

## ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ЭРБИЯ В АМОРФНОМ ГИДРОГЕНИЗИРОВАННОМ КРЕМНИИ ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

© М.С.Бреслер, О.Б.Гусев, Б.П.Захарченя, В.Х.Кудоярова,  
А.Н.Кузнецов, Е.И.Теруков, В.Фус\*, И.Н.Ясевич

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе,  
194021 С.-Петербург, Россия

\*Philipps-Universität Marburg, D-35032 Marburg, Germany  
(Поступила в Редакцию 23 октября 1995 г.)

В полупроводниковой структуре, состоящей из слоя аморфного кремния, легированного эрбием и нанесенного на подложку из кристаллического кремния *n*-типа, наблюдалась электролюминесценция при комнатной температуре. При смещении гетероперехода аморфный кремний-кристаллический кремний в обратном направлении (знак «минус» на подложке) наблюдается линия излучения ионов эрбия, соответствующая переходам в *f*-оболочке; при смещении в прямом направлении — линия излучения свободного экситона в кристаллическом кремнии. Показано, что механизм возбуждения электролюминесценции обусловлен электронами аморфной матрицы при захвате их на  $D^0$ -центры с передачей энергии в *f*-оболочку ионов эрбия за счет кулоновского взаимодействия.

На основе твердотельных матриц с редкоземельными ионами (РЗИ) созданы разнообразные лазеры с оптической накачкой. В последнее время возник большой интерес к исследованию редкоземельных ионов в полупроводниковых материалах, вызванный возможностью в этом случае электронной накачки РЗИ. Наибольший интерес представляет кремний, легированный эрбием, в связи с перспективой создания на основе кремниевой электроники светодиодов на длину волны  $1.54 \mu\text{m}$ , попадающую в минимум поглощения оптического волокна.

В этой системе в настоящее время реализованы светодиоды, эффективно работающие при азотных температурах [1]. Основу светоизлучающих структур составляет кристаллический кремний, коимплантированный эрбием и кислородом. Следует отметить, что фотолюминесценция и электролюминесценция таких структур проявляют сильное температурное гашение, поэтому эффективность излучения при комнатной температуре слабая. Это связано с тем, что возбуждение ионов эрбия в кристаллическом кремнии осуществляется при Оже-рекомбинации экситонов, связанных на относительно мелких донорных уровнях с энергией активации 100–200 meV, которые появляются при имплантации эрбия.

Недавно нами наблюдалась эффективная фотолюминесценция ионов эрбия в аморфном гидрогенизированном кремнии ( $a\text{-Si:H(Er)}$ ) при

комнатной температуре [2]. В настоящей работе мы впервые наблюдали электролюминесценцию  $a\text{-Si:H(Er)}$  на длине волн  $\sim 1.53 \mu\text{m}$  ( $\sim 810 \text{meV}$ ) при комнатной температуре и определили механизм возбуждения электролюминесценции, связанный с излучательным переходом  $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$  электронов внутренней оболочки иона эрбия.

## 1. Приготовление структур и методика измерения электролюминесценции

Светоизлучающая структура представляла собой слой  $a\text{-Si:H(Er)}$  толщиной  $0.5 \mu\text{m}$  и диаметром  $1 \text{mm}$ , напыленный на подложку из кристаллического кремния  $n$ -типа с концентрацией  $5 \cdot 10^{17} \text{cm}^{-3}$ . Слой  $a\text{-Si:H(Er)}$  наносился методом магнетронного распыления, активированного плазмохимическим разложением силана [3]. Эрбий вводился в процессе распыления. Концентрация эрбия в пленке по данным метода Резерфордского обратного рассеяния составляла  $\sim 1 \cdot 10^{20} \text{cm}^{-3}$  (оптимальная концентрация, определенная нами из исследования фотолюминесценции при комнатной температуре). В качестве омического контакта к пленке  $a\text{-Si:H(Er)}$  использовалась пленка термически напыленного алюминия. Вид структуры схематически представлен на вставке к рис. 1.

