

Эффективное сечение возбуждения фотолюминесценции и время жизни в возбужденном состоянии ионов Er^{3+} в многослойных селективно легированных Si:Er-структурах

© С.В. Гастев, А.М. Емельянов, Н.А. Соболев[¶], Б.А. Андреев*, З.Ф. Красильник*, В.Б. Шмагин*

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

* Институт физики микроструктур Российской академии наук,
603095 Нижний Новгород, Россия

(Получена 17 января 2003 г. Принята к печати 21 января 2003 г.)

Измерены эффективное сечение возбуждения фотолюминесценции и время жизни ионов эрбия в возбужденном состоянии для структур Si:Er/Si/Si:Er/Si.../Si, изготовленных в процессе сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии. Полученные результаты показывают, что значительное повышение интенсивности фотолюминесценции ионов эрбия в селективно легированном кремнии по сравнению с однородно легированным не связано с изменениями излучательного времени жизни, эффективного сечения возбуждения и времени жизни ионов эрбия в возбужденном состоянии.

1. Введение

Исследования фотолюминесценции (ФЛ) полупроводниковых структур, легированных редкоземельными элементами, направлены на создание новых источников излучения для оптоэлектроники. Многочисленные публикации посвящены люминесценции ионов эрбия в кремнии (см., например, [1–17]). Актуальными задачами в этой области остаются повышение интенсивности люминесценции ионов эрбия и эффективности возбуждения люминесценции. Метод молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) получения легированных эрбием кремниевых слоев [4–7] в настоящее время позволяет достигать значительной интенсивности ФЛ ионов эрбия при низких температурах. При исследовании структур, полученных методом сублимационной МЛЭ, было показано, что формирование периодически легированных структур, в которых слои чистого Si чередуются с наноразмерными слоями кремния, легированного эрбием, (Si:Er), позволяет значительно увеличить интенсивность ФЛ ионов эрбия по сравнению с однородно легированными [7,13]. Увеличение интенсивности ФЛ в таких структурах может быть обусловлено как увеличением концентрации возбуждаемых оптически активных центров, так и уменьшением излучательного времени жизни (τ_{rad}) ионов Er^{3+} по сравнению с однородно легированными структурами. Это заключение следует из того, что интенсивность ФЛ прямо пропорциональна количеству возбужденных ионов эрбия и обратно пропорциональна τ_{rad} [3,8]. Ответ на вопрос, какая из перечисленных причин является главной, до настоящего времени получен не был. Не определенными для таких структур оставались и параметры, характеризующие эффективное преобразования световой энергии: эффективное сечение возбуждения ФЛ ионов эрбия и эффективное время жизни ионов эрбия в возбужденном состоянии.

Цель настоящей работы — определение эффективного сечения возбуждения ФЛ ионов эрбия, кинетики спада фотолюминесценции ионов эрбия для периодически легированных Si:Er-структур и выделение наиболее вероятной из перечисленных выше причин, определяющей эффект повышения интенсивности ФЛ в периодически легированных структурах по сравнению с однородно легированными.

2. Экспериментальные условия

Эпитаксиальные структуры Si:Er/Si/Si:Er/.../Si были выращены методом сублимационной МЛЭ на кремниевых подложках, легированных бором, с удельным сопротивлением $10 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ и ориентацией (100) [7]. Чередующиеся эпитаксиальные слои Si:Er с концентрацией эрбия $\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (по данным вторично-ионной масс-спектрометрии для однородно легированных слоев, выращенных в аналогичных условиях) толщиной 4.5 нм и нелегированные слои Si толщиной 19 нм формировались в процессе сублимации разогреваемых током пластин поликристаллического Si, легированного эрбием, и монокристаллического Si с удельным сопротивлением $1000 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ соответственно. Температура подложки составляла 570°C . Структура содержала 94 (Si:Er)/Si-периода.

ФЛ возбуждалась при температуре 78 К излучением аргонового лазера, работающего на длине волны $\lambda = 488 \text{ нм}$. Для амплитудной модуляции излучения использовался электромеханический модулятор, обеспечивающий времена переключения $< 30 \text{ мкс}$. Излучение структур с поверхности фокусировалось линзовой системой на входную цель монохроматора и на его выходе регистрировалось неохлаждаемым диодом InGaAs с разрешением $\Delta\lambda = 3 \text{ нм}$ в диапазоне $\lambda = 1.0\text{--}1.65 \text{ мкм}$. При измерении кинетики спада ФЛ постоянная времени отклика приемника с системой регистрации не превышала 5 мкс.

