

А.В. Войцеховский, А.П. Коханенко, С.Н. Несмелов

Инфракрасные детекторы на основе поверхностно-барьерных структур с внутренней фотоэмиссией

Томский государственный университет
Сибирский физико-технический институт им. В.Д. Кузнецова при ТГУ

Поступила в редакцию 4.06. 2003 г.

Матрицы фокальной плоскости инфракрасного диапазона на основе полупроводниковых фотоприемников перспективны для создания аппаратуры дистанционного зондирования атмосферы и поверхности Земли. В данной статье проведен анализ пороговых характеристик новых типов кремниевых детекторов с внутренней фотоэмиссией и рассмотрены способы управления граничной длиной волны таких фотоприемников.

Использование матричных фотоприемников в аппаратуре дистанционного зондирования позволяет значительно увеличить ее функциональные возможности. Оптические системы на их основе могут осуществлять прямое измерение с высокой точностью пространственных распределений излучательных характеристик внутри различных областей атмосферы или подстилающей поверхности. Это позволяет определять временные и координатные зависимости таких параметров, как температура и концентрация газовых компонентов, необходимых для построения физических моделей процессов возмущения атмосферы техногенного или природного характера.

Из-за серьезных технологических проблем при создании крупноформатных матриц на основе твердого раствора HgCdTe около двадцати лет назад начались активные поиски альтернативных материалов для создания матриц фокальных плоскостей современных приборов [1, 2]. Для детектирования излучения в спектральных диапазонах окон прозрачности атмосферы 3–5 и 8–12 мкм перспективно использование кремниевых поверхностно-барьерных структур (барьеров Шоттки и гетеропереходов) с внутренней фотоэмиссией. Использование кремниевой технологии позволяет создать однородные монолитные крупноформатные матрицы детекторов данного типа с прекрасной стабильностью характеристик и относительно низкой стоимостью.

В данной статье проведен краткий обзор последних достижений в области разработки кремниевых инфракрасных детекторов с внутренней фотоэмиссией, рассмотрены способы управления характеристиками детекторов и рассчитаны пороговые характеристики детекторов различных типов.

Первыми фотоэмиссионными детекторами являлись детекторы на основе барьеров Шоттки с силицидами. На рис. 1 показана энергетическая диаграмма наиболее распространенного в настоящее время кремниевое детектора с внутренней фотоэмиссией – детектора на основе барьера Шоттки кремний *p*-типа – силицид платины (PtSi/*p*-Si), действующего в спектральном диапазоне 3–5 мкм. Детектирование при помощи фотоэмиссионных

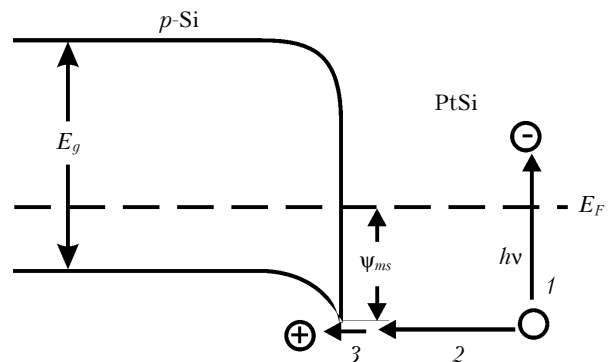


Рис. 1. Энергетическая диаграмма детектора с внутренней фотоэмиссией на основе барьера Шоттки PtSi/*p*-Si

детекторов можно разделить на следующие этапы: поглощение излучения свободными носителями (обычно дырками) в металле или в сильнолегированном полупроводнике (этап 1 на рис. 1), транспорт фото возбужденных дырок в электроде (этап 2) и последующая внутренняя эмиссия (этап 3) через потенциальный барьер на границе раздела.

