

Особенности примесной фотопроводимости в эпитаксиальных диодах Si:Er/Si

© А.В. Антонов, К.Е. Кудрявцев[¶], Д.В. Шенгуров, В.Б. Шмагин, З.Ф. Красильник

Институт физики микроструктур Российской академии наук,
603950 Нижний Новгород, Россия

(Получена 22 апреля 2013 г. Принята к печати 30 апреля 2013 г.)

Исследованы спектры фототока эпитаксиальных диодных структур Si:Er/Si. Показано, что характер подзонного фотоотклика определяется температурой эпитаксии слоя Si:Er и не связан с составом излучающих центров эрбия. Установлено, что поглощение света с энергией кванта, меньшей ширины запрещенной зоны кремния, определяется примесно-дефектными комплексами, возникающими в процессе роста эпитаксиального слоя и формирующими квазинепрерывный спектр состояний в запрещенной зоне кремния. Предполагается, что указанные примесные центры не связаны с оптически активными центрами эрбия и не участвуют в процессах передачи энергии возбуждения редкоземельной примеси.

1. Введение

Легированные эрбием кремниевые структуры представляют интерес как источники излучения для спектрального диапазона 1.5–1.6 мкм за счет наличия излучательных внутриаомных переходов между электронными состояниями $^4I_{13/2}$ и $^4I_{15/2}$ в трехвалентном ионе Er^{3+} [1]. Для эрбия в кремнии следует отметить очень высокую по сравнению с легированными эрбием стеклами эффективность возбуждения люминесценции, реализующуюся при рекомбинационном (экситонном) механизме возбуждения люминесценции. Сечение возбуждения эрбия в условиях межзонной оптической накачки достигает (при гелиевых температурах) величины $\sigma_{e-h} = 5 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2$ [2]. В то же время для большого класса эпитаксиальных структур, в частности, получаемых методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии (СМЛЭ) [3], остается неясным, как именно реализуется экситонный механизм возбуждения эрбиевых центров. Ряд исследований [4,5] позволяет утверждать, что в СМЛЭ слоях Si:Er схема передачи энергии возбуждения атому эрбия при рекомбинации электронно-дырочной пары отличается от схемы, принятой для имплантационных структур Si:Er [6,7]. Противоречивые мнения высказываются относительно участия глубоких примесных состояний, обнаруживаемых в СМЛЭ слоях Si:Er, в процессах возбуждения редкоземельной примеси. Цель данной работы — исследование особенностей примесных состояний и поглощения света с энергией кванта, меньшей ширины запрещенной зоны кремния, в структурах Si:Er/Si с помощью метода спектроскопии фотопроводимости (ФП). Дополнительным мотивом данной работы является тот факт, что в условиях мощной оптической накачки структур Si:Er/Si излучением с энергией кванта ниже края поглощения кремния наблюдается достаточно интенсивная эрбиевая люминесценция [8], что указывает на наличие в кремнии, легированном эрбием, относительно эффективных механизмов подзонного поглощения света.

2. Исследуемые структуры и методика эксперимента

Исследуемые структуры были выращены методом СМЛЭ на подложках p -Si при температуре эпитаксии слоя Si:Er $T_{gr} = 400\text{--}600^\circ\text{C}$. Диодная структура формировалась слоями p^+ -Si/ n -Si:Er/ n^+ -Si, толщина активного слоя n -Si:Er составляла ~ 1 мкм, толщина контактных слоев p^+ -Si и n^+ -Si ≈ 0.2 мкм. В первой серии образцов (№ 1 и № 2) слой Si:Er не легировался дополнительно какими-либо примесями, помимо эрбия и кислорода. В этом случае состав излучающих центров эрбия и концентрация формирующихся в слое Si:Er доноров определялись температурой эпитаксии [9,10]. Во второй серии образцов (№ 3 и № 4) слой Si:Er легировался дополнительно донорами V группы (P, As) до уровня $N_D \approx 10^{18} \text{ см}^{-3}$, что позволило изменить соотношение между температурой эпитаксии и составом излучающих центров эрбия. Параметры образцов, исследованных в данной работе, приведены в таблице. После роста структур стандартными методами формировались мезадиоды площадью до 2 мм^2 и производилось напыление контактов (Ti/Au).

