

СКРЫТАЯ АНИЗОТРОПИЯ ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫХ ПЕРЕХОДОВ  
В ПОРИСТОМ КРЕМНИИА.Н. Старухин А.Н., А.А. Лебедев,  
Б.С. Разбирин, Л.М. Капитонова

Фотолюминесценция (ФЛ) пористого кремния (ПК) в видимой области спектра была обнаружена недавно [1]. Позднее аналогичную ФЛ наблюдали и другие авторы (см., например, [2, 3]). Физическая природа этого излучения не ясна. В некоторых работах видимое излучение ПК связывают с квантоворазмерными эффектами в кремниевых „столбиках” с поперечными размерами порядка или меньше 100 Å. Другие авторы предполагают, что ФЛ обусловлена свечением соединений, которые образуются при электрохимической обработке кремния.

Исследованные нами слои ПК были получены путем анодного электрохимического травления в HF пластин монокристаллического кремния, вырезанных перпендикулярно оси [111]. Люминесценция возбуждалась импульсным азотным лазером ( $\lambda = 337$  нм), а также аргоновым лазером непрерывного действия ( $\lambda = 488.0, 476.5$  нм). Возбуждающий свет падал нормально к поверхности кристалла, излучение регистрировалось под малым углом к направлению распространения возбуждающего света. Для регистрации спектров применялся спектрометр ДФС-12 с дисперсией 5 Å/мм. Измерения были выполнены при  $T = 290, 90$  и 2 К.

На рис. 1 приведен спектр ФЛ при возбуждении ПК расфокусированным пучком азотного лазера с плотностью излучения в импульсе 10 кВт/см<sup>2</sup>. Спектр люминесценции представляет собой широкую колоколообразную полосу с максимумом около 600 нм ( $T = 90$  К) и 640 нм ( $T = 290$  К). При 90 К образец ярко светился желтым светом, который переходил в малиновый при повышении  $T$  до 290 К. При возбуждении ПК аргоновым лазером с плотностью излучения  $\approx 0.1$  Вт/см<sup>2</sup> образец светился малиновым светом, а максимум излучения располагался около 650 нм (см. штриховую кривую на рис. 2). Изменение цвета связано со смещением максимума излучения, причем это смещение, как следует из вышесказанного, может быть достигнуто либо изменением температуры образца, либо изменением плотности возбуждения при фиксированной температуре. Отметим также, что в исследованном интервале возбуждений 1–10 кВт/см<sup>2</sup> интенсивность ФЛ в максимуме излучения линейно зависела от интенсивности возбуждения.

При возбуждении ПК линейно поляризованным светом аргонового лазера мы обнаружили линейную поляризацию излучения. Эффект поляризации наблюдался в интервале температур от 2 до 290 К и

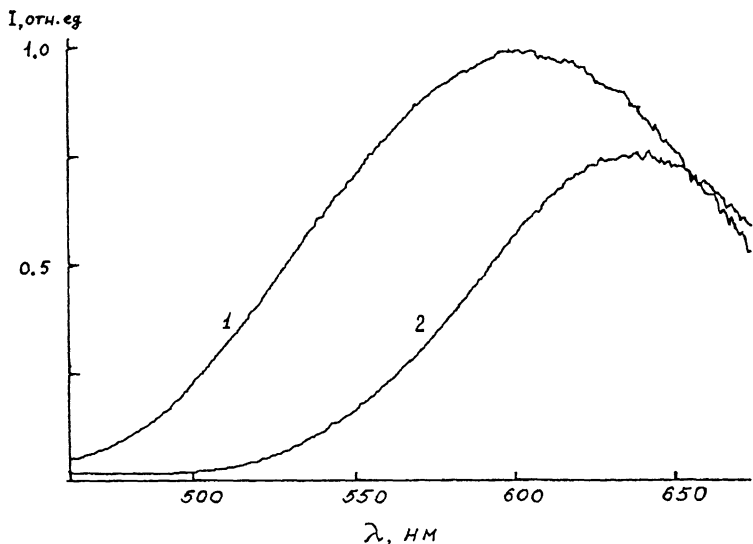


Рис. 1. Спектры ФЛ (1) ПК при возбуждении азотным лазером с  $\lambda = 337.1$  нм при  $T = 90$  К (1) и  $T = 290$  К (2).

убывал с ростом  $T$ . Введем степень линейной поляризации ФЛ, определив ее как

$$A = \frac{I_{\parallel} - I_{\perp}}{I_{\parallel} + I_{\perp}},$$

где  $I_{\parallel}$  и  $I_{\perp}$  — интенсивности компонент излучения, поляризованных параллельно и перпендикулярно плоскости поляризации возбуждающего света. Как видно из рис. 2, максимальное значение  $P$  достигается вблизи возбуждающей линии и плавно спадает до  $P \approx 0$  по мере удаления от нее на 100–150 нм. Помимо основного максимума на зависимости  $P(h\nu)$  наблюдается второй максимум, который отчетливо проявляется при понижении  $T$  (рис. 2, кривая 2).

Максимальные наблюдавшиеся значения степени поляризации  $P$  составляли 0.4; 0.25 и 0.2 при  $T = 4.2$ ; 90 и 290 К, соответственно. Согласно нашим предварительным экспериментам, степень поляризации  $P(h\nu)$  не зависит от ориентации вектора  $E$  возбуждающего света в плоскости  $[111]$  исследованных образцов.

