

# Краевая электролюминесценция кремния: гетероструктура аморфный кремний–кристаллический кремний

© М.С. Бреслер, О.Б. Гусев, Е.И. Теруков, А. Froitzheim\*, W. Fuhs\*

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

\* Hahn-Meitner-Institut, Abt. Silizium-Photovoltaik, D-12489 Berlin, Germany

Краевая электролюминесценция (ЭЛ) кремния наблюдалась на гетероструктуре аморфный кремний–кристаллический кремний ( $a\text{-Si:H}(n)/c\text{-Si}(p)$ ) в температурной области от 77 до 300 К. Внутренний квантовый выход ЭЛ при комнатной температуре для исследованной структуры составил около 0.1%. Теоретический анализ эмиссионных свойств гетероперехода  $a\text{-Si:H}(n)/c\text{-Si}(p)$ , основанный на модели резкого планарного  $p$ – $n$ –перехода, показал, что при оптимальном легировании внутренний квантовый выход ЭЛ может достигать нескольких процентов при частоте модуляции около 50 kHz.

Работа выполнена при поддержке грантов Российского фонда фундаментальных исследований, Нидерландской организации научных исследований (NWO), Министерства науки и технологий Российской Федерации и программы „Новые материалы и структуры“ отделения физических наук РАН.

Необходимость эффективных фотонных материалов, которые могут быть интегрированы в стандартные волоконные оптические линии связи, стимулировала новый интерес к светоизлучающим свойствам кремния. Среди различных подходов к кремниевой оптоэлектронике наиболее прямой путь — это увеличение эффективности собственной краевой электролюминесценции (ЭЛ) кремния. Внутренняя квантовая эффективность ЭЛ около 1% на  $p$ – $n$ –гомопереходе кристаллического кремния была получена недавно в работах [1,2]. Объяснение такой относительно высокой для кремния эффективности, основанное на анализе модели ЭЛ резкого планарного  $p$ – $n$ –перехода на кремнии, представлено в [3].

В настоящей работе показано, что электролюминесцентная гетероструктура аморфный кремний  $n$ -типа–кристаллический кремний  $p$ -типа ( $a\text{-Si:H}(n)/c\text{-Si}(p)$ ) работает аналогично гомогенному  $p$ – $n$ –переходу на кристаллическом кремнии, т.е. при пропускании тока в прямом направлении через гетероструктуру  $a\text{-Si:H}(n)/c\text{-Si}(p)$  наблюдается краевая ЭЛ кремния, соответствующая рекомбинации экситонов в кристаллическом кремнии. Так же как и в случае  $p$ – $n$ –перехода на кристаллическом кремнии, внутренний квантовый выход гетероструктуры  $a\text{-Si:H}(n)/c\text{-Si}(p)$  определяется коэффициентом излучательной рекомбинации и временем жизни электронов, инжектированных в зону проводимости  $c\text{-Si}(p)$ . По сравнению с гомогенным  $p$ – $n$ –переходом на кристаллическом кремнии электролюминесцентная гетероструктура  $a\text{-Si:H}(n)/c\text{-Si}(p)$  может иметь более высокий внешний квантовый выход ЭЛ.

## 1. Экспериментальные результаты

Электролюминесцентная гетероструктура аморфный кремний  $n$ -типа–кристаллический кремний  $p$ -типа ( $a\text{-Si:H}(n)/c\text{-Si}(p)$ ) получена осаждением аморфного гидrogenизированного кремния ( $a\text{-Si:H}$ ) на подложку

кристаллического кремния  $p$ -типа ( $c\text{-Si}(p)$ ). В процессе осаждения аморфный кремний был легирован фосфором до концентрации  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$ . Полученная пленка  $a\text{-Si:H}(n)$  имела толщину 30 nm. Прозрачный проводящий электрод толщиной 80 nm для вывода света через  $a\text{-Si:H}(n)$  был нанесен распылением  $\text{ZnO(Al)}$ . На поверхности  $\text{ZnO(Al)}$  кольцевой контакт формировался напылением алюминия.

Вольтамперные характеристики электролюминесцентной гетероструктуры  $a\text{-Si:H}(p)/c\text{-Si}(n)$  при температурах 77 и 300 К представлены на рис. 1. Электролюминесценция наблюдалась при пропускании через структуру прямоугольных импульсов тока в прямом направлении и анализировалась решеточным монохроматором с фокусным расстоянием 822 mm и охлаждаемым германиевым фотоприемником. Временной спад ЭЛ после выключения тока измерялся цифровым осциллографом. Полное временное разрешение схемы регистрации составляло 3  $\mu\text{s}$ .

