

Фотонные кристаллы на основе композитов опал-GaP и опал-GaPN: получение и оптические свойства

© Г.М. Гаджиев⁺, В.Г. Голубев, М.В. Заморянская, Д.А. Курдюков, А.В. Медведев,
J. Merz^{*}, A. Mintairov^{*}, А.Б. Певцов, А.В. Селькин, В.В. Травников[¶], Н.В. Шаренкова

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

^{*} University of Notre Dame, Notre Dame,
46556 IN, USA

⁺ Институт физики Дагестанского научного центра Российской академии наук,
367003 Махачкала, Россия

(Получена 22 мая 2003 г. Принята к печати 22 мая 2003 г.)

В пороках искусственных опалов синтезированы нанокристаллический GaP и аморфный твердый раствор GaPN. Полученные композиты опал-GaP и опал-GaPN обладают выраженными фотонно-кристаллическими свойствами. В спектрах отражения композита опал-GaPN наблюдаются особенности, связанные с множественным характером брэгговской дифракции на двух системах кристаллографических плоскостей {111}, параллельных и непараллельных поверхности фотонного кристалла. Исследованы спектры фотолюминесценции синтезированных композитов. Обнаружена заметная модификация полосы излучения композита опал-GaPN, обусловленная влиянием фотонной запрещенной зоны.

1. Введение

Фотонные кристаллы (ФК) представляют собой объемные пространственно-периодические структуры, диэлектрическая проницаемость которых модулируется с периодом, сравнимым с длиной волны света. Взаимодействие фотонов с такими структурами приводит к существенной модификации пространственного распределения и энергетического спектра электромагнитного поля. В частности, возникают фотонные запрещенные зоны (ФЗЗ) — энергетические области, в пределах которых распространение света невозможно в определенных (псевдо-ФЗЗ) или во всех (полная ФЗЗ) направлениях внутри ФК [1]. Энергетическая ширина и размер телесного угла, соответствующие ФЗЗ, определяются глубиной модуляции диэлектрической проницаемости и поэтому зависят от оптического контраста $\eta = \max(\epsilon_a/\epsilon_b, \epsilon_b/\epsilon_a)$, где ϵ_a , ϵ_b — диэлектрические константы материалов, формирующих ФК.

Реализация полной ФЗЗ возможна только в трехмерных ФК с относительно большим значением η (в ФК с гранецентрированной кубической (ГЦК) решеткой η должно быть $\gtrsim 8.5$ [2]). ФЗЗ формируются в результате брэгговской дифракции электромагнитных волн на системе кристаллографических плоскостей решетки ФК. Для образования ФЗЗ необходимо, чтобы в дифракционном процессе принимало участие достаточно большое число слоев решетки. Поэтому синтезировать ФК желательно из материалов, слабо поглощающих свет в соответствующем ФЗЗ спектральном диапазоне. Таким образом, для создания структур с ярко выраженными фотонно-кристаллическими свойствами необходимо использовать вещества-компоненты с сильно различающимися значениями вещественных частей диэлектрических

проницаемостей и, по возможности, минимальными значениями их мнимых частей.

Для видимого диапазона весьма перспективными кандидатами для синтеза ФК являются полупроводниковые соединения GaP [3], GaN [4] и твердые растворы на их основе. Эти полупроводники прозрачны в видимой области спектра и характеризуются большими значениями диэлектрической проницаемости. Кроме того, эти соединения интересны с точки зрения их люминесцентных свойств, которые широко используются в современной полупроводниковой оптоэлектронике [5,6]. В этой связи ФК, синтезированные на базе GaP, GaN и GaPN, могут быть перспективными и для изучения воздействия ФЗЗ на характеристики спонтанной эмиссии света. Дело в том, что именно возможность управления вероятностью спонтанного излучения источника, помещенного внутрь ФК, определяет перспективы практического применения ФК в качестве элементов светодиодов и лазеров с низкогопороговой накачкой [7]. Изложенные выше соображения стимулировали наши усилия по синтезу и исследованию фотонных кристаллов на основе твердых растворов GaPN.

2. Образцы

Как и в предыдущих наших работах [8], в качестве исходных матриц для создания ФК были использованы синтетические опалы, состоящие из трехмерно-упорядоченной плотноупакованной решетки шаров α -SiO₂. В таких опалах на долю воздушных пор, образующихся между шарами, приходится до 26% полного объема, который доступен для заполнения другими веществами. Диаметр шаров определялся с помощью сканирующего электронного и атомно-силового микроскопов и составлял ~ 245 нм. Опалы имели полидоменную структуру.

