

Влияние температуры подложки и отжига на фотолюминесценцию эрбия на длине волны 1.54 мкм в пленках $a\text{-Si:H}$, полученных методом тлеющего разряда

© Е.И. Теруков, О.И. Коньков, В.Х. Кудоярова, О.Б. Гусев, Г. Вайзер*, Х. Кюне*

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

* Philipps-Universitat Marburg,
35032 Marburg, Germany

(Получена 13 июля 1998 г. Принята к печати 28 июля 1998 г.)

В пленках $a\text{-Si:H}$, легированных атомами Er через газовую фазу с использованием в качестве источника ионов Er порошка $\text{Er}(\text{TМНД})_3$, наблюдается эффективная фотолюминесценция Er при комнатной температуре. Показано, что условия осаждения пленок и их последующий отжиг влияют на интенсивность фотолюминесценции и ее температурную зависимость. Наблюдаемое поведение объясняется изменением структуры матрицы аморфного кремния в рамках механизма оже-возбуждения с участием дефектов.

Кремний, легированный эрбием, $a\text{-Si:H}$ (Er), представляет большой интерес в связи с перспективой создания на основе кремниевой электроники светодиодов на длину волны 1.54 мкм, попадающую в минимум полосы поглощения оптического волокна.

Недавно нами сообщалось о наблюдении при комнатной температуре эффективной фотолюминесценции ионов эрбия в пленках $a\text{-Si:H}$, полученных методом тлеющего разряда с использованием в качестве источника ионов Er порошка $\text{Er}(\text{TМНД})_3$ [1]. Интенсивность фотолюминесценции (ФЛ) полученных образцов была сравнима по величине с интенсивностью ФЛ Er образцов $a\text{-Si:H}(\text{Er})$, оптимизированных по концентрации атомов эрбия и кислорода, полученных нами ранее методом MASD [2].

В настоящей работе сообщается о влиянии температуры подложки и температурного отжига на ФЛ эрбия в пленках $a\text{-Si:H}(\text{Er})$, полученных методом тлеющего разряда с использованием в качестве источника ионов Er порошка $\text{Er}(\text{TМНД})_3$. Отжиг осуществлялся в вакууме при остаточном давлении $P = 10^{-6}$ Торр в диапазоне температур от комнатной до 500°C в течение часа. Изменение структуры пленок в процессе отжига исследовалось методами рамановской и инфракрасной (ИК) спектроскопии. Спектры ФЛ снимались при возбуждении аргоновым лазером на длине волны $\lambda = 514$ нм. Мощность возбуждения составляла 20 мВт. Схема регистрации ФЛ включала в себя двойной решеточный монохроматор и охлаждаемый германиевый фотоприемник. Состав полученных пленок, т.е. концентрации Er и O, а также профиль распределения этих элементов по толщине пленки исследовались с помощью резерфордского обратного рассеяния при облучении пленок ускоренными α -частицами с энергией 3.17 МэВ. Согласно этим данным Er и O равномерно распределялись по толщине образца и их концентрация составляла в исследуемых образцах $2.1 \cdot 10^{20}$ и $1.4 \cdot 10^{21}$ см^{-3} .

Согласно данным ИК спектроскопии отжиг образцов, полученных при комнатной температуре подложки, при-

водит к перестройке локальной структуры, связанной с CH_2 -, CH_3 -модами и колебаниями C–C-связей, что, однако, не влияет на распределение концентрации Er и O по толщине пленки.

На рис. 1 представлены спектры ФЛ пленок $a\text{-Si:H}$ (Er), полученных при разных температурах подложки. Спектры снимались при $T = 77$ К в диапазоне энергий, включающем все возможные излучательные переходы в исследуемых пленках. Как видно из рисунка, независимо от температуры подложки в пленках наблюдается ФЛ Er при энергии 0.805 эВ. Интенсивность ФЛ Er различалась несущественно и была в 1.5 раза больше в образцах, изготовленных при температуре подложки 200°C . Существенное отличие наблюдалось в поведении ФЛ, связанной с излучательной рекомбинацией матрицы. Так, образцы, полученные при комнатной температуре подложки, характеризуются широким максимумом ФЛ

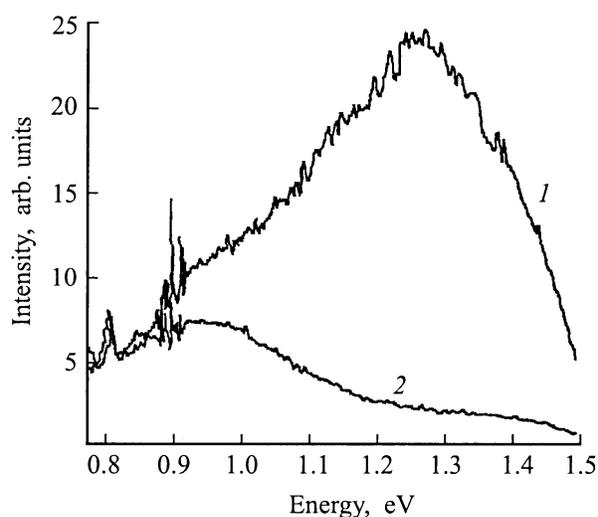


Рис. 1. Спектры ФЛ пленок $a\text{-Si:H}(\text{Er})$, полученных при температурах подложки 200 (1) и 20°C (2). Спектры нормированы на максимум ФЛ Er при 0.805 эВ.

