

Механизм излучательной рекомбинации в твердых растворах Si–Ge в области межзонных переходов

© А.М. Емельянов[¶], Н.А. Соболев^{¶¶}, Т.М. Мельникова*, Н.В. Абросимов⁺

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

* НПО „Орион“,

111123 Москва, Россия

⁺ Institute for Crystal Growth,

D-12489 Berlin, Germany

(Получена 10 февраля 2005 г. Принята к печати 1 марта 2005 г.)

При $T = 82$ и 300 К в области межзонных переходов исследована электролюминесценция в Si–Ge-диодах при концентрации Ge в твердом растворе 5.2%. Анализ спектров излучения, линейный характер зависимостей интенсивности электролюминесценции от тока, ее экспоненциальный спад указывают на экситонный механизм излучательной рекомбинации для излучательных переходов как с участием, так и без участия фононов.

Исследования светоизлучающих структур на основе монокристаллов твердых растворов Si–Ge вызывают большой интерес в связи с возможностью, путем варьирования концентраций компонентов раствора, в широких пределах изменять длину волны (λ) излучения в ближней инфракрасной области спектра. К настоящему времени достигнуты достаточно высокие величины внутренней эффективности электролюминесценции (η) таких структур. Согласно [1], максимальная для светодиодов на основе Si и Ge (включая низкоразмерные структуры), излучающих на характерной для оптических коммуникаций $\lambda \approx 1.3$ мкм, величина $\eta = 0.1\%$ при комнатной температуре была получена именно в светодиодах на основе монокристаллического Si–Ge, что не является пределом. Технология Si–Ge-светодиодов может быть встроена в процесс производства интегральных микросхем на основе монокристаллического кремния. Слабопоглощающие волноводы для таких оптоэлектронных устройств могут быть изготовлены из кремния. Причем вследствие близости величин показателей преломления для Si и Si–Ge потери при выводе излучения из светодиода в волновод могут быть сведены к минимуму. Понимание механизма излучательной рекомбинации в твердых растворах Si–Ge является основой достижения оптимальных характеристик светоизлучающих структур на основе Si–Ge и их успешного применения.

Недавние исследования механизма не прямой (с участием фононов) излучательной рекомбинации в монокристаллическом Si в области межзонных переходов [2] значительно изменили существовавшие ранее представления. Они показали, что полученные к настоящему времени экспериментальные результаты могут быть объяснены в рамках представлений об экситонном механизме излучательной рекомбинации в Si не только при низких температурах, но и при достаточно высоких, включая комнатную. Существенное отличие спектров

излучения твердых растворов Si–Ge от спектров Si состоит в том, что наряду с излучением, обусловленным непрямыми переходами с участием фононов (РА), в спектрах Si–Ge обычно присутствует и соизмеримое излучение, обусловленное переходами без участия фононов (NP) [1,3–6]. Цель данной работы заключается в исследовании влияния этого обстоятельства на характеристики рекомбинационного излучения в области межзонных переходов в монокристаллическом Si–Ge и определении механизма излучательной рекомбинации в Si–Ge, на основе которого эти характеристики могут быть объяснены.

Исследованные диоды были изготовлены на легированной бором полированной монокристаллической пластине Si–Ge толщиной ~ 350 мкм, ориентации (122), с удельным сопротивлением 2.5 Ом·см. Концентрация Ge составляла 5.2%. Были сформированы p – n -переходы по планарной технологии методом диффузии фосфора через отверстия диаметром 0.8 мм в пленке SiO₂. Концентрация фосфора в n^+ -слое составляла $\sim 4 \cdot 10^{20}$ см⁻³. Обратная сторона пластины была легирована диффузионно бором до концентрации $\sim 10^{19}$ см⁻³. Омические контакты были сформированы термическим напылением Au и Cr на лицевой и обратной стороне пластины. Измерение спектров проводилось с лицевой стороны. Определенное по методике [7] время жизни неосновных носителей при токах 0.3–1 А составило ~ 11 нс.

