

АНИЗОТРОПИЯ РЕЗОНАНСНЫХ ПЕРЕХОДОВ ВИСМУТОВЫХ АКТИВНЫХ ЦЕНТРОВ В ФОСФОРСИЛИКАТНОМ СТЕКЛЕ В БЛИЖНЕМ ИК

Елопов А.В.¹, Рюмкин К.Е.¹, Афанасьев Ф.В.², Алышев С.В.¹, Харахордин А.В.¹,
Хегай А.В.¹, Фирстова Е.Г.¹, Фирстов С.В.¹, Нищев К.Н.³, Мелькумов М.А.¹

¹ Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Научный центр волоконной оптики им. Е.М.Дианова РАН, г. Москва

² Институт химии высококачественных веществ им. Г.Г.Десятых РАН, г. Нижний Новгород

³ Мордовский государственный университет им. Н.П.Огарёва, г. Саранск

* E-mail: saelopov@yandex.ru DOI 10.24412/2308-6920-2023-6-245-246

Измерена поляризованная люминесценция (ПЛ) висмутовых активных центров (ВАЦ) в фосфоросиликатных стеклах и определена ее степень поляризации при резонансной накачке на длине волны 1240 нм. Был проведен анализ ПЛ ВАЦ, используя модель частично анизотропных осцилляторов. Данная модель позволяет представить наличие ПЛ, как результат передачи возбуждения от частично анизотропного поглощающего осциллятора к излучающему [1]. Целью исследования являлось изучения структуры и поляризационных свойств ВАЦ, ответственных за процесс усиления и генерации в волоконных оптических усилителях и лазерах.

Исследованные образцы представляли из себя цилиндрические оптоволоконные преформы, сделанные методом MCVD. Сердцевина была фосфоросиликатной ($\text{Bi: SiO}_2 - \text{P}_2\text{O}_5$), в то время как оболочка – кварцевой (SiO_2). Внешний диаметр образцов был в диапазоне от 6 до 9 мм, диаметр же легированной области составлял 1 мм. Концентрация ВАЦ оценивалась измерением уровня потерь в волоконных световодах, вытянутых из соответствующих преформ, и находилась в пределах возможности получения лазерной генерации. Полученные значения степеней поляризации не зависели, как от внешнего диаметра образцов, так и от концентрации ВАЦ в пределах исследованного диапазона.

ПЛ измерялась, используя общепринятую L – схему, подробно изложенную в [2]. Возбуждение проводилось линейно поляризованным излучением от лазерного диода на длине волны 1240 нм, поляризация накачки контролировалась поворотом призмы Глана. Поляризационные составляющие люминесценции с вертикальным и горизонтальным состоянием поляризации выделялись посредством пропускания люминесцентного излучения через поляризатор.

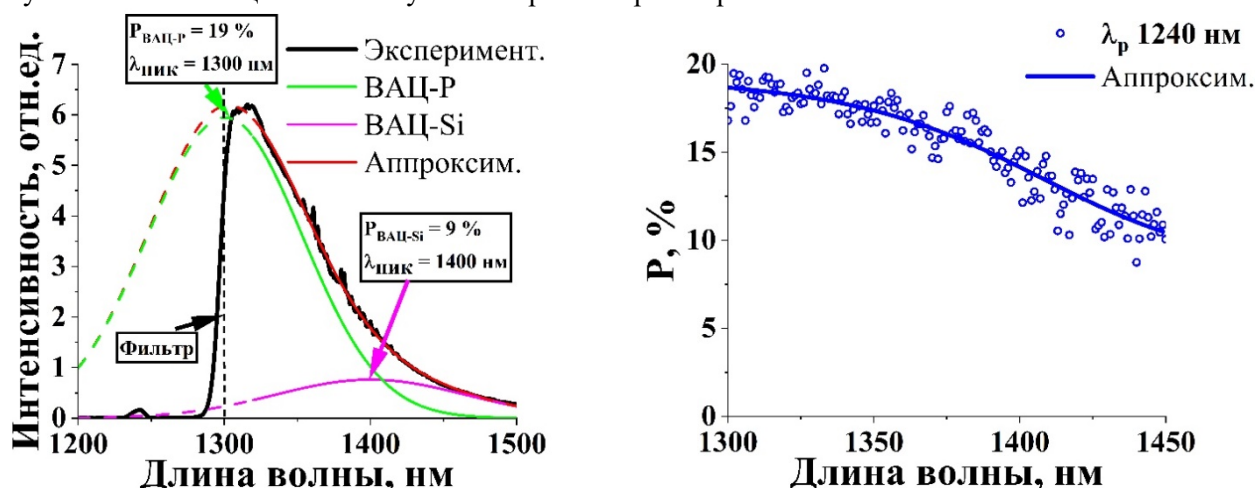


Рис. 1. а) Спектр ПЛ образца при накачке на длине волны 1240 нм. ВАЦ-Р и ВАЦ-Si – функции Гаусса, соответствующие спектральным компонентам обоих типов ВАЦ. Аппроксимация – сумма функций Гаусса. Фильтр – длина волны фильтрации длинноволнового фильтра.
б) Спектр степени поляризации люминесценции

При накачке на длине волны 1240 нм возбуждается два типа ВАЦ: висмутовые активные центры, ассоциируемые с фосфором (ВАЦ-Р) и ассоциированные с кварцем (ВАЦ-Si) [3]. При возбуждении на 1240 нм ВАЦ-Р демонстрирует люминесценцию с пиком на длине волны 1300 нм, при этом пик люминесценции ВАЦ-Si находится на длине волны 1400 нм, Рис. 1 а). ПЛ ВАЦ-Р и ВАЦ-Si имеет разные степени поляризации для указанных выше переходов, в связи с этим степень поляризации люминесценции, возбужденной в фосфоросиликатном стекле, зависит от длины волны, Рис. 1 б).

