

Светоизлучающие и фотоприемные структуры на основе Ge/Si для оптоэлектронных пар

М. М. Иванова, Ю. А. Кабальнов

Исследовались параметры источников и приемников оптического излучения, созданных на базе гетероэпитаксиальных структур Ge/Si как элементов оптоэлектронных пар. Для сформированных по единой технологии структур с Ge(Si) наноструктурами пики интенсивности в спектрах люминесценции и фоточувствительности отличались по длине волны, что обусловлено особенностями зонной структуры. Показана возможность использования в оптоэлектронных парах структур с массивами самоформирующихся наноструктур Ge(Si) как источников, так и приемников оптического излучения. В оптоэлектронных парах наряду со структурами с наноструктурами Ge(Si) опробованы структуры $p^+ \text{-Si}/n\text{-Si:Er}/n^+ \text{-Si}$ в качестве источников излучения и эпитаксиальные структуры Ge/Si в качестве фотоприемных устройств. Для различных сочетаний активных элементов был зарегистрирован оптопарный эффект с коэффициентом передачи K в диапазоне 10^{-5} – 10^{-6} .

Ключевые слова: источники и приемники оптического излучения; эпитаксиальные структуры германия на кремнии; структуры с наноструктурами Ge(Si); спектры электролюминесценции и фоточувствительности; оптоэлектронные пары.

DOI: 10.51368/2307-4469-2025-13-2-124-131

Введение

Эффективные светоизлучающие и фотоприемные структуры могут быть сформированы на базе различных полупроводниковых материалов. Для непрямозонных полупроводников, к которым относятся традиционные материалы микроэлектроники кремний и германий, вероятность излучательной рекомбинации носителей заряда очень мала, что

значительно снижает квантовый выход люминесценции. Однако Ge/Si гетероэпитаксиальные структуры (ГС) рассматриваются в качестве перспективных материалов оптоэлектроники, которые пригодны для создания источников и приемников оптического излучения в коммуникационном диапазоне длин волн 1,3–1,55 мкм, соответствующем окну прозрачности волоконных световодов [1]. Совместимые по технологии изделия оптоэлектроники (светоизлучающие диоды, фотодетекторы, оптроны), созданные на базе структур Ge/Si, могут интегрироваться в электронные микросхемы, сформированные по традиционным КМОП и биполярным маршрутам изготовления. Преимуществом использования гетероэпитаксиальных структур Ge/Si в качестве материалов активных областей оптоэлектронных устройств является возможность повышения радиационной стойкости систем по сравнению с аналогичными устройствами,

Иванова Мария Михайловна, вед. инженер.
Кабальнов Юрий Аркадьевич, в.н.с., к.т.н.
E-mail: Kabalnov@niiis.nnov.ru
ФГУП «РФЯЦ ВНИИЭФ».
Россия, 607188, Нижегородская обл., г. Саров,
пр. Мира, 37.

Дата поступления в редакцию 22.01.2025

После доработки 28.02.2025

Принята к публикации 7.04.2025

Шифр научной специальности: 1.3.11

© Иванова М. М., Кабальнов Ю. А., 2025

созданными на основе объемных материалов, что особенно актуально при разработке нового поколения аппаратуры навигации и связи [2].

Оптоэлектронные устройства, содержащие в цепи сигнала оптические звенья и обеспечивающие повышенную помехозащищенность каналов связи, находят широкое применение в приборах бортовой аппаратуры. Наибольшее распространение для передачи информации между электрически не связанными элементами получили оптроны с внешним электрическим входом и выходом, и внутренней оптической связью. Для многослойных Ge(Si) структур с самоформирующимися наноструктурами фиксируемые при комнатной температуре, как фотоэлектрические свойства, так и свойства электролюминесценции (ЭЛ) с учетом их высокой радиационной стойкости обуславливают перспективность использования для создания светодиодов и фотоприемников как составных частей оптоэлектронных пар (ОП) [2–4]. Также интересны для использования в ОП фотодетекторы, созданные на базе относительно толстых (до 1 мкм) релаксированных эпитаксиальных слоев Ge/Si(001), в связи с высокими значениями квантовой эффективности в коммуникационном диапазоне длин волн [1]. Интерес для использования в качестве светодиодов с длиной волны излучения в диапазоне 1,3–1,55 мкм могут представлять структуры со слоями кремния легированные Er [5, 6]. Люминесценция данного материала связана с излучательными переходами в $4f$ оболочке ионов эрбия в комплексе с примесями кислорода.