Основными характеристиками пороговых свойств инфракрасных детекторов являются температура выхода в режим ограничения фоном ($T_{\text{ОФ}}$), при которой темновой ток равен фоновому фототоку, спектральная обнаружительная способность (D^*) и пороговая разность температур (NETD) [1, 3, 4]. В таблице приведены граничные длины волн (λ_c) и температуры ограничения фоном детекторов на

Параметры детекторов с барьерами Шоттки

| Электрод | λ_c , мкм | $T_{\text{ОФ}}$, К | Число элементов в матрице | Применения |
|--------------------|-------------------|---------------------|-----------------------------------|--|
| Pd ₂ Si | 3,5 | 133 | 5 · 2560, 4 · 5120 [5] | Оценка ресурсов Земли со спутников |
| PtSi | 5,5 | 101 | 1040 · 1040 [6], 640 · 480 [7] | Тепловидение в спектральном диапазоне 3–5 мкм |
| IrSi | 8,5 | 76 | 128 · 128 [8] | Тепловидение в спектральном диапазоне 8–12 мкм |
| CoSi ₂ | 2,8 | 149 | – | Дистанционное коротковолновое зондирование |
| NiSi | 3,1 | 142 | – | |

основе барьеров Шоттки с различными силицидами. Расчеты $T_{\text{эф}}$ проводились при входной оптике $F/2$, температуре фона 300 К, эффективной постоянной Ричардсона $A^{**} = 4,4 \text{ \AA}/(\text{см}^2 \cdot \text{К}^2)$ и коэффициенте эффективности эмиссии $C_1 = 0,2 \text{ эВ}^{-1}$.

В настоящее время несколько производителей в США, России и Японии выпускают монокристаллические матрицы на основе PtSi размерами, превышающими 480×640 элементов, и NETD меньше 0,1 К [6, 7].

Наименьшая высота барьера (0,152 эВ) может быть получена в барьерах Шоттки кремний p -типа – силицид иридия (IrSi/ p -Si) [8]. Детекторы на основе IrSi/ p -Si в спектральном диапазоне 8–12 мкм широко не используются из-за малой квантовой эффективности при длинах волн больших 8 мкм, а также из-за ряда технологических проблем: плохой воспроизводимости процесса создания силицида иридия, неоднородности свойств матриц IrSi-детекторов, сложностей при формировании качественной границы раздела.

Возможность изменения высоты потенциального барьера на границе раздела электрод – кремний, определяющей λ_c фотоэмиссионных детекторов, важна для оптимизации характеристик детекторов применительно к конкретным условиям регистрации излучения. Например, при уменьшении высоты барьера улучшаются характеристики детекторов, действующих в вечернее или ночное время (при меньшей температуре фона), но требуется охлаждение приборов до более низких рабочих температур.

Первоначально изменения высоты потенциального барьера (граничной длины волны) добивались путем использования в качестве электрода различных силицидов, сплавов силицидов или изменением технологий формирования силицидов. Например, в работе [11] сообщалось о создании детектора на основе сплава PtSi и IrSi с высотой потенциального барьера 0,135 эВ. Позже было показано, что можно управлять эффективной высотой потенциального барьера путем неоднородного легирования приповерхностного слоя кремния [12–17]. К уменьшению эффективной высоты потенциального барьера вследствие эффекта Шоттки приводит увеличение электрического поля вблизи барьера, обусловленное созданием приповерхностного высоколегированного слоя в полупроводнике [12, 13]. Создание высоколегированного поверхностного слоя позволяет увеличить λ_c детекторов на основе PtSi до 22 мкм [14], а детекторов на основе IrSi до 12 мкм [15].

Известно использование для создания высоколегированного поверхностного слоя молекулярно-лучевой эпитаксии [14] или низкоэнергетичной ионной имплантации [16]. Традиционная имплантация бора с использованием ионных источников непрерывного действия не позволяет достичь требуемых параметров высоколегированной области из-за дефектообразования при разогреве поверхности мишени ионным пучком и термодиффузионного расширения концентрационного профиля [17, 18].

Авторами данной статьи предложено использовать для создания в кремнии высоколегированных приповерхностных слоев короткоимпульсную им-

плантацию бора методом ядер отдачи [17]. Достоинствами данного метода являются одновременный с имплантацией отжиг дефектов в приповерхностном слое кремния и широкие возможности управления режимами имплантации. Для оценки профилей глубинных распределений имплантированного бора при различных параметрах имплантации проводились расчеты с использованием прямого аналогового модельного приближения [18].

