструкции СЭ на монокристаллическом, поликристаллическом, аморфном кремнии, соединениях группы  $A^3B^5$ ,  $A^2B^6$  и  $A^4B^6$ , твердых растворах типа  $Cu(In,Ga)(S,Se)_2$  и  $Cu_2ZnSn(S,Se)_4$ , экситонные солнечные элементы на основе полимеров, красителей, квантовых точек и др. [100,101]. В таблице представлены опубликованные данные по эффективности преобразования СЭ из некоторых материалов и даты сообщений [102].

Таблица 1 – Эффективность (%) СЭ из некоторых материалов (год)

Материал	Малая площадь, кпд в %	Большая площадь, кпд в %
c-Si	25 (1998)	22.5 (2006)
a-Si	10.1 (2009)	7 (2003)
μc-Si:H	13.3 (2008)	
poly-Si		10.4 (2007)
CdTe	16.5 (2004)	11 (2007)
GaAs	26.4 (2009)	
$In_{1-x}Ga_xP/In_{1-y}Ga_yAs/Ge$	41.6 (2009)	
$CuInSe_2$	20.1 (2009)	15.1 (2010)

### 13.1 Кремниевые солнечные элементы

Хотя технологии создания кремниевых СЭ хорошо отработаны, предлагаются различные улучшения конструкции. Например, двухсторонний кремниевый СЭ с контактами из проводящего оксида и проволочной контактной сетки имел эффективность 17.7% [103] с перспективой достижения к.п.д 21%. Ячейки на аморфном кремнии с отражателем из периодической структуры имели кпд 9.7% [104], полученные методом CVD с индуктивно-связанной плазмой, имели низкую ( $3 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ) концентрацию дефектов и к.п.д. 9.6%, были стабильны под освещением. В [105] описан кремниевый СЭ с тыльным гетеропереходом на аморфном кремнии с к.п.д. 20.6% на площади  $2 \times 2 \text{ см}^2$ . Тонкие кремниевые СЭ с двойным гетеропереходом на аморфном кремнии TCO-(p-a-Si)-(i-a-Si)-(n-c-Si)-(i-a-Si)-(n-a-Si)-TCO, где TCO – прозрачный оксид, a-Si – аморфный слой, c-Si – кристаллический слой, имели эффективность 23% на площади  $100 \text{ см}^2$ , а на пластине толщиной менее 100 мкм получено  $U_{\text{xx}}=743 \text{ мВ}$  и к.п.д. 22.8% [106]. Для уменьшения отражения солнечного излучения предлагается текстурирование СЭ [107], нанотекстурирование с характерным размером меньше, чем длина волны падающего света [108-109]. Предлагаются конструкции СЭ на нанонитях [110], в виде нанопроводов, полученных травлением [111] или выращенных из газовой фазы на дешевых подложках [112-114]. Пока параметры этих устройств остаются более низкими, чем у планарных кремниевых СЭ [115-118].

Способы повышения эффективности СЭ [119] находятся в стадии постоянных разработок. Например, предложен СЭ на горячих носителях с оже-процессом термализации горячего электрона на дырке и генерацией дополнительного электрона в зоне проводимости [120]. Использование в СЭ света с энергией меньше, чем запрещенная зона полупроводника, может осуществляться через двухфотонное поглощение на квантовых точках из узкозонных полупроводников в матрице широкозонного полупроводника [121] либо через ИК-люминесценцию на локальных центрах [122].

### 13.2 Солнечные элементы на соединениях $A^{\text{III}}B^{\text{V}}$

Свойства арсенид галлия делают этот материал подходящим для создания более эффективных СЭ, чем кремниевые СЭ. Прямая зона GaAs вызывает сильное поглощение солнечного излучению при толщине слоя в несколько микрон. Радиационная и термическая стойкость GaAs делает СЭ на его основе оптимальными для космических применений. Ограничением широкого наземного применения СЭ на  $A^{\text{III}}B^{\text{V}}$  является высокая стоимость. Понизить стоимость СЭ на GaAs можно при использовании пленок, выращенных на подложках из Si или Ge, а также выращивая тонкие пленки GaAs на монокристаллической подложке с последующим отделением пленки и повторным использованием подложки [102]. В настоящее время многопереходные СЭ на основе полупроводников III-V (GaInP/GaInAs/Ge) имеют рекордные кпд более 40% [123], четырехпереходные СЭ AlGaInP/AlGaInAs/GaInAs/Ge могут иметь максимальную эффективность до 57%. Наземное использование СЭ на GaAs вследствие высокой стоимости материала оправдано при использовании концентраторных (~1000 солнц)

систем, оснащенных трекерами [124], которые, как показано [125], имеют срок службы около 30 лет.

### 13.3 Солнечные элементы на основе $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{Se}_2$ (CIGS)

Полупроводниковый материал  $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{Se}_2$  (CIGS) имеет ширину запрещенной зоны от 1.04 эВ при  $x=0$  до 1.7 эВ при  $x=1$ , и высокий коэффициент поглощения, поэтому хорошо подходит для создания тонкопленочных солнечных элементов. В настоящее время эффективность СЭ на CIGS достигла ~20% [126]. Характерная структура СЭ из CIGS состоит из стеклянной подложки, тонкого (0.3-0.4 мкм) слоя молибдена, активного слоя  $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$  толщиной от 1.5 до 2.5 мкм, лицевого контакта на основе CdS (0.05 мкм) и ZnO (0.1 мкм), и прозрачного контакта из ZnO:Al (0.3-0.4 мкм). Близкие к CIGS полупроводники имеют ширину запрещенной зоны 1.54 эВ ( $\text{CuInS}_2$ ), 1.68 эВ ( $\text{CuGaSe}_2$ ) и 2.5 эВ ( $\text{CuGaS}_2$ ). Это позволяет конструировать СЭ с оптимальными параметрами [127]. СЭ на CIGS уже выпускаются в промышленном масштабе [128]. Ограниченные запасы индия и галлия стимулируют разработку родственных материалов. СЭ из  $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{Se,S})_4$  продемонстрировали к.п.д. более 9% [129], СЭ из  $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S,Se})_4$  с Ge - 8.4%, разрабатываются пленочные СЭ  $\text{Cu}_2\text{S}/\text{CdS}$  [130].

