

УДК 535.361

**ВТОРИЧНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ГЛОБУЛЯРНЫХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ НА ОСНОВЕ КОМПОЗИТА ОПАЛ – РОРОР**

Н. Ф. Габитова, В. С. Горелик

*Исследованы спектры вторичного излучения глобулярного фотонного кристалла типа опаловой матрицы, заполненного известным люминофором, ароматическим соединением РОРОР, и исходных материалов при возбуждении излучением полупроводниковых светодиодов. Обнаружено, что спектр свечения опала, заполненного РОРОР, существенно отличается от спектров свечения как самого РОРОР, так и исходного опала. Показано, что наблюдаемое свечение в видимой области спектра в большой степени обусловлено трехфотонным параметрическим рассеянием света. При этом форма спектра определяется плотностью фотонных состояний, отличающейся от плотности фотонных состояний чистого опала. Произведен расчет вида спектра вторичного излучения искусственного опала, заполненного РОРОР. Установлено влияние положения запрещенной фотонной зоны на распределение интенсивности спонтанного излучения используемого люминофора.*

Глобулярные фотонные кристаллы представляют собой кристаллические решетки, построенные из шаров (глобул), размеры которых существенно превышают атомные размеры. Важнейшим примером глобулярного фотонного кристалла является опаловая матрица, построенная из глобул аморфного кварца (кремнезема), размер которых близок к длинам волн электромагнитного излучения видимого диапазона  $d = 200 - 800$  нм. Характерным свойством таких кристаллов является присутствие разрешенных и запрещенных фотонных зон [1–3]. В опаловых матрицах между шарами присутствуют поры,

занимающие до 26% общего объема (при точечном контакте). В поры могут вводиться различные наполнители в виде жидкостей и твердых тел.

Использование оптически нелинейных или активных сред в качестве наполнителей пор фотонных кристаллов открывает широкие возможности для создания оптических элементов с уникальными свойствами, включая локализацию света и усиление или подавление спонтанного излучения.

Ранее были получены фотонные кристаллы на базе искусственных опалов, обладающие ярко выраженными фотолюминесцентными свойствами, обусловленными неорганическими полупроводниковыми соединениями [2]. В настоящей работе приводятся результаты исследования спектров вторичного излучения синтетических опалов, заполненных известным люминофором, ароматическим соединением РОРОР.

*Методика эксперимента.* В работе использовались синтетические опалы, состоящие из монодисперсных шарообразных частиц диаметром 230 нм, предоставленные М. И. Самойловичем (НИИ "Техномаш", г. Москва). Исследования проводились с пластинами  $2 \times 10 \times 10 \text{ мм}^3$  с ориентацией поверхности (111).

Было подготовлено два образца с различным содержанием РОРОР в порах кристалла: 2 и 10% от общего объема. При этом фотонный кристалл пропитывался раствором РОРОР в ацетоне разной концентрации. Образцы выдерживались на открытом воздухе в течение 10 часов до полного испарения ацетона. Спектральные исследования были выполнены также с кристаллами исходных опалов (без специально вводимых примесей) и с порошком РОРОР.

В качестве источников возбуждения вторичного излучения в настоящей работе использовалось излучение полупроводниковых светодиодов с максимумами интенсивности 364, 382, 463 и 530 нм.

Анализ спектров свечения проводился на экспериментальной установке, блок-схема которой изображена на рис. 1. Измерения проводились по схеме на просвет. Излучение от светодиода с помощью световода диаметром 2 мм подводилось к поверхности образца. Вторичное излучение собиралось с противоположной поверхности с помощью кварцевого световода со светопроводящим каналом диаметром 200 мкм. Этим световодом вторичное излучение подводилось к миниатюрному полихроматору FSD8; при этом выходной торец световода служил в качестве входной щели полихроматора. Спектр вторичного излучения регистрировался ПЗС-линейкой, являющейся частью полихроматора. Оптическая и спектральная характеристика используемого полихроматора обеспечивала высокую чувствительность метода.