В данной работе представлены результаты исследований параметров источников и приемников оптического излучения, созданных на основе гетероэпитаксиальных структур Ge/Si как элементов конструкции ОП. С использованием последних достижений в области технологии изготовления структур с массивами самоформирующихся наноструктур Ge(Si) в кремниевой матрице, выращенных методом комбинированной сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии кремния и газофазной эпитаксии германия, показана принципиальная возможность их применения в оптоэлектронных парах. Рассмотрены вопросы эффективности различных конструктивно-технологических вариантов оптоэлектронных

пар, созданных на кремнии с наноструктурами Ge(Si) и легированными эрбием эпитаксиальными слоями в качестве источников оптического излучения, и структурами с наноструктурами Ge(Si) и гетероструктурами Ge/Si(001) с эпитаксиальными слоями германия в качестве фотоприемников.

Техника и методика эксперимента

Ge/Si гетероэпитаксиальные структуры выращивались комбинированным методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии (СМЛЭ) кремния и газофазной эпитаксии (ГФЭ) германия непосредственно в сверхвысоковакуумной камере модернизированной установки СМЛЭ с использованием германа (GeH_4) в качестве прекурсора. При слабой связи германия с водородом для эффективного пиролиза GeH_4 в процессе роста не требуются высокие температуры. Поэтому использование комбинированного метода СМЛЭ позволяет избегать проблем с однородностью эпитаксиальных слоев по площади подложки и дефектообразованием вследствие разбрызгивания расплава из тиглей при повышенной скорости испарения германия из твердотельного источника [4, 7]. С другой стороны метод сублимационной МЛЭ позволяет выращивать совершенные структуры со слоями различного типа и уровня легирования при низких температурах роста.

Исследовались квантоворазмерные структуры $p-i-n$ -диодов, в слаболегированные области которых встраивались массивы наноструктур германия. Структуры диодов выращивались на подложках $p^+-\text{Si}(001)$. Температура подложки в процессе роста составляла ~ 600 °С. GeH_4 разлагался пиролитически на поверхности подложки, на которую осаждался слой Ge. Последний по механизму Странски-Крастанова в ходе роста трансформировался в массив наноструктур Ge(Si). Массивы наноструктур Ge(Si) в количестве до 40 слоев разделялись легированными фосфором спейсерными слоями $n\text{-Si}$ толщиной $\sim 0,1$ мкм.

Фотодетекторы на основе эпитаксиальных слоев Ge на Si имели структуру $p-i-n$ -диодов со слабо легированным слоем германия и сильно легированной кремниевой подложкой, используемой в качестве одного из электро-

дов. Фотодиоды с активным слоем Ge на Si формировались на подложках n^+ -Si(001) марки КЭС-0,01. На поверхность буферных слоев n^+ -Si с использованием, так называемого, метода «горячей проволоки» [2] при температуре 350 °С осаждались эпитаксиальные слои Ge толщиной ~ 0,5–1 мкм.

Светоизлучающие диодные структуры с эпитаксиальными слоями Si:Er выращивали методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках p -Si (001) марки КДБ-1. Слой n -Si толщиной ~ 0,6 мкм легированный эрбием с концентрацией $\sim 3 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ осаждали при температуре подложки ~ 500 °С. При выращивании слоев использовались специально подготовленные кремниевые стержни с концентрацией эрбия $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

Морфология поверхности гетероэпитаксиальных структур Ge/Si(001) контролировалась методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) при помощи АСМ «Силвер Про» компании НТ-МТД (Россия). Кристаллическая структура исследовалась методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) высокого разрешения с использованием ПЭМ JEOL JEM 2100F. Критическая толщина пленки при переходе от двумерного к трехмерному режиму формирования наноструктур детектировалась с помощью системы ДБЭО (дифракция быстрых электронов на отражение).