Для спектрального анализа фототока использовался фурье-спектрометр Bruker Vertex80v. В качестве источника возбуждающего излучения использовался глобар, что позволило проводить измерения в режиме, линейном по мощности накачки, и полностью исключить влияние двухфотонных процессов. Использовался низкошумящий усилитель тока Stanford Research Systems SR570. Температурные измерения проводились в заливном азотном криостате. Спектральный диапазон

| Номер образца | Температура роста | Концентрация доноров в активном слое |
|---------------|---------------------|---------------------------------------|
| № 1 | 600°C | $N_D \approx 10^{16} \text{ см}^{-3}$ |
| № 2 | 400°C | $N_D \approx 10^{17} \text{ см}^{-3}$ |
| № 3 | 600°C | $N_D \approx 10^{18} \text{ см}^{-3}$ |
| № 4 | 400°C | $N_D \approx 10^{18} \text{ см}^{-3}$ |

[¶] E-mail: konstantin@ipmras.ru

измерений составлял $1000\text{--}15\,000\text{ см}^{-1}$, спектральное разрешение до 8 см^{-1} . Для учета спектральной функции источника излучения производилась нормировка измеряемых спектров фототока на отклик пироэлектрического (DTGS) приемника, имеющего практически плоскую спектральную функцию во всем диапазоне измерений. Анализ состава излучающих центров в исследуемых образцах производился посредством спектроскопии фотолюминесценции (ФЛ) с помощью фурье-спектрометра высокого разрешения BOMEM DA3. Возбуждение люминесценции эрбия осуществлялось излучением непрерывного лазера Nd:YVO₄ с удвоением частоты (532 нм), детектирование сигнала люминесценции — германиевым $p\text{--}i\text{--}n$ -фотодиодом, охлаждаемым жидким азотом. Измерения ФЛ проводились при температуре $T = 77\text{ К}$ со спектральным разрешением до 0.5 см^{-1} .

3. Результаты и обсуждение

Спектры фототока структур Si:Er № 1 и № 2, измеренные при температуре $T = 300\text{ К}$, приведены на рис. 1. Для всех образцов наблюдается резкий край поглощения кремния с выраженной фоновой структурой (ступеньки $\hbar\omega = E_G \pm E_{ph}$). В области энергий меньше ширины запрещенной зоны кремния ($\hbar\omega < E_G - E_{ph}$) поглощение света мало и приблизительно одинаково во всех образцах, как с эрбием, так и не содержащих редкоземельной примеси. На рис. 2 приведены спектры фототока тех же структур, измеренные при температуре $T = 80\text{ К}$. В образце № 1 на фоне общего для всех образцов слабого „хвоста“ в спектре фототока наблюдается значительный фотоотклик в области энергий ниже ширины запрещенной зоны кремния ($\hbar\nu \approx 2000\text{--}8000\text{ см}^{-1}$), более чем на порядок величины превышающий фотоотклик образца № 2. Интенсивность подзонного поглощения коррелирует с температурой роста активного слоя Si:Er. В образцах, выращенных при высокой температуре (600°С), подзонная фотопроводимость выражена наиболее ярко. По мере уменьшения температуры эпитаксии вклад подзонной части фотоотклика уменьшается (данные для промежуточных температур в статье не приведены), и в низкотемпературных образцах (400°С) интенсивность подзонного поглощения света мала и соответствует кремниевым диодам без эрбия.

Интересно сравнить наблюдаемые спектры фототока со спектрами ФЛ эрбия. Ранее упоминалось, что тип оптически активных центров эрбия, формирующихся при СМЛЭ росте структур Si:Er/Si, определяется в первую очередь температурой эпитаксии [9]. При высоких температурах формируются излучающие центры эрбия преципитатного типа, для которых характерна относительно широкая ($\sim 50\text{ см}^{-1}$) за счет неоднородного уширения полоса люминесценции. По мере понижения температуры эпитаксии преобладающими становятся изолированные центры эрбия с линейчатой структурой спектра люминесценции. Действительно, по

