

УДК 621.383

**А.М. Гилинский, М.С. Аксенов, И.Б. Чистохин,  
Д.В. Дмитриев, А.И. Торопов, К.С. Журавлев**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова  
Сибирского отделения РАН, Новосибирск, Россия

## **ФОТОДИОДЫ С РАСШИРЕННЫМ ДИНАМИЧЕСКИМ ДИАПАЗОНОМ ДЛЯ СИСТЕМ РАДИОФОТОНИКИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ**

Экспериментально изучено влияние конструкции скоростных фотодиодов для систем радиофотоники и передачи сигналов на величину обратного тока диодов. Показано, что мезафотодиоды с барьером Шоттки демонстрируют наименьшие величины обратного тока, превосходя фотодиоды *pin*-конструкции. Изготовлены фотодиоды со средним по выборке значением обратного тока 0,4 нА при диаметре фоточувствительной мезы 25 мкм. Показано, что величина обратного тока определяется током утечки по боковой поверхности мезаструктур.

**Ключевые слова:** радиофотоника, телекоммуникации, гетероструктуры, InGaAs, InAlAs, фотодиоды, молекулярно-лучевая эпитаксия.

**A.M. Gilinsky, M.S. Aksenov, I.B. Chistokhin,  
D.V. Dmitriev, A.I. Toropov, K.S. Zhuravlev**

Rzhanov Institute of Semiconductor Physics,  
The Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

## **WIDE DYNAMIC RANGE PHOTODIODES FOR MICROWAVE PHOTONICS AND COMMUNICATION SYSTEMS**

The influence of the design of high-speed photodiodes for microwave photonics and signal transmission systems on the diode dark current is studied experimentally. It is shown that Schottky barrier photodiodes demonstrate the lowest dark currents, excelling photodiodes of the *pin* design. Photodiodes of 25 micron mesa diameter with the dark current average value as low as 0.4 nA have been manufactured. It is shown the dark current value is controlled by the mesa side wall leakage.

**Keywords:** microwave photonics, communications, heterostructures, InGaAs, InAlAs, photodiodes, molecular beam epitaxy.

### **Введение**

Технологии радиофотоники, обеспечивающие передачу и обработку широкополосных аналоговых сигналов с применением оптических методов, находят всё более широкое применение в аппаратуре связи, генерации и синхронизации сигналов, радиолокации и

управления [1–3]. Широко известным направлением применения систем радиофотоники является передача высокочастотных сигналов по оптоволоконной линии на расстояния, недостижимые для традиционных коаксиальных кабелей в силу больших потерь мощности высокочастотного сигнала в кабеле [4]. В последнее время на основании таких систем также предложены новые методы создания датчиков физических величин для удалённых измерительных систем и передачи и обработки сигналов таких датчиков [5, 6]. Для построения радиофотонных систем передачи сигналов требуются малошумящие полупроводниковые лазеры, модуляторы и фотодетекторы с широким динамическим диапазоном. Фотодетекторы радиофотонных оптоволоконных трактов передачи сигналов выполняются на основе высокоскоростных фотодиодов спектрального диапазона 1,2–1,6 мкм. Как правило, для увеличения коэффициента передачи и динамического диапазона тракта фотодиоды выполняют с высокими значениями максимального выходного тока, измеряемыми десятками миллиампер. Для расширения динамического диапазона тракта передачи сигналов или линии связи с датчиками необходимо также обеспечить малые значения темнового тока фотодиода. Кроме динамического диапазона линии передачи с величиной темнового тока фотодиода также может быть связана его надёжность, поскольку повышенные значения темнового тока могут быть обусловлены наличием дефектов структуры, ведущих к деградации и выходу прибора из строя [7].

В данной работе рассматривается влияние конструкции фотодиодов для систем радиофотоники и передачи сигналов, обеспечивающей сниженные значения обратного тока фотодиода. Проведено сравнение конструкций фотодиодов на основе традиционной *pin*-структуры и структуры с барьером Шоттки. Изготовлены фотодиоды с обратными токами 0,5 нА и менее, обеспечивающие расширение динамического диапазона фотоприемника. Обсуждаются механизмы, определяющие величину темнового тока в таких фотодиодах.

### **Исследуемые образцы и методика эксперимента**

Фотодиоды изготавливались на основе гетероэпитаксиальных структур (ГЭС) InGaAs/InAlAs, выращиваемых на полуизолирующих подложках InP (001) методом молекулярно-лучевой эпитаксии в установке Riber Compact 21T. Остаточное давление в сверхвысоковакуумной камере установки перед началом роста не превышало  $5 \cdot 10^{-11}$  Торр.