Было проведено разложение спектра ПЛ на функции Гаусса, соответствующие вкладу спектральных компонент ВАЦ-Р и ВАЦ-Si. Используя уравнение (1) из [1], проведена аппроксимация и получены степени поляризации люминесценции для каждого типа ВАЦ:

$$P(\lambda) = \frac{K_{\text{ВАЦ-Р}}(\lambda)P_{\text{ВАЦ-Р}} + K_{\text{ВАЦ-Si}}(\lambda)P_{\text{ВАЦ-Si}}}{K_{\text{ВАЦ-Р}}(\lambda) + K_{\text{ВАЦ-Si}}(\lambda)} \quad (1)$$

где $K_{\text{ВАЦ-Р}}(\lambda)$ и $K_{\text{ВАЦ-Si}}(\lambda)$ - функции Гаусса спектральных компонент ВАЦ-Р и ВАЦ-Si, $P_{\text{ВАЦ-Р}}$ и $P_{\text{ВАЦ-Si}}$ - степени поляризации люминесценции соответствующих спектральных компонент, $P(\lambda)$ - суммарная степень поляризации люминесценции обоих спектральных компонент.

Полученные степени поляризации люминесценции ВАЦ-Р и ВАЦ-Si при накачке на 1240 нм оказались $P_{\text{ВАЦ-Р}} = 19\%$ и $P_{\text{ВАЦ-Si}} = 9\%$.

В рамках модели частично анизотропного осциллятора, который характеризуется тремя главными осями эллипсоида \mathbf{a}_1 , \mathbf{a}_2 и \mathbf{a}_3 , поглощающий и излучающий осциллятор имеет свой набор главных осей с произвольной взаимной ориентацией. Степень поляризации люминесценции в данном случае выражается [1]:

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

где $\beta^2 = \sum_{i,j} a_i a'_j \beta_{ij}^2$; $i, j = 1, 2, 3$;

\mathbf{a}_i - главные оси поглощающего осциллятора, \mathbf{a}'_j - главные оси излучающего осциллятора, β_{ij} - косинус угла между \mathbf{a}_i и \mathbf{a}'_j .

В случае резонансного перехода поглощающий осциллятор является в то же время и излучающим осциллятором. Таким образом, $\beta_{ij}^2 = 1$ при $i = j$ и $\beta_{ij}^2 = 0$ при $i \neq j$. Из (2) получаем:

$$a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 = \frac{1+3P}{3-P} \quad (3)$$

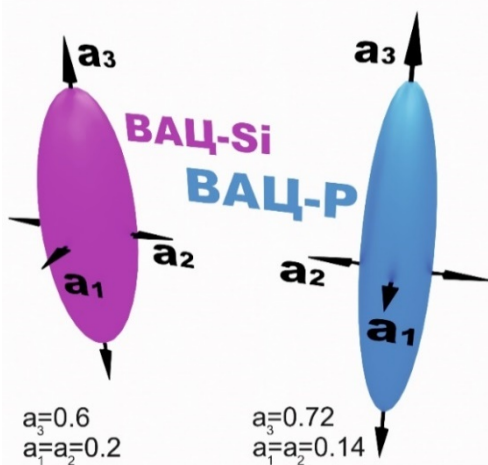


Рис. 2. Эллипсоиды, характеризующий частично анизотропные осцилляторы резонансного перехода в ВАЦ-Р и ВАЦ-Si при накачке на 1240 нм

По определению длины главных осей эллипсоида характеризуют вероятность возбуждения анизотропного осциллятора линейно поляризованным излучением, электрический вектор которого параллелен данной оси. Следовательно, сумма \mathbf{a}_1 , \mathbf{a}_2 и \mathbf{a}_3 равна 1 [4]. Особый интерес представляет отношение большой и малых главных осей эллипсоида, характеризующего анизотропный осциллятор. Таким образом, вводится предположение, что эллипсоид обладает симметрией, выражающейся в равенстве малых осей. Таким образом, получается система из трех уравнений и трех неизвестных, решение которой позволяет получить значения длин главных осей эллипсоида.

Главные оси эллипсоида для резонансного перехода в ВАЦ-Р при накачке на 1240 нм оказались $\mathbf{a}_1 = \mathbf{a}_2 = 0.14$, $\mathbf{a}_3 = 0.72$, а в ВАЦ-Si $\mathbf{a}_1 = \mathbf{a}_2 = 0.2$, $\mathbf{a}_3 = 0.6$. Отношение большой и малой главных осей эллипсоида в ВАЦ-Р существенно выше, чем в ВАЦ-Si и составляет $\frac{a_3}{a_{1,2}} = 5.1$, против $\frac{a_3}{a_{1,2}} = 3.0$, Рис.2.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-00157, <https://rscf.ru/project/22-79-00157/>.

Литература

1. Феофилов П. Поляризованная люминесценция атомов, молекул и кристаллов, Москва, 121-186 (1959)
2. Lakowicz, J. Principles of Fluorescence Spectroscopy, New-York, 353-382 (2006)
3. Bufetov, I.A., et al, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 20, 111-125 (2014)
4. Kawski, A. Crit Rev Anal Chem. 23, 459-529 (1993)