

# Матричные приёмники дальнего ИК и терагерцового диапазонов – основа одного из перспективных направлений развития радиолокационных систем

А.Н. Акимов, А.Э. Климов, И.Г. Неизвестный, С.П. Супрун, В.Н. Шумский

В обзоре рассмотрены современные приёмники в дальнем инфракрасном и терагерцовом диапазонах для создания дополнительного оптического канала обнаружения объектов в пассивном режиме. Особое внимание уделено матричным фотонным приёмникам на основе твёрдых растворов PbSnTe:In. Приведены результаты, свидетельствующие о принципиальной возможности создания фотонных приёмников с поглощением на переходах зона – зона. Проанализированы результаты по разработке монолитных фотоприёмных устройств и пороговые характеристики приёмников.

*Ключевые слова:* пассивная оптическая локация, инфракрасный и терагерцовый диапазоны, охлаждаемые болометры на сверхпроводящих материалах, фотонные приёмники излучения.

## 1. Введение

Оптическая локация по сложившемуся определению – это обнаружение, определение координат и распознавание объектов с помощью преобразования электромагнитных волн оптического диапазона. Понятие оптической локации возникло с появлением лазеров в начале 60-х годов XX века и поэтому преимущественно является активным способом получения информации об объекте при воздействии на него непрерывного или импульсного лазерного излучения. Однако существует и пассивная оптическая локация обнаружения объектов путём анализа собственного теплового излучения.

Оптическая локация относится к направлению науки и техники, связанному с поиском, переработкой и анализом информации, полученной в оптическом диапазоне распространения электромагнитных волн, и является частью более широкого направления, в которое, в частности, входит и радиолокация. Получаемая информация исходит от объектов, создающих распределённые в пространстве поля электромагнитных излучений. Деление на диапазоны в области терагерцовых частот, по-видимому, ещё не установилось, и в разных источниках можно встретить несколько отличающиеся данные; в данной статье под дальним ИК и терагерцовым излучением будет пониматься диапазон длин волн от 30 до 300 мкм [1]. Одна из причин того, что дальний инфракрасный диапазон оставался неиспользованным в активной локации, связана с отсутствием источников излучения в этой области, а вторая – с особенностью прохождения излучения при этих длинах волн. На рис. 1 приведено пропускание атмосферы в этом спектральном диапазоне по данным работ [2] и [3].

В интересующем нас диапазоне наблюдаются два окна пропускания атмосферы: на уровне около 50% при  $\lambda = 30 - 65$  мкм (4.6 – 10 ТГц) и на уровне около 10 – 20 % в области 100 – 250 мкм (1.2 – 3 ТГц).

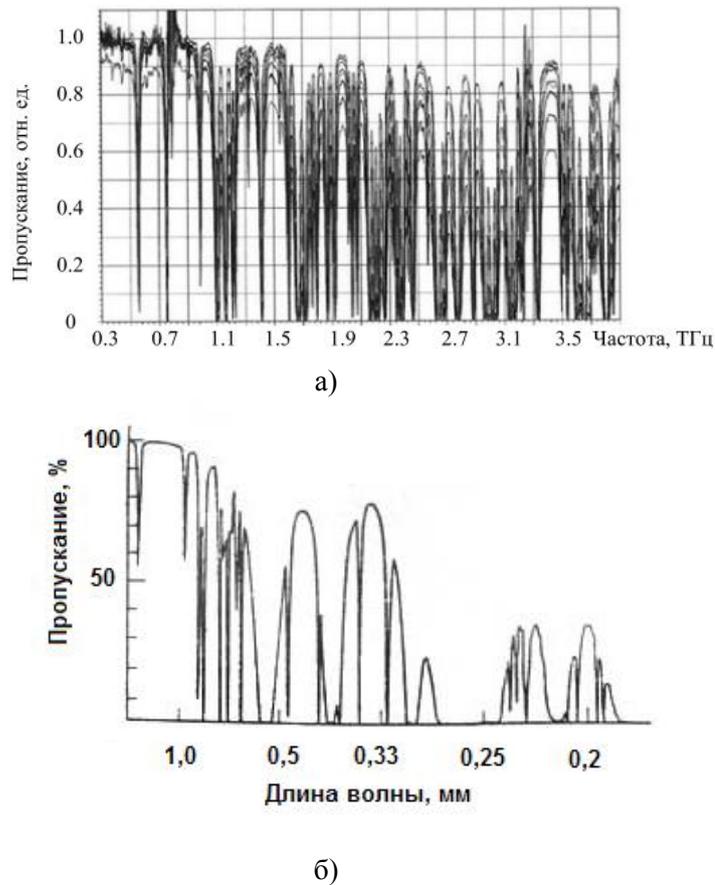


Рис. 1. Пропускание атмосферы по данным [2] – а; [3] – б

Рассмотрим теперь, насколько важна информация, которую можно получить в этом спектральном диапазоне. Рассматривать будем только ситуацию, связанную с пассивной локацией.

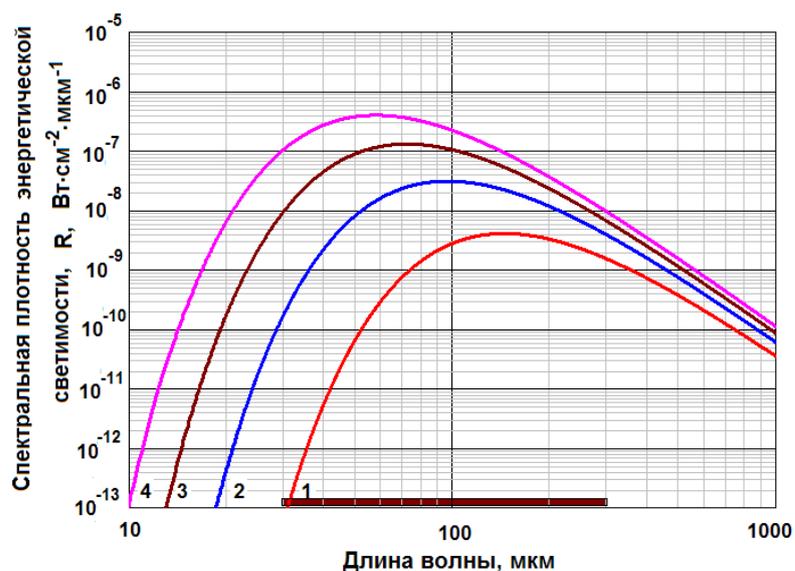


Рис. 2. Спектральная плотность энергетической светимости АЧТ.  
Температура излучателя T=20 К (1); 30 К (2); 40 К (3); 50 К (4).  
Залитый прямоугольник – область дальнего инфракрасного диапазона

