

Оптические свойства $p-i-n$ -структур на основе аморфного гидрогенизированного кремния с нанокристаллами кремния, сформированными с применением наносекундных лазерных отжигов

© Г.К. Кривякин*, В.А. Володин*+, С.А. Кочубей*, Г.Н. Камаев*, А. Purkrt*, Z. Remes*, R. Fajgar*, Т.Н. Stuchliková*, J. Stuchlik*

* Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, 630090 Новосибирск, Россия

+ Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск, Россия

• Institute of Physics ASCR, 162 00 Praha 6, Czech Republic

♦ Institute of Chemical Process Fundamentals of the ASCR, 165 02 Praha 6, Czech Republic

E-mail: volodin@isp.nsc.ru

(Получена 28 декабря 2015 г. Принята к печати 16 января 2016 г.)

С применением импульсных лазерных отжигов в i -слоях $p-i-n$ -структур на основе a -Si:H были сформированы нанокристаллы Si. Для импульсных воздействий применялся эксимерный лазер XeCl с длиной волны 308 нм, с длительностью импульса 15 нс. Плотность энергии лазерного излучения изменялась в пределах от 100 мДж/см² (ниже порога плавления) до 250 мДж/см² (выше порога плавления). Оценка размеров нанокристаллов проводилась из анализа спектров комбинационного рассеяния света с использованием модели локализации фононов, средний размер составил от 2.5 до 3.5 нм в зависимости от параметров лазерных воздействий. Созданные $p-i-n$ -структуры обладали диодными ВАХ. Обнаружен сигнал электролюминесценции в ИК-диапазоне от $p-i-n$ -структур с нанокристаллами Si, положение пика (0.9–1 эВ) варьировалось с параметрами лазерных воздействий. Излучательные переходы связаны, предположительно, с состояниями на границе нанокристалл/аморфная матрица. Предложенный подход может быть использован для создания светоизлучающих диодов на нетугоплавких подложках.

1. Введение

Получение эффективных и высокостабильных солнечных элементов и светодиодов на основе недорогой и широко распространенной тонкопленочной кремниевой технологии остается весьма актуальной задачей. В обоих случаях (солнечные элементы и светодиоды) используются $p-i-n$ -структуры, а наиболее дешевым и массовым способом их изготовления остается плазмохимическое осаждение (ПХО, или в англоязычной литературе — PECVD). В последние годы усилия исследователей направлены на повышение эффективности данных устройств путем встраивания различных нанокристаллических включений в нелегированный слой (i -слой) структуры [1,2]. Использование включений из узкозонных материалов приводит к росту поглощения света, что может повысить их эффективность. Для удешевления технологии проще использовать нанокристаллические включения (нанокристаллы — nc -Si) кремния в i -слои аморфного гидрогенизированного кремния (a -Si:H). Преимущества гетеросистемы a -Si:H/ nc -Si заключается в том, что она сочетает преимущества a -Si:H, такие как хорошая фотопроводимость, дешевизна технологии и возможность использования нетугоплавких подложек, а включения nc -Si до 10–15% по объему приводят к стабилизации гетеросистемы, улучшая ее деградационные характеристики [3–5]. Дополнительным плюсом является увеличение поглощения света, обу-

словленное добавкой от nc -Si к плотности состояний системы [6].

Существуют способы формирования nc -Si в пленках a -Si:H непосредственно в процессе осаждения пленок методом ПХО при достаточно низких температурах (менее 300°C). Обычно, для увеличения доли nc -Si при осаждении используют газовые смеси из моносилана с высоким содержанием водорода [3,7,8], для формирования многослойных гетероструктур a -Si:H/ nc -Si используют циклическое осаждение и отжиг в водородной плазме [9]. Кристаллизация пленок a -Si:H с применением печных отжигов требует температур от 550°C и выше и времен до десятков часов, что требует применения тугоплавких подложек. Поэтому по настоящее время совершенствуются подходы импульсной кристаллизации пленок a -Si:H [10,11]. Преимущества импульсного лазерного отжига (ИЛО) следующие: 1 — при использовании ультрафиолетового излучения практически все излучение поглощается в слое 10–20 нм, значит можно подобрать режимы, позволяющие ввести nc -Si только в верхние слои структуры; 2 — за малые времена лазерного импульса и за время (обычно десятки наносекунд) последующего остывания пленки вследствие диффузии тепла из пленки, подложка не успевает перегреться и не деформируется. С конца 80-х годов для ИЛО использовались эксимерные лазеры с длительностью импульса 10–30 наносекунд [12,13]. Можно разделить два подхода, в первом происходит расплав всей пленки