Перед выращиванием ГЭС подложка подвергалась двухступенчатому отжигу вначале при температуре 150°C для удаления легколетучих соединений и затем в потоке мышьяка при высокой температуре до 525 °C для удаления слоя окисла и формирования атомарно-чистой поверхности. Контроль состояния поверхности подложки проводился с помощью дифрактометра быстрых электронов на отражение, обеспечивавшего наблюдение за степенью очистки и формированием атомарно-чистой поверхности по появлению в картине дифракции поверхностной сверхструктуры. Температура поверхности в ходе роста ГЭС измерялась однополосным пирометром. Оперативные калибровки составов твердых растворов  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  и  $\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$  проводились непосредственно перед ростом ГЭС путем выращивания тестовых слоев, составы которых  $x$  и  $y$  измерялись оптическими методиками спектра пропускания (состав  $\text{InGaAs}$ ) и фотолюминесценции (состав  $\text{InAlAs}$ ) для введения коррекции молекулярных потоков и достижения требуемых составов  $x = 0,53$  и  $y = 0,52$ , обеспечивающих изопериодичность слоёв с подложкой. Отклонения в величинах составов от требуемых не превышали 0,2 %. По данным измерений эффекта Холла, концентрация остаточных примесей в слоях составляла  $\approx 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ .

Конструкции ГЭС для фотодиодов с *pin*-переходом и барьером Шоттки [8, 9] показаны на рис. 1. Толщина поглощающего излучение слоя  $\text{InGaAs}$ , определяющая чувствительность фотодиодов, составляла 950 нм для фотодиодов *pin*-конструкции и 900 и 1200 нм для фотодиодов с барьером Шоттки. ГЭС *pin*-конструкции выполнялась с дополнительным *p*-легированием части поглощающего слоя, предложенным ранее [10] для выравнивания времени транспорта носителей двух знаков в поглощающем слое (фотодиоды с частично обеднённым поглощающим слоем). Между слоями  $\text{InGaAs}$  и  $\text{InAlAs}$  для исключения образования потенциальных ям, выступающих в роли ловушек для носителей заряда, формировались области переходного состава.

Изготовление фотодиодов проводилось по мезатехнологии с помощью жидкостного травления, фотолитографии и формирования слоев диэлектриков и металлических контактных покрытий. Использование мезатехнологии обеспечивает значительно меньшие значения электрической емкости контактной системы фотодиода по сравнению с планарной (диффузионной) технологией изготовления приборов на легированных подложках. Конструкция фотодиодов показана на рис. 2.

<i>i</i> -InGaAs защитный слой
<i>i</i> -InAlAs барьерный слой
<i>i</i> -InGaAs поглощающий слой
$n^+$ -InGaAs контактный слой
$n^+$ -InAlAs контактный слой
InP подложка

*a*

<i>p</i> -InGaAs контактный слой
<i>p</i> -InAlAs барьерный слой
<i>p</i> -InGaAs поглощающий слой
<i>i</i> -InGaAs поглощающий слой
$n^+$ -InGaAs контактный слой
$n^+$ -InAlAs контактный слой
InP подложка

*б*

Рис.1. Гетерозпитаксиальные структуры для фотодиодов с барьером Шоттки (*a*) и *pin*-структурой (*б*) с частично обедненным поглощающим слоем; гетерограницы InGaAs/InAlAs выполняются в виде слоёв переходного состава

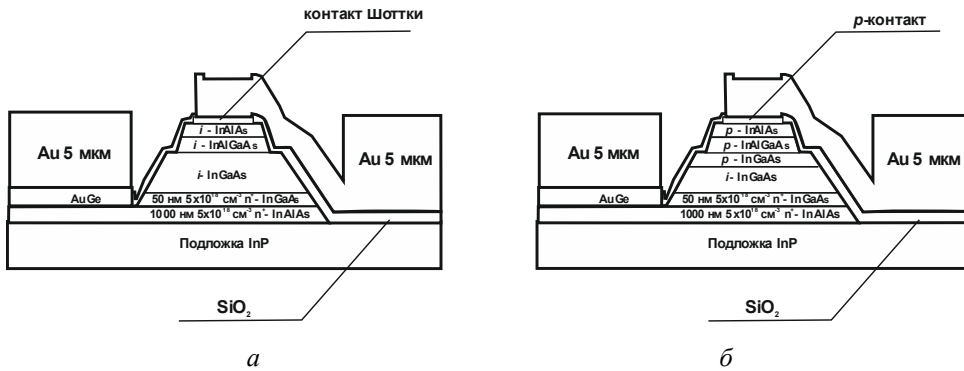


Рис. 2. Конструкция мезафотодиодов фотодиодов с барьером Шоттки (*a*) и *pin*-переходом (*б*)

