

07:09

## Люминесценция солнечных элементов с гетеропереходом $a\text{-Si:H/c-Si}$

© Д.М. Жигунов<sup>1</sup>, А.С. Ильин<sup>1,2</sup>, П.А. Форш<sup>1,2,¶</sup>, А.В. Бобыль<sup>3</sup>,  
В.Н. Вербицкий<sup>3</sup>, Е.И. Теруков<sup>3</sup>, П.К. Кашкаров<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

<sup>2</sup> НИЦ „Курчатовский институт“, Москва

<sup>3</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

¶ E-mail: phorsh@mail.ru

Поступило в Редакцию 30 декабря 2016 г.

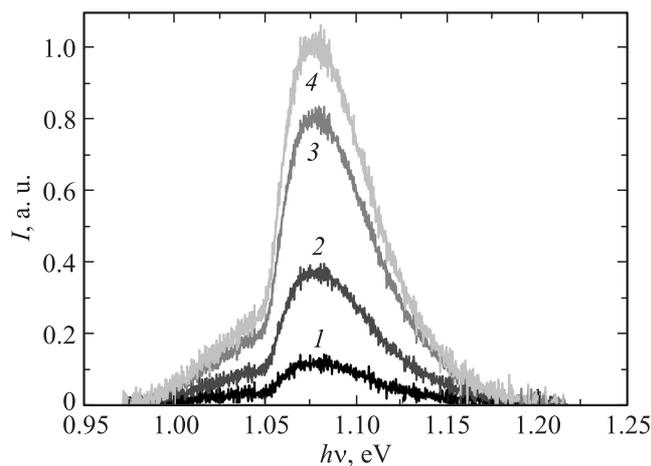
Исследованы электролюминесценция и фотолюминесценция солнечных элементов, содержащих гетеропереходы  $a\text{-Si:H/c-Si}$ . Установлено, что как электролюминесценция, так и фотолюминесценция исследованных элементов определяются излучательной рекомбинацией неравновесных носителей заряда в кристаллическом кремнии. Продемонстрировано, что внешний энергетический выход (КПД) электролюминесценции солнечных элементов с гетеропереходом  $a\text{-Si:H/c-Si}$  составляет при комнатной температуре значение 2.1%, что превосходит имеющиеся на данный момент значения для кремниевых диодных структур. Столь значительные величины КПД электролюминесценции могут объясняться хорошей пассивацией поверхности кристаллического кремния и соответственно увеличением времени жизни неосновных носителей заряда в исследованных элементах.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.10.44626.16626

Создание светоизлучающих устройств на основе кремния является важной и актуальной задачей на протяжении многих последних лет, поскольку такие устройства хорошо интегрируются с имеющимися кремниевыми технологиями. С целью повышения эффективности фото- и электролюминесценции используются низкоразмерные кремниевые структуры [1–6], а также кремниевые структуры со специально созданными дислокациями [7–9]. Однако в последнее время появляется все большее количество работ, посвященных исследованию излучательной рекомбинации в структурах, содержащих высококачественные слои монокристаллического кремния ( $c\text{-Si}$ ) с большими временами жизни неосновных носителей заряда, достигаемыми за счет различных

технологических приемов (в частности, текстурирования и пассивации поверхности кремния) [10–12]. Интерес к таким структурам связан с наблюдаемыми в них высокими значениями внешнего квантового выхода фотолюминесценции, порядка 6% [13], и электролюминесценции, примерно 1% [10]. Высокие значения внешнего квантового выхода для электролюминесценции были получены в структурах с  $p-n$ -переходом из кристаллического кремния, используемых в солнечной энергетике. В области солнечной энергетике сейчас большую популярность набирают элементы, содержащие гетеропереход аморфный гидрогенизированный кремний ( $a\text{-Si:H}$ ) — монокристаллический кремний с промежуточным слоем из собственного  $a\text{-Si:H}$  (международная аббревиатура НИТ — Heterojunction with Intrinsic Thin Layer). Здесь значения КПД фотопреобразования превышают 20% в условиях АМ1.5 [14]. Большие значения КПД фотопреобразования НИТ-элементов позволяют надеяться на их эффективную люминесценцию. Поэтому в данной работе проведены исследования электролюминесценции и фотолюминесценции НИТ-элементов.

