

УДК 621

*М.А. Васильева, Т.А. Гаврикова,
В.И. Ильин, С.Ф. Мусихин*

**КОМПОЗИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ – НОВОЕ НАПРАВЛЕНИЕ
РАЗВИТИЯ НАНОТЕХНОЛОГИЙ
(по материалам XIV Всероссийской молодежной
конференции по физике полупроводников и наноструктур,
полупроводниковой опто- и наноэлектронике)**

*М.А. Vasil'eva, Т.А. Gavricova,
V.I. Ilyin, S.F. Musikhin*

St. Petersburg State Polytechnical University,
195251, 29 Politekhnicheskaya St., St. Petersburg, Russia.

**COMPOSITE MATERIALS AS A NEW DIRECTION
OF NANOTECHNOLOGY DEVELOPMENT
(on the 14th All-Russian Youth Conference on Semiconductor and
Nanostructure Physics and Semiconductor Opto- and Nanoelectronics)**

В статье подведены итоги XIV Всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике (Санкт-Петербург, 26 – 30 ноября 2012 г.) Названы работы студентов и аспирантов, отмеченных дипломами конференции и премиями. Во вводной части статьи дан обзор работ, посвященных композитным материалам, – направлению, открывающему новые перспективы развития нанотехнологии.

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ. НАНОСТРУКТУРЫ. КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. ОПТОЭЛЕКТРОНИКА. НАНОЭЛЕКТРОНИКА.

The paper briefly summarizes the results of the 14th All-Russian Youth Conference on Semiconductor and Nanostructure Physics and Semiconductor Opto- and Nanoelectronics (St. Petersburg, on November 26 – 30, 2012). The titles of students' and post-graduate students' reports diplomaed and awarded prizes are presented. The introductory part reviews works on composite materials as a new direction of nanotechnology development.

SEMICONDUCTOR PHYSICS. NANOSTRUCTURES. COMPOSITE MATERIALS. OPTOELECTRONICS. NANOELECTRONICS.

26 – 30 ноября 2012 года в Санкт-Петербурге, в здании Академического университета РАН, прошла XIV Всероссийская молодежная конференция по физике полу-

проводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике. Настоящая статья посвящена итогам конференции. По традиции, которой мы придерживались,

публикуя в журнале «Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета» итоги многих предыдущих конференций, мы и на этот раз, предваряя описание собственно результатов конференции, даем обзор работ по одному из наиболее перспективных (по нашему мнению) направлений в тематике конференции. В данном случае статья посвящена композиционным материалам, имеющим в своем составе полупроводниковые нанозлементы.

Композиционный материал, часто сокращенно называемый композитом или композитным материалом, — это «искусственно созданный неоднородный материал, состоящий из двух или более компонентов с четкой границей раздела между ними» (так определяет композитные материалы Википедия). В большинстве композитов компоненты можно разделить на матрицу и включенные в нее элементы. В композитах элементы обычно обеспечивают необходимые характеристики материала, а матрица — совместную работу элементов и их защиту от внешней среды. В некоторых случаях трудно, а иногда и невозможно, разделить композит на элементы и матрицу. Композит обладает не только свойствами, присущими элементам и матрице, но и может проявлять новые свойства, которых не было у матрицы и элементов по отдельности. Если элементы имеют размеры от единицы до нескольких десятков нанометров, то в этом случае говорят о нанокompозитах. Мы будем рассматривать компоненты, представленные полупроводниковыми наночастицами (квантовыми точками (КТ)), проводящими или диэлектрическими полимерами и другими материалами. Нас будут интересовать электрические и оптические свойства нанокompозитов, а также их применение.

Нанокompозиты привлекают внимание уже более 10 лет [1 – 3]. За это время исследованы различные сочетания КТ в различных матрицах. Наиболее популярны КТ в сульфиде, теллуриде и селениде кадмия с фотoluminesценцией в видимой области спектра, а также в сульфиде и селениде свинца, арсениде индия в ближней инфра-

красной области [4]. Кроме того, в последнее время также привлекают внимание наночастицы оксида цинка, фосфида индия и возродился интерес к наночастицам диоксида титана. Нанокompозиты являются быстро развивающейся областью исследования наноматериалов. Сфера их применения охватывает обширный диапазон от опто- и наноэлектроники до различного рода сенсоров для химии, биологии и медицины. В данном обзоре мы сфокусируем внимание на применении нанокompозитов в опто- и наноэлектронике. В ряде работ нанокompозитом называют квантовые точки с оболочкой из полупроводника иного типа, чем ядро, и покрытием из лигандов. В данном обзоре мы будем считать такой объект квантовой точкой. Пленки, образованные КТ, покрытыми органическими лигандами, тоже образуют нанокompозит. Материал лиганда и полупроводниковые ядра являются компонентами нанокompозита. Материал лиганда играет ту же роль, что и полимер, и, по сути, представляет собой матрицу.