### 13.4 Солнечные элементы на теллуриде кадмия

Оптимальная ширина запрещенной зоны теллурида кадмия 1.45 эВ, высокое оптическое поглощение, низкая стоимость и достаточно простая и низкочувствительная технология синтеза делают СЭ на CdTe перспективными. Среди недостатков CdTe как материала для СЭ необходимо отметить трудность получения р-типа CdTe, трудность создания низкоомных контактов к р-типу CdTe, рекомбинационные потери в р-п-переходе, высокую токсичность кадмия и малые запасы теллура. В недавних работах предлагается использовать буферный слой  $\text{MoO}_x$  для оптимизации свойств омического тыльного контакта к р-CdTe, имеющего высокую работу выхода [131], формировать слой р-CdTe методом сублимации компонентов в замкнутом объеме, а n-CdS лицевой контакт – гидротермальным методом [132], создавать КТ ядро-оболочка CdTe/CdS и сенсibilизировать ими фотоэлектрод из  $\text{TiO}_2$  [133], использовать дешевые стеклянные подложки для получения СЭ n-CdS/p-CdTe с эффективностью более 15% [134]. Это демонстрирует имеющийся потенциал СЭ на CdTe в плане получения высокой эффективности при низких затратах.

### 13.5 Солнечные элементы, сенсibilизированные красителями

В 1991 году [135] создан сенсibilизированный красителем СЭ с к.п.д. преобразования 7.1%, простая конструкция и низкочувствительная технология его создания стимулировали огромный интерес к данным устройствам. Ячейка Гретцеля состоит из 1) стеклянного анода, покрытого проводящим и прозрачным слоем оксида, 2) мезопористого слоя оксида, часто из  $\text{TiO}_2$ , нанесенного на анод, 3) тонкого слоя красителя на

поверхности мезопористого слоя для поглощения света, 4) электролита, содержащего редокс- медиатор для восстановления красителя, и 5) катода из слоя платины, нанесенного на подложку, обычно на стекло, для сбора электронов.

СЭ, сенсibilизированные красителями, достигли эффективности 11.4% [136] и 12.3 % [137]. Теоретический предел СЭ, сенсibilизированных красителями, составляет ~20% [138-139]. Повышение эффективности может быть достигнуто за счет разработки новых фотосенсibilизаторов с более высоким коэффициентом поглощения и широкой спектральной характеристикой, электролитов с лучшим согласованием энергии окисления красителя, подавлением рекомбинации зарядов, захвата электронов, подбором слоя полупроводника с зоной проводимости, расположенной по энергии между нижними свободными энергетическими состояниями адсорбера и редокс-уровнями электролита, с высокой подвижностью электронов и химической устойчивостью. Этим проблемам посвящено большое количество работ [140-150].

### **13.6 Другие типы солнечных элементов**

В настоящее время тонкопленочные СЭ на гибкой основе находятся в фокусе исследователей и разрабатывается целый ряд СЭ, принцип действия которых значительно отличается от работы классических СЭ на полупроводниковых p-n-переходах [151-153].

СЭ на полупроводниковых квантовых точках (КТ) являются перспективной альтернативой благодаря уникальным свойствам КТ и технологичности СЭ на КТ [154-161]. За 5 лет разработок к.п.д. СЭ на КТ поднялся с 0.5% в 2008 в 10 раз [156], достигнута эффективность 6% [157].

СЭ на основе полимеров и органических материалов [162-172] имеют низкую стоимость и хорошие механические свойства. В настоящее время на органических СЭ с одним переходом достигнут к.п.д. 8.4 % [168], на tandemных СЭ – 8.6 % [169]. Ожидается, что к.п.д. можно превысить до 10% [170]. Теоретические расчеты предсказывают для оптимизированных СЭ к.п.д. до 11% при относительно низкой стоимости [171]. Еще более перспективны полимерные СЭ с двойным гетеропереходом [172], которые могут иметь эффективность более 16% при ширине запрещенной зоны первой полуячейки ~1.6 эВ и второй полуячейки ~1 эВ.

СЭ на основе нанокремниевых материалов, таких как фуллерены, УНТ и графен, имеют малый вес, низкую стоимость исходного сырья и гибкую конструкцию. Поэтому много исследований посвящено разработке эффективных СЭ на основе этих материалов [173-177]. В [174] описан СЭ с объемным гетеропереходом на полимере донорного типа и фуллеренах. Достигнута эффективность около 4%, область фоточувствительности находилась в диапазоне от 300 до 650 нм.

Для эффективного рассеяния света в тонкопленочных СЭ предлагается применять 1D фотонные кристаллы [178, 179], которые могут действовать как брегговские отражатели и значительно уменьшать непродуктивную часть света, которая доходит до тыльного контакта и теряется.

**Выводы.** Таким образом, в последнее время объем исследований в мире в области полупроводников не снизился и акцент постепенно смещается в область разработки приборных наноструктур инаноструктурированных материалов. Это открывает новые возможности для создания новых материалов и приборов, для улучшения характеристик существующих устройств, для расширения области их применения.

## ЛИТЕРАТУРА

- 180 *Baglin J.E.E.* // *Applied Surface Science*. 2012. 258. P. 4103–4111.
- 181 *Ronning C., Borschel C., Geburt S., Niepelt R.* // *Materials Science and Engineering R*. 2010. 70. P. 30–43.
- 182 *Alkemade P., Chen P., van Veldhoven E., Maas D., Vac J.* // *Sci. Technol. B*. 2010. 28 (6). P. C6F22-5.
- 183 *Chen P., van Veldhoven E., Sanford C., Salemink H., Maas D., Smith D., Rack P., Alkemade P.* // *Nanotechnology*. 2010. 21. P. 455302-1-455302-7.
- 184 *Schrimpf R.D., Fleetwood D.M., Alles M.L., Reed R.A., Lucovsky G., Pantelides S.T.* // *Microelectronic Engineering*. 2011.88. P. 1259–1264.
- 185 *Gu Y., Dong CS., Zhong ML., Ma MX., Li L., Liu WJ.* // *Applied Surface Science*. 2011. 257. P. 3211-3215.
- 186 *Marconi MC., Wachulak PC.* // *Progress in Quantum Electronics*. 2010. 34. P. 173-190.
- 187 *Leen J.B., Hansen P., Cheng Y.-T., Gibby A., Hesselink L.* // *Applied Physics Letters*. 2010. 97. P. 073111.
- 188 *Malinauskas M., Ukauskas Z., Bichauskaite G., Gadonas R., Joudkazis S.* // *Optics Express*. 2010. 18(10). P. 10210–10221.
- 189 *Rill M.S., Plet C., Thiel M., Staude I., Freymann G.V., Linden S., Wegener M.* // *Nature Materials*. 2008. 7. P. 543–546.
- 190 *Hannah J. Joyce, Qiang Gao, Hoe Tan H., Jagadish C., Yong Kim, Jin Zou, Leigh M. Smith, Howard E. Jackson, Jan M. Yarrison-Rice, Patrick Parkinson, Michael B. Johnston.* // *Progress in Quantum Electronics*. 2011. 35. P. 23–75.
- 191 *Sven Barth, Francisco Hernandez-Ramirez, Justin D. Holmes, Albert Romano-Rodriguez.* // *Progress in Materials Science*. 2010. 55. P. 563–627.
- 192 *Shen Y., Hong J., Xu S., Lin S.S., Fang H., Zhang S., Ding Y., Snyder R.L., Wang Z.L.* // *Advanced Functional Materials*. 2010. 20. P. 703–707.
- 193 *Juan A. Anta.* // *Current Opinion in Colloid & Interface Science*. 2012. 17. P. 124–131.
- 194 *Keem K., Kang J., Yoon C., Jeong D.Y., Moon B.M., Kim S.* // *Jpn. J. Appl. Phys.* 2007. 46. P. 6230–6232.
- 195 *Chang P.C., Fan Z., Chien C.J., Stichtenoth D., Ronning C., Lu J.G.* // *Appl. Phys. Lett.* 2006. 89. P. 133113-1-133113-3.
- 196 *Lao C., Li Y., Wong C.P., Wang Z.L.* // *Nano Lett.* 2007. 7. P. 1323–1328.
- 197 *Edmund G. Seebauer, Kyong Wook Noh.* // *Materials Science and Engineering R*. 2010. 70. P. 151–168.
- 198 *Stewart A. V. et all.* // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 2008. 44(2). P. 157-164.
- 199 *Guerrieri F., Tisa S., Tosi A., Zappa F.* // *Proceedings of SPIE*. 2010. 7536. 753605.1-753605.10, ISBN 0-8194-7929-2, San Jose, USA, January 2010, SPIE, Bellingham, WA, USA.
- 200 *Sugiyama H., Yokoyama H., Teranishi A., Suzuki S., and Asada M.* // *Jpn. J. Appl. Phys.* 2010. 49. P. 051201-1-051201-6.

