

Фотолюминесценция эрбия в аморфном гидрогенизированном кремнии, легированном фосфором

© Е.И. Теруков, А.Н. Кузнецов, Е.О. Паршин*, G. Weiser#, Н. Kuehne#

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

*Институт микроэлектроники Российской академии наук,
150007 Ярославль, Россия

#Philips-Universität Marburg,
D-35032 Marburg, Germany

(Получена 5 декабря 1996 г. Принята к печати 25 декабря 1996 г.)

Исследована фотолюминесценция ионов Er в пленках $a\text{-Si:H}$, легированных фосфором. Наблюдаемое увеличение фотолюминесценции Er с увеличением концентрации дефектов в образцах, а также корреляция температурного хода интенсивностей фотолюминесценции Er и фотолюминесценции, связанной с дефектами, объясняются в рамках модели возбуждения ионов Er в результате оже-рекомбинации с участием дефектов.

В последнее время усиленное внимание уделяется фото- и электролюминесценции редкоземельных ионов (РЗИ) в полупроводниковых материалах, обусловленное возможностью электронной накачки РЗИ [1]. Наибольший интерес представляет кремний, легированный эрбием, в связи с перспективой создания излучателей на длину волны 1.54 мкм, что соответствует минимуму поглощения оптического волокна. Недостатком кристаллического кремния, легированного эрбием, является сильное температурное гашение люминесценции, что связано с механизмом возбуждения эрбия в этом материале. Возбуждение ионов эрбия осуществляется при оже-рекомбинации экситонов, связанных на мелких донорных уровнях с энергией активации $100 \div 200$ мэВ [2,3].

Недавно нами наблюдалась эффективная фотолюминесценция ионов эрбия при комнатной температуре в аморфном гидрогенизированном кремнии, полученном методом MASD (Magnetron assisted silane decomposition) [4,5]. Эффективное свечение эрбия в

этом материале объясняется нами другим механизмом возбуждения, именно захватом электронов матрицы на состояния дефектов в середине запрещенной зоны $a\text{-Si:H}$ с передачей энергии в f -оболочку ионов эрбия за счет кулоновского взаимодействия (модель оже-рекомбинации с участием дефектов [6]).

В настоящей работе осуществлено исследование фотолюминесценции ионов эрбия в образцах $a\text{-Si:H}$, легированных фосфором, введение которого изменяет исходную ситуацию в образцах $a\text{-Si:H}$, а именно ведет к увеличению концентрации дефектов и сдвигает уровень Ферми. Влияние этих факторов на фотолюминесценцию эрбия обсуждается в рамках ранее предложенной модели.

Пленки $a\text{-Si:H}$, легированные фосфором, напылялись на кварцевые подложки путем разложения SiH_4 и PH_3 в плазме тлеющего разряда при следующих параметрах процесса: температура подложки $T_s = 250^\circ \text{C}$, рабочее давление в камере $p = 0.1$ мбар, удельная мощность

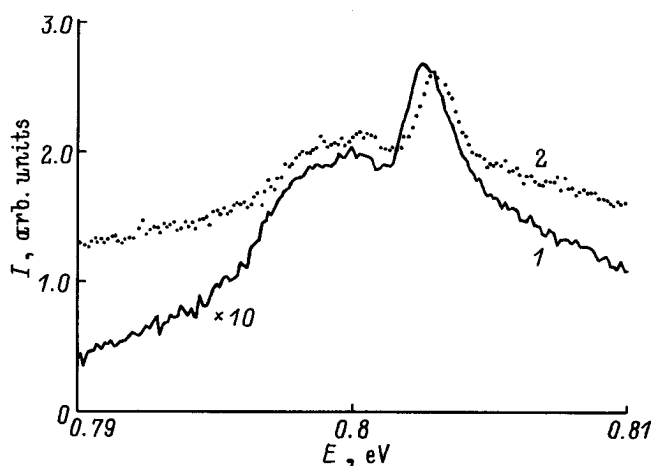


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции ионов Er при комнатной температуре для образцов $a\text{-Si:H}$ с различной концентрацией фосфора. Концентрация фосфина в газовой фазе, ppm: 1 — 1, 2 — 100.

