

УДК 621.315

## Пороговые характеристики ИК-фотоприемников на основе барьеров Шоттки PtSi-p-Si с высоколегированным поверхностным слоем

*А. В. Войцеховский, А. П. Коханенко, С. Н. Несмелов*  
Сибирский физико-технический институт при Томском государственном  
университете, Томск, Россия

*С. И. Ляпунов, Н. В. Комаров, А. Ю. Никифоров*  
Научно-производственное предприятие "Матричные технологии",  
Москва, Россия

*Рассмотрены возможности повышения пороговых характеристик детекторов на основе барьеров Шоттки PtSi-p-Si путем создания в кремнии поверхностного высоколегированного слоя короткоимпульсной имплантацией бора методом ядер отдачи. Определены параметры слоев и рабочие температуры, оптимальные для использования детекторов в спектральном диапазоне 3–5 мкм.*

Инфракрасные детекторы на основе барьеров Шоттки PtSi-p-Si широко применяются в современных тепловизионных приборах, действующих в спектральном диапазоне 3–5 мкм, что обусловлено возможностью интеграции матрицы детекторов и схем обработки сигнала на одном кремниевом кристалле, а также высокой однородностью свойств матрицы детекторов и отсутствием заметных шумов типа  $1/f$ . Важной задачей разработчиков матричных фотоприемников на основе барьеров Шоттки PtSi-p-Si является увеличение квантовой эффективности, которая в детекторах данного типа мала по сравнению с фоторезисторами и  $p$ - $n$ -фотодиодами. Варьировать высоту потенциального барьера, определяющую граничную длину волны и спектральную зависимость квантовой эффективности, можно путем создания вблизи поверхности кремния тонкого высоколегированного слоя. Использование молекулярно-лучевой эпитаксии позволяет получать высоколегированные пленки высокого качества [2–4]. Но этот метод имеет недостатки — высокую стоимость изготовленных образцов и сложность технологического цикла. В работах авторов показано, что короткоимпульсная имплантация ионов бора в кремний методом ядер отдачи позволяет создать поверхностные слои с экспоненциальным характером распределения легирующей примеси ( $N_{\max} = 10^{19} - 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ) толщиной порядка 10 нм [1].

Цель данной работы — установление роли фонового фототока и темнового тока в ограничении пороговых характеристик ИК-фотоприемников PtSi-p-Si с высоколегированным поверхностным слоем и определение оптимальных условий регистрации теплового излучения от объектов с температурой от  $-40$  до  $+40$  °С (233–313 К) в спектральном диапазоне ближнего окна прозрачности атмосферы (3–5 мкм).

Для оценки величины понижения потенциального барьера при создании поверхностного слоя методом короткоимпульсной имплантации методом ядер отдачи рассчитаны энергетические диаграммы барьеров Шоттки с высоколегированными поверхностными слоями [1]. Расчеты проводились на основе

решения одномерного уравнения Пуассона для экспоненциального профиля распределения концентрации примеси в приповерхностном слое полупроводника. В качестве исходных параметров поверхностных слоев были использованы результаты расчета имплантационных профилей с помощью программы TRIM© для метода ядер отдачи при использовании облучения ионами  $Ar^+$ , а в качестве источника ионов бора — пленку боросодержащего материала на поверхности Si (BSc, BSi, BO, BAs). Концентрация примеси на границе раздела изменялась в пределах  $9 \cdot 10^{18} - 1,4 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ , глубина поверхностного слоя составляла 12—14 нм. Установлено, что посредством создания в кремнии поверхностного высоколегированного слоя имплантацией бора методом ядер отдачи можно добиться уменьшения величины потенциального барьера на границе кремния и силицида платины до 0,1 эВ. Понижение величины потенциального барьера приводит к увеличению граничной длины фотоприемника и квантовой эффективности на заданной длине волны, что улучшает пороговые характеристики детекторов инфракрасного излучения.

Установим роль фонового фототока и темнового тока в ограничении пороговых характеристик ИК-фотоприемников PtSi-p-Si с высоколегированным поверхностным слоем при регистрации теплового излучения от объектов с температурой от  $-40$  до  $+40$  °C (233—313 K) в спектральном диапазоне ближнего окна прозрачности атмосферы (3—5 мкм).