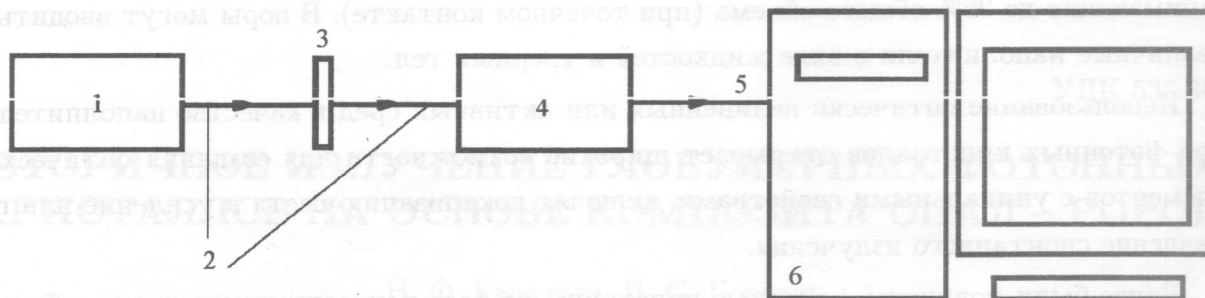


Рис. 1. Принципиальная схема установки для анализа вторичного излучения в фотонных кристаллах на базе искусственных опалов. 1 – светодиод, источник первичного квазимонохроматического излучения; 2 – световоды; 3 – исследуемый образец; 4 – миниполихроматор FSD8; 5 – USB-интерфейс; 6 – персональный компьютер.

*Результаты экспериментальных исследований.* Ранее [4] были проведены исследования спектров отражения исходных кристаллов (без введения примесей) с целью выявления в них фотонных запрещенных зон. Измеренные спектры отражения характеризовались асимметричными полосами отражения с параметрами, зависящими от угла падения. Из этих измерений следует, что положение стоп-зоны в этих образцах при нормальном падении на поверхность (111) соответствует длинам волн: 506 – 540 нм.

Наряду с аномальным отражением было обнаружено [4] свечение искусственных опалов без специально вводимых примесей при их облучении ультрафиолетовыми источниками света ( $\lambda_0 = 364$  и 382 нм). Нами были проведены дополнительные исследования такого рода свечения для исходного опала толщиной 2.0 мм при возбуждении излучением светодиодов с длинами волн  $\lambda_0 = 364, 382, 463$  и 530 нм. На рис. 2а, б, с, д приведены соответствующие спектры свечения. Максимумы интенсивности свечения при этом наблюдались на длинах волн: 522, 534, 464 и 540 нм соответственно.

На рис. 3а, б, с приведены спектры фотолюминесценции ультрадисперсного порошка РОРОР (при возбуждении тремя линиями: 364, 382 и 463 нм). Полученные спектры представляли собой асимметричные полосы с перегибами в длинноволновой части. Максимумы спектров при возбуждении линиями с  $\lambda_0 = 364$  и 382 нм располагались на длине волны  $\lambda_{max} = 472$  нм, а при возбуждении линией с  $\lambda_0 = 463$  нм – на длине волны  $\lambda_{max} = 475$  нм.

На рис. 4а, б, с представлены полученные спектры свечения синтетического опала, заполненного ароматическим соединением РОРОР на 2% от общего объема, при облучении излучением светодиодов с длинами волн 364, 382 и 463 нм, соответственно (линии

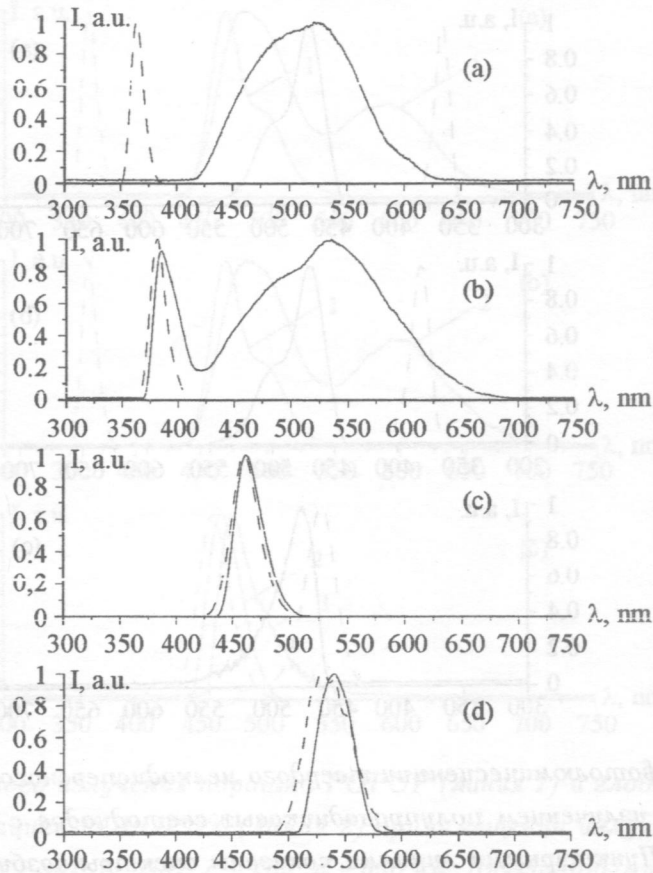


Рис. 2. Спектры свечения (сплошные линии) пластины исходного опала толщиной 2.0 мм при возбуждении излучением полупроводниковых светодиодов с длинами волн 364 (а), 382 (б), 463 (с) и 530 (д) нм. Пунктирными линиями показаны спектры возбуждающего излучения.