[¶] E-mail: travn@spectr.mail.ru

Характерный размер доменов с высокой степенью упорядоченности шаров SiO_2 был порядка 100 нм. Каждая субмикронная сфера SiO_2 состояла из наноразмерных частиц аморфного SiO_2 , между которыми имеется некоторая доля воздушных пустот. Вследствие этого средняя диэлектрическая проницаемость шара (ϵ_b) отличается от своего значения для объемного $a\text{-SiO}_2$. Согласно оценке [9], для образцов опалов, использовавшихся в настоящей работе, $\epsilon_b \approx 2.0$.

Синтез полупроводников осуществлялся непосредственно в порах опала по технологии, аналогичной использованной в [10]. В начальной стадии поры между шарами опала заполнялись веществом-прекурсором Ga_2O_3 . Затем при температуре около 900°C опалы отжигались в атмосфере смеси гидридов азота и фосфора. В силу химических реакций, которые могут протекать при этих условиях, в порах опала должно возникнуть вещество GaPN , и поэтому в дальнейшем полученные в этом случае образцы мы будем называть композитами опал- GaPN . По аналогичной причине образцы, полученные при отжиге в атмосфере только гидридов фосфора, будут называться композитами опал- GaP . Гравиметрические измерения показали, что степень заполнения пор опала веществом составляет 20–30%.

Оценка атомных концентраций элементов, образующих вещества, внедренные в опалы, выполнена методом рентгеноспектрального микроанализа (electron probe microanalysis). В композите опал- GaP концентрации атомов Ga и P были приблизительно равны друг другу ($\text{Ga}:\text{P} \approx 1:1.2$). Некоторый избыток P может объясняться наличием в порах опала элементарного фосфора, который мог сконденсироваться при охлаждении образца в парах фосфора. Из анализа интенсивностей измеренных характеристических линий рентгеновского излучения следует, что в композите опал- GaPN концентрации основных составляющих соответствуют соотношению $\text{Ga}:\text{P}:\text{N} = 1:0.2:0.8$. Следует отметить, что указанная величина концентрации атомов азота определяется с достаточно большой погрешностью из-за низкой интенсивности характеристических линий легких атомов (в нашем случае N и O).

Выполненные рентгеновские исследования показали, что вещество, внедренное в поры композита опал- GaP , является кубическим нанокристаллическим GaP (рис. 1, *a*), а вещество, синтезированное в порах композита опал- GaPN , является рентгеноаморфным (рис. 1, *b*). При большом количестве азота (~ 0.8), которое реализуется в нашем случае, кристаллизация твердого раствора, по-видимому, термодинамически невыгодна из-за значительных различий в постоянных решеток и типах кристаллической структуры GaN (гексагональная) и GaP (кубическая). Максимальное значение x , при котором удавалось получить кристаллический твердый раствор $\text{GaP}_{1-x}\text{N}_x$, не превышало величину 0.16 [11]. Для рентгеноаморфного вещества, возникающего в порах опала, возможны две предельные альтернативы: 1) аморфный твердый раствор GaPN ; 2) вещество, состоящее из двух разделенных аморфных фаз GaP и GaN .

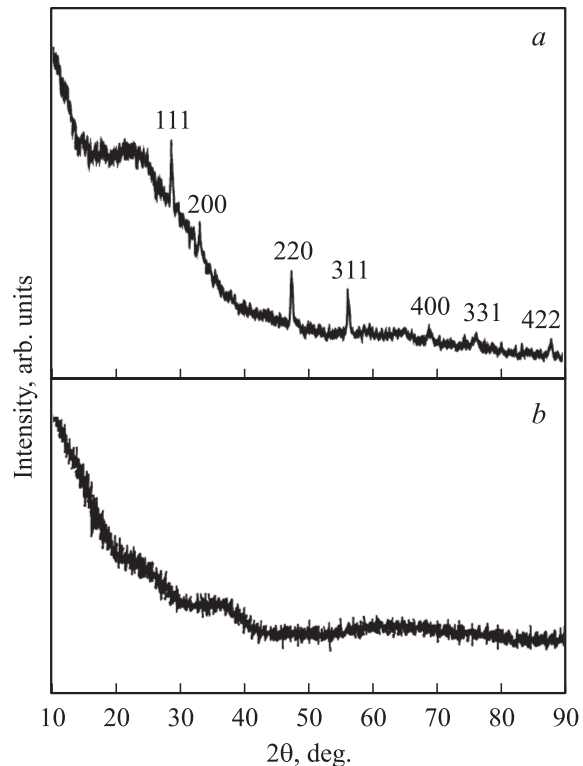


Рис. 1. Дифрактограммы композитов опал- GaP (*a*) и опал- GaPN (*b*).

