

06.2;07

©1994

## ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ГИСТЕРЕЗИС ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ

*В.Г.Гайворон, Ю.Ф.Огрин,  
Т.П.Колмыкова, В.И.Сидоров*

Обнаруженная в 1990 г. высокотемпературная (300 К) фотолюминесценция (ФЛ) пористого кремния ПК [1] является в настоящее время предметом особого внимания исследователей. В большинстве работ, посвященных этим исследованиям [2-4], авторы приходят к мнению, что наблюдаемая фотолюминесценция вызвана квантовыми эффектами, имеющими место на поверхности этого материала. В результате анодного травления пластины кремния ее поверхность представляет собой плотную систему перпендикулярных тонких игл (проволочек) диаметром менее 100 Å. Такая поверхность названа пористой [1]. В работе [5] показано, что при диаметре проволочек 30 Å и менее возможно увеличение непрямой зоны в кремнии за счет квантового размерного эффекта [6].

Есть и альтернативное объяснение наблюдаемого эффекта. Так, в [2] и в ряде других публикаций ФЛ объясняется образованием на поверхности кремния (при травлении) люминесцентного силосена и его производных.

В данной работе экспериментально исследовалась ФЛ в ПК, находящегося при температурах выше комнатной. Методика получения образцов описана в [3]. ФЛ возбуждалась импульсным азотным лазером ( $\lambda = 0.337$  мкм).

Как и в [7], измеренный нами спектр ФЛ в ПК имеет вид широкой полосы с максимумом интенсивности  $J_m$  в области энергий фотонов  $E_0 \approx 1.96$  эВ (при  $T = 300$  К) и  $E_1 \approx 2.02$  эВ (при  $T = 90$  К).

При нагревании образцов наблюдалось смещение максимума в спектре в сторону меньших энергий фотонов. На рис. 1 представлены спектры ФЛ при температурах 300 и 400 К. На этом же рисунке приведен спектр ФЛ при 300 К, но после предварительного его нагрева образца до 400 К. Видно, что максимум спектра смещен в сторону меньших энергий фотонов по сравнению с кривой 1. Это позволяет предположить, что при нагреве образцов происходят процессы их температурной формовки. При этом сама величина

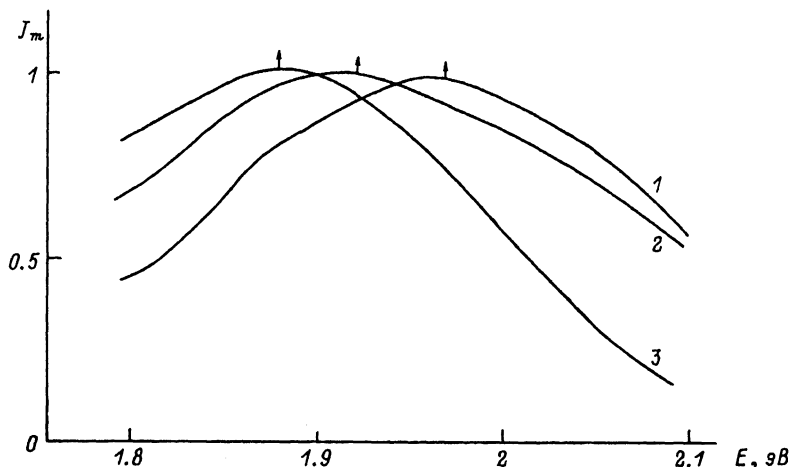


Рис. 1. Спектр фотолюминесценции пористого кремния: 1 —  $T = 300$ , 2 — 300 (после предварительного нагрева до 400), 3 — 400 К.

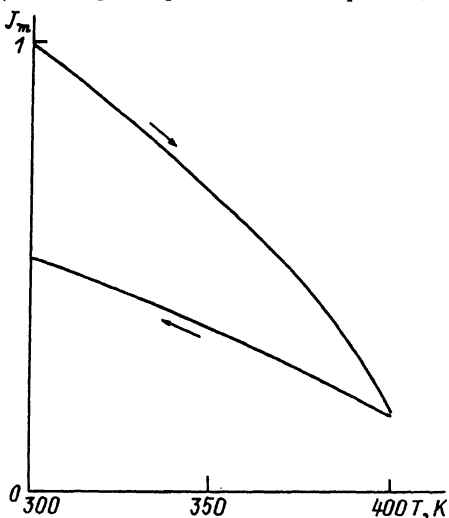


Рис. 2. Зависимость  $J_m$  от  $T$  для образца № 48 пористого кремния, не подвергнувшегося предварительному нагреванию.

$J_m$  также меняется (на рис. 1 интенсивность ФЛ приведена в относительных единицах).

Для более детального изучения процесса температурной формовки была снята зависимость  $J_m$  от  $T$  при нагревании и охлаждении, где  $J_m$  — интенсивность ФЛ при энергии фотона  $E_0$ .