2). Для сравнения здесь же приведены спектры фотолюминесценции исходного твердого мелкодисперсного РОРОР (линии 1). При облучении образца с 2% РОРОР излучением диодов с  $\lambda_0 = 364$  нм (рис. 4а) и 382 нм (рис. 4б) результирующий спектр представлял собой широкую полосу с двумя максимумами при  $\lambda_{\max} = 486$  и 593 нм. Форма спектров для данных двух возбуждающих мало отличалась. Положение коротковолновых максимумов было близко к положению максимума в спектре фотолюминесценции РОРОР и смещено в длинноволновую область на 13 нм. При облучении данного образца излучением светодиода с  $\lambda_0 = 463$  нм (рис. 4с) спектр вторичного излучения представлял собой асимметричную полосу с полушириной, равной полуширине полосы возбуждаю-



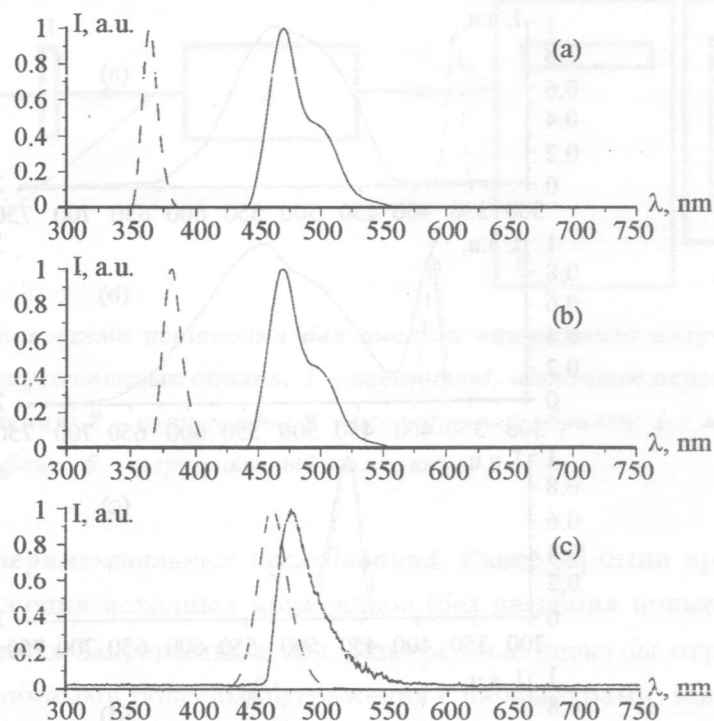


Рис. 3. Спектры фотолюминесценции твердого мелкодисперсного РОРОР (сплошные линии) при возбуждении излучением полупроводниковых светодиодов с длинами волн 364 (а), 382 (b) и 463 (d) нм. Пунктирными линиями показаны спектры возбуждающего излучения.

шего излучения. При этом положение максимума спектра вторичного излучения ( $\lambda_{\max} = 468$  нм) мало отличалось от положений максимума первичного излучения и максимума в спектре фотолюминесценции исходного РОРОР.

На рис. 5а и 5b изображены спектры свечения опала с 10% РОРОР в порах при возбуждении излучением светодиодов с  $\lambda_0 = 364$  и 382 нм, соответственно. Наблюдалось два максимума  $\lambda_{\max} = 547$  и 678 нм. Относительная интенсивность первого максимума по отношению ко второму значительно уменьшилась по сравнению со случаем опала с 2% РОРОР (см. табл. 2). При возбуждении излучением светодиода с  $\lambda_0 = 463$  нм наблюдалось также два максимума при  $\lambda_{\max} = 513$  и 678 нм (рис. 5с). При возбуждении излучением с  $\lambda_0 = 530$  нм наблюдалась полоса с одним максимумом при  $\lambda_{\max} = 539$  нм, форма которой мало отличалась от формы спектра первичного излучения (рис. 5d).