Электролюминесценция исследовалась при пропускании через структуру импульсов тока прямоугольной формы на частоте  $25 \text{Hz}$  как при прямом, так и при обратном напряжении смещения. Прямым смещением считалось тогда, когда потенциал подложки  $n$ -типа был отрицательным по отношению к алюминиевому контакту на пленке  $a\text{-Si:H(Er)}$ . Излучаемый свет собирался системой линз с обратной стороны кремниевой подложки. Схема регистрации включала в себя двойной решеточный спектрометр и охлаждаемый германиевый фотоприемник.

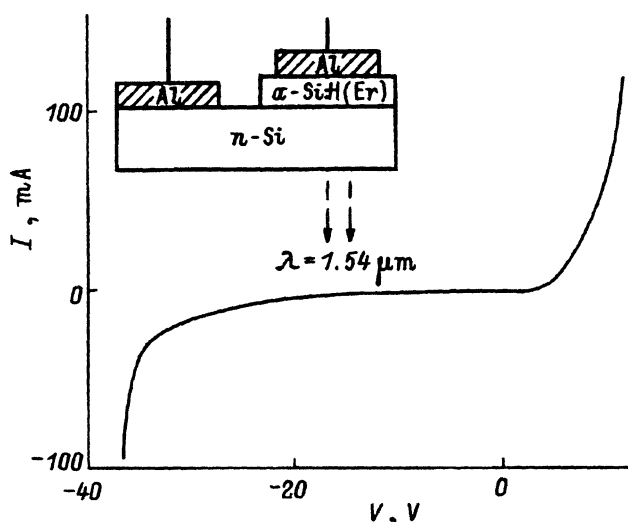


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика структуры  $a\text{-Si:H(Er)-c-Si}$   $n$ -типа при  $T = 300 \text{K}$ .

На вставке — схематическое поперечное сечение исследуемой структуры.

## 2. Результаты

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) светоизлучающей структуры при  $T = 300\text{ K}$ , приведенная на рис. 1, имеет характерный диодный вид. На рис. 2 представлены спектры электролюминесценции структуры, полученные при обратном смещении для тока 20 (a) и 100 мА (b). Как видно из этого рисунка, одновременно наблюдаются две линии. Узкая, слабо расщепленная линия с энергией вблизи 807 мэВ соответствует известному переходу  ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$  4f-электронов иона  $\text{Er}^{3+}$ . Значительно более широкая линия с максимумом  $\sim 870\text{ мэВ}$  является характерной линией дефектной люминесценции a-Si:H, которую обычно связывают с излучательным переходом  $D^0 + e \rightarrow D^-$  [4]. При приложении прямого напряжения смещения в спектре электролюминесценции наблюдается только линия с энергией  $\sim 1070\text{ мэВ}$ , соответствующая энергии рекомбинации свободного экситона кристаллического кремния при комнатной температуре.

Положение максимума линии люминесценции эрбия зависит от тока, пропускаемого через структуру. На рис. 3 представлены спектры электролюминесценции ионов эрбия, полученные при двух различных значениях тока. Для сравнения показан также спектр фотолюминесценции той же структуры, полученный при накачке аргоновым лазером с мощностью  $\sim 50\text{ мВт}$ . Видно, что с ростом тока линия излучения ионов эрбия сдвигается в сторону более высоких энергий, причем величина этого смещения относительно максимума линии фотолюминесценции  $\Delta(\hbar\omega)$  для тока  $\sim 20\text{ мА}$  составляет  $\sim 3\text{ мэВ}$  ( $\Delta(\hbar\omega)/\hbar\omega \sim 0.004$ ).

На рис. 4 приведены зависимости интенсивности эрбиевой люминесценции при обратном смещении (a) и свободного экситона при прямом смещении (b) от тока через структуру. Как видно из этого рисунка, интенсивность люминесценции ионов эрбия имеет тенденцию к насыщению с ростом уровня возбуждения, что обычно наблюдается для ионов эрбия, внедренных в различные полупроводниковые матрицы. Насыщение может быть связано как с большим временем жизни возбужденного иона эрбия, так и с конечной концентрацией оптически активных центров. Интенсивность линии свободного экситона монотонно возрастает по закону, слабо отличающемуся от линейного.

