

07:09

Фотолюминесценция в области края фундаментального поглощения текстурированного без маскирования монокристаллического кремния

© А.М. Емельянов¹, С.Н. Аболмасов², Е.И. Торуков^{1,2}¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург² Научно-технический центр тонкопленочных технологий в энергетике при Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

E-mail: Emelyanov@mail.ioffe.ru

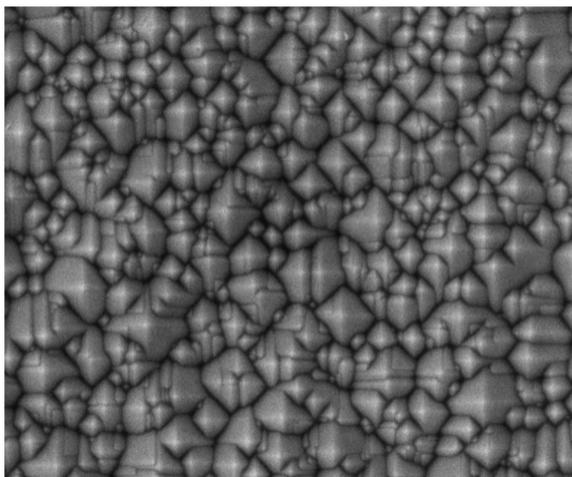
Поступило в Редакцию 4 марта 2016 г.

Проведено сравнение эффективностей вывода краевой люминесценции из монокристаллического кремния для трех структур: текстурированной без маскирования, нетекстурированной и текстурированной с использованием маскирования по технологии высокоэффективных солнечных элементов. Наибольшая эффективность получена для структуры, текстурированной без маскирования. В условиях безызлучательной рекомбинации, описываемых постоянной времени экспоненциального спада фотолюминесценции (ФЛ) ~ 0.11 ns, для текстурированной без маскирования структуры величина коэффициента преобразования мощности излучения на длине волны ~ 0.66 μm , равной 75 mW, в выходящую из полупроводника мощность краевой ФЛ составила $\eta \approx 0.8\%$. Измерены диаграммы направленности краевой ФЛ для трех исследованных структур.

Монокристаллический кремний (*c*-Si) относится к непрямозонным полупроводникам и многие годы считался неэффективным источником краевой (в области края фундаментального поглощения) люминесценции. Такие представления были опровергнуты только в начале века в работе [1]. В этой работе, а затем и в ряде других исследований [2–5] было доказано, что при обеспечении низкого уровня безызлучательной рекомбинации и эффективного вывода излучения из объема *c*-Si возможно достичь очень высоких для класса непрямозонных полупроводников внешней квантовой эффективности (η_{ext})

и мощности краевой люминесценции, которые сопоставимы с аналогичными параметрами для прямозонных полупроводников. Насколько нам известно, современные рекордные величины η_{ext} для кремния при комнатной температуре составляют $\sim 6\%$ для фотолюминесценции (ФЛ) [2] и $\sim 0.85\%$ для электролюминесценции (ЭЛ) [3,4]. Для краевой ЭЛ *c*-Si светодиодов при комнатной температуре достигнуты максимальная излучаемая мощность $\sim 46 \text{ mW}$ [3] и мощность краевой ЭЛ, излучаемая с единицы поверхности, $\sim 65 \text{ mW/cm}^2$. Основные результаты исследований краевой люминесценции *c*-Si последних лет изложены в [5–7]. В указанных исследованиях рекордные параметры получены с использованием для увеличения выхода ФЛ и ЭЛ из полупроводника наружу текстурирования полированной поверхности *c*-Si путем анизотропного травления *c*-Si через маску, изготовленную с использованием литографии. В результате на поверхности *c*-Si образовывались регулярно расположенные пирамиды с базовым размером $\sim 10 \mu\text{m}$ [1,8]. Согласно [1], такое текстурирование позволяет увеличить выход краевой ЭЛ примерно в 10 раз. Однако давно известно [9], что текстурирование поверхности *c*-Si, ориентированной в плоскости (100), можно проводить и путем анизотропного травления без маскирования и полировки поверхности. Это значительно упрощает и удешевляет процесс текстурирования. В настоящей работе впервые исследована ФЛ текстурированного без использования маскирования кремния с целью изучения возможностей применения этой технологии для создания высокоэффективных источников краевой люминесценции *c*-Si.

Для исследований использовались изготовленные с использованием зонной плавки две пластины *n*-Si, толщиной 180 и 280 μm , с удельным сопротивлением $1\text{--}5 \Omega \cdot \text{cm}$, ориентированные в плоскости (100). После травливания нарушенных резкой слоев *c*-Si и отмывок пластин от продуктов травления одна из пластин (толщиной 180 μm) погружалась в раствор KOH + IPA (изопропиловый спирт) при температуре 80°C на 30 min. В результате на обеих поверхностях этой пластины кремния была сформирована текстура в виде пирамид, микрофотография которой представлена на рис. 1. Как видно из рис. 1, средний базовый размер пирамид значительно меньше 10 μm и наблюдается значительный разброс размеров пирамид, они расположены хаотично. Средняя высота пирамид составила 2.1 μm . Для пассивации поверхностей и уменьшения таким образом поверхностной рекомбинации на обе пластины с двух сторон были нанесены слои аморфного кремния ($\alpha\text{-Si:H}$)



Seron Technology AIS2300C SEI
WD = 12.3 15.0 kV ×3.0 K

10 μm

Рис. 1. Микрофотография текстурированной без маскирования поверхности *c*-Si.

