

Влияние γ -облучения на кинетику фотолюминесценции пористого кремния

© В.Ф. Агеян*, В.В. Емцев, А.А. Лебедев, Д.С. Полоскин, А.Д. Ременюк[†], Ю.А. Степанов*

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

* Институт физики, Санкт-Петербургский государственный университет,
199034 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 11 июня 1999 г. Принята к печати 15 июня 1999 г.)

Исследовано влияние γ -облучения на релаксацию фотолюминесценции пористого кремния в микро-секундном диапазоне. Увеличение интенсивности фотолюминесценции при облучении сопровождается уменьшением времени затухания, что свидетельствует о снижении высоты барьеров при туннелировании пространственно разделенных носителей. Облучение приводит к более резкой дисперсии времени затухания.

Введение

Интерес к пористому кремнию (ПК), а вслед за ним и к другим пористым полупроводникам, был инициирован открытием видимой люминесценции ПК [1] и возникшей таким образом перспективой создания излучающих устройств для кремниевой оптоэлектроники. Однако из-за крайне высокого удельного сопротивления ПК и нестабильности его свойств путь к изготовлению светоизлучающих элементов на основе ПК оказался более долгим и трудным, чем предполагалось вначале. В процессе исследований ПК обнаружилось, что он представляет интерес для других приборных применений [2–6]. По этой причине становится актуальной проблема радиационной стойкости ПК и зависимости его оптических свойств от облучения. В предыдущих работах мы исследовали влияние γ - и α -облучения на люминесцентные свойства ПК [7–9]. В настоящей работе исследовано влияние γ -облучения на кинетику фотолюминесценции (ФЛ) ПК.

Образцы и методика эксперимента

Образцы ПК были получены электрохимическим травлением полированных пластин p -кремния с ориентацией {100} и удельным сопротивлением $2 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ при ультрафиолетовой подсветке в режиме, обеспечивающем высокую яркость фотолюминесценции. Электролитом служила плавиковая кислота с добавлением водного раствора NaNO_2 . Исследуемые образцы ПК оставались на кремниевой подложке.

Источником γ -излучения являлся изотоп ^{60}Co с интенсивностью $10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Облучение образцов производилось при комнатной температуре до дозы $\Phi \approx 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$, при которой достигалось увеличение интенсивности ФЛ приблизительно в 2 раза [7]. Измерение кинетики ФЛ проводилось на парах образцов — близнецов, один из которых был подвергнут γ -облучению, а другой просто хранился на воздухе и к моменту исследования облученного образца сохранял

неизменной интенсивность ФЛ и характеристики ее затухания.

ФЛ возбуждалась импульсами излучения лазера на молекулярном азоте (длина волны $\lambda = 337.1 \text{ нм}$) длительностью 5 нс с частотой следования 100 Гц . Пиковая интенсивность возбуждения на поверхности была порядка 10 кВт/см^2 , средняя мощность лазерного излучения на поверхности не более нескольких мВт/см^2 . Для регистрации спектров использовался спектрометр ДФС-12, спектры регистрировались либо в режиме постоянного тока, либо с временным разрешением с помощью стробоскопического интегратора Voxcar-162 в интервале $10^{-9} \div 10^{-3} \text{ с}$.

Результаты измерений и их анализ

Как известно, спад ФЛ пористого кремния после выключения возбуждения имеет три характерных участка: наносекундный, обусловленный рекомбинацией свободных фотоносителей вблизи места их рождения; промежуточный, связанный с релаксацией носителей по энергии; микросекундный, обусловленный туннельной рекомбинацией разделенных в пространстве носителей [10–15]. Наши исследования относятся к кинетике ФЛ в микро-секундном диапазоне спада ФЛ.

Характерные зависимости интенсивности ФЛ (I_{FL}) от времени задержки относительно максимума лазерного импульса (t) при 77 К для облученного и необлученного образцов показаны на рис. 1. Как видно из рис. 1, кинетика затухания ФЛ для облученного образца является более быстрой.

На рис. 2 экспериментальные данные по затуханию ФЛ для облученного образца приведены в сравнении с результатами расчета с использованием расширенной экспоненциальной функции, которая обычно хорошо описывает кинетику ФЛ с учетом миграции возбужденных носителей в разупорядоченных и неоднородных средах [11–15],

$$I_{\text{FL}} \sim f(x) = (t/\tau)^{1-\beta} \exp[-(t/\tau)^\beta], \quad (1)$$

где $x = t/\tau$, τ — характерное время затухания ФЛ, β — параметр, изменяющийся в пределах от 1 до 0.