- 201 Suzuki S., Sawada K., Teranishi A., Asada M., Sugiyama H. and Yokoyama H. // *Electronics Lett.* 2010. 46. P. 1006–1007.
- 202 Joon Seok Park, Wan-Joo Maeng, Hyun-Suk Kim, Jin-Seong Park. // *Thin Solid Films.* 2012. 520. P. 1679–1693.
- 203 E. Fortunato, P. Barquinha, R. Martins. // *Advanced Materials.* 2012. 24. P. 2945; K. Nomura, H. Ohta, A. Takagi, T. Kamiya, M. Hirano, H. Hosono. // *NATURE.* 2004. 432. P. 488–492.
- 204 Hyun-Suk Kim, Kyung-Bae Park, Kyoung Seok Son, Joon Seok Park, Wan-Joo Maeng, Tae Sang Kim, Kwang-Hee Lee, Eok Su Kim, Jiyoul Lee, Joonki Suh, Jong- Baek Seon, Myung Kwan Ryu, Sang Yoon Lee, Kimoon Lee, Im S. // *Appl. Phys. Lett.* 2010. 97. P.102103-1-102103-5.
- 205 Ghaffarzadeh K., Nathan A., Robertson J., Kim S., Jeon S., Kim C., Chung U.-I., Lee J.-H. // *Appl. Phys. Lett.* 2010. 97. P. 143510-1-143510-3.
- 206 Kim M.G., Kim H.S., Ha Y.G., He J., Kanatzidis M., Facchetti A., Marks T.J., Am J. // *Chem. Soc.* 2010. 132. P. 10352-10364.
- 207 Yang Y.H. // *IEEE Electron Device Lett.* 2010. 31. P. 329-331.
- 208 Banger K.K., Yamashita Y., Mori K., Peterson R.L., Leedham T., Rickard J., Sirringhaus H. // *Nat. Mater.* 2011. 10. P. 45-50.
- 209 Zhmakin A.I. // *Physics Reports.* 2011. 498. P. 189–24.
- 210 Dieter Bimberg and Udo W. Pohl. // *Materials Today.* 2011, 14. P. 388-397.
- 211 Lin Li, Minghui Hong, Michael Schmidt, Minlin Zhong, Ajay Malshe, Bert Huis in 'tVeld, Volodymyr Kovalenko. // *CIRP Annals - Manufacturing Technology.* 2011. 60. P. 735–755.
- 212 Hongbo Lan, Yucheng Ding. // *Nano Today.* 2012. 7. P. 94–123.
- 213 Mirov S., Fedorov V., Moskalev I., Mirov M., Martyshkin D. // *J. Lumin.* 2011. doi:10.1016/j.jlumin.2011.09.040.
- 214 Taiichi Otsuji, Hiromi Karasawa, Takayuki Watanabe, Tetsuya Suemitsu, Maki Suemitsu, Eiichi Sano, Wojciech Knap, Victor Ryzhii. // *C. R. Physique.* 2010. 11. P. 421–432.
- 215 Sergei Yu. Zaitsev, Daria O. Solovyeva, Igor Nabiev. // *Advances in Colloid and Interface Science.* 2012. 183–184. P. 14–29.
- 216 Capelli R. et al. // *Nat. Mater.* 2010. 9. P. 496-503.
- 217 de Dios A.S., Diaz-Garcia M.E. // *Analytica Chimica Acta.* 2010. 666. P. 1–22.
- 218 Wang D., Zhou W., Hu P., Guan Y., Chen L., Li J., Wang G., Liu H., Wang J., Cao G., Jiang H. // *Journal of Colloid and Interface Science.* 2012. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcis>.
- 219 Hu P. G., Du G. J., Zhou W. J., Cui J. J., Lin J. J., Liu H., Liu D., Wang J. Y., Chen S.W. // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2010. 2 (11). P. 3263–3269.
- 220 Zhou W., Liu H., Boughton R. I., Du G., Lin J., Wang J., Liu D. // *J. Mater. Chem.* 2010. 20. P. 5993-6008.
- 221 Zhang Y., Shi Y., Pu L., Wang J., Pan L., Zheng Y. // *Physics Letters A.* 2011. 375. P.2728–2732.
- 222 Vomiero A., Concina I., Comini E., Soldano C., Ferroni M., Faglia G., Sberveglieri G. // *Nano Energy.* 2012. 1. P. 372–390.
- 223 Boukai A.I., Bunimovich Y., Tahir-Kheli J., Yu J.-K., Goddard W.A. and J.R. Heath // *Nature.* 2008. 451. 168–171.
- 224 Liu Y., Zhang Z., Wei X., Li Q., Peng L.-M. // *Adv. Func. Mat.* 2011. 21. P. 3900–3906.
- 225 Kraemer D., Poudel B., Feng H.-P., Caylor J.C., Yu B., Yan X., Ma Y., Wang X., Wang D., Muto A., McEnaney K., Chiesa M., Ren Z., Chen G. // *Nature Materials.* 2011. 10. P. 532–538.
- 226 Karni J. // *Nature Materials.* 2011. 10. P. 481–482.
- 227 Delaizir G., Monnier J., Soulier M., Grodzki R., Villeroy B., Testard J., Simon J., Navone C., Godart C. // *Sensors and Actuators A.* 2012. 174. P. 115– 122.
- 228 Yongjing Lin, Guangbi Yuan, Rui Liu, Sa Zhou, Stafford W. Sheehan, Dunwei Wang. // *Chemical Physics Letters.* 2011. 507. P. 209–215.