в районе 0.95 эВ, характерным для ФЛ, связанной с дефектами. Образцы, полученные при температуре подложки 200°C, имеют максимум ФЛ в районе 1.25 эВ, связанный с собственной излучательной рекомбинацией из хвостов плотности состояний собственной зоны проводимости и валентной зоны [3]. "Дефектный" пик при 0.95 эВ выражен слабо. Набор линий в спектрах ФЛ в районе 0.9 эВ связан с влиянием атмосферы.

Температурные зависимости спектров ФЛ образца, полученного при температуре подложки 200°C, представлены на рис. 2. С увеличением температуры наблюдается резкое уменьшение интенсивности собственной полосы ФЛ. При температуре $T > 100$ К в спектрах доминирует полоса, связанная с излучательным переходом через дефекты в середине запрещенной зоны.

На рис. 3 представлены температурные зависимости интенсивности ФЛ Er для образцов, полученных при разных температурах подложки. В случае увеличения температуры подложки наблюдается усиление температурного гашения ФЛ Er, в результате чего при комнатной температуре интенсивность ФЛ образца, изготовленного при комнатной температуре подложки, становится выше интенсивности ФЛ образца, изготовленного при температуре подложки 200°C. Последнее обстоятельство связано, на наш взгляд, с влиянием ближайшего окружения атома Er на данный процесс. Известно, что ближайшее окружение оказывает существенное влияние на время жизни возбужденного состояния атома Er и дает вклад в механизм температурного гашения ФЛ Er. Как уже отмечалось [1], образцы, полученные при комнатной температуре подложки, обладают полимероподобной структурой, содержащей в окружении атома Er как C–H-связи, так и O–H-группы. Последние, по мнению авторов [4], определяют механизм температурного гашения в органических полимерах.

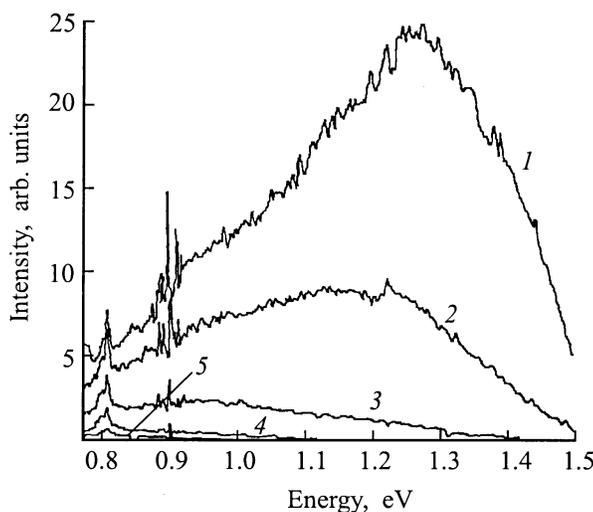


Рис. 2. Спектр ФЛ образца $a\text{-Si:H(Er)}$, полученного при температуре подложки 200°C. Температура измерения T , К: 1 — 77, 2 — 130, 3 — 190, 4 — 250, 5 — 310.

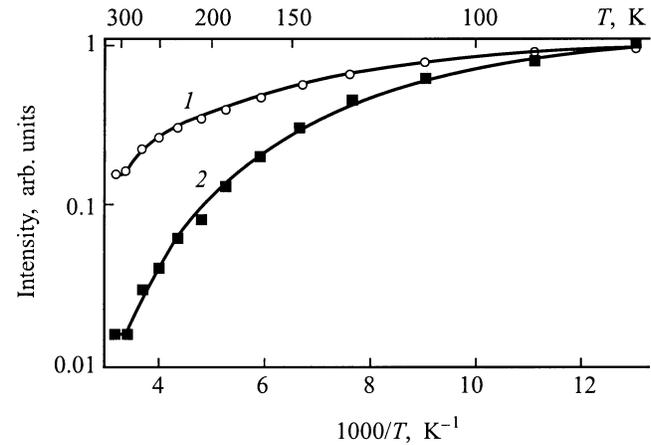


Рис. 3. Температурные зависимости интенсивности ФЛ Er для образцов $a\text{-Si:H(Er)}$, полученных при температурах подложки 20 (1) и 200°C (2).