При воздействии излучением с максимумами  $\lambda_0 = 364, 382, 463$  нм на образец опала с 10% РОРОР в порах наблюдался резкий пик (показан стрелочками) на фоне коротко-

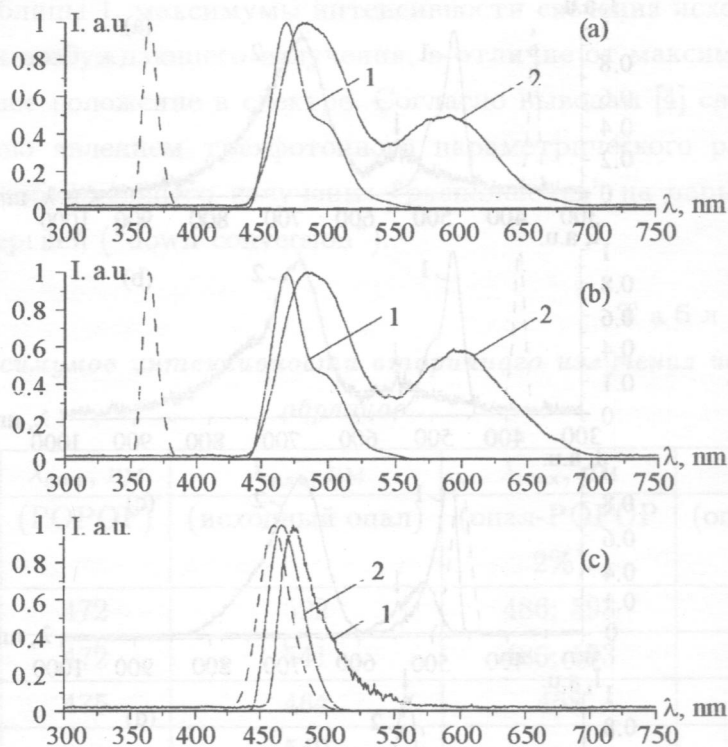


Рис. 4. Спектры вторичного излучения порошка РОРОР (линия 1) и глобулярного фотонного кристалла с концентрацией РОРОР 2% (линия 2) при освещении излучением светодиодов с разными длинами волн: а – 364, б – 382, с – 463, д – 530 нм. Пунктирными линиями показаны спектры возбуждающего излучения.

волновых максимумов. Положение этого пика,  $\lambda_i = 547$  нм, не зависело от длины волны возбуждающего излучения. Следует отметить, что этот пик по положению был близок к положению максимума интенсивности вторичного излучения опала с 10% РОРОР при возбуждении светодиодом с  $\lambda_0 = 530$  нм.

Таким образом, при увеличении степени заполнения пор соединением РОРОР наблюдалось: (i) увеличение общей ширины полос, (ii) смещение положений максимумов в область больших длин волн (табл. 1), (iii) значительное увеличение интенсивности длинноволновых максимумов относительно коротковолновых (табл. 2).

**Обсуждение результатов.** В таблице 1 приведены данные о положении максимумов интенсивности вторичного излучения исследованных образцов: порошка РОРОР, исходного опала и композитов опал-РОРОР при разных концентрациях.