В принципе нельзя исключить, что возникающее вещество может быть и смесью указанных предельных случаев.

Для идентификации природы веществ, образующихся в порах опалов, мы измерили спектры рамановского рассеяния полученных композитов. Результаты для композита опал- GaP подтвердили, что внедренный в поры GaP имеет нанокристаллическую структуру. Измерить спектры рассеяния для композита опал- GaPN нам не удалось из-за того, что при использовании всех имеющихся в нашем распоряжении линий аргонового и криптонового лазеров возникает сильная фотолюминесценция (см. далее), на фоне которой выделить слабые особенности рамановского рассеяния невозможно.

Образование разделенных аморфных фаз в порах опалов нам представляется маловероятным. Действительно, при той же температуре синтеза при отжиге Ga_2O_3 в парах гидроксида азота получается кристаллический гексагональный GaN [4], а при отжиге в парах гидроксида фосфора образуется кристаллический кубический GaP (рис. 1, *a*). Если бы при использовании смеси гидридов азота и фосфора происходило разделение фаз GaP и GaN , то, учитывая аналогичные условия синтеза, следовало бы ожидать, что эти разделенные фазы также должны были бы быть кристаллическими. Отсутствие каких-либо признаков кристаллическости на соответствующей дифрактограмме (рис. 1, *b*) приводит нас к выводу, что в порах опала в этом случае скорее всего синтезируется аморфный твердый раствор

GaPN. Учитывая разную свободную энергию диссоциации гидридов азота ($\Delta G_d^0 = 16.21$ кДж/мол) и фосфора ($\Delta G_d^0 = -13.4$ кДж/мол) [12], возникающий рентгено-аморфный твердый раствор $\text{GaP}_x\text{N}_{1-x}$ может характеризоваться неоднородным концентрационным (по величине x) распределением по образцу.

3. Результаты оптических исследований и обсуждение

Фотонно-кристаллические свойства полученных композитов мы исследовали, анализируя спектры зеркального отражения света и фотолюминесценции (ФЛ).

3.1. Спектры отражения

На рис. 2 представлены спектры отражения композита опал-GaPN при разных углах падения света, полученные в s -компоненте поляризации (детальному изложению результатов исследования спектров отражения композита опал-GaP будет посвящена отдельная публикация). В спектрах наблюдаются выраженные максимумы, которые сдвигаются в коротковолновую сторону с ростом угла падения θ . Формирование таких максимумов и их характерный спектральный сдвиг в зависимости от θ , приблизительно подчиняющийся известному закону Брэгга, являются прямым следствием существования ФЗЗ в ФК.

С увеличением угла падения, вблизи значения $\theta \approx 50^\circ$, в спектре отражения появляется дополнительный, более коротковолновый, максимум. Интенсивность этого максимума нарастает и при $\theta \approx 55^\circ$ становится сравнимой с интенсивностью длинноволнового максимума. Спектры приобретают ярко выраженный дублетный характер. При дальнейшем увеличении угла падения происходит уменьшение интенсивности длинноволнового максимума и в спектре остается лишь один (коротковолновый) максимум.

Появление дублетной структуры в спектре отражения при наклонном падении света указывает на множественный характер брэгговской дифракции [13], т.е. на одновременную дифракцию света на системе по крайней мере двух пересекающихся кристаллографических плоскостей. Одна система плоскостей — это совокупность ростовых плоскостей (111), параллельных естественной поверхности образца. Другая система узловых плоскостей должна пересекать плоскости (111) под некоторым углом.

В работе [13] возникновение дублетной структуры при наклонном падении света связывалось с одновременной дифракцией на плоскостях (111) и (200). Однако вклад в множественную дифракцию должны давать и непараллельные поверхности плоскости из совокупности {111} (соответствующие плоскости будем обозначать как $(11\bar{1})$). При этом следует ожидать значительно более сильный эффект множественной дифракции именно на пересекающихся плоскостях (111) и $(11\bar{1})$, а не на