На рис. 2 показаны кривые спектральной плотности энергетической светимости абсолютно чёрного тела (АЧТ), имеющего различную температуру в зависимости от длины волны. На рисунке выделена область спектра, соответствующая дальнему инфракрасному диапазону. Из рисунка видно, что максимум излучения АЧТ с температурой  $T=20-50$  К находится в указанном диапазоне. Это означает, что даже в полосе поглощения шириной в 1 мкм на детектор площадью в  $1 \text{ см}^2$  будет падать излучение мощностью от  $4 \cdot 10^{-9}$  до  $4 \cdot 10^{-7}$  Вт и, при соответствующей пороговой чувствительности приёмника, это излучение будет зарегистрировано.

Представляется, что использование в качестве дополнительного канала получения информации при помощи пассивной локации в оптическом диапазоне в ряде случаев может оказаться серьёзным преимуществом. Однако практическая осуществимость создания такого канала в первую очередь зависит от успехов в развитии технологии создания высокочувствительных матричных приёмников в указанном спектральном диапазоне.

В настоящей статье будет представлен обзор результатов исследований по созданию технологии и свойствам приёмников для оптической локации в дальнем ИК и терагерцовом диапазонах, главным образом, на основе твёрдых растворов  $\text{PbSnTe:In}$ .

## 2. Приёмники дальнего инфракрасного и терагерцового излучения на основе тонких плёнок твёрдых растворов $\text{PbSnTe}$ , легированных индием

### 2.1. Детекторы дальнего инфракрасного и терагерцового излучения

*Охлаждаемые болометры, детекторы на сверхпроводимости.* Для детектирования сигнала в дальнем ИК-диапазоне используются различные типы тепловых и фотонных детекторов. В работе [4] описана линейка охлаждаемых болометров, предназначенных для работы в фотометре и спектрометре дальнего инфракрасного и терагерцового излучения в составе Гершелевской космической обсерватории, разрабатываемой под эгидой Европейского космического агентства. Фотометр состоял из двух матриц фокальной плоскости форматом  $32 \times 64$  и  $16 \times 32$  пикселей. Матрица более коротких длин волн ( $32 \times 64$ ) предназначалась для диапазонов 60 – 90 и 90 – 130 мкм, а более длинноволновая матрица – для диапазона 130 – 210 мкм. Фотоприёмные матрицы охлаждались до  $T=0.3$  К. Предварительные результаты испытаний показали, что МЭШ была около  $10^{-16}$  Вт/Гц<sup>0.5</sup>, что близко к пределу, ограниченному фоном.

В работах [5, 6] представлены результаты создания чувствительных болометров на основе тонких (100 нм) плёнок сплава ниобий – кремний ( $\text{NbSi}$ ). Сплавы  $\text{NbSi}$  могут быть как полупроводниками, так и сверхпроводниками в зависимости от концентрации ниобия. Температура перехода составляла  $T_c=593$  мК и разброс этой температуры для матрицы с 23 пикселями не превышал  $\pm 0.001$  К. Величина шума составляла  $1.8 \cdot 10^{-11}$  А/Гц<sup>0.5</sup>, а МЭШ оказался равным  $1.35 \cdot 10^{-16}$  Вт/Гц<sup>0.5</sup>.

О девятиэлементной линейке детекторов камеры изображения в субмиллиметровой области, предназначенной для субмиллиметрового телескопа, сообщается в [7]. Использовались детекторы на основе структур сверхпроводник – изолятор – сверхпроводник (SIS-структуры). Исследования параметров детекторов проводились при эффективной температуре фона около 150 К. При рабочей температуре детекторов  $T=0.3$  К фототок составлял 0.3 нА. Шумы усилителя были близки к дробовому шуму фототока, и МЭШ была равна  $\sim 10^{-15}$  Вт/Гц<sup>0.5</sup> при рабочей температуре  $T=0.3$  К.

В работах [9, 10] обсуждаются терагерцовые детекторы на основе сверхпроводящих туннельных переходов (СТП). СТП диаметром около 2 мкм формируется из сверхпроводящего

алюминия размером в 100 нм и туннельного барьера из оксида алюминия. СТП лежит на плёнке ниобия, поглощающей терагерцовое излучение, которая, в свою очередь, размещена на сапфировой подложке. Сапфировая подложка слабо поглощает терагерцовое излучение. Плёнка ниобия является монокристаллической, и это обстоятельство уменьшает комбинационные потери. Ожидаемое значение величины МЭШ детектора в условиях низкофоновых засветок составляет примерно  $10^{-18}$  Вт/Гц<sup>0.5</sup>, что, как справедливо считают авторы, достаточно для использования такого детектора в наземных астрономических лабораториях, в том числе, для высокоскоростного формирования изображения в терагерцовой области.

Фотонные примесные приёмники. Для приёма излучения в дальнем ИК-диапазоне вплоть до сотен микрометров используются полупроводниковые примесные ФП, т.е. приёмники, у которых излучение возбуждает локализованные носители заряда с примесных уровней. Так как коэффициент поглощения пропорционален концентрации локализованных электронов, то очевидно, что он на 2 – 3 порядка меньше коэффициента поглощения при оптическом возбуждении: валентная зона – зона проводимости.