Из таблицы 1 видно, что положение максимума свечения порошка РОРОР мало ме-

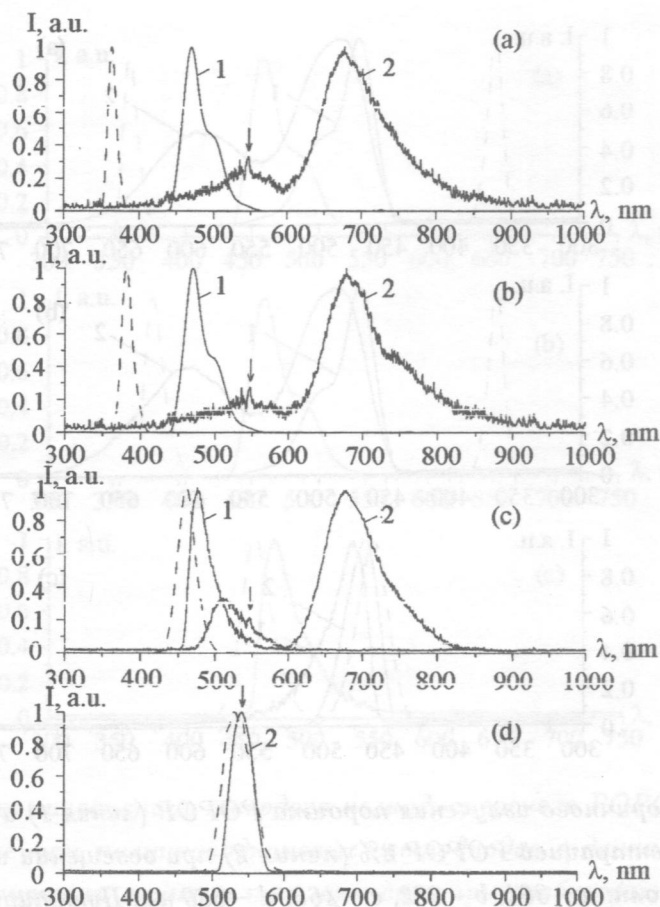


Рис. 5. Спектры вторичного излучения порошка РОРОР (линия 1) и глобулярного фотолюминесцентного кристалла с концентрацией РОРОР 10% (линия 2) при освещении излучением светодиодов с разными длинами волн: а – 364, б – 382, с – 463 нм. Пунктирными линиями показаны спектры возбуждающего излучения. Стрелками обозначены положения пиков, соответствующих высокочастотному краю стоп-зоны.

няется при изменении значения длины волны возбуждающего излучения. Это является характерной особенностью люминесценции. Незначительное смещение полосы фотолюминесценции РОРОР при возбуждении излучением с длиной волны  $\lambda_0 = 463$  нм связано с близостью полосы излучения используемого светодиода к полосе фотолюминесценции. При этом большую роль может играть комбинационное рассеяние (КР), что приводит к искажению формы полосы фотолюминесценции. Кроме того, в этом случае возбуждение фотолюминесценции происходит лишь для части электронных состояний, соответствующих переходу.

Как видно из таблицы 1, максимумы интенсивности свечения исходного опала при разных длинах волн возбуждающего излучения, в отличие от максимумов в спектрах РОРОР, имеют разное положение в спектре. Согласно выводам [4] свечение опала без примесей обусловлено явлением трехфотонного параметрического рассеяния (ТПР). При этом фотоны возбуждающего излучения “распадаются” на пары вторичных фотонов с меньшей энергией (“down conversion”).

Т а б л и ц а 1

Положения максимумов интенсивности вторичного излучения исследованных образцов

Длина волны возбуждения $\lambda_0$ , нм	$\lambda_{\max}$ , нм	$\lambda_{\max}$ , нм	$\lambda_{\max}$ , нм	$\lambda_{\max}$ , нм
	(РОРОР)	(исходный опал)	(опал-РОРОР 2%)	(опал-РОРОР 10%)
364	472	522	486; 593	547; 678
382	472	541	486; 593	547; 678
463	475	464	468	513; 678
530	—	540	—	539

В centrosymmetric кристаллах процессы ТПР являются запрещенными. Однако в данном случае присутствие большой доли поверхности внутри кристалла обуславливает нарушение правила отбора. Спектр результирующего излучения при этом зависит от плотности фотонных состояний окружающей среды, в данном случае синтетического опала – глобулярного фотонного кристалла [5]. Согласно [5] энергия излучения кристалла объемом  $V$  в единицу времени:

$$U \approx \frac{\pi\omega^2}{\epsilon_0 V} \cdot |\mathbf{d} \cdot \mathbf{E}^{(T)*}(\mathbf{r})|^2 D(\omega) \propto \omega^2 D(\omega), \quad (1)$$

где  $\mathbf{d}$  – вектор дипольного момента взаимодействия,  $\mathbf{E}$  – вектор напряженности электрического поля световой волны, а плотность фотонных состояний  $D(\omega)$  обратно пропорциональна групповой скорости  $v = d\omega/dk$ :

$$D(\omega) \propto k^2(\omega) \frac{\partial k}{\partial \omega} = k^2(\omega) \frac{1}{v}. \quad (2)$$

В связи с тем, что вблизи краев стоп-зоны скорость  $v$  должна стремиться к нулю, плотность фотонных состояний, а вместе с ней и интенсивность излучения, в идеальном кристалле без потерь должна стремиться к бесконечности.



Согласно данному представлению в спектрах свечения опалов должно наблюдаться два максимума, соответствующих краям стоп-зоны. Однако присутствие неоднородностей и разупорядоченных областей, а так же сопутствующее комбинационное рассеяние может привести не только к уширению этих пиков, но и к их перекрытию, что и наблюдалось в спектрах вторичного излучения исходного чистого опала при возбуждении излучением диодов с  $\lambda_0 = 364$  и  $382$  нм.

