

## Фотоотклик $p-i-n$ -фотодиодов GeSiSn/Si, сопряженных с фотонными кристаллами с микрорезонаторами\*

В.А. Тимофеев<sup>1</sup>, И.В. Скворцов<sup>1</sup>, В.И. Машанов<sup>1</sup>, В.В. Кириенко<sup>1</sup>,  
А.Е. Гайдук<sup>1</sup>, А.А. Блошкин<sup>1</sup>, А.И. Никифоров<sup>1</sup>, Д.Е. Уткин<sup>1,2</sup>,  
С.А. Хахулин<sup>3</sup>, Д.Д. Фирсов<sup>3</sup>, О.С. Комков<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, г. Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», г. Санкт-Петербург, Россия

Были разработаны  $p-i-n$ -фотодиоды GeSiSn/Si, сопряженные с фотонно-кристаллическими структурами с массивом микрорезонаторов в виде суперъячеек (3×3) и (5×5). Методами численного моделирования исследованы электромагнитные характеристики микрорезонаторов в полупроводниковом волноводном слое. В спектре отражения периодического массива микрорезонаторов типа (3×3) наблюдаются множественные асимметричные резонансные особенности типа Фано, обусловленные возбуждением волноводных мод. Показано, что на основных резонансных частотах происходит локальное усиление электрического поля в центральной части микрорезонаторов. Рассчитаны коэффициенты интегральной интенсивности электрического поля в двумерной задаче рассеяния фотонно-кристаллической моды на микрорезонаторах типа (3×3) и (5×5). Показано, что в ближнем инфракрасном диапазоне происходит усиление на частотах, соответствующих собственным модам микрорезонатора, вплоть до 7 раз по сравнению с исходным фотонным кристаллом без микрорезонаторов. В спектре фототока для структуры с суперъячейкой (5×5) наблюдается узкая линия шириной 1 нм на длине волны 1.55 мкм, соответствующая возбуждению моды микрорезонатора. Также наблюдалось усиление сигнала фотолюминесценции по сравнению с исходной эпитаксиальной структурой, достигавшее для структур с суперъячейками (3×3) и (5×5) до 4 и до 8 раз соответственно.

**Ключевые слова:** молекулярно-лучевая эпитаксия, квантовые точки, фотонный кристалл, микрорезонатор, фотодиод.

### Введение

Актуальной задачей на пути развития электронно-фотонных интегральных схем является получение новых материалов, совместимых с кремниевой технологией, позволяющих расширить рабочий спектральный диапазон устройств, а также продвинуться в направлении их миниатюризации, повышения быстродействия и энергоэффективности. Для решения проблемы интеграции электронных и фотонных устройств на едином кремниевом кристалле требуется разработка новой элементной базы твердотельной фотоники, включающей оптические вычислители, модуляторы, фильтры, устройства передачи сигнала, источники и приемники излучения. Класс материалов Ge–Si–Sn является одним из наиболее перспективных для решения вышеобозначенных задач [1–4]. Элементарные полупроводники Ge и Si являются непрямозонными и характеризуются низкой эффективностью излучательной рекомбинации носителей заряда, что ограничивает их применение в устройствах фотоники, в том числе в элементах интегральной фотоники, системах полностью оптической обработки информации, системах формирования изображения и волоконно-оптических линиях связи нового поколения. Добавление Sn в матрицу GeSi позволяет контролируемо управлять зонной структурой исходного материала, уменьшая ширину запрещенной зоны. Это дает возможность регулировать рабочую длину волны устройств нанофотоники на основе материалов GeSiSn в ближнем и среднем инфракрасном диапазоне от 1.55 до 8 мкм [5–7], тогда как рабочая длина волны устройств на основе Ge ограничена ближним инфракрасным (ИК) диапазоном. Было показано, что показатель поглощения  $\text{Ge}_{0.98}\text{Sn}_{0.02}$  больше показателя поглощения Ge в телекоммуникационной С-зоне (1.53–1.56 мкм) в 10 раз и в L-зоне (1.56–1.62 мкм) в 20 раз [8]. Материалы на основе соединений GeSiSn могут быть прямозонными при определенных составах твердого раствора [9–11]. На сегодняшний день продемонстрирован прямозонный материал GeSn с содержанием Sn 12.5% и деформацией сжатия 0.55%, что подтверждается измерениями кинетики фотолюминесценции [12]. Поскольку Sn является изовалентным элементом по отношению к Si и Ge, а также не создает глубоких примесных уровней в запрещенной зоне [13], класс материалов

\* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-79-10092).