

Мощные СВЧ-фотодиоды на основе гетероструктур InAlAs/InGaAs, синтезируемых методом молекулярно-лучевой эпитаксии

© К.С. Журавлев,^{1,2} А.М. Гилинский,¹ И.Б. Чистохин,¹ Н.А. Валишева,¹ Д.В. Дмитриев,¹
А.И. Торопов,¹ М.С. Аксенов,^{1,2} А.Л. Чиж,³ К.Б. Микитчук³

¹ Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН,
630090 Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный университет,
630090 Новосибирск, Россия

³ Государственное научно-производственное объединение „Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника“ НАН Беларуси,
220090 Минск, Беларусь
e-mail: zhur@isp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 16 декабря 2020 г.

В окончательной редакции 24 февраля 2021 г.

Принято к публикации 1 марта 2021 г.

Описаны конструкция и технологии изготовления мощных СВЧ-мезафотодиодов с барьером Шоттки диаметром от 10 до 40 μm и обратной засветкой через подложку на основе гетероструктур InAlAs/InGaAs/InP, выращиваемых методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Рабочая частота фотодиодов диаметром 10 μm составляет 40 GHz, а максимальная выходная СВЧ-мощность на частоте 20 GHz для фотодиодов диаметром 15 μm достигает 58 mW. Коэффициент амплитудно-фазового преобразования составил 1.5 rad/W, что превосходит литературные данные и делает данную конструкцию фотодиодов перспективной для применения в системах генерации и передачи аналоговых СВЧ-сигналов с высокими требованиями к фазовым шумам.

Ключевые слова: мощные СВЧ-фотодиоды, гетероструктуры InAlAs/InGaAs, барьер Шоттки, планарная технология.

DOI: 10.21883/JTF.2021.07.50957.347-20

Введение

Постоянное расширение рабочих частотных диапазонов аналоговых систем связи, радиолокации и передачи информации привело к возникновению ограничений на дальность передачи СВЧ-сигналов по традиционным коаксиальным линиям из-за значительного роста величины потерь мощности сигнала с ростом его частоты. Так, при повышении частоты сигнала до 70–100 GHz величина потерь в коаксиальной линии передачи растет до 8–10 dB/m, что затрудняет передачу сигнала на расстояние свыше нескольких метров. Решение проблемы ограничения дальности передачи состоит в применении передачи СВЧ-сигнала по оптоволоконным линиям [1–3]. В этом случае при использовании длины волны излучения 1.55 μm , соответствующей минимуму потерь распространяемого оптического волокна на основе оксида кремния, погонные потери мощности снижаются до 0.2 dB/km, что позволяет реализовать передачу сигналов на расстояния в десятки километров. При этом канал передачи является нечувствительным к электромагнитным помехам и обеспечивает гальваническую развязку передатчика и приемника. Для построения таких волоконно-оптических систем передачи СВЧ-сигналов требуются полупроводниковые лазеры, модуляторы и фотодиоды на выбранный спектральный диапазон, при этом эффективность передачи сигнала и динамический диапазон канала передачи прямо зависят от мощности используемого

источника излучения и величины фототока фотоприемника. К настоящему времени предложены различные конструкции СВЧ-фотодиодов — с двойной обедненной областью, с частично обедненным поглощающим слоем и фотодиоды с униполярной проводимостью (UTC) [4], значения выходной мощности которых в большинстве случаев не превышают единиц милливольт. Для ряда применений, однако, требуются фотодетекторы, обеспечивающие выходную мощность в десятки-сотни милливольт при полосе пропускания до 10–50 GHz. Задача изготовления мощных СВЧ-фотодиодов, имеющих такие характеристики, ставит технологические проблемы, обусловленные в значительной части необходимостью оптимизации конструкции гетероэпитаксиальной структуры (ГЭС) и трудностями отвода тепла от области малого объема, в которой в таком приборе протекает фототок. Рекордные значения выходной мощности для указанного частотного диапазона показывают модифицированные варианты UTC-фотодиодов, продемонстрировавшие при использовании алмазного теплоотвода выходную мощность до 1.86 W на частоте 10 GHz [5].