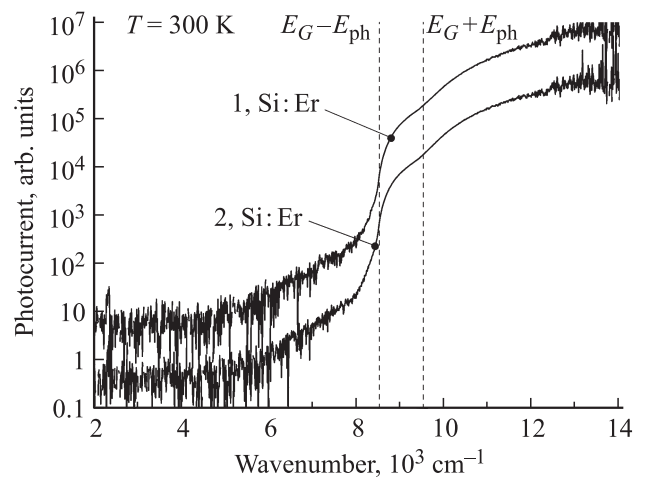


Рис. 1. Спектры фототока Si:Er-диодов № 1 ($T_{gr} = 600^\circ\text{С}$) и № 2 ($T_{gr} = 400^\circ\text{С}$), температура измерений $T = 300\text{ К}$. Спектры разнесены по вертикали для наглядности.

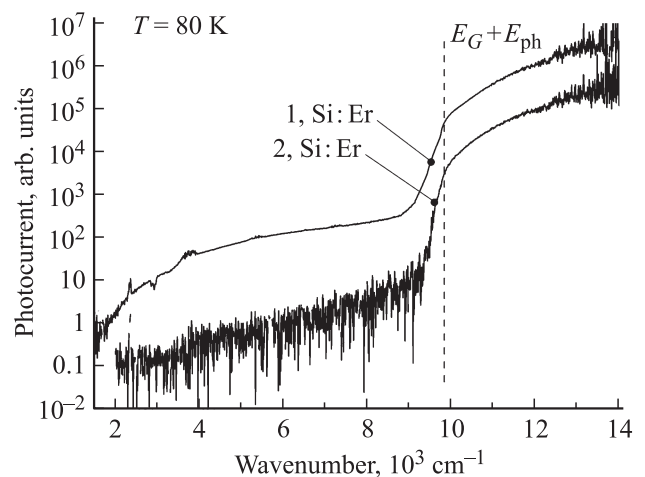


Рис. 2. Спектры фототока Si:Er-диодов № 1 ($T_{gr} = 600^\circ\text{С}$) и № 2 ($T_{gr} = 400^\circ\text{С}$), температура измерений $T = 80\text{ К}$. Спектры разнесены по вертикали для наглядности.

данным фотолюминесценции, в первом случае в образце представлены излучающие центры эрбия преципитатного типа (кривая 1 на рис. 3), а во втором — центры с линейчатым спектром излучения (кривая 2 на рис. 3).

С целью понять, связан ли наблюдаемый подзонный фотоотклик в высокотемпературных ($T_{gr} \approx 600^\circ\text{С}$) образцах с формированием преципитатных центров эрбия, была исследована серия образцов Si:(Er,As), выращенных с дополнительным легированием активного слоя. Спектры ФЛ этих образцов приведены на рис. 3 (кривые 3 и 4). Видно, что дополнительное легирование существенно влияет на формирование излучающих центров эрбия. В образце, выращенном при более высокой температуре, существенный вклад в люминесценцию вносят центры эрбия с линейчатым спектром (кривая 3 на рис. 3), в то время как в низкотемпературном образце

преобладают центры преципитатного типа (кривая 4 на рис. 3). Сравнение спектров ФП данных образцов (рис. 4) показывает, что сильный подзонный фотоотклик наблюдается тем не менее в высокотемпературном образце. Таким образом, не наблюдается связи между типом излучающих центров эрбия и структурой спектров фототока. По-видимому, наблюдаемое подзонное поглощение света связано с примесно-дефектными центрами, формирующимися при высоких температурах роста и не участвующими в переносе энергии возбуждения ионам Er³⁺.

На рис. 5 приведены спектры фототока образца 1, измеренные для различных температур в диапазоне $T = 90\text{--}190\text{ K}$. Для каждого из представленных спек-

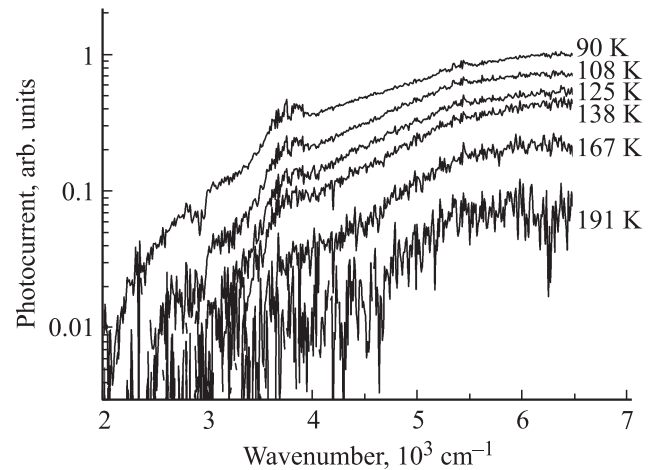


Рис. 5. Спектры фототока образца 1, измеренные при различных температурах.