Для возбуждения электролюминесценции (ЭЛ) к диодам прикладывалось импульсное напряжение с частотой 32 Гц при длительности импульсов 0.1–2 мс. Спектры ЭЛ регистрировались с использованием монохроматора (разрешение 7 нм), InGaAs-фотоприемника и селективного нановольтметра. Представленные спектры были скорректированы с учетом как спектральной характеристики фотоприемника, так и всего оптического тракта.

Измеренные при 82 и 300 К и токе 80 мА спектры ЭЛ диода приведены на рис. 1 и 2 соответственно.

[¶] E-mail: Emelyanov@mail.ioffe.ru

^{¶¶} E-mail: nick@sobolev.ioffe.rssi.ru

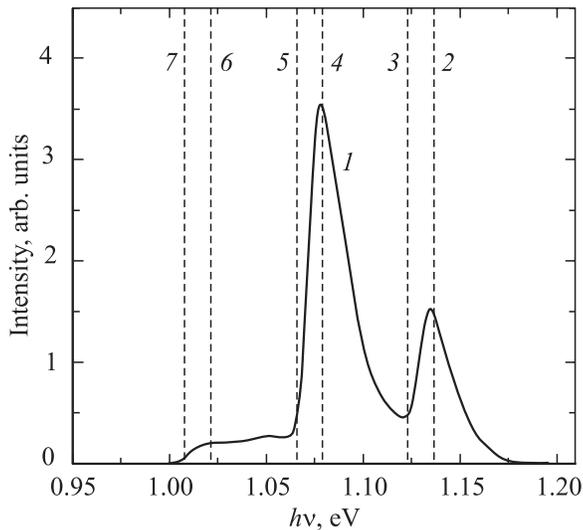


Рис. 1. Зависимость интенсивности электролюминесценции от энергии квантов ($h\nu$) при токе 80 мА и температуре 82 К (1). Штриховыми вертикальными линиями отмечены энергии квантов, соответствующие: 2 — ширине запрещенной зоны твердого раствора Si-Ge при $T \approx 82$ К ($E_g(82\text{ K}) \approx 1.137$ эВ [8,9]), 3 — $E_g(82\text{ K}) - E_{ex}$, 4 — $E_g(82\text{ K}) - E_{ph1}$, 5 — $E_g(82\text{ K}) - E_{ph1} - E_{ex}$, 6 — $E_g(82\text{ K}) - 2E_{ph1}$, 7 — $E_g(82\text{ K}) - 2E_{ph1} - E_{ex}$.

Как и в спектрах ранее исследованных Si-Ge-светодиодов [1,3–6], в представленных спектрах присутствуют пики ЭЛ, относящиеся к переходам РА и NP. При $T = 300$ К эти пики значительно перекрываются (рис. 2). Для анализа спектров нами использовалась описанная в работе [2] методика построения вертикальных прямых, соответствующих началу возрастания интенсивности ЭЛ в длинноволновой части спектра при различных механизмах излучательной рекомбинации в Si-Ge (см. вертикальные штриховые прямые 2–7 на рис. 1 и 2). Ширина запрещенной зоны при данной температуре $E_g(T)$ раствора Si-Ge при концентрации Ge 5.2% меньше величины $E_g(T)$ для Si на ~ 24 мэВ [8], а энергия связи носителей заряда в экситоне (E_{ex}) равна ~ 13.5 мэВ [3]. При этом, согласно результатам работы [4], энергия, сбрасываемая при рекомбинации поперечного оптического (ТО) фонона, определяющая основной РА-максимум ЭЛ, равна $E_{ph1} = 58$ мэВ. Энергия наиболее энергетичного фонона (E_{ph2}) по аналогии с Si принята равной $2E_{ph1}$, что объясняется участием в акте рекомбинации двух ТО фононов с энергией E_{ph1} [9].