Плотность темнового тока в барьерах Шоттки PtSi-p-Si с высоколегированным поверхностным слоем определяется термоэлектронной составляющей, которая при обратном смещении порядка 1 В может быть записана в виде

$$j_{\text{мэ}}(V) = A * T^2 \exp(-q(\phi_{\text{в}} - \Delta\phi) / kE_{\text{ф}}),$$

где  $A^*$  — эффективная постоянная Ричардсона (для системы PtSi-Si эта постоянная зависит от технологии изготовления; при расчетах использовалось значение, типичное для современных фотоприемников PtSi-p-Si,  $A^* = 10 \text{ А}/(\text{см} \cdot \text{К})^2$  [2]);

$T_{\text{ф}}$  — температура фотоприемника;

$k$  — постоянная Больцмана;

$\phi_{\text{в}}$  — высота поверхностного слоя в барьере Шоттки без поверхностного слоя (для структуры PtSi-p-Si высота потенциального барьера зависит от условий создания силицида и может изменяться от 0,19 до 0,25 эВ [2—4], при расчетах мы использовали значение  $\phi_{\text{в}} = 0,21$  эВ);

$\Delta\phi$  — понижение потенциального барьера в структуре с поверхностным высоколегированным слоем вследствие эффекта Шоттки (в электронвольтах).

Плотность фонового фототока в фотоприемнике на основе барьера Шоттки при использовании входного фильтра, пропускающего излучение в диапазоне от  $\lambda_1$  до  $\lambda_2$ , можно записать с учетом формулы Фаулера в следующем виде:

$$j_{\text{фон}} = A \sin^2(\theta) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{(1/\lambda - 1/\lambda_c)^2}{\lambda^3 (\exp(c_2/kT) - 1)} d\lambda = A \sin^2(\theta) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{(1/\lambda - (0,21 - \Delta\phi)/c_1)^2}{\lambda^3 (\exp(c_2/kT) - 1)} d\lambda,$$

где  $\theta$  — половинный апертурный угол;

$\lambda$  — длина волны, мкм;

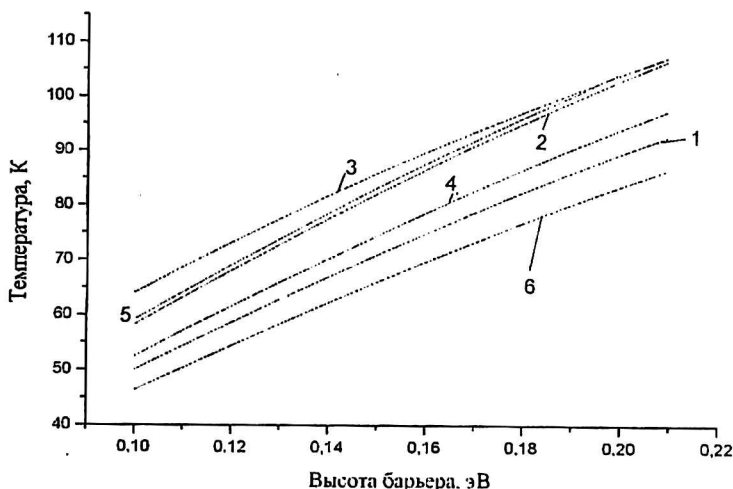
$T$  — температура фона;

$\lambda_c$  — граничная длина волны;

$$A = 7461 \text{ А} \cdot \text{мкм}^4 \cdot \text{см}^{-2};$$

$$c_1 = 1,24 \text{ эВ} \cdot \text{мкм}; c_2 \approx 1,43 \cdot 10^4 \text{ мкм} \cdot \text{К}.$$

На рис. 1 приведены зависимости температуры фотоприемника, при которой наблюдается равенство темнового тока и фототока для различных температур фона, апертурных углов и спектрального диапазона регистрации излучения.