Для решения космических задач в низкофоновых условиях применяются примесные ФП на основе кремния и германия. Обращает на себя внимание рабочая температура ФП, которая находится в пределах 2 – 5 К. В табл. 1 приведены характеристики ИК ФП на основе Si и Ge для длин волн более 15 мкм [11]. Там же приведены параметры напряжённого ФП Ge:Ga. В ненапряжённом состоянии граничная длина волны на полувысоте от максимального значения чувствительности составляет 114 мкм.

Таблица 1. Характеристики некоторых ИК-детекторов на основе Si и Ge для низкофоновых применений

Детектор	(ΔE) <sub>opt</sub> , мэВ	λ <sub>p</sub> , мкм	λ <sub>c</sub> (T), мкм (К)	η(λ <sub>p</sub> ), %	ФВ, фотон/(см <sup>2</sup> s)	NEP(λ; T; f) (Вт·Гц <sup>-1/2</sup> )	λ(μm); T(K); f(Hz)
Si:As	53.76	23	24–24.5 (5)	50(T) 20(L)	$9 \times 10^6$ $6.4 \times 10^7$	$0.88 \times 10^{-17}$ $4.0 \times 10^{-17}$	(19; 6; 1.6) (23; 5; 5)
Si:P	45.59	24/26.5	28/29 (5)	~30(T)	$2.5 \times 10^8$	$7.5 \times 10^{-17}$	(28; 4.2; 10)
Si:Sb	42.74	28.8	31 (5)	58(T) 13(L)	$1.2 \times 10^8$ $1.2 \times 10^8$	$5.6 \times 10^{-17}$ $5.5 \times 10^{-17}$	(28.8; 5; 5) (28.8; 5; 5)
Si:Ga	74.05	15.0	18.4 (5)	47(T)	$6.6 \times 10^8$	$1.4 \times 10^{-17}$	(15; 5; 5)
Si:Bi	70.98	17.5	18.5 (27)	34(L)	$<1.7 \times 10^8$	$3 \times 10^{-17}$	(13; 11; –)a
Ge:Li	9.98	125 (calc)			$8 \times 10^8$	$1.2 \times 10^{-16}$	(120; 2; 13)
Ge:Cu	43.21	23	29.5 (4.2)	50	$5 \times 10^{10}$	$1.0 \times 10^{-15}$	(12; 4.2; 1)
Ge:Beb	24.81	39 50.	5 (4.2)	100b	$1.9 \times 10^{10}$	$1.8 \times 10^{-16}$	(43; 3.8; 20)
Ge:Ga	11.32	94	114 (3)	34 6.	$1 \times 10^9$	$5.0 \times 10^{-17}$	(94; 3; 150)
Ge:Gab	11.32	94	114 (3)	~100b	$5.1 \times 10^9$	$2.4 \times 10^{-17}$	(94; 3; 150)
Ge:Gab(s)c	~6	150	193 (2)	73b	$2.2 \times 10^{10}$	$5.7 \times 10^{-17}$	(150; 2; 150)

T и L означает поперечную и продольную геометрию детектора

a Сигнал накапливается в течение 1 с.

b Результат получен с резонатором для накопления

c (s): давление =  $6.6 \times 10^3$  кг·см<sup>-2</sup>

Данные по спектральной зависимости чувствительности детекторов на основе германия, легированного цинком, бериллием и галлием, приведены в работе [12] и показаны на рис. 3.

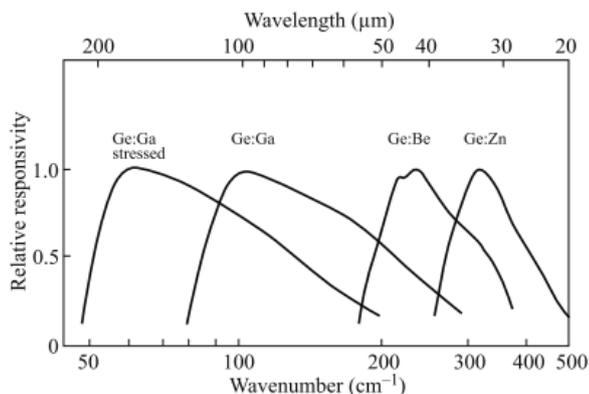


Рис. 3. Спектральная зависимость относительной чувствительности легированных ФП на основе Ge. Рабочая температура  $T=2$  К [12]

Как видно из рисунка, путём легирования германия различными примесями можно расширить область чувствительности от 25 до 100 мкм. При приложении одноосного давления спектральная характеристика чувствительности сдвигается в сторону длинных волн, и граничная длина волны достигает на полувысоте от максимального значения чувствительности величины 200 с небольшим мкм.

### 2.1. Свойства $\text{CoT:In}$ , линейки ФПУ $2 \times 128$

У монокристаллических объёмных образцов легированного индием твёрдого раствора  $\text{CoT}$  с содержанием олова  $x=0.24 - 0.26$  в 1979 году были обнаружены крайне необычные свойства [13, 14], главными из которых являлись:

- стабилизация уровня Ферми в запрещённой зоне для определённого состава (примерно  $x \approx 0.22 - 0.28$ ) и низкая темновая проводимость при температуре  $T \leq 20$  К;
- высокая фоточувствительность: наличие реакции на крайне слабое излучение, в том числе, от тел, нагретых до температур, лишь ненамного превышающих температуру образцов;
- долговременная релаксация фотосигнала и остаточная проводимость после выключения освещения;
- «гашение» фототока при приложении импульса сильного электрического поля, а также другие особенности.

Обнаружение высокой фоточувствительности в дальней ИК-области, о чём говорила реакция на излучение от слабо нагретых объектов, стимулировало проведение прикладных разработок по созданию ИК-фотоприёмников. В работах [15, 16] представлены результаты по росту и легированию плёнок, полученных молекулярно-лучевой эпитаксией (МЛЭ) на подложках диэлектрика  $\text{BaF}_2$ . Полученные плёнки обладали описанными выше свойствами, что дало возможность начать исследования по созданию многоэлементных приёмников ИК-излучения (что невозможно на объёмном материале) для использования их в разрабатываемом Институтом космических исследований РАН проекте ИКОН – «Инфракрасный обзор неба широкоугольным охлаждаемым телескопом на солнечно-синхронном искусственном спутнике Земли «Ника» [17]. Многоэлементное гибридное фотоприёмное устройство для спектрального диапазона 5 – 20 мкм описано в работах [18, 19]. Оно включало в себя билинейку фотоприёмников (ЛФП), кремниевые схемы обработки фотосигнала (мультиплексоры) с управляющей электроникой и соединительные шлейфы. В качестве базового элемента ФПУ был выбран модуль ЛФП длиной 64 элемента.