Коллоидные квантовые точки, проводящие полимеры, нанокompозиты

Квантовые точки (КТ) — это нульмерные наноматериалы [5]. Их привлекательность связана с нанометровыми размерами и возможностью проектирования для определенных применений в таких устройствах, как электро- и нелинейно-оптические приборы, солнечные элементы и узлы для компьютеров (здесь мы опускаем обширную область их применения в биосенсорах и в медицине). КТ могут быть соединены с полимерами и образовывать нанокompозиты, которые можно рассматривать как небывалое новшество XXI века [6]. КТ и методы их синтеза, проводящие полимеры и нанокompозиты ранее были описаны в статье [3], поэтому в данном обзоре мы рассмотрим последние научные достижения и новые приборы на основе нанокompозитов.

Основной особенностью КТ, стимулирующей их применение, следует считать зависимость эффективной ширины запрещенной зоны от размера КТ: чем меньше

размер КТ, тем больше ширина зоны. Такая корреляция приводит к зависимости спектров поглощения и люминесценции от размера КТ, что позволяет задавать заранее спектральные свойства объектов, которые требуются конкретно для проектируемого прибора.

Свойства проводящих полимеров определяются двойными связями между атомами углерода, обусловлены пайерлсовской неустойчивостью и особенностью π -связей. Положение уровней низшей незанятой молекулярной орбитали (LUMO) и наивысшей занятой молекулярной орбитали (НОМО) полимера – аналогов дна зоны проводимости и потолка валентной зоны полупроводника зависит от структуры элементарного звена полимерной цепи (мономера) и длины участка (сегмента) с согласованным положением связей. В проводящих полимерах эти уровни распределены по энергии в некотором интервале. Источники энергетического беспорядка – это распределение сегментов по длине в π - или s -связанных главных цепях полимера и флуктуация энергии поляризации в решетке. Этот участок можно рассматривать как квантовую нить, в пределах которой электроны или дырки могут свободно перемещаться, причем они локализованы на этих сегментах, оставаясь делокализованными в пределах сегмента. Положение уровней зависит от длины квантовой нити и поэтому может меняться от одного участка цепи к другому. Границы сегмента полимерной нити могут быть связаны либо с обрывом полимерной цепи, либо с ее поворотом вокруг оси цепи, либо с ее изгибом.

Флуктуация поляризационной энергии обусловлена хаотическим расположением полимерных цепей и случайным образованием зарядов носителей, которое приводит к возникновению поляронов. В нанокompозитах положение уровней зависит также от включения наночастиц в полимерную матрицу. Величины диэлектрической проницаемости материалов наночастиц и полимеров могут значительно различаться, что приводит к изменению поляризационной энергии полимеров в окрестности наночастиц [7]. В целом локализованные

состояния распределены по Гауссову закону [8]:

$$g(\varepsilon) = \frac{N}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\varepsilon^2}{2\sigma^2}\right), \quad (1)$$

где $g(\varepsilon)$ – плотность локализованных состояний в диапазоне энергий от ε до $\varepsilon + d\varepsilon$; σ – энергетический масштаб распределения; N – полная концентрация локализованных состояний.

Энергия ε отсчитывается от центра полосы состояний. Распределение локализованных состояний в органических соединениях отличается от аналогичного распределения в неорганических, например полупроводниках, где локализованные состояния распределены по экспоненциальному закону.

Проводимость в проводящих полимерах носит прыжковый характер с переменной длиной прыжка. Предполагается, что заряженные носители движутся в неупорядоченных органических полупроводниках через некогерентные прыжковые переходы между локализованными состояниями с некоторой концентрацией N , которые хаотически распределены в пространстве. Все состояния локализованы, а их энергетическое распределение описывается уравнением (1). Энергетический масштаб σ для распределения плотности состояний в большинстве органических материалов составляет около 0,1 эВ. Считается, что нет никаких корреляций между пространственным положением локализованных состояний и их энергией.

Температурная зависимость дрейфовой подвижности, полученная из времяпролетных экспериментов в неупорядоченных органических твердых телах, обычно имеет форму [8]:

$$u \sim \exp\left[-\left(\frac{T_0}{T}\right)^2\right], \quad (2)$$

где T_0 – параметр.

Эта температурная зависимость была воспроизведена при расчетах методом Монте-Карло прыжкового переноса заряженных носителей в наборе локализованных состояний с гауссовским распределением по энергии. Для экспоненциального распределения локализованных состояний

характерна температурная зависимость подвижности, которая следует закону Аррениуса:

$$u \sim \exp\left(-\frac{\Delta}{k_0 T}\right), \quad (3)$$

где Δ – энергия активации.