**Рис. 1. Зависимость температуры фотоприемника, при которой темновой ток равен фоновому току, от высоты потенциального барьера на границе PtSi-p-Si:**

1 —  $T = 233 \text{ К}$ ,  $3-5 \text{ мкм}$ ;  $2\theta = 180^\circ$ ; 2 —  $T = 313 \text{ К}$ ,  $3-5 \text{ мкм}$ ,  $2\theta = 180^\circ$ ; 3 —  $T = 313 \text{ К}$ ,  $3-\lambda_c \text{ мкм}$ ,  $2\theta = 18^\circ$ ; 4 —  $T = 313 \text{ К}$ ,  $3-5 \text{ мкм}$ ,  $2\theta = 18^\circ$ ; 5 и 6 —  $T = 233 \text{ К}$ ,  $3-5 \text{ мкм}$ ,  $2\theta = 180^\circ$  при  $A^* = 0,2$  и  $72 \text{ А}/(\text{см} \cdot \text{К})^2$ , соответственно

Из рис. 1 следует, что при использовании фотоприемника на основе барьера PtSi-p-Si с высоколегированным поверхностным слоем при полусферической апертуре для регистрации теплового излучения от объектов с температурами 233—313 К в спектральном диапазоне 3—5 мкм высота потенциального барьера для реализации режима ограничения фоном (ОФ) при охлаждении фотоприемника до температуры жидкого азота должна составлять 0,18 эВ. При расширении спектрального диапазона до граничной длины волны фотоприемника, а также при увеличении температуры фона режим ограничения фоном будет реализован при меньших высотах потенциального барьера, а при использовании охлаждаемых апертур режим ограничения фоном при температуре 80 К будет наблюдаться при больших высотах потенциального барьера. Следует отметить, что при увеличении значения  $A^*$  зависимости сместятся вниз, т. е. для достижения режима ограничения фоном станет необходимо более глубокое охлаждение фотоприемника, при уменьшении значения  $A^*$  — темновые токи уменьшатся и фоновый фототок будет доминировать при большем температурном диапазоне. На рис. 1 приведены зависимости для различных значений  $A^*$ : 0,2 (кривая 5) и  $72 \text{ А}/(\text{см} \cdot \text{К})^2$  (кривая 6). Обычно фотоприемники на основе барьеров PtSi-p-Si используются при температуре жидкого азота 80 К. На рис. 2 показана зависимость плотности полного тока через контакт PtSi-p-Si при температуре фотоприемника 80 К от высоты потенциального барьера при различных условиях регистрации излучения. Из рис. 2 следует, что при малых высотах потенциального барьера доминирует темновая составляющая тока, а при больших потенциальных барьерах — фоновый фототок, величина которого зависит от температуры фона и апертурного угла фотоприемника.

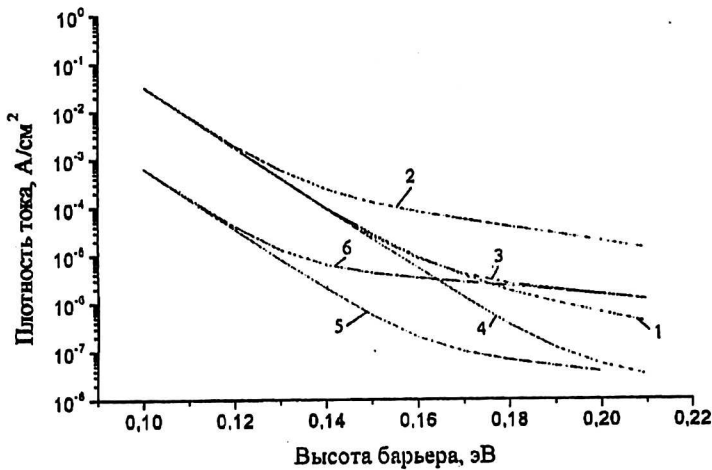


Рис. 2. Зависимость плотности полного тока через барьер PtSi-p-Si с высоколегированным поверхностным слоем от высоты потенциального барьера:

- 1 —  $T = 233$  К, спектральный диапазон от 3 мкм до граничной длины волны ( $\lambda_c$ ),  $2\theta = 180^\circ$ ;  
 2 —  $T = 313$  К,  $3-\lambda_c$  мкм,  $2\theta = 180^\circ$ ; 3 —  $T = 313$  К, 3–5 мкм,  $2\theta = 18^\circ$ ; 4 —  $T = 233$  К, 3–5 мкм,  $2\theta = 18^\circ$ ; 5 —  $T = 233$  К, 3–5 мкм,  $2\theta = 18^\circ$ ,  $A^* = 0,2$  А/(см·К)<sup>2</sup>;  
 6 —  $T = 313$  К, 3–5 мкм,  $2\theta = 18^\circ$ ,  $A^* = 0,2$  А/(см·К)<sup>2</sup>

Таким образом, фотоприемник на основе барьера PtSi-p-Si с высоколегированным поверхностным слоем в зависимости от величины барьера и условий регистрации излучения может действовать в режиме ограничения пороговых характеристик дробовыми шумами фонового фототока и темнового тока.