- 229 Bolton J.R., Strickler S.J., Connolly J.S. // *Nature*. 1985. 316. P. 495-500.
- 230 Cook T.R., Dogutan D.K., S.Y. Reece, Surendranath Y., Teets T.S., Nocera D.G. // *Chem. Rev.* 2010. 110. P. 6474-6502.
- 231 Suzhen Liang, Jingfu He, Zhihu Sun, Qinghua Liu, Yong Jiang, Hao Cheng, Bo He, Zhi Xie and Shiqiang Wei. // *J. Phys. Chem. C*. 2012. 116. P. 9049–9053.
- 232 Frank E. Osterloh and Bruce A. Parkinson. // *MRS BUL.* 2011. 36. P. 17-22.
- 233 Su J., Feng X., Sloppy J.D., Guo L., Grimes C.A. // *Nano Lett.* 2011. 11. P. 203-208.
- 234 Nann T., Ibrahim S.K., Woi P.M., Xu S., Ziegler J., Pickett C.J. // *Angew. Chem. Int. Ed.* 2010. 49. P.1574-1577.
- 235 Liu R., Lin Y., Chou L.Y., Sheehan S.W., He W., Zhang F., Hou H.J., Wang D. // *Angew Chem Int Ed Engl.* 2011. 50. P. 499-502.
- 236 Zhang J., Bang J.H., Tang C., Kamat P.V. // *ACS Nano*. 2010. 4. P.387-395.
- 237 Simamora A.-J., Hsiung T.-L., Chang F.-C., Yang T.-C., Liao C.-Y., Paul Wang H. // *International journal of hydrogen energy*. 2012. 37. P. 13855-13858.
- 238 Nguyen T.K. Thanh, Luke A.W. Green. // *Nano Today*. 2010. 5. P. 213-230.
- 239 Cassette E., Helle M., Bezdetnaya L., Marchal F., Dubertret B., Pons T. // *Advanced Drug Delivery Reviews*. 2012 <http://dx.doi.org/10.1016/j.addr.2012.08.016>.
- 240 Faklaris O., Joshi V., Irinopoulou T., Tauc P., Sennour M., Girard H., Gesset C., Arnault J.C., Thorel A., Boudou J.P., Curmi P.A., Treussart F. // *ACS Nano*. 2009. 3. 3955–3962.
- 241 Erogbogbo F., Tien C.A., Chang C.W., Yong K.T., Law W.C., Ding H., Roy I., Swihart M.T., Prasad P.N. // *Bioconjug. Chem.* 2011. 22. P. 1081–1088.
- 242 Blackman B., Battaglia D., Peng X.G. // *Chem. Mater.* 2008. 20. P. 4847–4853.
- 243 Deng Z., Schulz O., Lin S., Ding B., Liu X., Wei X., Ros R., Yan H., Liu Y. // *J. Am. Chem. Soc.* 2010. 132. P. 5592–5593.
- 244 Pons T., Pic E., Lequeux N., Cassette E., Bezdetnaya L., Guillemain F., Marchal F., Dubertret B. // *ACS Nano*. 2010. 4. P. 2531–2538.
- 245 Cassette E., Pons T., Bouet C., Helle M., Bezdetnaya L., Marchal F., Dubertret B. // *Chem. Mater.* 2010. 22. P. 6117–6124.
- 246 Allen P.M., Liu W.H., Chauhan V.P., Lee J., Ting A.Y., Fukumura D., Jain R.K., Bawendi M.G. // *J. Am. Chem. Soc.* 2010. 132. P. 470–471.
- 247 Choi H.S., Ipe B.I., Misra P., Lee J.H., Bawendi M.G., Frangioni J.V. // *Nano Lett.* 2009. 9. P. 2354–2359.
- 248 Tamang S., Beaune G., Texier I., Reiss P. // *ACS Nano*. 2011. 5(12). P. 9392-9402.
- 249 Zhao H.G., Wang D.F., Zhang T., Chaker M., Ma D.L. // *Chem. Commun.* 2010. 46. P. 5301–5303.
- 250 Chauhan V.P., Popović Z., Chen O., Cui J., Fukumura D., Bawendi M.G., Jain R.K. // *Angew. Chem. Int. Ed.* 2011. 50. P. 11417–11420.
- 251 Nicolas J., Brambilla D., Carion O., Pons T., Maksimovic I., Larquet E., Le Droumaguet B., Andrieux K., Dubertret B., Couvreur P. // *Soft Matter*. 2011. 7. P. 6187–6193.
- 252 Louie A.Y. // *Chem. Rev.* 2010. 110. P. 3146–3195.
- 253 Zongwen Jin and Niko Hildebrandt. // *Trends in Biotechnology*. 2012. 30 (7). P. 394-403.
- 254 Yablonovitch E. // *Physical Review Letters*. 1987. 58 (20). P. 2059–2062.
- 255 John S. // *Physical Review Letters*. 1987. 58 (23), 2486–2489.
- 256 Cheng S.C., Wu J.N., Yang T.J. et al. // *Physical Review A*. 2009. 79 (1). P. 013801.
- 257 Adachi N. Ishikura, Sasaki H. et al. // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 2010. 16 (1). P. 192-199.
- 258 Yong Zhao, Ya-Nan Zhang, Qi Wang. // *Sensors and Actuators B*. 2011. 160. P. 1288–1297.
- 259 Xiangsheng Xie, Yikun Liu, Mudong Zhang, Jianying Zhou, Kam Sing Wong. // *Physica E*. 2012. 44. P. 1109–1126.
- 260 Nair R.V., Vijaya R. // *Progress in Quantum Electronics*. 2010. 34. P. 89–134.