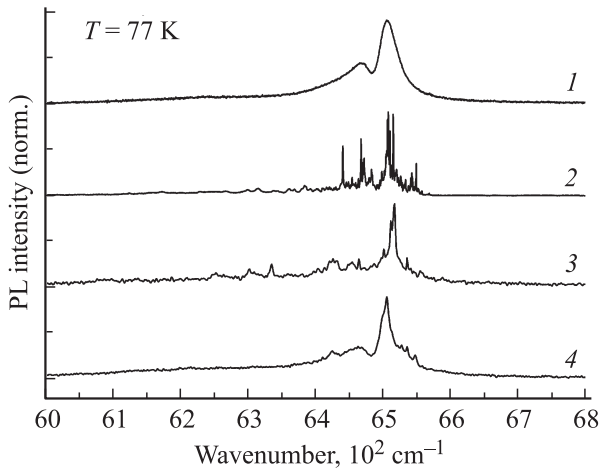


Рис. 3. Спектры фотолюминесценции исследуемых Si:Er/Si-диодов. Образцы, не легированные дополнительно: № 1 и № 2. Образцы с дополнительным легированием слоя Si:Er-донорами V группы: № 3 и № 4. Температура измерений $T = 77\text{ K}$.

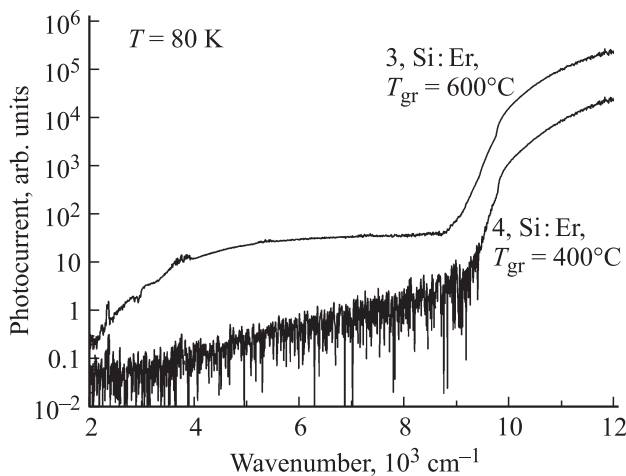


Рис. 4. Спектры фототока Si:Er-диодов, выращенных с дополнительным легированием активного слоя: № 3 ($T_{gr} = 600^\circ\text{C}$) и № 4 ($T_{gr} = 400^\circ\text{C}$). Температура измерений $T = 80\text{ K}$. Спектры разнесены по вертикали для наглядности.

тров проведено вычитание фототока, измеренного для того же образца 1 при комнатной температуре, при которой примесное поглощение отсутствует (см. рис. 1). Это позволило увеличить контрастность интересующей нас компоненты фотоотклика, связанной с примесным поглощением. С ростом температуры наблюдения величина фототока падает, а красная граница в спектрах фототока плавно сдвигается в сторону коротких длин волн. Последнее позволяет нам утверждать, что в данном случае мы имеем дело не с одним или двумя уровнями энергии в запрещенной зоне кремния, а с примесной подзоной, для которой характерна квазинепрерывная плотность состояний. Красная граница фотоотклика составляет величину порядка $1700\text{--}2000\text{ cm}^{-1}$ ($210\text{--}250\text{ мэВ}$). Это согласуется с заключениями о структуре примесных состояний в СМЛЭ слоях Si:Er, приведенными в [11] на основании данных двухцветной спектроскопии, а также в [12] на основании данных холловских измерений. Роль обнаруженных примесных состояний в безызлучательной релаксации эрбиевых центров может быть вполне заметной, например, за счет оже-девозбуждения свободными носителями заряда при ионизации примесей, что и наблюдается в [11]. В то же время приведенное в настоящем исследовании сопоставление спектров фототока и фотолюминесценции Si:Er/Si-диодов противоречит высказанным в работах [11,12] предположениям о непосредственной связи наблюдаемых примесных уровней с излучающими центрами эрбия и участия соответствующих примесных состояний в процессах возбуждения редкоземельной примеси.