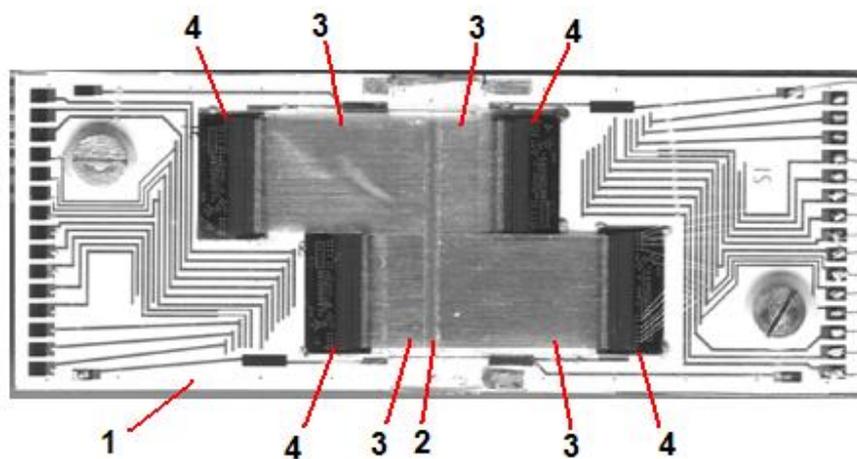


Рис. 4. Линейчатое фотоприёмное устройство форматом  $2 \times 128$  элементов.  
 1 – подложка ситалла, 2 – ЛФП  $2 \times 128$  элементов, 3 – соединительные шлейфы;  
 4 – кремниевые мультиплексоры на 64 входа каждый

На рис. 4 представлена фотография двухрядного ЛФПУ в составе ЛФП  $2 \times 128$  элементов, 4-х кремниевых мультиплексоров на 64 входа каждый и 4-х соединительных шлейфов на основе полиимидной плёнки (управляющая электроника не показана). Мультиплексоры в каждом ряду (верхнем и нижнем) разнесены друг относительно друга для удобства монтажа к ним полиимидных шлейфов. При этом в центре ЛФП в месте присоединения шлейфов зазоры между соседними элементами ЛФП такие же, как и в её остальных частях. Длина базового сегмента обеспечивала сравнительную простоту и большой процент выхода годных при изготовлении соответствующих ей мультиплексоров. При этом на базе модульной технологии обеспечивалась возможность разработки схем считывания сигналов как с линейчатого ФПУ (ЛФПУ), так и с матричного ФПУ (МФПУ) достаточно большого формата, для решения ряда практических задач. Малые темновые токи (менее  $10^{-11}$  А при рабочих напряжениях смещения) обеспечили возможность использования технологии кремниевых мультиплексоров, работающих при низких температурах вплоть до температуры жидкого гелия с временем накопления сигнала 1 мс (частота опроса – 1 кГц). Компоновка ЛФПУ и схема ЛФП были согласованы с надёжной и воспроизводимой технологией микросборки аналогичных устройств другого назначения, разработанных в ИФП СО РАН. Зазор между элементами составляет 20 мкм как вдоль ЛФП, так и между двумя рядами линейки. Освещение элементов производится со стороны эпитаксиальной плёнки СОТ.

Измерение характеристик ЛФПУ проводились на холодном стенде в температурном интервале  $T=4 - 16$  К при воздействии излучения от модели абсолютно чёрного тела (АЧТ) с температурой, которая могла изменяться от 80 до 300 К. Чувствительность отдельных элементов ЛФПУ зависит от уровня освещённости или от температуры излучателя. Тестовые измерения шумов отдельных ячеек входных мультиплексоров при гелиевой температуре дали значения шума  $U_{\text{шума}} \leq 2 \cdot 10^{-14}$  А·Гц $^{-0.5}$ . Таким образом, максимальное значение токовой чувствительности около  $S_{\text{max}} = 2 \cdot 10^5$  А/Вт и собственный шум мультиплексора дают минимальный предел для пороговой мощности шума около  $P_{\text{NEP}} = 1 \cdot 10^{-19}$  Вт·Гц $^{0.5}$ . Реально эта величина несколько больше в зависимости от рабочей температуры и уровня освещённости. Это связано как с наличием собственного шума фотоприёмных элементов, так и с нелинейностью их чувствительности, а также с зависимостью обоих этих параметров от температуры. На рис. 5 приведены экспериментальные данные по пороговой мощности (мощности, эквивалентной шуму – МЭШ) и по чувствительности элементов одного из фрагментов ЛФПУ в составе кремниевого мультиплексора и 64 элементов ЛФП для рабочей температуры  $T=7$  К.

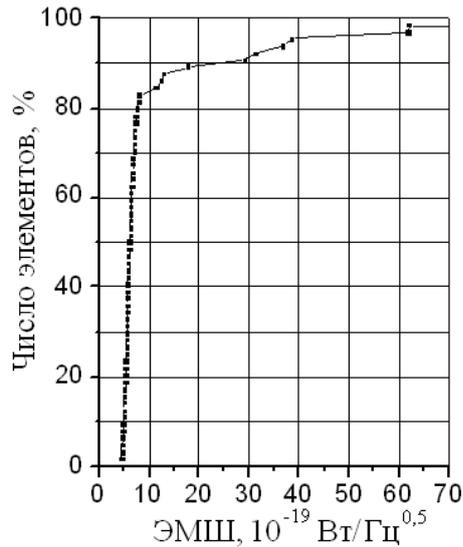


Рис. 5. Зависимость количества элементов фрагмента ЛФПУ от мощности, эквивалентной шуму.