Облучение пластин кремния типа КДБ-12 с нанесенными методом катодного распыления слоями бора толщиной 10 нм проводилось ионами алюминия с энергией 30–150 кэВ. Число импульсов менялось от 5 до 500 (ионный поток $2 \cdot 10^{12}$ ион/см² в импульсе). После облучения проводились травление пленки бора и отжиг образцов в парах водорода при температурах 500–800 °С. Профили бора определялись методом ВИМС. Электрические параметры облученных образцов исследовались при помощи бесконтактной радиоволновой методики [18].

В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что при помощи короткоимпульсной имплантации бора методом ядер отдачи с последующим отжигом можно создать в кремнии высоколегированные поверхностные слои толщиной 5–15 нм с экспоненциальным характером распределения примеси при поверхностной концентрации 10^{18} – 10^{20} см⁻³. В работе [19] рассчитаны энергетические диаграммы барьеров Шоттки PtSi/Si с высоколегированным слоем, созданным методом ядер отдачи, установлена зависимость λ_c от параметров высоколегированных слоев. В работе [20] рассчитаны спектральные и пороговые характеристики детекторов с приповерхностными высоколегированными слоями и показано, что граничные длины волн детекторов на основе барьеров Шоттки PtSi/Si могут быть увеличены до 14 мкм при создании высоколегированного слоя данным методом, что обеспечивает увеличение квантовой эффективности в спектральном диапазоне 3–5 мкм.

Новые технологические возможности управления граничной длиной волны фотоэмиссионных кремниевых детекторов предоставляют гетеропереходы p^+ -Ge_xSi_{1-x}/ p -Si, в которых высота потенциального барьера на гетерогранице зависит от содержания германия и концентрации бора в пленке силицида германия. В настоящее время на основе гетеропереходов GeSi/Si созданы монокристаллические детекторы с граничной длиной волны от 3 до 22 мкм [9, 10, 21–23]. При этом наряду с легированием в процессе эпитаксиального роста возможно применение метода радиационного легирования примесью бора сплава GeSi для оптимизации спектральной характеристики детектора. Оптимальная толщина электрода из GeSi составляет около 20 нм (оптимальная толщина электрода из PtSi – 2 нм [1]), что обусловлено более низким коэффициентом поглощения силицида германия. Однослойные детекторы на основе GeSi-гетероперехода с внутренней фотоэмиссией (НП-детекторы) и детекторы на основе барьеров Шоттки имеют близкие значения A^{**} и C_1 .

Дополнительной возможностью для увеличения внутренней квантовой эффективности в НР-детекторах является создание многослойных структур из чередующихся слоев высоколегированного силицида германия и слаболегированного кремния. В многослойных НР-детекторах достигнуты значения C_1 , равные $1,4 \text{ эВ}^{-1}$ [24]. Перспективным направлением современной оптоэлектроники является разработка детекторов с квантовыми ямами GeSi/Si [25–28], а также многоспектральных детекторов на основе структур PtSi/GeSi/Si и PtSi/Si/GeSi/Si [29, 30], в которых λ_c сильно зависит от напряжения смещения. В связи с этим большое число работ посвящено исследованию спектральных свойств GeSi-детекторов с квантовыми ямами и технологиям формирования многослойных структур. В настоящее время достаточно детально разработана концепция применения НР-детекторов на основе гетеропереходов GeSi/Si в спектральном диапазоне 3–5 мкм [25].

Рассмотрим пороговые характеристики кремниевых детекторов с внутренней фотоэмиссией.

