

Формирование светоизлучающих в ИК-диапазоне нанокристаллов германия в пленках $\text{Ge} : \text{SiO}_2$

© В.А. Володин^{1,2}, Zhang Rui², Г.К. Кривякин^{1,2}, А.Х. Антоненко², М. Stoffel², Н. Rinnert³, М. Vergnat³

¹ Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского Отделения Российской академии наук, 630090 Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск, Россия

³ Université de Lorraine, Institut Jean Lamour UMR CNRS 7198, B.P. 70239, 54506 Vandœuvre-lès-Nancy Cedex, France

E-mail: volodin@isp.nsc.ru

(Получена 11 января 2018 г. Принята к печати 19 февраля 2018 г.)

Проведены исследования светоизлучающих нанокристаллов германия, сформированных в процессе отжига пленок $\text{Ge}_x[\text{SiO}_2]_{1-x}$, полученных сораспылением в высоком вакууме мишеней германия и кварца на подложки, находящиеся при температуре 100°C. По условиям роста молярная доля германия менялась от 10 до 40%. С применением электронной микроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния света в исходных пленках с содержанием германия выше 20 мол% обнаружены нанокластеры аморфного Ge с размерами $\sim 4\text{--}5$ нм. Для кристаллизации аморфных нанокластеров применялись отжиги при температурах до 650°C. Исследована кинетика кристаллизации нанокластеров германия, установлено, что в системе остается до $\sim 1/3$ аморфной фазы, предположительно, на границе нанокристалл/окружающая аморфная матрица SiO_2 . Обнаружено, что при отжигах в обычной атмосфере происходило частичное либо полное (при молярной доле германия 30% и менее) окисление нанокластеров германия. Обнаружены интенсивная фотолюминесценция в ИК-диапазоне от квантово-размерных нанокристаллов германия и видимая фотолюминесценция, обусловленная комплексами дефектов — вакансия кислорода + избыточные атомы германия.

DOI: 10.21883/FTP.2018.09.46156.8815

1. Введение

Полупроводниковые нанокристаллы (НК) представляют интерес для исследования фундаментальных явлений, а также для использования в опто- и наноэлектронике [1,2]. Их свойствами можно управлять, используя квантово-размерные эффекты, примеси (включая изменение стехиометрии), дефекты и механические напряжения. Использование оптических линий связи (вместо электрических проводников) для передачи данных внутри микросхем (на одном чипе) приведет к гигантскому скачку в быстродействии микропроцессоров. Недавно был разработан микропроцессор с полностью оптической связью [3]. При этом к настоящему времени почти все оптоэлектронные устройства (электрооптические модуляторы, детекторы, волноводы и дифракционные решетки) уже разработаны на основе стандартной планарной кремниевой технологии, за исключением эффективных излучателей света.

Вследствие своей непрямозонной структуры объемный кремний (Si) и германий (Ge) не могут излучать свет с высокой эффективностью. Существуют несколько подходов к преодолению этого фундаментального ограничения и созданию светоизлучающих устройств на основе Si или Ge: снятие (либо смягчение) правил отбора по квазиимпульсу в квантово-размерных НК [4–8]; приложение деформаций, изменяющих зонную структуру [9–11]; модификация поверхности тонких слоев германия и сильное легирование [12]; включение редкоземельных элементов [13] и инженерия дефектов [14,15].

В то время как НК Si изучены достаточно полно, гораздо меньше работ было посвящено исследованию НК Ge [16–25], либо НК $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$, встроенных в диэлектрические матрицы [26–32], или исследованию нанопорошков $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ [33,34]. Стоит отметить, что НК Ge имеют ряд преимуществ. Температура кристаллизации германия ниже, чем у кремния, что позволяет снизить термический бюджет процессов. Разрыв зон в гетероструктурах Ge/GeO₂ и Ge/GeSiO₂ таков, что барьеры для инжекции электронов либо дырок не слишком велики, что важно для использования данных гетероструктур в приборах.

Недавно было продемонстрировано, что внешняя квантовая эффективность фотолюминесценции коллоидных растворов НК Si при подавлении безызлучательных каналов рекомбинации может достигать 60% [35]. Однако, максимум сигнала ФЛ для НК Si находится в диапазоне 1.5–1.7 эВ, поэтому для смещения максимума в длинноволновую область необходимо применять НК Ge, либо НК, состоящие из твердых растворов GeSi. В данной работе для получения светоизлучающих НК Ge мы использовали отжиги пленок $\text{Ge}_x[\text{SiO}_2]_{1-x}$ с различным содержанием Ge, полученные сораспылением мишеней германия и кварца в высоком вакууме и осаждением на подложки, находящиеся при температуре 100°C.

2. Описание эксперимента

Пленки $\text{Ge}_x[\text{SiO}_2]_{1-x}$ были получены путем совместного испарения электронными пучками мишеней Ge