

Определение сечения возбуждения фотолюминесценции иона Er в кремнии в случае однородного и неоднородного оптического возбуждения

© Б.А. Андреев, З.Ф. Красильник, Д.И. Крижков[¶], В.П. Кузнецов, А.Н. Яблонский

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

(Получена 25 апреля 2011 г. Принята к печати 25 апреля 2012 г.)

Исследованы зависимости интенсивности фотолюминесценции иона эрбия в структурах Si:Er/Si в случае однородного (по поверхности образца) и неоднородного оптического возбуждения. Показано, что способ возбуждения существенно влияет на вид получаемых зависимостей. Обсуждается способ определения сечения возбуждения иона Er как при непрерывной, так и при импульсной оптической накачке. Полученное значение эффективного сечения возбуждения ионов эрбия в кремнии $\sigma = 5 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2$ (при температуре 8 К) на порядок превышает значения, известные из литературы.

1. Введение

В настоящее время кремний, легированный эрбием, рассматривается как один из потенциальных источников излучения на основе кремния с рабочей длиной волны 1.5 мкм. Одним из параметров, описывающих эффективность возбуждения эрбия в структурах Si:Er/Si, а соответственно и качество изготовленных структур, является сечение возбуждения иона Er при межзонной накачке [1,2]. Однако в большинстве работ не уделяется достаточно внимания однородности или неоднородности возбуждения фотолюминесценции (ФЛ) исследуемых структур, что, как будет показано далее, может приводить к некорректному определению сечения возбуждения иона Er.

В настоящей работе исследуются зависимости интенсивности эрбиевой ФЛ от мощности возбуждающего излучения при различных условиях межзонного оптического возбуждения (однородное и неоднородное по поверхности образца возбуждение, а также импульсное возбуждение). Также в работе обсуждается способ определения сечения возбуждения ФЛ иона Er в условиях как непрерывного, так и импульсного оптического возбуждения.

2. Эксперимент

Исследованные в работе структуры Si:Er/Si были выращены методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии [3] на подложке p -Si:В с ориентацией (100) и удельным сопротивлением 15 Ом·см. Слой Si:Er выращивался при температуре $\sim 580^\circ\text{C}$. Толщина слоя составляет ~ 1 мкм, концентрация ионов Er $\approx 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Измерения ФЛ структур проводились при температурах 8 и 77 К. Структуры демонстрировали интенсивную ФЛ на длине волны 1.534 нм. Вид спектра ФЛ соответствует излучению ионов Er, расположенных в SiO₂-подобных преципитатах [4]. Для возбуждения

структур использовались непрерывный Nd:YAG-лазер с длиной волны излучения 532 нм и импульсный оптический параметрический осциллятор (ОРО) с длительностью импульса 10 нс. При измерениях в условиях неоднородного возбуждения лазерный луч фокусировался в пятно размером меньше размера исследуемого образца. Для обеспечения однородности возбуждения лазерный луч расфокусировался так, что пятно возбуждения становилось больше образца, либо поверхность образца закрывалась и оставлялась открытой небольшая область, меньше пятна возбуждающего лазера.

3. Результаты и обсуждение

В случае однородного непрерывного возбуждения зависимость интенсивности ФЛ иона Er в кремнии от мощности возбуждения описывается выражением

$$I = \frac{I_0 P}{P_0 + P}, \quad (1)$$

где P_0 — характерная плотность мощности, соответствующая установлению насыщения ФЛ эрбия. Однако во многих экспериментах, в особенности при фокусировке возбуждающего излучения, латеральный размер исследуемой структуры может существенно превышать характерный размер пятна возбуждающего излучения. При этом плотность мощности излучения накачки, падающего на различные области исследуемого образца, может различаться на несколько порядков, и зависимость интенсивности ФЛ от мощности возбуждения будет существенно отличаться от выражения (1). Предположим, что плотность мощности в возбуждающем пучке распределена по закону Гаусса:

$$p(r) = \frac{P}{\pi r_0^2} \exp\left(-\frac{r^2}{r_0^2}\right), \quad (2)$$

где P — полная мощность в пучке, r — расстояние от оси пучка, r_0 — радиус пучка. Предположим также, что размер образца много больше r_0 . Тогда, подставляя (2)