Поведение носителей существенно различается в зависимости от характера распределения состояний по энергии. При гауссовском распределении локализованных состояний существует граничная энергия $\langle \varepsilon_\infty \rangle$, вблизи которой собираются релаксирующие по энергии электроны (или дырки), и ниже они уже не опускаются, в то время как при экспоненциальном распределении носители могут неограниченно релаксировать, опускаясь на свободные состояния до тех пор, пока они не окажутся вблизи уровня Ферми μ . Для гауссовского спектра распределения локализованных состояний выражаются как

$$\langle \varepsilon_\infty \rangle = \frac{\sigma^2}{k_0 T}. \quad (4)$$

Оказалось, что в органических проводящих материалах можно наблюдать зависимости как типа (2), так и типа (3). Если энергия $\langle \varepsilon_\infty \rangle$ лежит выше уровня Ферми, то температурная зависимость подвижности описывается соотношением (2). Подвижность электронов в этом случае является хорошо определенной величиной, независимо от размеров образца и приложенного электрического поля, и характеризует сам материал. Если концентрация носителей велика, так что уровень Ферми находится выше $\langle \varepsilon_\infty \rangle$, то подвижность зависит от концентрации электронов в системе. Более того, в последнем режиме температурная зависимость подвижности носителей, вследствие прыжков по локализованным состояниям с гауссовским распределением, принимает форму закона Аррениуса (3). Обычно такая зависимость в органических материалах наблюдается при измерении электропроводности в системе со значительной концентрацией электронов, например, в полевых транзисторах.

В неупорядоченных органических материалах существует уровень энергии ε_i ,

который играет роль края подвижности. Он отделяет локализованные состояния от делокализованных в хвосте распределения плотности состояний. При низких температурах, когда $k_0 T < \sigma$, носители, помещенные в область большой энергии гауссовского распределения, совершают переходы вниз по энергии до тех пор, пока они не достигнут величины ε_i – транспортного уровня. После этого носители совершают прыжки вверх по энергии в состояния вблизи уровня ε_i . Этот прыжковый процесс, около и ниже ε_i , напоминает процесс многочисленных захватов на ловушки, где величина ε_i играет роль края подвижности.

Для проводимости на постоянном токе перколяционная теория дает зависимость

$$\sigma_{DC} = \sigma_0 \exp\left(-\frac{\varepsilon_i - \mu}{k_0 T}\right), \quad (5)$$

где σ_0 – предэкспоненциальный множитель, слабо зависящий от температуры, а энергия μ – уровень Ферми.

Смесь КТ и полимеров образует нанокомпозит. КТ распределены хаотически в объеме полимерной матрицы.

Нанокомпозит образуется также при соединении графенового листа с другими материалами. Так, возможно соединение графена с полимером и графена с квантовой точкой.

Проводимость в нанокомпозитах

В зависимости от концентрации наночастиц возможно образование из них бесконечного кластера наночастиц. Если полимерная матрица является проводящей, то проводимость возможна как по проводящей полимерной матрице, так и по бесконечному кластеру из наночастиц. Если же полимер не проводит электричества, то проводимость возможна только в случае образования бесконечного кластера из наночастиц. Перенос зарядов по бесконечному кластеру происходит по прыжковому механизму [9]. Носители туннелируют из одной КТ в другую, если расстояние между КТ достаточно мало. Темп туннельных переходов заряженных носителей из локализованного состояния i в локализованное состояние j , лежащее ниже по энергии, зависит от про-

странственного разделения r_{ij} между узлами i и j и следует равенству

$$v(r_{ij}) = v_0 \exp\left(-\frac{2r_{ij}}{a}\right),$$

где a — длина локализации, которая предполагается одной и той же для всех узлов; r_{ij} — расстояние между КТ.

Длина локализации определяет экспоненциальный спад волновой функции носителей в локализованных состояниях. Длину спада на отдельных узлах можно оценить из численных расчетов дрейфовой подвижности в зависимости от концентрации. Коэффициент v_0 зависит от механизма взаимодействия электронов, который вызывает переход. Обычно предполагается, что переходы носителей, которые дают вклад в их перенос в неупорядоченных материалах, вызваны взаимодействием с фононами. Часто предполагают, что коэффициент v_0 имеет порядок фоновой частоты. При более строгом рассмотрении необходимо определить эту величину и принять во внимание структуру электронных локализованных состояний, а также детали механизма взаимодействия.

Размеры КТ распределены приблизительно по Гауссову закону, следовательно, и уровни энергии КТ тоже распределены приблизительно по данному закону. Перескоки носителей между КТ будут зависеть от положения уровней энергии в КТ. Темп переходов между КТ с уровнями энергии ε_i и ε_j , которые расположены на расстоянии r_{ij} между КТ, будет выражаться как

$$v(r_{ij}) = v_0 \exp\left(-\frac{2r_{ij}}{\beta}\right) \times \exp\left(-\frac{\varepsilon_j - \varepsilon_i + |\varepsilon_j - \varepsilon_i|}{2k_0T}\right), \quad (6)$$

где β — эффективный радиус собственного состояния в КТ.

Заряд по прыжковому механизму переносится по сетке Миллера — Абрахамса в форме заряда, делокализованного по всей наночастице, а не в форме электрона или дырки на локализованных состояниях.

Все, что изложено относительно проводящих полимеров, справедливо и для

КТ бесконечного кластера. Соответствующие уровни, аналогичные энергиям $\langle \varepsilon_\infty \rangle$ и ε_p , можно определить и для бесконечного кластера.