Несмотря на значительное количество опубликованных результатов и вариантов исполнения СВЧ-фотодиодов, разработка технологических приемов их изготовления и конструкций продолжает оставаться актуальной. В настоящей работе описаны конструкция и технология изготовления мощных СВЧ-фотодиодов для спектрального диапазона 1.0–1.65 μm , выполненных в

виде мезафотодиодов с барьером Шоттки с обратной засветкой. Первые результаты, полученные с фотодиодами с барьером Шоттки, были приведены нами в работе [6]. Изготовлены фотодиоды с диаметрами мез от 10 до 40 μm . Рабочая частота фотодиодов диаметром 10 μm достигает 40 GHz, а максимальная выходная СВЧ-мощность на частоте 20 GHz для фотодиодов диаметром 15 μm равна 58 mW. Исследованы характеристики амплитудно-фазового преобразования фотодиодов и показана перспективность их применения в системах передачи аналоговых СВЧ-сигналов с высокими требованиями к фазовым шумам.

1. Конструкция фотодиода

Конструкция фотодиодов является развитием предложенной ранее в работе [7]. Поперечное сечение мощного СВЧ-фотодиода с барьером Шоттки на основе ГЭС $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ схематически показано на рис. 1, *a*, а его зонная диаграмма — на рис. 1, *b*. Фотодиод представляет собой мезаструктуру круглого сечения с массивными металлическими контактными выводами и состоит из следующих элементов:

1. Полуизолирующая подложка InP, на тыльную сторону которой нанесено просветляющее покрытие на длину волны 1.55 μm .
2. Контактный слой $n^+\text{-In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ толщиной 300 nm с концентрацией легирующей примеси $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, прозрачный для ИК-излучения (ширина запрещенной зоны 1.44 eV).
3. Поглощающий излучение слой $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$, разделенный на две области для минимизации влияния эффекта захвата носителей заряда на гетерогранице InAlAs/InGaAs: n^+ -слой толщиной 50 nm с концентрацией легирующей примеси $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ и нелегированный слой толщиной 500–1200 nm с концентрацией примеси $< 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.
4. Варизонный нелегированный слой $\text{In}_x\text{Ga}_y\text{Al}_{1-x-y}\text{As}$ толщиной 30 nm переходного состава, изменяющегося от $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ на границе с поглощающим слоем до $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$, необходимый также для устранения захвата носителей заряда на гетерогранице.
5. Нелегированный барьерный слой $n\text{-In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ толщиной 30 nm. Используется для увеличения высоты барьера Шоттки и тем самым значительного снижения величины темного тока фотодиода.
6. Металлический контакт Шоттки Ti/Au к нелегированному барьерному $n\text{-In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ -слою. Помимо основной функции — разделения фотогенерированных носителей — выполняет также роль зеркала для излучения, прошедшего сквозь поглощающий слой, что обеспечивает увеличение доли поглощенного излучения.
7. Металлический омический контакт Ge/Au/Ni/Au к контактному слою $n^+\text{-In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$.
8. Массивные выводы толщиной до 5 μm , формируемые осаждением золота на металлические контакты.