Фотодиоды выполнены с обратной засветкой через подложку и сплошным покрывающим мезу металлическим контактом толщиной 5 мкм, обеспечивающим низкое электрическое сопротивление и выполняющим роль теплоотвода при больших интенсивностях возбуждения. При изготовлении *pin*-фотодиодов на верхней поверхности мезы изготавливался омический контакт к *p*-слою. Для фотодиодов с барьером Шоттки после удаления тонкого защитного слоя InGaAs на поверхности широкозонного слоя InAlAs осаждались барьерные слои на основе Ti либо Pt, обеспечивающие формирование потенциального барьера различной высоты [11, 12]. В остальном технологические операции изготовления фотодиодов с различными типами барьерной структуры были аналогичны. Омический контакт к сильнолегированному слою *n*-InAlAs формировался напылением композиции Ga/Au/Ni/Ge с последующим

вжиганием. Поверхность мезаструктуры пассивировалась слоем SiO<sub>2</sub> толщиной до 400 нм, синтезируемого методом химического осаждения из газовой фазы при пониженном давлении при температурах 195–250 °С. После проведения мезапроцесса подложка утонялась до толщины 120–200 мкм для разделения пластины на отдельные чипы. На обратную сторону подложки перед разделением наносилось просветляющее покрытие для снижения потерь излучения на отражение.

Были изготовлены фотодиоды с диаметром мезы 25 мкм, обеспечивающим простоту стыковки с одномодовым оптоволоконном с диаметром моды излучения 9,5 мкм. Для оценки максимальной рабочей частоты  $f_{3dB}$  фотодиодов, ограничиваемой временем дрейфа носителей заряда обеднённой области и полосой пропускания выходной цепи фотодиода, воспользуемся соотношением [13, 14]

$$f_{3dB}^{-2} = f_{RC}^{-2} + f_{др}^{-2},$$

где  $f_{RC} = (2 \pi \tau)^{-1}$  – ограничение рабочей частоты RC-цепью передачи сигнала фотодиода,  $f_{др}$  – ограничение из-за конечности времени дрейфа носителей заряда в обеднённой области структуры. Постоянная времени выходной цепи фотодиода  $\tau = RC$  определяется его емкостью:

$$C = (\epsilon \epsilon_0 S) / d,$$

где  $\epsilon$  и  $\epsilon_0$  – относительная диэлектрическая проницаемость материала ГЭС и диэлектрическая проницаемость вакуума,  $S$  – площадь фоточувствительной площадки фотодиода,  $d$  – толщина  $i$ -поглощающего слоя ГЭС с суммарным сопротивлением  $R$  нагрузки и последовательным сопротивлением фотодиода. Величина  $f_{др}$  определяется как

$$f_{др} = (3,5 v) / (2 \pi d),$$

где эффективная скорость дрейфа при учете транспорта носителей двух знаков определяется соотношением:

$$v^{-4} = \frac{1}{2}(v_e^{-4} + v_h^{-4}),$$

где  $v_e$  и  $v_h$  – скорости дрейфа электронов и дырок соответственно. Пренебрегая последовательным сопротивлением и паразитной емкостью контактов фотодиода, для толщины нелегированного слоя  $d = 900$  и  $1200$  нм при учете  $v_e = 6,5 \times 10^6$  см/с,  $v_h = 4,8 \times 10^6$  см/с для

сопротивления нагрузки 50 Ом получаем максимальную рабочую частоту  $f_{зв} = 23,3$  и  $21,6$  ГГц соответственно.

Измерение вольт-амперных характеристик (ВАХ) фотодиодов проводилось с помощью микрозондовой станции Nextron MPS-LN2 с возможностью регулирования температуры образца и анализатора параметров полупроводниковых приборов Keysight B1500. При регистрации ВАХ исследуемые образцы находились в темноте, напряжение разворачивалось от отрицательных значений к положительным, время регистрации одной кривой составляло 30 с. Чувствительность фотодиодов измерялась при подаче излучения лазера с длиной волны 1,54 мкм при помощи волоконной системы. Максимальная мощность лазерного излучения на выходе волокна составляла 37 мВт. Измерение чувствительности выполнялось без монтажа чипа фотодиода пайкой в линию передачи, поэтому для исключения перегрева фотодиода при высоких значениях выходного тока измерение проводилось в импульсном режиме с длительностью импульса излучения 10 мкс и скважностью 128.