[¶] E-mail: krizh@ipmras.ru

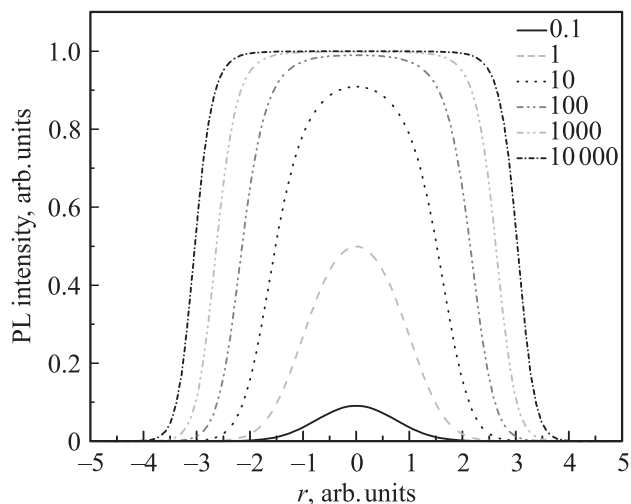


Рис. 1. Профили распределения интенсивности ФЛ (PL) ионов эрбия по поверхности структуры при возбуждении гауссовым пучком с $r_0 = 1$, для различных мощностей ($P/P_0 = 0.1, 1, 10, 100, 1000, 10000$), полученные с помощью формулы (3).

в (1), получаем интенсивность люминесценции, приходящуюся на единицу площади структуры:

$$I(r) = \frac{I_0 P \exp(-\frac{r^2}{r_0^2})}{P_0 + P \exp(-\frac{r^2}{r_0^2})}. \quad (3)$$

На рис. 1 представлены зависимости $I(r)$ при различных соотношениях P/P_0 . Видно, что при достижении определенного значения P ($P/P_0 = 100$ на рис. 1) люминесценция Er в центре пятна полностью насыщается. При дальнейшем увеличении мощности ФЛ насыщается для все больших значений r , однако для каких-то r она всегда продолжает расти. Проинтегрируем выражение (3):

$$I = 2\pi \int_0^\infty \frac{I_0 P \exp(-\frac{r^2}{r_0^2})}{P_0 + P \exp(-\frac{r^2}{r_0^2})} r dr \propto \ln\left(1 + \frac{P}{P_0}\right). \quad (4)$$

Полученное выражение в отличие от (1) не имеет насыщения и при $P \gg P_0$ логарифмически зависит от мощности возбуждающего излучения. На рис. 2 представлены зависимости интегральной интенсивности ФЛ от мощности накачки, рассчитанные по формулам (1) и (4) при одном и том же значении P_0 .

Нами было выполнено экспериментальное измерение зависимости интенсивности ФЛ от мощности возбуждения как в случае однородного возбуждения образца (размер образца $< r_0$), так и в случае неоднородного возбуждения (размер образца $> r_0$). Полученные результаты представлены на рис. 3. Видно, что экспериментальные зависимости качественно соответствуют расчетным кривым, приведенным на рис. 2.

По аналогии с сечением возбуждения ионов эрбия в диэлектрических матрицах SiO₂ и Al₂O₃ эффективное сечение возбуждения эрбия в кремнии σ определяется с помощью кинетического уравнения для концентрации возбужденных ионов эрбия [2]:

$$\frac{dN_{Er}^*}{dt} = \sigma(N_{Er} - N_{Er}^*)\Phi - \frac{N_{Er}^*}{\tau}, \quad (5)$$

где N_{Er} и N_{Er}^* — полная концентрация оптически активных и концентрация возбужденных ионов эрбия, Φ — поток фотонов возбуждающего излучения, τ — время жизни иона эрбия в возбужденном состоянии, в нашем случае ~ 1 мс.