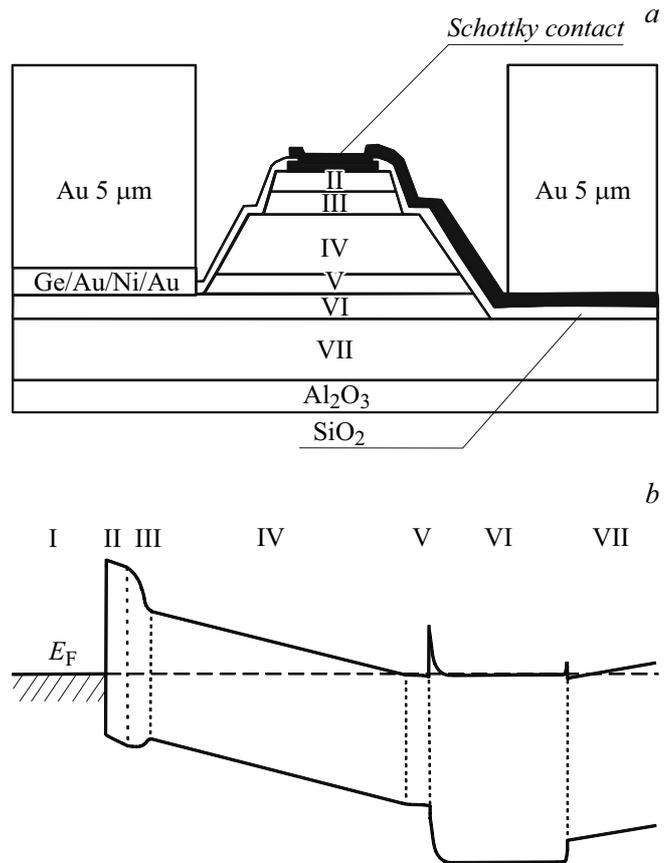


Рис. 1. *a* — схема мезаструктуры фотодиода с барьером Шоттки (не в масштабе) и *b* — его зонная диаграмма. Области структуры: I — металл, II — барьерный слой $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$, III — варизонный слой $\text{In}_x\text{Ga}_y\text{Al}_{1-x-y}\text{As}$, IV, V — поглощающий слой $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$, VI — контактный слой $n^+\text{-In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$, VII — подложка InP. Вертикальные пунктирные линии отмечают границы между слоями ГЭС, E_F — уровень Ферми (*b*).

Использование массивных контактных выводов позволяет уменьшить электрическое и тепловое сопротивление конструкции, а их индуктивность может быть использована для увеличения предельной рабочей частоты фотодиода [7,8].

2. Изготовление фотодиодов

Фотодиоды изготавливались на основе многослойных полупроводниковых ГЭС InAlAs/InGaAs/InP, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Выращивание ГЭС производилось в установке МЛЭ „Compact-21T“ производства Riber (Франция) на epi-ready подложках полуизолирующего (001) InP, легированного Fe. Перед началом выращивания ГЭС подложки для очистки подвергались прогреву при температуре от 150 до 540°C. При высоких температурах прогрев проводился в потоке мышьяка с давлением $2.5 \cdot 10^{-5} \text{ Torr}$. Контроль очистки подложки выполнялся

с помощью регистрации картин дифракции быстрых электронов на отражение до формирования на поверхности подложки сверхструктуры (4×2), свидетельствующей об удалении остаточных окислов и достижении атомарной чистоты поверхности [9]. После очистки подложки рост слоев ГЭС проводился в порядке, описанном в разд. 1. Для защиты от окисления при контакте с атмосферой барьерный слой ГЭС защищался слоем $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ толщиной 30 nm. Выращивание слоев $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ и $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ ГЭС производилось при температуре подложки 520 и 480°C соответственно. Контроль состава слоев твердого раствора $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ выполнялся с помощью методики фотолюминесценции на предварительно выращиваемых калибровочных ГЭС. Контроль состава x твердого раствора $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ поглощающего слоя проводился с помощью измерения спектра оптического пропускания ГЭС вблизи ширины запрещенной зоны поглощающего слоя. Толщина поглощающего слоя d_{AL} изменялась в серии ГЭС в диапазоне 500–1200 nm. Выбор толщины поглощающего слоя ГЭС d_{AL} определяется требуемыми эффективностью преобразования излучения и частотными параметрами фото диода. Величина d_{AL} определяет долю поглощенного излучения, время пролета слоя фотогенерируемыми носителями заряда, задающее предельную рабочую частоту фото диода, и емкость мезаструктуры, также влияющую на его частотные характеристики. При использовании тонкого поглощающего слоя ($d_{\text{AL}} < 1000$ nm) применение сплошного металлического контакта Шоттки позволяет увеличить эффективность поглощения падающего излучения благодаря отражению контактом части излучения, прошедшего поглощающий слой, назад и его повторному проходу через область поглощения. Для определения коэффициента отражения излучения R_S контактами Шоттки был измерен спектр отражения образца, представляющего собой ГЭС с нанесенным контактом Шоттки. При измерении неполяризованное излучение подавалось со стороны полированной подложки ГЭС под углом 45° к нормали образца. Для снижения влияния интерференции волн, отраженных контактом и границей подложка–воздух, измерение проводилось при спектральном разрешении в три раза больше периода интерференции. В спектре, показанном на рис. 2, следует выделить две области. Для энергий фотона $h\nu$ более ширины запрещенной зоны поглощающего слоя E_g интенсивность отраженного образца света определяется отражением на границе InP подложки с воздухом, поскольку излучение, прошедшее границу раздела, поглощается в ГЭС. Как видно из рисунка, в этом случае величина коэффициента отражения образца для $h\nu > 0.85$ eV равна 38%, что соответствует расчету для случая отражения от фосфида индия (показатель преломления $n = 3.3$ [10]). В области прозрачности поглощающего слоя $h\nu < E_g$ коэффициент отражения образца увеличивается благодаря отражению излучения металлическим контактом и составляет 70%. Расчет величины коэффициента отражения для $h\nu < E_g$

