

## Формирование и исследование $p-i-n$ -структур на основе двухфазного гидрогенизированного кремния со слоем германия в $i$ -области

© Г.К. Кривякин<sup>1</sup>, В.А. Володин<sup>1,2</sup>, А.А. Шкляев<sup>1,2</sup>, V. Mortet<sup>3</sup>, J. More-Chevalier<sup>3</sup>, P. Ashcheulov<sup>3</sup>, Z. Remes<sup>3</sup>, T.H. Stuchliková<sup>3</sup>, J. Stuchlik<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, 630090 Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск, Россия

<sup>3</sup> Institute of Physics ASCR, v. v. i., Cukrovarnická 10/112, 16200 Praha 6, Czech Republic  
E-mail: grisha992@gmail.com

(Получена 9 февраля 2017 г. Принята к печати 16 февраля 2017 г.)

Методом плазмохимического осаждения сформированы четыре пары  $p-i-n$ -структур на основе  $pm$ -Si:H (полиморфного Si:H). Структуры в каждой паре выращивались на одной подложке так, что одна из них была без Ge в  $i$ -слое, а другая содержала Ge, который осаждался слоем толщиной 10 нм методом вакуумного напыления. Пары различались между собой температурой подложки при осаждении Ge, которая была 300, 350, 400 и 450 °С. Данные электронной микроскопии показали, что структуры, полученные при 300 °С, содержали нанокристаллы Ge ( $nc$ -Ge), центрами зарождения которых являлись нанокристаллические включения на поверхности  $pm$ -Si:H. Концентрация  $nc$ -Ge увеличивалась с возрастанием температуры. Исследование вольт-амперных характеристик показало, что наличие Ge в  $i$ -слое уменьшало плотность тока короткого замыкания в  $p-i-n$ -структурах, когда они использовались как солнечные элементы, тогда как наблюдалось увеличение тока под действием освещения при обратном смещении. Полученные результаты согласуются с известными данными для структур с кластерами Ge в Si, согласно которым кластеры Ge увеличивают коэффициент поглощения света, но также увеличивают и скорость рекомбинации носителей.

DOI: 10.21883/FTP.2017.10.45024.8547

### 1. Введение

Проблема повышения эффективности и стабильности недорогих солнечных элементов (СЭ) на основе гидрогенизированного аморфного кремния ( $a$ -Si:H) остается актуальной на протяжении десятков лет [1]. Интерес к СЭ, получаемым по низкотемпературной технологии, обусловлен в первую очередь возможностью использования нетугоплавких, в том числе гибких подложек, а также их относительно небольшой стоимостью.

Наиболее эффективным способом реализации СЭ на базе  $a$ -Si:H, если не принимать в рассмотрение дорогие многокаскадные решения, являются  $p-i-n$ - и  $n-i-p$ -структуры. В последние годы усилия исследователей направлены на повышение эффективности и стабильности подобных структур путем встраивания в нелегированный  $i$ -слой нанокристаллических включений [2–4]. Известно, что присутствие в  $a$ -Si:H  $\sim$  (10–15)% по объему нанокристаллического кремния ( $nc$ -Si) подавляет эффект Стеблера–Вронского [5], повышая стабильность СЭ [6–8]. Подобные пленки  $a$ -Si:H с кристаллическими включениями являются двухфазными системами и в литературе обозначаются как  $pm$ -Si:H [1,9] (здесь  $pm$  означает polycrystalline — полиморфный). Помимо этого использование включений из более узкозонного материала в некоторых случаях может привести к повышению коэффициента поглощения света, что должно повысить эффективность СЭ

или дать возможность снизить их толщину без потери в эффективности. Подходящим материалом для таких включений является Ge.

Ранее проводились исследования по внедрению квантовых точек Ge в  $i$ -слой кремниевых  $p-i-n$ -структур [10–12]; однако, как правило, в этих работах структуры были кристаллические, в то же время СЭ на базе  $a$ -Si:H с нанокристаллическими включениями Ge ( $nc$ -Ge) практически не исследованы. В качестве примера можно привести недавнюю работу [13], однако и в ней не все слои СЭ являлись аморфными, в частности в качестве нижнего  $n$ -слоя использовалась монокристаллическая подложка кремния.

В данной работе исследуется  $p-i-n$ -структура на базе  $pm$ -Si:H, в нелегированную область которой был встроены слой Ge. Пленки аморфного кремния с нанокристаллическими включениями выращивались с применением метода плазменно-химического осаждения (ПХО), в то время как Ge осаждался с применением метода вакуумного напыления. Встраивание  $nc$ -Ge в  $i$ -слой ранее использовалось в кристаллических структурах, где на поверхности проходил процесс самоорганизации Ge в наноструктуры [10–12], однако его применимость для формирования  $nc$ -Ge на поверхности  $pm$ -Si:H ранее не исследовалась. Таким образом, данная работа является первой попыткой формирования  $p-i-n$ -структур на базе  $pm$ -Si:H с включениями  $nc$ -Ge на нетугоплавких прозрачных подложках.