На основе выращенных гетероэпитаксиальных слоев с использованием стандартных методов фотолитографии формировались мезаструктуры свето- и фотодиодов с верхним омическим контактом Au/Pd/Ti. Спектры ЭЛ структур регистрировались с использованием решетчатого монохроматора и охлаждаемого Ge-детектора. Измерение спектров ЭЛ проводилось при токе накачки 200 мА в импульсном режиме с периодом повторения 25 мс импульсов длительностью 4 мс. Спектры фоточувствительности (ФЧ) структур измерялись в режиме фотоэдс холостого хода. Источником монохроматического излучения служил решетчатый монохроматор с галогеновой лампой мощностью 100 Вт. Для построения спектров ФЧ S спектры фотоэдс нормировались на относительное спектральное распределение интенсивности фотовозбуждения. Для проверки реализации оптической

связи между светоизлучающими и фотоприемными структурами были изготовлены экспериментальные образцы оптопар. Функционирование оптоэлектронных пар контролировалось с использованием специально разработанной электронной схемы. Контроль фотоотклика ОП выполнялся с применением стандартной методики синхронного детектирования «lock-in» на частоте опорного сигнала, что обеспечивало выделение полезного сигнала на фоне шумов и помех. Регистрация фототока проводилась при помощи синхронного детектора SR-530 по схеме с малошумящим усилителем тока SR-570 производства фирмы Stanford Research Systems.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Были проведены исследования спектральных характеристик светоизлучающих и фотоприемных Ge/Si структур, определяющих эффективность параметров оптоэлектронных пар. Оптимизированные по характеристикам светоизлучающие диодные структуры с наноструктурами обычно отличаются от фотоприемных структур составом, размерами, поверхностной плотностью, числом слоев в массиве Ge(Si) наноструктур. Однако на одних и тех же структурах с наноструктурами был зарегистрирован как устойчивый эффект излучательной рекомбинации, так и эффект межзонного оптического поглощения. Сигнал ЭЛ диодных структур уверенно регистрировался с использованием многомодового кварцевого оптоволокна диаметром 50 мкм с помощью охлаждаемого Ge детектора. ФЧ диодных структур показала величину 25 мА/Вт на длине волны ~ 1,3 мкм. На рис. 1 показаны в относительных единицах спектры ЭЛ и ФЧ структур с Ge(Si) наноструктурами, а также ФЧ объемного Ge и эпитаксиальных структур Ge на Si. Из рисунка видно, что для сформированных по единой технологии структур с Ge(Si) наноструктурами пики интенсивности (S) в спектрах ЭЛ и ФЧ отличаются по длине волны (λ). В спектре ФЧ фотодиодов с наноструктурами Ge(Si) наблюдается полоса собственной ФЧ Si в диапазоне длин волн ~ 0,9–1,1 мкм, т. е. спектральной области энергий

квантов фотовозбуждения $h\nu \sim 1,05\text{--}1,30$ эВ (ширина запрещенной зоны кремния $E_{gSi} = 1,12$ эВ при температуре 293 К). В диапазоне длин волн $\sim 1,1\text{--}1,6$ мкм в спектральной области $h\nu \sim 0,70\text{--}1,05$ эВ меньше ширины запрещенной зоны кремния наблюдается полоса ФЧ, обусловленная межзонным оптическим поглощением в наноструктурах Ge(Si).