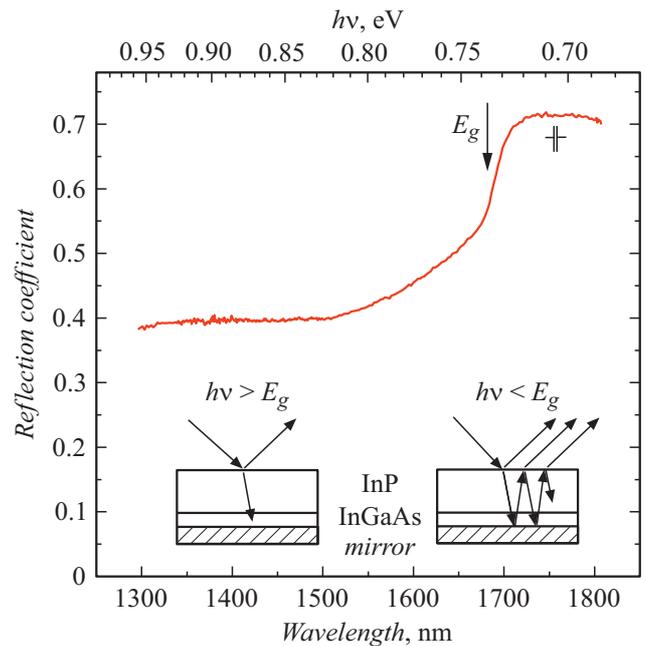


Рис. 2. Спектр отражения ГЭС с контактом Шоттки, выступающим в роли зеркала. Стрелка указывает энергию фотона, соответствующую ширине запрещенной зоны E_g поглощающего слоя InGaAs . На вставке иллюстрируется геометрия измерения и режимы отражения для „коротковолновой“ и „длинноволновой“ частей спектра. Спектральное разрешение указано на графике.

показал, что для излучения, прошедшего поглощающий слой фото диода, контакт Шоттки имеет коэффициент отражения $R_S = (65 \pm 5)\%$. Расчет проводился с учетом интерференции для системы в виде прозрачного плоскопараллельного слоя полупроводника с показателем преломления $n = 3.15$, граничащего со средой с $n = 1$ с одной стороны и зеркалом с другой. Полученное значение R_S используется при расчете скорости генерации носителей при поглощении излучения и выборе толщины поглощающего слоя.

Фото диоды на ГЭС $\text{InAlAs}/\text{InGaAs}/\text{InP}$ изготавливались методом планарной технологии. Мезаструктуры диаметром от 10 до 40 μm формировались химическим травлением. Омический контакт к контактному слою n^+ - $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ изготавливался напылением последовательности слоев Ge (20 nm)/ Au (40 nm)/ Ni (20 nm)/ Au (200 nm) с последующим вжиганием в водороде при температуре 385°C. Барьер Шоттки на нелегированном слое $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ изготавливался путем осаждения слоев Ti (20 nm)/ Au (200 nm) после удаления химическим травлением защитного слоя $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ и естественного оксидного слоя InAlAs . Для межслойной изоляции, защиты и пассивации поверхности мезаструктуры использовались слои SiO_2 толщиной 800 nm, синтезируемые методом осаждения из газовой фазы низкого давления при температуре 250°C. Внешний вид фото диодной структуры до изготовления массивных кон-