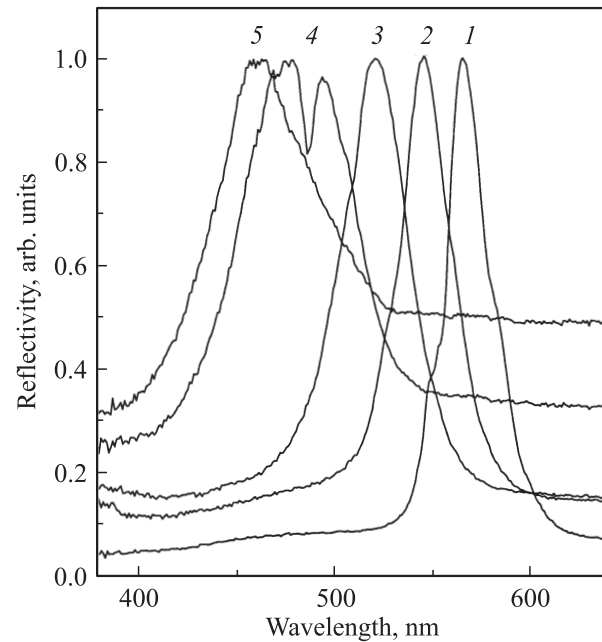


Рис. 2. Спектры брэгговского отражения композита опал-GaPN при разных углах падения света: 1 — 12° , 2 — 30° , 3 — 40° , 4 — 57° , 5 — 65° .

плоскостях (111) и (200), поскольку пространственная модуляция диэлектрической проницаемости в направлениях $\langle 200 \rangle$ намного слабее соответствующей модуляции в направлениях $\langle 111 \rangle$. Этот факт подтверждается численными оценками и прямыми экспериментальными наблюдениями [14]. В результате ФЗЗ, формируемые плоскостями {200}, оказываются намного уже запрещенных зон, возникающих в результате брэгговской дифракции на плоскостях {111}.

Представленные на рис. 3 зависимости максимумов брэгговского отражения от угла падения света позволяют выделить две ветви (нижнюю и верхнюю), которые отделены друг от друга областью антипересечения (avoiding crossing area [13]). Крестиком на рисунке отмечена точка на середине отрезка, соединяющего минимум верхней ветви и максимум нижней ветви. Как показывает выполненный анализ, в этой точке ($\lambda = \lambda_*$, $\theta = \theta_*$) при слабом периодическом возмущении диэлектрической проницаемости условия Брэгга выполняются одновременно для дифракции на трех плоскостях (111), $(11\bar{1})$ и (200) ГЦК решетки. При этом координаты точки (λ_*, θ_*) для ГЦК решетки подчиняются следующим простым соотношениям:

$$\frac{a}{\lambda_*} \sin \theta_* = \sqrt{3}/4, \quad (1)$$

$$\varepsilon_0 = 2 \sin^2 \theta_*, \quad (2)$$

где a — расстояние между центрами шаров в опалоподобной структуре, ε_0 — среднее значение диэлектрической проницаемости структуры.

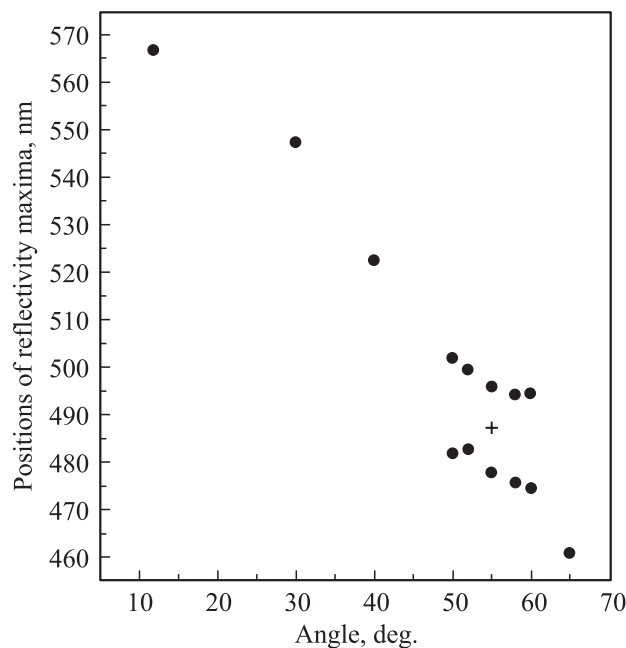


Рис. 3. Угловая зависимость положений максимумов брэгговского отражения. Крестик расположен на середине отрезка, соединяющего максимум нижней и минимум верхней ветвей.