- 261 Joannopoulos J.D., Meade R.D., Winn J.N. // Princeton University Press. 1995.
- 262 Matthew M. Hawkeye, Michael J. Brett. // *Advanced Functional Materials* Volume. 2011. 21. P. 3652–3658.
- 263 Ruyang Xuan, Qingsheng Wu, Yadong Yin and Jianping Ge. // *J. Mater. Chem.* 2011. 21. P. 3672-3676.
- 264 Lai W.C., Chakravarty S., Wang X.L. et al. // *Applied Physics Letters*. 2011. 98 (2). 023304.
- 265 Jagerska J., Le Thomas N., Zhang H., Diao Z., Houdre R. // 12th International Conference on [Transparent Optical Networks \(ICTON\) 2010](#) Digital Object Identifier: 10.1109/ICTON.2010.5549037.
- 266 Yunbo Guo, Jing Yong Ye, Charles Divin, Baohua Huang, Thommey P. Thomas, James R. Baker, Jr, and Theodore B. Norris. // *Anal Chem.* 2010. 82 P. 5211–5218.
- 267 Bozolan A., Gerosa R.M., de Matos C.J.S., Romero M.A. // *Sensors Journal*. IEEE 2012. 12. P. 195-200.
- 268 Pergande D., Geppert T.M., Rhein A.V. et al. // *Journal of Applied Physics*. 2011. 109 (8). P. 083117.
- 269 He L., Hu Y.X., Kim H. et al. // *Nano Letters*. 2010. 10 (11). P. 4708–4714.
- 270 Zetian Mi., Pablo Bianucci. // *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. 2012. 16. P. 52–58.
- 271 Cai W., Shalaev V. // *Optical Metamaterials: Fundamentals and Applications*, Springer Verlag. 2009.
- 272 YinYin, Teng Qiu, Jiaqi Li, Paul K. Chu. // *Nano Energy*. 2012. 1. P. 25–41.
- 273 Gururaj V. Naik, Alexandra Boltasseva. // *Metamaterials*. 2011. 5. 1–7.
- 274 Viktoriia E. Babicheva, Irina V. Kulkova, Radu Malureanu, Kresten Yvind, Andrei V. Lavrinenko. // *Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications*. 2012. 10. P. 389–399.
- 275 Lukas Novotny. // *Phys. Rev. Lett.* 2007. 98. P. 266802.
- 276 Mark W. Knight, Heidar Sobhani, Peter Nordlander, Naomi J. Halas. // *Science* 2011. 332. P. 702-704 DOI: 10.1126/science.1203056.
- 277 Lukas Novotny, Niek van Hulst. // *Nature Photonics*. 2011. 5. P. 83–90 doi:10.1038/nphoton.2010.237.
- 278 Слюсар В. Наноантенны: подходы и перспективы. *Электроника: Наука, Технология, Бизнес* 2/2009, С. 58-65.
- 279 Parida B., Iniyani S., Goic R. // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011. 15. P. 1625–1636.
- 280 El Chaar L., Lamont L.A., El Zein N. // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011. 15. P. 2165–2175.
- 281 Avrutin V., Izyumskaya N., Morko? H. // *Superlattices and Microstructures*. 2011. 49. P. 337–364.
- 282 Унтила Г.Г., Кост Т.Н., Чеботарева А.Б., Закс М.Б., Ситников А.М., Солодуха О.И. // *ФТП*. 2005. 39. P. 1393-1398.
- 283 Ching-Mei Hsu, Corsin Battaglia, Celine Pahud, Zhichao Ruan, Franz-Josef Haug, Shanhui Fan, Christophe Ballif, Yi Cui. // *Advanced Energy Materials*. 2012. 2. P. 628-633.
- 284 Martin Bivour, Marc R?diger, Christian Reichel, Kurt-U. Ritzau, Martin Hermle, Stefan W. Glunz. // *Energy Procedia*. 2011. 8. P. 185–192.
- 285 Takahiro Mishima, Mikio Taguchi, Hitoshi Sakata, Eiji Maruyama. // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2011. 95. P. 18-21.
- 286 Zeman M., Isabella O., J?ger K., Santbergen R., Solntsev S., Topic M. and Krc J. // *Energy Procedia*. 2012. 15. P. 189 – 199.
- 287 Sanjay K. Srivastava, Dinesh Kumar, Vandana, Mukul Sharma, Ravi Kumar, Singh P.K. // *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 2012. 100. P. 33–38.

- 288 O'Donnell B., Yu L., Foldyna M., Cabarrocas P.R. // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2012. 358. P. 2299–2302.
- 289 Tang J., Huo Z., Britzman S., Gao H., Yang P. // *Nature Nanotechnology*. 2011. 6. P. 568–72.
- 290 Lu Y.R., Lal A. // *Nano Lett.* 2010. 10. P. 4651–4656.
- 291 Kendrick C.E., Yoon H.P., Yuwen Y.A., Barber G.D., Shen H.T., Mallouk T.E., Dickey E.C., Mayer T.S., Redwing J.M. // *Appl. Phys. Lett.* 2010. 97. P. 143108.
- 292 Yu L., O'Donnell B., Alet P.J., Roca i Cabarrocas P. // *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. 2010. 94. P. 1855–1859.
- 293 Gau C., Kuo C.Y., Dai B.T. // *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. 2011. 95. P. 154–157.
- 294 Stelzner T., Pietsch M., Andra G., Falk F., Ose E., Christiansen S. // *Nanotechnology*. 2008. 19. P. 295203.
- 295 Putnam M.C., Boettcher S.W., Kelzenberg M.D., Turner-Evans D.B., Spurgeon J.M., Warren E.L., Briggs R.M., Lewis N.S., Atwater H.A. // *Energy Environ. Sci.* 2010. 3. P. 1037–1041.
- 296 Cho J., O'Donnell B., Yu L., Kim K.-H., Ngo I., Roca i Cabarrocas P. // *Prog. Photovoltaics*. 2012. doi:10.1002/pip.1245.
- 297 Rathi S.J., Jariwala B.N., Beach J.D., Stradins P., Taylor P.C., Weng X.J., Ke Y., Redwing J.M., Agarwal S., Collins R.T. // *J. Phys. Chem. C*. 2011. 115. P. 3833–3839.
- 298 Adolf Goetzberger, Joachim Luther, Gerhard Willeke. // *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 2002. 74. P. 1–11.
- 299 Hans J. Queisser. // *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 2010. 94. P. 1927–1930.
- 300 Luque A., Marti A., Stanley C. // *Nature Photonics*. 2012. 6. P. 146–52.
- 301 Zheng J., Tao Y., Wang W., Ma Z., Zuo Y., Cheng B., et al. // *Journal of Luminescence*. 2012. 132. P. 2341–4.
- 302 Cotal H., Fetzer C., Boisvert J., Kinsey G., King R., Hebert P., Yoon H., Karam N. // *Energy Environ. Sci.* 2009. 2. P. 174–192.
- 303 Dimroth F. // *Phys. stat. sol.* 2006. 3(3). P. 373–379. DOI 10.1002/pssc.200564172.3
- 304 Carlos Algora. // *Microelectronics Reliability*. 2010. 50. P. 1193–1198.
- 305 Chirilă A., Buecheler S., Pianezzi F., Bloesch P., Gretener C., Uhl AR., Fella C., Kranz L., Perrenoud J., Seyrling S., Verma R., Nishiwaki S., Romanyuk Y.E., Bilger G., Tiwari A.N. // [Nat Mater](#). 2011, 10. P. 857-61. doi: 10.1038/nmat3122.
- 306 Green M.A., Emery K., Hishikawa Y., Warta W. // *Photovolt.: Res. Appl.* 2010. 18. P. 346–352.
- 307 Arnulf Jager-Waldau. // *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 2011. 95. P. 1509–1517.
- 308 Todorov T.K., Reuter K.B., Mitzi D.B. // *Adv. Mater.* 2010. 22. P. 1–4.
- 309 Sam M., Bayati M.R., Mojtahedi M., Janghorban K. // *Applied Surface Science*. 2010. 257. P. 1449–1453.
- 310 Hao Lin, Wei Xia, Hsiang N. Wu, and Ching W. Tang. // *Applied Physics Letters*. 2010. 97. P. 123504.
- 311 Ferekides C.S. and Morel D.L. // *Subcontract Report* 2011. NREL/SR-5200-51605. <http://www.osti.gov/bridge>.
- 312 Xiao-Yun Yu, Bing-Xin Lei, Dai-Bin Kuang and Cheng-Yong Su. // *Chem. Sci.* 2011. 2. P. 1396-1400.
- 313 Colegrove E., Banai R., Blissett C., Buurma C., Ellsworth J., Morley M., Barnes S., Gilmore C., Bergeson J. D., Dhere R., Scott M., Gessert T., Siva Sivananthan. // *Journal of Electronic Materials*. 2012. 41. P. 2833-2837.
- 314 O'regan B., Grätzel M. // *Nature*. 1991. 353. P. 737–740.
- 315 Han. L., et al. // *Energy Environ. Sci.* 2012. 5. P. 6057–6060.
- 316 Yella A., et al. // *Science*. 2011. 334. P. 629–634.
- 317 Snaiith H.J. // *Adv. Funct. Mater.* 2010. 20. P. 13–19.
- 318 Qifeng Zhang, Guozhong Cao. // *Nano Today*. 2011.6. P. 91-109.

