

Люминесценция квантово-размерных нанокристаллов и наностержней селенида кадмия во внешнем электрическом поле

© Л.И. Гуринович[¶], А.А. Лютич, А.П. Ступак, С.Я. Прислопский, Е.К. Русаков*, М.В. Артемьев*, С.В. Гапоненко, Х.В. Демир⁺

Институт физики им. Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси,
220072 Минск, Беларусь

* Институт физико-химических проблем Белорусского государственного университета,
220080 Минск, Беларусь

⁺ Bilkent University,
TR-06800 Ankara, Turkey

(Получена 18 декабря 2008 г. Принята к печати 16 января 2009 г.)

Установлена зависимость спектров поглощения и люминесценции нанокристаллов и наностержней CdSe от величины внешнего электрического поля. Показано, что внешнее электрическое поле тушит фотолюминесценцию наностержней CdSe *P*-поляризации в большей степени, чем *S*-поляризации. Отмечено, что нанокристаллы более чувствительны к внешнему электрическому полю, чем наностержни. Обсуждается механизм действия внешнего электрического поля на люминесценцию полупроводниковых наностержней.

PACS: 78.66.Hf, 78.67.Hc, 73.50.Fq

1. Введение

Зависимость энергии оптических переходов в полупроводниковых нанокристаллах от геометрических размеров открывает возможность развития новейших люминесцентных материалов, создаваемых на основе синтеза структур в виде полимерных пленок или золь-гель стекол, содержащих нанокристаллы соединений II–VI (CdSe, CdTe, CdS и др.) либо III–V (InP, GaAs и др.), в которых спектр люминесценции определяется не только химическим составом, но и в гораздо большей степени пространственными размерами оптически активной области [1]. Использование явления квантового ограничения в полупроводниковых нанокристаллах реализует потенциальную возможность создания оптимально подобранных люминесцентных материалов для решения прикладных задач широкого диапазона: от оптоэлектронных устройств отображения и передачи данных, применяемых в информационно-вычислительных системах [2], до биологических флуоресцентных меток, применяемых для целей диагностики и фармакологии.

Управление внешним электрическим полем люминесценцией полупроводниковых нанокристаллов, внедренных в тонкую диэлектрическую пленку и изолированных друг от друга, может быть использовано для создания принципиально новых оптоэлектронных приборов видимого диапазона. Сочетание квантово-размерных эффектов в полупроводниках с кулоновскими эффектами создает технологические преимущества при оптимизации к требуемому спектральному диапазону и заданным рабочим напряжениям. Поскольку размерное ограничение движения носителей заряда в данном случае является

ключевым, важно сделать сравнительную оценку эффективности воздействия электрического поля на структуры с различным числом степеней свободы движения электронов и дырок. В данной работе проведено сравнение спектров поглощения и люминесценции нанокристаллов и наностержней селенида кадмия в тонких диэлектрических пленках при воздействии внешнего электрического поля. Рассмотрено влияние взаимной ориентации направленных электрического вектора электромагнитной волны возбуждающего света и внешнего электрического поля на поляризационные компоненты фотолюминесценции наностержней.

2. Описание образцов и методика измерений

В эксперименте использованы структуры с нанокристаллами и наностержнями селенида кадмия, помещенными в тонкую диэлектрическую пленку полиметилметакрилата (ПММА). Образец, содержащий монодисперсные *нанокристаллы* CdSe со средним размером (диаметром) частиц $d_{av} = 4$ нм, имеет общую толщину диэлектрического слоя $h_{gap} \approx 20$ мкм. Образцы, содержащие *наностержни* CdSe, имеют среднее соотношение длина/диаметр (aspect ratio) стержня $l_{rods}(\text{нм})/d_{av}(\text{нм}) = 17:10, 23:7, 20:5$ и $25:4$. Диэлектрический слой ПММА, содержащий наночастицы, заключен между планарными токопроводящими слоями ИТО, имеющими электрические контакты для подвода напряжения. Кроме слоя ПММА, между слоями ИТО помещен слой эпоксидной смолы, который также служит с одной стороны клеем, а с другой — разделителем. Суммарный зазор (h_{gap}) между слоями ИТО в образцах с наностержнями составляет соответственно $\sim 30, \sim 35, \sim 40$ и ~ 20 мкм.

[¶] E-mail: gphms@imaph.bas-net.by

Измерения спектров поглощения и люминесценции нанокристаллов проводились с использованием дифракционного спектрографа „Solar ТН“ S-3801 и охлаждаемой ПЗС-матрицы „Princeton Instruments, Inc.“ LN/CCD-1162-E PROD FG. Поляризационные исследования спектров люминесценции наностержней CdSe осуществлены на спектрофлуориметре „СМ 2203 Solar“ при спектральной ширине щели 5 нм, а спектров поглощения — на спектрофотометре „Varian“ Carry 500 со спектральным разрешением 1 нм. Электрическое напряжение на контактах задавалось стабилизированным источником „Спецприбор“ HVPS-320.

3. Поглощение и люминесценция нанокристаллов CdSe во внешнем электрическом поле

Спектры поглощения образца, содержащего нанокристаллы селенида кадмия со средним размером нанокристаллов ~ 4 нм, при различной напряженности внешнего

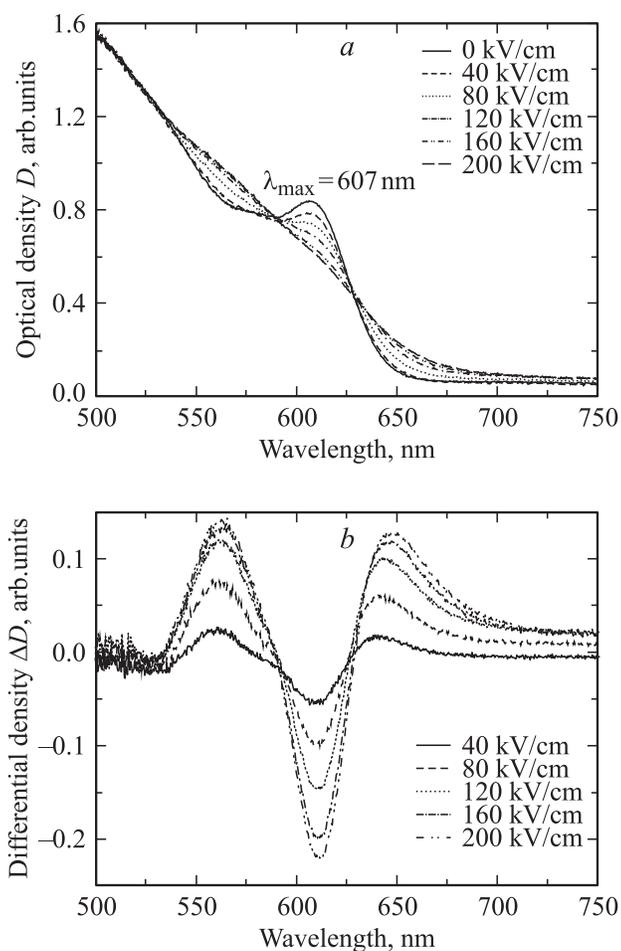


Рис. 1. Спектры поглощения (a) и дифференциального поглощения (b) нанокристаллов CdSe в пленке ПММА при различной напряженности внешнего электрического поля, указанной на рисунке.