[¶] E-mail: nick@sobolev.ioffe.ru

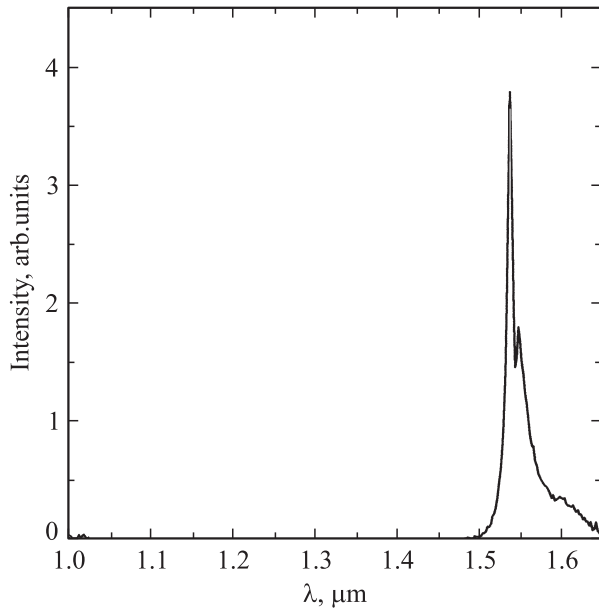


Рис. 1. Спектр фотолюминесценции структуры при 78 К.

3. Результаты и обсуждение

Спектр ФЛ образца при температуре 78 К показан на рис. 1. В исследованной области спектра наблюдается только пик с максимумом при $\lambda \approx 1.54$ мкм, обусловленный излучательными переходами электронов между уровнями $^4I_{13/2}$ (первое возбужденное состояние) и $^4I_{15/2}$ (основное состояние) ионов Er^{3+} , расщепленными в кристаллическом поле. Ранее исследования спектров ФЛ этих образцов были проведены на фурье-спектрометре BOMEM DA3.36 с разрешением до 0.5 см^{-1} при 4.2 К и опубликованы в [16] (образец 64). Было установлено, что доминирующим центром является хорошо известный комплекс Er с кислородом (центр Er-01 с наиболее интенсивными переходами при 6507 и 6472 см^{-1}), и отсутствуют принадлежащие краевым дислокациям так называемые D1 линии, положение которых, в отличие от спектральных линий Er-содержащих центров, зависит от температуры [17].

С ростом интенсивности возбуждающего света интенсивность ФЛ возрастала, стремясь к насыщению. На рис. 2 представлена экспериментальная зависимость интенсивности эрбиевой ФЛ при 78 К от плотности потока фотонов F аргонового лазера, проникающих в образец в единицу времени. Величина F определялась с учетом потерь в оптическом тракте и отражения от поверхности кремния. Согласно [8], зависимость интенсивности фотолюминесценции (PL) от F может быть описана формулой

$$PL = A\sigma_{eff}\tau F / (1 + \sigma_{eff}\tau F), \quad (1)$$

где σ_{eff} — эффективное сечение возбуждения ФЛ, τ — время жизни ионов эрбия в возбужденном состоянии, A — постоянная, не зависящая от σ_{eff} , τ и F . Для

кривой, аппроксимирующей экспериментальные результаты на рис. 2, величина $\sigma_{eff}\tau$, определенная по формуле (1), составила $\sim 6.8 \cdot 10^{-19} \text{ см}^2\text{с}$.

Для независимого определения времени жизни ионов эрбия в возбужденном состоянии и последующего вычисления на основании этой величины σ_{eff} в настоящей работе исследовалась кинетика спада ФЛ. Зависимость интенсивности ФЛ от времени t при мощности излучения аргонового лазера 10 мВт представлена на рис. 3.