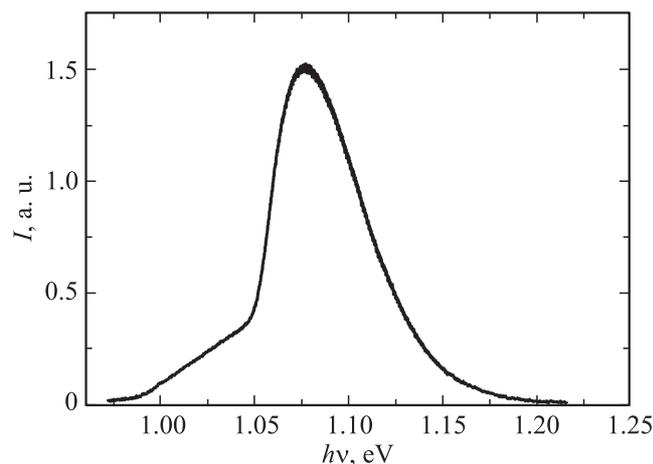
Структура исследованных НИТ-элементов была следующей. С двух сторон на текстурированную пластину  $c\text{-Si}$   $n$ -типа толщиной  $180\ \mu\text{m}$  напылены для пассивации тонкие слои  $i\text{-}a\text{-Si:H}$  толщиной по  $5\ \text{nm}$  каждый. На верхний слой  $i\text{-}a\text{-Si:H}$  напылен слой  $p^+\text{-}a\text{-Si:H}$  толщиной  $10\ \text{nm}$ . На него нанесен прозрачный проводящий слой  $\text{In}_2\text{O}_3:\text{SnO}_2$  (ИТО) толщиной  $80\ \text{nm}$ , сверху которого создана сетка из серебряных контактов. На нижний слой  $i\text{-}a\text{-Si:H}$  напылена пленка  $n^+\text{-}a\text{-Si:H}$  толщиной  $20\ \text{nm}$ , на которую нанесен слой ИТО толщиной  $40\ \text{nm}$  и сделан сплошной серебряный контакт. Площадь элементов составляла  $1\ \text{cm}^2$ . Исследования спектральной зависимости интенсивности электролюминесценции НИТ-элементов проводились с помощью спектрального комплекса на базе спектрографа SOLAR III и цифровой ПЗС-камеры, охлаждаемой жидким азотом. Для измерения внешнего энергетического выхода (КПД) электролюминесценции использовался калиброванный  $\text{InGaAs}$  фотоприемник с интегрирующей сферой. Полученное значение мощности электролюминесценции корректировалось с учетом спектральной чувствительности фотоприемника (для этого использовались измеренные спектры электролюминесценции, также скорректированные на спектральную чувствительность системы регистрации) и делилось на расходимую мощность НИТ-элемента для определения его КПД электролюминесценции. Спектры фотолюминесценции измерялись с



**Рис. 1.** Спектральные зависимости электролюминесценции НПТ-элементов, измеренные при комнатной температуре и при различных значениях плотности тока,  $\text{mA}/\text{cm}^2$ : 1 — 5, 2 — 10, 3 — 15, 4 — 20.

помощью того же спектрального комплекса при возбуждении образцов излучением Nd:YAG-лазера с длиной волны 532 nm.