По оси ординат отложена доля элементов, МЭШ которых меньше величины, указанной на оси абсцисс. Рабочая температура ЛФПУ равна  $T=7$  К.

Температура полости излучателя равна  $T_{\text{ачт}}=78$  К

Из приведённых на рисунке данных видно, что при этой температуре примерно 85% элементов фрагмента ЛФПУ имеют МЭШ менее  $10^{-18}$  Вт/Гц<sup>0,5</sup>. Из рисунка также следует, что достигнутые параметры не являются предельными, так как отдельные элементы ЛФПУ при  $T=7$  К имеют МЭШ менее  $5 \cdot 10^{-19}$  Вт/Гц<sup>0,5</sup>. Так как площадь фотоприёмной площадки чувствительного элемента ЛФПУ составляет  $A=10^{-4}$  см<sup>2</sup>, то величина МЭШ, равная  $10^{-18}$  Вт/Гц<sup>0,5</sup>, соответствует обнаружительной способности  $D^* = 10^{16}$  см·Гц<sup>0,5</sup> и реализуется только в условиях низкого фона для указанного спектрального диапазона.

### 2.1. Чувствительность СОТ:In при длинах волн более 100 мкм

Изменение проводимости соединений группы А4В6 под воздействием дальнего ИК и терагерцового диапазона наблюдалось в работах [20, 21]. В [20] была обнаружена фотопроводимость в теллуриде свинца, легированного галлием, в области частот  $100 - 460$  см<sup>-1</sup> ( $21.7 - 100$  мкм), а в [21] – фотопроводимость в СОТ:In на длинах волн 90 и 116 мкм с помощью набора оптических фильтров. О чувствительности этого материала в терагерцовом диапазоне сообщается также в работах [22 – 29]. В [22] было выдвинуто предположение, что в запрещённой зоне СОТ:In существуют несколько уровней, расположенных на расстоянии нескольких миллиэлектронвольт от дна зоны проводимости, которые являются центрами захвата электронов, а при их заполнении могут отвечать за неравновесную проводимость под воздействием терагерцового излучения. В работе [23] сообщается о чувствительности СОТ:In под воздействием излучения моделей АЧТ с температурой от 60 до 20 К. Анализ зависимости фотосигнала от температуры АЧТ совместно с зависимостью излучательной способности АЧТ при различной температуре от длины волны с применением отрезающего оптического фильтра и без него позволил сделать оценку области чувствительности, которая лежала в полосе  $300 - 400$  мкм. Исследования чувствительности тех же образцов, проведённые с помощью терагерцового HCN-лазера, излучающего на длине волны 336.8 мкм [24 – 28], показали, что в этом случае при засветке образца ток возрастает, причём абсолютная величина приращения тока увеличивается с ростом напряжения, приложенного к структуре.

В работе [29] было показано, что ток, по крайней мере, в достаточно сильных электрических полях является инжекционным, а транспорт носителей заряда должен описываться

теорией токов, ограниченных пространственным зарядом (ТОПЗ). В рамках теории ТОПЗ из ВАХ было определено энергетическое положение локализованных состояний в плёнках PbSnTe:In, которые в первоначально незаполненном электронами состоянии играют роль ловушек для оптически возбужденных неравновесных носителей заряда, а в заполненном состоянии под воздействием излучения с соответствующей энергией кванта вызывают возникновение фототока. Расчёт энергетического распределения плотности ловушек по запрещённой зоне исходя из экспериментальных ВАХ показал, что распределение ловушек является квазинепрерывным и энергия их составляет от 1 до 10 мэВ [30].

В работе [30] приведены расчёты фототока в структуре с энергией центров, полученных из вольтамперных характеристик в зависимости от напряжения на структуре и равных, соответственно, 9.5 мэВ и 6.2 мэВ, а также экспериментальные зависимости тока при воздействии терагерцового излучения лазера на свободных электронах на длинах волн 130 мкм и 198 мкм, что соответствует энергии центров (рис. 6).

Как видно из рисунка, расчёт и эксперимент для  $\lambda=130$  мкм согласуются удовлетворительно, а для  $\lambda=198$  мкм – только в области низких напряжений. Но в обоих случаях наблюдается рост тока при увеличении напряжения, что связано с заполнением центров электронами при увеличении уровня полевой инжекции. Это находится в согласии с теорией токов, ограниченных пространственным зарядом. Возможное расхождение может быть связано с тем, что распределение локализованных центров является квазинепрерывным, а не дискретным (двухуровневым), как предполагалось при расчётах.

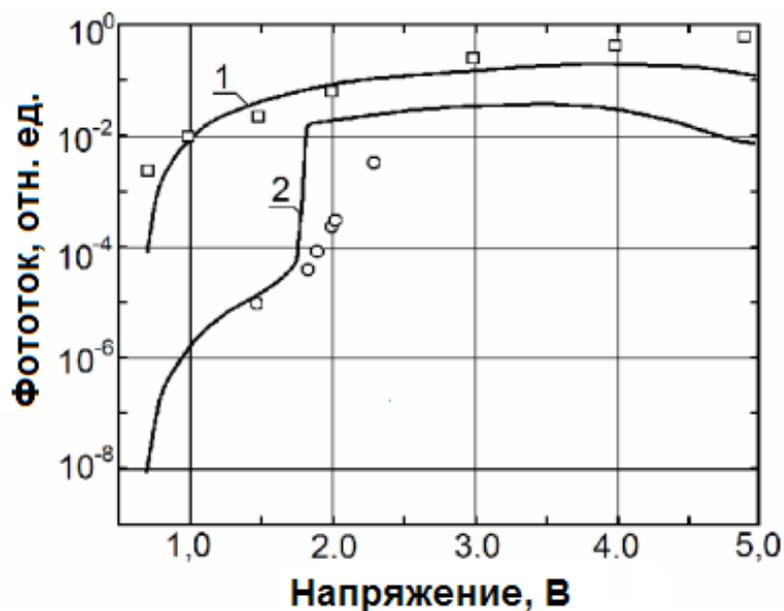


Рис. 6. Экспериментальные (квадраты и кружки) и расчётные зависимости тока от напряжения смещения при воздействии излучения лазера на свободных электронах при  $\lambda=130$  мкм (квадраты, кривая 1) и  $\lambda=198$  мкм (кружки и кривая 2)

Отмечено, что принципиальным отличием фотоответа для токов, ограниченных пространственным зарядом, является сильная зависимость фототока от заселённости локального уровня, которая, в свою очередь, зависит от уровня электронной инжекции, т.е. от приложенного напряжения. Эта зависимость должна проявляться тем резче, чем дальше данный уровень отстоит от равновесного уровня Ферми. При тех же параметрах центров, что и в [30], были рассчитаны спектральные зависимости фототока структуры к терагерцовому излучению. Результаты расчётов приведены на рис. 7.