толщиной 15 nm. Для этого пластины подвергались предварительной очистке от органических и металлических загрязнений с последующим снятием собственного оксида кремния непосредственно перед стадией нанесения пассивирующих *a*-Si:H слоев методом плазмохимического осаждения. Для сравнительных исследований использовалась также полученная резкой солнечного элемента (СЭ) структура, конструкция, технология и параметры которой ранее описывались в [1,4,10]. Толщина структуры составляла $\sim 400 \mu\text{m}$, а базовый размер пирамид $\sim 10 \mu\text{m}$.

Для возбуждения ФЛ использовался полупроводниковый лазер, излучающий на длине волны $\sim 0.66 \mu\text{m}$ с максимальной мощностью $W = 75 \text{ mW}$. Излучение лазера фокусировалось на поверхности образцов в пятно с линейными размерами 0.7–0.9 mm. Для регистрации краевой ФЛ использовался работающий при комнатной температуре германиевый фотодиод с фильтром, пропускающим только излучение из области краевой ФЛ *c*-Si. Излучение лазера модулировалось с частотой 10 Hz при длительности импульсов $\sim 3 \text{ ms}$ и длительности фронтов не более $1 \mu\text{s}$. Коэффициенты отражения лазерного излучения

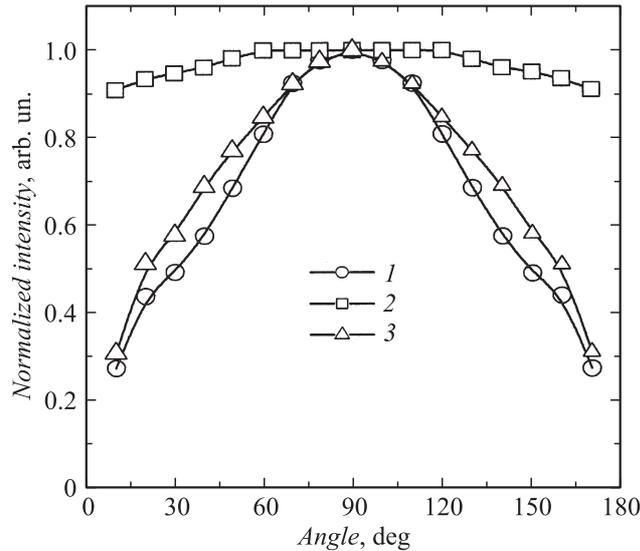


Рис. 2. Нормированные зависимости интенсивности краевой ФЛ от угла к поверхности *c*-Si при нормальном падении лазерного излучения: 1 — для текстурированной без маскирования поверхности, 2 — для нетекстурированной поверхности, 3 — для текстурированной с применением литографии и базовым размером пирамид $10\ \mu\text{m}$ поверхности СЭ.

от диффузно отражающих поверхностей образцов при нормальном падении излучения лазера определялись из измерений площадей под графиками угловых распределений отраженного излучения лазера для исследуемых поверхностей и белой диффузно отражающей поверхности с известным коэффициентом диффузного отражения. В таких экспериментах германиевый фотодиод с фильтром, отсекающим ФЛ, перемещается в горизонтальной плоскости по окружности с центром в месте падения лазерного луча на образец. Мощность ФЛ измерялась по описанной в [4] методике.

На рис. 2 представлены нормированные зависимости интенсивности краевой ФЛ от угла к поверхности структуры для исследованных структур при нормальном падении лазерного излучения. Разбросы экспериментальных значений не превышали размеров экспериментальных

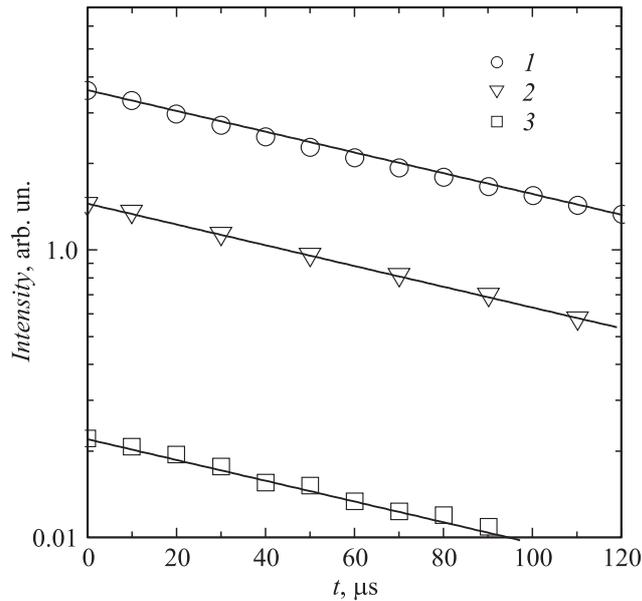


Рис. 3. Кинетика спада краевой ФЛ при комнатной температуре после достижения квазиравновесной интенсивности и выключения лазера: 1 — текстурированная без маскирования структура, 2 — нетекстурированная структура, 3 — текстурированный СЭ с базовым размером пирамид $10 \mu\text{m}$.