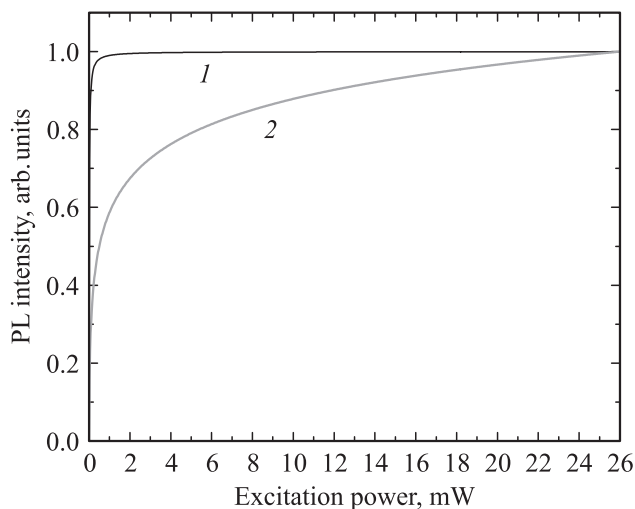


Рис. 2. Рассчитанные зависимости интенсивности ФЛ (PL) эрбия от мощности накачки (нормированные на 1) в условиях однородного (1) и неоднородного (2) оптического возбуждения структуры.

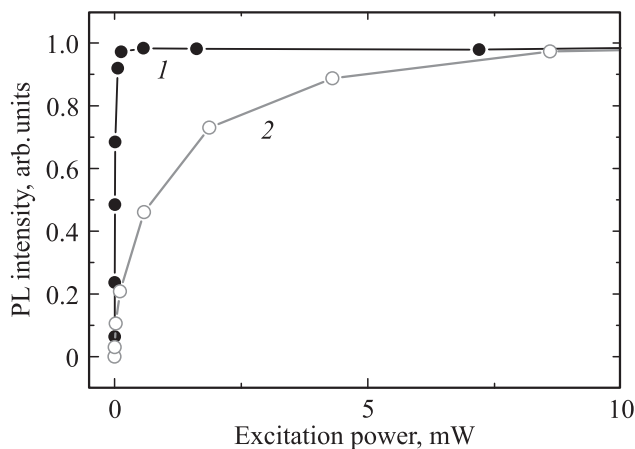


Рис. 3. Зависимости экспериментально измеренной интенсивности эрбиевой ФЛ (PL) от мощности оптической накачки (нормировано) в условиях однородного (1) и неоднородного (2) возбуждения структуры Si:Er/Si. Длина волны возбуждающего излучения $\lambda_{ex} = 540$ нм, температура измерения $T = 77$ К.

В условиях непрерывного возбуждения имеем:

$$I \propto N_{Er}^* = \frac{\sigma\tau\Phi}{1 + \sigma\tau\Phi} N_{Er}, \text{ или } I = \frac{I_0\sigma\tau\Phi}{1 + \sigma\tau\Phi}, \quad (6)$$

где I_0 — интенсивность эрбиевой ФЛ в условиях насыщения. Можно сказать, что σ соответствует величине $1/\tau\Phi_0$, где Φ_0 — поток, при котором возникает насыщение ФЛ. При температуре 8 К эффективное сечение возбуждения ионов эрбия составило $\sigma = 5 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2$, что на порядок превышает значения эффективного сечения возбуждения структур Si:Er/Si, полученных методами молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) и ионной имплантации, опубликованные ранее [5,6]. Отметим, что определенное в [7] значение $\sigma = (2-8) \cdot 10^{-12} \text{ см}^2$ позднее было признано авторами ошибочным [8].