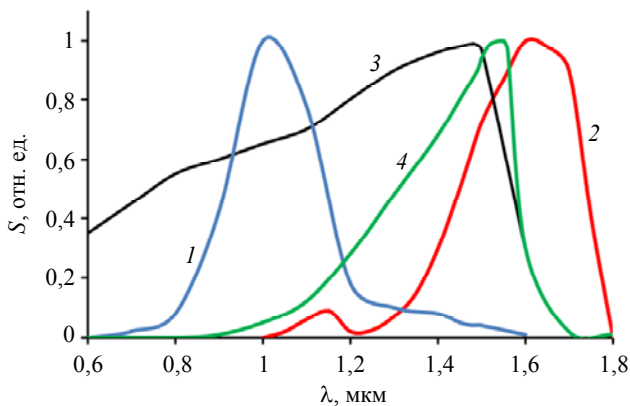


Рис. 1. Спектры ФЧ (1) и ЭЛ (2) структур с Ge(Si) наноструктурами и ФЧ объемного Ge (3) и эпитаксиальных структур Ge на Si (4)

В спектре ЭЛ структур с наноструктурами Ge(Si) наблюдается пик в диапазоне длин волн $\sim 1,4\text{--}1,8$ мкм с энергией максимума в области границы фоточувствительности $\sim 0,75$ эВ. К пику интенсивности ЭЛ структур с наноструктурами Ge(Si) как видно из рисунка ближе пик ФЧ структур с эпитаксиальными слоями Ge на Si.

Различная величина энергии пиков интенсивности в спектрах ЭЛ и ФЧ для ГС с наноструктурами Ge(Si) обусловлена особенностями их зонной структуры. Структуры с наноструктурами Ge(Si) относятся к гетероструктурам второго типа, когда локализованные состояния для электронов и дырок формируются по разные стороны от гетерограницы в самосогласованных потенциальных ямах [8–10]. В ГС с наноструктурами Ge(Si) возможны межзонные оптические переходы с энергиями меньше ширины запрещенной зоны, как кремния, так и германия. На рис. 2 показана зонная диаграмма с уровнями энергии размерного квантования (E_{h1} и E_{e1}) и модулями огибающих волновых функций ($|\Psi_h|$ и $|\Psi_e|$) основных квантово-размерных состояний в ГС на основе КТ Ge(Si). В реальных ГС с наноструктурами Ge(Si) характерны изгибы зон

вблизи гетерограницы Ge(Si)/Si, формирующие потенциальную яму для электронов и способствующие их локализации вблизи гетерограниц [10]. Изгиб зон вызван влиянием кулоновского потенциала дырок, локализованных в наноструктурах Ge(Si), а также упругими напряжениями в кремнии, под влиянием которых локальное значение ширины запрещенной зоны Si уменьшается по сравнению с объемным значением. Находящиеся в локализованных состояниях электроны и дырки пространственно разделены потенциальными барьерами на гетерогранице кремния с наноструктурами Ge(Si). Пик ЭЛ связан с переходом из зоны проводимости окружающего кластеры кремния в состояния валентной зоны наноструктур Ge(Si) обратно переходу 1 (рис. 2), согласно проведенным расчетам энергий переходов в наноструктурах по модели [3]. Рассчитанные значения энергии таких переходов с электронных состояний долины Δ_2 в s -зоне кремния в дырочные состояния вблизи потолка зоны тяжелых дырок в валентной зоне напряженных слоев Ge(Si) находятся в диапазоне от 0,7 до 0,85 эВ. Таким образом, пик ЭЛ с энергией в максимуме $\sim 0,75$ эВ обусловлен пространственно непрямыми излучательными межзонными оптическими переходами с участием фононов.

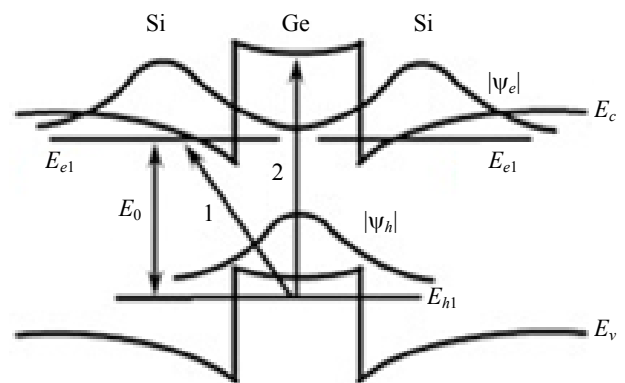


Рис. 2. Зонная диаграмма гетероструктуры с Ge(Si) наноструктурами

В полосе ФЧ, обусловленной межзонным оптическим поглощением в наноструктурах Ge(Si), наблюдается рост интенсивности ФЧ от края полосы поглощения $\sim 0,7$ эВ с ростом энергии квантов фотовозбуждения, что может свидетельствовать об увеличении доли переходов с возбужденных состояний электронов и дырок в области 0,85–0,95 эВ. Переходы с