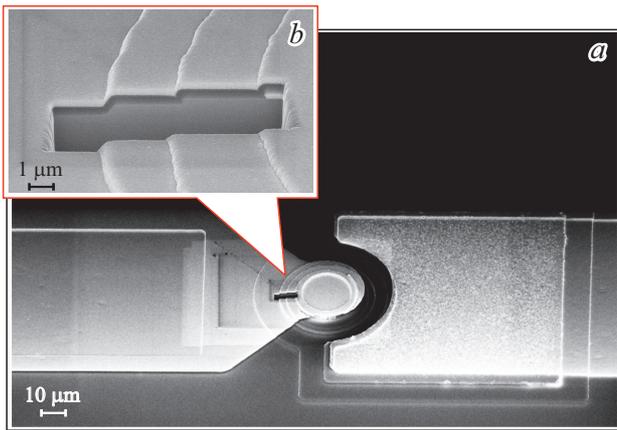


Рис. 3. *a* — мезафотодиод до изготовления массивных контактов. Слева от центра диода методом травления фокусированным ионным пучком выполнен разрез мезы, обеспечивающий контроль качества осажденных слоев. На вставке (*b*) область разреза показана в увеличенном виде.

тактов и поперечный разрез в области мезаструктуры, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа Zeiss Cross Beam 1540XB, показаны на рис. 3, *a* и *b* соответственно. Для обеспечения электрического и теплового контакта фотодиода в дальнейшем на контактные и барьерные металлические площадки электролитическим методом осаждался слой золота толщиной до 5 μm. Затем на утоненную механическим шлифованием с последующей полировкой подложку наносилось просветляющее покрытие из Al₂O₃.

3. Характеристики фотодиодов

Измерение низкочастотных характеристик фотодиодов проводилось с помощью зондовой станции Cascade M150 и анализатора параметров полупроводниковых приборов Agilent 1500B, излучение полупроводникового лазера с длиной волны 1.55 μm подавалось через одномодовое волокно со стороны подложки фотодиода. Для измерения СВЧ-параметров чипы фотодиодов монтировались методом перевернутого кристалла на носителе с выполненными на них копланарными линиями передачи с волновым сопротивлением 50 Ω. Измерения выполнялись с помощью стенда на основе одночастотного полупроводникового лазера с усилителем, электрооптического модулятора Маха-Цандера с полосой частот 40 GHz, векторного анализатора Anritsu MS4645B и измерителя мощности Anritsu MA24126A.

Вольт-амперные характеристики изготовленных фотодиодов соответствовали полученным ранее для барьеров Шоттки на InAlAs [6,11] и характеризовались высотой барьера 0.7 V и коэффициентом идеальности 1.2. Значения обратного тока при напряжении -3 V, усредненные по выборкам из 20 чипов каждая, для фотодиодов диаметром 10, 15 и 40 μm составляли соответственно

0.04, 0.1 и 0.3 nA. Эффективность преобразования на постоянном токе для длины волны излучения 1.55 μm составляла 0.65, 0.72, 0.87 и 1.05 A/W для фотодиодов с толщиной поглощающего слоя $d_{AL} = 500, 600, 900$ и 1200 nm соответственно, что находится в согласии с расчетом с учетом отражения излучения металлическим контактом Шоттки. Для минимизации влияния времени пролета поглощающего слоя при измерении СВЧ-характеристик использовались фотодиоды с наименьшей толщиной поглощающего слоя $d_{AL} = 500$ nm. На рис. 4 показаны амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) фотодиодов диаметром 10 и 15 μm, имеющих наименьшие значения емкости структуры. Низкочастотный срез

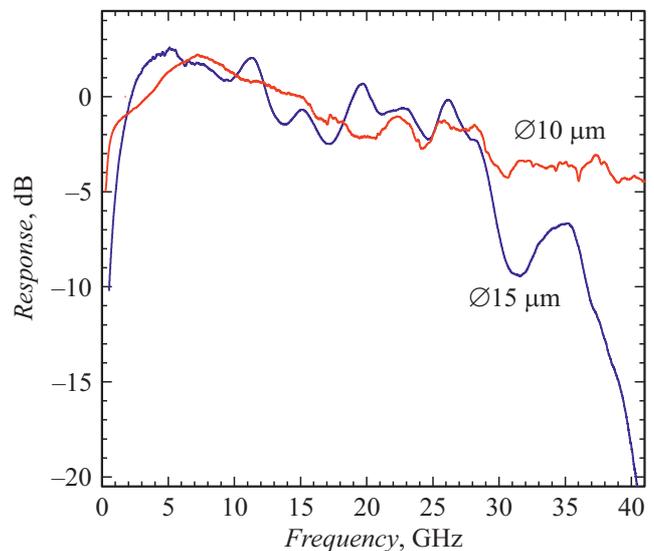


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики фотодиодов с диаметром мезы 10 и 15 μm.