Важной характеристикой, которая определяет поведение проводимости в полимерных нанокомпозитах, служит порог протекания. Он проявляется, когда концентрация нанокристаллов достигает достаточно высоких значений и возникает проводимость вдоль цепочек нанокристаллов. При пороговом значении концентрации проводимость резко возрастает и может достигать значений $10^7 - 10^8$ (Ом·см)⁻¹. Этот эффект аналогичен переходу металл — изолятор в сильно легированных и сильно компенсированных полупроводниках (переход Мотта). Порог протекания (по концентрации частиц) зависит от размера наночастиц. Было показано, что порог для наноразмерных частиц ниже, чем для частиц микронного размера, и изменение проводимости с ростом концентрации — более резкое. Порог протекания для наночастиц составляет около 15 об. % (или несколько меньше) [10].

Примеры приборов на основе нанокомпозитов

Фрактальный p - n -переход образован двумя слоями нанокомпозитов, в одном из которых содержатся КТ с проводимостью n -типа, а в другом — с проводимостью p -типа. Если разместить наночастицы так, что их концентрация максимальна у противоположных краев пленки и спадает к середине, т. е. они размещаются с градиентом концентрации, то образуется диффузионный p - n -переход, образованный двумя бесконечными кластерами наночастиц. На границе образуется смешанный слой, содержащий одновременно КТ с проводимостью обоих типов. В случае двух типов частиц порог протекания для каждого составляет около 15 об. %. Таким образом, наночастицы должны в целом занимать 30 об. %, а полимер — 70 об. %. В этом случае имеется протекание по кластерам частиц как n -, так и p -типа (рис. 1).

Если ширина смешанного слоя W составляет около семи диаметров частиц, а

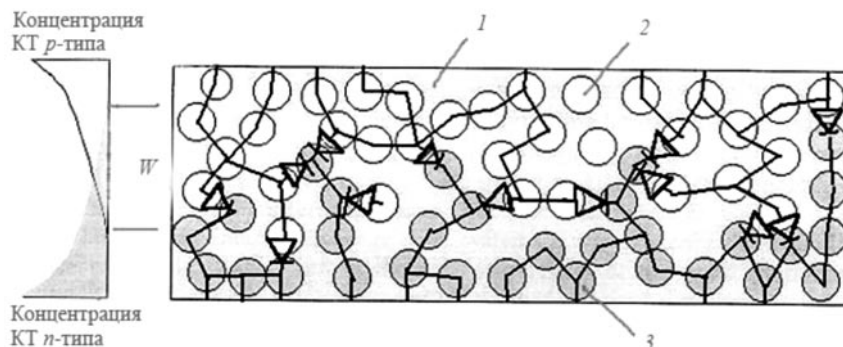


Рис. 1 [10]. Структура прибора с фрактальной геометрией $p-n$ -перехода:
 1 – полимерная матрица; 2, 3 – КТ p - и n - типов;
 W – ширина фрактального $p-n$ -перехода (смешанного слоя)

длина экранирования Дебая

$$L_D = \sqrt{\frac{\kappa \kappa_0 k_0 T}{e^2 n_b}}$$

(n_b – число свободных носителей в зоне проводимости (или валентной зоне) частицы, κ – диэлектрическая проницаемость, κ_0 – электрическая постоянная) больше диаметра частиц, то образуется планарный $p-n$ -переход.

Однако, если уровень легирования частиц возрастает либо переход подвергается воздействию света, то длина экранирования Дебая может оказаться сравнимой с радиусом наночастиц, вследствие чего область пространственного заряда изменяется и сводится к области пространственного заряда $p-n$ -перехода одиночной пары частиц, т. е. наступает «фрактализация» области пространственного заряда. Распределение потенциала можно найти из уравнения Пуассона. Если допустить, что примесные атомы однородно распределены по объему наночастицы, а КТ n - и p -типа перемешаны, то можно решить уравнение численным методом, используя метод конечных элементов при соответствующих граничных условиях. Результаты расчетов показывают, что порог «фрактализации» зависит от таких параметров, как диаметр частицы, дебаевская длина, топология и толщина смешанного слоя.

Особенностью такого перехода является существование сильного электрического поля, так как даже в случае частиц с тем же типом проводимости локальные поля мо-

гут достигать значений 10^7 В/см, а в случае контакта или близкого расположения частиц p - и n - типов значения напряженности поля будут даже выше и могут превышать 10^8 В/см. Так, когда наступает «фрактализация», область объемного заряда рассматриваемого перехода может превосходить таковую для обычного полупроводникового плоского перехода в 10 – 1000 раз, в зависимости от топологии смешанной области. Это дает существенное преимущество при изготовлении фотовольтаических наноконструктивных ячеек, так как активная область (область, где поля достаточно сильны, чтобы разделить заряды фотогенерированных экситонов, образованных как в наночастицах, так и в полимерах) увеличивается до 10 – 20 мкм; другими словами, образуется объемный $p-n$ -переход. Топология фрактального перехода также предоставляет непрерывные пути для носителей заряда обоих типов к соответствующим электродам с минимальной рекомбинацией, поскольку вблизи всегда имеется частица с подходящим типом проводимости, входящая в бесконечный кластер, на которую может перепрыгнуть электрон или дырка. В итоге дырки передаются по бесконечному кластеру дырочного типа, а электроны – по кластеру электронного. Такие кластеры сосуществуют в активной области диффузионного перехода с данным типом топологии.

