

Влияние локального окружения на кинетику спада фотолюминесценции Er в аморфном гидрогенизированном кремнии

© Е.И. Теруков, В.Х. Кудоярова, О.И. Коньков, Е.А. Константинова[†], Б.В. Каменев[†], В.Ю. Тимошенко[†]

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

[†]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119899 Москва, Россия

(Получена 25 июня 1999 г. Принята к печати 28 июня 1999 г.)

Впервые проведены исследования кинетики спада фотолюминесценции примеси Er в пленках аморфного гидрогенизированного кремния ($a\text{-Si:H(Er)}$), полученного двумя методами: сораспылением мишеней Si и Er с применением технологии разложения силана на постоянном токе в магнитном поле (MASD) и высокочастотным разложением силана. Источником Er во втором случае служил полимерный порошок Er(TMHD)_3 . Показано, что пленки $a\text{-Si:H(Er)}$, полученные методом MASD, имеют характерные времена спада фотолюминесценции Er при комнатной температуре $10 \div 15$ мкс, т.е. в 20 раз меньшие, чем в кристаллическом кремнии, легированном Er, ($c\text{-Si(Er,O)}$) при температурах жидкого азота. Для пленок $a\text{-Si:H(Er)}$, полученных высокочастотным разложением силана, времена спада фотолюминесценции Er составляют 2 мкс. Отличие во временах спада кинетики фотолюминесценции связывается с различным локальным окружением атомов Er в $a\text{-Si:H(Er)}$, полученном разными методами.

1. Введение

Интерес к исследованию фотолюминесценции (ФЛ) редкоземельных ионов (РЗИ) в твердых телах продиктован потенциальной возможностью создания светодиодов (light emitted diodes, LED), работающих при комнатной температуре и легко встраиваемых в интегральные системы при использовании дешевой кремниевой технологии. Наиболее интересным РЗИ является Er, излучение которого на длине волны 1.54 мкм попадает в минимум потерь оптического кварцевого волокна. Одним из важных параметров, характеризующих возможность использования того или иного полупроводникового материала для изготовления LED, является время жизни возбужденного состояния Er.

В кристаллическом кремнии, легированном Er и O методом имплантации, возбужденное состояние Er имеет большое время жизни — $1 \div 2$ мс, которое вызывает насыщение люминесценции при относительно низких интенсивностях. Это обстоятельство препятствует созданию эффективных люминесцентных структур на базе этого материала [1]. В последнее время большое внимание уделяется исследованию фото- и электролюминесцентных свойств $a\text{-Si:H}$, легированного эрбием ($a\text{-Si:H(Er)}$). Будучи легко встраиваемым в существующую кремниевую технологию, этот материал является перспективным для создания излучателей на длину волны 1.54 мкм.

Ранее нами были проведены исследования ФЛ Er в аморфном гидрогенизированном кремнии $a\text{-Si:H(Er,O)}$ в зависимости от температуры, частоты и мощности возбуждения. Было показано, что в таком материале интенсивность ФЛ Er с ростом температуры (T) от 4.2 до 300 К уменьшается всего на $20 \div 30\%$ [2,3], в то время как в кристаллическом кремнии, $c\text{-Si(Er,O)}$, она становится трудно детектируемой уже при температуре жидкого азота ($T = 77$ К) [4].

Хорошо известно, что в $c\text{-Si(Er,O)}$ ФЛ Er зависит от мощности возбуждения и является типичной для систем с конечным числом излучательных центров, имеющих большие времена жизни возбужденного состояния [5]. Наши предыдущие эксперименты на $a\text{-Si:H(Er)}$ показали, что насыщение ФЛ наступает при интенсивности возбуждения порядка 50 Вт/см^2 . Такие интенсивности насыщения превышают характерные для $c\text{-Si(Er,O)}$, и это давало основание считать, что время жизни возбужденного состояния Er в $a\text{-Si:H(Er,O)}$ является намного меньшим, чем в $c\text{-Si(Er,O)}$. Прямую информацию о времени жизни возбужденного состояния обычно получают из исследования кинетики спада ФЛ.

В настоящей работе впервые приводятся результаты исследования времени жизни возбужденного состояния Er в матрице $a\text{-Si:H}$, полученные из измерений кинетики спада ФЛ Er.

2. Методика эксперимента

Пленки $a\text{-Si:H(Er)}$ были получены двумя различными методами: методом сораспыления мишеней Si и Er с применением технологии разложения силана на постоянном токе (dc -разложение) в магнитном поле; использовался стандартный реактор, предназначенный для магнетронного распыления, однако вместо аргоно-водородной смеси использовали аргоно-кислородо-силановую смесь (magnetron assisted silane decomposition — MASD) [6]; методом высокочастотного (ВЧ) разложения силана; источником Er служил порошок Er(TMHD)_3 , нагретый до температуры более 160°C , подробно метод получения описан в работах [7,8].

