

Спектроскопия возбуждения эрбиевой фотолюминесценции в эпитаксиальных структурах Si:Er

© Б.А. Андреев, З.Ф. Красильник, А.Н. Яблонский, В.П. Кузнецов*, Т. Gregorkiewicz**, М.А.К. Klik**

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

* Научно-исследовательский физико-технический институт
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского,
603950 Нижний Новгород, Россия

** Van der Waals–Zeeman Institute, University of Amsterdam,
NL-1018XE Amsterdam, The Netherlands

E-mail: yablonsk@ipm.sci-nnov.ru

Исследованы спектры возбуждения эрбиевой фотолюминесценции в эпитаксиальных структурах Si:Er в широком диапазоне длин волн возбуждающего излучения ($\lambda_{\text{ex}} = 780\text{--}1500\text{ nm}$). Во всех исследованных структурах наблюдался значительный сигнал эрбиевой фотолюминесценции при энергиях кванта, существенно меньших ширины запрещенной зоны кремния ($\lambda = 1060\text{ nm}$), в условиях отсутствия генерации экситонов. Обсуждается возможный механизм возбуждения ионов эрбия в кремнии без участия экситонов.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 02-02-16773), INTAS (гранты № 01-0468, 01-0194) и NWO (грант № 047-009-013).

Кремний, легированный эрбием, привлекает к себе значительное внимание в связи с тем, что длина волны излучательного перехода $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ в $4f$ -оболочке иона Er^{3+} лежит в спектральной области максимальной прозрачности кварцевых волоконно-оптических линий связи ($\lambda \approx 1.54\text{ }\mu\text{m}$). Применение метода сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии (СМЛЭ) [1] позволяет получать однородно и селективно легированные структуры Si:Er с высоким совершенством кристаллической решетки, обнаруживающие интенсивную эрбиевую фото- и электролюминесценцию на длине волны $1.54\text{ }\mu\text{m}$ [2].

Известно, что механизм возбуждения ионов эрбия в кремнии через электронную подсистему полупроводника является гораздо более эффективным, чем прямое оптическое возбуждение ионов Er в диэлектрических матрицах [3,4]. В то же время, согласно общепринятой точке зрения, механизм передачи энергии через электронную подсистему кремния представляет собой сложный многоступенчатый процесс с участием примесных уровней в запрещенной зоне кремния и до сих пор до конца не изучен. В связи с этим целью настоящей работы было исследование спектров возбуждения эрбиевой фотолюминесценции (ФЛ) в структурах Si:Er, выращенных методом СМЛЭ, с различными типами оптически активных эрбиевых центров.

1. Методика эксперимента

Методом СМЛЭ были выращены однородно и селективно легированные эрбием кремниевые структуры на кремниевых подложках p -типа [100] с удельным сопротивлением $\rho \sim 10\text{--}20\text{ }\Omega \cdot \text{cm}$. Для получения слоев кремния, легированного эрбием, использован кристаллический источник Si:Er. Нелегированные слои кремния в

многослойных структурах выращивались с применением второго источника — кремния с низкой концентрацией примесей (до 10^{15} cm^{-3}). Толщина исследованных эпитаксиальных структур составляла от 0.8 до $5.5\text{ }\mu\text{m}$. Температура роста структур варьировалась от 500 до 600°C . Выращенные структуры содержали по данным ВИМС до $5 \cdot 10^{18}\text{ cm}^{-3}$ атомов Er, $5 \cdot 10^{19}\text{ cm}^{-3}$ атомов O и от $4 \cdot 10^{18}$ до $1 \cdot 10^{19}\text{ cm}^{-3}$ атомов C.

Для исследования спектров возбуждения ФЛ в структурах Si:Er/Si в ближнем ИК-диапазоне ($780\text{--}1500\text{ nm}$) использовался оптический параметрический осциллятор (ОРО) с накачкой от импульсного лазера Nd:YAG. Длительность импульсов накачки составляла 5 ns , частота повторения импульсов 20 Hz , максимальная энергия в импульсе 7 mJ на длине волны 780 nm . Таким образом, максимальная мощность излучения в импульсе достигала 10^6 W . Регистрация сигнала ФЛ осуществлялась с помощью решеточного спектрометра, охлаждаемого азотом германиевого детектора (Edinburgh Instruments), и цифрового осциллографа (TDS 3032, Tektronix). Исследуемые образцы охлаждались до 10 K с помощью криостата замкнутого цикла (Oxford Instruments).

