

Особенности спектров возбуждения фотолюминесценции ионов Er^{3+} в эпитаксиальных кремниевых структурах, легированных эрбием

© Б.А. Андреев, З.Ф. Красильник, Д.И. Крыжков, А.Н. Яблонский, В.П. Кузнецов*,
Т. Gregorkiewicz**, М.А.Ж. Kliik**

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, The Netherlands

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

Приводятся результаты исследования спектров возбуждения эрбиевой фотолюминесценции ($\lambda = 1540 \text{ nm}$) в эпитаксиальных структурах Si:Er в широком диапазоне длин волн возбуждающего излучения ($\lambda = 780\text{--}1500 \text{ nm}$). Сообщается о наблюдении эрбиевой фотолюминесценции при энергиях кванта излучения накачки, существенно меньших ширины запрещенной зоны кремния. Обсуждаются возможные механизмы возбуждения ионов эрбия в данной области энергий квантов излучения накачки.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 01-02-16439, 02-02-16773, 02-02-06695), INTAS (грант N 01-0468) и NWO (грант N 047-009-013).

В настоящее время ведутся поиски путей интеграции в технологию кремниевых микроструктур различных элементов оптоэлектроники: полупроводниковых лазеров, светодиодов, фотоприемников, модуляторов излучения и т.д. 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+} (1540 nm) лежит в спектральной области максимальной прозрачности и минимальной дисперсии кварцевых волоконно-оптических линий связи. Применение для выращивания кремниевых слоев, легированных эрбием, метода сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии (СМЛЭ) [1] позволяет получать однородно и селективно легированные структуры Si:Er и SiGe:Er с высоким совершенством классической решетки, демонстрирующие интенсивную эрбиевую фото- и электролюминесценцию [2]. Важной задачей является минимизация температурного гашения люминесценции в структурах Si:Er/Si . Большой интерес в связи с этим представляют, в частности, кремниевые структуры с оптически активными эрбиевыми центрами в SiO_2 -подобных преципитатах, характеризующиеся относительно слабым температурным гашением [3].

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 (сечение возбуждения иона Er^{3+} в кремнии составляет по различным данным от $3 \cdot 10^{-15}$ [4] до 10^{-12} cm^2 [5], что на много порядков больше, чем сечение оптического возбуждения эрбия в матрице SiO_2 — 10^{-21} cm^2). 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 является исследование особенностей возбуждения эрбиевой фотолюминесценции (ФЛ) при изменении энергии кванта излучения накачки в структурах Si:Er , выращенных методом СМЛЭ, с различными типами оптически активных эрбиевых центров.

1. Эксперимент

Кремниевые структуры, легированные эрбием, были выращены методом СМЛЭ на кремниевых подложках n - или p -типа [100] с удельным сопротивлением $\rho \sim 10\text{--}20 \Omega \cdot \text{cm}$ с использованием кристаллического источника Si:Er . Толщина исследованных эпитаксиальных структур составляла от 1.8 до $5.5 \mu\text{m}$. 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 ФЛ использовался Фурье-спектрометр высокого разрешения WOMEM DA3. Регистрация сигнала ФЛ осуществлялась с помощью охлаждаемого азотом германиевого детектора (Edinburg Instruments). Исследования ФЛ проводились при температуре 4.2 K с использованием заливного оптического криостата. Оптическая накачка в видимом диапазоне для исследования спектров эрбиевой ФЛ осуществлялась с помощью Ar^+ - и Kr^+ -лазеров непрерывного излучения с мощностью до 300 mW .