возбужденных состояний могут быть обусловлены флюктуацией размеров и формы наноструктур. Также возможны межзонные переходы по типу 2 (рис. 2). Энергия межзонных переходов по типу 2 для структур $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ при значениях $x \sim 0,5$ превышает энергию переходов по типу 1. Чтобы сблизить спектральные диапазоны ЭЛ и ФЧ для структур с наноструктурами $\text{Ge}(\text{Si})$ необходимо, чтобы островки представляли собой глубокую потенциальную яму для дырок. Однако в этом случае появляется риск снижения эмиссии фотовозбужденных дырок и уменьшения ФЧ.

Для структур с наноструктурами $\text{Ge}(\text{Si})$ эмиссия фотовозбужденных носителей из наноструктур служит важным элементом механизма фотоэлектрических явлений. В гетероструктурах $\text{Ge}(\text{Si})/\text{Si}$ конечными электронными состояниями межзонных оптических переходов в наноструктурах являются электронные состояния вблизи дна зоны проводимости $\text{Ge}(\text{Si})$, либо состояния в кремнии окружающем наноструктуру. Высота потенциальных барьеров для электронов в зоне проводимости для ГС второго типа не превышает десятков мэВ. Поэтому фотовозбужденные электроны в условиях межзонного оптического поглощения в наноструктурах беспрепятственно попадают в подконтактные области n^+ -типа проводимости. Фототок при этом лимитируется скоростью эмиссии фотовозбужденных дырок из наноструктур. Эмиссия дырок из наноструктур $\text{Ge}(\text{Si})$ с учетом потенциального барьера, обусловленного разрывом валентной зоны, определяется туннельным и термоактивационным механизмами [4]. Значения разрыва валентной зоны на границе наноструктур $\text{Ge}(\text{Si})$ для подзон тяжелых и легких дырок при температуре 300 К рассчитанные по [4] составляют $\sim 0,4$ эВ и $\sim 0,3$ эВ соответственно. Для оптоэлектронных пар использовались гетероструктуры с наноструктурами $\text{Ge}(\text{Si})$ с полученными экспериментальным путем оптимальными как для ФЧ, так и для ЭЛ режимами формирования (температура подложки в процессе роста ~ 600 °С).

Так как максимум ФЧ структур с эпитаксиальными слоями Ge/Si смещен в длинноволновую область спектра ближе к пику ЭЛ наноструктур $\text{Ge}(\text{Si})$ (рис. 1) были проведены

исследования характеристик оптопар со светодиодами на основе наноструктур $\text{Ge}(\text{Si})$ и ФЧ структурами на основе Ge/Si . Для снижения плотности дислокаций несоответствия ниже 10^5 см^{-2} ЭС $\text{Ge}/\text{Si}(001)$ выращивали при температуре ~ 350 °С с использованием метода газовой фазы осаждения. Результаты рентгенодифракционных и электронно-микроскопических исследований подтвердили монокристаллическую структуру ЭС Ge/Si . Ширина кривых качания вблизи рефлекса $\text{Ge}(004)$ на высоте 1/2 максимума составляла $\sim 0,12^\circ$, что меньше значений для ЭС $\text{Ge}/\text{Si}(001)$, выращенных методом ГФЭ при пониженном давлении [1]. Холловские измерения показали, что ЭС Ge/Si имеют p -тип проводимости с концентрацией и подвижностью дырок при 300 К $\sim 1 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и $\sim 900 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ соответственно. Плотность темнового тока фотодиодов составляла $\sim 10^{-2} \text{ А/см}^2$ при обратном напряжении 1 В.