Контакты с разными значениями работы выхода создают встроенное поле в структуре. Тогда возможен перенос дырок

по матрице и электронов по бесконечному кластеру нанокристаллов. Разделение зарядов можно создать, если использовать уже рассмотренную структуру фрактального диода, которая образуется при использовании нанокристаллов *n*- и *p*- типов. Такую структуру можно создать из нанокристаллов Cu_2S (*p*-тип) и CdS (*n*-тип).

Использование бесконечного кластера из наночастиц сульфида или селенида кадмия при их высокой концентрации позволяет разделить около 90 % носителей от общего числа генерированных экситонов. Главные потери происходят в результате захвата электронов в «мертвых» концах проводящей сети нанокристаллов, которые действуют как центры рекомбинации. Цепи нанокристаллов CdS играют роль электрода (коллектора носителей), распределенного в полимерной матрице.

Фрактальный *p*–*n*-переход образуется также при использовании КТ Bi_2S_3 (*n*-тип) и PbS (*p*-тип) [11]. На базе такого перехода возможна разработка оптоэлектронных приборов и солнечных элементов.

Объединение графена и КТ образует в итоге наноккомпозит. Слой КТ на поверхности графенового листа использован для создания полевого фототранзистора [12]. Графен нанесен на поверхность структуры Si/SiO_2 и покрыт КТ PbS . Графен образует канал переноса носителей, а слой КТ PbS – слой, в котором происходит поглощение фотонов. Носители, образующиеся под действием света в КТ, переходят в графен, а противоположные заряды захватываются в слое КТ. Эти захваченные заряды приводят к эффекту фотоусиления, когда в их присутствии через емкостную связь меняется сопротивление графенового листа. Главная особенность прибора состоит в сверхвысоком коэффициенте фотоэлектрического усиления благодаря высокой подвижности носителей в графене (порядка $10^3 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$) и многократному переносу носителей за то время, пока захваченные носители остаются в КТ PbS . Этот гибридный фототранзистор графен – КТ обладает сверхвысоким коэффициентом фотоусиления и высокой квантовой эффективностью. Обнаружительная способность составляет

$7 \cdot 10^{13} \text{ см}\cdot\text{Гц}^{1/2}/\text{Вт}$. Это сопоставимо с эпитаксиально выращенными фототранзисторами на основе материалов A^3B^5 .

Наноккомпозит графен – КТ CdSe является основой для изготовления фотовольтаических элементов [13]. Возбужденные светом электроны переходят из КТ CdSe в графен, затем в электрод SnO_2 , а дырки через электролит Na_2S – к противоположному электроду. Эффективность преобразования падающего потока фотонов в ток солнечного элемента составила 17 %.

Коллоидные КТ являются хорошим основанием для разработки различных источников излучения в видимой и инфракрасной областях спектра. Так, благодаря использованию КТ CdSe/ZnCdS удалось получить излучение во всей видимой области спектра и разработать источники для лазерного излучения в красной, зеленой и голубой областях спектра [14]. Это, в свою очередь, позволяет создать на этой основе источники белого цвета.

Применение наноккомпозитов на основе КТ охватывает широкий спектр оптических и оптоэлектронных приборов [15]. Они включают как фотодетекторы, фотопроводники, фотовольтаические приборы (в том числе и солнечные элементы), так и оптические приборы, использующие фоторефрактивный эффект и другие явления нелинейной оптики. В частности, это могут быть устройства для динамической голографии и обратимой оптической памяти.

Существуют и другие приборы на основе наноккомпозитов с коллоидными КТ, но ограничения объема данной статьи не позволяют их все рассмотреть.

Итоги конференции

Организаторами конференции выступили Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Санкт-Петербургский академический университет – научно-образовательный центр нанотехнологий РАН, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербургский государственный университет. Опубликовано 89 докладов, которые представили 25 вузов и научных центров из 15 городов России: от Санкт-Петербурга



до Красноярска [16]. К сожалению, в отечественных исследованиях работ по полупроводниковым нанокompозитам немного. Развитие проблемы в этом направлении интенсивно ведется за рубежом. Именно на таких работах и базируется, главным образом, представленный выше обзор. Их авторами выступают, в том числе, и ученые из России. К ним принадлежит и один из авторов данной статьи, опыт его работы за рубежом отражен в обзоре. Среди работ, представленных на конференцию, только пять-шесть посвящено нанокompозитам. Организаторы конференции надеются, что в ближайшие годы исследования, направленные на изучение полупроводниковых нанокompозитов, будут представлены в отечественных работах (и, соответственно, в трудах последующих конференций) более весомо, поскольку приведенный обзор показывает необходимость таких исследований для достойного участия российских исследователей в развитии нанотехнологий, происходящем в мировой науке.

В программу конференции были включены три приглашенных доклада ведущих российских ученых: М.М. Глазова (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН) «Когерент-

ная спиновая динамика в наноструктурах», В.П. Евтихиева (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН) «Инжекционные полупроводниковые лазеры – от указки до интегральной оптики», В.С. Запасского (СПбГУ, «Spinoptics laboratory») «Спектроскопия спиновых шумов».