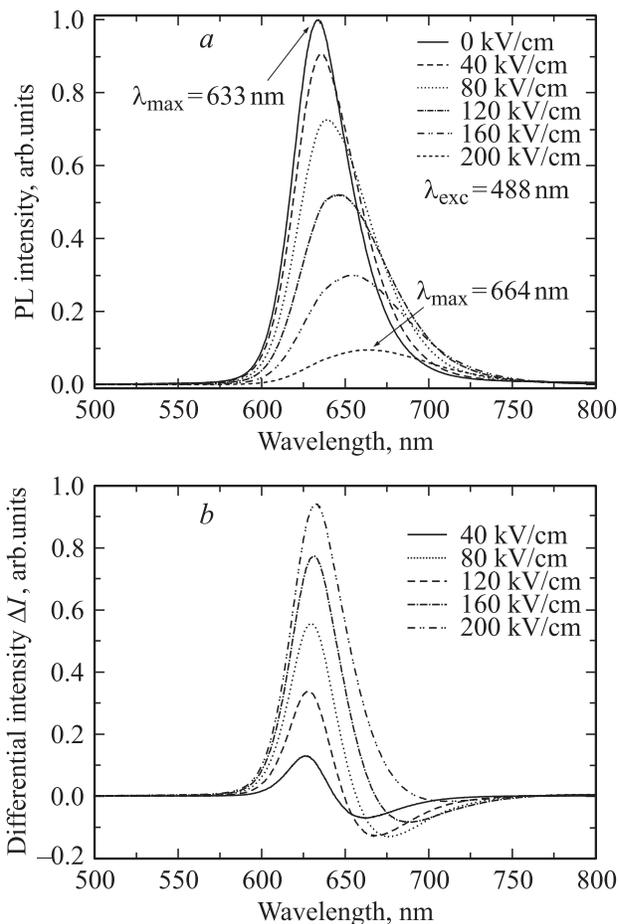


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции (a) и разностные спектры $I(0) - I(U)$ (b) нанокристаллов CdSe в пленке ПММА при различной напряженности внешнего электрического поля, указанной на рисунке. Длина волны возбуждения $\lambda_{\text{exc}} = 488$ нм.

электрического поля приведен на рис. 1. Край спектра поглощения нанокристаллов смещен в коротковолновую область спектра относительно края объемного полупроводника и содержит экситонную линию с максимумом на длине волны $\lambda_{\text{max}} = 607$ нм. При включении внешнего электрического поля амплитуда экситонного пика уменьшается, а при полях свыше 200 кВ/см пик практически исчезает. Уширение экситонного пика в спектрах поглощения является типичным проявлением эффекта Штарка в квантово-размерных полупроводниковых наноструктурах [3,4].

Спектр люминесценции также трансформируется под воздействием внешнего электрического поля (рис. 2). При увеличении поля от нуля до 200 кВ/см интенсивность полосы люминесценции уменьшается более чем в десять раз. Контур полосы люминесценции монотонно уширяется, а максимум полосы смещается в длинноволновую область спектра на 31 нм с $\lambda_{\text{max}} = 633$ нм в отсутствие внешнего поля до $\lambda_{\text{max}} = 664$ нм при напряженности поля 200 кВ/см. Коэффициент смещения максимума составляет $\Delta\lambda_{\text{max}}/\Delta E_{\text{ext}} \approx 1.55 \cdot 10^{-4}$ нм · см/В.

Рассматривая эволюцию спектров поглощения и люминесценции нанокристаллов во внешнем электрическом поле, можно предположить следующее:

— экситонный механизм люминесценции, скорее всего, является основным (на это указывают изменения в спектрах поглощения);

— вероятность рекомбинации электрон-дырочной пары уменьшается во внешнем электрическом поле в результате уменьшения перекрытия волновых функций электрона и дырки в возбуждаемой наночастице;

— исследуемая наноструктура, вероятно, представляет собой ансамбль нанокристаллов, неоднородных по электронно-оптическим свойствам, в котором электрическим полем выключается из люминесценции определенная их часть (механизм неясен).

Следует отметить, что эффект изменения (уменьшения вблизи экситонного пика) краевого поглощения в ансамбле полупроводниковых нанокристаллов и сильное тушение фотолюминесценции может быть также вызвано инжекцией электронов на один из незаполненных электронных уровней нанокристалла. Полное или частичное заполнение этого уровня приводит к существенному уменьшению экситонного пика в спектре оптической плотности. С другой стороны, наличие электронов в зоне проводимости полупроводника приводит к сильному тушению фотолюминесценции за счет оже-рекомбинации экситонов. Эти и другие эффекты, связанные с зарядением нанокристаллов, были подробно изучены в работах [5,6], в которых нанокристаллы заряжались вследствие электрохимических процессов, что требует электрического контакта нанокристаллов с одним из электродов. В нашем случае инжекция электронов в нанокристаллы затруднена полимерной матрицей ПММА. Поэтому мы полагаем, что основным эффектом, оказывающим влияние на оптические свойства нанокристаллов, является эффект Штарка, а эффект инжекции носителей заряда является вторичным.

Пролить свет на механизм тушения люминесценции нанокристаллов во внешнем электрическом поле можно было бы в экспериментах по исследованию кинетических свойств люминесценции и люминесценции одиночных нанокристаллов в электрических полях. Отдельные работы в этом направлении уже ведутся [7–9].

4. Поглощение и люминесценция наностержней CdSe во внешнем электрическом поле

Наностержни селенида кадмия имеют геометрические размеры, большие, чем рассмотренные выше нанокристаллы, поэтому квантово-размерные эффекты в них проявляются слабее. Так, в частности, в спектрах поглощения наностержней экситонная полоса сильно уширена и спектрально расположена ближе к краю фундаментального поглощения объемного полупроводника.