Типичные спектры электролюминесценции, измеренные при комнатной температуре, при различных плотностях тока, протекающего через структуру, показаны на рис. 1. Схожий характер спектров люминесценции наблюдался в работах [15,16] для структур с гетеропереходом  $a\text{-Si:H}/c\text{-Si}$ , не содержащих слой  $i\text{-a-Si:H}$ . Согласно литературным данным [11,12,15,16], наблюдаемая спектральная зависимость электролюминесценции характерна для краевой люминесценции в  $c\text{-Si}$ . В большинстве работ отмечается, что значительный вклад в электролюминесценцию может вносить экситонная рекомбинация с участием фононов. При исследованных в работе температурах основной вклад в рекомбинацию дают оптические фононы с энергией порядка 58 meV. Как видно из рисунка, форма всех измеренных при разных плотностях тока спектров электролюминесценции остается практически одинаковой, положение максимума электролюминесценции не изменяется. Наблюдаются только изменения интенсивности электролюминесценции. При использованных

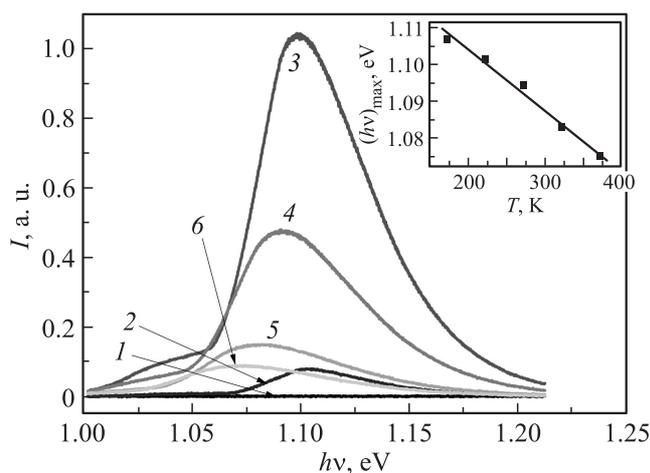


**Рис. 2.** Спектральная зависимость фотолюминесценции НПТ-элементов, измеренная при комнатной температуре.

в работе смещениях, подаваемых на структуру, интенсивность электролюминесценции увеличивалась с ростом плотности тока.

Спектр фотолюминесценции исследованных структур, представленный на рис. 2, имеет характер, аналогичный полученным спектрам электролюминесценции. Исследования показали, что при увеличении мощности накачки интенсивность фотолюминесценции увеличивается и, начиная с некоторых значений мощности, выходит на насыщение. Следует отметить, что интенсивность фотолюминесценции заметно превосходит интенсивность электролюминесценции. Это может быть связано с более низким уровнем инжекции носителей заряда при подаче используемых в работе напряжений на структуру по сравнению с оптическим возбуждением. Идентичный характер спектров фотолюминесценции и электролюминесценции указывает на одинаковый характер процессов рекомбинации неравновесных носителей зарядов, определяющих люминесценцию при электрическом и оптическом возбуждениях.

На рис. 3 приведены спектральные зависимости электролюминесценции исследованных структур, измеренные при различных температурах. При этом плотность протекающего через структуру тока была



**Рис. 3.** Спектральные зависимости электролюминесценции НИТ-элементов, измеренные при различных температурах, К: 1 — 120, 2 — 170, 3 — 220, 4 — 270, 5 — 320, 6 — 370. На вставке к рисунку показана зависимость максимума электролюминесценции от температуры.

постоянной и составляла  $10 \text{ mA/cm}^2$ . Такая, относительно невысокая, плотность тока была выбрана с целью исключить нагрев образцов. Как видно из рис. 3, при изменении температуры смещаются положение максимума электролюминесценции и ее интенсивность. Вставка на рис. 3, демонстрирует смещение максимума электролюминесценции с температурой. В области исследованных температур положение пика электролюминесценции практически линейно смещается в длинноволновую область с повышением температуры. Такое поведение может объясняться уменьшением ширины запрещенной зоны *c*-Si с ростом температуры. Немонотонная зависимость интенсивности электролюминесценции от температуры, по-видимому, объясняется конкуренцией излучательных и безызлучательных механизмов рекомбинации в *c*-Si. Небольшое отличие формы спектров электролюминесценции, полученных при различных температурах, может быть связано с возрастающим вкладом рекомбинации с участием LO-фононов при низких температурах [17].