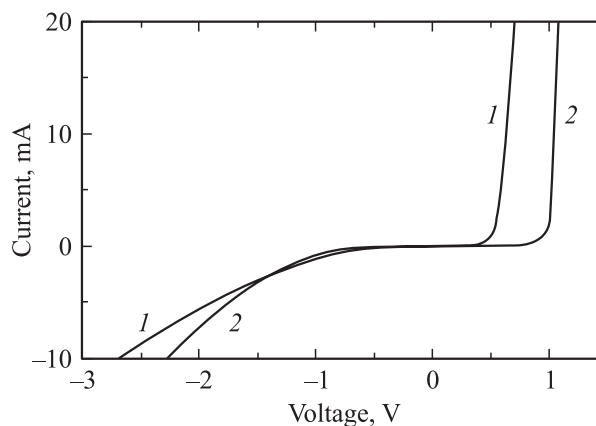
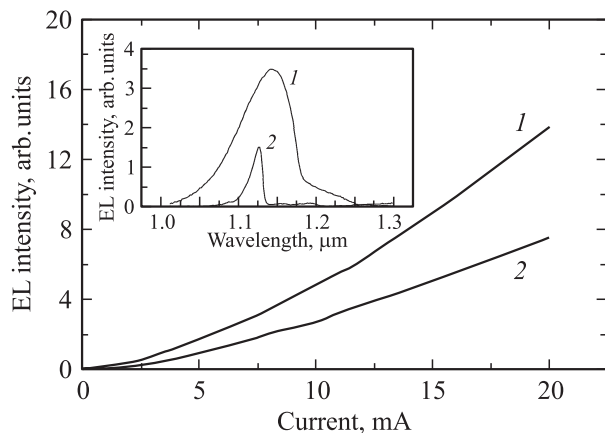
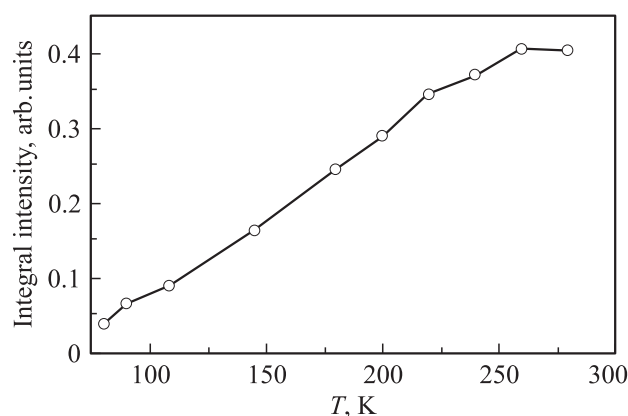


Рис. 1. Вольтамперные характеристики гетероструктуры аморфный кремний–кристаллический кремний при температурах 300 К (1) и 77 К (2).



**Рис. 2.** Зависимость интенсивности краевой ЭЛ кремния от плотности тока при температурах 300 (1) и 77 К (2) в максимуме соответствующей спектральной линии. На вставке показаны спектры ЭЛ при этих же температурах.



**Рис. 3.** Температурная зависимость интегральной интенсивности краевой ЭЛ кремния.

На рис. 2 показана зависимость интенсивности ЭЛ гетероструктуры  $a\text{-Si:H}(n)/c\text{-Si}(p)$  от тока для температур 77 и 300 К. Спектры ЭЛ для этих же температур приведены на вставке. Полученные спектры соответствуют обычной краевой люминесценции кристаллического кремния. При низкой температуре практически вся собственная ЭЛ кремния обусловлена рекомбинацией свободных электронов с участием оптических фононов. При комнатной температуре рекомбинационные вклады свободных экситонов и свободных носителей заряда примерно одинаковы, и поэтому вершина спектра при комнатной температуре слегка деформирована. Как можно видеть из рис. 2, интенсивность ЭЛ при комнатной температуре значительно выше, чем при азотной температуре. Время спада краевой ЭЛ, измеренное после выключения импульса тока, соответствовало  $25\ \mu\text{s}$  при комнатной температуре и меньше  $3\ \mu\text{s}$  при азотной температуре. На рис. 3 показана температурная зависимость интегральной интенсивности собственной ЭЛ. Как видно из этого рисунка, интенсивность собственной ЭЛ растет с повышением температуры и при комнатной температуре выходит на максимальное значение. От-

метим, что аналогичные результаты по температурной зависимости интенсивности и времени спада краевой ЭЛ наблюдались и в случае гомогенного  $p$ - $n$ -перехода на кристаллическом кремнии [1–3].