Соотношения (1), (2) можно использовать для дополнительной характеристики фотонных кристаллов. Подстановка в формулу (1) измеренных значений $a = 245$ нм, $\lambda_* = 487.5$ нм и $\theta_* = 55^\circ$ показывает, что соотношение (1) выполняется с хорошей точностью: $(a/\lambda_*) \sin \theta_* \approx 0.42$, а $\sqrt{3}/4 \approx 0.43$. Последнее свидетельствует о том, что структура исследуемого образца соответствует ГЦК решетке.¹ Если это так, то должно выполняться и соотношение (2), из которого на длине волны λ_* можно оценить величину $\varepsilon_0 = 2.0$. С другой стороны, величина ε_0 удовлетворяет соотношению

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_a(1 - f) + \varepsilon_b f, \quad (3)$$

где ε_a и ε_b — средние диэлектрические проницаемости межшарового пространства и шаров соответственно, а f — фактор заполнения структуры шарами. Тогда при известных значениях ε_b и f [9], используя оценку для ε_0 , можно найти величину $\varepsilon_a \approx 2.0$. Полученное значение ε_a дает среднее значение диэлектрической проницаемости межшарового пространства, которое частично заполнено воздухом и материалом GaPN. Если в качестве грубого приближения допустить, что ε_a является линейной функцией степени заполнения пор твердым раствором, то с учетом погрешности гравиметрических данных для диэлектрической проницаемости синтезированного нами аморфного GaPN получаем

¹ В ряде чистых опалов и синтезированных композитов при подстановке измеренных значений (λ_* , θ_*) в левую часть соотношения (1) обнаружено заметное (более 10%) отклонение от соотношения (1), что свидетельствует об отличии пространственной симметрии этих ФК от симметрии ГЦК решетки.

оценку $\varepsilon_{\text{GaPN}} = 4.5-6.0$ в спектральной области антипересечения. Эта оценка, так же как и данные рентгено-спектрального микроанализа, свидетельствует о высокой концентрации азота в синтезированном GaPN, поскольку величина диэлектрической проницаемости ε_{GaN} чистого GaN составляет ~ 5.5 (в окрестности 500 нм) [15].

3.2. Фотолюминесценция

Фотолюминесценция (ФЛ) полученных композитов исследовалась при комнатной температуре. Возбуждение осуществлялось светом аргонового лазера на длине волны 457.9 нм. Измерения проводились на разных участках поверхности образцов: от высокоупорядоченных областей в пределах выделенных доменов, характеризующихся интенсивным брэгговским отражением света, и от неупорядоченных областей, для которых брэгговская компонента отражения отсутствовала. Для выбора различных участков поверхности образца использовалась техника оптического микроскопа. Луч аргонового лазера при нормальном угле падения фокусировался на образец микрообъективом ($\times 10$) в пределах одного домена. Этот же объектив собирал люминесцентное излучение, которое с помощью системы линз и полупрозрачных зеркал проецировалось на входную щель спектрометра. В качестве приемника использовалась CCD (Charge Coupled Device) камера фирмы Jobin Yvon.

Спектры ФЛ от неупорядоченных участков созданных композитов представлены на рис. 4. Композиты опал-GaPN характеризуются сильной полосой ФЛ (спектр 1) с максимальной интенсивностью, более чем на 2 порядка превышающей интенсивность соответствующей полосы в композите опал-GaP (спектр 2). На рис. 4 показано, что, хотя по положению максимумов наблюдаемые полосы ФЛ созданных композитов находятся в одной спектральной области, по общей форме они заметно отличаются друг от друга. Полоса ФЛ композита опал-GaPN заметно шире полосы ФЛ в опале-GaPN и в целом смещена в длинноволновую сторону относительно последней.

Максимумы полос ФЛ композита опал-GaPN существенно смещены в коротковолновую сторону относительно максимумов брэгговского отражения, расположенных в области 680 нм. В композите опал-GaPN наблюдаемые полосы ФЛ попадают в спектральную область ФЗЗ. Этот факт наряду с большой интенсивностью ФЛ позволил наблюдать проявление ФЗЗ в спектрах люминесценции. На рис. 5 изображены спектры люминесценции от упорядоченной области композита опал-GaPN при разных углах выхода излучения относительно нормали к поверхности. В спектрах наблюдается провал, положение и смещение которого по мере увеличения угла выхода коррелирует с положением и смещением максимумов в спектрах отражения. Возникновение провала в ФЛ обусловлено тем, что интенсивность излучения, выходящего под некоторым углом