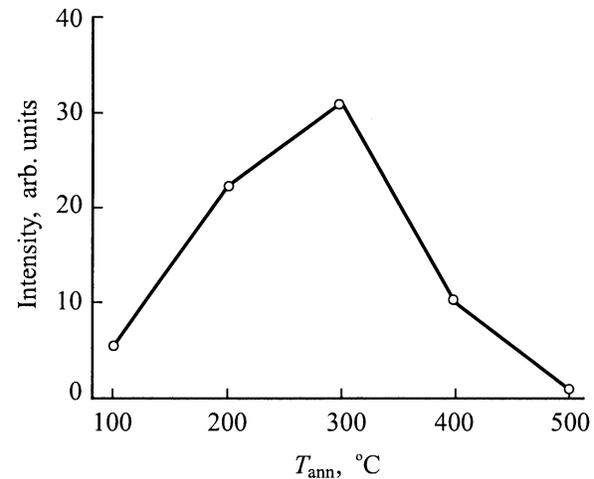


Рис. 4. Влияние температуры отжига T_{ann} на интенсивность ФЛ Er в образце, полученном при 20°C.

Влияние термического отжига на интенсивность ФЛ Er, измеренной при комнатной температуре, представлено на рис. 4. Наиболее существенное изменение ФЛ Er наблюдалось на образцах, полученных при комнатной температуре подложки. Отжиг этих образцов при температурах $T_{\text{ann}} \sim 300^\circ\text{C}$ приводил к увеличению интенсивности ФЛ Er почти в 30 раз, что можно объяснить перестройкой структуры пленок. Согласно данным ИК спектроскопии, отжиг в этом диапазоне температур приводит к уменьшению интенсивностей CH_2 -, CH_3 -мод и к исчезновению полос, отвечающих C–C-связям [1]. Эти изменения практически не сказываются на температурном ходе интенсивности ФЛ Er, что свидетельствует о незначительности влияния этого окружения на излучательное время жизни, но с другой стороны, говорит в пользу увеличения концентрации оптически активных ионов Er в ходе такой перестройки структуры.

Отжиг образцов при температурах $T_{\text{ann}} > 300^\circ\text{C}$ ведет к уменьшению интенсивности ФЛ Ег, что связано, на наш взгляд, с дальнейшей перестройкой структуры пленок. При повышении температуры отжига наблюдается эффузия водорода из пленок и происходит изменение ширины запрещенной зоны. По всей видимости, это меняет условия накачки ФЛ Ег в пленках $a\text{-Si:H}$, которая, согласно нашим представлениям, происходит за счет оже-процесса, связанного с захватом электрона из зоны проводимости дефектом в состоянии D^0 с образованием состояния D^- (электронный переход $D^0 + e \rightarrow D^-$) [5]. В дальнейшем за счет кулоновского взаимодействия энергия передается в систему f -электронов ионов эрбия, в которой осуществляется переход $^4I_{15/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$. Данный процесс носит в $a\text{-Si:H}$ резонансный характер благодаря близости энергий этих двух электронных переходов, и эффективность его будет уменьшаться с уменьшением ширины запрещенной зоны.

Аналогичная зависимость интенсивности ФЛ Ег от температуры отжига наблюдалась также и на пленках $a\text{-Si:H}$, полученных при температуре подложки 200°C , с той лишь разницей, что наблюдаемые изменения не носили столь резко выраженный характер. При оптимальной температуре отжига 300°C наблюдаемое увеличение ФЛ Ег составило лишь 1.5 раза. Последнее свидетельствует лишь о том, что структура этих пленок лучше сформирована и не содержит в себе полимерной компоненты, которая более подвержена перестройке в процессе отжига.

Таким образом, легирование пленок $a\text{-Si:H}$ атомами Ег в процессе плазмохимического осаждения с использованием в качестве источника эрбия порошка $\text{Er}(\text{TMND})_3$ является эффективным методом изготовления фотолуминесцирующих пленок на длину волны 1.54 мкм, что позволяет надеяться на изготовление электролюминесцентных структур на базе аморфных слоев в рамках этого метода.

Авторы благодарят Министерство науки России (проект 97-1036), РФФИ (грант 96-02-16931-а) и ЕС INCO-Cорегnicus (гранты 977048 и PL978104) за финансовую поддержку работы.

Список литературы

- [1] Е.И. Теруков, О.И. Коньков, В.Х. Кудоярова, О.Б. Гусев, Г. Вайзер. ФТП, **32**, 8 (1998).
- [2] M.S. Bresler, O.B. 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] R.A. Street. *Hydrogenated Amorphous Silicon* (Cambridge University Press, Cambridge, 1991).
- [4] L.H. Slooff, A. Polman, M.P. Oude Wolbers, F.C.J.M. van Veggel, D.N. Reinhoudt, J.W. Hofstraat. J. Appl. Phys., **83**, 497 (1998).
- [5] W. Fuhs, I. Ulber, G. Weiser, M.S. Bresler, O.B. Gusev, V.Kh. Kudoyarova, A.N. Kuznetsov, E.I. Terukov, I.N. Yassievich. Phys. Rev. B, **56**, 9545 (1997).

Редактор Л.В. Шаронова

The influence of annealing and substrate temperature on 1.54 μm photoluminescence of erbium in $a\text{-Si:H}$ films obtained by glow discharge method

E.I. Terukov, O.I. Kon'kov, V.Kh. Kudoyarova, O.B. Gusev, G. Weiser*, H. Kuehne*

A.F. Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St.Petersburg, Russia
* Philipps-Universitat Marburg,
35032 Marburg, Germany