Для фотоэмиссионных детекторов $T_{\text{ОФ}}$ может быть найдена из уравнения [3]:

$$A^{**}T_{\text{ОФ}}^2 \exp\left(-\frac{1,24q}{\lambda_c k T_{\text{ОФ}}}\right) = C_3 C_1 \sin^2 \theta \int_0^{\lambda_c} \frac{t(\lambda) \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_c}\right)^2}{\lambda^3 \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T_{\text{Ф}}}\right) - 1\right]} d\lambda, \quad (1)$$

где q – заряд электрона; k – постоянная Больцмана; λ – рабочая длина волны; θ – половинный апертурный угол; $T_{\text{Ф}}$ – температура фона; $C_2 = 1,43 \cdot 10^4 \text{ мкм/К}$, $C_3 = 37372 \text{ \AA}/(\text{мкм}^4 \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{эВ})$; $A^{**} = 4,4 \text{ \AA}/(\text{см}^2 \cdot \text{К}^2)$; $t(\lambda)$ – коэффициент пропускания атмосферы.

Спектральная обнаружительная способность фотоэмиссионных детекторов равна

$$D^*(\lambda) = \frac{C_1 t(\lambda) \lambda^2 \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_c}\right)^2}{\sqrt{2q \left\{ A^{**} T^2 \exp\left(-\frac{1,24q}{\lambda_c k T}\right) + C_3 C_1 \sin^2 \theta \int_0^{\lambda_c} \frac{t(\lambda) \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_c}\right)^2}{\lambda^3 \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T_{\text{Ф}}}\right) - 1\right]} d\lambda \right\}}}, \quad (2)$$

где T – температура детектора.

NETD фотоэмиссионных детекторов можно записать в следующем виде:

$$\text{NETD} = \frac{(4F^2 + 1) \frac{2q}{S \tau_{\text{н}}} \left\{ A^{**} T^2 \exp\left(-\frac{1,24q}{\lambda_c k T}\right) + C_3 C_1 \sin^2 \theta \int_0^{\lambda_c} \frac{t(\lambda) \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_c}\right)^2}{\lambda^3 \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T_{\text{Ф}}}\right) - 1\right]} d\lambda \right\}}{\int_0^{\lambda_c} \left[t(\lambda) C_1 C_2 C_3 \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_c}\right)^2 / \left\{ \lambda^4 T_{\text{Ф}}^2 \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T_{\text{Ф}}}\right) - 1\right] \right\} \right] d\lambda}, \quad (3)$$

где $F = 1/2 \text{tg} \theta$; $\tau_{\text{н}}$ – время накопления сигнального заряда; S – площадь детектора.

Различия между фотоэмиссионными кремниевыми детекторами различных типов будут проявляться использованием при расчете различных λ_c , A^{**} и C_1 .

На рис. 2 приведены зависимости D^* от длины волны для фотоэмиссионных детекторов: на основе барьеров Шоттки PtSi/ p -Si (кривая 1) и IrSi/ p -Si (кривая 2), PtSi/ p^+ -Si/ p -Si (кривая 3), на основе многослойного гетероперехода p^+ -GeSi/ p -Si (кривая 4). Для сравнения на рис. 2 также приведены характеристики идеального фотовольтаического детектора (кривая 5), фоторезистора на основе InAs (кривая 6) и фотодиодов на основе InSb и HgCdTe (кривые 7 и 8 соответственно).

Расчеты проведены при следующих параметрах: $\theta = 90^\circ$, $T = 80 \text{ К}$ (кривые 1–3, 6–8) и 60 К (кривая 4), $T_{\text{Ф}} = 300 \text{ К}$, $A^{**} = 4,4 \text{ \AA}/(\text{см}^2 \cdot \text{К}^2)$, $C_1 = 0,2 \text{ эВ}^{-1}$ для кривых 1–3 [4, 8, 10, 14] и $C_1 = 1,4 \text{ эВ}^{-1}$ для кривой 4 [24]. Также на рис. 2 показаны значения D^* на длине волны 4 мкм для многоспектрального детектора PtSi/GeSi/Si при нулевом напряжении смещения (треугольник) и при смещении 3 В (квадрат), рассчитанные на основании данных работ [29, 30].

Из рис. 2 следует, что спектральная обнаружительная способность фотоэмиссионных детекторов мала по сравнению с аналогичным параметром для детекторов на основе узкозонных детекторов (кривые 6–8), что обусловлено малыми значениями квантовой эффективности фотоэмиссионных детекторов.