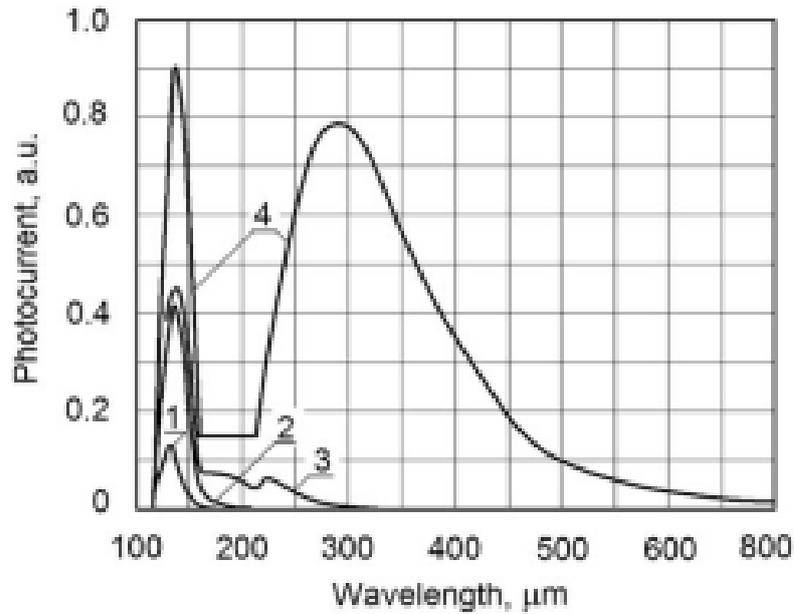


Рис. 7. Спектральные зависимости фототока (распределение плотности состояний по запрещённой зоне, как в [30]).  
 $U=1.16$  (1);  $1.79$  (2);  $1.83$  (3);  $2.95$  В

Из рисунка видно, что увеличение уровня инжекции (увеличение напряжения) приводит к росту фототока во всей спектральной области, но наиболее эффективно проявляется при  $\lambda > 200$  мкм. Это связано с тем, что по мере увеличения напряжения увеличивается инжекционный ток и происходит заполнение электронами уровней, расположенных все ближе и ближе к зоне проводимости. Это ведёт к тому, что становятся возможными переходы с более мелких уровней, которые возбуждаются терагерцовым излучением со всё большей длиной волны. При этом величина фототока на более коротких длинах волн остаётся неизменной, так как эти уровни уже заполнены электронами. Таким образом детектор может работать в режиме спектральной чувствительности, зависящей от приложенного напряжения.

Важной особенностью твердого раствора  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  является инверсия зоны проводимости и валентной зоны, которая зависит от содержания олова и температуры и приводит к тому, что при определённых значениях этих параметров ширина запрещённой зоны стремится к нулю. Это открывает перспективы создания фотонных приёмников терагерцового диапазона, в которых фототок связан не с переходами локализованное состояние – зона проводимости, а с переходами валентная зона – зона проводимости, что на порядки увеличивает поглощение излучения.

О параметрах детекторов, созданных на основе плёнок  $Pb_{1-x}Sn_xTe:In$  с  $x=0.32$  и о перспективах их применения сообщается в работе [32]. Измерения шума проводились в той же экранированной камере, что и при измерении под воздействием излучения при помощи селективного усилителя напряжения на частоте 1025 Гц на сопротивлении нагрузки  $R_n = 4.45$  Ом. Ширина шумовой полосы усилителя составляла  $\Delta f = 20.5$  Гц. Важным экспериментальным результатом является появление фототока при низких (вплоть до 10 К) температурах АЧТ, что не может быть связано с межзонными переходами из-за практически полного отсутствия фотонов с соответствующей энергией. Как показывают расчёты, при  $T_{АЧТ} = 10$  К для состава образцов  $x = 0.32$  поток фотонов на образец в области собственного поглощения недостаточен для объяснения появления фотосигнала вследствие генерации электронно-дырочных пар. Таким образом, можно предположить, что наблюдение фототока связано как с собственным поглощением, так и с возбуждением электронов с уровней в запрещённой зоне, глубина залегания которых соответствует чувствительности плёнок в дальней ИК или суб-

миллиметровой области спектра. Оценки, полученные из сравнения зависимости потоков квантов на различных длинах волн от  $T_{\text{ДЧТ}}$  и из значений поглощённого в структуре потока квантов, рассчитанных из кривых релаксации фототока, показали, что спектральный диапазон чувствительности ФП лежит в пределах 200 – 400 мкм.

### 3.1. Тонкоплёночные структуры $\text{PbSnTe:In/BaF}_2/\text{CaF}_2/\text{Si}$ для монокристаллических матричных фотоприёмных устройств

Приведённые в предыдущих разделах данные относились к структурам  $\text{COT:In}$ , полученным МЛЭ на монокристаллических подложках  $\text{BaF}_2$ . Важной проблемой явилось создание технологии МЛЭ переходных слоёв фторидов кальция и бария на кремнии с последующим ростом плёнок  $\text{PbSnTe}$  и легирования их индием. Это связано с возможностью создания монокристаллических фотоприёмных устройств по кремниевой технологии. В работе [33] описано создание матричных фотоприёмников форматом  $288 \times 2$  с размером элемента  $25 \times 25$  мкм<sup>2</sup>. С использованием атомно-силового микроскопа (АСМ) проведено исследование морфологии поверхности буферных слоёв на кремнии. На рис. 8 представлен профиль поверхности плёнки  $\text{BaF}_2$ , выращенной на подслое  $\text{CaF}_2$ . Видно, что наблюдается ярко выраженный ступенчатый рельеф. Длина ступени порядка 2 мкм, высота примерно  $(0.4 \pm 0.05)$  нм. Фторид бария имеет кубическую решётку с длиной главной диагонали в направлении [111], равной 0.8762 нм. Из рисунка видно, что высота ступени соответствует половине диагонали куба.