Использованный нами принцип анализа спектров ЭЛ основан на том, что на спектральных зависимостях при энергиях квантов, соответствующих началу действия каждого механизма излучательной рекомбинации (при пересечениях спектральной кривой с соответствующими вертикальными прямыми), должны наблюдаться изломы спектральных линий, сопровождающиеся ростом производных зависимостей интенсивности ЭЛ от энергии квантов $I(h\nu)$. Очевидно, что такие изломы можно заме-

нить, если соответствующий вклад механизма ЭЛ достаточно значителен. Как видно из рис. 1 и 2, характерные изломы при 82 и 300 К наблюдаются только для экситонных механизмов ЭЛ. Это позволяет утверждать, что доминирующей излучательной рекомбинацией в твердых растворах Si-Ge для переходов РА и NP является рекомбинация через экситоны.

В исследованных структурах в широком диапазоне токов в условиях высокого уровня инжекции наблюдались линейные зависимости интегральной интенсивно-

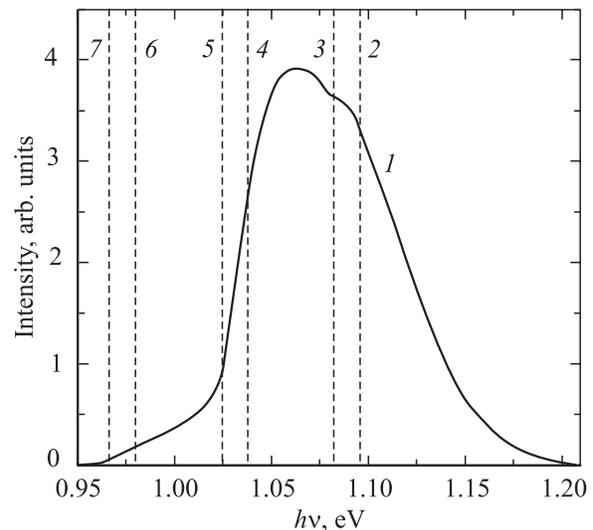


Рис. 2. Зависимость интенсивности электролюминесценции от энергии квантов ($h\nu$) при токе 80 мА и температуре 300 К (1). Штриховыми вертикальными линиями отмечены энергии квантов, соответствующие: 2 — ширине запрещенной зоны твердого раствора Si-Ge при $T \approx 300$ К ($E_g(300\text{ K}) \approx 1.096$ эВ [8,9]), 3 — $E_g(300\text{ K}) - E_{ex}$, 4 — $E_g(300\text{ K}) - E_{ph1}$, 5 — $E_g(300\text{ K}) - E_{ph1} - E_{ex}$, 6 — $E_g(300\text{ K}) - 2E_{ph1}$, 7 — $E_g(300\text{ K}) - 2E_{ph1} - E_{ex}$.

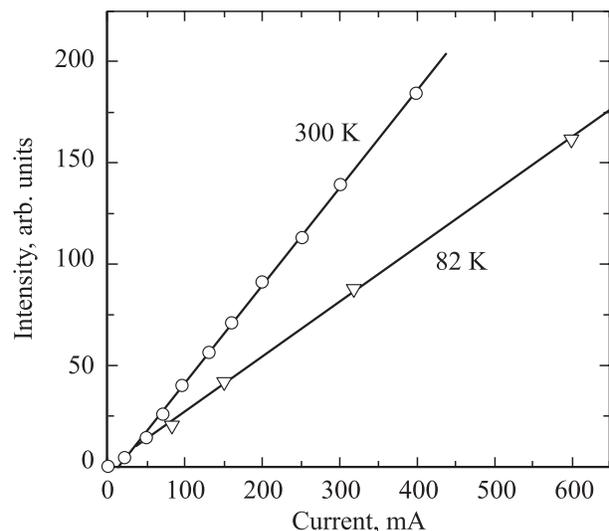


Рис. 3. Зависимости интегральной интенсивности электролюминесценции от тока при 82 и 300 К.