### **Результаты и обсуждение**

Зависимость величины фототока фотодиодов с различной толщиной поглощающего слоя от мощности входного излучения показана на рис. 3. Как видно, максимальный выходной ток фотодиодов составляет не менее 37 мА и ограничивается доступной мощностью лазера. Чувствительность фотодиодов с толщиной поглощающего слоя 900 и 1200 нм в исследованной выборке чипов равна соответственно 0,86–0,94 А/Вт и 1,00–1,08 А/Вт. Следует отметить, что значения чувствительности превышают расчетные значения для доли поглощаемого в слое InGaAs излучения, равной  $\eta = 1 - \exp(-\alpha d)$ , где  $\alpha \approx 7500 \text{ см}^{-1}$  – коэффициент поглощения InGaAs,  $d$  – толщина поглощающего слоя. Увеличение чувствительности обусловлено тем, что излучение, прошедшее поглощающий слой, в фотодиоде с обратной засветкой может эффективно возвращаться назад металлическим контактным слоем, выступающим в роли зеркала.

Для изучения влияния конструкции фотодиода на величину его темнового тока были измерены ВАХ выборки фотодиодов различной конструкции, иллюстрируемые на рис. 4. Прямые ветви ВАХ фотодиодов всех типов представляют собой экспоненциальные зависимости вплоть до токов миллиамперного диапазона, а обратные ветви

демонстрируют сравнительно медленное изменение тока с напряжением для значений приложенного напряжения более 0,25 В. Данные на рис. 4 показывают, что фотодиоды *pin*-конструкции демонстрируют значительно более высокие величины темнового тока: для *pin*-фотодиодов средняя величина темнового тока при обратном напряжении 3,0 В равна 2,0 нА, в то время как фотодиоды с барьером Шоттки демонстрируют среднее значение тока 0,4 нА.

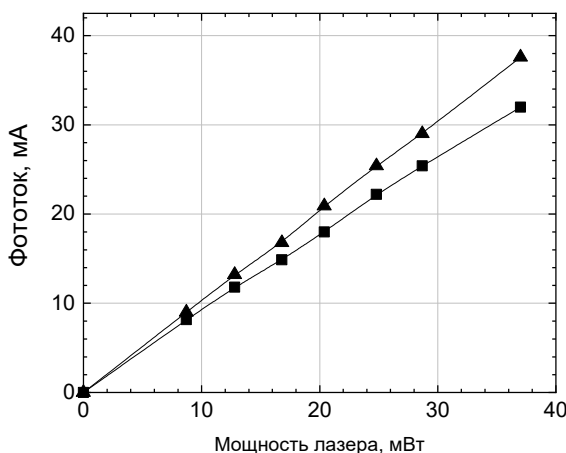


Рис. 3. Зависимость фототока фотодиодов с толщиной поглощающего слоя 900 и 1200 нм от мощности входного излучения, напряжение обратного смещения 3,0 В

Необходимо подчеркнуть, что величина темнового тока фотодиодов с барьером Шоттки оказалась не зависящей от материала барьера: в то время как на прямой ветви ВАХ значения тока барьерной структуры на основе платины значительно (в 8–10 раз) ниже величины тока структуры на основе титана при том же приложенном напряжении, что соответствует расчету с учетом большей высоты барьера Шоттки в этом случае, величины обратного тока этих фотодиодов практически не различаются. Это указывает на то, что механизмы, определяющие величину тока на прямой и обратной ветвях ВАХ, различны: ток прямой ветви обусловлен термоэмиссией электронов из металла в полупроводник, в то время как обратная ветвь контролируется механизмом, не связанным непосредственно с барьером Шоттки. Близость величин тока и аналогичный вид кривых ВАХ позволяют высказать такое же предположение и для *pin*-структуры.

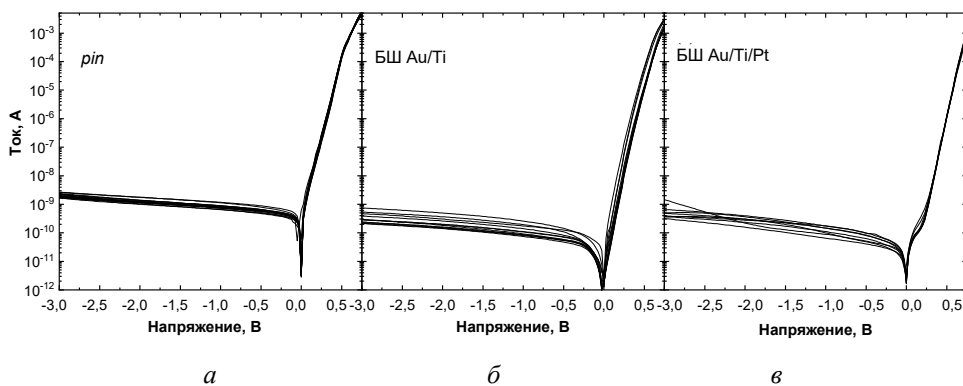


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики наборов *pin*-фотодиодов (а) и фотодиодов (б, в) с барьером Шоттки на основе Ti (б) и Pt (в)