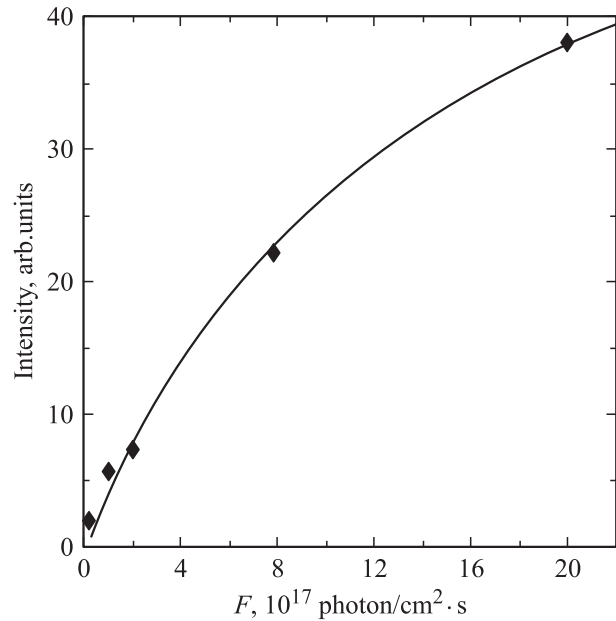


Рис. 2. Зависимость интенсивности ФЛ на $\lambda = 1.538$ мкм при 78 К от плотности потока фотонов F аргонового лазера, проникающих в образец в единицу времени.

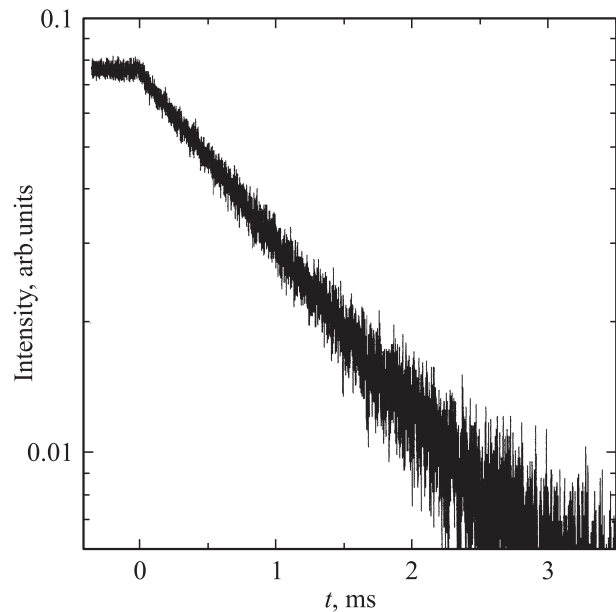


Рис. 3. Зависимость интенсивности ФЛ от времени после выключения подачи излучения аргонового лазера мощностью 10 мВт на образец.

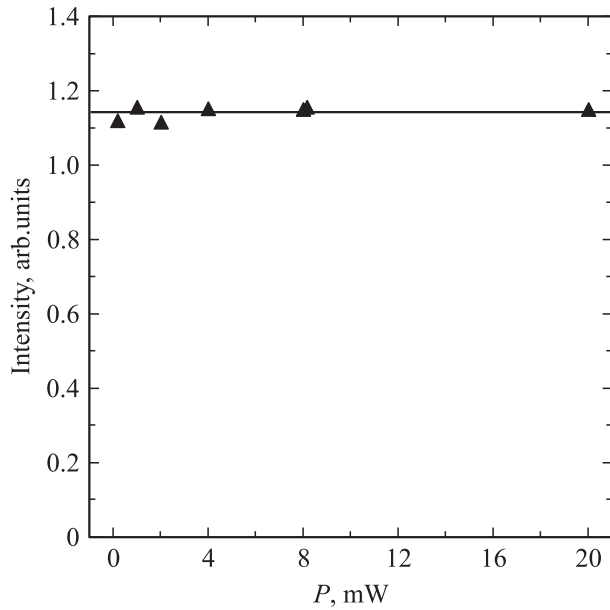


Рис. 4. Зависимость постоянной времени спада ФЛ ионов эрбия от мощности P излучения аргонового лазера.