[†] Факс: (812) 2479123,
E-mail: arem@pop.ioffe.rssi.ru

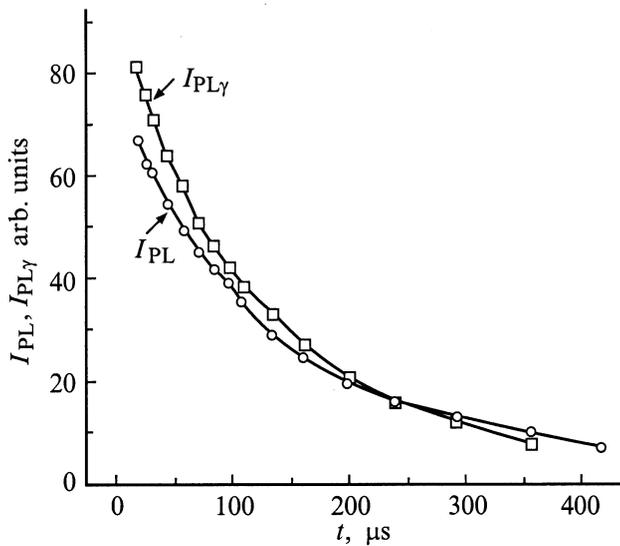


Рис. 1. Зависимость интенсивности фотолюминесценции в максимуме полосы при $\lambda = 720$ нм от времени t для облученного ($I_{PL\gamma}$) и необлученного (I_{PL}) образцов. $\Phi = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$, $T = 77$ К.

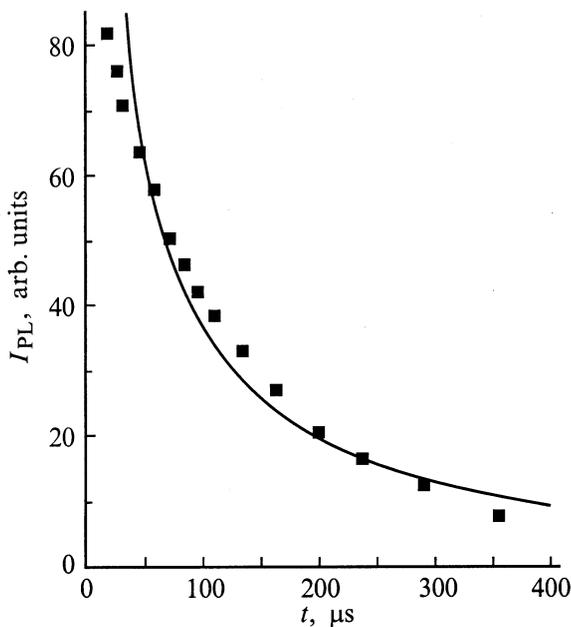


Рис. 2. Сопоставление экспериментальной и расчетной зависимостей затухания фотолюминесценции для γ -облученного образца в максимуме полосы ФЛ. $T = 77$ К. $\beta = 0.45$; $\tau = 128$ мкс.

Как видно из рис. 2, кинетика ФЛ достаточно хорошо описывается функцией (1). Для наших образцов β по контуру полосы ФЛ находится в пределах $0.5 \div 0.8$ и на длинноволновом хвосте полосы ФЛ зависимость интенсивности ФЛ от времени приближается к экспоненциальной. Величина τ определялась по точкам, в которых $d[\ln f(x)]/dx = -1$, где $x = 1$ и $\tau = t$. Полученные

таким образом величины τ составляли 150 ± 50 мкс для γ -облученных образцов и 250 ± 50 мкс для необлученных. Следовательно, облучение уменьшает время затухания ФЛ по всему спектру.