точек на графиках. Текстурирование привело к значительному сужению диаграмм направленности ФЛ, несколько большее сужение — для текстурирования без маскирования. При сравнительных исследованиях интенсивностей ФЛ для различных структур измеренные для угла наблюдения $\sim 90^\circ$ интенсивности ФЛ были увеличены пропорционально площадям под соответствующими распределениями на рис. 2. На рис. 3 для исследованных структур представлены зависимости интенсивности краевой ФЛ от времени (t) после достижения квазиравновесной интенсивности и выключения лазерного излучения. Все зависимости носят экспоненциальный характер с постоянной времени спада ФЛ τ_d . Величины τ_d для текстурированной без маскирования и нетекстурированной структур практически не изменялись при уменьшении W от 75 mW примерно на порядок. Средние величины τ_d для различных структур

различались, но разброс величин τ_d по площадям пластин позволил нам для удобства сравнения подобрать участки поверхности структур, где величины τ_d практически не различались и составляли $\sim 120 \mu\text{s}$. Это позволило считать практически одинаковыми и величины эффективных времен жизни носителей заряда (τ). Кроме того, для удобства сравнения кинетика нетекстурированной структуры измерялась при $W = 75 \text{ mW}$, а для текстурированных структур со значительно меньшим коэффициентом отражения W была уменьшена настолько, чтобы во всех трех случаях в *c*-Si в единицу времени проникало практически одинаковое количество (N_{hv}) квантов лазерного излучения. Поскольку количество создаваемых лазером неосновных носителей заряда прямо пропорционально величинам $N_{h\nu}$ и τ , при практическом равенстве этих величин для различных структур обеспечиваются практически одинаковые величины скорости излучательной рекомбинации для краевой ФЛ. Это следует из доминирования механизма излучательной рекомбинации через свободные экситоны [5–7]. Согласно рис. 3, при $t = 0$ интенсивность ФЛ для текстурированной без маскирования структуры в 16.4 раза выше, чем для нетекстурированной, и в 2.5 раза выше, чем для СЭ. Следовательно, описанная выше текстурированная без маскирования структура обеспечивает наибольшую среди исследованных структур эффективность вывода излучения краевой ФЛ из *c*-Si.

Определенная для текстурированной без маскирования структуры эффективность преобразования мощности возбуждения в излучаемую мощность краевой люминесценции (с учетом ФЛ, выходящей с обратной стороны пластины) составила $\eta \approx 0.8\%$ при $\tau_d \approx 0.11 \text{ ms}$ и $W = 75 \text{ mW}$. В работе [1] при исследованиях ЭЛ СЭ была получена примерно такая же величина η ($\sim 0.85\%$ при 300 K), но для τ , оцененной авторами [1] на уровне около 1 ms. Увеличение для исследованной текстурированной без маскирования структуры величины τ_d до значений $\sim 0.38\text{--}0.39 \text{ ms}$, достигнутых в работах [3,4] для СЭ, изготовленного по технологии [1], по нашим оценкам, позволило бы достичь величин η не менее 2.7%. Таким образом, результаты работы показывают, что описанная технология с использованием текстурирования без маскирования позволяет не только значительно упростить и удешевить технологию светоизлучающих структур *c*-Si, но и в перспективе, по-видимому, значительно повысить величины η по сравнению с современным уровнем.

Список литературы

- [1] *Green M.A., Zhao J., Wang A.* et al. // *Nature*. 2001. V. 412. P. 805–808.
- [2] *Trupke Th., Zhao J., Wang A.* et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2003. V. 82. P. 2996–2998.
- [3] *Емельянов А.М., Соболев Н.А.* // *Письма в ЖТФ*. 2008. Т. 34. В. 4. С. 64–70.
- [4] *Емельянов А.М., Соболев Н.А.* // *ФТП*. 2008. Т. 42. С. 336–340.
- [5] *Emel'yanov A.M.* // *High_Efficiency Solar Cells. Physics, Materials, and Devices*. Switzerland: Springer International Publ., 2014. P. 59–83.
- [6] *Емельянов А.М.* // *ФТП*. 2014. Т. 48. С. 190–195.
- [7] *Емельянов А.М.* // *ФТП*. 2015. Т. 49. С. 463–488.
- [8] *Campbell P., Green M.A.* // *J. Appl. Phys.* 1987. V. 62. P. 243–249.
- [9] *Thomas R.E., Norman C.E., Varma S.* et al. // *Can. J. Phys.* 1987. V. 65. P. 892–896.
- [10] *Емельянов А.М.* // *ФТП*. 2011. Т. 45. P. 823–828.