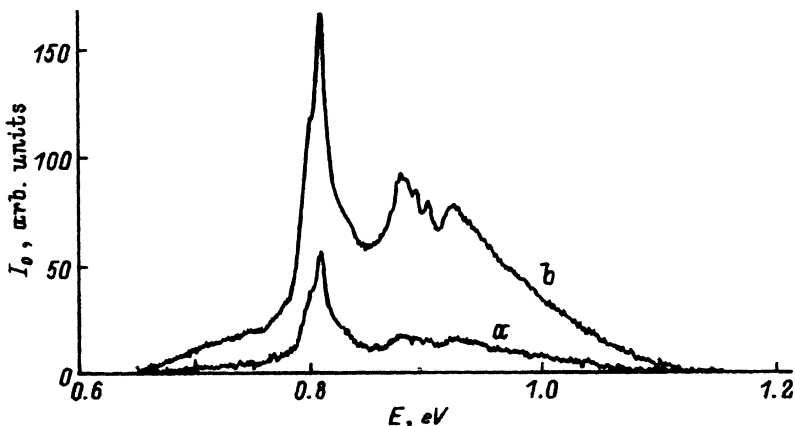


Рис. 2. Спектры электролюминесценции структуры a-Si:H(Er)-c-Si при обратном смещении.

$I(\text{mA})$ : a — 20, b — 100.

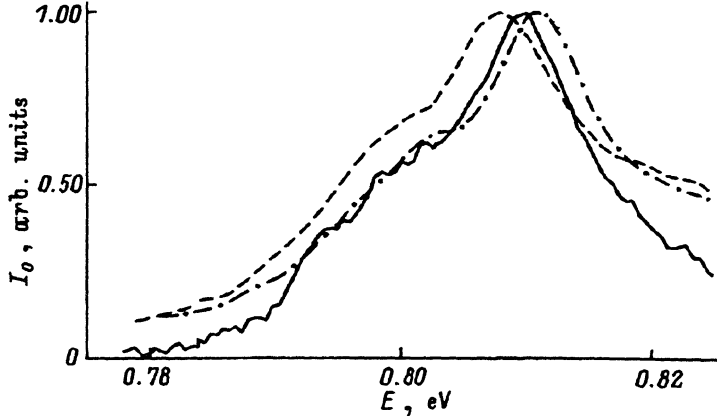


Рис. 3. Смещение максимума линии люминесценции ионов эрбия при возрастании тока через структуру аморфный-кристаллический кремний. Сплошная линия — спектр при токе 5 мА, штрихпунктирная — спектр при токе 20 мА. Штриховая линия показывает спектр фотолюминесценции в отсутствие эффекта Штарка.

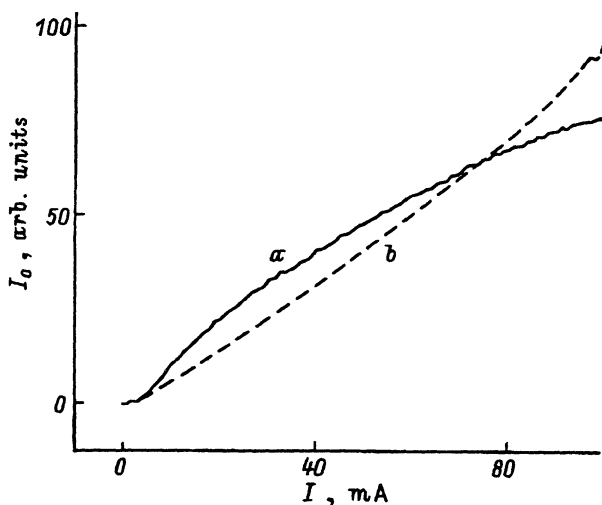


Рис. 4. Зависимость интенсивности эрбиевой люминесценции при обратном смещении (а) и люминесценции свободных экситонов при прямом смещении (б) от тока через структуру.  $T = 300$  К.