При формировании оптоэлектронных пар меза структуры свето- и фотодиодов монтировались в металлокерамический корпус. Использовался вертикальный монтаж кристаллов свето- и фотодиодов с сопряжением поверхности активных областей. Электрическая изоляция между блоками излучателя и приемника с напряжением пробоя не менее 3 кВ обеспечивалась слоем плавленого кварца оптически прозрачного для излучения с длиной волны $\sim 1,54$ мкм. Ввиду относительно малого внешнего квантового выхода излучения для структур с наноструктурами обычно используются большие токи накачки, что приводит к перегреву и деградации устройств. Поэтому при измерениях параметров оптопар использовался импульсный режим работы. На светодиод подавались прямоугольные импульсы напряжения (меандр) с амплитудой 5 В с генератора сигналов Tabor Electronics WW2571, частота повторения импульсов 80 Гц, коэффициент заполнения 50 %. При этом через образец протекал ток ~ 300 мА. Для регистрации фототока с фотоприемного устройства использовался малощумящий усилитель тока Stanford Research Systems SR570 и цифровой осциллограф LeCroy 7100. При подаче сигнала на источник излучения на фотоприемнике был зафиксирован сигнал по форме и продолжительности совпадающий с входным

сигналом. При этом ток, измеренный на фотоприемном устройстве до усиления, был равен 4 нА. Полученный результат свидетельствует о принципиальной возможности использования светодиодов, созданных на основе структур с наноструктурами Ge(Si) в оптоэлектронных парах.

Исследовалась также возможность использования структур с наноструктурами Ge(Si) в качестве фотоприемных устройств для оптоэлектронных пар. При этом источниками света для оптопар с длиной волны излучения в диапазоне 1,3–1,55 мкм служили структуры с эпитаксиальными слоями кремния, легированными Er. К достоинствам структур Si:Er можно отнести возможность создания оптически активных сред, характеризующихся узкой и температурно-независимой спектральной линией в одном из окон прозрачности волоконно-оптических линий связи на длине волны $\sim 1,54$ мкм. Оптическая активность структур Si:Er обусловлена внутриатомными (внутриионными) переходами в частично заполненной $4f$ -оболочке Er экранированной $5s$ - и $5p$ -оболочками от внешних воздействий.

Светодиоды выполнялись на базе структур $p^+-Si/n-Si:Er/n^+-Si$. Для блока фотоприемников использовались изготовленные по модифицированной технологии фотодиоды, выполненные на основе кремниевых $p-i-n$ -структур с 25-слойным массивом самоформирующихся наноструктур Ge(Si) встроенных в i -область. В качестве основной характеристики оптронов измерялась зависимость фототока от входного тока светодиода. При измерениях использовался импульсный режим работы с контролем фотоотклика по методике синхронного детектирования на частоте опорного сигнала. С ростом силы тока на входе оптрона ($I_{сд}$) отмечался рост фотоотклика с выходом на насыщение при $I_{сд} \sim 250$ мА. Отмечена зависимость величины фототока от частоты входного сигнала (рис. 3).

Максимальные уровни фототока ~ 1 мкА наблюдались на частотах более 70 кГц. Оценка коэффициента передачи оптоэлектронной пары по току (K) показала значение $\sim 3,6 \times 10^{-6}$. Данное значение K близко к уровню максимально возможных значений коэффициента передачи для оптронов, если в качестве активных слоев свето- и фотодиодов для них

использовать структуры Si:Er и Ge(Si). По результатам исследований для уверенной регистрации оптопарного эффекта минимальные уровни внешней квантовой эффективности излучательной рекомбинации светодиодов и фоточувствительности фотодиодов должны составлять значения $\sim 10^{-5}$ и $\sim 10^{-4}$ соответственно в коммуникационном диапазоне длин волн 1,3–1,55 мкм. Замена в оптопарах фоточувствительных структур с наноструктурами Ge(Si) на фоточувствительные структуры, выполненные на основе эпитаксиальных слоев Ge/Si, позволяет увеличить максимальные значения K до $\sim 10^{-5}$.