Необходимо отметить, что в некоторых случаях выражением (6) пользуются также для аппроксимации зависимости интенсивности эрбиевой ФЛ от мощности возбуждения в случае неоднородного возбуждения. Как было показано выше, $I(P)$ в этом случае описывается выражением (4), и полученное из (6) значение сечения возбуждения иона Er будет значительно отличаться от реальной величины σ .

Интересным также представляется рассмотреть зависимость интенсивности ФЛ эрбия от мощности в случае импульсного возбуждения. Дело в том, что определение σ из зависимости интенсивности ФЛ от мощности возбуждения с использованием выражения (6) дает значение сечения возбуждения Er на несколько порядков меньше, чем значение σ при непрерывном возбуждении.

Рассмотрим уравнение (5) в случае, когда в нулевой момент времени на образец приходит возбуждающий импульс длительностью Δt . Решением уравнения будет

$$N_{Er}^*(t) = A \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{T}\right) \right] \text{ при } t < \Delta t, \quad (7a)$$

$$N_{Er}^*(t) = A \left[1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{T}\right) \right] \exp\left(-\frac{t - \Delta t}{\tau}\right) \text{ при } t > \Delta t, \quad (7b)$$

где

$$A = \frac{N_{Er}\sigma\tau\Phi}{1 + \sigma\tau\Phi}, \quad T = \frac{\tau}{1 + \sigma\tau\Phi}$$

Интегральную интенсивность ФЛ эрбия можно записать в виде двух частей:

$$I \propto \int_0^{\infty} N_{Er}^*(t) dt = \int_0^{\Delta t} N_{Er}^*(t) dt + \int_{\Delta t}^{\infty} N_{Er}^*(t) dt. \quad (8)$$

В случае, когда $\Delta t \ll \tau$, первой частью можно пренебречь (см. рис. 4) и тогда

$$I \propto \int_{\Delta t}^{\infty} N_{Er}^*(t) dt = \tau A \left[1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{T}\right) \right] \quad (9)$$

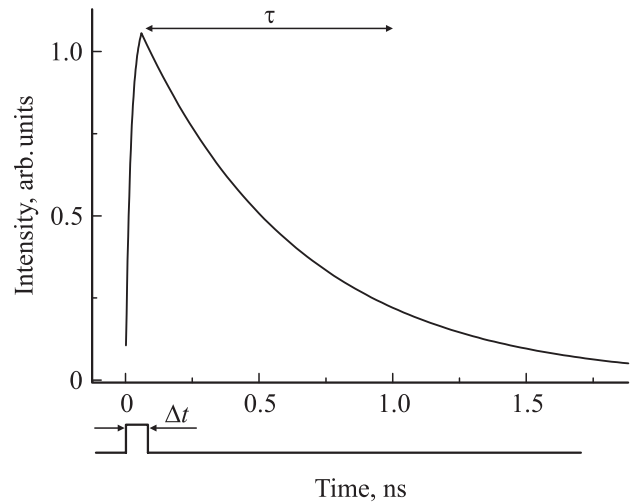


Рис. 4. Кинетика ФЛ Er при возбуждении импульсом лазера длительностью Δt . Видно, что при условии $\Delta t \ll \tau$, где τ — время спада люминесценции, при вычислении интегральной по времени интенсивности ФЛ можно пренебречь первой частью кинетики длительностью Δt .

или

$$I = \frac{I_0\sigma\tau\Phi}{1 + \sigma\tau\Phi} \left[1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau} (1 + \sigma\tau\Phi)\right) \right].$$

Множитель перед скобками насыщается при $\Phi \approx 1/\sigma\tau$, тогда как выражение в скобках насыщается при $\Phi \gg 1/\sigma\tau$ (так как $\Delta t \ll \tau$). Тогда в области насыщения

$$I = I_0 [1 - \exp(-\Delta t\sigma\Phi)], \quad (10)$$

и можно сказать, что σ соответствует величине $1/\Delta t \cdot \Phi_0$, где Φ_0 — поток, при котором возникает насыщение ФЛ.