Пленки выращивались на подложках из кварца и кристаллического кремния.

Состав пленок $a\text{-Si:H}$, т.е. содержание Er, O, C и H, определяли методами вторичной ионной масс-спектрометрии (SIMS) и резерфордовского обратного рассеяния (RBS). Чтобы установить наличие или отсутствие связей между атомами основной матрицы Si и легкими примесями O, C и H, а также вид этих связей использовалась инфракрасная (ИК) спектроскопия.

Исследования кинетики спада ФЛ Er проводились при возбуждении импульсами излучения азотного лазера с длиной волны $\lambda = 337$ нм, длительность импульса составляла 10 нс, мощность $P = 0.01$ мДж/см². Сигнал ФЛ выделялся монохроматором в максимуме полосы излучения. Регистрация сигнала осуществлялась охлаждаемым германиевым детектором с временем разрешения 0.3 мкс.

3. Экспериментальные результаты

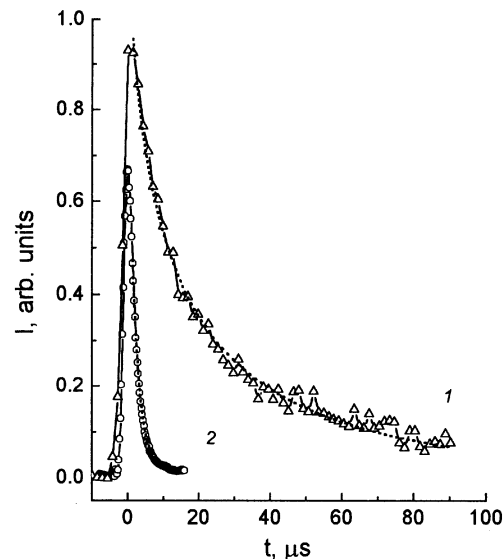
Типичные кривые спада интенсивности ФЛ (I) во времени (t) для образцов $a\text{-Si:H}\langle\text{Er}\rangle$, полученных методами MASD и ВЧ разложения силана, приведены на рисунке. Подробный анализ показал, что кривые спада нельзя аппроксимировать одной экспонентой от времени t . Наиболее хорошо спад ФЛ аппроксимируется "растянутой" экспонентой

$$I = I_0 \exp(-t/\tau)^b, \quad (1)$$

где τ — время жизни возбужденного состояния, а b — фактор неэкспоненциальности. Таким образом, если $b \approx 1$, то кинетика спада ФЛ близка к моноэкспоненциальной.

Аппроксимация экспериментально наблюдаемой кинетики выражением (1) показывает, что образцы, полученные методом MASD, имели характерные времена спада ФЛ десятки микросекунд ($10 \div 15$ мкс) и фактор неэкспоненциальности $b = 0.53$. Такое значение фактора неэкспоненциальности может свидетельствовать о возможности описания кинетики спада ФЛ двумя экспонентами и о наличии, как и в случае кристаллического кремния, легированного Er и O, двух излучательных центров. О возможности существования Er, имеющего разное локальное окружение, свидетельствуют результаты исследования с использованием эффекта Мессбауэра и ИК спектроскопии [9,10]. Мессбауэровские исследования показали, что в этих образцах часть атомов Er существует в конфигурации с локальным окружением, близким к Er_2O_3 , а часть в конфигурации ErSi_2 . Доля Er, окружение которого близко к Er_2O_3 , зависит от концентрации кислорода. На рисунке приведены результаты исследования кинетики спада ФЛ Er для образца MASD, оптимизированного по соотношению кислорода к эрбию, которое при этом составляло 10:1.

Для образцов $a\text{-Si:H}\langle\text{Er}\rangle$, полученных методом ВЧ разложения силана и легирования Er путем термического разложения полимерного порошка $\text{Er}(\text{TMHD})_3$, исследования кинетики спада ФЛ обнаружили, что времена жизни ФЛ могут быть еще меньше, ~ 2 мкс, и фактор неэкспоненциальности $b \sim 1$. Исследования



Кинетика спада ФЛ Er при комнатной температуре для пленок $a\text{-Si:H}\langle\text{Er}\rangle$, полученных методом MASD (1) и методом ВЧ разложения (2). $T = 300$ К. Точки — эксперимент, линии — аппроксимация выражением (1). Параметры аппроксимации: 1 — $\tau = 11.8$ мкс, $b = 0.53$; 2 — $\tau = 2.1$ мкс, $b \simeq 1$.

методами SIMS, RBS и ИК спектроскопии показали, что локальное окружение Er в этих образцах отличается от локального окружения Er в образцах, полученных методом MASD [7,10]. На основании того факта, что распределение C, O, H отслеживает распределение Er и не обнаруживается связей атомов основной матрицы Si с C, можно предположить, что Er находится в локальном окружении, представляющем остатки неразложившегося до конца полимера, используемого для легирования. Повидимому, Er находится в локальном окружении, симметрия которого ниже, чем в Er_2O_3 .