Известно, что для полупроводниковых соединений  $A_3B_5$  значительный вклад в величину тока в различных приборных структурах (фотодетекторах, транзисторах, светоизлучающих приборах) могут создавать поверхностные каналы утечки и рекомбинации носителей, возникающие на границе полупроводника с атмосферой или покрытием из-за генерации дефектов структуры при его обработке. Несмотря на интенсивные исследования спектров дефектов, механизмов дефектообразования и способов пассивации уровней, создаваемых на и вблизи поверхности, на сегодняшний день для этих материалов не было предложено способа создания пассивирующего покрытия, обеспечивающего полное блокирование поверхностных каналов утечки [15]. Эффективность пассивирующих покрытий может различаться для родственных материалов и изменяться в зависимости от деталей процесса их синтеза. Для оценки роли токов утечки была исследована температурная зависимость обратного тока фотодиодов. На рис. 5 показаны ВАХ фотодиода с барьером Шоттки, измеренные в интервале температур 200–353 К, и температурная зависимость обратного тока при напряжении 2,8 В. Как видно из рис. 5, а, повышение температуры от 250 К ведёт к росту темнового тока. Однако понижение температуры ниже 250 К приводит к искажению хода ВАХ, в которых появляются немонотонные участки, а значения тока при нулевом приложенном напряжении, регистрируемые при низких температурах, становятся отличными от нуля. Такое поведение измерительным артефактом и обусловлено захватом носителей заряда на ловушки, контролирующую величину тока при его значениях ниже 1–10 пА и имеющие времена эмиссии, сравнимые или большие времени



регистрации ВАХ. В структуре фотодиода на основе прямозонных материалов InGaAs и InAlAs, оптимизируемой для работы на высоких частотах, отсутствуют области, способные выступать в роли ловушек для носителей заряда с сопоставимыми значениями времени эмиссии. Следовательно, темновой ток контролируется в данных условиях не объемным током барьерной структуры, а параллельным каналом утечки по поверхности мезаструктуры.

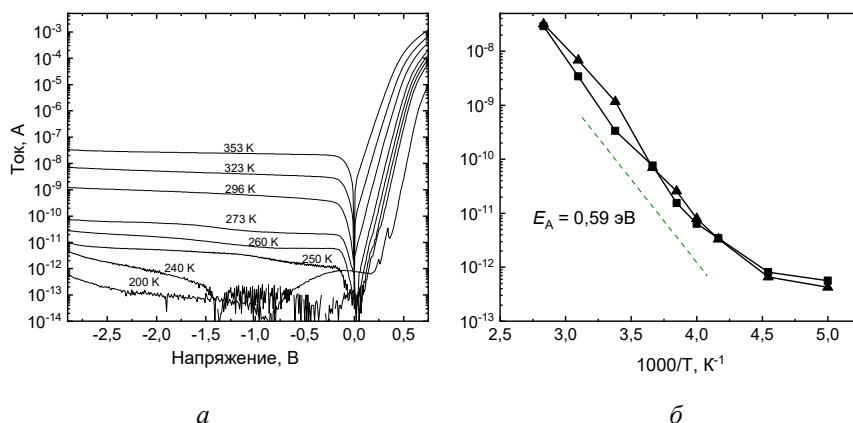


Рис. 5. Зависимость ВАХ фотодиода с барьером Шоттки (а) с  $d = 1200$  нм от температуры, сверху вниз: 353, 323, 296, 273, 260, 250, 240, 200 К, и зависимость обратного тока от температуры (б) при напряжении 2,8 В для фотодиодов с  $d = 900$  (квадраты) и 1200 нм (треугольники)

Зависимость величины обратного тока от температуры в диапазоне 250–353 К рис. 5, б имеет активационный вид с энергией активации 0,59 эВ. Величина энергии активации не соответствует механизму межзонной термогенерации темнового тока или механизму генерации тока с участием состояний в середине запрещенной зоны InGaAs (ширина запрещенной зоны при комнатной температуре 0,74 эВ). Это подтверждает связь механизма генерации темнового тока с утечками по поверхности мезаструктуры. В свою очередь, это заключение позволяет нам предположить, что описанное выше значительное превышение величины обратного тока *pin*-фотодиодов над значениями для Шоттки-структур также обусловлено доминированием поверхностного тока утечки и связано с различием в длине пути протекания темнового тока в структурах двух типов. В фотодиодах с барьером Шоттки отступ барьерного контакта от края мезы, составляющий 1,5–2 мкм, включается в длину пути, который проходит ток утечки, в то время как для *pin*-

структур ток утечки проходит только по боковой поверхности мезы между  $n^+$  и  $p^+$  слоями структуры, имеющими высокую проводимость. По этой причине величина электрического поля на мезе структур с барьером Шоттки ниже, чем для *pin*-структур, что в силу близкой к экспоненциальной зависимости плотности тока утечки от напряженности приложенного поля приводит к меньшим величинам тока утечки фотодиодов с барьером Шоттки. Это указывает путь дальнейшего совершенствования мезаструктур с *pin*-переходом для снижения их темнового тока.