На девяти пленарных заседаниях студентами и аспирантами было сделано 48 устных докладов. Состоялась стендовая сессия (35 докладов) по разделам «Объемные свойства полупроводников», «Процессы роста, поверхность, границы раздела», «Гетероструктуры, сверхрешетки, квантовые ямы», «Квантовые точки, квантовые нити и другие низкоразмерные системы», «Приборы опто- и наноэлектроники», «Новые материалы».

Программный комитет отметил дипломами и премиями следующие работы аспирантов и студентов.

Премией (5 000 руб.) имени Е.Ф.Гросса за лучшую работу в области оптики полупроводников награждены:

Лямкина Анна Алексеевна, аспирантка Института физики полупроводников СО РАН (г. Новосибирск), за доклад «Резонансное усиление люминесценции в систе-

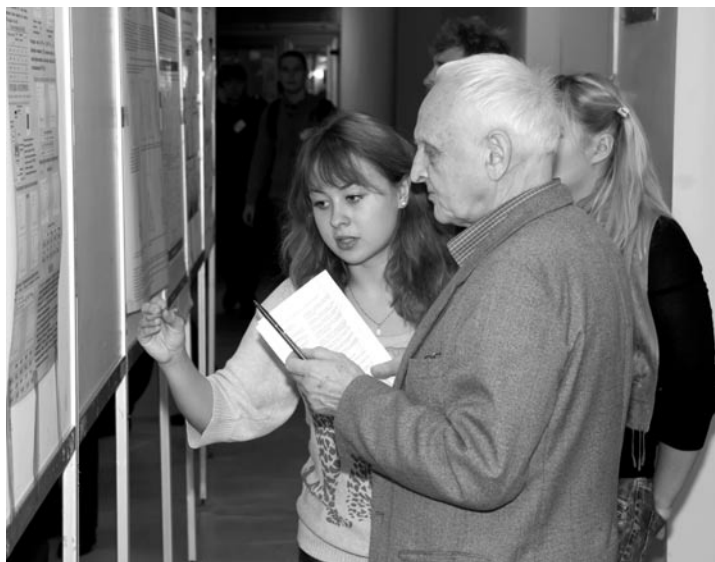


Рис. 2. Стендовая сессия конференции:

доктор физико-математических наук, профессор Санкт-Петербургского государственного университета В.Ф. Агемян знакомится с докладами; на его вопросы отвечает Д.А. Суroveгина, магистрант Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского

ме квантовая точка — металлическая капля за счет экситон-плазмонного взаимодействия»;

Козырев Дмитрий Сергеевич, студент Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, за доклад «Желто-зеленая фотолюминесценция электронно-дырочной жидкости в квазидвумерных слоях SiGe кремниевых гетероструктур».

Дипломом I степени и премией 4300 руб. награжден

Барановский Максим Владимирович, аспирант Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ», за доклад «Диагностика гетероструктур InGaN/GaN с множественными квантовыми ямами фотоэлектрическим методом».

Дипломами II степени и премиями (по 3 200 руб.) награждены аспиранты:

Гребенькова Юлия Эрнестовна (Институт физики СО РАН, г. Красноярск), за доклады «Влияние морфологии и структуры Ni-Ge-пленок на их магнитные свойства», «Магнитное и магнитооптическое поведение пленочных структур $La_{0,7}Sr_{0,3}MnO_3/YSZ$ »;

Румянцев Владимир Владимирович (Институт физики микроструктур РАН, г. Нижний Новгород), за доклад «Особенности релаксации ТГц-фотопроводимости в объемных p-Ge и p-Si в сильных и слабых электрических полях».

Дипломами III степени и премиями (по 2 300 руб.) награждены аспиранты:

Волкова Наталья Сергеевна (Нижегородский государственный университет), за доклад «Оптоэлектронные свойства гетеронаноструктур с комбинированными слоями квантовых ям и точек In(Ga)As/GaAs»;

Коновалов Глеб Георгиевич (Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург), за доклад «Фотовольтаический детектор на основе гетероструктуры II типа с глубокой квантовой ямой AlSb/InAsSb/AlSb в активной области для среднего инфракрасного диапазона».

Дипломами награждены аспиранты:

Ахундов Игорь Олегович (Институт физики полупроводников СО РАН, г. Новосибирск), за доклад «Формирование терра-

сированных поверхностей арсенида галлия в равновесных условиях»;

Корнев Владимир Владимирович (Академический университет РАН, Санкт-Петербург), за доклад «Аналитическая модель генерации через основные состояния в полупроводниковых лазерах на квантовых точках»;

Матвеев Сергей Александрович (Нижегородский государственный университет), за доклад «Рост и исследование фотолюминесценции гетероструктур $Si/Si_{1-x}Ge_x : Er/Si/capфир$ »;

Мельников Юрий Сергеевич (Санкт-Петербургский государственный политехнический университет), соавтор Д.А. Старостенко (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН), за доклад «Создание и исследование сенсора водорода на основе структуры с барьером Шоттки»;

Миронова Мария Сергеевна (Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»), за доклад «Эффекты междолинного смешивания в гетероструктурах на основе непрямозонных полупроводников. Сверхрешетки $(AlAs)_M/(GaAs)_N$ и квантовые ямы $SiO_2/Si/SiO_2$ ».