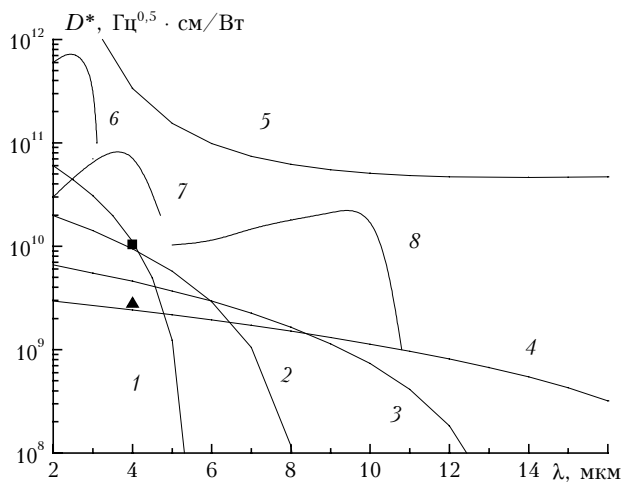


Рис. 2. Зависимости обнаружительной способности от длины волны для фотоэмиссионных детекторов различных типов

Однако при действии в режиме накопления фотоэмиссионные детекторы могут обеспечить достаточно малые значения NETD. Современные технологии матричных фотоприемников позволяют достигнуть емкости хранения заряда в каждом элементе, не превышающей $5 \cdot 10^7$ электронов. При этом максимальное заполнение емкости хранения при высокой квантовой эффективности, типичной для собственных детекторов, происходит за времена значительно меньше 1 мс. При низкой квантовой эффективности фотоэмиссионных детекторов времена заполнения емкостей хранения значительно больше, что позволяет существенно улучшить пороговые характеристики фотоэмиссионных детекторов при работе с кадровой частотой 25–100 Гц.

На рис. 3 приведены зависимости NETD от граничной длины волны фотоэмиссионных детекторов. При расчете рассматривались три различных случая: $t(\lambda) = 1$ при любых λ (кривая 1); $t(\lambda) = 1$ в спектральных диапазонах 3–5 и 8–12 мкм и $t(\lambda) = 0$ при других λ (кривая 2), $t(\lambda) = 1$ в диапазоне 8–12 мкм и $t(\lambda) = 0$ при других λ (кривые 3–6). Расчеты проведены при следующих параметрах: $\theta = 90^\circ$, $T = 80$ К (кривые 1, 2) и 70 К (кривые 3–5), $T_{\Phi} = 300$ К, $A^{**} = 4,4 \text{ \AA}/(\text{см}^2 \cdot \text{К}^2)$, $F = 2$, $C_1 = 0,2 \text{ эВ}^{-1}$ для кривых 1, 2, 4, 5 и $C_1 = 1,4 \text{ эВ}^{-1}$ для кривых 3 и 6, $S = 9 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2$. Время накопления для кривых 1–3, 5, 6 равнялось времени заполнения ямы емкостью $5 \cdot 10^7$ электронов в случае, если это время меньше 40 мс, и 40 мс при обратном соотношении. Для кривой 4 $\tau_{\text{н}} = 10$ мс. Кривая 6 рассчитана без учета темновых токов.

Из рис. 3 следует, что при правильном выборе режима регистрации излучения фотоэмиссионные детекторы обеспечивают значения NETD, сравнимые с аналогичным параметром собственных детекторов на основе узкозонных материалов [1]. Ухудшение NETD при больших λ_c связано с ростом дробовых шумов темнового тока при уменьшении высоты потенциального барьера, а при малых λ_c — с низкими

значениями квантовой эффективности вблизи длинноволновой границы. Уменьшения NETD можно добиться путем снижения рабочей температуры детектора (кривые 3 и 4). Важной задачей является выбор технологического цикла, обеспечивающего наименьшие значения A^{**} , и увеличение коэффициента эмиссионной эффективности C_1 путем оптимизации конструкции и параметров детекторов.