При увеличении длины волны возбуждающего излучения от  $364$  к  $382$  нм наблюдалось смещение положения максимума в длинноволновую область, причем положение полосы свечения в целом не изменилось. Это свидетельствовало о том, что произошло перераспределение энергии в пределах спектрального диапазона свечения.

Т а б л и ц а 2

Относительная интенсивность максимумов в спектрах вторичного излучения опала с 2 и 10% РОРОР.  $I_1, I_2$  – интенсивности коротковолнового и длинноволнового максимумов интенсивности соответственно (см. рис. 4 и 5, кривые 2)

Длина волны возбуждения $\lambda_0$ , нм	$I_1/I_2$ (2% РОРОР)	$I_1/I_2$ (10% РОРОР)
364	2.0	0.25
382	1.8	0.18
463	–	0.32

Максимумы интенсивности в спектрах опала при возбуждении диодами с  $\lambda_0 = 463$  и  $530$  нм находились при меньших длинах волн, чем при возбуждении диодами с  $\lambda_0 = 364$  и  $382$  нм, причем полуширина этих спектров была порядка полуширины спектра возбуждающих линий. Если бы первичное излучение находилось в области запрещенной фотонной зоны, вторичное излучение не наблюдалось бы. Поэтому можно предположить, что возбуждающие линии в данных случаях находились вблизи энергетического края стоп-зоны. По-видимому, имел место резонансный процесс, где все излучение переходило в одну линию. Данный процесс, предположительно, сопровождался возникновением медленных фотонов.

Аналогичная ситуация имела место при возбуждении излучением диода с  $\lambda_0 = 463$  нм опала, заполненного РОРОР на 2%, и излучением диода с  $\lambda_0 = 530$  нм опала, заполненного РОРОР на 10%. Эти линии соответствовали коротковолновым краям стоп-зон данных фотонных кристаллов (опал-РОРОР 2% и 10%).

Согласно таблице 1 при возбуждении диодами  $\lambda_0 = 364$  и  $382$  нм в спектрах опала, заполненного РОРОР до концентрации 2%, присутствовало два максимума, положение которых не менялось при изменении длины волны возбуждения; при этом согласно таблице 2 происходило перераспределение интенсивности между ними. Эти два максимума соответствовали верхней и нижней границе стоп-зоны фотонного кристалла, заполненного РОРОР. Максимум, соответствующего фотолюминесценции РОРОР, не было обнаружено. Это свидетельствовало о полном или частичном гашении спонтанного излучения люминофора.

При заполнении опала РОРОР на 10% спектры вторичного излучения при возбуждении светодиодами с  $\lambda_0 = 364, 382$  и  $463$  нм характеризовались теми же особенностями. При этом края стоп-зоны находились при больших длинах волн. Это объясняется смещением и увеличением ширины стоп-зоны при увеличении показателя преломления среды пор в глобулярном фотонном кристалле в соответствии с условием Брэгга-Вульфа:

$$\lambda(\theta) = 2d\sqrt{\langle n \rangle^2 - \sin^2 \theta}, \quad (3)$$

где  $d$  – расстояние между плоскостями в кристалле ( $d = \sqrt{2/3}a$ ,  $a$  – диаметр сфер, составляющих кристалл),  $\theta$  – угол падения,  $\langle n \rangle = \beta n_1 + (1 - \beta)n_2$  – эффективный показатель преломления искусственного опала. В случае опала  $\beta = 0.74$  – коэффициент заполнения для  $\text{SiO}_2$ ,  $n_1 = 1.47$  – показатель преломления аморфного кварца,  $n_2$  – показатель преломления среды в порах кристалла.

Таким образом, при заполнении опала люминофором РОРОР на 2 и 10% происходит изменение энергетического распределения плотности фотонных состояний опала и подавление люминесценции наполнителя.

На основании формул (1) и (2) был проведен расчет спектральной зависимости интенсивности вторичного излучения искусственного опала. При этом использовалась следующая аппроксимация для первой и второй ветвей дисперсионной зависимости, предложенная в [6]:

$$\begin{aligned} \omega_1 &= \frac{2c}{a} \sin\left(\frac{ka}{2}\right) \\ \omega_2 &= \sqrt{\omega_0^2 - 4\frac{c^2}{a^2} \sin^2\left(\frac{ka}{2}\right)}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $c$  – константа, близкая к скорости света в вакууме,  $a$  – диаметр глобул (период кристаллической решетки),  $\omega_0$  – значение круговой частоты в центре зоны Бриллюэна для второй и третьей ветвей.