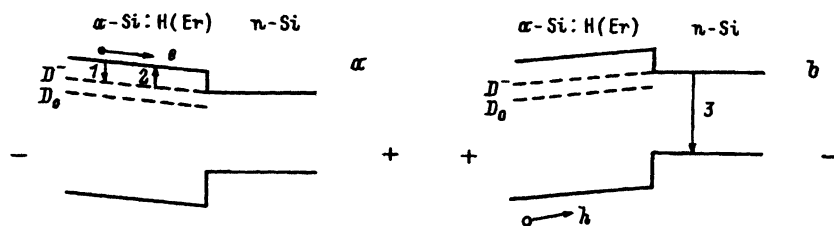


Рис. 5. Схематические зонные диаграммы структуры  $a\text{-Si:H(Er)-c-Si}$  при обратном (а) и прямом смещении (б).

1 — переход  $D^0 + e \rightarrow D^-$ , 2 — термическая ионизация  $D^-$ -центров в сильном электрическом поле (процесс  $D^- \rightarrow D^0 + e$ ), 3 — излучательная рекомбинация экситона в подложке кремния.

### 3. Обсуждение

Наблюдение электролюминесценции ионов эрбия в аморфном кремнии свидетельствует о том, что происходит возбуждение ионов эрбия свободными носителями заряда, проходящими через слой аморфного кремния. Наши исследования фотолюминесценции  $a\text{-Si:H(Er)}$  показали, что накачка эрбиевой люминесценции происходит за счет Оже-процесса (результаты исследования фотолюминесценции будут опубликованы в отдельной работе). При этом электрон из зоны проводимости захватывается дефектом в состоянии  $D^0$  с образованием состояния  $D^-$  (электронный переход  $D^0 + e \rightarrow D^-$ ), и 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 оказывается эффективным процессом возбуждения благодаря близости энергий двух соответствующих электронных переходов. Следовательно, для возбуждения ионов эрбия в  $a\text{-Si:H(Er)}$  при накачке током необходимы два условия: первое — наличие в зоне проводимости подвижных электронов, второе — эффективный обратный процесс перевода  $D^-$ -центров, образующихся при Оже-возбуждении ионов эрбия, в  $D^0$ -центры. Это может быть достигнуто, например, приложением сильного электрического поля, значительно ускоряющего процесс термической ионизации  $D^-$ -центров. Поэтому для наблюдения электролюминесценции достаточно поместить в сильное электрическое поле аморфный материал  $n$ -типа, каким является  $a\text{-Si:H(Er)}$  (энергия активации подвижности  $0.6\text{--}0.65\text{eV}$ ).

Для реализации этих условий и определения механизма возбуждения эрбия была сделана структура (рис. 1), позволяющая при смене полярности пропускать через пленку ток, обусловленный или только электронами, или только дырками. Это достигалось за счет гетероскачков на границе  $a\text{-Si:H(Er)}$ —кремниевая подложка  $n$ -типа.

На рис. 5 представлены схематические зонные диаграммы исследуемой структуры при обратном ( $a$ ) и прямом смещении ( $b$ ).

При обратном напряжении, когда через  $a\text{-Si:H(Er)}$  идет поток электронов, наблюдались дефектная и эрбиевая люминесценции. Первая обусловлена излучательным переходом  $D^0 + e \rightarrow D^-$ , а вторая — Оже-возбуждением  $f$ -электронов ионов эрбия при этом же переходе электронов матрицы. Мы полагаем, что при концентрации ионов эрбия  $1 \cdot 10^{20}\text{ см}^{-3}$  вблизи дефектов всегда находится ион эрбия.