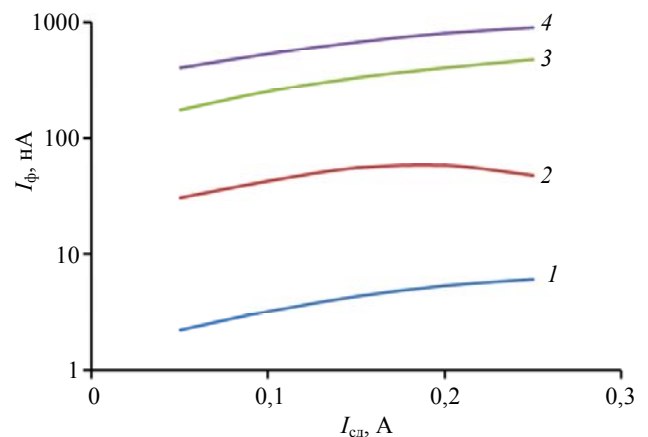


Рис. 3. Зависимость фототока ($I_{ф}$) от величины тока накачки ($I_{сд}$) при различных частотах модуляции сигнала (1 – 64,5 Гц; 2 – 647 Гц; 3 – 6,5 кГц; 4 – 72 кГц)

Заключение

Проведены исследования параметров источников и приемников оптического излучения, созданных на основе гетероэпитаксиальных структур Ge/Si как элементов конструкции ОП. Показано, что для сформированных по единой технологии структур с Ge(Si) наноструктурами пики интенсивности в спектрах ЭЛ и ФЧ отличаются по длине волны. Различная величина энергии пиков для ГС с наноструктурами Ge(Si) обусловлена особенностями их зонной структуры. Пик ЭЛ связан с переходами из зоны проводимости окружающего кластеры кремния в состояния валентной зоны наноструктур Ge(Si), тогда как в полосе ФЧ могут присутствовать межзонные переходы с возбужденных состояний электронов и дырок. Для структур с эпитаксиальными

слоями германия на кремнии максимальная ФЧ наблюдалась в длинноволновой области спектра приближаясь к пику ЭЛ наноструктур Ge(Si).

Показана принципиальная возможность использования в оптоэлектронных парах в качестве источников либо приемников оптического излучения структур с массивами самоформирующихся наноструктур Ge(Si), выращенных методом комбинированной сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии кремния и газофазной эпитаксии германия. В оптоэлектронных парах наряду со структурами с наноструктурами Ge(Si) использовались структуры $p^+-Si/n-Si:Er/n^+-Si$ в качестве источников излучения и ЭС Ge/Si в качестве фотоприемных устройств. Монтаж мезоструктур свето- и фотодиодов в металлокерамический корпус с сопряжением поверхности активных областей кристаллов позволял регистрировать оптопарный эффект с коэффициентом передачи K в диапазоне от 10^{-5} до 10^{-6} для различных сочетаний активных структур оптопар. Определены минимальные уровни внешней квантовой эффективности излучательной рекомбинации светодиодов $\sim 10^{-5}$ и фоточувствительности фотодиодов $\sim 10^{-4}$ в коммуникационном диапазоне длин волн 1,3–