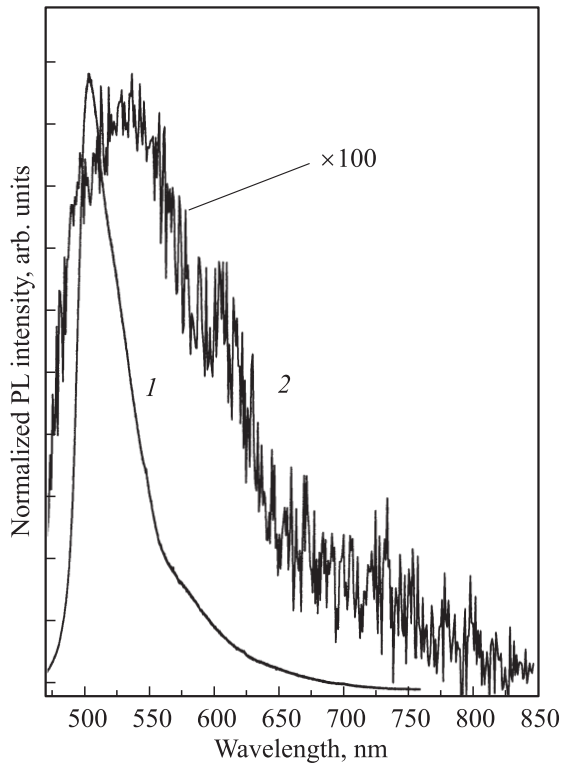


Рис. 4. Спектры фотолюминесценции неупорядоченных областей (характеризуемых отсутствием брэгговской компоненты в спектрах отражения) композитов опал-GaPN (1) и опал-GaP (2).

к поверхности (111), должна заметно уменьшаться в спектральном интервале, соответствующем условиям брэгговского отражения (из-за влияния ФЗЗ на условия распространения фотонов).

В случае опалов, заполненных полупроводниками, вклад в ФЛ могут давать как электронно-дырочная излучательная рекомбинация в самих полупроводниках, так и излучение опаловой матрицы (например, вакансии кислорода в SiO_2) [3,16,17]. Согласно [18], спектры ФЛ аморфного SiO_2 при $T = 300$ К содержат в исследованной нами спектральной области две полосы излучения: четко выраженную и довольно узкую (полуширина 0.19 эВ) полосу ~ 645 нм (1.92 эВ) и менее интенсивную, но более широкую (полуширина 0.35 эВ) полосу ~ 516 нм (2.40 эВ). В спектрах ФЛ чистых опалов и опалов, заполненных ZnS, максимумы широких полос ФЛ, связанных с излучением SiO_2 , соответствуют энергии 2.3 эВ (~ 539 нм) [17]. Положение максимума широкой (полуширина 0.5 эВ) полосы ФЛ в композите опал-GaP также может быть оценено как 2.30 эВ (рис. 4). Поэтому можно предположить, что наблюдаемая полоса ФЛ в композите опал-GaP в значительной степени связана с излучением самой опаловой матрицы.

По своей форме, полуширине (0.2 эВ) и положению (505 нм, 2.45 эВ) полоса ФЛ в композите опал-GaPN (рис. 4) заметно отличается от полос ФЛ, связанных

с излучением опаловой матрицы [3,16,17]. Мы предполагаем, что эта полоса обусловлена в основном фотолюминесценцией рентгеноаморфного вещества, синтезированного в порах опала. Учитывая неоднозначность наших выводов о природе этого вещества, обсудим возможные альтернативы происхождения рассматриваемой полосы. Если бы в порах опала возникали разделенные аморфные фазы (см. выше), то полоса могла бы быть связана с излучательной рекомбинацией либо в GaP, либо в GaN. При комнатной температуре максимум ФЛ кристаллического GaP (2.3 эВ [6]) смещен в длинноволновую сторону относительно максимума рассматриваемой полосы. Добавление незначительного количества азота, согласно литературным данным [6], сдвигает полосу люминесценции GaP в длинноволновую (красную) область спектра. Учитывая сказанное, мы полагаем, что наблюдаемая полоса ФЛ не может быть связана с излучением аморфной фазы GaP (полосы люминесценции в аморфных материалах обычно смещены в длинноволновую сторону относительно их положения в кристаллических аналогах). В работе [19] обнаружено, что широкая полоса люминесценции аморфного GaN расположена в области 2.8 эВ и, таким образом, она существенно сдвинута в коротковолновую область по сравнению с