### **Заключение**

Таким образом, в работе было экспериментально изучено влияние конструкции высокоскоростных фотодиодов для систем радиофотоники и передачи сигналов на величину обратного тока диодов, определяющего нижний предел регистрируемых значений фототока. Показано, что меза-фотодиоды с барьером Шоттки демонстрируют наименьшие величины обратного тока, превосходя фотодиоды *pin*-конструкции. Изготовлены фотодиоды со средним по выборке значением обратного тока 0,4 нА при диаметре фоточувствительной мезы 25 мкм. Показано, что величина обратного тока определяется током утечки по боковой поверхности мезаструктур.

### **Благодарности**

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФП СО РАН (шифр темы: FWGW-2022-0005). В работе использовалось оборудование Центра коллективного пользования «Наноструктуры» ИФП СО РАН.

### **Список литературы**

1. Seeds A.J., Williams K.J. Microwave photonics // Journal of Lightwave Technology. – 2006. – Vol. 24, no. 12. – P. 4628–4641.
2. Microwave Photonics / ed. C.H. Lee. – Boca Raton, FL: CRC Press, 2006. – 440 p.
3. Pan S., Zhang Y. Microwave photonic radars // Journal of Lightwave Technology. – 2020. – Vol. 38, no. 19. – P. 5450–5484.
4. Long-haul analog photonics / V.J. Urick, F. Bucholtz, J.D. McKinney, P.S. Devgan, A.L. Campillo, J.L. Dexter, K.J. Williams // Journal of Lightwave Technology. – 2011. – Vol. 29, no. 8. – P. 1182–1205.

5. Microwave photonics for optical fiber sensors / J. Hervás, A.L. Ricciuti, W. Li, N.H. Zhu, C.R. Fernández-Pousa, S. Sales, M. Li, J. Capmany // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. – 2017. – Vol. 23, no. 2. – P. 327.

6. Deep learning assisted microwave photonic dual-parameter sensing / X. Tian, L. Zhou, L. Li, G. Gunawan, L. Nguyen, X. Yi // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. – 2023. – Vol. 29, no. 6. – P. 1–11.

7. Correlation between the failure mechanism and dark currents of high power photodetectors / M.S. Islam, A. Nespola, M. Yeahia, M.C. Wu, D.L. Sivco, A.Y. Cho // *IEEE Annual Meeting Conference Proceedings. 13th Annual Meeting. IEEE Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting (LEOS)*. – 2000. – Vol. 1. – P. 82–83.

8. Мощные высокоскоростные фотодиоды Шоттки для аналоговых волоконно-оптических линий передачи СВЧ-сигналов / А.Л. Чиж, К.Б. Микитчук, К.С. Журавлев, Д.В. Дмитриев, А.И. Торопов, Н.А. Валишева, М.С. Аксенов, А.М. Гишинский, И.Б. Чистохин // *Письма в журнал технической физики*. – 2019. – Т. 45, № 14. – С. 52.

9. Мощные СВЧ-фотодиоды на основе гетероструктур InAlAs/InGaAs, синтезируемых методом молекулярно-лучевой эпитаксии / К.С. Журавлев, А.М. Гишинский, И.Б. Чистохин, Н.А. Валишева, Д.В. Дмитриев, А.И. Торопов, М.С. Аксенов, А.Л. Чиж, К.Б. Микитчук // *Журнал технической физики*. – 2021. – Т. 91, № 7. – С. 1158.

10. High-saturation-current InP-InGaAs photodiode with partially depleted absorber / X. Li, N. Li, X. Zheng, S. Demiguel, J.C. Campbell, D.A. Tulchinsky, K.J. Williams // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 2003. – Vol. 15, no. 9. – P. 1276–1278.

11. Pt-based gate enhancement-mode InAlAs/InGaAs HEMTs for large-scale integration / N. Harada, S. Kuroda, T. Katakami, K. Hikosaka, T. Mimura, M. Abe // *Proceedings of Third International Conference Indium Phosphide and Related Materials*. – 1991. – P. 377–380.

12. 1.09-eV Schottky barrier height of nearly ideal Pt/Au contacts directly deposited on n- and p+n-Al<sub>0.48</sub>In<sub>0.52</sub>As layers / A. Fricke, G. Stareev, T. Kummert, D. Sowada, J. Mähns, W. Kowalsky, K.J. Ebeling // *Appl. Phys. Lett.* – 1994. – Vol. 65, no. 6. – P. 755–757.