1,55 мкм, обеспечивающие уверенную регистрацию оптопарного эффекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шенгуров В. Г., Чалков В. Ю., Денисов С. А. и др. / Физика и техника полупроводников. 2015. Т. 49. № 10. С. 1411–1414.
2. Иванова М. М., Качемцев А. Н., Михайлов А. Н., Филатов Д. О. и др. / Физика и техника полупроводников. 2018. Т. 52. № 6. С. 651–655.
3. Максимов Г. А., Красильник З. Ф., Филатов Д. О., Круглова М. В. и др. / Физика твердого тела. 2005. Т. 47. № 1. С. 26–28.
4. Филатов Д. О., Горшков А. П., Волкова Н. С., Гусейнов Д. В. и др. / Физика и техника полупроводников. 2015. Т. 49. № 3. С. 399–405.
5. Крыжков Д. И., Соболев Н. А., Андреев Б. А., Денисов Д. В. и др. / Физика и техника полупроводников. 2005. Т. 39. № 12. С. 1448–1451.
6. Белова О. В., Шабанов В. Н., Касаткин А. П., Кузнецов О. А. и др. / Физика и техника полупроводников. 2008. Т. 42. № 2. С. 136–140.
7. Пчеляков О. П., Болховитянов Ю. Б., Двуреченский А. В., Соколов Л. В. и др. / Физика и техника полупроводников. 2000. Т. 34. № 11. С. 1281–1299.
8. Schmidt O. G., Lange C., Eberl K. / Appl. Phys. Lett. 1999. Vol. 75. P. 1905.
9. Алешкин В. Я., Бекин Н. А. / Физика и техника полупроводников. 1997. Т. 31. С. 171.
10. Двуреченский А. В., Якимов А. И. / Физика и техника полупроводников. 2001. Т. 35. № 9. С. 1143–1153.

PACS: 85.60.-q

Light-emitting and photodetector structures on the basis of Ge/Si for optoelectronic pairs

M. M. Ivanova and Yu. A. Kabalnov

FSUE "RFNC VNIIEF"

37, Mira pr., Sarov, Nizhny Novgorod Region, 607188 Russia

Received 22.01.2025; revised 28.02.2025; accepted 7.04.2025

Parameters of optical radiation sources and receivers developed on the basis of Ge/Si heteroepitaxial structures as elements of optoelectronic pairs were studied. For structures with Ge (Si) nanowires formed by a single technology, the intensity peaks in the luminescence and photosensitivity spectra differed in wavelength due to the features of the zone structure. There is presented the possibility of using both optical radiation sources and receivers in optoelectronic pairs of the structures with self-forming Ge (Si) nanowires arrays. $p^+-Si/n-Si:Er/n^+-Si$ structures were tested in optoelectronic pairs along with the structures with Ge/Si nanowires as radiation sources and Ge (Si) epitaxial structures (ES) as photode-

tector devices. For various combinations of active elements, an optopar effect with K transmission factor in the range of 10^{-5} – 10^{-6} was recorded.

Keywords: optical radiation sources and receivers; germanium on silicon epitaxial structures; structures with Ge(Si) nanowires; luminescence and photosensitivity spectra; optoelectronic pairs.

REFERENCES

1. Shengurov V. G., Chalkov V. Yu., Denisov S. A. et al., *Semiconductor Physics and Technology* **49** (10), 1411–1414 (2015).
2. Ivanova M. M., Kachemtsev A. N., Mikhailov A. N., Filatov D. O. et al., *Semiconductor Physics and Technology* **52** (6), 651–655 (2018).
3. Maximov G. A., Krasilnik Z. F., Filatov D. O., Kruglova M. V. et al., *Physics of the Solid State* **47** (1), 26–28 (2005).
4. Filatov D. O., Gorshkov A. P., Volkova N. S., Guseynov D. V. et al., *Semiconductor Physics and Technology* **49** (3), 399–405 (2015).
5. Kryzhkov D. I., Sobolev N. A., Andreev B. A., Denisov D. V. et al., *Semiconductor Physics and Technology* **39** (12), 1448–1451 (2005).
6. Belova O. V., Shabanov V. N., Kasatkin A. P., Kuznetsov O. A. et al., *Semiconductor Physics and Technology* **42** (2), 136–140 (2008).
7. Pchelyakov O. P., Bolkhovityanov Yu. B., Dvurechenskiy A. V., Sokolov L. V. et al., *Semiconductor Physics and Technology* **34** (11), 1281–1299 (2000).
8. Schmidt O. G., Lange C. and Eberl K., *Appl. Phys. Lett.* **75**, 1905 (1999).
9. Aleshkin V. Ya. and Bekin N. A., *Semiconductor Physics and Technology* **31**, 171 (1997).
10. Dvurechenskiy A. V. and Yakimov A. I., *Semiconductor Physics and Technology* **35** (9), 1143–1153 (2001).