Механизм туннельной рекомбинации разделенных в пространстве носителей подтверждается и результатами температурных измерений времени затухания $\tau(T)$, которые проводились для максимума полосы. Зависимость

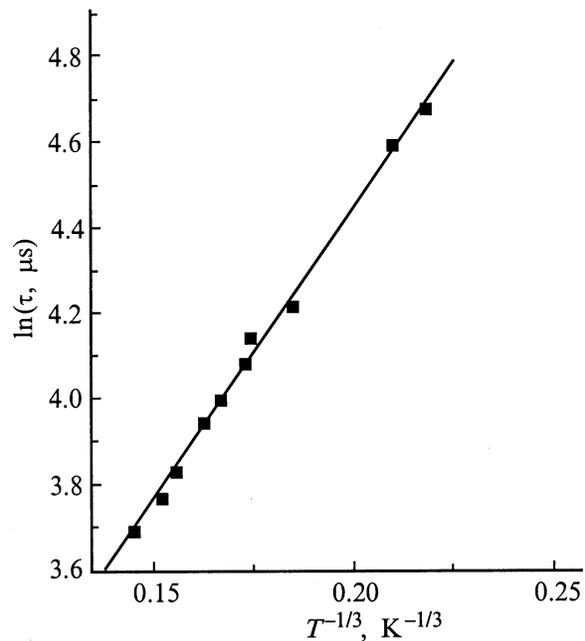


Рис. 3. Температурная зависимость характерного времени затухания фотолюминесценции τ на длине волны $\lambda = 0.716$ мкм для необлученного образца ПК.

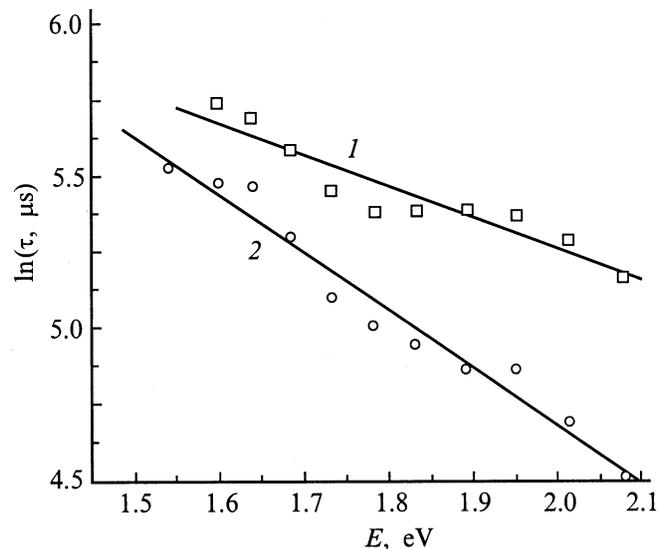


Рис. 4. Зависимость времени затухания интенсивности фотолюминесценции от энергии фотонов. 1 — необлученный образец, 2 — облученный образец ($\Phi = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$). Точки — эксперимент, прямые — расчет по методу наименьших квадратов. $T = 300$ К.

$\tau(T)$ определялась в интервале температур $77 \div 400$ К (рис. 3). Точки хорошо удовлетворяют зависимости $\tau^{-1} \sim \exp(-T_0/T)^{1/3}$, характерной для рекомбинации с туннелированием через барьеры разной высоты, разделяющие области генерации и области рекомбинации носителей заряда (частично неупорядоченная среда) [12,15].

Изменение τ по контуру полосы ФЛ для облученного и необлученного образцов показано на рис. 4. Поскольку экспериментальная зависимость в логарифмическом масштабе близка к линейной, можно сделать вывод об экспоненциальной зависимости вероятности излучательной рекомбинации от энергии E : $W \sim 1/\tau \sim \exp(E/E_0)$, где $E_0 = \Delta E/\Delta(\ln \tau)$. Это также свидетельствует в пользу того, что ФЛ обусловлена рекомбинацией пространственно разделенных носителей заряда, туннелирующих через барьеры, разделяющие области генерации носителей при оптическом возбуждении. Средняя высота барьеров E_0 , полученная из экспериментальных зависимостей типа показанной на рис. 3, составляет $\sim 0.3 \div 0.4$ эВ и хорошо согласуется с величинами, полученными другими авторами [12,14,15]. Для облученных образцов E_0 приблизительно в 2 раза меньше, чем для необлученных. Это означает, что в результате γ -облучения ПК высота барьера при туннелировании носителей понижается и вероятность излучательной рекомбинации возрастает. Менее существенное возрастание интенсивности ФЛ при облучении говорит, очевидно, о том, что при облучении возрастает также вероятность безызлучательной рекомбинации.