- 319 Sahin C., Dittrich Th., Varlikli C., Icli S., Lux-Steiner M.Ch. // Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 2010. 94. P. 686–690.
- 320 Monica Lira-Cantu, Amine Chafiq, JeremyFaissat, Irene Gonzalez-Valls, Youhai Yu. // Solar Energy Materials & Solar Cells. 2011. 95. P. 1362–1374.
- 321 Rajab F., Loaring D. and Ziegler K.J. // Thin Solid Films. 2011. 519. P. 6598.
- 322 Meng S., Kaxiras E. // Nano Lett. 2010. 10. P. 1238–1247.
- 323 da Silva R., Rego L.G.C., Freire J.A., Rodriguez J., Laria D., Batista V.S. // J. Phys. Chem. C. 2010. 114. P. 19433–19442.
- 324 Jiawei Gong, Jing Liang, Sumathy K. // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2012. 16. P. 5848–5860.
- 325 Chakrapani. V., Tvrdy. K., Kamat P.V. // J. Am. Chem. Soc. 2010. 132. P. 1228–1229.
- 326 Barea E.M., Shalom M., Gimeñez S., Hod I., Mora-Seoro I., Zaban A., Bisquert J. / J. Am. Chem. Soc. 2010. 132. P. 6834–6839.
- 327 Gong J., Liang J., Sumathy K. // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2012. 16. P. 5848-5860.
- 328 Wang B., Kerr LL. // Solar Energy Materials and Solar Cells. 2011. 95. P. 2531-5.
- 329 Gong F., Wang H., Wang Z.-S. // Phys. Chem. Chem. Phys. 2011. 13. P. 17676–17682.
- 330 Thomas Dittrich, Abdelhak Belaidi, Ahmed Ennaoui. // Solar Energy Materials & Solar Cells. 2011. 95. P. 1527–1536.
- 331 Zou D., Wang D., Chu ZLv., Zh., Fan. X. // Coordination Chemistry Reviews. 2010. 254. P. 1169–1178.
- 332 Rui Yu., Qingfeng Lin., Siu-Fung Leung., Zhiyong Fan. // Nano Energy. 2012. 1. P. 57–72.
- 333 R?hle S., Shalom M., Zaban A. // Chem. Phys. Chem. 2010. 11. P. 2290–2304.
- 334 Emin S., Singh S.P., Han L., Satoh N., Islam. A. // Solar Energy. 2011. 85. P. 1264–1282.
- 335 Sargent E.H. // Nature Photonics. 2012. 6. P. 133-135.
- 336 Tang J., et al. // Nature Mater. 2011. 10. P. 765–771.
- 337 Olson J.D., Rodriguez Y.W., Yang L.D., Alers G.B., Carter S.A. // Appl. Phys. Lett. 2010. 96. P. 242103.
- 338 Wang X., Koleilat G.I., Tang J., Liu H., Kramer I.J., Debnath R., et al. // Nature Photonics. 2011. 5. P. 480-484.
- 339 Debntah R., Greiner M.T., Kramer J.J., Fuscher A., Tang J., Barkhouse D.A.R., Wang X., Levina L., Lu Z.-H., Sargent E.H. // Appl. Phys. Lett. 2010. 97. P. 023109.
- 340 Zhou Y., Riehle F.S., Yuan Y., Schleiermacher H.-F., Niggemann M., Urban G.A., Kr?ger M. // Appl. Phys. Lett. 2010. 96. P. 013304.
- 341 Cai W., Gong X., Cao Y. // Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 2010. 94. P. 114–127.
- 342 Chandrasekaran J., Nithyaprakash D., Ajjan K.B., Maruthamuthu S., Manoharan D., Kumar S. // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2011. 15. P. 1228–1238.
- 343 Liang Y., Xu Z., Xia J., Tsai S.T., Wu Y., Li G., Ray C., Yu L. // Adv. Mater. 2010. 22. P.135-138.
- 344 Jenny Nelson. // Materials Today. 2011. 14. P. 462-470.
- 345 Dilek Celik, Michael Krueger, Clemens Veit, Hans F. Schleiermacher, Birger Zimmermann, Sybille Allard, Ines Dumsch, Ullrich Scherf, Frank Rauscher, Phenwisa Niyamakom. // Solar Energy Materials & Solar Cells. 2012. 98. P. 433–440.
- 346 Yanmin Wang, Wei Wei, Xin Liu, Yijie Gu. // Solar Energy Materials & Solar Cells. 2012. 98. P. 129–145.
- 347 He Z., et al. // Adv. Mater. 2011. 23. P. 4636–4643.
- 348 Dou L., et al. // Nature Photonics 2012. 6. P. 180–185.
- 349 Gr?tzl M., Janssen R.A.J., Mitzi D.B., Sargent E.H. // Nature. 2012. 488. 304–312.
- 350 Koster L.J.A., Mihailetschi V.D., Blom P.W.M. // Appl. Phys. Lett. 2006. 88. P. 093511.
- 351 Siddiki M.K., Venkatesan S., Wang M., Qiao Q. // Solar Energy Materials and Solar Cells. 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2012.04.028>.