4. Заключение

В работе исследованы спектры фототока эпитаксиальных Si:Er/Si-диодов в области энергий ниже края поглощения кремния. Предполагается, что наблюдаемое

поглощение света с энергией кванта меньше ширины запрещенной зоны кремния определяется примесно-дефектными комплексами, возникающими в процессе роста эпитаксиального слоя и формирующими в запрещенной зоне кремния квазинепрерывный спектр состояний. Установлено, что плотность состояний в примесной зоне коррелирует с температурой роста структуры, в то время как корреляция с типом излучающих центров отсутствует. По-видимому, данные примесные состояния не принимают участия в возбуждении эрбия по экситонному механизму.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 11-02-953, 11-02-963, 12-02-31287, 13-02-00397) и Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение 8735).

Список литературы

- [1] H. Ennen, J. Schneider, G. Pomrenke, A. Axmann. Appl. Phys. Lett., **43** (10), 943 (1983).
- [2] Б.А. Андреев, З.Ф. Красильник, Д.И. Крыжков, В.П. Кузнецов, А.Н. Яблонский. ФТП, **46** (11), 1398 (2012).
- [3] В.П. Кузнецов, Р.А. Рубцова. ФТП, **34** (5), 519 (2000).
- [4] В.Б. Шмагин, Б.А. Андреев, А.В. Антонов, З.Ф. Красильник, В.П. Кузнецов, О.А. Кузнецов, Е.А. Ускова, С.А.А. Ammerlaan, G. Pensl. ФТП, **36** (2), 178 (2002).
- [5] К.Е. Kudryavtsev, V.P. Kuznetsov, D.V. Shengurov, V.B. Shmagin, Z.F. Krasilnik. Physica E, **41** (6), 899 (2009).
- [6] J. Palm, F. Gan, B. Zheng, J. Michel, L.C. Kimerling. Phys. Rev. B, **54**, 17 603 (1996).
- [7] F. Priolo, G. Franzo, S. Coffa, A. Carnera. Phys. Rev. B, **57**, 4443 (1998).
- [8] Б.А. Андреев, З.Ф. Красильник, Д.И. Крыжков, А.Н. Яблонский, В.П. Кузнецов, T. Gregorkiewicz, M.A.J. Klik. ФТТ, **46** (1), 98 (2004).
- [9] Б.А. Андреев, З.Ф. Красильник, В.П. Кузнецов, О.А. Солдаткин, М.С. Бреслер, О.Б. Гусев, И.Н. Ясиевич. ФТТ, **43** (6), 979 (2001).
- [10] В.П. Кузнецов, В.Б. Шмагин, М.Н. Дроздов, М.О. Марычев, К.Е. Кудрявцев, М.В. Кузнецов, Б.А. Андреев, А.В. Корнаузов, З.Ф. Красильник. ФТП, **45** (1), 132 (2011).
- [11] I. Izeddin, M.A.J. Klik, N.Q. Vinh, M.S. Bresler, T. Gregorkiewicz. Phys. Rev. Lett., **99**, 077 401 (2007).
- [12] О.В. Белова, В.Н. Шабанов, А.П. Касаткин, О.А. Кузнецов, А.Н. Яблонский, М.В. Кузнецов, В.П. Кузнецов, А.В. Корнаузов, Б.А. Андреев, З.Ф. Красильник. ФТП, **42** (2), 136 (2008).

Редактор Т.А. Полянская

Features of impurity photoconductivity of epitaxial Si:Er/Si diodes

A.V. Antonov, K.E. Kudryavtsev, D.V. Shengurov, V.B. Shmagin, Z.F. Krasilnik

Institute for Physics of Microstructures,
Russian Academy of Sciences,
603950 Nizhny Novgorod, Russia

Abstract Photocurrent spectra of epitaxial Si:Er/Si diodes have been studied. It has been shown that the magnitude of sub-band-gap photoresponse is determined by the temperature of epitaxy and does not correlate with any particular optically active erbium sites. It has been established that absorption of photons with energy less than silicon band gap is determined by impurity- and defect-related complexes, generated during epitaxial growth and characterized by continuous density of states in silicon band gap. It is suggested that the above centers are not related to optically active erbium and do not participate in energy transfer during excitation of rare-earth ions by recombination of electron-hole pairs.