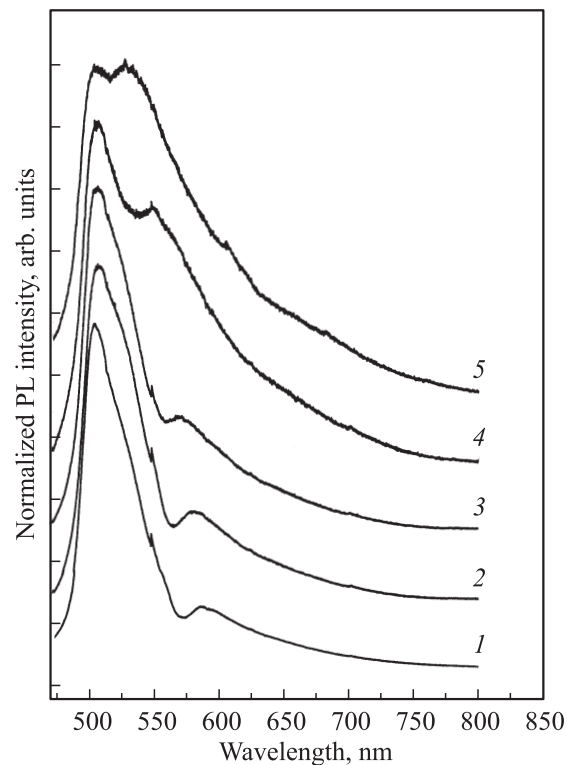


Рис. 5. Спектры фотолюминесценции высокоупорядоченной (в пределах одного домена) области композита опал-GaPN при разных углах выхода излучения относительно нормали к поверхности образца: 1 — 0° , 2 — 14° , 3 — 26° , 4 — 45° , 5 — 51° ; для удобства сопоставления спектры сдвинуты по оси ординат. Скачок в спектрах в районе 550 нм связан с переключением диапазонов регистрации.

полосой ФЛ в композите опал-GaN. В свете вышеизложенного остается предположить, что основной вклад в наблюдаемую люминесценцию в исследованном образце связан с излучательной рекомбинацией неравновесных носителей в аморфной фазе полупроводника GaPN.

В работе [20] представлены результаты расчетов ширины запрещенной зоны твердого раствора $\text{GaP}_{1-x}\text{N}_x$ как функции x . Для оцененной нами концентрации азота ($x = 0.8$) край поглощения твердого раствора соответствует прямым переходам (Γ - Γ -переход в кристаллической фазе) и должен располагаться, согласно [20], в районе 2.6 эВ. Такое положение края запрещенной зоны согласуется с наблюдаемым положением максимума излучения (2.45 эВ, рис. 4) полосы ФЛ в композите опал-GaN. Для окончательного установления конкретной природы наблюдаемых полос ФЛ необходимы дальнейшие исследования.

4. Заключение

Таким образом, в настоящей работе продемонстрирована возможность создания трехмерных фотонных кристаллов на основе полупроводниковых композитов опал-GaP и опал-GaN. Проведенные спектрально-оптические исследования показали, что полученные структуры обладают ярко выраженными фотонно-кристаллическими свойствами и могут рассматриваться в качестве перспективных объектов для фундаментальных исследований и практических разработок.

В спектрах брэгговского отражения композита опал-GaN обнаружены четкие особенности, связанные с множественным характером дифракции света на системе непараллельных кристаллографических плоскостей типа $\{111\}$. Показано, что спектральные положения этих особенностей, их зависимость от угла падения света непосредственно связаны с оптическими и геометрическими параметрами композита.

Изучены спектры фотолюминесценции композитов опал-GaP и опал-GaN. Благодаря тому что фотонная запрещенная зона композита опал-GaN оказывается по своему энергетическому положению в пределах широкой полосы излучения полупроводникового материала, в работе удалось наблюдать заметную модификацию спектра излучения под влиянием фотонной запрещенной зоны. Таким образом, в работе показано, что синтезированная структура опал-GaN может в принципе использоваться для управления характеристиками спонтанного излучения и рассматриваться как перспективная система при разработке низкороговых лазерных источников света.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Программ Президиума РАН „Низкоразмерные квантовые структуры“ и Министерства промышленности, науки и технологий „Физика твердотельных наноструктур“, гранта НАТО PST. CLG. 978079.