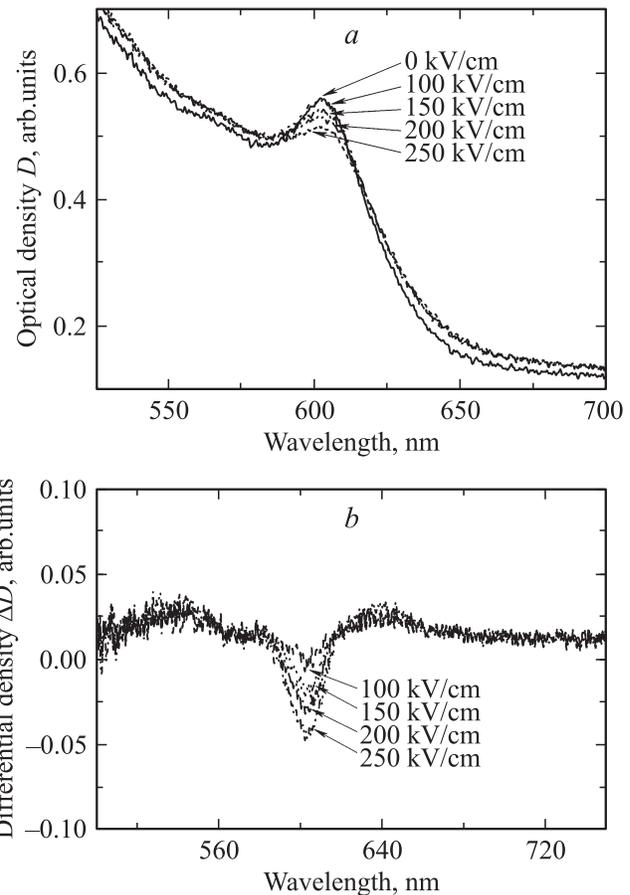


Рис. 3. Спектры поглощения (a — $D = \lg I_0/I$) и дифференциального поглощения (b — $\Delta D = D - D_{0V}$) образца, содержащего наностержни CdSe с соотношением длина/диаметр 25:4, при различной напряженности внешнего электрического поля, указанной на рисунке.

Несферичность формы наностержней (например, отношение длины к диаметру наностержня в разных образцах составляет от 1.7 до 6.25) также приводит к усилению эффекта неоднородного уширения спектра, что дополнительно усложняет анализ формы спектра поглощения. Поскольку исследуемая структура представляет собой тонкую пленку толщиной порядка 30 мкм с оптически ровными поверхностями, на спектр поглощения наностержней накладывается паразитная интерференционная структура. Спектры поглощения наностержней CdSe во внешнем электрическом поле различной напряженности приведены на рис. 3.

Спектр фотолюминесценции наностержней селенида кадмия, как и нанокристаллов CdSe, также трансформируется во внешнем электрическом поле. Однако эти изменения менее существенны — интенсивность полосы люминесценции при напряженности поля 200 кВ/см уменьшается немногим более чем в 2 раза, а спектральное положение максимума полосы люминесценции смещается в длинноволновую сторону спектра на несколько нанометров. При увеличении напряженности внешнего

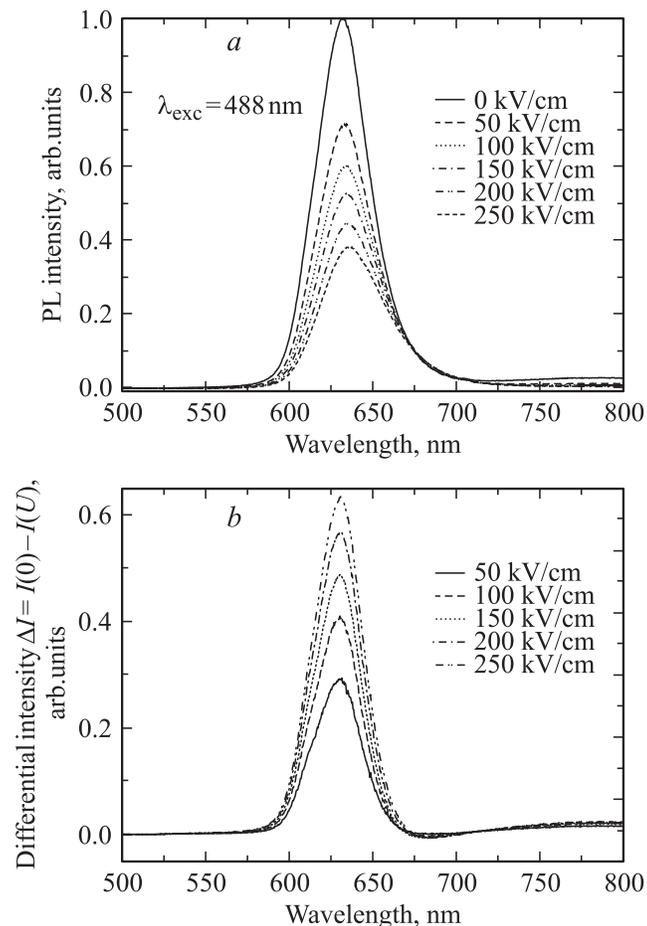


Рис. 4. Спектры люминесценции (а) и разностные спектры (б) образца, содержащего наностержни селенида кадмия с соотношением длина/диаметр 25:4, при включении внешнего электрического поля напряженностью от 50 до 250 кВ/см. Возбуждение люминесценции осуществлялось коротковолновой ($\lambda_{\text{exc}} = 488 \text{ nm}$) модой аргонового лазера.

поля полоса люминесценции также уширяется. Спектры люминесценции наностержней CdSe во внешнем электрическом поле различной напряженности приведены на рис. 4.