Полученные зависимости интенсивности от частоты имели вид:

$$U_1(\omega) = \frac{2\omega^2}{\sqrt{4c^2 - a^2\omega^2}} \cdot k_1^2(\omega)$$

$$U_2(\omega) = \frac{2\omega^3}{\sqrt{\omega_0^2 - \omega^2} \cdot \sqrt{4c^2 - a^2(\omega_0^2 - \omega^2)}} \cdot k_2^2(\omega), \quad (5)$$

где  $k_1(\omega) = \frac{2}{a} \arcsin \frac{a\omega}{2c}$ , а  $k_2(\omega) = \frac{2}{a} \arcsin \frac{a\sqrt{\omega_0^2 - \omega^2}}{2c}$ .

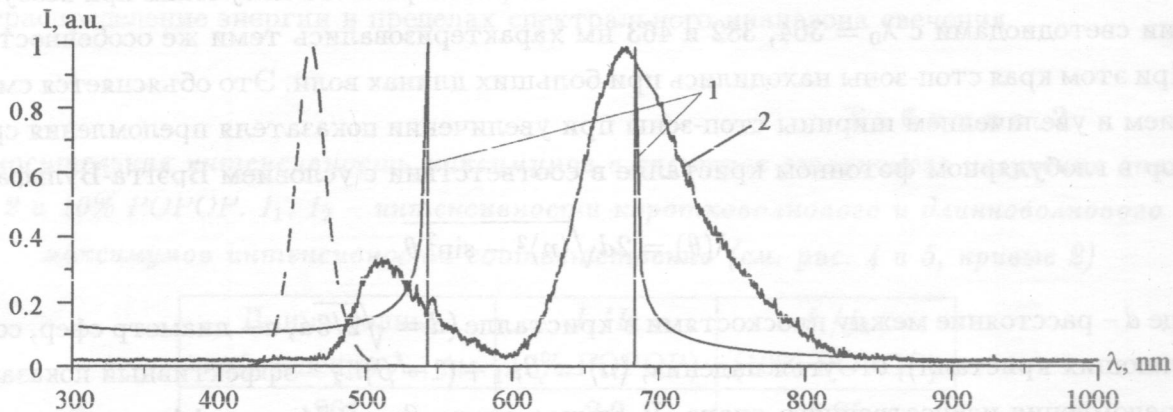


Рис. 6. Расчетный (линия 1) и экспериментальный (линия 2) спектры вторичного излучения искусственного опала, содержащего 10% РОРОР, при возбуждении излучением диода с длиной волны 463 нм. Пунктирной линией показан спектр возбуждающего излучения.

Расчетный спектр для опала, заполненного 10% РОРОР, изображен на рис. 6 вместе со спектром экспериментально полученным при возбуждении излучением светодиода с длиной волны  $\lambda_0 = 463$  нм. Для расчета использовались значения положений краев запрещенной фотонной зоны, полученные в ходе анализа экспериментальных данных:  $\lambda_1 = 539$  и  $\lambda_2 = 678$  нм. Константа  $c$  считалась равной скорости света в вакууме. Значения параметров  $a$  и  $\omega_0$  определялись путем аппроксимации экспериментальных данных формулой (5). Полученные значения:  $a = 216$  нм и  $\omega_0 = 4.5 \cdot 10^{15}$  с<sup>-1</sup>.

Расчетный спектр (рис. 6, линия 1) качественно согласовывался с экспериментально полученным спектром (рис. 6, линия 2). При этом уширение и сдвиг экспериментального спектра возникли за счет комбинационного рассеяния, а также наличия отклика от других кристаллографических плоскостей, близких плоскости (111), и ширины полосы возбуждающего излучения, отличной от нуля.



**Заключение.** Таким образом, введение люминофора РОРОР в глобулярный фотонный кристалл типа опаловой матрицы сопровождается изменениями спектров свечения исходных материалов: при малых концентрациях люминофора происходит частичное подавление люминесценции РОРОР и небольшое смещение положений максимумов интенсивности свечения опала в длинноволновую область, а также перераспределение энергии между фотонными состояниями в пределах диапазона свечения. При увеличении концентрации РОРОР в опале происходит полное подавление фотолюминесценции люминофора и дальнейшее смещение спектра свечения в длинноволновую область спектра. Следует отметить, что форма спектра свечения и положение соответствующих максимумов интенсивности зависят от частоты возбуждающего излучения.