сти ЭЛ от тока (см. рис. 3) и, по крайней мере при 300 К, экспоненциальный спад ЭЛ, методика измерений которого описана в работе [2]. Как показано в [2], эти результаты также могут быть объяснены в рамках экситонного механизма ЭЛ и не находят объяснения при излучательной рекомбинации свободных носителей заряда.

Как отмечается в работе [2], для доминирования экситонного механизма излучательной рекомбинации в Si при 300 К необходимо, чтобы излучательное время жизни экситонов (τ_r) на несколько порядков было меньше излучательного времени жизни свободных носителей заряда (τ_f). Такой же характер соотношения τ_r и τ_f необходим и для доминирования при 300 К экситонного механизма в Si-Ge. Для переходов PA, как отмечено в [2], указанное соотношение является следствием того, что, во-первых, среднее расстояние между свободными носителями значительно больше боровского радиуса экситона. Во-вторых, для излучательной рекомбинации необходима определенная корреляция в положениях электрона, дырки и образующегося или поглощаемого при рекомбинации фона, которая со значительно большей вероятностью может реализоваться в случае рекомбинации через экситоны. Согласно современным представлениям [4], в NP излучательной рекомбинации в Si-Ge участвуют атомы примеси, обеспечивающие выполнение закона сохранения импульса при не прямых переходах. Поэтому второй причиной большого различия времен τ_r и τ_f для переходов NP (кроме значительного различия средних расстояний между электроном и дыркой) может быть необходимость определенной корреляции в положениях электрона, дырки и атома примеси, которая со значительно большей вероятностью реализуется в случае рекомбинации через экситоны.

В заключение отметим, что ЭЛ изготовленных нами Si-Ge-светодиодов при токе 600 мА и температуре 300 К вызывала почти такой же фототок Ge-фотодиода, как и ЭЛ ранее исследованного Si-светодиода с $\eta \approx 0.6\%$ при аналогичных условиях сбора излучения на фотоприемную площадку.

Работа частично поддержана INTAS (грант № 2001-0194) и РФФИ (грант № 04-02-16935).

Список литературы

- [1] T. Stoica, L. Vescan. *Semicond. Sci. Technol.*, **18**, 409 (2003).
- [2] А.М. Емельянов. *Письма ЖТФ*, **30** (22), 75 (2004).
- [3] D.J. Robbins, L.T. Canham, S.J. Barnett, A.D. Pitt, P. Calcott. *J. Appl. Phys.*, **71**, 1407 (1992).
- [4] J. Weber, M.I. Alonso. *Phys. Rev. B*, **40**, 5683 (1989).
- [5] T. Stoica, L. Vescan, M. Goryll. *J. Appl. Phys.*, **83**, 3367 (1998).
- [6] T. Stoica, L. Vescan, A. Mück, B. Holläder, G. Schöpe. *Physica E*, **16**, 359 (2003).
- [7] B. Lax, T. Neustadter. *J. Appl. Phys.*, **25**, 1148 (1954).
- [8] R. Braunstein, A.R. Moor, F. Herman. *Phys. Rev.*, **109**, 695 (1958).

- [9] Р. Смит. *Полупроводники* (М., Мир, 1979).
- [10] А.М. Емельянов, Ю.А. Николаев, Н.А. Соболев, Т.М. Мельникова. *ФТП*, **38**, 634 (2004).

Редактор Т.А. Полянская

A mechanism of the radiative recombination in a band-to-band transition region in Si-Ge solid solutions

A.M. Emel'yanov, N.A. Sobolev, T.M. Mel'nikova*, N.V. Abrosimov⁺

loffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

* Scientific and Manufacturing Enterprise „Orion“,
111123 Moscow, Russia

⁺ Institute for Crystal Growth,
D-12489 Berlin, Germany

Abstract The electroluminescence in Si-Ge-diodes with the Ge concentration equal to 5.2% has been studied in the band-to-band transition region at 82 K and 300 K. The analysis of emitting spectra, the linear intensity dependence on the current, an exponential decay of the electroluminescence point to an exciton mechanism of a radiative recombination for emitting transitions both with and without the phonon participation.