5. Поляризация люминесценции наностержней селенида кадмия во внешнем электрическом поле

Для протяженных структур, таких как наностержни, должно проявляться различие оптических свойств в зависимости от пространственной ориентации осей наночастиц. Одним из естественных выделенных направлений, в котором можно ожидать максимального проявления различия физических процессов взаимодействия света с полупроводником, может служить направление действия внешнего электрического поля. Внешнее поле выполняет роль селективирующего воздействия, с

помощью которого из ансамбля случайно ориентированных наностержней выделяются те частицы, которые ориентированы вдоль поля и в которых соответствен-

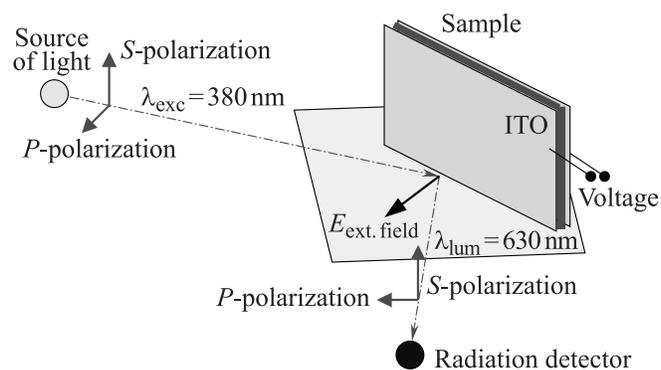


Рис. 5. Схема хода оптических лучей S- и P-поляризации при измерении спектров люминесценции наностержней CdSe во внешнем электрическом поле.

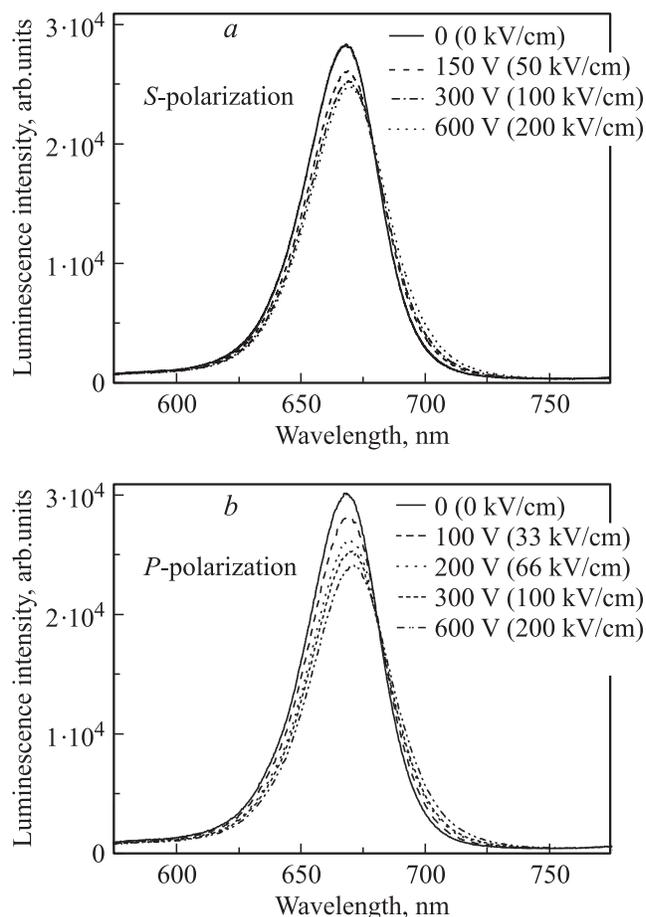


Рис. 6. Спектры люминесценции наностержней CdSe (соотношение длина/диаметр 17:10), находящихся в электрическом поле различной напряженности, в двух независимых поляризациях S (а) и P (б). Фотолюминесценция возбуждалась 2-й гармоникой ($\lambda_{\text{exc}} = 531 \text{ nm}$) Nd-лазера в непрерывном режиме. Время накопления сигнала — 3 с. Возбуждающее излучение отсекалось от фотоприемника светофильтром ОС-13.

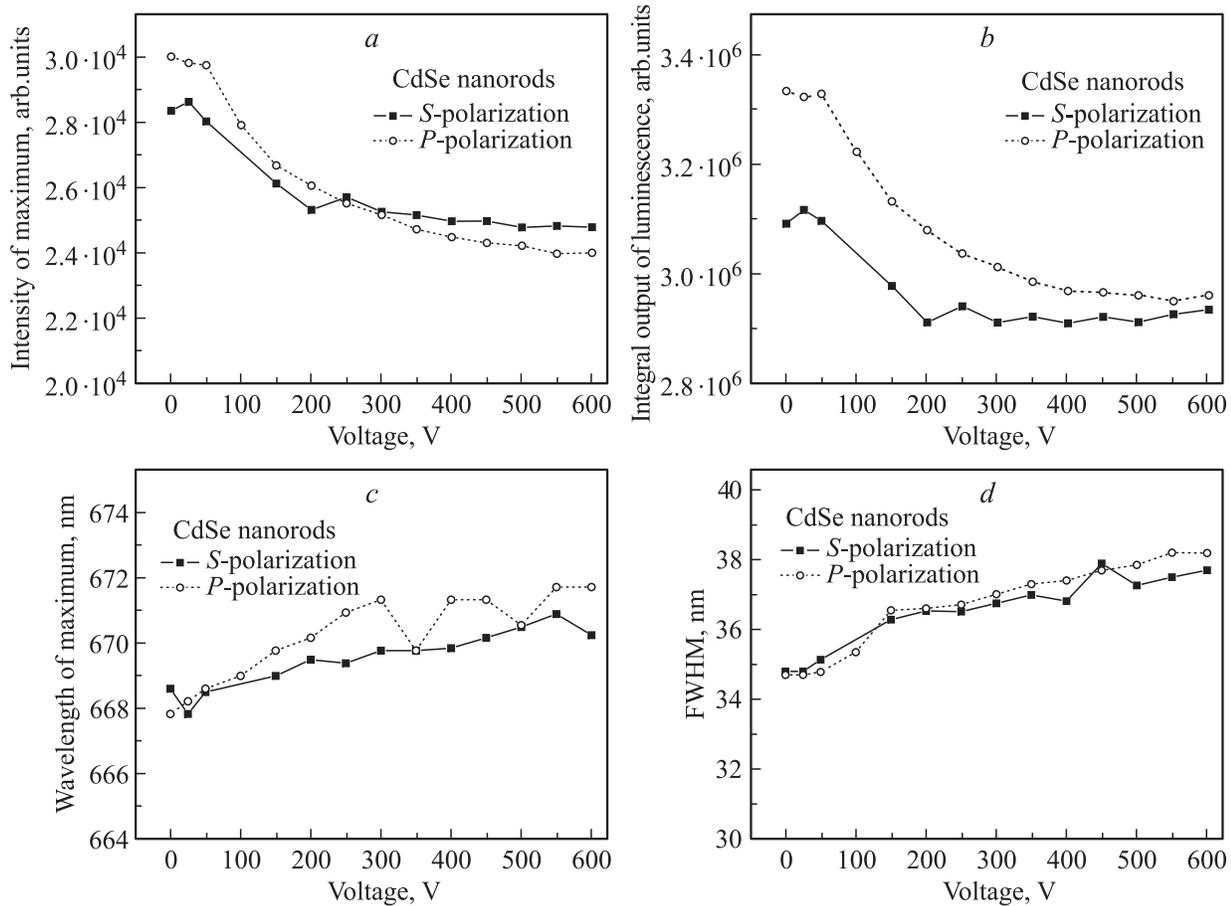


Рис. 7. Зависимости максимума интенсивности полосы люминесценции (a), интегральной интенсивности полосы люминесценции (b), длины волны, соответствующей максимуму полосы люминесценции (c), и ширины линии на уровне полувысоты полосы люминесценции (FWHM) (d) наностержней CdSe (соотношение длина/диаметр 17:10) от величины внешнего напряжения для независимых поляризаций *S* и *P* возбуждающего и детектируемого света.