На тех же образцах, для которых проводилось измерение при непрерывном возбуждении, были проведены измерения с импульсным возбуждением. Так как в нашем случае $\tau \approx 1 \text{ мс}$, а $\Delta t = 10 \text{ нс}$, выражение (10) вполне применимо. Полученное с помощью этой формулы значение сечения возбуждения $\sigma = 4.7 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2$ хорошо соответствует значению, полученному для непрерывного возбуждения.

4. Заключение

Проведенное исследование зависимостей интенсивности ФЛ эрбия в Si:Er-структурах от мощности возбуждения показало, что получаемый вид зависимости $I(P)$ кардинально меняется в зависимости от условий возбуждения. Так, использование выражения (6) для определения сечения возбуждения Er в случае неоднородного возбуждения образца будет давать значительно заниженные значения σ . Для получения корректных значений сечения возбуждения необходимо однородное

по поверхности возбуждение образца. Полученное нами при однородном возбуждении эффективное сечение возбуждения ионов эрбия составило $\sigma = 5 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2$, что на порядок превышает значения эффективного сечения возбуждения структур Si:Er/Si, полученных методами МЛЭ и ионной имплантации, опубликованные ранее. Также показано, что сечение возбуждения Er может быть определено из зависимости $I(P)$, полученной в условиях импульсного оптического возбуждения. Полученное при этом значение σ совпадает со значением σ , определенным в условиях непрерывного возбуждения.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, программ РАН и Министерства образования и науки (ГК 16.518.11.7018).

Список литературы

- [1] 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).
- [2] М.С. Бреслер, О.Б. Гусев, П.Е. Пак, Е.И. Теруков, И.Н. Яссьевич. ФТТ, **43**, 601 (2001).
- [3] П. Кузнецов, Р.А. Рубцова. ФТП, **34**, 519 (2000).
- [4] W. Jantsch, S. Lanzerstorfer, L. Palmetshofer, M. Stepikova, H. Preier. J. Luminesc., **80**, 9 (1999).
- [5] J. Palm, F. Gan, B. Zheng, J. Michel, L.C. Kimmerling. Phys. Rev. B, **54**, 17 603 (1996).
- [6] N.Q. Vinh, S. Minissale, H. Vrielinck, T. Gregorkiewicz. Phys. Rev. B, **76**, 085339 (2007).
- [7] O.B. Gusev, M.S. Brestler, P.E. Pak, I.N. Yassievich, M. Forcales, N.Q. Vinh, T. Gregorkiewicz. Phys. Rev. B, **64**, 075 302 (2001).
- [8] N.Q. Vinh, N.N. Ha, T. Gregorkiewicz. Proc. IEEE, **97** (7), 1269 (2009).

Редактор Л.В. Беляков

Determination of excitation cross section of Er photoluminescence in silicon in the case of homogeneous and inhomogeneous optical excitation

B.A. Andreev, Z.F. Krasilnik, D.I. Kryzhkov,
V.P. Kuznetsov, A.N. Yablonskiy

Institute for Physics of Microstructures,
Russian Academy of Sciences,
603950, GSP-105, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract In this work the dependence of the erbium photoluminescence intensity in the Si:Er/Si structures has been studied in the case of homogeneous and inhomogeneous optical excitation of the sample. It has been shown that uniformity of optical excitation significantly affects the obtained dependence. We discuss the way to determine the excitation cross section of Er ion in silicon both under continuous-wave and pulsed optical pumping. The obtained value of the effective excitation cross section of erbium ions in silicon $\sigma = 5 \cdot 10^{-14} \text{ cm}^2$ (at 8 K) is an order of magnitude higher than the values known from the literature.