Заключение

Исследована релаксация фотолюминесценции γ -облученного и необлученного пористого кремния в микросекундном диапазоне. Затухание фотолюминесценции является неэкспоненциальным и описывается расширенной экспоненциальной функцией как для γ -облученных, так и для необлученных образцов. Время затухания фотолюминесценции, определяемое на основе указанной выше процедуры, лежит в области $100 \div 300$ мкс. Время затухания зависит от энергии кванта света. Анализ измеренных зависимостей свидетельствует, по-видимому, о важной роли туннельных процессов в излучательной рекомбинации носителей заряда в пористом кремнии. Увеличение интенсивности фотолюминесценции при облучении сопровождается уменьшением времени затухания для облученных образцов, что свидетельствует о снижении высоты барьера при туннелировании пространственно разделенных носителей. Облучение приводит к более резкой дисперсии времени затухания.

Авторы благодарят Е.В. Астрову за предоставление образцов для исследования и за полезные дискуссии.

Работа выполнена при поддержке программ "Физика твердотельных наноструктур" (проекты № 97-1039 и № 99-1107) и "Перспективные направления микро- и нанoeлектроники".

Список литературы

- [1] L.T. Canham. Appl. Phys. Lett., **57**, 1046 (1990).
- [2] G. Maiello, S.L. Monica, A. Ferrari, G. Masini, V.P. Bondarenko, A.M. Dorofeev, N.M. Kzuchits. Thin Sol. Films, **297**, 296 (1997).
- [3] L. Charrier, T.L. Gorju, L. Haji, M. Guendouz. In: *Porous Semiconductors. Science and Technology* (Int. Conf., Majorca, 1998) abstr., P1-05.
- [4] M.J. Berger, R. Arens-Fischer, M. Thonissen, M. Kruger, S. Billat, H. Luth, S. Hibrich, W. Theiß, P. Grosse. Thin. Sol. Films, **297**, 237 (1997).
- [5] S. Frohnhoff, M.G. Berger. Ad. Mater., **6**, 963 (1994).
- [6] L. Schirone, G. Sotigiu, F.P. Califano. Thin. Sol. Films, **297**, 296 (1997).
- [7] Е.В. Астрова, Р.Ф. Витман, В.В. Емцев, А.А. Лебедев, Д.С. Полоскин, А.Д. Ременюк, Ю.В. Рудь. ФТП, **30**, 507 (1996).
- [8] E.V. Astrova, V.V. Emtsev, A.A. Lebedev, D.S. Poloskin, A.D. Remenyuk, Yu.V. Rud', R.F. Vitman. MRS Fall Meeting Proc., **405**, 185 (1996).
- [9] А.М. Иванов, А.А. Лебедев, А.Д. Ременюк, Ю.В. Рудь. ФТП, **30**, 188 (1996).
- [10] М.С. Бреслер, И.Н. Ясневич. ФТП, **27**, 871 (1993).
- [11] Y. Kanemitsu, S. Okamoto, M. Otake, S. Oda. Phys. Rev. B, **55**, R7375 (1997).
- [12] Y. Kanemitsu. Phys. Rev. B, **48**, 12357 (1993).
- [13] Л.Л. Федоренко, А.Д. Сердарлы, Э.Б. Каганович, С.В. Свечников, С.П. Диккий, С.В. Баранец. ФТП, **31**, 6 (1997).
- [14] Y.H. Xie, W.L. Wilson, F.M. Ross, J.A. Mucha, E.A. Fitzgerald, J.M. Macaulay, T.D. Harris. J. Appl. Phys., **71**, 2403 (1992).
- [15] L. Pavesi. J. Appl. Phys., **80**, 216 (1996).

Редактор Л.В. Шаронова

Effect of γ -irradiation on photoluminescence kinetics in porous silicon

V.F. Agekyan*, V.V. Emtsev, A.A. Lebedev, D.S. Poloskin, A.D. Remenyuk, Yu.A. Stepanov*

A.F. Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St.Petersburg, Russia
* Physics Institute,
St.Petersburg State University,
199034 St.Petersburg, Russia

Abstract Effect of γ -irradiation upon the photoluminescence decay dynamics in porous silicon has been studied. The photoluminescence intensity growth as well as decay time decrease in irradiated porous silicon have been explained by lowering barriers for recombination of spatially separated electrons and holes via tunneling. The γ -irradiation of porous silicon leads to a sharper dispersion of the decay time.