но наиболее сильно выражено кулоновское действие внешних полей. При взаимодействии возбуждающего света с наностержнем во внешнем электрическом поле возможны 2 независимых случая: проекция вектора электрического поля световой волны на направление вектора напряженности внешнего электрического поля равна нулю (*S*-поляризация) и не равна нулю (*P*-поляризация) (рис. 5).

Случай *S*-поляризации, при котором *E*-компонента электромагнитной волны возбуждающего света ортогональна вектору напряженности внешнего электрического поля, реализуется при условии, когда направление этой компоненты параллельно плоскости образца. Случай *P*-поляризации, при котором всегда существует ненулевая проекция *E*-компоненты электромагнитной волны возбуждающего света на вектор напряженности внешнего электрического поля, реализуется при условии, когда направление этой компоненты лежит в плоскости, образуемой падающим (отраженным) лучом возбуждающего света и нормалью к поверхности образца.

Исследование поляризации люминесценции наностержней CdSe было проведено на образце ($l_{\text{rods}}/d_{\text{av}} = 17:10$, $h_{\text{gap}} \approx 30$ мкм), имеющем наибольшую степень тушения, по схеме „на просвет“: угол наклона образца относительно возбуждающего луча — 45° , регистрация люминесценции — с обратной стороны образца под углом 90° к возбуждающему лучу. Оптическая схема измерения поляризации люминесценции при различных напряженностях внешнего электрического поля приведена на рис. 5. Выделение *S*- и *P*-поляризаций возбуждающего и детектируемого света осуществлялось призмными поляризаторами. Спектры фотолюминесценции наностержней селенида кадмия при различных электрических полях в двух независимых поляризациях приведены на рис. 6.

Из рис. 6 видно, что люминесценция с *P*-поляризацией модулируется внешним электрическим полем глубже, чем в случае *S*-поляризации, для которой внешнее электрическое поле является поперечным. Эта закономерность проявляется и в других характеристиках спектров люминесценции независимых поляризаций *S* и *P* (рис. 7).

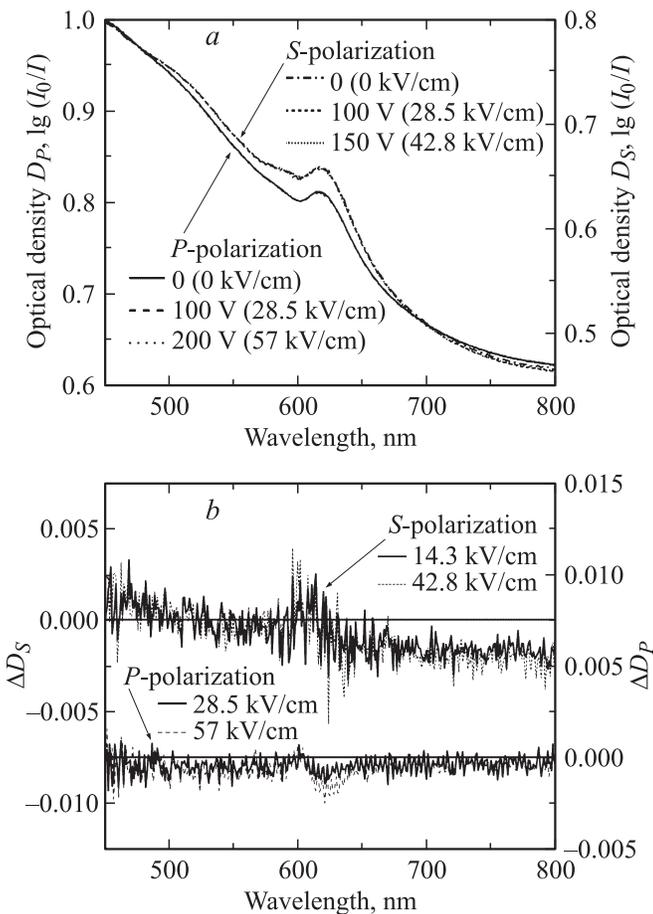


Рис. 8. Спектры поглощения (а) и дифференциального поглощения (б) наностержней CdSe (соотношение длина/диаметр 23:7) во внешнем электрическом поле при различных поляризациях проходящего света, указанных на рисунке. Угол ориентации образца относительно оптической оси „источник-детектор“ $\sim 60^\circ$.

6. Спектры поглощения поляризованного света наностержнями CdSe во внешнем электрическом поле

Для исследования поляризационных спектров поглощения были выбраны более длинные наностержни селенида кадмия с соотношением длина/диаметр наностержня — 23:7. Толщина диэлектрического слоя ПММА в нем составляет ~ 35 мкм. Спектры поглощения измерялись на спектрофотометре Cary-500. Использовались два пленочных поляризатора в измерительном канале — перед и за образцом. Угол наклона образца относительно измерительного луча составлял $\sim 60^\circ$. Спектр поглощения наностержней CdSe в двух независимых поляризациях приведен на рис. 8.

На рис. 8 видно различие поглощения для S - и P -поляризаций. Хотя спектры поглощения наностержней селенида кадмия как для S -поляризации, так и для P -поляризации имеют характерную экситонную струк-

туру, но для S -поляризации, в отличие от P , в спектре можно различить второй экситонный пик. В спектрах для обеих поляризаций зависимость поглощения от величины напряженности внешнего электрического поля весьма слаба и ничтожна по сравнению с нанокристаллами. На спектр поглощения для P -поляризации также оказывает существенное влияние френелевское отражение, которое при углах, близких к углу Брюстера, дает заметный дополнительный вклад в абсолютную величину измеряемой оптической плотности. Несовпадение формы спектров поглощения в области экситонного пика при различных поляризациях может быть также вызвано, например, спектральной немонотонностью коэффициента отражения поверхностей исследуемого образца для поляризаций S и P , одной относительно другой.