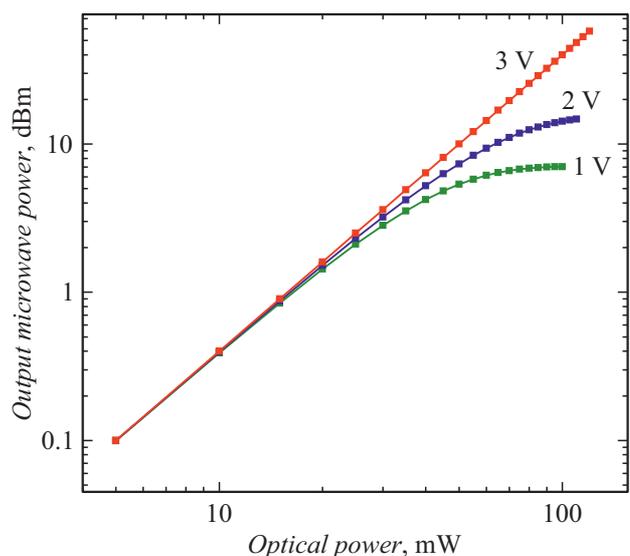


Рис. 5. Зависимость выходной СВЧ-мощности фотодиода диаметром 15 μm от мощности входного оптического излучения при частоте модуляции 20 GHz для напряжения смещения в диапазоне 1–3 V.

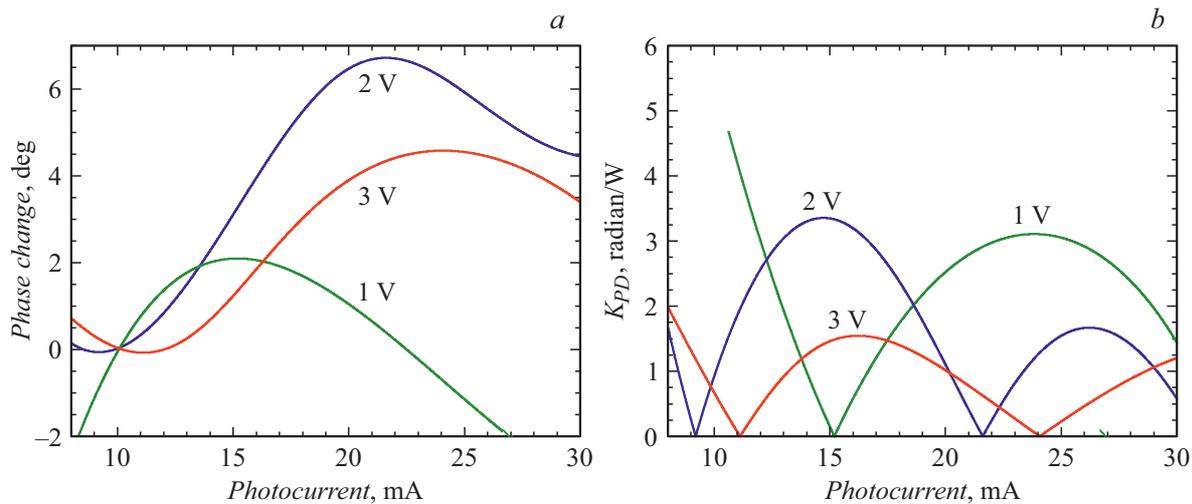


Рис. 6. Зависимости (а) фазы выходного СВЧ-сигнала фотодиода и (б) коэффициента АМ-РМ конверсии от мощности входного оптического сигнала для напряжения смещения в диапазоне 1–3 В. Частота модуляции 20 GHz. Мощность входного сигнала характеризуется величиной среднего фототока фотодиода.