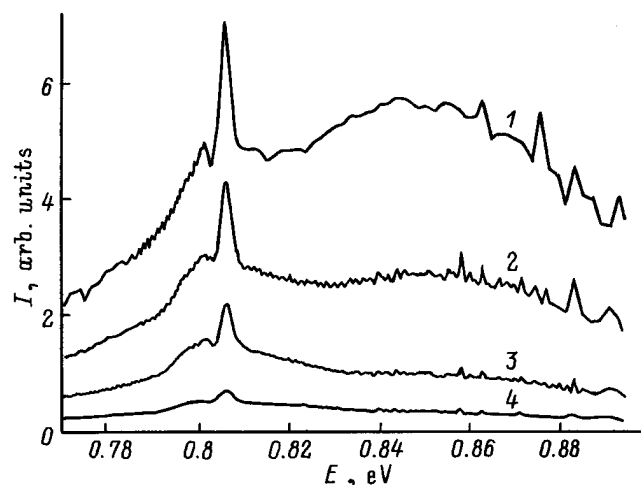


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции образцов $a\text{-Si:H(Er)}$, полученные при концентрации фосфина в газовой фазе 100 ppm. Температура T, K : 1 — 77, 2 — 130, 3 — 200, 4 — 295.

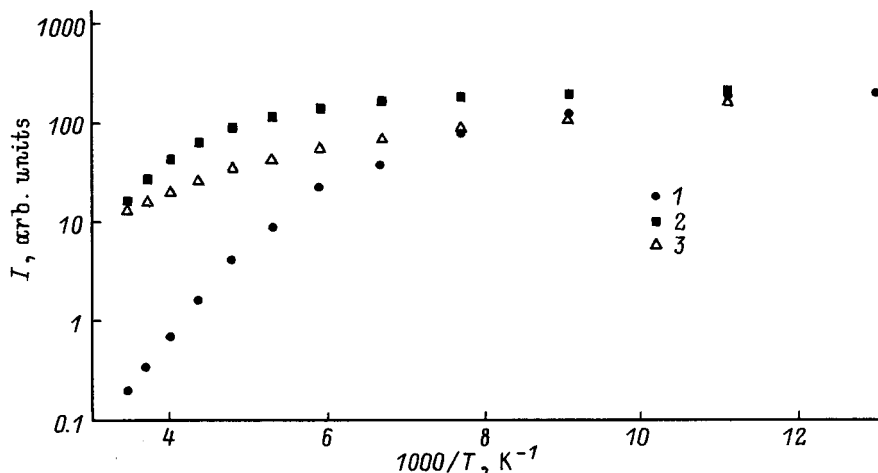


Рис. 3. Температурные зависимости интенсивностей собственной фотолюминесценции (1), фотолюминесценции Er (2) и фотолюминесценции, обусловленной дефектами, (3) в образце $a\text{-Si:H(Er)}$, легированном фосфором. Концентрация фосфина в газовой фазе 100 ppm.

разряда $P = 50 \text{ мВт/см}^2$. Толщина исследуемых образцов составляла 0.8 мкм. Исследовались образцы, полученные при концентрации фосфина PH_3 в газовой фазе 1 и 100 ppm. Согласно данным электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) и электрических измерений энергия уровня Ферми и концентрация дефектов для первого образца составляли 0.47 эВ и $6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, а для второго 0.26 эВ и $3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ соответственно. Введение эрбия осуществлялось методом ионной имплантации с энергией ионов 1.2 МэВ при дозе 10^{14} см^{-2} . Спектры фотолюминесценции измерялись при возбуждении излучением аргонового лазера с длиной волны $\lambda = 544 \text{ нм}$ в диапазоне температур от 77 до 300 К. Мощность возбуждения составляла во всех случаях 50 мВт. Детектирование фотолюминесценции осуществлялось охлаждаемым до азотной температуры германиевым детектором с использованием двойного монохроматора SPEX-1403.

Исследования показали отсутствие в образцах после имплантации фотолюминесценции эрбия, что находится в согласии с данными [7]. Фотолюминесценция появляется после отжига образцов в вакууме при температуре 350°С в течение 2 ч.

На рис. 1 представлены спектры фотолюминесценции (I) эрбия при комнатной температуре для двух образцов $a\text{-Si:H}$ с различной концентрацией фосфора. Обращает на себя внимание, что с увеличением концентрации фосфора в исходной пленке происходит небольшой сдвиг положения максимума фотолюминесценции эрбия в сторону больших энергий (E), связанный, на наш взгляд, с изменением локального окружения иона эрбия. Также наблюдается увеличение интенсивности фотолюминесценции эрбия (примерно на порядок) при увеличении концентрации фосфора в образцах.