7. Степень поляризации люминесценции наностержней селенида кадмия на различных длинах волн

Для измерения степени поляризации использовались наностержни CdSe с соотношением длина/диаметр 20:5 и толщиной диэлектрического слоя ПММА ~ 40 мкм. Фотолюминесценция наностержней при различной напряженности внешнего электрического поля для двух независимых поляризаций S и P возбуждалась на длине волны $\lambda_{\text{exc}} = 380$ нм.

Спектр фотолюминесценции данных наностержней CdSe, более длинных, чем в случаях образцов с соотношением $l_{\text{rods}}(\text{нм})/d_{\text{av}}(\text{нм}) = 17:10$ и $23:7$, модулируется внешним электрическим полем в меньшей степени. Так, интенсивность полосы люминесценции при включении внешнего электрического поля напряженностью 100 кВ/см уменьшается лишь примерно на 17%, причем, как и для предыдущих образцов, в большей степени для полосы люминесценции P -поляризации.

Степень поляризации фотолюминесценции наностержней селенида кадмия в спектральном диапазоне от 580 до 700 нм определялась исходя из соотношения спектров люминесценции, измеренных для S - S -поляризации и S - P -поляризации, по формуле [10]:

$$P_{\text{CdSe}} = \frac{I_{\parallel} - I_{\perp}}{I_{\parallel} + I_{\perp}}, \quad (1)$$

где I_{\parallel} и I_{\perp} — интенсивности компонентов люминесценции наностержней, поляризованных соответственно параллельно (S - S) и перпендикулярно (S - P) вектору \mathbf{E} возбуждающего линейно поляризованного излучения (S). Зависимость степени поляризации от длины волны света, излучаемого наностержнями CdSe при различной напряженности внешнего электрического поля, приведена на рис. 9.

Из графиков, приведенных на рис. 9, видно, что фотолюминесценция полупроводниковых наностержней

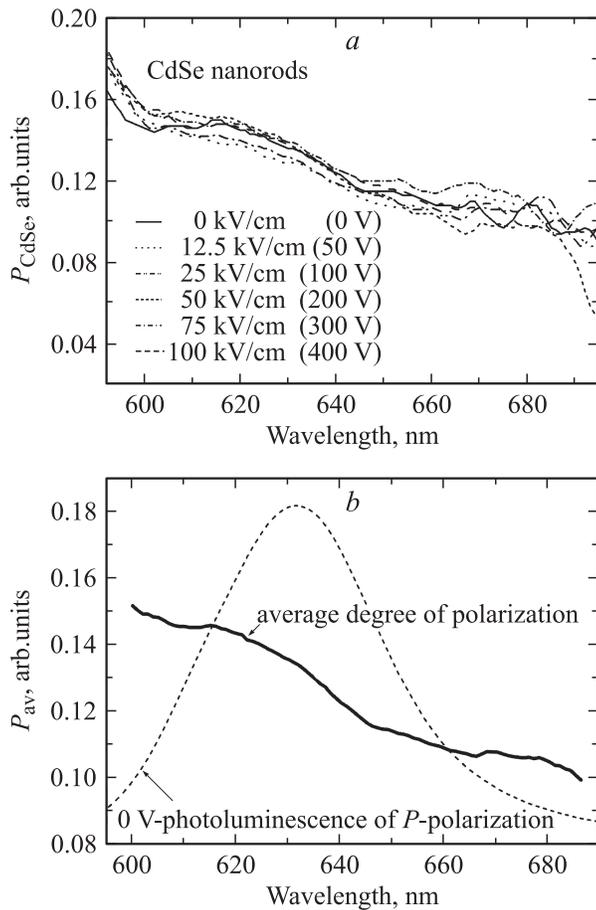


Рис. 9. Зависимости степени поляризации (P_{CdSe}) люминесценции наностержней селенида кадмия (соотношение длина/диаметр 20:5) при различных напряженностях внешнего электрического поля (*a*) и график среднеарифметической величины степени поляризации (P_{av}) по всем проведенным измерениям от длины волны излучаемого света (*b*). Пунктирной линией на рис. *b* обозначен контур полосы люминесценции исследуемого образца (0V — photoluminescence)

селенида кадмия с соотношением длина/диаметр 20:5 частично поляризована со средним значением 0.13 и практически не меняет свою поляризацию во внешнем электрическом поле любой интенсивности. Степень поляризации монотонно растет с уменьшением длины волны. Имеется два пологих участка с разным значением степени поляризации — в области от 600 до 620 нм ($P_{\text{CdSe}} = 0.145$) и от 640 до 680 ($P_{\text{CdSe}} = 0.11$), которые спектрально приходятся на коротковолновое и длинноволновое крыло полосы люминесценции наностержней CdSe. Наличие двух разных значений степени поляризации в пределах одного контура полосы люминесценции может быть следствием наложения двух независимых линий люминесценции, вероятно, с разными механизмами свечения. Это может быть, например, узкая коротковолновая линия собственной люминесценции и широкая длинноволновая линия примесной („дефектной“) люминесценции. Более точные выводы можно было бы сде-

лать, проведя анализ данных кинетики люминесценции исследуемых наностержней на длинах волн 610 и 660 нм.

Аналогичное поведение степени поляризации наблюдалось для пористого кремния, люминесценция которого связана со свечением наночастиц, вытянутых вдоль направления тока травления (т.е. фактически эллиптических нанокристаллов или наностержней) [1,11,12].

Согласно теории поляризованной люминесценции, в случае оптической анизотропии отдельных нанокристаллов ансамбль случайно ориентированных нанокристаллов будет испускать излучение, обладающее частичной поляризацией при условии возбуждения линейно поляризованным светом. Подобный эффект известен в молекулярной спектроскопии и называется *фотоселекцией*. Поляризация люминесценции обычно описывается величиной степени поляризации, определяемой выражением (1), в котором I_{\parallel} и I_{\perp} являются компонентами испускаемого излучения с параллельной и поперечной поляризацией относительно поляризации возбуждающего излучения. В модели линейного осциллятора степень поляризации удовлетворяет зависимости [13]

$$P = \frac{3 \cos^2 \alpha - 1}{\cos^2 \alpha + 3}, \quad (2)$$

где α — угол между поглощающим и испускающим осцилляторами. Таким образом, максимальная величина P соответствует полностью анизотропным осцилляторам $P_{\text{max}} = 1/2$ ($\alpha = 0$), тогда как минимальная величина оказывается при угле $\alpha = 90^\circ$ и соответствует значению $P_{\text{min}} = -1/3$. Необходимо отметить, что рассмотренный ансамбль является макроскопически изотропным вследствие случайной ориентации частиц.