На рис. 4 наблюдается порог в зависимости интенсивности электролюминесценции от тока (при напряжении  $\sim 20\text{ V}$ , что соответствует полю  $E \sim 4 \cdot 10^5\text{ V/cm}$  в  $a\text{-Si:H(Er)}$ ). Это связано с тем, что к пленке  $a\text{-Si:H(Er)}$  необходимо приложить высокое электрическое поле, обеспечивающее эффективное увеличение скорости термической ионизации  $D^-$ -центров. Отметим, что именно при электрических полях  $\sim 10^5\text{ V/cm}$  обычно наблюдается резкое экспоненциальное возрастание скорости термической ионизации глубоких дефектов в полупроводниках [5].

Поскольку пленка аморфного кремния находится в сильном электрическом поле, то смещение линии электролюминесценции с ростом тока через структуру (рис. 3) объясняется эффектом Штарка на ионах эрбия. Наблюдение смещения линии с током показывает, что ионы

эрбия действующим внедрены в слой аморфного кремния, а не в подложку из кристаллического кремния. Величина эффекта Штарка соответствует ожидаемой: если принять, что поле внутри иона эрбия  $E_0 \sim 10^8$  V/cm, то смещение линии по порядку величины должно быть  $\Delta(\hbar\omega)/\hbar\omega \sim E/E_0 \sim 4 \cdot 10^{-3}$ , что находится в согласии с экспериментом.

Наблюдение излучения только свободного экситона из подложки кремния  $n$ -типа при смещении в прямом направлении указывает на то, что в этом случае мы имеем дело с протеканием дырок через слой  $a$ -Si:H(Er). Отсутствие в этом случае как дефектной, так и эрбиевой люминесценции подтверждает тот факт, что они обусловлены именно захватом электронов на  $D$ -центры.

Наши исследования по фотолюминесценции  $a$ -Si:H(Er) показали, что при слабых накачках дефектная люминесценция матрицы  $a$ -Si:H практически отсутствует. Это указывает на то, что вероятность Оже-процесса возбуждения  $f$ -электронов ионов эрбия превышает вероятность конкурирующего излучательного дефектного перехода. При высоких уровнях накачки в условиях насыщения эрбиевой люминесценции, когда практически все ионы эрбия находятся в возбужденном состоянии, линия дефектной люминесценции сильно возрастает. В электролюминесценции мы наблюдали аналогичное возрастание дефектной люминесценции в режиме, близком к насыщению электролюминесценции эрбия (рис. 2).

Таким образом, мы впервые наблюдали электролюминесценцию эрбия в матрице  $a$ -Si:H при комнатной температуре и показали, что механизм возбуждения обусловлен электронами аморфной матрицы при захвате их на  $D^0$ -центры с передачей энергии в  $f$ -оболочку ионов эрбия за счет кулоновского взаимодействия.

Авторы благодарят немецкое общество исследователей (DFG), Министерство науки России (проект 1-060/3) и Российский фонд фундаментальных исследований (грант 95 02-04163-а) за финансовую поддержку работы.

### Список литературы

- [1] Zheng B., Michel J., Ren F.Y.G., Kimerling L.C., Jacobson D.C., Poate J.M. Appl. Phys. Lett. **64**, 21, 2842 (1994).
- [2] Bresler M.S., Gusev O.B., Kudoyarova V.Kh., Kuznetsov A.H., Pak P.I., Terukov E.I., Yassievich I.N., Zakharchenya B.P., Fuhs W., Sturm A. Appl. Phys. Lett. **67**, 24, 3599 (1995).
- [3] Marakhonov V., Rogachev N., Ishkalov J., Marakhonov J., Terukov E., Chelnokov V.J. Non-Cryst. Sol. **137&138**, 1, 817 (1991).
- [4] Street R.A., Biegelsen D.K., Weisfield R.L. Phys. Rev. **B30**, 10, 5861 (1984).
- [5] Abakumov V.N., Perel V.I., Yassievich I.N. Nonradiative Recombination in Semiconductors. North Holland. Amsterdam (1991). P. 172.