Для исследования спектров возбуждения эрбиевой ФЛ в структурах Si:Er/Si в ближнем ИК-диапазоне ($780\text{--}1500 \text{ nm}$) использовался оптический параметрический осциллятор с накачкой от импульсного лазера Nd:YAG (355 nm). Длительность импульсов накачки составляла 5 ns , частота повторения импульсов 20 Hz ,

максимальная энергия в импульсе 7 мДж на длине волны 780 нм. Таким образом, максимальная мощность излучения в импульсе достигала 10^6 Вт. Регистрация сигнала ФЛ осуществлялась с помощью решетчатого спектрометра, германиевого детектора и цифрового осциллографа (TDS 3032, Tektronix). Запись спектров возбуждения эрбиевой ФЛ производилась при температуре 10 К с использованием криостата замкнутого цикла (Oxford Instruments).

2. Результаты и обсуждение

Методом Фурье-спектроскопии высокого разрешения был проведен анализ вклада различных оптически активных центров, связанных с эрбием, в сигнал ФЛ исследуемых структур Si:Er/Si. При низких температурах в спектрах ФЛ в зависимости от условий роста и послеростового отжига структур доминируют либо узкие пики высокосимметричных изолированных эрбиевых центров, либо широкая линия ($\sim 30 \text{ cm}^{-1}$), обусловленная излучением ионов эрбия в SiO_2 -подобных преципитатах, которые формируются в слоях кремния с большим содержанием кислорода при высокой температуре роста ($\sim 600^\circ\text{C}$). На основании характерного уширения и смещения спектра эрбиевой ФЛ в коротковолновую область был сделан вывод о том, что ионы эрбия в SiO_2 -подобных преципитатах вносят доминирующий вклад в сигнал ФЛ при высоких температурах измерения.

Согласно общепринятому представлению, для возбуждения эрбиевой ФЛ в структурах Si:Er необходима межзонная накачка (квант с энергией, большей ширины запрещенной зоны кремния), приводящая к генерации электронно-дырочных пар и последующей рекомбинации носителей с передачей энергии ионам эрбия. Поэтому можно предположить, что спектры возбуждения эрбиевой ФЛ в структурах Si:Er будут зависеть от типа оптически активного эрбиевого центра и длины волны возбуждающего излучения. В данной работе рассмотрен интервал $\lambda_{\text{ex}} = 780\text{--}1500 \text{ nm}$, включая энергии кванта, существенно меньше ширины запрещенной зоны кремния ($\lambda \approx 1060 \text{ nm}$).

В ходе исследований оценена возможность прямой оптической накачки ионов эрбия в структурах Si:Er с SiO_2 -подобными преципитатами при значениях длины волны возбуждающего излучения, соответствующих переходам из основного в верхние возбужденные состояния иона эрбия ($\lambda = 800$ и 980 nm для переходов $^4I_{15/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$ и $^4I_{15/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ соответственно). Обнаружено, что для структур с ионами Er в SiO_2 -подобных преципитатах, как и для структур с изолированными эрбиевыми центрами, в спектрах возбуждения эрбиевой ФЛ не наблюдается особенностей при данных значениях λ_{ex} (рис. 1). Полученный результат свидетельствует о том, что эффективность прямой оптической накачки ионов Er^{3+} в кремниевых структурах, легированных эрбием, чрезвычайно низка и доминирующим механизмом возбуждения эрбиевой ФЛ в структурах Si:Er/Si, в том

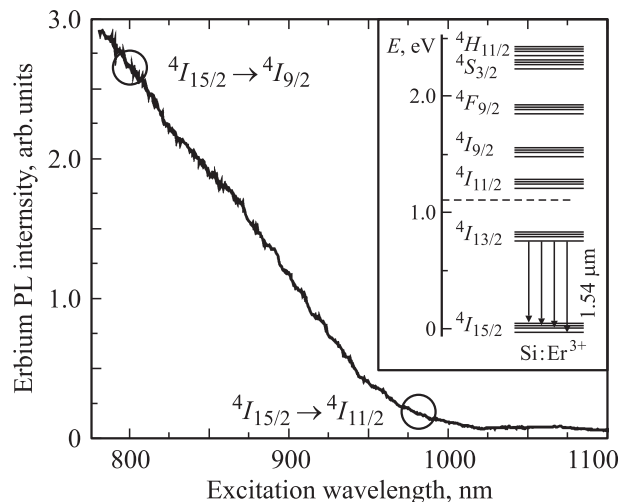


Рис. 1. Спектр возбуждения эрбиевой ФЛ ($\lambda = 1540 \text{ nm}$) в структуре Si:Er. $T = 1\text{--}K$. На вставке — структура энергетических уровней в $4f$ -оболочке иона Er^{3+} .