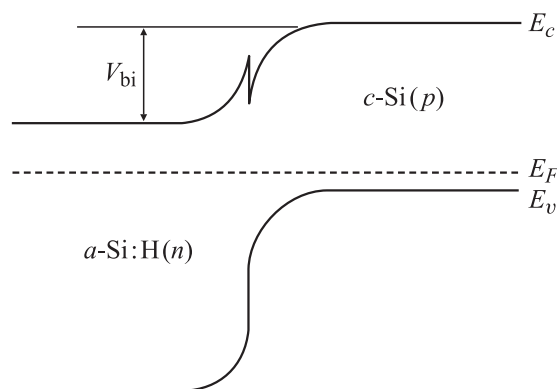
## 2. Обсуждение результатов

Энергетическая диаграмма гетероперехода  $a\text{-Si:H}(n)/c\text{-Si}(p)$ , построенная по данным работы [4], показана на рис. 4. Ширина запрещенной зоны  $a\text{-Si:H}$  и  $c\text{-Si}$  составляет 1.9 и 1.12 eV соответственно. Разрыв зон в зоне проводимости приблизительно 0.2–0.3 eV. Уровень Ферми для слоя  $a\text{-Si:H}$ , легированного фосфором до  $10^{19}\ \text{cm}^{-3}$ , находится на 0.25 eV ниже дна зоны проводимости [4]. В этом случае концентрация электронов в зоне проводимости, соответствующая данному положению уровня Ферми ( $6 \cdot 10^{16}\ \text{cm}^{-3}$ ), довольно низкая для эмиттера. Однако в „кармане“ на интерфейсе концентрация может достигать  $5 \cdot 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$ , что вполне достаточно для эффективной инжекции электронов.

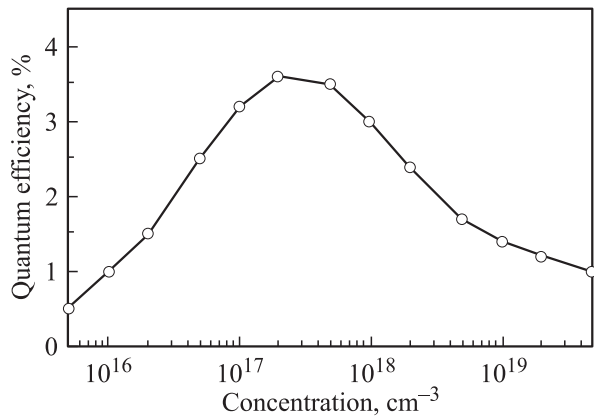
Анализ эффективности электролюминесценции  $p$ - $n$ -перехода на кристаллическом кремнии, выполненный в работе [3], показал, что с точки зрения выхода электролюминесценции более выгодно иметь высокий уровень легирования  $n$ -области гомогенного  $p$ - $n$ -перехода. В этом случае краевая ЭЛ кремния в основном будет обусловлена  $p$ -областью, и внутренний квантовый выход краевой ЭЛ определяется выражением

$$\eta \approx r_r p_p \tau_n \frac{E_g}{qV_{bi}} \approx \frac{\tau_n}{\tau_r}, \quad (1)$$

где  $r_r$  — коэффициент излучательной рекомбинации,  $p_p$  — концентрация основных носителей заряда (дырок) в  $p$ -области  $p$ - $n$ -перехода,  $\tau_n$  — полное время жизни электронов в  $p$ -области,  $E_g$  — ширина запрещенной зоны  $c\text{-Si}$ ,  $q$  — заряд электрона,  $V_{bi}$  — потенциальный барьер в зоне проводимости. Таким образом, как следует из (1), внутренний квантовый выход определяется отношением полного времени жизни неосновных носителей заряда к излучательному времени жизни. Поскольку времена жизни зависят от концентраций основных носителей заряда в  $n$ - и  $p$ -областях, имеется оптималь-



**Рис. 4.** Энергетическая зонная диаграмма для  $a\text{-Si:H}/c\text{-Si}$ .



**Рис. 5.** Расчетная зависимость квантового выхода краевой ЭЛ от уровня легирования  $p$ -области  $p$ - $n$ -перехода.  $T = 300$  К. Концентрация  $n$ -области  $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ .

ный уровень легирования этих областей. Используя данные [5] по зависимости времени жизни неосновных носителей заряда от концентрации основных носителей заряда, можно рассчитать оптимальный уровень легирования для получения максимального внутреннего квантового выхода собственной ЭЛ. Результаты расчетов показаны на рис. 5. Как видно из рисунка, максимальный квантовый выход краевой ЭЛ может достигать 3% при концентрации  $p$ -области около  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . При больших концентрациях квантовый выход уменьшается из-за уменьшения  $\tau_n$  вследствие Оже-процессов, при малых концентрациях мала вероятность излучательной рекомбинации.