Дипломом I степени и премией 4 300 руб. награжден

Пошакинский Александр Валерьевич, студент Академического университета РАН (Санкт-Петербург), за доклад «Отражение сверхкоротких оптических импульсов от резонансных фотонных структур».

Дипломами II степени и премиями (по 3 200 руб.) награждены студенты:

Смирнов Дмитрий Сергеевич (Академический университет РАН, Санкт-Петербург), за доклад «Накачка и зондирование электронных спинов в сферических нанокристаллах»;

Цакаев Абдул-Вахаб Валидович (Санкт-Петербургский государственный университет), за доклад «Эффекты пространственной дисперсии экситонов в квантовых ямах ZnSe».

Дипломами III степени и премиями (по 2 300 руб.) награждены студенты:

Лазаренко Александра Анатольевна (Академический университет РАН, Санкт-Петербург), за доклад «Исследование слоев

GaP(As)N на подложках Si и GaP, выращенных методом МПЭ»;

Таланцев Артём Дмитриевич (Московский физико-технический институт), за доклад «Ферромагнетизм нанокластеров сплавов хрома и гашение фотолюминесценции в гетероструктурах ZnSe/ZnMgSSe/ZnSSe:Cr».

Дипломами награждены студенты:

Баранов Артём Игоревич (Академический университет РАН, Санкт-Петербург), за доклад «Компьютерное моделирование характеристик фотоэлектрических преобразователей на основе гетероперехода GaP/GaNAsP»;

Бельтюков Ярослав Михайлович (Санкт-Петербургский государственный политехнический университет) за доклад «Моделирование электрон-фононного взаимодействия и электропроводности в квантово-холловских системах»;

Григорьев Филипп Сергеевич (Санкт-Петербургский государственный университет) за доклад «Численный расчет волновых функций экситона в квантовой яме»;

Давыдовская Диана Викторовна (Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»), соавтор Д.Д. Фирсов, аспирант того же университета, за доклад «Фотолюминесценция квантовых точек InSb/InAs в диапазоне 4 – 6 мкм»;

Князева Мария Викторовна (Новосибирский государственный технический университет), за доклад «Определение оптимальных параметров роста GaAs-нановискеров с помощью Монте-Карло-модели»;

Котова Мария Сергеевна (Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова), соавтор М.А. Дронов, аспирант Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН, за доклад «Эффект резистивного переключения и энергонезависимая память на его основе в полимерных материалах и композиционных материалах с металлическими частицами»;

Крылов Иван Владимирович (Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова), соавтор К.А. Дроздов, аспирант того же университета, за доклад «Влияние примеси олова на энергетиче-

ский спектр и оптические свойства тонких наноструктурированных пленок оксида индия (III)»;

Мещанкин Андрей Вячеславович (Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова), за доклад «Определение разрыва зон на гетеропереходе InGaAs/InGaAsP методом спектроскопии фотоотражения»;

Мыльников Дмитрий Александрович (Московский физико-технический институт), за доклад «Осцилляции конденсата экситонных поляритонов в GaAs-микрорезонаторе»;

Саргинов Сергей Сергеевич (Санкт-Петербургский государственный университет), за доклад «Стабильность политипного состава монокристаллических и поликристаллических образцов AgI»;

Суворов Сергей Константинович (Санкт-Петербургский государственный политехнический университет), соавторы М.Я. Винниченко и Г.А. Мелентьев, аспиранты того же университета; А.Н. Яблонский и К.Е. Кудрявцев, младшие научные сотрудники Института физики микроструктур РАН; Л.В. Красильникова, научный сотрудник того же института, за доклад «Фотолюминесценция и разогрев носителей заряда в квантовых ямах GaAs/AlGaAs с различным типом проводимости»;

Туманов Дмитрий Сергеевич (Санкт-Петербургский государственный политехнический университет), за доклад «Модификация спектров поглощения квантовых ям с резонансными состояниями акцепторов в сильных электрических полях»;

Чирков Евгений Леонидович (Санкт-Петербургский государственный университет), за доклад «Исследование структуры нановискеров AlGaAs».

Пять докладов рекомендовано для участия в конкурсе по Программе «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» («УМНИК») в номинации «Научные результаты, обладающие существенной новизной и перспективой их коммерциализации» с последующим их финансированием Фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере:

Гильштейн Евгения Павловна, студентка Академического университета РАН (Санкт-Петербург), за доклад «(Ga,Mn)As ННК: синтез и электрические свойства»;

Безнасюк Дарья Вячеславовна, студентка Академического университета РАН (Санкт-Петербург), за доклад «Использование массивов GaAs : Ве ННК в качестве активных слоев солнечных элементов»;

Свистунов Александр Николаевич, студент Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ», за доклад «Получение методом газофазной эпитаксии твердых растворов, согласованных по постоянной решетки с подложкой фосфида индия, и создание на их основе фотоэлектрического преобразователя InGaAsP»;

Мельников Юрий Сергеевич, аспирант Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, за доклад «Создание и исследование сенсора водорода на основе структуры с барьером Шоттки»;

Корнев Владимир Владимирович, аспирант Академического университета РАН (Санкт-Петербург), за доклад «Аналитическая модель генерации через основные состояния в полупроводниковых лазерах на квантовых точках».