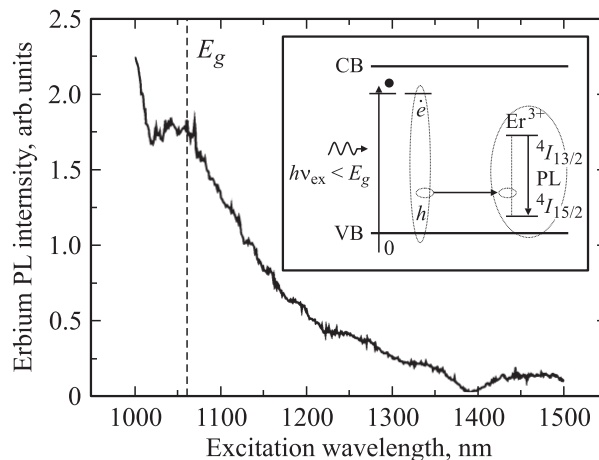


Рис. 2. Спектр возбуждения эрбиевой ФЛ ($\lambda = 1540 \text{ nm}$) в области энергий кванта возбуждающего излучения, меньших E_g . На вставке — предполагаемый механизм возбуждения ионов эрбия в кремнии при $h\omega_{\text{ex}} < E_g$.

числе и в структурах с SiO_2 -подобными преципитатами, является передача энергии через электронную подсистему матрицы кремния.

На рис. 2, 3 приведены спектры возбуждения эрбиевой ФЛ, измеренные при температуре $T = 10 \text{ K}$ и различной мощности возбуждающего излучения. При небольшой мощности накачки ($P \sim 10^4 \text{ W}$) наблюдалось монотонное падение интенсивности эрбиевой ФЛ при уменьшении энергии кванта возбуждающего излучения до значений, близких к ширине запрещенной зоны кремния. Такое падение интенсивности соответствует уменьшению коэффициента поглощения в кремнии в указанном диапазоне длин волн и, как следствие, снижению интенсивности генерации электронно-дырочных пар. Несмотря на это, заметный сигнал эрбиевой ФЛ

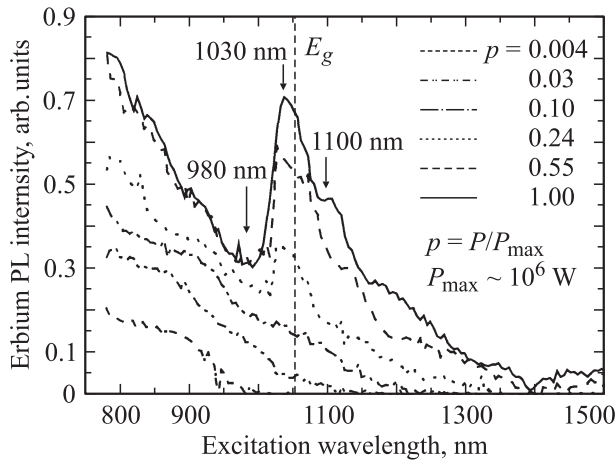


Рис. 3. Спектры возбуждения эрбиевой ФЛ ($\lambda = 1540$ nm) при различной мощности излучения накачки.