АЧХ обусловлен использованием схемы питания фотодиода с фильтром высоких частот, неоднородности в виде „модуляций“ связаны с неполным согласованием импедансов в СВЧ-тракте. Как видно из рисунка, частотный диапазон фотодиода диаметром $15\ \mu\text{m}$ ограничен 28–30 GHz, в то время как фотодиод диаметром $10\ \mu\text{m}$ обладает частотным диапазоном до 40 GHz. Максимальная выходная мощность СВЧ-сигнала была получена для диодов диаметром $15\ \mu\text{m}$. На рис. 5 показаны зависимости выходной СВЧ-мощности такого фотодиода от входной мощности модулированного светового потока при частоте модуляции 20 GHz. Наибольшая выходная мощность СВЧ-фотодиода, соответствующая границе теплового разрушения прибора, достигла 58 mW.

Важной характеристикой фотодиодов, используемых в системах передачи аналоговых СВЧ-сигналов, является величина изменения фазы выходного сигнала при изменении мощности входного модулированного излучения. Изменение фазы с интенсивностью излучения приводит к амплитудно-фазовому преобразованию (АМ-РМ конверсии) и появлению дополнительных фазовых шумов выходного сигнала за счет конверсии шума интенсивности источника излучения [12,13], что существенно для устройств, чувствительных к фазе сигнала, включая осцилляторы и многоканальные системы со связанными фазами сигналов. Для исследования величины коэффициента амплитудно-фазового преобразования (коэффициента АМ-РМ конверсии) $K_{PD} = \Delta\varphi_{PD} / \Delta P_{opt}$ (rad/W) фотодиодов, где $\Delta\varphi_{PD}$ — изменение фазы выходного сигнала и ΔP_{opt} — изменение мощности входного излучения, были измерены зависимости фазы выходного сигнала от мощности входного оптического пучка. Измерение проводилось при частоте модуляции 20 GHz, для измерения мощности падающего пучка использовалась средняя величина фототока, измеряемого в цепи питания

фотодиода. Для повышения однородности освещения рабочей площадки фотодиода падающее излучение дефокусировалось, при этом эффективность преобразования фотодиода равнялась $0.2\ \text{A/W}$. На рис. 6, а показаны зависимости фазы выходного сигнала от мощности входного для фотодиода диаметром $15\ \mu\text{m}$, полученные для различных напряжений обратного смещения. Как видно из рисунка, изменение сдвига фазы с мощностью немонотонно. Рассчитанная по этим данным величина коэффициента амплитудно-фазового преобразования в зависимости от мощности показана на рис. 6, б. Величина K_{PD} для напряжения смещения –3 В, обеспечивающего получение наибольшей выходной мощности СВЧ-сигнала фотодиода, не превышает $1.5\ \text{rad/W}$ и близка к нулю при значении среднего фототока фотодиода 24 mA. Для сравнения, опубликованные данные коэффициента K_{PD} фотодиодов серии xHPLD компании Discovery Semiconductor, Inc. ограничены величиной $5\ \text{rad/W}$ [14]. Значения коэффициента амплитудно-фазового преобразования оптимизированных UTC-фотодиодов, приводимые с нормировкой на относительное изменение мощности, составили $6.5\text{--}9.5^\circ$ на частоте 15 GHz в аналогичном диапазоне токов [15], что соответствует величинам $K_{PD} = 3.6\text{--}4.6\ \text{rad/W}$ ($4.8\text{--}6.2\ \text{rad/W}$ при пересчете для частоты 20 GHz). Значительно меньшая величина коэффициента АМ-РМ конверсии в фотодиодах Шоттки указывает на перспективность такой конструкции для применений в скоростных линиях передачи аналоговых данных с высокими требованиями к величине фазового шума.

Заключение

Рассмотрены конструкция и технология изготовления мощных высокочастотных мезафотодиодов с ба-

рьером Шоттки, полученных на основе гетероструктур InGaAs/InAlAs/InP, синтезируемых методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Показано, что чувствительность фотодиодов на постоянном токе составляет до 1.05 A/W, темновой ток равен 0.04–0.3 nA для диаметра фотодиодов 10–40 μm соответственно. Фотодиоды демонстрируют полосу частот в 28 и 40 GHz для диаметра мезы 15 и 10 μm соответственно, и выходную мощность на частоте 20 GHz до 58 mW. Обнаружено, что коэффициент амплитудно-фазового преобразования (АМ-РМ конверсии) фотодиодов с барьером Шоттки более чем в три раза ниже, чем ранее опубликованные литературные данные, что показывает перспективность этой конструкции фотодиодов для работы в системах с высокими требованиями к величине фазового шума передаваемого СВЧ-сигнала.