13. Design of high-speed and high-sensitivity photodiode with an input optical waveguide on semi-insulating InP substrate / K. Kato, S. Hata, J. Yoshida, A. Kozen // *Proceedings of LEOS Summer Topical Meeting Digest on Broadband Analog and Digital Optoelectronics, Optical Multiple Access Networks, Integrated Optoelectronics, and Smart Pixels*. – 1992. – P. 254–257.

14. Чистохин И.Б., Журавлев К.С. СВЧ-фотодетекторы для аналоговой оптоволоконной связи // Успехи прикладной физики. – 2015. – Т. 3, № 1. – С. 92.

15. Passivation of III–V surfaces with crystalline oxidation / P. Laukkanen, M.P.J. Punkkinen, M. Kuzmin, K. Kokko, J. Lång, R.M. Wallace // Appl. Phys. Rev. – 2021. – Vol. 8, no. 1. – P. 011309.

### References

1. Seeds A.J., Williams K.J. Microwave photonics. Journal of Lightwave Technology, 2006, vol. 24, no. 12, p. 4628-4641.

2. Microwave Photonics. Ed. C.H. Lee. Boca Raton, FL, CRC Press, 2006, 440 p.

3. Pan S., Zhang Y. Microwave photonic radars. Journal of Lightwave Technology, 2020, vol. 38, no. 19, p. 5450-5484.

4. Urick V.J., Bucholtz F., McKinney J.D., Devgan P.S., Campillo A.L., Dexter J.L., Williams K.J. Long-haul analog photonics. Journal of Lightwave Technology, 2011, vol. 29, no. 8, pp. 1182-1205.

5. Hervás J., Ricchiuti A.L., Li W., Zhu N.H., Fernández-Pousa C.R., Sales S., Li M., Capmany J. Microwave photonics for optical fiber sensors. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2017, vol. 23, no. 2, p. 327.

6. Tian X., Zhou L., Li L., Gunawan G., Nguyen L., Yi X. Deep learning assisted microwave photonic dual-parameter sensing. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2023, vol. 29, no. 6, pp. 1-11.

7. Islam M.S., Nespola A., Yeahia M., Wu M.C., Sivco D.L., Cho A.Y. Correlation between the failure mechanism and dark currents of high power photodetectors. IEEE Annual Meeting Conference Proceedings. 13th Annual Meeting. IEEE Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting (LEOS), 2000, vol. 1, pp. 82-83.

8. Chizh A.L., Mikitchuk K.B., Zhuravlev K.S., Dmitriev D.V., Toropov A.I., Valisheva N.A., Aksenov M.S., Gilinskii A.M., Chistokhin I.B. Moshchnye vysokoskorostnye fotodiody Shottki dlia analogovykh volokonno-opticheskikh linii peredachi SVCh-signalov [Powerful high-speed Schottky photodiodes for analog fiber-optic transmission lines of microwave signals]. Technical Physics Letters, 2019, vol. 45, no. 14, p. 52.

9. Zhuravlev K.S., Gilinskii A.M., Chistokhin I.B., Valisheva N.A., Dmitriev D.V., Toropov A.I., Aksenov M.S., Chizh A.L., Mikitchuk K.B. Moshchnye SVCh-fotodiody na osnove geterostruktur InAlAs/InGaAs,

sinteziruemykh metodom molekuliarno-luchevoi epitaksii [Powerful microwave photodiodes based on InAlAs/InGaAs heterostructures synthesized by molecular beam epitaxy]. *Technical Physics*, 2021, vol. 91, no. 7, p. 1158.

10. Li X., Li N., Zheng X., Demiguel S., Campbell J.C., Tulchinsky D.A., Williams K.J. High-saturation-current InP-InGaAs photodiode with partially depleted absorber. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, vol. 15, no. 9, pp. 1276-1278.

11. Harada N., Kuroda S., Katakami T., Hikosaka K., Mimura T., Abe M. Pt-based gate enhancement-mode InAlAs/InGaAs HEMTs for large-scale integration. *Proceedings of Third International Conference Indium Phosphide and Related Materials*, 1991, pp. 377-380.

12. Fricke A., Stareev G., Kummetz T., Sowada D., Mähns J., Kowalsky W., Ebeling K.J. 1.09-eV Schottky barrier height of nearly ideal Pt/Au contacts directly deposited on n- and p+n-Al<sub>0.48</sub>In<sub>0.52</sub>As layers. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, vol. 65, no. 6, pp. 755-757.

13. Kato K., Hata S., Yoshida J., Kozen A. Design of high-speed and high-sensitivity photodiode with an input optical waveguide on semi-insulating InP substrate. *Proceedings of LEOS Summer Topical Meeting Digest on Broadband Analog and Digital Optoelectronics, Optical Multiple Access Networks, Integrated Optoelectronics, and Smart Pixels*, 1992, pp. 254-257.