Для оценки изменений пороговых характеристик фотоприемников при создании поверхностного слоя рассмотрим изменения спектральной обнаружительной способности. Последняя характеризует пороговые свойства фотоприемника при регистрации излучения на определенной (рабочей) длине волны в случае, когда фоновый фототок определяется тепловым излучением в спектральном диапазоне 3–5 мкм (или  $3-\lambda_c$  мкм). Для барьера Шоттки с учетом выражений для квантовой эффективности и спектральной плотности излучения абсолютно черного тела получено следующее выражение для спектральной обнаружительной способности в случае режима ограничения пороговых характеристик дробовыми шумами темнового тока и фонового фототока:

$$D_{\lambda}^*(\lambda) = \frac{C(1 - \lambda/\lambda_c)^2}{\sqrt{\int_3^5 \frac{(1/\lambda - 1/\lambda_c)^2}{\lambda^3 (\exp(c_2/\lambda T) - 1)} d\lambda + \frac{2A^* T^2}{B} \exp\left(\frac{1,24q}{\lambda_c k T_{\Phi}}\right)}}$$

где  $C = 4 \cdot 10^6$  см·с<sup>0,5</sup>·мкм<sup>-2</sup>·Дж<sup>-1</sup>;  $B = 14\,880$  Кл·мкм<sup>4</sup>·см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>. Для режима ограничения пороговых характеристик дробовыми шумами фонового фототока в подкоренном выражении можно пренебречь вторым слагаемым, а в случае ограничения дробовыми шумами темнового тока — первым слагаемым. Изменение пороговых свойств при создании поверхностного высоколегированного слоя можно характеризовать коэффициентом  $K$ , равным отношению спектральной обнаружительной способности фотоприемника с граничной длиной волны  $\lambda_{c1}$  к обнаружительной способности фотоприемника с граничной длиной волны  $\lambda_{c0}$  ( $\lambda_{c1} = 1,24/(\phi_{\text{н}} - \Delta\phi)$ ):

$$K = \frac{D_{\lambda 1}^*(\lambda)}{D_{\lambda 0}^*(\lambda)} = \frac{(1 - \lambda / \lambda_{cl})^2}{(1 - \lambda / \lambda_{c0})^2} \sqrt{\frac{\int_3^5 \frac{(1/\lambda - 1/\lambda_{c0})^2}{\lambda^3} \frac{1}{\exp(C_1/\lambda T) - 1} d\lambda + \frac{2A^* T_{\phi}^2}{B} \exp\left(\frac{1,24q}{\lambda_{c0} k T}\right)}{\int_3^5 \frac{(1/\lambda - 1/\lambda_{cl})^2}{\lambda^3} \frac{1}{\exp(C_1/\lambda T) - 1} d\lambda + \frac{2A^* T_{\phi}^2}{B} \exp\left(\frac{1,24q}{\lambda_{cl} k T}\right)}}$$

где  $D_{\lambda 0}^*$  — обнаружительная способность фотоприемника на основе PtSi-Si без поверхностного слоя.

Таким образом, для случая ограничения фоном изменения обнаружительной способности определяются изменением граничной длины волны при создании поверхностного высоколегированного слоя. На рис. 3 показаны зависимости спектральной обнаружительной способности при рабочих длинах волн 3, 4, 5 мкм от высоты потенциального барьера при учете только фонового фототока (кривые 1—3), а также суммы фонового фототока и темнового тока при температуре фотоприемника 80 К (кривые 4—6). Из рис. 3 следует, что при малых рабочих длинах волн (когда квантовая эффективность по сигналу близка к 1 без поверхностного слоя) наблюдается уменьшение обнаружительной способности, связанное с увеличением фонового фототока из-за увеличения квантовой эффективности по фону при больших длинах волн. При больших рабочих длинах волн обнаружительная способность растет, что определяется значительным ростом квантовой эффективности по сигналу при увеличении граничной длины волны. В случае учета темнового тока при температуре 80 К наибольшее значение коэффициента  $K$  наблюдается при определенной высоте потенциального барьера.