Благодарности

Контроль внешнего вида структур и измерение низкочастотных характеристик фотодиодов выполнялись в Центре коллективного пользования „Наноструктуры“ ИФП СО РАН.

Финансирование работы

Изготовление гетероструктур, использованных в работе, было поддержано Российским научным фондом в рамках проекта 19-72-30023. Изготовление и тестирование макетов было поддержано Российским фондом фундаментальных исследований в рамках проекта № 20-52-26013.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A.J. Seeds, K.J. Williams. *J. Lightwave Technol.*, **24** (12), 4628 (2006). DOI: 10.1109/JLT.2006.885787
- [2] T. Berceci, P.R. Herczfeld. *IEEE Trans. Microw. Theor. Tech.*, **58** (11), 2992 (2010). DOI: 10.1109/TMTT.2010.2076932
- [3] W.S.C. Chang, editor. *RF Photonic Technology in Optical Fiber Links* (Cambridge University Press, NY., 2002)
- [4] И.Б. Чистохин, К.С. Журавлев. *Успехи прикладной физики*, **3** (1), 92 (2015). [I.B. Chistokhin, K.S. Zhuravlev. *Uspekhi Prikladnoj Fiziki*, **3** (1), 92 (2015) (in Russian).]
- [5] X. Xie, Q. Zhou, K. Lim, Y. Shen, Q. Lim, Z. Yang, A. Beling, J.C. Campbell. *Optica*, **1** (6), 429 (2013). DOI: 10.1364/OPTICA.1.000429
- [6] А.Л. Чиж, К.Б. Микитчук, К.С. Журавлев, Д.В. Дмитриев, А.И. Торопов, Н.А. Валишева, М.С. Аксенов, А.М. Гилинский, И.Б. Чистохин. *Письма в ЖТФ*, **45** (14), 52 (2019). DOI: 10.21883/PJTF.2019.14.48026.17764 [A.L. Chizh, K.B. Mikitichuk, K.S. Zhuravlev, D.V. Dmitriev, A.I. Toropov, N.A. Valisheva, M.S. Aksenov, A.M. Gilinsky, I.B. Chistokhin. *Tech. Phys. Lett.*, **45** (7), 739 (2019). DOI: 10.1134/S1063785019070204]
- [7] A. Chizh, S. Malyshev, K. Mikitichuk. 2015 International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP) — Paphos, Cyprus, 24–29 October, 2015, p. 1. DOI: 10.1109/mwp.2015.7356654
- [8] R. Lewen, U. Westergren, R. Schatz, E. Berglind. *J. Lightwave Technol.*, **19** (12), 1956 (2001).
- [9] S. Katsura, Y. Sugiyama, O. Oda, M. Tacano. *Appl. Phys. Lett.*, **62** (16), 1910 (1993). DOI: 10.1063/1.109540
- [10] S. Adachi. *J. Appl. Phys.*, **66** (12), 6030 (1989). DOI: 10.1063/1.343580
- [11] M.S. Aksenov, N.A. Valisheva, I.B. Chistokhin, D.V. Dmitriev, A.S. Kozhukhov, K.S. Zhuravlev. *Appl. Phys. Lett.*, **114** (22), 221602 (2019). DOI: 10.1063/1.5091598
- [12] D. Eliyahu, D. Seidel, L. Maleki. *IEEE Trans. on Microw. Theor. Tech.*, **56** (2), 449 (2008). DOI: 10.1109/TMTT.2007.914640
- [13] Y. Hu, C. Menyuk, X. Xie, M. Hutchinson, V. Urick, J. Campbell, K. Williams. *IEEE Photonics J.*, **9** (2), 5501111 (2017). DOI: 10.1109/JPHOT.2017.2682251
- [14] Электронный ресурс. Режим доступа: https://www.discoverysemi.com/Product_Pages/DSC-xHLPD.php
- [15] J. Zang, X. Xie, Q. Yu, Z. Yang, A. Beling, J.C. Campbell. *J. Lightwave Technol.*, **36** (22), 5218 (2018). DOI: 10.1109/JLT.2018.2871882