При возбуждении линейно поляризованным светом с  $\lambda = 337.1$  нм степень поляризации ФЛ была близка к нулю —  $P(h\nu) = 0.05 \pm 0.05$ . Возбуждение ПК циркулярно поляризованным светом аргонового лазера не приводило к возникновению циркулярной поляризации излучения в пределах погрешности измерения ( $\pm 5\%$ ).

Сохранение линейной поляризации возбуждающего света в излучении полупроводников известно для экситонных переходов в прямозонных полупроводниках в условиях непосредственного возбуждения светом экситонных состояний и объясняется оптическим выстра-

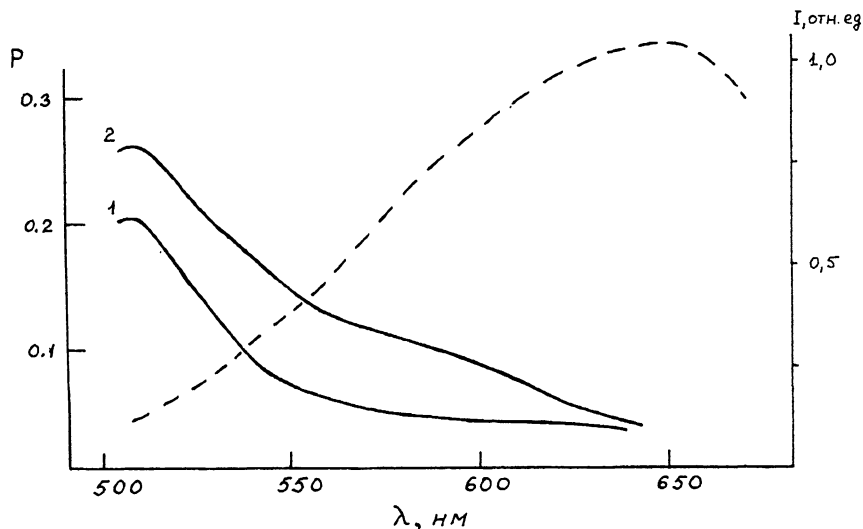


Рис. 2. Зависимость степени линейной поляризации  $P$  ФЛ ПК при возбуждении излучением аргонового лазера с  $\lambda=476.5$  нм при  $T=290$  К (1) и  $T=90$  К (2). Штриховая кривая – спектр ФЛ ( $I$ ) ПК при том же возбуждении и  $T=90$  К.

иванием полных спинов экситонов линейно поляризованным светом. В этих условиях при возбуждении циркулярно поляризованным светом происходит оптическая ориентация экситонов, что проявляется в сохранении в излучении экситонов циркулярной поляризации возбуждающего света. Поскольку обычно времена распада выстраивания и ориентации экситонов сравнимы по величине, наличие выстраивания экситонов предполагает и возможность их ориентации. Можно предположить, что сохранение в ФЛ ПК при ее резонансном возбуждении линейной поляризации возбуждающего света также связано с оптическим выстраиванием примесных молекул или экситонных состояний в квантоворазмерных структурах ПК. Однако отсутствие в аналогичных условиях при возбуждении циркулярно поляризованным светом оптической ориентации излучательных состояний показывает, что анизотропия в распределении дипольных моментов этих состояний при линейно поляризованной накачке, по-видимому, имеет иную природу. Результаты действия линейно поляризованного возбуждения на поляризацию ФЛ ПК означает, что оптические переходы в исследуемых материалах обладают скрытой анизотропией. В этой модели излучательным переходом формирующим полосу ФЛ в ПК, можно сопоставить систему хаотически ориентированных осциллирующих диполей.

При возбуждении линейно поляризованным светом преимущественно возбуждаются диполи с дипольным моментом, ориентированным вдоль вектора  $E$  возбуждающего света. Если переходы из возбужденного в более низколежащее состояние происходит преиму-

шественно в состоянии с той же ориентацией дипольного момента (без изменения его ориентации) излучение будет линейно поляризованным в плоскости возбуждения. Поскольку релаксация возможна в состоянии не строго с тем же дипольным моментом, происходит потеря поляризации. Эти потери должны увеличиваться по мере релаксации возбуждения по энергии. Поэтому легко понять отсутствие поляризации ФЛ ПК при высокоэнергетическом возбуждении азотным лазером. При циркулярно поляризованной накачке возбуждаются диполи, ориентированные по всем направлениям. Отсутствие циркулярной поляризации излучения указывает на то, что фазовая релаксация колебаний диполей происходит независимо.

Понижение температуры, как показывает эксперимент, приводит к уменьшению влияния деполаризующих факторов в процессе релаксации возбуждений, что может быть связано с вымораживанием колебательных состояний, взаимодействие с которыми приводит к дезориентации диполей.

Таким образом, применение метода поляризованной люминесценции открывает новые возможности в изучении природы излучения ПК.

Авторы благодарят Д.К. Нельсона за измерение зависимости интенсивности ФЛ от интенсивности возбуждения и Е.Л. Ивченко за полезное обсуждение результатов.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] S a n h a m L.T. // Appl. Phys. Lett. 1990. V. 57. N 10. P. 1046-1048.
- [2] K o y a m a H., A r a k i M., Y a m a m o t o Y., K o s h i d a N. // Jap. J. Appl. Phys. 1991. V. 30. N. 12B. P. 3606-3509.
- [3] I t o T., O h t a T., H i r a k i A. // Jap. J. Appl. Phys. 1992. V. 31. Part. V. 2. N 1A3B7 P. L1-L3.

Поступило в Редакцию  
4 августа 1992 г.