- 352 Dubacheva G.V., Chih-Kai Liang., Bassani D.M. // *Coordination Chemistry Reviews*. 2012. 256. P. 2628–2639.
- 353 Troshin P.A., Hoppe H., Peregodov A.S., Egginger M., Shokhovets S., Gobsch G., Sariciftci N.S., Razumov V.F. // *ChemSusChem*. 2011. 4. P.119 – 124.
- 354 Lancellotti L., Polichetti T., Ricciardella F., Tari O., Gnanapragasam S., Daliento S., Di Francia G. // *Thin Solid Films*. 2012. doi: 10.1016/j.tsf.2012.09.040.
- 355 Wang Y. // *Appl. Phys. Lett.* 2009. 95. P. 063302.
- 356 Sh. Sun L., Gao Y. Liu. // *Appl. Phys. Lett.* 2010. 96. P.083113.
- 357 Krč J., Zeman M., Luxembourg S., Topic M. // *Appl. Phys. Lett.* 2009. 94. P. 153501.
- 358 Parvathy Devi B., Kuo-Cheng Wu, Zingway Pei. // *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 2011. 95. P. 2102–2106.

## REFERENCES

- 42 Baglin J.E.E. *Applied Surface Science*, **2012**, 258, 4103–4111.
- 43 Ronning C., Borschel C., Geburt S., Niepelt R. *Materials Science And Engineering R*, **2010**, 70, 30–43.
- 44 Alkemade P., Chen P., van Veldhoven E., Maas D., *Vac J. Sci. Technol. B*, **2010**, 28 (6), C6F22-5.
- 45 Chen P., van Veldhoven E., Sanford C., Salemink H., Maas D., Smith D., Rack P., Alkemade P. *Nanotechnology*, **2010**, 21, 455302-1-455302-7.
- 46 Schrimpf R.D., Fleetwood D.M., Alles M.L., Reed R.A., Lucovsky G., Pantelides S.T. *Microelectronic Engineering*, **2011**, 88, 1259–1264.
- 47 Gu Y., Dong CS., Zhong ML., Ma MX., Li L., Liu WJ. *Applied Surface Science*, **2011**, 257, 3211-3215.
- 48 Marconi M.C., Wachulak P.C. *Progress In Quantum Electronics*, **2010**, 34, 173-190.
- 49 Leen J.B., Hansen P., Cheng Y.-T., Gibby A., Hesselink L. *Applied Physics Letters*, **2010**, 97, 073111.
- 50 Malinauskas M., Ukauskas Z., Bichauskaite G., Gadonas R., Joudkazis S. *Optics Express*, **2010**, 18(10), 10210–10221.
- 51 Rill M.S., Plet C., Thiel M., Staude I., Freymann G.V., Linden S., Wegener M. *Nature Materials*, **2008**, 7, 543–546.
- 52 Hannah J. Joyce, Qiang Gao, Hoe Tan H., Jagadish C., Yong Kim, Jin Zou, Leigh M. Smith, Howard E. Jackson, Jan M. Yarrison-Rice, Patrick Parkinson, Michael B. Johnston. *Progress In Quantum Electronics*, **2011**, 35, 23–75.
- 53 Sven Barth, Francisco Hernandez-Ramirez, Justin D. Holmes, Albert Romano-Rodriguez. *Progress In Materials Science*, **2010**, 55, 563–627.
- 54 Shen Y., Hong J., Xu S., Lin S.S., Fang H., Zhang S., Ding Y., Snyder R.L., Wang Z.L. *Advanced Functional Materials*, **2010**, 20, 703–707.
- 55 Juan A. Anta. *Current Opinion In Colloid & Interface Science*, **2012**, 17, 124–131.
- 56 Keem K., Kang J., Yoon C., Jeong D.Y., Moon B.M., Kim S. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **2007**, 46, 6230–6232.
- 57 Chang P.C., Fan Z., Chien C.J., Stichtenoth D., Ronning C., Lu J.G. *Appl. Phys. Lett.*, **2006**, 89, 133113-1-133113-3.
- 58 Lao C., Li Y., Wong C.P., Wang Z.L. *Nano Lett.*, 2007. 7. P. 1323–1328.
- 59 Edmund G. Seebauer, Kyong Wook Noh. *MATERIALS Science And Engineering R*, **2010**, 70, 151–168.
- 60 Stewart A.V. et all. *IEEE Journal Of Quantum Electronics*, **2008**, 44(2), 157-164.

- 61 Guerrieri F., Tisa S., Tosi A., Zappa F. *Proceedings Of Spie*, **2010**, 7536, 753605.1-753605.10, ISBN 0-8194-7929-2, San Jose, USA, January 2010, SPIE, Bellingham, WA, USA.
- 62 Sugiyama H., Yokoyama H., Teranishi A., Suzuki S., Asada M. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **2010**, 49, 051201-1-051201-6.
- 63 Suzuki S., Sawada K., Teranishi A., Asada M., Sugiyama H. and Yokoyama H. *Electronics Lett.*, **2010**, 46, 1006–1007.
- 64 Joon Seok Park, Wan-Joo Maeng, Hyun-Suk Kim, Jin-Seong Park. *Thin Solid Films*, **2012**, 520, 1679–1693.
- 65 Kenji Nomura, Hiromichi Ohta, Akihiro Takagi, Toshio Kamiya, Masahiro Hirano, Hideo Hosono. *Nature*, **2004**, 432, 488-492.
- 66 Hyun-Suk Kim, Kyung-Bae Park, Kyoung Seok Son, Joon Seok Park, Wan-Joo Maeng, Tae Sang Kim, Kwang-Hee Lee, Eok Su Kim, Jiyoul Lee, Joonki Suh, Jong- Baek Seon, Myung Kwan Ryu, Sang Yoon Lee, Kimoon Lee, Seongil Im. *Appl. Phys. Lett.*, **2010**, 97, 102103-1-102103-5.
- 67 Ghaffarzadeh K., Nathan A., Robertson J., Kim S., Jeon S., Kim C., Chung U.-I., Lee J.-H. *Appl. Phys. Lett.*, **2010**, 97, 143510-1-143510-3.
- 68 Kim M.G., Kim H.S., Ha Y.G., He J., Kanatzidis M., Facchetti A., Marks T.J., Am J. *Chem. Soc.*, **2010**, 132, 10352-10364.
- 69 Yang Y.H. *IEEE Electron Device Lett.*, **2010**. 31. 329-331.
- 70 Banger K.K., Yamashita Y., Mori K., Peterson R.L., Leedham T., Rickard J., Sirringhaus H. *Nat. Mater.*, **2011**, 10, 45-50.
- 71 Zhmakin A.I. *Physics Reports*, **2011**, 498, 189–24.
- 72 Dieter Bimberg, Udo W. Pohl. *Materials Today*, **2011**, 14, 388-397.
- 73 Lin Li, Minghui Hong, Michael Schmidt, Minlin Zhong, Ajay Malshe, Bert Huis in'tVeld, Volodymyr Kovalenko. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, **2011**, 60. 735–755.
- 74 Hongbo Lan, Yucheng Ding. *NANO TODAY*, **2012**. 7. 94—123.
- 75 Mirov S., Fedorov V., Moskalev I., Mirov M., Martyshkin D. *J. Lumin*, **2011**, doi:10.1016/j.jlumin.2011.09.040.
- 76 Taiichi Otsuji, Hiromi Karasawa, Takayuki Watanabe, Tetsuya Suemitsu, Maki Suemitsu, Eiichi Sano, Wojciech Knap, Victor Ryzhii. *C. R. Physique*, **2010**, 11, 421–432.
- 77 Sergei Yu. Zaitsev, Daria O. Solovyeva, Igor Nabiev. *Advances In Colloid And Interface Science*, **2012**, 183–184, 14–29.
- 78 Raffaella Capelli, [Stefano Toffanin](#), [Gianluca Generali](#), [Hakan Usta](#), [Antonio Facchetti](#), Michele Muccini. *Nature Materials*, 2010. 9. P. 496-503.
- 79 de Dios A.S., Diaz-Garcia M.E. *Analytica Chimica Acta*, 2010. 666. P. 1–22.
- 80 Wang D., Zhou W., Hu P., Guan Y., Chen L., Li J., Wang G., Liu H., Wang J., Cao G., Jiang H. *Journal Of Colloid And Interface Science*, **2012**, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcis>.
- 81 Hu P.G., Du G.J., Zhou W.J., Cui J.J., Lin J.J., Liu H., Liu D., Wang J.Y., Chen S.W. *Acs Appl. Mater. Interfaces*, **2010**, 2 (11), P. 3263–3269.
- 82 Zhou W., Liu H., Boughton R. I., Du G., Lin J., Wang J., Liu D. *J. Mater. Chem.*