КПД электролюминесценции исследованных структур составил 2.1%. При этом мощность, излучаемая с  $1 \text{ cm}^2$  НТ-элемента, равнялась 0.65 mW. Полученные значения КПД в исследованных структурах получились несколько выше, чем известные из литературы значения для кремниевых солнечных элементов с  $p-n$ -переходом. Связано это может быть с более оптимизированной структурой НТ-элемента, которая включает два гетероперехода ( $a\text{-Si:H}(p^+)/c\text{-Si}(n)$  и  $a\text{-Si:H}(n^+)/c\text{-Si}(p)$ ), а также с хорошей пассивацией  $c\text{-Si}$  с помощью тонких  $i$ -слоев  $a\text{-Si:H}$ . Наличие двух гетеропереходов позволяет повысить мощность излучения за счет эффективного собирания носителей в кристаллическом кремнии.

Таким образом, в работе была продемонстрирована возможность получения эффективной электролюминесценции на солнечных НТ-элементах. Характерный вид спектров электролюминесценции свидетельствует о том, что излучательная рекомбинация носителей заряда происходит в  $c\text{-Si}$ . Полученные значения КПД электролюминесценции исследованных элементов превосходят известные в литературе значения для гомогенных кремниевых переходов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-32-60060 мол\_а\_дк).

## Список литературы

- [1] *de Boer W.D.A.M., Timmerman D., Dohnalova K. et al. // Nat. Nanotechnol. 2010. V. 5. P. 878.*
- [2] *Cho K.S., Park N.M., Kim T.Y. et al. // Appl. Phys. Lett. 2005. V. 86. P. 071909.*
- [3] *Takeoka S., Fujii M., Hayashi S. // Phys. Rev. B. 2000. V. 62. P. 16820.*
- [4] *Huh Ch., Kim T.-Y., Ahn Ch.-G., Kim B.K. // Appl. Phys. Lett. 2015. V. 106. P. 211103.*
- [5] *Emelyanov A.V., Kazanskii A.G., Khenkin M.V. et al. // Appl. Phys. Lett. 2012. V. 101. P. 081902.*
- [6] *Emelyanov A.V., Kazanskii A.G., Forsh P.A. et al. // J. Nanoelectron. Optoelectron. 2015. V. 10. P. 649.*
- [7] *Kveder V.V., Steinman E.A., Shevchenko S.A., Grimmeiss H.G. // Phys. Rev. B. 1995. V. 51. P. 10520.*
- [8] *Шевченко С.А., Изотов Н.А. // ФТТ. 2003. Т. 45. С. 248.*
- [9] *Ng W.L., Lourenco M.A., Gwilliam R.M. et al. // Nature. 2001. V. 410. P. 192.*
- [10] *Green M.A., Zhao J., Wang A. et al. // Nature. 2001. V. 412. P. 805.*

- [11] *Емельянов А.М.* // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. С. 75.
- [12] *Емельянов А.М.* // ФТП. 2011. Т. 45. С. 823.
- [13] *Trupke T., Zhao J., Wang A.* et al. // Appl. Phys. Lett. 2003. V. 82. P. 2996.
- [14] *Masuko K., Shigematsu M., Hashiguchi T.* et al. // IEEE J. Photovolt. 2014. V. 4. P. 1433.
- [15] *Bresler M.S., Gusev O.B., Terukov E.I.* et al. // J. Non-Cryst. Solids. 2004. V. 338–340. P. 440.
- [16] *Бреслер М.С., Гусев О.Б., Теруков Е.И.* и др. // ФТТ. 2004. Т. 46. С. 18.
- [17] *Davies G.* // Phys. Reports. 1989. V. 176. P. 83.