Моменту времени $t = 0$ соответствует время выключения подачи излучения аргонового лазера на образец. Скорость убывания концентрации N_{Er}^* возбужденных ионов эрбия после выключения лазерного луча, как известно (см., например, [8,9]), описывается формулой

$$dN_{Er}^*/dt = -N_{Er}^*/\tau. \quad (2)$$

Решение уравнения (2):

$$N_{Er}^* = N_{Er}^* \exp(-t/\tau), \quad (3)$$

где N_{Er} — начальная концентрация возбужденных ионов эрбия. Поскольку интенсивность люминесценции прямо пропорциональна N_{Er}^* , постоянная времени τ_d спада сигнала ФЛ после выключения аргонового лазера равна времени жизни ионов эрбия в возбужденном состоянии. Как видно из рис. 3, кинетика спада люминесценции хорошо описывается экспоненциальной функцией с одной постоянной времени спада. Зависимость τ_d от мощности излучения аргонового лазера представлена на рис. 4. Практически τ_d не зависела от мощности излучения лазера в исследованном диапазоне мощностей и составляла $\sim 1.14 \pm 0.03$ мс. Эта величина близка к максимальной величине ($\tau_{max} \approx 2$ мс) времени жизни в возбужденном состоянии ионов эрбия, зарегистрированном в кремнии при неселективном легировании при $T = 15$ К [10]. Максимальная величина τ обычно достигается при достаточно низких температурах и в разных работах для однородно легированного кремния варьируется в пределах ~ 1 – 2 мс [10–12]. Причем величина τ практически постоянна при температурах, когда происходит вымерзание свободных носителей заряда (см., например, [11]). Поскольку все изученные к настоящему времени эффективные механизмы безызлучательного

девозбуждения ионов Er^{3+} в кремнии предполагают наличие температурной зависимости τ , многие исследователи полагают, что с большой долей вероятности $\tau_{max} \approx \tau_{rad}$. Измеренное нами при $T = 78$ К значение τ менее чем в 2 раза отличается от τ_{max} ($T = 15$ К) и очень близко к времени спада сигнала ФЛ (1.3 мс при $T = 78$ К) [14] в однородно легированных эпитаксиальных слоях Si:Er, выращенных методом сублимационной МЛЭ, в то время как интенсивность ФЛ в результате селективного легирования возросла почти на порядок величины [7,13]. Полученный результат показывает, что уменьшение излучательного времени жизни иона Er^{3+} не является доминирующим фактором повышения интенсивности ФЛ в периодически легированном кремнии по сравнению с однородно легированным.

Вычисленная на основании найденных значений $\sigma_{eff}\tau$ и τ величина σ_{eff} составила $\sim 0.6 \cdot 10^{-15}$ см² при $T = 78$ К, мощности излучения аргонового лазера до 20 мВт и диаметре сечения светового потока 1.5 мм. В литературе приведены значения эффективного сечения возбуждения иона Er^{3+} в однородно легированных слоях монокристаллического кремния, определенные для случая низких температур и малых мощностей накачки P : $\sigma_{eff} = 3 \cdot 10^{-15}$ см² ($T \approx 15$ К, $P < 1$ мВт, диаметр сечения светового потока 1 мм) [10] и $\sigma_{eff} = 5.2 \cdot 10^{-15}$ см² ($T \approx 4$ К, $P \approx 10$ мкВт) [11]. Учитывая уменьшение эффективного сечения возбуждения с ростом температуры и мощности накачки [10,11], можно полагать, что величина σ_{eff} для периодически легированных СМЛЭ структур близка к таковой для однородно легированных слоев.

4. Заключение

В работе впервые измерены эффективное сечение возбуждения ФЛ и время жизни ионов эрбия в возбужденном состоянии для периодических структур Si:Er/Si/Si:Er/Si.../Si, легированных в процессе сублимационной МЛЭ. Полученные результаты показывают, что значительное повышение интенсивности ФЛ ионов эрбия в периодически легированном кремнии по сравнению с однородно легированным не связано с изменениями излучательного времени жизни, эффективного сечения возбуждения и времени жизни ионов эрбия в возбужденном состоянии.

Работа частично поддержана РФФИ (гранты № 02-02-16374, № 02-02-16773), РФФИ Бюро научно-технического сотрудничества Австрии (грант № 01-02-02000 БНТС_a) и INTAS (грант 2001-0194).