Используя для коэффициента излучательной рекомбинации значение  $r_r \sim 10^{-14} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$  [6] при комнатной температуре и для времени жизни неосновных носителей заряда в  $c$ -Si( $p$ )  $\tau_n \sim 10^{-4} \text{ s}$  для концентрации равновесных зарядов  $1 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  [5], мы оценили внутренний квантовый выход как  $10^{-2}$ . Эта величина внутреннего квантового выхода заметно больше, чем оцененная экспериментально ( $0.1 \cdot 10^{-2}$ ).

Полагаем, что это обусловлено низким качеством нашего  $p$ - $n$ -перехода. На это обстоятельство указывает температурная зависимость интегральной интенсивности ЭЛ, представленная на рис. 3. Поскольку коэффициент излучательной рекомбинации  $r_r$ , согласно [6], должен уменьшаться с повышением температуры, рост интегральной интенсивности собственной ЭЛ с повышением температуры объясняется, так же как и для гомогенного  $p$ - $n$ -перехода на кристаллическом кремнии, уменьшением вероятности захвата электронов, инжектированных в  $p$ -область, на глубокие примеси/дефекты с увеличением температуры. Таким образом, мы полагаем, что в  $n$ -области нашего  $p$ - $n$ -перехода есть некоторая концентрация глубоких притягивающих рекомбинационных центров. Появление таких центров, по-видимому, связано с проникновением дефектов в  $n$ -область при нанесении  $p$ -слоя аморфного кремния.

Как известно, первое возбужденное метастабильное состояние заряженной глубокой примеси по порядку

величины соответствует энергетическому положению мелкого акцептора/донора в кремнии, т.е.  $\sim 50 \text{ meV}$  относительно края валентной зоны или зоны проводимости. При комнатной температуре скорость захвата электронов на метастабильный уровень, через который происходит многофононный захват электронов в основное состояние, может быть меньшей, чем скорость обратного выброса носителя с этого уровня в зону. Таким образом, вероятность безызлучательного захвата инжектированных электронов на глубокие центры в кремнии с увеличением температуры уменьшается, что и приводит к увеличению интенсивности ЭЛ и наблюдаемому увеличению времени спада сигнала ЭЛ после окончания импульса тока. Отметим, что к такому же эффекту могут привести и поверхностные состояния на гетерогранице аморфный кремний-кристаллический кремний.

Интересно сравнить эмиссионные свойства гомогенного  $p$ - $n$ -перехода на кристаллическом кремнии и гетероструктуры  $a$ -Si:H/ $c$ -Si. Внешний квантовый выход электролюминесцентной структуры  $a$ -Si:H/ $c$ -Si будет несколько выше, поскольку выход краевого излучения кремния происходит через широкозонный материал  $a$ -Si:H, что уменьшает поглощение краевой ЭЛ. Принимая во внимание более простую технологию получения гетероструктур  $a$ -Si:H( $n$ )/ $c$ -Si( $p$ ) и совместимость их с оптическими элементами, применяемыми в кремниевой оптоэлектронике, мы полагаем, что эти структуры могут найти применение в кремниевой оптоэлектронике.

Таким образом, наблюдалась краевая ЭЛ кремния на гетеропереходе аморфный кремний-кристаллический кремний от азотной до комнатной температуры. Температурное поведение интенсивности и временные характеристики краевой ЭЛ такой структуры очень близки к наблюдаемым для гомогенного  $p$ - $n$ -перехода кристаллического кремния. Однако меньший энергетический барьер между зонами проводимости  $a$ -Si:H( $n$ ) и  $c$ -Si( $p$ ) и большая ширина запрещенной зоны аморфного кремния могут позволить достигнуть большего внутреннего и внешнего квантового выхода краевой ЭЛ для  $a$ -Si:H( $n$ )/ $c$ -Si( $p$ ) структуры.

## Список литературы

- [1] M.A. Green, J. Zhao, A. Wang, P.J. Reece, M. Gal. Nature **412**, 805 (2001).
- [2] W.L. Ng, M.A. Lourenço, R.M. Gwilliam, S. Ledain, G. Shao, K.P. Homewood. Nature **410**, 192 (2001).
- [3] O.B. Gusev, M.S. Bresler, I.N. Yassievich, B.P. Zakharchenya. In: NATO workshop OASIS (Optical amplification and stimulation in silicon). Trento (2002).
- [4] A. Froitzheim, K. Brendel, L. Elstner, W. Fuhs, K. Kliefoth, M. Schmidt. J. Non-Cryst. Solids **299–302**, 663 (2002).
- [5] В.Н. Абакумов, В.И. Перель, И.Н. Яссиевич. Безызлучательная рекомбинация в полупроводниках. Изд. ПИЯФ РАН, СПб (1997).
- [6] H. Schlangenotto, H. Maeder, W. Gerlach. Phys. Stat. Sol. (a) **21**, 2, 357 (1974).