

06.1;06.2;06.3;07

©1993

## ТЕМПЕРАТУРНОЕ ГАШЕНИЕ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ

*Л.М.Капитонова, А.А.Лебедев,  
А.Д.Ременюк, Ю.В.Рудь*

Фотолюминесценция (ФЛ) пористого кремния (ПК) в видимой области спектра была обнаружена в 1990 г. [1]. С тех пор спектры ФЛ ПК были измерены только при нескольких температурах  $T$  [2,3], но сколь-либо подробно зависимость амплитуды ФЛ  $I = f(T)$  исследована не была, хотя такая зависимость представляет не только научный, но и значительный практический интерес в связи с широкой перспективой применения люминесценции ПК в электронике.

Образцы ПК были получены путем анодного травления монокристаллического кремния в HF при плотностях тока 5–80 мА/см<sup>2</sup> в течение 15–40 мин. Исходное сопротивление исходного кремния было 10 Ом · см, ориентация  $\langle 111 \rangle$  и  $\langle 100 \rangle$ . Толщина слоя ПК в разных образцах была 3–15 мкм. ПК светится под действием УФ излучения, причем визуально цвет его свечения бывает — в зависимости от режима травления — от красного до желтого.

Измерения спектров стационарной ФЛ производились при возбуждении перестраиваемым аргоновым лазером ПЛА-120-1 фирмы "Карл Цейсс". Энергия фотонов возбуждающего света могла изменяться от 2.4 до 2.7 эВ. Как показали измерения, изменение энергии возбуждающих фотонов в указанных пределах не влияет на спектры ФЛ. Температурное сканирование производилось в интервале  $T = 77\text{--}330$  К. Измерения спектров ФЛ до и после температурных измерений показали, что они не изменяются в пределах ошибки измерений.

Спектры восьми исследованных образцов были достаточно типичными и имели вид широкой полосы с максимумом при 670–700 нм [1–3]. В процессе температурного сканирования измерялась амплитуда ФЛ в максимуме полосы  $I_M$  и энергетическое положение максимума  $E_M$  при постоянной интенсивности возбуждения. На рис. 1 показаны температурные зависимости  $I_M$  для двух типичных образцов с максимумами ФЛ при комнатной температуре 700 (кривая 1) и 670 нм (кривая 2).

Температурная зависимость  $I_M$  немонотонная с максимумом вблизи 210 К (рис. 1, кривые 1,2). Такая зависимость  $I_M(T)$  указывает на конкуренцию двух каналов перехода из возбужденного состояния в стационарное — излучательного и безызлучательного. Рост  $I_M$  с ростом  $T$  в области  $T > 200$  К может быть связан с уменьшением интенсивности безызлучательной рекомбинации, температурной зависимостью сечений захвата носителей тока или другими причинами. В данной работе исследовано температурное гашение ФЛ в области  $T > 210$  К.

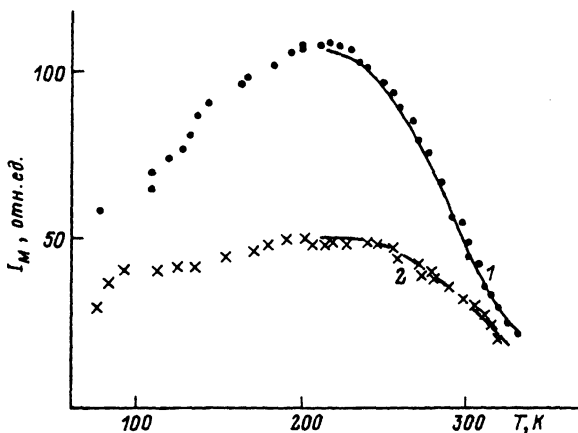


Рис. 1. Температурная зависимость  $I_M$ . Кривая 1 соответствует образцу № 1 с  $\lambda_M = 700$  нм, кривая 2 — с  $\lambda_M = 670$  нм.

Сплошные кривые — расчет при  $E_a = 0.29$  эВ для образца № 1 и  $E_a = 0.27$  эВ для образца № 2, точки — экспериментальные значения  $I_M$ .

Согласно теории, ФЛ в простейшем случае температурное гашение описывается формулой [5,6]:

$$I = \frac{I_0}{1 + A \exp(-E_a/kT)}, \quad (1)$$

где  $I_0$  — амплитуда максимума в области независимости  $I_M = f(T)$ ,  $E_a$  — энергия активационного процесса, которая может иметь различный смысл в зависимости от физического механизма тушения.