## Резюме

Абдуллин<sup>1</sup> Х.А., Мұқашев<sup>2</sup> Б.Н.

(<sup>1</sup>ҚР БҒМ әл-Фараби атындағы ҚазҰУ Ашық түрдегі ұлттық нанотехнологиялық зертханасы, Алматы қ.; <sup>2</sup>Физика-техникалық институты, Алматы қ., Қазақстан)

## ЖАРТЫЛАЙ ӨТКІЗГІШТЕР ЖӘНЕ НАНОҚҰРЫЛЫМДАР ФИЗИКАСЫ

Бұл жұмыста жартылай өткізгішті құрылымдарды жасау және қолдану саласындағы зерттеулерге әдеби шолу жасалған. Иондық шоқтар, лазерлік литография және ақаулардың инжинирингі сияқты нанокұрылымдарды түрлендіру және жасау әдістері қарастырылған. Нанокұрылымдарды синтездеудің келесі әдістері: өзін-өзі катализдеу механизмі арқылы және катализаторлардың қатысуы арқылы газдық фазадан өсу, лазерлік тозаңдату, газдық фазадан химиялық тұндыру және молекулалық-сәулелік эпитакия, наношаблондарды (мысалға, нанокеукті алюминий тотығын) қолданатын синтез, электроспиннинг, өңдеу және т.б. қарастырылған. Жарық және зарядталған бөлшектерді тіркеуге арналған детекторлар, үлкен токтарда және 1ТГц жиіліктерге дейін жұмыс істейтін резонансты туннельдік диодтарды, жарық шығарушы диодтарға және органикалық жарық шығарушы диодтарға негізделген белсенді матрицалы дисплейлер жасауға арналған жұқа пленкалы транзисторлар жасауға, жарық шығарушы диодтарды жетілдіру және белсенді аймақтан жарық ағынын қалыптастыру әдістерін дамыту, түрлі салада қолданылатын жиілігі келтіріле алатын терагерцтік жартылай өткізгішті лазерлер мен жарық көздерін жасауға арналған еңбектерге шолу жүргізілген. Молекулярлық электрониканы дамытуға және органикалық жартылай өткізгіштер, жартылай өткізгішті тетіктер мен сенсорлар, термоэлектрлік және пьезоэлектрлік генераторлар, суды ыдыратуға арналған фотоэлектрохимиялық ұяшықтар, жартылай өткізгішті кванттық нүктелерді қолдануға арналған мәліметтер келтірілген. Соңғы жылдары фотоника және плазмоника, фотондық кристалдар мен плазмондық құрылымдарды синтездеу қарқынды дамуда. Жартылай өткізгішті электроникада күн элементтерін жетілдіру және жасау саласы ең жедел дамып келе жатқан бағыт болып табылады. Кремний,  $A^{III}B^V$  қосылыстары, кадмий теллуридi, жұқа пленкалы  $CuIn_xGa_{(1-x)}Se_2$  негізіндегі күн элементтеріне арналған еңбектерге шолу келтірілген.

**Кілт сөздер:** жартылай өткізгіштер, нанокұрылым, түрлендіру, электроника.

### Summary

*H.A. Mukashev<sup>2</sup>, B.N. Abdullin<sup>1</sup>*

(<sup>1</sup>The national nanotechnological laboratory of open type TREASURY  
of al-Farabi of Ministry of Education and Science RK, Almaty, Kazakhstan;

<sup>2</sup>fiziko-technical institute, Almaty, Kazakhstan)

## PHYSICS OF SEMICONDUCTORS AND NANOSTRUCTURES

The review of literature on researches is provided in the real work in the field of creation and application of semiconductor instrument structures. Methods of modification and creation of nanostructures, such, as ionic bunches, laser lithograph and engineering of defects are considered. Methods of synthesis of nanostructures are considered: growth from a gas phase on the self-catalytic mechanism and with participation of catalysts, laser dispersion, chemical sedimentation from a gas phase and a molecular and beam epitaxy, synthesis with use of nanotemplates (for example, nanoporous oxide of aluminum), an elektrospining, etching, etc. The review of works in the field of creation of detectors for registration of light and the loaded particles, resonant tunnel diodes for work is carried out at big currents and frequencies to 1 TGTs; on creation of thin-film transistors for displays with an active matrix on light-emitting diodes and organic light-emitting diodes, on development of methods of improvement of light-emitting diodes and formations of a light stream from active area, on development of arranged semiconductor lasers and sources at terahertz frequencies for various applications. Data on development to molecular electronics and organic semiconductors, on semiconductor sensors and sensors, thermoelectric and piezoelectric generators, photoelectrochemical cells for water splitting, on use of semiconductor quantum points are provided. Photonics and a plazmonik, synthesis of photon crystals and plazmonny structures in recent years have considerable development. Most intensively developing direction in semiconductor electronics is improvement and creation of solar elements. The review of works on solar elements on the basis of silicon, is given in AIIIBV connections, in telluride of cadmium, a wide class of thin-film solar elements on the basis of  $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{by Se}^2$ .

**Keywords:** Semiconductors, nanostruktura, updating, electronics.

*Поступила 13.05.2013 г.*