На рис. 2 приведены спектры фотолюминесценции образцов $a\text{-Si:H(Er)}$, полученных при концентрации фосфина 100 ppm в более широком спектральном диапазоне при различных температурах. На этих спектрах наряду с

фотолюминесценцией Er отчетливо проявляется полоса фотолюминесценции в районе 0.85 эВ, связанная с дефектами. С увеличением температуры происходит как уменьшение интенсивности фотолюминесценции Er, так и уменьшение фона от полосы, обусловленной дефектами, на котором наблюдается фотолюминесценция Er.

На рис. 3 представлены температурные зависимости интенсивностей собственной фотолюминесценции в $a\text{-Si:H}$, фотолюминесценции Er и фотолюминесценции, обусловленной дефектами. Интересно отметить наличие корреляции в температурном поведении фотолюминесценции, обусловленной дефектами, и фотолюминесценции Er, что свидетельствует, на наш взгляд, в пользу возбуждения ионов эрбия через дефекты.

Наши исследования фотолюминесценции образцов $a\text{-Si:H(Er)}$, полученных методом MASD, показали, что возбуждение фотолюминесценции Er происходит за счет оже-процесса. Согласно этим представлениям, электрон из зоны проводимости захватывается дефектом в состоянии D^0 с образованием состояния D^- и за счет кулоновского взаимодействия энергия передается в систему f -электронов эрбия, в которой осуществляется переход $^4I_{15/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$. Данный процесс оказывается эффективным процессом возбуждения благодаря близости энергий этих электронных переходов.

В рамках этих представлений легко объясняются, на наш взгляд, полученные экспериментальные результаты по фотолюминесценции Er в пленках $a\text{-Si:H}$, легированные фосфором. Возбуждение оптически активного атома Er возможно лишь при наличии в непосредственной близости с ним дефекта. Увеличение концентрации атомов фосфора при неизменной концентрации атомов Er ведет к увеличению концентрации дефектов и, как следствие, к увеличению фотолюминесценции Er за счет увеличения вероятности оже-процесса возбуждения f -электронов атомов Er. С другой стороны, с увеличением температуры возрастает вероятность термической активации элек-

трона в зону с последующей безызлучительной рекомбинацией через дефект. Наблюдаемая в эксперименте корреляция между температурными зависимостями фотолюминесценции Er и фотолюминесценции, обусловленной дефектами, (см. рис. 3) подтверждает это предположение и не противоречит модели возбуждения атомов Er в результате оже-рекомбинации с участием дефектов.

Авторы благодарят Министерство науки Российской Федерации (проект 1В.О1.1НС), Российский фонд фундаментальных исследований (грант 9502-04163-а, грант 96-02-17901-а), а также Volkswagen Stiftung (проект № 1/71 646) за финансовую поддержку работы.

Список литературы

- [1] *Rare Earth Doped Semiconductors*, ed. by G.S. Pomrenke et al. [Mater. Res. Soc. Simp. Proc. (1993) v. 301].
- [2] S. Coffa, G. Franzo, F. Priolo, A. Polman, R. Serna. Phys. Rev. B, **49**, 16313 (1994).
- [3] B. Zheng, J. Michel, F.Y.G. Ren, L.C. Kimerling, D.C. Jacobson, J.M. Poate. Appl. Phys. Lett., **64**, 2842 (1994).
- [4] 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).
- [5] V. Marakhonov, N. Rogachev, J. Ishkalov, J. Marakhonov, E. Terukov, V. Chelnokov. J. Non-Cryst. Sol., **137/138**, 817 (1991).
- [6] М.С. Бреслер, О.Б. Гусев, Б.П. Захарченя, В.Х. Кудоярова, А.Н. Кузнецов, Е.И. Теруков, В. Фус, И.Н. Яссиевич. ФТТ, **38**, 1189 (1996).
- [7] Jung H. Shin, R. Serna, G.N. van den Hoven, A. Pollman, W.G.J.H.M. van Sark, A.M. Vredenberg. Appl. Phys. Lett., **68**, 997 (1996).

Редактор Л.В. Шаронова

Erbium photoluminescence in an amorphous hydrogenated phosphorus-doped silicon

E.I. Terukov, A.N. Kuznetsov, E.O. Parshin*, G. Weiser#, H. Kuehne#

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

*Institute for Microelectronics,
Russian Academy of Sciences,
150007 Yaroslavl, Russia

#Philips-Universität Marburg,
D-35032 Marburg, Germany