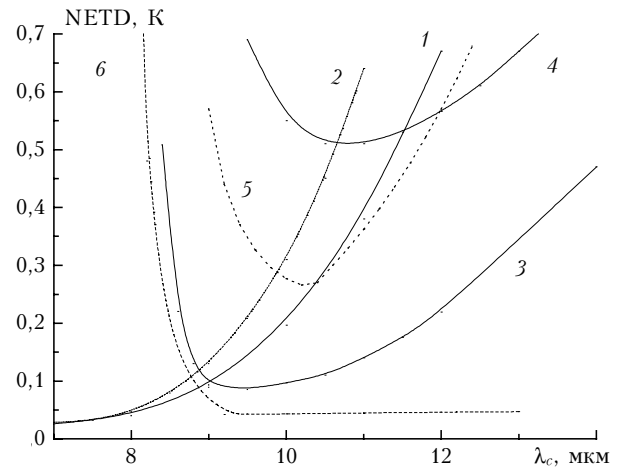


Рис. 3. Зависимости пороговой разности температур от λ_c НР-детекторов при различных условиях регистрации излучения

В спектральном диапазоне 8–12 мкм возможно применение детекторов на основе барьеров Шоттки IrSi/Si и НР-детекторов на основе гетеропереходов GeSi/Si. Лучшие характеристики обеспечивают НР-детекторы из-за возможностей оптимизации λ_c , хорошей однородности и стабильности свойств. На зависимостях NETD фотоэмиссионных детекторов от граничной длины волны в спектральном диапазоне 8–12 мкм имеется минимум, положение которого зависит от температуры, параметров детектора и условий регистрации излучения. На рис. 4 приведены зависимости оптимальной λ_c (кривые 1, 2)

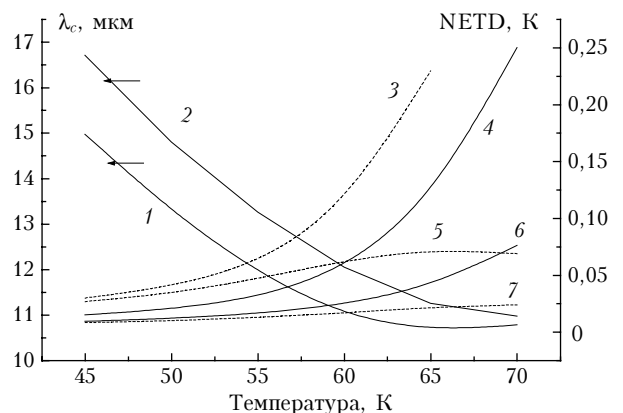


Рис. 4. Зависимости оптимальной λ_c и минимальной NETD от температуры для однослойного и многослойного НР-детекторов

и соответствующие значения NETD (кривые 3–7) для НР-детекторов, действующих в спектральном диапазоне 8–12 мкм. Расчеты проведены при следующих параметрах: $\theta = 90^\circ$, $T_{\text{ф}} = 300 \text{ К}$, $A^{**} = 4,4 \text{ \AA}/(\text{см}^2 \text{ К}^2)$, $S = 9 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2$, $F = 2$, $C_1 = 0,2 \text{ эВ}^{-1}$ для кривых 1, 3–5 и $C_1 = 1,4 \text{ эВ}^{-1}$ для кривых 2, 6, 7. Кривые 5 и 7 рассчитаны без учета темновых токов, для кривой 4 $\tau_{\text{н}} = 40 \text{ мс}$, для остальных – 10 мс.

Таким образом, фотоэмиссионные кремниевые детекторы уступают по обнаружительной способности детекторам на основе узкозонных детекторов и требуют меньших рабочих температур. Несмотря на эти недостатки, фотоэмиссионные кремниевые детекторы обеспечивают достаточно малые значения NETD в режиме накопления, обладают высокой однородностью и стабильностью свойств, а также предоставляют уникальные возможности использования высокоразвитой кремниевой технологии при создании матричных детекторов инфракрасного диапазона (1–23 мкм), совмещенных с системой обработки сигналов на одном кристалле.