Список литературы

- [1] Н.А. Соболев. ФТП, **29**, 1153 (1995).
- [2] A. Polman. J. Appl. Phys., **82**, 1 (1997).
- [3] S. Coffa, G. Franzo, F. Priolo. MRS Bulletin, Iss. 23, 25 (1998).

- [4] J. Stimmer, A. Reitinger, E. Neufeld, G. Abstreiter, H. Holzbrecher, U. Breuer, Ch. Buchal. *Thin Sol. Films*, **294**, 220 (1997).
- [5] R. Serna, J.H. Shin, M. Lohmeier, E. Vlieg, A. Polman, P.F.A. Alkemade. *J. Appl. Phys.*, **79**, 2658 (1996).
- [6] W.-X. Ni, K.B. Joelsson, C. X. Du, I.A. Buyanova, G. Pozina, W.M. Chen, G.V. Hansson, B. Monemar, J. Gardenas, B.G. Svensson. *Appl. Phys. Lett.*, **70**, 3383 (1997).
- [7] B. Andreev, V. Chalkov, O. Gusev, A. Emel'yanov, Z. Krasil'nik, V. Kuznetsov, P. Pak, V. Shabanov, V. Shengurov, V. Shmagin, N. Soboлев, M. Stepikhova, S. Svetlov. *Nanotechnology*, **13**, 97 (2002).
- [8] М.С. Бреслер, О.Б. Гусев, П.Е. Пак, И.Е. Тербуков, И.Н. Ясиевич. *ФТТ*, **43**, 601 (2001).
- [9] S. Coffa, G. Franzo, F. Priolo. *Appl. Phys. Lett.*, **69**, 2077 (1996).
- [10] F. Priolo, G. Franzo, S. Coffa, A. Carnera. *Phys. Rev.*, B, **57**, 4443 (1998).
- [11] J. Palm, F. Gan, B. Zheng, J. Michel, L.C. Kimerling. *Phys. Rev.*, B, **54**, 17 603 (1996).
- [12] P.B. Klein, G.S. Pomrenke. *Electron. Lett.*, **24**, 1503 (1988).
- [13] B.A. Andreev, Z.F. Krasil'nik, M.V. Stepikhova, A.N. Yablonsky, V.P. Kuznetsov, W. Jantsch, D.I. Kuritzyn. *Proc. 26th Int. Conf. Physics of Semicond.*, July 29–Aug. 2, 2002, Edinburgh (2003).
- [14] Б.А. Андреев, З.Ф. Красильник, В.П. Кузнецов, А.О. Солдаткин, М.С. Бреслер, О.Б. Гусев, И.Н. Ясиевич. *ФТТ*, **43**, 979 (2001).
- [15] O.B. Gusev, M.S. Bresler, P.E. Pak, I.N. Yassievich. *Phys. Rev. B*, **64**, 075 302 (2001).
- [16] M. Stepikhova, B. Andreev, V. Kuznetsov, Z. Krasil'nik, A. Soldatkin, V. Shmagin, M. Bresler. *Sol. St. Phenomena*, **82–84**, 629 (2002).
- [17] N.A. Soboлев, O.B. Gusev, E.I. Shek, V.I. Vdovin, T.G. Yugova, A.M. Emel'yanov. *Appl. Phys. Lett.*, **72**, 3326 (1998).

Редактор Л.В. Беляков

Effective cross section for photoluminescence excitation and lifetime of excited Er^{3+} ions in selectively doped multilayer Si:Er structures

S.V. Gasteв, A.M. Emel'yanov, N.A. Soboлев, B.A. Andreev, Z.F. Krasil'nik*, V. Shmagin**

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

* Institute for Physics of Microstructures,
Russian Academy of Science,
603095 Nizhnii Novgorod, Russia

Abstract An effective cross section for photoluminescence excitation and lifetime of erbium ions in an excited state have been determined in Si:Er/Si/Si:Er/Si.../Si structures fabricated by sublimation molecular beam epitaxy technique. The results obtained show that a remarkable enhancement of erbium ion photoluminescence intensity in selectively doped silicon, as compared with that in a uniformly doped silicon, is not connected with changes in the radiative lifetime, as well as with those in the effective cross section for excitation and lifetime of erbium ions in the excited state.