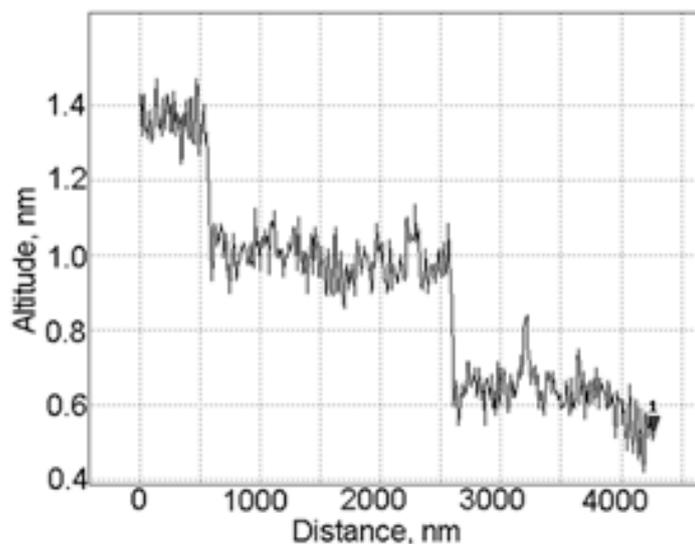


Рис. 8. Профиль поверхности структуры  $\text{BaF}_2/\text{CaF}_2/\text{Si}$  (111), полученный АСМ

Описаны эксперименты по выращиванию эпитаксиальных плёнок фторидов щелочно-земельных металлов на кремнии ориентации (001), которая является общепринятой при изготовлении электронных схем. В принципе оказалось возможным формирование буферных слоёв приемлемого качества, даже в случае осаждения на подложку сразу  $\text{BaF}_2$  без подслоя  $\text{CaF}_2$ . Интересной особенностью такой эпитаксии при сильном рассогласовании постоянных решёток является то, что на  $\text{Si}(001)$  растёт  $\text{BaF}_2$  ориентацией (111). Подробности такого механизма роста изложены в работе [34].

Толщина слоя  $\text{CaF}_2$  составляла около 70 нм, слоя  $\text{BaF}_2$  — 130–140 нм. Шероховатость поверхности лежала в пределах 10 нм, т.е. не превышала 5% от толщины буферного слоя. Рост слоёв  $\text{PbSnTe:In}$  осуществлялся в течение 5 часов при температуре подложки  $T_{\text{подл.}} = 320 \pm 5^\circ\text{C}$ .

Использовались два испарителя:  $\text{Pb}_{0.74}\text{Sn}_{0.26}\text{Te}$  и  $\text{In}_{0.85}\text{Te}_{0.15}$  для легирования плёнок индием в процессе роста. Толщина плёнок  $\text{PbSnTe}:\text{In}$  составляла от 0.7 мкм до 1.3 мкм.

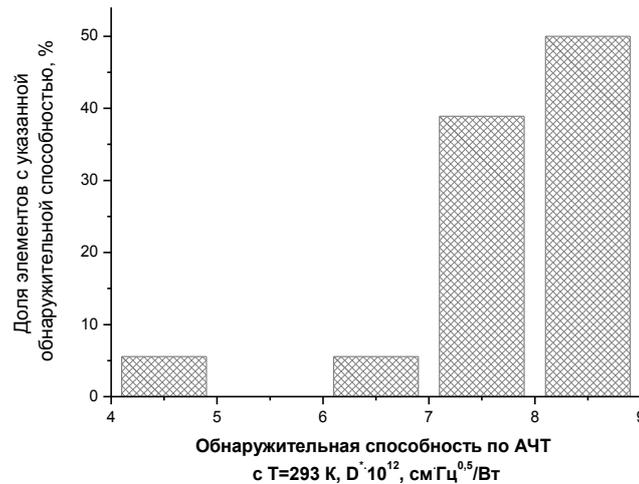


Рис. 9. Относительная часть элементов фрагмента линейки, обладающая данной обнаружительной способностью

Для определения влияния резких скачков температуры на рабочие параметры плёнки СОТ на кремнии с буферным слоем, было исследовано влияние термоциклирования – многократного охлаждения структуры  $\text{Si}/\text{CaF}_2/\text{BaF}_2/\text{PbSnTe}:\text{In}$  до 77 К и нагрева до комнатной температуры. Длительность каждого цикла «нагрев – охлаждение» составила  $100 \pm 15$  с. После проведения 200 циклов «нагрев – охлаждение» изменение концентрации и подвижности, тока в темноте и фототока у исследуемых структур во всём температурном диапазоне находилось в пределах  $\pm 20\%$ . На этих структурах были созданы матричные фотоприёмники форматом  $288 \times 2$  с размером элемента  $25 \times 25$  мкм. На рис. 9 приведена гистограмма распределения обнаружительной способности элементов линейки при рабочей температуре  $T = 21.2$  К.

Контрольные измерения показали, что однородность параметров элементов линейки на кремнии с буферными слоями существенно выше, чем на подложке из монокристаллического фтористого бария. За исключением 2-х элементов с существенным отклонением от средних параметров, разброс чувствительности и темнового сопротивления отдельных 18-ти исследованных площадок составляет примерно  $\pm 15\%$ . Очевидно, более высокая однородность связана с более высокой однородностью подложки из  $\text{BaF}_2/\text{CaF}_2/\text{Si}$  по сравнению с подложками из монокристаллического фтористого бария.