2. Результаты и обсуждение

Исследовались спектры возбуждения эрбиевой ФЛ для серии структур Si:Er, полученных методом СМЛЭ, в широком диапазоне длин волн возбуждающего излучения ($\lambda_{\text{ex}} = 780\text{--}1500\text{ nm}$). Для всех исследованных структур было обнаружено, что значительный сигнал эрбиевой ФЛ наблюдается при энергиях кванта излучения накачки, существенно меньших ширины запрещенной зоны кремния ($\lambda = 1060\text{ nm}$) (рис. 1). Более того, при высоких мощностях возбуждающего излучения наблюдалось резкое возрастание интенсивности эрбие-

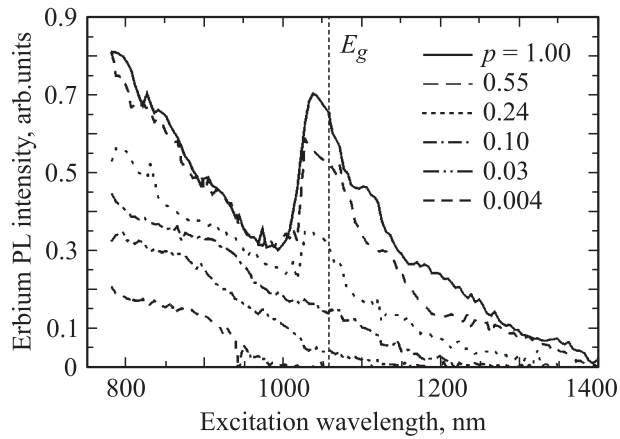


Рис. 1. Спектры возбуждения эрбиевой ФЛ ($\lambda_{ex} = 1540$ nm) в структуре Si:Er при различной мощности излучения накачки $p = P/P_{max}$. $T = 10$ K.

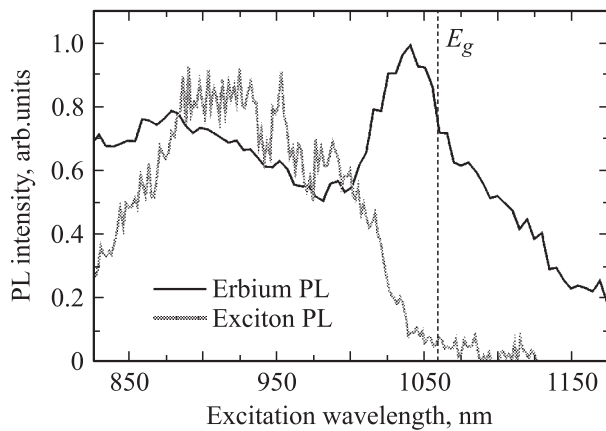


Рис. 2. Спектры возбуждения эрбиевой и экситонной ФЛ в структуре Si:Er.

вой ФЛ с длиной волны излучения накачки в области 1000–1050 nm, соответствующей краю межзонного поглощения в объемном кремнии.

Согласно общепринятой модели, для возбуждения эрбиевой ФЛ в структурах Si:Er необходима межзонная накачка (поглощение фотона с энергией, большей ширины запрещенной зоны кремния). Это приводит к генерации электронно-дырочных пар, их связыванию в экситоны, связыванию экситонов на эрбиевых примесных комплексах и последующей безызлучательной рекомбинации связанных экситонов с передачей энергии ионам эрбия [5]. Для выяснения механизма возбуждения ионов эрбия при энергиях кванта, меньших ширины запрещенной зоны кремния, были исследованы также спектры возбуждения экситонной ФЛ. Этот сигнал ФЛ соответствует излучательной рекомбинации экситонов, связанных на мелких примесных центрах, в основном в подложке структур Si:Er/Si, и позволяет определить эффективность генерации электронно-дырочных пар (экситонов) в структуре в зависимости от длины волны

излучения накачки. Как видно из рис. 2, в интервале 1000–1050 nm наблюдается резкое падение интенсивности экситонной ФЛ с увеличением длины волны возбуждающего излучения. Сигнал экситонной ФЛ отсутствует при энергиях кванта излучения накачки, меньших E_g ($\lambda_{ex} > 1060$ nm). Спад интенсивности экситонной ФЛ указывает на уменьшение эффективности генерации экситонов в структурах Si:Er в данном спектральном диапазоне и свидетельствует о том, что при $h\nu_{ex} < E_g$ возбуждение ионов эрбия осуществляется, по-видимому, без участия экситонов.

Необходимо отметить, что при $\lambda_{ex} > 1060$ nm структуры становятся практически прозрачными для возбуждающего излучения. Это, в частности, означает чрезвычайно высокую эффективность возбуждения эрбиевой ФЛ в данном спектральном диапазоне, поскольку при этом лишь малая доля мощности излучения накачки поглощается в образце и вносит вклад в возбуждение ФЛ.

Следует заметить, что эффект возбуждения эрбиевой ФЛ при $h\nu_{ex} < E_g$ проявляется в большей степени при

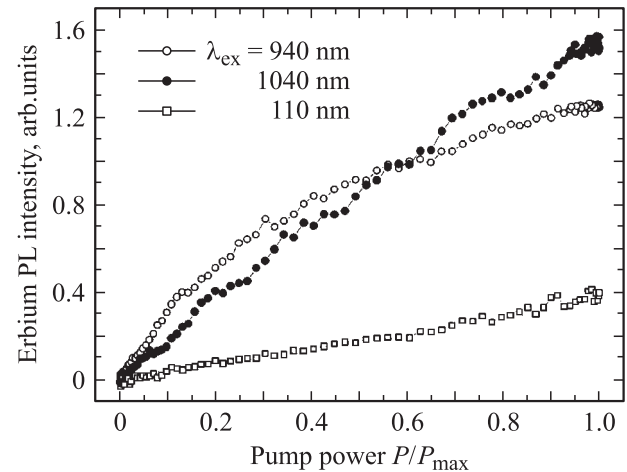


Рис. 3. Зависимость интенсивности эрбиевой ФЛ от мощности накачки при энергии кванта возбуждающего излучения выше ($\lambda_{ex} = 940$ nm), вблизи ($\lambda_{ex} = 1040$ nm) и ниже ($\lambda_{ex} = 1100$ nm) ширины запрещенной зоны кремния.