На рис. 2 приведены зависимости  $J_m$  от  $T$  для двух циклов нагрева-охлаждения образца, который первоначально температурной формовке не подвергался. Представ-

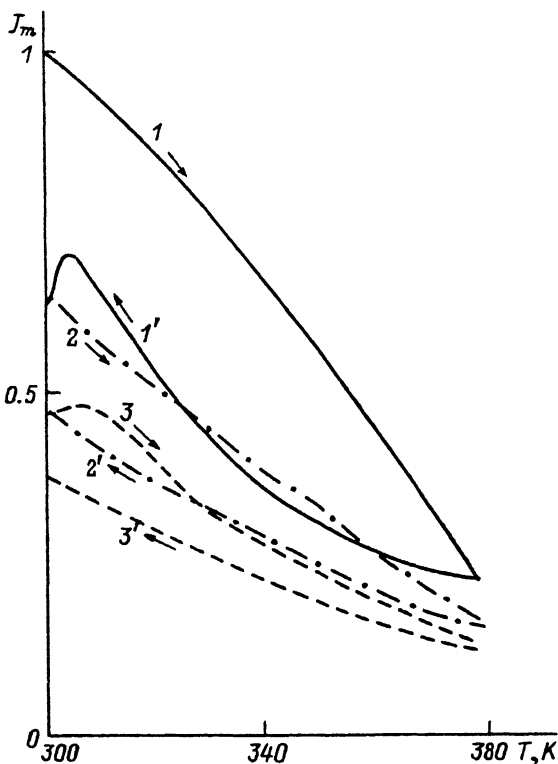


Рис. 3. Зависимость  $J_m$  от  $T$  для образца № 48 через 24 ч после первоначальных температурных измерений.

ленные результаты свидетельствуют о наличии в кривых  $J_m(T)$  значительного температурного гистерезиса, который во втором цикле нагревание-охлаждение существенно меньше.

Опыты показали, что после 5-6 циклов гистерезис становится малым, а сама величина  $J_m$  уменьшается.

Важным в наблюдаемом эффекте гистерезиса является вопрос: восстанавливается ли он и через какое время? Кроме того, важно знать, как изменяется во времени интенсивность ФЛ.

Результаты исследований показали, что гистерезис восстанавливается почти полностью. На рис. 3 представлены гистерезисные кривые  $J_m(T)$  для того же образца (рис. 2) через сутки. Видно, что в основном кривые такие же, как и накануне. Отметим, что небольшой гистерезис в начале каждого цикла (в начале очередного нагрева), возможно, связан с разной скоростью охлаждения исследуемой части образца и термопары с холодопроводом. Что касается из-

менения интенсивности ФЛ образцов ПК от времени, после нагревания, то установлено почти полное ее восстановление за время, не превышающее 2–3 ч. Более точное время восстановления люминесценции, а также кинетика этого процесса в настоящее время выясняются. Следует подчеркнуть, что ФЛ исследуемых образцов почти полностью исчезла при их нагреве до температуры порядка 150° С. Этот факт может быть важным в дальнейшей работе по выяснению механизма свечения.

Наблюдаемое смещение максимума ФЛ в ПК при изменении температуры, по-видимому, можно связать с известным фактом уменьшения ширины запрещенной зоны кремния при нагревании. Что касается эффектов гистерезиса, то в настоящее время трудно однозначно сказать, связаны ли эти эффекты с обратимыми химическими процессами на поверхности кремния или же с какими-то долго живущими электронными состояниями.

В заключение авторы приносят благодарность Л.Ю. Захарову и Н.С. Платонову за техническую помощь при проведении экспериментов.

#### Список литературы

- [1] *Sanham L.T.* // Appl. Phys. Lett. 1990. V. 57. N 10. P. 1046–1048.
- [2] *Капитонова Л.М., Лебедев А.А., Ременюк А.Д., Рудь Ю.В.* // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. В. 13. С. 31–34.
- [3] *Колмыкова Т.П., Бару В.Г., Малахов Б.А., Ормонт А.Б., Терешин С.А.* // Письма в ЖЭТФ. 1993. Т. 57. В. 7. С. 398–401.
- [4] *Prokes S.M.* / J. Appl. Phys. 1993. V. 73. N 1. P. 407–410.
- [5] *Копаев Ю.В., Молохов С.Н., Назин С.С.* // Письма в ЖЭТФ. 1992. Т. 65. В. 12. С. 696–700.
- [6] *Огрин Ю.Ф., Луцкий В.Н., Елинсон М.И.* // Письма в ЖЭТФ. 1966. Т. 3. В. 3. С. 114–118.
- [7] *Старухин А.Н., Лебедев А.А., Разбиригин Б.С., Капитонова Л.М.* // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. В. 16. С. 60–63.

Институт радиотехники  
и электроники  
Фрязинская часть

Поступило в Редакцию  
20 декабря 1993 г.