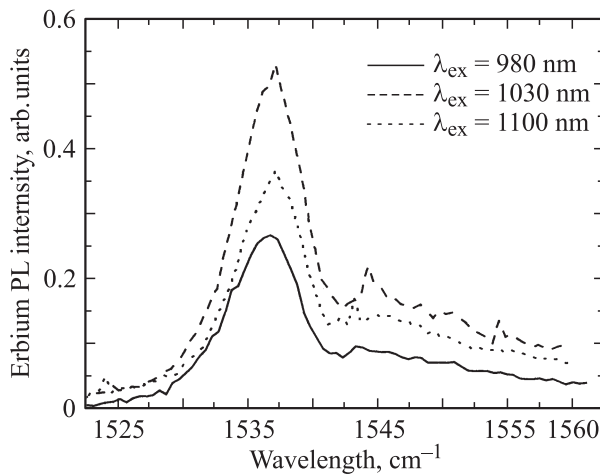


Рис. 4. Спектры эрбиевой ФЛ, измеренные при различных значениях длины волны возбуждающего излучения λ_{ex} .

наблюдался при энергиях кванта возбуждающего излучения, существенно меньших ширины запрещенной зоны кремния ($\lambda = 1060$ nm), вплоть до энергии излучательного перехода иона Er^{3+} ($\lambda = 1540$ nm) (рис. 2).

При увеличении мощности накачки ($P \sim 10^5 - 10^6$ W) в спектре возбуждения эрбиевой люминесценции возникает интенсивный широкий пик, максимум которого приходится на длину волны $\lambda_{ex} \sim 1030$ nm (рис. 3). Следует отметить, что высокочастотный край пика совпадает с краем поглощения излучения в объемном кремнии. Таким образом, резкое возрастание эрбиевой ФЛ наблюдается, когда образец становится практически прозрачным для возбуждающего излучения. Это, в частности, свидетельствует о чрезвычайно высокой эффективности возбуждения эрбиевой ФЛ в данной спектральной области ($\lambda_{ex} \sim 1030$ nm), так как при этом лишь малая доля (менее 1%) мощности излучения накачки поглощается в образце и вносит вклад в возбуждение ФЛ.

На рис. 4 представлены спектры ФЛ, измеренные при трех значениях длины волны возбуждающего излучения ($\lambda_{ex} = 980, 1030$ и 1100 nm), обозначенных стрелками на рис. 3, при максимальной мощности накачки ($P = 10^6$ W). Полученные спектры ФЛ имеют одинаковый вид, характерный для спектров эрбиевой ФЛ в структурах с SiO_2 -подобными преципитатами. Это подтверждает тот факт, что наблюдаемый при $\lambda_{ex} > 1060$ nm (т.е. при $h\nu < E_g$) сигнал ФЛ представляет собой не что иное, как ФЛ ионов Er^{3+} .

Возникновение значительного сигнала эрбиевой люминесценции при возбуждении квантами света с энергией, заметно меньшей ширины запрещенной зоны, не может быть объяснено наличием хвостов плотности состояний в запрещенной зоне кремния, поскольку спектры возбуждения ФЛ, измеренные в работе [6] для излучения свободных и связанных экситонов в кремнии с примесями бора и фосфора, имеют красную границу при λ_{ex} не более 1080 nm при концентрации доноров и акцепторов вплоть до 10^{19} cm^{-3} . В то же время концентрация мелких примесей в исследованных структурах не превышала 10^{18} cm^{-3} .

Полученный результат можно пытаться объяснить на основе представлений о генерации электронно-дырочных пар за счет двухфотонных переходов в матрице кремния. Однако в этом случае должна была бы иметь место квадратичная зависимость интенсивности ФЛ от мощности излучения накачки, тогда как наблюдавшаяся в эксперименте зависимость имела сублинейный характер (рис. 5). Кроме того, наличие двухфотонного поглощения не может объяснить возникновения пика в спектрах возбуждения ионов эрбия при энергиях кванта возбуждающего излучения, близких к E_g .