Заключение

В представленной работе впервые выполнены исследования кинетики спада ФЛ Er. Показано, что времена жизни возбужденного состояния Er при комнатной температуре в $a\text{-Si:H}\langle\text{Er}\rangle$, полученного методом MASD, составляют $10 \div 15$ мкс. Эти значения в 20 раз меньше, чем в кристаллическом кремнии при температурах жидкого азота.

Времена спада кинетики ФЛ Er могут быть еще меньше — (2 мкс) в $a\text{-Si:H}\langle\text{Er}\rangle$, полученном методом ВЧ разложения силана, что свидетельствует о влиянии локального окружения на кинетику спада фотолюминесценции.

Авторы выражают благодарность А.Н. Кузнецову за изготовление пленок $a\text{-Si:H}\langle\text{Er}\rangle$ методом MASD.

Работа выполнена при финансовой поддержке INCO-COPERNICUS (грант 977048-SIER).

Список литературы

- [1] S. Coffa, G. Franzo, F. Priolo, A. Polman, R. Serna. Phys. Rev. B, **49**, 16 313 (1994).
- [2] M.S. Bresler, O.D. Gusev, V.Kh. Kudoyarova, A.N. Kuznetsov, P.E. Pak, E.I. Terukov, I.N. Yassievich, B.P. Zakharchenya, W. Fuhs, A. Sturm. Appl. Phys. Lett., **67**, 3599 (1995).
- [3] W. Fuhs, I. Ulber, G. Weiser, M.S. Bresler, O.B. Gusev, A.N. Kuznetsov, V.Kh. Kudoyarova, E.I. Terukov, I.N. Yassievich. Phys. Rev. B, **56**(15), 9545 (1997).
- [4] F. Priolo, G. Franzo, S. Coffa, S. Libertino, R. Barkille, D. Carey. J. Appl. Phys. **78**, 3874 (1995).
- [5] M. Kechouane, N. Beldi, T. Mohammed-Brohim, H. L'Hardon, M. Salvi, M. Gauneau, P.N. Favennec. Mater. Res. Soc. Symp. Proc., **301**, 133 (1993).
- [6] V. Marakhonov, N. Rogachev, J. Ishkalov, J. Marakhonov, E.I. Terukov, V.E. Chelnokov. J. Non-Cryst. Sol., **137 & 138**, 817 (1991).
- [7] Е.И. Теруков, О.И. Коньков, В.Х. Кудоярова, О.Б. Гусев, Г. Вайзер. ФТП, **32**(8), 987 (1998).
- [8] Е.И. Теруков, О.И. Коньков, В.Х. Кудоярова, О.Б. Гусев, Г. Вайзер, Х. Кюне. ФТП, **33**(2), 208 (1999).
- [9] В.Ф. Мастеров, Ф.С. Насрединов, П.П. Серегин, В.Х. Кудоярова, А.Н. Кузнецов, И.Е. Теруков. Письма ЖТФ, **22**(12), 960 (1996).
- [10] В.Х. Кудоярова, А.Н. Кузнецов, Е.И. Теруков, О.Б. Гусев, Ю.А. Кудрявцев, Б.Я. Бер, Г.М. Гусинский, W. Fuhs, G. Weiser, Y.H. Kuehne. ФТП, **32**, 124 (1998).

Редактор Л.В. Шаронова

The influence of local surroundings on the time decay of the photoluminescence of erbium in an amorphous hydrogenated silicon

E.I. Terukov, V.Kh. Kudoyarova, O.I. Konkov,
E.A. Konstantinova[†], B.V. Kamenev[†],
V.Yu. Timoshenko[†]

Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

[†]Moscow State University,
119899 Moscow, Russia

Abstract In this work for the first time an investigation has been carried out of the time decay of erbium photoluminescence in an amorphous hydrogenated silicon, doped with erbium (*a*-Si:H⟨Er⟩). Films of *a*-Si:H⟨Er⟩ were prepared by two methods: by the co-sputtering Si and Er targets with the use of the technique of the magnetron assisted silane decomposition (MASD) and by the rf-plasma enhanced chemical vapor deposition (PECVD). In the second case the polymer powder of the Er(TMHD)₃ was used as a source of Er. It has been shown that *a*-Si:H⟨Er⟩ films prepared by MASD have the time of photoluminescence decay of 10–15 μs at the room temperature. These time decays are 20 times less than in a crystalline silicon doped with Er (*c*-Si⟨Er,O⟩) at the temperature of liquid nitrogen. The characteristic time of Er photoluminescence decay for an *a*-Si:H⟨Er⟩ prepared by the PECVD method are 2 μs. The difference in the time of Er photoluminescence decay may be related to the different local surroundings of Er atoms in an *a*-Si:H⟨Er⟩ prepared by the above-mentioned methods.