Частичная степень поляризации может быть также результатом асимметрии формы случайно распределенных нанокристаллов. Этот случай, как оказалось, имеет место для протяженных кремниевых кристаллитов в пористых кремниевых пленках. Была обнаружена заметная положительная поляризация излучения [11], хотя нанокристаллы кремния, имеющие форму, близкую к сферической, испускают неполяризованное излучение. Объяснение было предложено на основе эффекта диэлектрического ограничения в условиях эллипсоидальной формы нанокристалла [12,14]. Анизотропия испускаемого излучения является результатом анизотропии распределения электрического поля световой волны внутри эллипсоида диэлектрической проницаемости, находящегося в среде с диэлектрической постоянной, отличной от постоянной эллипсоида.

8. Долговременный эффект от сильного внешнего электрического поля

Длительное воздействие внешнего электрического поля на полупроводник может привести к упорядоченному движению носителей зарядов в виде дрейфа заряженных

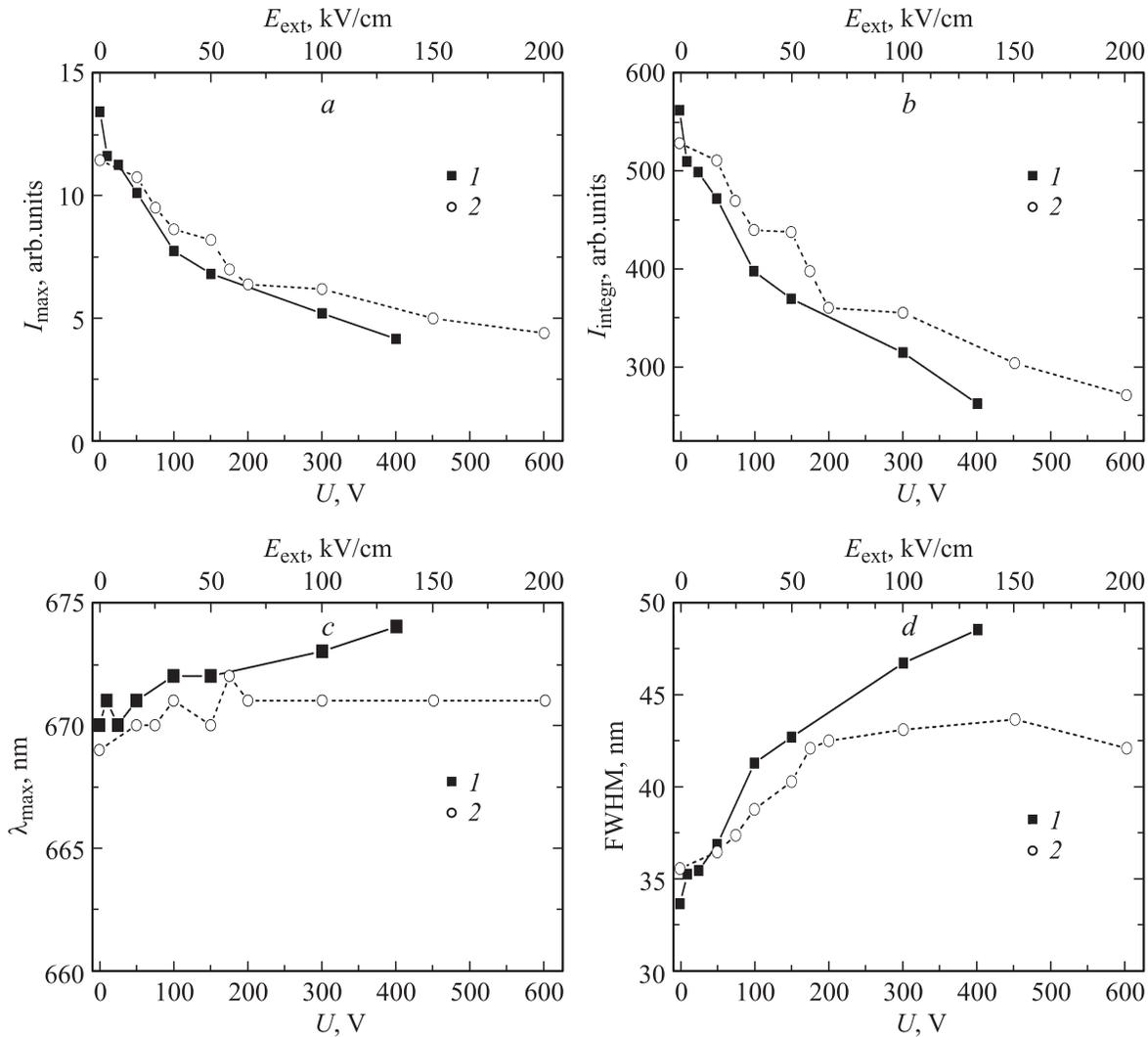


Рис. 10. Максимальная интенсивность I_{max} (a), интегральная интенсивность I_{integr} (b), длина волны максимума λ_{max} (c) и полная ширина на уровне полувысоты FWHM (d) полосы люминесценции наностержней CdSe (соотношение длина/диаметр 17:10), рассчитанные по спектрам, измеренным до (1) и после (2) 9-часового воздействия внешнего электрического поля ($E_{\text{ext}} = U/h_{\text{gap}}$) при различных напряжениях U . Длина волны возбуждения $\lambda_{\text{exc}} = 450$ нм. Толщина диэлектрического слоя между электродами $h_{\text{gap}} \approx 30$ мкм.

дислокаций и ловушек. Действительно, даже в наностержне длиной 17 нм, ориентированном вдоль внешнего электрического поля, поле напряженностью 200 кВ/см в состоянии сообщить свободному электрону энергию порядка 330 мэВ. Даже если учесть диэлектрическую проницаемость селенида кадмия $\langle \epsilon_0 \rangle_{\text{CdSe}} = 9.4$ [15] и потери энергии на столкновения, связанные с тепловым движением электрона и атомов кристаллической решетки, этой энергии вполне достаточно для приведения в движение электронов, захваченных ловушками с невысокой энергией активации (до 35 мэВ). Таким образом, длительным воздействием внешним полем можно изменить оптические свойства неоднородного по составу ансамбля полупроводниковых наностержней. Очевидно, что эти изменения могут приводить к некоторой деградации или своего рода частичному „старению“ с

точки зрения оптических свойств образца, но и быть частично обратимыми за счет обратного диффузионного дрейфа вследствие теплового движения, когда внешнее поле отсутствует. С другой стороны, в нанокристаллах, имеющих, напротив, очень маленькие размеры, долговременное действие внешнего электрического поля должно быть менее заметно.