14. Chistokhin I.B., Zhuravlev K.S. SVCh-fotodetektory dlia analogovoi optovolokonnoi svyazi [Microwave photodetectors for analog fiber optic communications]. *Advances in Applied Physics*, 2015, vol. 3, no. 1, p. 92.

15. Laukkanen P., Punkkinen M.P.J., Kuzmin M., Kokko K., Lång J., Wallace R.M. Passivation of III–V surfaces with crystalline oxidation. *Appl. Phys. Rev.*, 2021, vol. 8, no. 1, p. 011309.

#### Сведения об авторах

**ГИЛИНСКИЙ А.М.**

e-mail: [gilinsky@isp.nsc.ru](mailto:gilinsky@isp.nsc.ru)

Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, г. Новосибирск.

#### About the authors

**A.M. GILINSKY**

e-mail: [gilinsky@isp.nsc.ru](mailto:gilinsky@isp.nsc.ru)

Ph. D. in Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher of Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

**АКСЕНОВ М.С.**

e-mail: [aksenov@isp.nsc.ru](mailto:aksenov@isp.nsc.ru)

Кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией Института физики полупроводников им. А.В. Ржанава СО РАН, г.Новосибирск.

**M.S. AKSENOV**

e-mail: [aksenov@isp.nsc.ru](mailto:aksenov@isp.nsc.ru)

Ph. D. in Physical and Mathematical Sciences, Head of Lab at Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

**ЧИСТОХИН И.Б.**

e-mail: [igor@isp.nsc.ru](mailto:igor@isp.nsc.ru)

Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института физики полупроводников им. А.В. Ржанава СО РАН, г.Новосибирск.

**I.B. CHISTOKHIN**

e-mail: [igor@isp.nsc.ru](mailto:igor@isp.nsc.ru)

Ph. D. in Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher of Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

**ДМИТРИЕВ Д.В.**

e-mail: [ddmitriev@isp.nsc.ru](mailto:ddmitriev@isp.nsc.ru)

Младший научный сотрудник Института физики полупроводников им. А.В. Ржанава СО РАН, г.Новосибирск.

**D.V. DMITRIEV**

e-mail: [ddmitriev@isp.nsc.ru](mailto:ddmitriev@isp.nsc.ru)

Junior Researcher of Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

**ТОРОПОВ А.И.**

e-mail: [toropov@isp.nsc.ru](mailto:toropov@isp.nsc.ru)

Кандидат физико-математических наук, главный научный сотрудник Института физики полупроводников им. А.В. Ржанава СО РАН, г.Новосибирск.

**A.I. TOROPOV**

e-mail: [toropov@isp.nsc.ru](mailto:toropov@isp.nsc.ru)

Ph. D. in Physical and Mathematical Sciences, Chief Researcher of Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

**ЖУРАВЛЕВ К.С.**

e-mail: [zhur@isp.nsc.ru](mailto:zhur@isp.nsc.ru)

Доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института физики полупроводников им. А.В. Ржанава СО РАН, г.Новосибирск

**K.S. ZHURAVLEV**

e-mail: [zhur@isp.nsc.ru](mailto:zhur@isp.nsc.ru)

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher of Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках государственного задания Института физических проблем Сибирского отделения РАН (код объекта: FWGW-2022-0005). В работе использовалось оборудование Центра коллективного пользования «Наноструктуры» Института физических проблем Сибирского отделения РАН.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад авторов.** Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

**Получена:** 21.10.2023

**Одобрена:** 23.10.2023

**Принята к публикации:** 25.10.2023

**Financing.** The work was carried out within the framework of the state assignment of the Institute of Physical Problems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (subject code: FWGW-2022-0005). The work used the equipment of the Center for Collective Use “Nanostructures” of the Institute of Physical Problems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

**Conflict of Interest.** The authors declare no conflict of interest.

**Author Contributions.** All authors have made an equivalent contribution to the publication.

**Received:** 21/10/2023

**Approved:** 23/10/2023

**Accepted for publication:** 25/10/2023

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Фотодиоды с расширенным динамическим диапазоном для систем радиофотоники и телекоммуникации / А.М. Гилинский, М.С. Аксенов, И.Б. Чистохин, Д.В. Дмитриев, А.И. Торопов, К.С. Журавлев // Прикладная фотоника. – 2023. – Т. 10, № 8. – С. 44–58.

Please cite this article in English as: Gilinsky A.M., Aksenov M.S., Chistokhin I.B., Dmitriev D.V., Toropov A.I., Zhuravlev K.S. Wide dynamic range photodiodes for microwave photonics and communication systems // Applied photonics, 2023, no. 8, pp. 44-58.