Более вероятное объяснение наблюдения эрбиевой ФЛ при $h\nu_{ex}$, существенно меньших E_g , может быть предложено, если допустить существование в исследованных структурах примесных уровней в запрещенной зоне кремния, связанных с ионами Er в эпитаксиальном

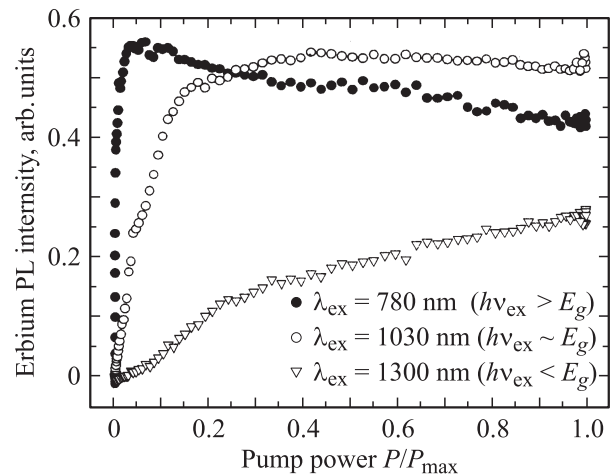


Рис. 5. Зависимости интенсивности эрбиевой ФЛ от мощности накачки при различных значениях длины волны возбуждающего излучения λ_{ex} .

слое. Действительно, известно, что кремниевые слои, легированные эрбием, как правило, обладают проводимостью n -типа [1]. В этом случае поглощение кванта света с энергией $h\nu_{ex} < E_g$ может приводить к возбуждению электронов из валентной зоны непосредственно на донорные уровни, связанные с эрбием, и к их последующей безызлучательной рекомбинации с дырками в валентной зоне с передачей энергии во внутреннюю оболочку ионов Er . К сожалению, пока не удалось обнаружить наличие глубоких центров в выращенных с помощью СМЛЭ структурах методом релаксационной спектроскопии глубоких уровней [7].

В рамках предложенного механизма возбуждения ионов эрбия можно объяснить возрастание интенсивности эрбиевой ФЛ при увеличении длины волны возбуждающего излучения в области 1000–1030 nm. Дело в том, что при межзонной накачке структур Si:Er в образце генерируется большее число электронно-дырочных пар, что приводит к возникновению интенсивного безызлучательного Оже-девозбуждения ионов Er с участием свободных носителей, существенно снижающего эффективность возбуждения эрбиевой ФЛ. Это подтверждается, в частности, падением интенсивности ФЛ при большой мощности межзонной накачки ($h\nu_{ex} > E_g$) (рис. 5). При уменьшении энергии кванта возбуждающего излучения вблизи E_g происходит резкое падение коэффициента поглощения света в объемном кремнии и, следовательно, числа свободных носителей, рождаемых в структуре. Это приводит к снижению эффективности Оже-девозбуждения и, как следствие, к возрастанию сигнала эрбиевой 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. Pilpits, R.A. Rubtsova, N.S. Sokolov, V.B. Shmagin, M.V. Stepikhova, 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. Stepikhova, A.N. Yablonsky. *Towards the First Silicon Laser / Ed. L. Pavesi et al. Kluwer Academic Publ. (2003) P. 445–454.*
- [3] B.A. Andreev, W. Jantsch, Z.F. Krasil'nik, D.I. Kuritzyn, V.P. Kusnetsova, A.N. Yablonsky. *Proc. of ICPS-26. Edinburg (2002).*
- [4] F. Priolo, G. Franzo, S. Coffa, A. Carnera. *Phys. Rev. B* **57**, 8, 4443 (1998).
- [5] 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).
- [6] J. Wagner. *Phys. Rev. B* **29**, 29 (1983).
- [7] В.Б. Шмагин, Б.А. Андреев, А.В. Антонов, З.Ф. Кrasil'ник, В.П. Кузнецов, О.А. Кузнецов, Е.А. Ускова, С.А.А. Ammerlaan, G. Pensl. *ФТП* **36**, 178 (2002).