Список литературы

- [1] *Photonic Crystals and Light Localization in the 21st Century*, ed. by C.M. Soukoulis (Dordrecht, Kluwer, 2001).
- [2] K. Bush, S. John. *Phys. Rev. E*, **58**, 3896 (1998).
- [3] S.G. Romanov, R.M. De La Rue, H.M. Yates, M.E. Pemble. *J. Phys.: Condens. Matter*, **12**, 339 (2000).
- [4] Yu. Davydov, V.G. Golubev, N.F. Kartenko, D.A. Kurdyukov, A.B. Pevtsov, S.M. Samoilovich, N.V. Sharenkova, P. Brogueira, R. Schwarz. *Nanotechnology*, **11**, 291 (2000).
- [5] S. Nakamura, G. Fasol. *The Blue Laser Diode: GaN based Light Emitters and Lasers* (Berlin, Springer, 1997).
- [6] C.W. Tu. *J. Phys. Condens. Matter*, **13**, 7169 (2001).
- [7] E. Yablonoitch. *Phys. Rev. Lett.*, **58**, 2059 (1987).
- [8] В.Г. Голубев, В.А. Кособукин, Д.А. Курдюков, А.В. Медведев, А.Б. Певцов. *ФТП*, **35**, 710 (2001); V.G. Golubev, V.Yu. Davydov, N.F. Kartenko, D.A. Kurdyukov, A.V. Medvedev, A.B. Pevtsov, A.V. Scherbakov, E.B. Shadrin. *Appl. Phys. Lett.*, **79**, 2127 (2001); G. Gajiev, V.G. Golubev, D.A. Kurdyukov, A.B. Pevtsov, A.V. Sel'kin, V.V. Travnikov. *Phys. St. Sol. (b)*, **231** (1), R7 (2002).
- [9] V.G. Golubev, A.V. P'inskii, D.A. Kurdyukov, A.V. Medvedev, A.B. Pevtsov, A.V. Scherbakov, A.V. Sel'kin, E.B. Shadrin. *Abstracts 10th Int. Symp. „Nanostructures: Physics and Technologies“* (St. Petersburg, 2002) p. 108.
- [10] Г. Гаджиев, В.Г. Голубев, В.Ю. Давыдов, Д.А. Курдюков, А.В. Медведев, А.Б. Певцов, В.В. Травников. Сб. тр. III межд. конф. „Аморфные и микроскристаллические полупроводники“ (СПб., 2002) с. 9; A.B. Pevtsov, V.G. Golubev, D.A. Kurdyukov, A.V. Medvedev, A.V. Sel'kin, V.V. Travnikov, J. Merz, A. Mintairov. *Abstracts MRS Fall Meeting* (Boston, USA, 2002) p. 361; G. Gajiev, V.G. Golubev, D.A. Kurdyukov, A.B. Pevtsov, V.V. Travnikov. *Abstracts 10th Int. Symp. „Nanostructures: Physics and Technologies“* (St. Petersburg, 2002) p. 134.
- [11] W.G. Bi, C.W. Tu. *Appl. Phys. Lett.*, **69**, 3710 (1996).
- [12] В.А. Рабинович, З.Я. Хавин. *Краткий химический справочник* (Л., Химия, Ленингр. отд-ние, 1977).
- [13] H.M. van Driel, W.L. Vos. *Phys. Rev. B*, **62**, 9872 (2000).
- [14] A. Reynolds, F. Lopez-Tejiera, D. Cassagne, F.J. Garcya-Vidal, C. Jouanin, J. Sanchez-Dehesa. *Phys. Rev. B*, **60**, 11422 (1999).
- [15] G. Yu, G. Wang, H. Ishikawa, M. Umeno, T. Soga, T. Egawa, J. Watanabe, T. Jimbo. *Appl. Phys. Lett.*, **70**, 3209 (1997).
- [16] R.C. Schroden, M. Al-Daous, A. Stein. *Chem. Mater.*, **13**, 2945 (2001).
- [17] S.G. Romanov, A.V. Fokin, R.M. De La Rue. *Appl. Phys. Lett.*, **74**, 1821 (1999).
- [18] M.A. Stevens Kalceff. *Phys. Rev. B*, **57**, 5674 (1998).
- [19] А.А. Андреев. *ФТТ*, **45**, 395 (2003).
- [20] S. Miyoshi, K. Onabe. *Jap. J. Appl. Phys.*, **37**, pt 1, 4680 (1998).

Редактор Л.В. Беляков

Photonic crystals based on opal-GaP and opal-GaPN composites: fabrication and optical properties

G.M. Gajiev⁺, V.G. Golubev, M.V. Zamoryanskaya, D.A. Kurdyukov, A.V. Medvedev, J. Merz^{}, A. Mintairov^{*}, A.B. Pevtsov, A.V. Sel'kin, V.V. Travnikov, N.V. Sharenkova*

Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

^{*} University of Notre Dame, Notre Dame,
46556 IN, USA

⁺ Daghestan Institute of Physics,
Russian Academy of Sciences,
367003 Makhachkala, Russia

Abstract Both nanocrystalline GaP and amorphous solid solution GaPN have been synthesized in pores of artificial opals. Opal-GaP and opal-GaPN composites fabricated demonstrate pronounced photonic band gap properties. Reflection spectra of the opal-GaPN show additional peculiarities due to multiple Bragg diffraction on the lateral and non-lateral systems of the {111} crystallographic planes. Photoluminescence spectra of the composites were studied as well. Appreciable modification of the opal-GaPN emission contour under photonic band gap was observed.