- Rogalskii A. Infrared detectors. London: Gordon Press, 2001. 736 p.
- Матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона / Под ред. В.Н. Синицы. Новосибирск: Наука, 2001. 376 с.
- Войцеховский А.В., Коханенко А.П., Несмелов С.Н., Соколов В.Н. Режимы ограничения пороговых характеристик ИК-фотоприемников на основе барьеров PtSi-Si с поверхностным высоколегированным слоем // Изв. вузов. Физ. 2002. № 5. С. 74–77.
- Kimata M., Tsubouchi N. Schottky barrier photoemissive detectors // Infrared Photon Detectors, Bellingham: Optical Engineering Press, 1995. P. 299–349.
- Tower J.R., Cope A.D., Pellon L.E., McCarthy B.M., Strong R.T., Kinnard K.F., Moldovan A.G., Levine P.A., Elabd H., Hoffman D.M., Kramer W.M., Longsdorff R.W. Design and performance of 4x5120-element visible and 5x2560-element shortwave infrared multispectral focal planes // RCA Review. 1986. V. 47. P. 226–255.
- Yutani N., Yagi H., Kimata M., Nakanishi J., Nagayoshi S., Tsubouchi N. 1040x1040 element PtSi Schottky-barrier IR image sensor // IEDM Tech. Digest. 1991. P. 175–178.
- Sauer D.J., Shallcross F.V., Hsueh F.L., Meray G.M., Levine P.A., Gilmartin H.R., Villani T.S., Esposito B.J., Tower J.R. 640x480 MOS PtSi IR sensor // Proc. SPIE. 1991. V. 1540. P. 285–296.
- Tsaur B.-Y., McNutt M.J., Bredthauer R.A., Mattson B.R. 128x128-element IrSi Schottky-barrier focal plane arrays for long wavelength infrared imaging // IEEE Electron Device Lett. 1989. V. 10. № 7. P. 361–363.
- Wada H., Nagahima M., Hayashi K. 512x512 element GeSi/Si heterojunction infrared FPA // Proc. SPIE. 1999. V. 3698. № 14. P. 584–595.
- Lin T.L., Maserjian J. Novel Si_{1-x}Ge_x/Si heterojunction internal photoemission long-wavelength infrared detectors // Appl. Phys. Lett. 1990. V. 57. P. 1422–1424.
- Tsaur B.-Y., Weeks M.M., Pellegrini P.W. Pt-ir silicide Schottky-barrier IR detectors // IEEE Electron Device Lett. 1988. V. 9. № 2. P. 100–102.
- Shannon J.M. Reducing the effective height of a Schottky barrier using low-energy ion implantation // Appl. Phys. Lett. 1974. V. 24. № 8. P. 369–371.
- Kanaya H., Hasegawa F., Yamaka, Moriyama T., Nakajima M. Reduction of the barrier height of Silicide/p-Si_{1-x}Ge_x contact for application in a Infrared Image Sensor // Jap. J. Appl. Phys. Pt. 1. 1989. V. 28. № 4. P. 544–546.
- Lin T.L., Park J.S., George T., Jones E.W., Fathauer R.W., Maserjian J. Long-wavelength PtSi infrared detectors fabricated by incorporating a p⁺ doping spike grown by molecular beam epitaxy // Appl. Phys. Lett. 1993. V. 62. № 25. P. 3318–3320.
- Tsaur B.-Y., Chen C.K., Nechay B.A. IrSi Schottky-barrier infrared detectors with wavelength response beyond 12 μm // IEEE Electron Device Lett. 1990. V. 11. № 9. P. 415–417.
- Wei C.-Y., Tantraporn W., Katz W., Smith G. Reduction of effective barrier height in PtSi-p-Si Schottky diode using low-energy ion implantation // Thin Solid Films. 1982. V. 93. P. 407–412.
- Voitsekhovskii A.V., Kokhanenko A.P., Korotaev A.G., Nesmelov S.N. Modification of Parameters of Silicon Schottky Barriers Using Powerful Ion Irradiation: Proc. // 1 International Congress on Radiation Physics, High Electronics, and Modification of Materials. Tomsk, 2000, Tomsk: published TPU. 2000. V. 3. С. 362–364.
- Войцеховский А.В., Коханенко А.П., Несмелов С.Н., Ляпунов С.И., Комаров Н.В. Барьеры Шоттки кремний-силицид платины высоколегированным поверхностным слоем // Изв. вузов. Физ. 2001. № 8. С. 11–20.
- Nesmelov S.N., Voitsekhovskii A.V., Korotaev A.G., Kokhanenko A.P. Energy band diagrams of PtSi-Si barrier with a heavily-doped surface nanolayer formed by recoil implantation // Proc. SPIE. 2002. V. 4654. P. 164–173.
- Войцеховский А.В., Коханенко А.П., Несмелов С.Н., Ляпунов С.И., Комаров Н.В. Фотоэлектрические свойства фотоприемников на основе барьеров Шоттки кремний-силицид платины с высоколегированным поверхностным слоем // Изв. вузов. Физ. 2001. № 11. С. 8–18.
- Машанов В.И., Чистохин И.Б., Зайцев Б.А., Пчеляков О.П., Соколов Л.В., Тишковский Е.Г., Фолин Б.И., Черепов Е.И. Получение фоточувствительных ячеек матричного модуля ИК-диапазона 3–5 мкм на основе гетеропереходов Ge_xSi_{1-x}/Si и исследование их характеристик // Микроэлектроника. 1998. Т. 27. № 6. С. 412–418.
- Tsaur B.-Y., Chen C.K., Marino S.A. Heterojunction Ge_xSi_{1-x}/Si infrared detectors and focal plane arrays // Opt. Eng. 1994. V. 33. № 1. P. 72–78.
- Strong R., Greve D.W., Misra R., Weeks M., Pellegrini P. GeSi infrared detectors // Thin Solid Films. 1997. V. 294. P. 343–346.
- Park J.S., Lin T.L., Jones E.W., Del Castillo H.M., George T., Gunapala S.D. Long-wavelength stacked Si_{1-x}Ge_x/Si heterojunction internal photoemission infrared detectors // Proc. SPIE. 1993. V. 2020. P. 12–21.
- Presting H. Near and mid infrared silicon/germanium based photodetection // Thin Solid Films. 1998. V. 321. P. 186–195.
- People R., Bean J.C., Bethea C.G., Spitz S.K., Petricolas L.J. Broadband (8–14 μm), normal incidence, pseudomorphic Ge_xSi_{1-x}/Si strained-layer infrared photodetector operating between 20 and 77 K // Appl. Phys. Lett. 1992. V. 61. № 9. P. 1122–1124.