Следует заметить, что на природу вещества, образующегося при анодном травлении кремния и проявляющего ФЛ с энергией, существенно превышающей  $E_g$  кремния, нет единой точки зрения. В большинстве исследований, опубликованных по этому вопросу, считается, что излучение происходит из кремния, превратившегося в систему тонких проволочек и имеющего большую, чем монокристалл,  $E_g$  вследствие квантово-размерного уширения  $E_g$ . Одновременно имеются достаточно веские доказательства того, что светящимся веществом является образовавшийся на поверхности подвергнутого анодному окислению кремния силоксен или его производные типа  $\text{Si}_6\text{O}_{3+n}\text{H}_{6-m}$  [6]. Таким образом, в случае внешнего тушения  $E_a$  связано с энергией ионизации центра, создающего канал безызлучательной рекомбинации, а в случае "внутреннего" тушения она определяется пересечением конфигурационных кривых основного и возбужденного состояний центра [5].

Как следует из формулы (1),

$$\lg \left( \frac{I_0}{I} \right) \sim \frac{1}{T}. \quad (2)$$

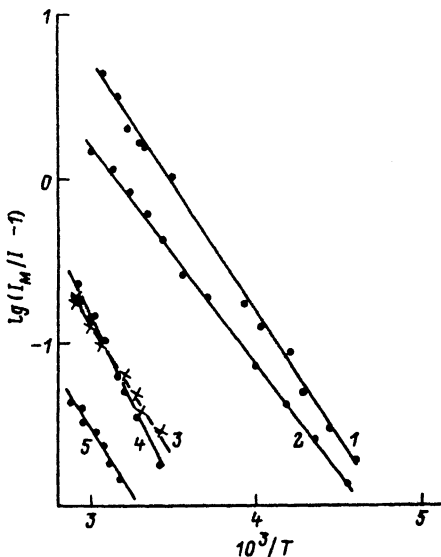


Рис. 2. Зависимость  $\lg \left( \frac{I_0}{I_M} - 1 \right)$  от температуры. Кривая 1 соответствует образцу  $\lambda_M = 700$  нм; кривая 2 — образцу с  $\lambda_M = 670$  нм; кривые 3, 4, 5 — образцам с  $\lambda_M = 700$  нм.

В нашем случае несколько неопределенной является величина  $I_0$ , так как на зависимости  $I_M = f(T)$  практически нет участка,  $I_M$  не зависит от  $T$ . В дальнейших расчетах мы за  $I_0$  принимали величину  $I_M$  в максимуме температурной зависимости. На рис. 2 показаны результаты расчетов температурной зависимости интенсивности ФЛ для двух образцов ПК. Из рисунка видно, что в интервале  $T = 200-300$  К указанная зависимость хорошо выполняется. Из наклона прямых сделана оценка  $E_a$ . Для разных образцов она меняется в пределах  $0.25 - 0.35$  эВ. По определенной таким образом энергии активации  $E_a$  для тех же двух образцов ПК сделан расчет  $I_M = f(T)$  и сопоставлен с экспериментальными данными (рис. 1, сплошная кривая). Хорошее согласие вычисленных значений  $I_M = f(T)$  с экспериментальными показывает, что принятая нами величина  $I_0$  и значение  $E_a$ , определенное из наклона прямой на рис. 2, не слишком сильно отличаются от реальных величин.

Таким образом, в настоящей работе наблюдалось при  $T > 210$  К гашение фотолюминесценции. Уменьшение интенсивности фотолюминесценции с ростом температуры имеет активационный характер и описывается классическими формулами гашения фотолюминесценции. При этом согласие расчетных и экспериментальных данных получается при энергиях активации  $0.25-0.35$  эВ.

## Список литературы

- [1] *Canham L.T.* // Appl. Phys. Lett. 1990. V. 57. N 10. P. 1046-1048.
- [2] *Zheng X.L., Wang W., Chen H.C.* // Appl. Phys. Lett. 1992. V. 60. N 8. P. 986-988.
- [3] *Старухин А.Н., Лебедев А.А., Разбирин Б.С., Капитонова Л.М.* // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. Вып. 16. С. 60-63.
- [4] *Кюри Д.* Люминесценция кристаллов. М.: Ил, 1961. 200 с.
- [5] *Гурвич А.М.* Введение в физическую химию кристаллофоров. М.: Высшая школа, 1977. 336 с.
- [6] *Brandt M.S., Fuchs H.D., Stutzmann M., Weber J., Cardona M.* // Sol. St. Comm. 1992. V. 81. N 4. P. 307-312.

Физико-технический институт  
им. А.Ф.Иоффе РАН,  
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию  
12 мая 1993 г.