Организаторы конференции благодарны сотрудникам Научно-образовательного комплекса «СПбФТНОЦ РАН» за создание всех условий для работы конференции. Информация о следующей конференции будет помещена в сентябре 2013 г. на сайте: <http://www.spbstu.ru/rphf/conf2013.html>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Bakueva, L.S.** Luminescence and photovoltaic effects in polymer-based nanocomposites [Text] / L.S. Bakueva, S.F. Musikhin, E.H. Sargent, H.E. Ruda, A. Shik // Handbook of Organic-Inorganic Hybrid Materials and Nanocomposites. – Vol. 2. – Chapter 5. – New-York: American Scientific Publishers, 2003. – P. 182 – 216.
2. **Hussain, F.** Polymer-matrix nanocomposites, processing, manufacturing, and application: An overview [Text] / F. Hussain, M. Hojjati, M. Okamoto, R.E. Gorga // J. of Composite Materials. – 2006. – Vol. 40. – № 17. – P. 1511 – 1575.
3. **Мусихин, С.Ф.** Гибридные полимер-полупроводниковые наноструктуры, технология, приборы [Текст] / С.Ф. Мусихин, В.И. Ильин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2007. – № 4-1. – С. 105 – 112.
4. **Gordillo, H.** Colloidal QDs-polymer nanocomposites [Text] / H. Gordillo, I. Subrez, P. Rodriguez-Canty, [et al.] // Proc. of SPIE. – 2012. – Vol. 8424. – 84242A.
5. **Шик, А.Я.** Физика низкоразмерных систем [Текст] / А.Я. Шик, Л.Г. Бакуева, С.Ф. Мусихин, С.А. Рыков. – СПб.: Наука, 2001. – 155 с.
6. **Mansur, H.S.** Quantum dots and nanocomposites [Text] / H.S. Mansur // WIREs. Nanomedicine and Nanobiotechnology. – 2010. – Vol. 2. – P. 113 – 129.
7. **Musikhin, S.** Luminescent properties and electron structure of composite structures conjugated polymer-dielectric nanocrystals [Text] / S. Musikhin, L. Bakueva, E.H. Sargent, A. Shik // J. Appl. Phys. – 2002. – Vol. 91. – P. 6679 – 6683.
8. **Baranovskii, S.D.** Description of charge transport in disordered organic materials [Text] / S.D. Baranovskii, O. Rubel, F. Jansson, R. Österbacka // Adv. Polym. Sci. – 2010. – Vol. 223. – P. 45 – 71.
9. **Забродский, А.Г.** Электронные свойства неупорядоченных систем [Текст] / А.Г. Забродский, С.А. Немов, Ю.И. Равич. – СПб.: Наука, 2000. – 70 с.
10. **Godovsky, D.Y.** Device applications of polymer-nanocomposites [Text] / D.Y. Godovsky // Advances in polymer science. – 2000. – Vol. 153. – P. 163 – 205.
11. **Rath, A.K.** Solution-processed inorganic bulk nano-heterojunctions and their application to solar cells [Text] / A.K. Rath, M. Bernechea, L. Martinez [et al.] // Nature Photonics. – 2012. – Vol. 6. – P. 529 – 534.
12. **Konstantatos, G.** Hybrid graphene – quantum dot phototransistors with ultrahigh gain [Text] / G. Konstantatos, M. Badioli, L. Gaudreau [et al.] // Nature Nanotechnology. – 2012. – Vol. 7. – P. 363 – 368.
13. **Jing, Chen.** Flexible photovoltaic cells based on a graphene – CdSe quantum dot nanocomposite [Text] / Jing Chen, Feng Xu, Jun Wu [et al.] // Nanoscale. – 2012. – Vol. 4. – № 2. – P. 441 – 443.
14. **Dang, C.** Red, green and blue lasing enabled by single-exciton gain in colloidal quantum dot films [Text] / C. Dang, J. Lee, C. Breen [et al.] // Nature Nanotechnology. – 2012. – Vol. 7. – P. 335 – 339.
15. **Prabhakaran, P.** Quantum dots (QDs) for



photonic applications [Text] / P. Prabhakaran, W.J. Kim, K.-S. Lee, P.N. Prasad // Optical Materials Express. – 2012. – Vol. 2. – № 5. – P. 578 – 593.

16. 14-я Всероссийская молодежная конфе-

ренция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике [Текст]: Тезисы докладов. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 96 с.

ВАСИЛЬЕВА Мария Александровна – старший научный сотрудник, заместитель заведующего кафедрой физики полупроводников и наноэлектроники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

vilyin@rphf.spbstu.ru

ГАВРИКОВА Татьяна Андреевна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики полупроводников и наноэлектроники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

zykov@rphf.spbstu.ru

ИЛЬИН Владимир Иванович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики полупроводников и наноэлектроники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

vilyin@rphf.spbstu.ru

МУСИХИН Сергей Федорович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики полупроводников и наноэлектроники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

sergei.musikhin@rphf.spbstu.ru