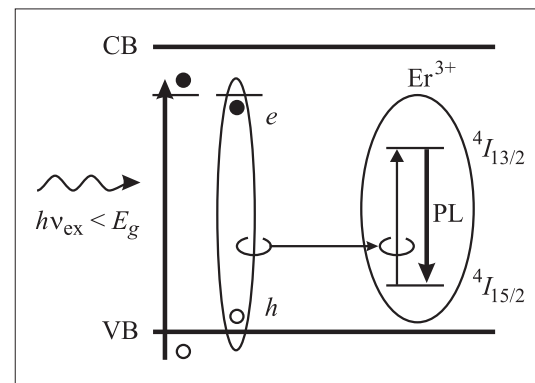


Рис. 4. Схема предполагаемого механизма возбуждения ионов эрбия в исследованных структурах Si:Er при $h\nu_{ex} < E_g$.

высоких мощностях излучения накачки. Это хорошо видно при сравнении зависимостей интенсивности эрбиевой ФЛ от мощности накачки при энергиях кванта возбуждающего излучения выше ($\lambda_{\text{ex}} = 940 \text{ nm}$) и ниже ($\lambda_{\text{ex}} = 1100 \text{ nm}$) ширины запрещенной зоны кремния (рис. 3). Как следует из данных графиков, интенсивность эрбиевой ФЛ в условиях межзонной накачки (940 nm) быстрее возрастает при малой мощности возбуждающего излучения и частично насыщается при высокой мощности, в то время как при $\lambda_{\text{ex}} = 1100 \text{ nm}$ зависимость от мощности является линейной во всем исследованном интервале.

На основании полученных экспериментальных данных можно сделать вывод, что при $h\nu_{\text{ex}} < E_g$ поглощение возбуждающего излучения, по-видимому, осуществляется в эпитаксиальном слое Si:Er. Возбуждение эрбиевой ФЛ в данных условиях может быть объяснено наличием примесных (дефектных) уровней в запрещенной зоне кремния, связанных с ионами эрбия, образующихся при выращивании эпитаксиального слоя Si:Er. В этом случае поглощение фотона с энергией, меньшей ширины запрещенной зоны, может вызывать возбуждение электронов из валентной зоны непосредственно на данные примесные уровни и их последующую безызлучательную рекомбинацию с дырками в валентной зоне с передачей энергии во внутреннюю оболочку ионов эрбия. Предполагаемая модель возбуждения эрбиевой ФЛ показана на рис. 4. Высокая эффективность данного механизма может быть объяснена именно отсутствием генерации электронно-дырочных пар в структурах при $h\nu_{\text{ex}} < E_g$, поскольку взаимодействие со свободными носителями является одной из основных причин безызлучательного девозбуждения ионов эрбия в кремнии. Снижением Оже-девозбуждения можно объяснить также возрастание интенсивностей эрбиевой ФЛ с длиной волны возбуждающего излучения в области 1000–1030 nm при одновременном уменьшении интенсивности экситонной ФЛ.

Список литературы

- [1] B.A. Andreev, A.Yu. Andreev, H. Ellmer, H. Hutter, Z.F. Krasilnik, V.P. Kuznetsov, S. Lanzerstorfer, L. Palmetshofer, K. Piplits, R.A. Rubtsova, N.S. Sokolov, V.B. Shmagin, M.V. Stepihova, E.A. Uskova. *J. Cryst. Growth* **201–202**, 534 (1999)
- [2] Z.F. Krasilnik, V.Ya. Aleshkin, B.A. Andreev, O.B. Gusev, W. Jantsch, L.V. Krasilnikova, D.I. Kryzhkov, V.P. Kuznetsov, V.G. Shengurov, V.B. Shmagin, N.A. Sobolev, M.V. Stepihova, A.N. Yablonsky. *Towards the First Silicon Laser / Ed. L. Pavesi et al. Kluwer Academic Publ., The Netherlands* (2003) P. 445–454.
- [3] F. Priolo, G. Franzo, S. Coffa, A. Carnera. *Phys. Rev. B* **57**, 8, 4443 (1998).
- [4] O.B. Gusev, M.S. Bresler, P.E. Pak, I.N. Yassievich, M. Forcales, N.Q. Vinh, T. Gregorkiewicz. *Phys. Rev. B* **64**, 075 302 (2001).
- [5] М.С. Бреслер, О.Б. Гусев, Б.П. Захарченя, И.Н. Ясиевич. *ФТТ*. **38**, 5, 1474 (1996).