27. *Krapf D., Adoram B., Shappir J., Sa'ar A.* Infrared multispectral detection using Si/Si_xGe_{1-x} quantum well infrared photodetectors // *Appl. Phys. Lett.* 2001. V. 78. № 4. P. 495–497.
28. *Park J.S., Karunasiri R.P.G., Wang K.L.* Normal incidence infrared detector using *p*-type SiGe/Si quantum wells // *Appl. Phys. Lett.* 1992. V. 60. № 1. P. 103–105.
29. *Jimenez J.R.* Silicide/SiGe Schottky diode infrared detectors // *Proc. SPIE.* 1994. V. 2225. P. 393–403.
30. *Xiao X., Sturm J.S., Parihar S.R., Lyon S.A., Meyerhofer D., Paifrey S., Shallcross F.V.* Silicide/Strained Si_{1-x}Ge Schottky-barrier infrared detectors // *IEEE Electron Device Lett.* 1993. V. 14. № 4. P. 199–201.

A.V. Voitsekhovskii, A.P. Kokhanenko, S.N. Nesmelov. **Infrared detectors based on surface barrier structures with internal photoemission.**

Infrared focal-plane arrays of semiconductor photodetectors are promising for remote sensing of the atmosphere and the Earth's surface. In this paper, threshold characteristics of new types of silicon detectors with internal photoemission are analyzed and methods of controlling the cutoff wavelength of such photodetectors are considered.