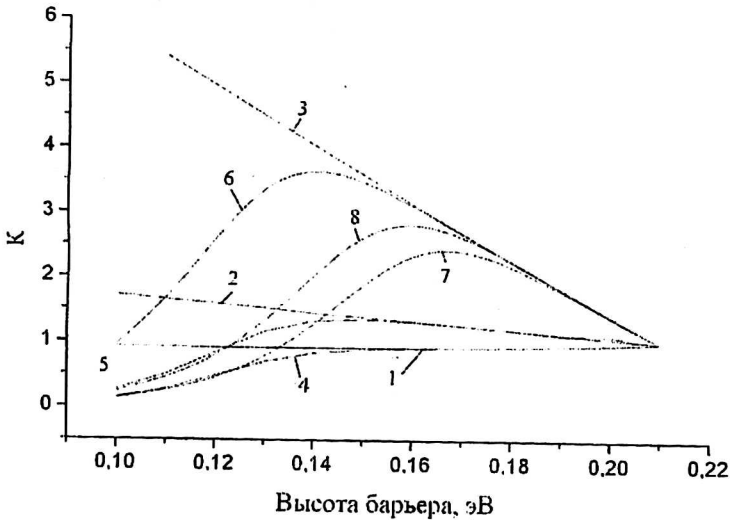


Рис. 3. Зависимость коэффициента  $K$  от высоты потенциального барьера в структуре PtSi-p-Si:

1, 4 — для длин волн 3 мкм; 2, 5 — 4 мкм; 3, 6—8 — 5 мкм; 1—7 —  $\theta = 180^\circ$ ,  $T = 273$  К; 8 —  $\theta = 180^\circ$ ,  $T = 273$  К; 1—3 — реализация режима ОФ; 4—6 — учет темнового тока при температуре фотоприемника 80 К для  $A^* = 0,2$  А/(см·К)<sup>2</sup>; 7—8 — для  $A^* = 10$  А/(см·К)<sup>2</sup>

На рис. 4 приведены зависимости обнаружительной способности от рабочей длины волны при различных граничных длинах волн (для барьера PtSi-p-Si без поверхностного слоя граничная длина волны близка к 6 мкм). Из рис. 4 следует, что увеличение граничной длины волны до 8 мкм умень-

шает обнаружительную способность вблизи 3 мкм, но увеличивает вблизи 5 мкм. При дальнейшем увеличении граничной длины волны фотоприемника на основе PtSi-p-Si обнаружительная способность уменьшается по всему спектральному диапазону 3—5 мкм, что обусловлено возрастанием темновых токов. При граничной длине волны 7 мкм спектральные зависимости обнаружительной способности при учете темновых токов сходны с зависимостями без учета темновых токов (кривые 2 и 5). Учет последних необходим при граничной длине большей, чем 7 мкм.

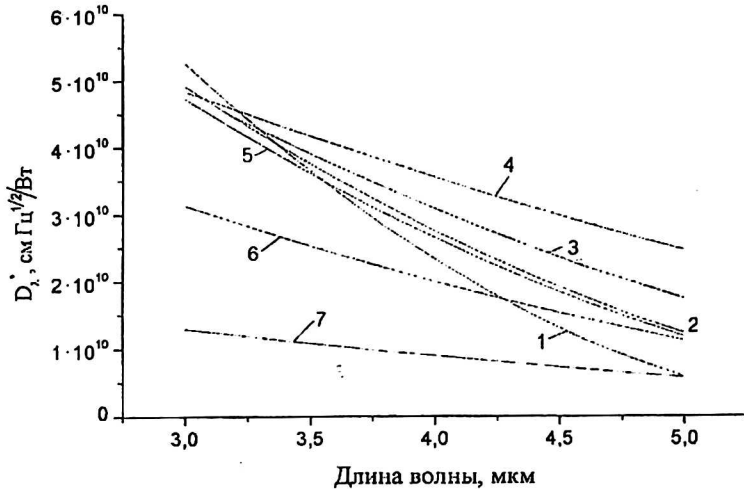


Рис. 4. Спектральные зависимости обнаружительной способности фотоприемника PtSi-p-Si с полусферической апертурой:

1—4 — при граничной длине волны 6, 7, 8, 10 мкм для режима ограничения фоном с температурой фона 273 К, соответственно; 5—7 — при граничной длине волны 7, 8, 9 мкм с учетом темновых токов при температуре фотоприемника 80 К, соответственно

Таким образом, уменьшение высоты потенциального барьера сначала приводит к увеличению обнаружительной способности (при больших длинах волн из диапазона 3—5 мкм), а при дальнейшем понижении барьера — к снижению, что связано с увеличением вклада темновых токов. Понижение температуры фотоприемника можно добиться режима ограничения фоном и увеличения обнаружительной способности при дальнейшем увеличении длины волны (кривая 4).

## Выводы

1. На основании расчета энергетических диаграмм барьеров Шоттки PtSi-p-Si с поверхностным высоколегированным слоем показано, что высота потенциального барьера на границе PtSi-p-Si существенным образом зависит от параметров высоколегированного поверхностного слоя. Создание поверхностных высоколегированных слоев с экспоненциальным распределением примеси короткоимпульсной имплантацией бора методом ядер отдачи уменьшает эффективную высоту потенциального барьера на 0,1 эВ.

2. Дробовой шум фонового фототока ограничивает пороговые характеристики фотоприемника на основе барьера PtSi-p-Si (с  $A^* = 10 \text{ A}/(\text{см} \cdot \text{K})^2$ ), регистрирующего тепловое излучение от объектов с температурой от 233 до 313 К в ближнем окне прозрачности атмосферы (3—5 мкм) при охлаждении фото-

приемника до 80 К в случае высоты потенциального барьера на границе кремний—силицид кремния большей, чем 0,18 эВ. При меньшей высоте потенциального барьера для реализации режима ограничения фоном необходимо понижение температуры фотоприемника, расширение спектрального диапазона действия фотоприемника или увеличении температуры фона.

3. Создание поверхностного высоколегированного слоя в барьерах Шоттки PtSi-p-Si немонотонно изменяет спектральную обнаружительную способность фотоприемника в диапазоне длин волн 3—5 мкм, увеличивает при больших рабочих длинах волн и уменьшает при малых рабочих длинах волн в диапазоне 3—5 мкм в случае реализации режима ограничения пороговых характеристик дробовыми шумами фонового фототока.

4. В случае действия фотоприемника PtSi-p-Si при температуре 80 К максимальное улучшение спектральной обнаружительной способности будет реализовано при определенной высоте потенциального барьера на границе кремний—силицид платины (около 0,16 эВ для рабочей длины волны 5 мкм при температуре фона 233 К).

#### Л и т е р а т у р а

1. Войцеховский А. В., Коханенко А. П., Несмелов С. Н., Ляпунов С. И., Комаров Н. В.//Изв. вузов. Сер. Физика. 2001. № 8. С. 11—20.
2. Kiamata M., Tubouchi N. Schottky-barrier photoemissive detectors. — Bellingam, Washington, USA//SPIE Optical Engeneering Press., 1995. P. 299—349.
3. Lin T. L., Park J. S., George T. et al.//App. Phys. Lett. 1993. V. 62. №. 25. P. 3318—3320.
4. Lin T. L., Park J. S., Gunapala S. D., Jones F. W., del Castillo H. M.//J. Appl. Phys., 1994. V. 33. P. 2435—2438.

## Threshold characteristics of IR-photodetectors on base of PtSi-p-Si Schottky barriers with surface highly-doped layer

A. V. Voitsekhoovskii, A. P. Kokhanenko, S. N. Nesmelov  
The Siberian Physical-and-Technical Institute at the Tomsk State  
University, Tomsk, Russia

S. I. Lyapunov, N. V. Komarov, A. Yu. Niciphorov  
The Matrix Technology R&P Enterprise, Москва, Россия

*Surveyed are opportunities for increasing the threshold performances of detectors, which are based on Schottky barriers such as PtSi-Si, by means of making a surface high alloy layer in the silicon, with the layer being created by a short-pulsing implantation of the boron on the method of recoil nuclei. The parameters of layers and operation temperatures, optimum for usage of detectors in an 2- to 5- $\mu$ m spectral range, are spotted.*