В эксперименте использовался образец ($l_{\text{rods}}/d_{\text{av}} = 17:10$, $h_{\text{gap}} \approx 30$ мкм), имеющий наибольшую степень тушения, который находился под напряжением 400 В, что соответствует напряженности электрического поля 133 кВ/см (без учета диэлектрической проницаемости), в течение 9 ч. Затем было проведено сравнение основных характеристик спектров люминесценции этого образца до и после воздействия поля. Возбуждение люминесценции осуществлялось на $\lambda_{\text{exc}} = 450$ нм.

Анализируя экспериментальные данные, можно выделить следующие закономерности. Максимальная интенсивность полосы люминесценции наностержней I_{\max} и ее интегральная интенсивность I_{integr} уменьшаются обратно пропорционально величине прикладываемого внешнего электрического поля (E_{ext}). Причем относительная величина изменения при долговременном эффекте от поля ниже, чем без эффекта (рис. 10, *a, b*).

Смещение длины волны максимума полосы люминесценции λ_{\max} и изменение ее полной ширины на уровне полувысоты FWHM также различается (рис. 10, *c, d*). Изменение длины волны максимума прямо пропорционально величине прикладываемого внешнего напряжения и замедляется в процессе длительного воздействия электрического поля (рис. 10). Особенно четко выражено замедление уширения полосы люминесценции (после обработки внешним полем) при напряжениях свыше 175 В ($E_{\text{ext}} \approx 58$ кВ/см) — полоса люминесценции практически не уширяется. Это может свидетельствовать, например, о том, что после длительного воздействия поля в образце становится меньше излучательных центров, имеющих широкий разброс параметров люминесценции. Эффект от сильного внешнего электрического поля может иметь также и электрохимическую или тепловую природу.

9. Заключение

Внешнее электрическое поле может быть эффективно использовано для модуляции фотолюминесценции квантово-размерных полупроводниковых наноструктур. Глубина модуляции определяется типом и геометрией наноструктур. Наиболее эффективно модулируются спектры поглощения и люминесценции нанокристаллов типа „квантовая точка“, которые обладают сильным квантово-размерным эффектом в трех измерениях. Спектры люминесценции наностержней являются частично поляризованными и имеют комбинированную внутреннюю структуру, определяемую, как минимум, двумя разными механизмами — собственной и „дефектной“ (примесной) люминесценции. Удлиненность наностержней обуславливает селективность их люминесцентных свойств относительно направления действия внешнего электрического поля, в которое они помещены.

Список литературы

- [1] S.V. Gaponenko. *Optical Properties of Semiconductor Nanocrystals* (Cambridge University Press, Cambridge, 1998).
- [2] S. Nizamoglu, T. Qzel, E. Sari, H.V. Demir. *Nanotechnology*, **18**, 065 709 (2007).
- [3] S.A. Empedocles, M.G. Bawendi. *Science*, **278**, 2114 (1997).
- [4] F. Hache, D. Ricard, C. Flytzanis. *Appl. Phys. Lett.*, **55**, 1504 (1989). A.I. Ekimov, A.L. Efros, T.V. Shubina, A.P. Skvortsov. *J. Luminesc.*, **46**, 97 (1990).
- [5] C. Wang, M. Shim, P. Guyot-Sionnest. *Science*, **291**, 2390 (2001).

- [6] A.K. Gooding, S.E. Gómez, P. Mulvaney. *Amer. Chem. Soc. NANO*, **2** (4), 669 (2008).
- [7] E. Rothenberg, M. Kazes, E. Shaviv, U. Banin. *Nano Lett.*, **5** (8), 1581 (2005).
- [8] J. Muller, J.M. Lupton, P.G. Lagoudakis, F. Schindler, R. Koeppel, A.L. Rogach, J. Feldmann, D.V. Talapin, H. Weller. *Nano Lett.*, **5** (10), 2044 (2005).
- [9] R.M. Kraus, P.G. Lagoudakis, A.L. Rogach, D.V. Talapin, H. Weller, J.M. Lupton, J. Feldmann. *Phys. Rev. Lett.*, **98**, 017401-1 (2007).
- [10] М.У. Белый, Б.А. Охрименко, С.М. Яблочков. *ПТЭ*, № 6, 162 (1981).
- [11] S.V. Gaponenko, E.P. Petrov, U. Woggon, O. Wind, C. Klingshirn, Y.H. Xie, I.N. Germanenko, A.P. Stupak. *J. Luminesc.*, **70**, 364 (1996).
- [12] D. Kovalev, M. Ben Chorin, J. Diener, F. Koch, A.L. Efros, M. Rosen, N.A. Gippius, S.G. Tikhodeev. *Appl. Phys. Lett.*, **67**, 1585 (1995).
- [13] Б.И. Степанов, В.П. Грибковский. *Введение в теорию люминесценции* (Минск, Наука и техника, 1963).
- [14] P. Lavallard, R.A. Suris. *Sol. St. Commun.*, **95**, 267 (1995).
- [15] *Физические величины*. Справочник, под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова (М., Энергоатомиздат, 1991).

Редактор Т.А. Полянская

Luminescence of cadmium selenide quantum dots and nanorods in the external electric field

L.I. Gurinovich, A.A. Lutich, A.P. Stupak, S.Ya. Prislipsky, E.K. Rusakov*, M.V. Artemyev*, S.V. Gaponenko, H.V. Demir⁺

B.I. Stepanov Institute of Physics
of National Academy of Science of Belarus,
220072 Minsk, Belarus

* Institute of Physical and Chemical Problems
of Belarusian State University,
220080 Minsk, Belarus

⁺ Bilkent University,
TR-06800 Ankara, Turkey

Abstract The dependence of absorption and luminescence spectra of cadmium selenide quantum dots and nanorods on the electric field has been established. It was demonstrated that *P*-polarized component of the photoluminescence of CdSe nanorods is quenched more efficiently by external electric field compared to the *S*-polarized component. It was found that quantum dots are more sensitive to external electric field than nanorods. The mechanism of influence of the external electric field on the luminescent properties of the semiconductor nanorods is discussed.