Если длина волны возбуждающего излучения близка к краю фотонной стоп-зоны, то наблюдается вторичное излучение, близкое по форме к полосе возбуждающего излучения, но сдвинутое в стоксову область спектра. Можно полагать, что при этом происходит возбуждение медленных фотонов, так как вблизи края фотонной зоны групповая скорость электромагнитной волны становится предельно малой величиной.

Обнаружено, что при возбуждении опала излучением светодиодов с длинами волн 364, 381 и 463 нм на континуальном спектре вторичного излучения образца, насыщенного люминофором при концентрации 10% , присутствуют резкие пики интенсивности (показаны стрелкой на рис. 5), которые можно отнести к проявлению медленных фотонов, соответствующих краю запрещенной зоны.

Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ N 05-02-16205.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] В. Г. Голубев, В. А. Кособукин, Д. А. Курдюков, и др., *ФТП*, **35**, 710 (2001).
- [2] Г. М. Гаджиев, В. Г. Голубев, В. Г. Голубев и др., *ФТП* **37**, 1449 (2003).
- [3] В. С. Горелик. Оптика глобулярных фотонных кристаллов. Препринт ФИАН, N 32 (Москва, ФИАН, 2006).
- [4] Горелик В. С., Есаков А. А., Фадюшин А. Б. Свечение глобулярных фотонных кристаллов при ультрафиолетовом возбуждении. Препринт ФИАН, N 14 (Москва, ФИАН, 2006).
- [5] K. Sakoda. Optical properties of photonic crystals. (Springer, Berlin 2001).
- [6] Ю. Я. Голубь, В. С. Горелик, Л. И. Злобина, и др., Отражение и пропускание световых волн глобулярными фотонными кристаллами// Тезисы докладов III Всерос-



**Заключение.** Таким образом, введение люминофора РОРОР в глобулярный фотонный кристалл типа опаловой матрицы сопровождается изменениями спектров свечения исходных материалов: при малых концентрациях люминофора происходит частичное подавление люминесценции РОРОР и небольшое смещение положений максимумов интенсивности свечения опала в длинноволновую область, а также перераспределение энергии между фотонными состояниями в пределах диапазона свечения. При увеличении концентрации РОРОР в опале происходит полное подавление фотолюминесценции люминофора и дальнейшее смещение спектра свечения в длинноволновую область спектра. Следует отметить, что форма спектра свечения и положение соответствующих максимумов интенсивности зависят от частоты возбуждающего излучения.

Если длина волны возбуждающего излучения близка к краю фотонной стоп-зоны, то наблюдается вторичное излучение, близкое по форме к полосе возбуждающего излучения, но сдвинутое в стоксову область спектра. Можно полагать, что при этом происходит возбуждение медленных фотонов, так как вблизи края фотонной зоны групповая скорость электромагнитной волны становится предельно малой величиной.

Обнаружено, что при возбуждении опала излучением светодиодов с длинами волн 364, 381 и 463 нм на континуальном спектре вторичного излучения образца, насыщенного люминофором при концентрации 10% , присутствуют резкие пики интенсивности (показаны стрелкой на рис. 5), которые можно отнести к проявлению медленных фотонов, соответствующих краю запрещённой зоны.

Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ N 05-02-16205.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] В. Г. Голубев, В. А. Кособукин, Д. А. Курдюков, и др., ФТП, **35**, 710 (2001).
- [2] Г. М. Гаджиев, В. Г. Голубев, В. Г. Голубев и др., ФТП **37**, 1449 (2003).
- [3] В. С. Горелик. Оптика глобулярных фотонных кристаллов. Препринт ФИАН, N 32 (Москва, ФИАН, 2006).
- [4] Горелик В. С., Есаков А. А., Фадюшин А. Б. Свечение глобулярных фотонных кристаллов при ультрафиолетовом возбуждении. Препринт ФИАН, N 14 (Москва, ФИАН, 2006).
- [5] K. Sakoda. Optical properties of photonic crystals. (Springer, Berlin 2001).
- [6] Ю. Я. Голубь, В. С. Горелик, Л. И. Злобина, и др., Отражение и пропускание световых волн глобулярными фотонными кристаллами// Тезисы докладов III Всерос-

сийской конференции “Необратимые процессы в природе и технике”, 24-26 января 2005 г., 9Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005), стр. 274.

Поступила в редакцию 13 марта 2007 г.