Около 90% элементов обладают обнаружительной способностью от  $7.2 \cdot 10^{12}$  до  $8.7 \cdot 10^{12}$   $\text{см} \cdot \text{Гц}^{0.5}/\text{Вт}$ . Сравнение обнаружительной способности ФП, изготовленного в структурах  $\text{Si}/\text{CaF}_2/\text{BaF}_2/\text{PbSnTe}:\text{In}$ , и элементов гибридного фотоприёмного устройства с мультиплексорами на основе плёнок  $\text{PbSnTe}:\text{In}$ , выращенных тем же методом на монокристаллическом  $\text{BaF}_2$ , показывает, что их параметры близки: мощность, эквивалентная шуму (МЭШ), в первом случае при рабочей температуре  $T_{\text{раб}}=15$  К для 90% элементов лучше, чем  $8 \cdot 10^{-17}$   $\text{Вт}/\text{Гц}^{0.5}$ , а во втором случае, но при  $T_{\text{раб}}=21.2$  К, для 90% элементов лучше, чем  $3 \cdot 10^{-16}$   $\text{Вт}/\text{Гц}^{0.5}$ .

#### 4. Заключение

Из проведённого анализа литературы следует, что для разработки канала РЛС, работающего в пассивном режиме в дальнем инфракрасном и терагерцовом диапазонах, в настоящее время имеются реальные технологические решения. Этот канал может дополнить существующий.

ющие каналы РЛС, что расширит её возможности. Однако необходимо проведение исследований по оптимальному применению этого канала с учётом влияния внешних условий, в первую очередь, на дальность обнаружения объектов.

## Литература

1. Основы тепловидения: учебное пособие / В. В. Коротаяев, Г. С. Мельников, С. В. Михеев, В. М. Самков, и др. СПб: НИУ ИТМО, 2012, 122 с.
2. Скворцов Л. А. Дистанционное обнаружение (Standoff) скрытых взрывчатых веществ, холодного и огнестрельного оружия с помощью методов импульсной терагерцовой спектроскопии и активного формирования спектральных изображений (Обзор) // Журнал прикладной спектроскопии. 2014. Т. 81, № 5. С. 653-678.
3. Шоломицкий Г. Б. Инфракрасное небо и космические исследования // Земля и Вселенная. 1994. №1. С. 3-12.
4. Submillimeter bolometers large arrays for Hershel/PACS / F. Simoens, P. Agnese, A. Beguin, et al. // Joint 30th Int. Conf. on Infrared and Millimeter Waves & 13th Int. Conf. on Terahertz Electronics. Williamsburg, Virginia, USA, September 19-23 2005. P.405-404.
5. Large bolometers arrays with superconducting NbSi sensors for future space experiments / F. Pajot, Y. Atik, C. Evesque, et al. // J. Low Temperature Physics. 2008. V. 151, № 1/2, P. 513-517.
6. Development of NbSi TES bolometer arrays for submillimeter astronomy / F. Pajot, Y. Atik, B. Bélier, et al. // Int. Conf. on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, Busan, Korea, September 21-25, 2009. P.1-2.
7. Submillimeter-wave Camera using SIS Photon Detectors / H. Matsuo, Y. Mori, H. Ezawa, et al. // Int. Conf. on Infrared and Millimeter Waves Int. Conf. on Terahertz Electronics (IRMMW-THz2006), Shanghai, Sept., 2006, p.28.
8. THz superconducting hot electrons bolometer heterodyne receiver. / J.R. Gao, M. Hajenius, Z.Q. Yang, et al. // Int. Conf. on Terahertz Electronics (IRMMW-THz2006), Shanghai, Sept., 2006, p.545.
9. A broadband terahertz detector using a superconducting tunnel junction / T. Taino, R. Nakano, S. Yoshimura, et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2006. V. 559, №2. P.751-753.
10. Design of a Terahertz Detector based on a Superconducting Tunnel Junction Coupled to a Thin Superconductor Film / S. Ariyoshi, T. Taino, A. Dobroiu, et al. // Int. Conf. on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, Busan, Korea, September 21-25. Proceedings of Conference. 2009.
11. Рогальский А. Инфракрасные детекторы: Пер. с англ./ Под ред. А. В. Войцеховского. – Новосибирск: Наука, 2003. 636 с.
12. Leotin J. Far infrared photoconductive detector // Proc. SPIE, 1986, V. 666, P. 81-100.
13. Неравновесное металлическое состояние в сплавах  $Pb_{1-x}Sn_xTe(In)$  / Б. А. Акимов, Б. А. Брандт, С. А. Богословский, Л. И. Рябова и др. // Письма ЖЭТФ. 1979. Т. 29, № 1. С. 11–14.
14. Особенности явлений переноса в  $Pb_{0,78}Sn_{0,22}Te$  с большим содержанием индия / Б.М. Вул, И. Д. Воронова, Г. А. Калюжная, Т. С. Мамедов, и др. // Письма ЖЭТФ. 1979. Т. 29, № 1. С. 21–25.
15. Surface LTT-film structure with In doping / E. V. Fedosenko, A. E. Klimov, D. V. Krivopalov, et al. // Appl. Surface Sci. 1994. V.78, № 4. P. 413-420.
16. Коррекция свойств плёнок  $PbSnTe<In>$ , полученных МЛЭ, при помощи низкотемпературных диффузионных отжигов / Л. Ф. Васильева, А. Э. Климов, Н. И. Петиков, В.Н. Шумский // Неорганические материалы. 2001. Т. 37, № 2. С. 193–198.

17. Инфракрасный обзор неба широкоугольным охлаждаемым телескопом на солнечно-синхронном ИСЗ «Ника-И» (Проект ИКОН) / Г.Б.Шаломицкий, И.А.Маслов, В.П.Архипова, и др. // ИКИ РАН, Москва, 1995, 93 с.
18. Deep Cooling  $2 \times 128$  Elements Hybrid Photoresistor Device for Spectral Range 6–20  $\mu\text{m}$  Based on Epitaxial  $\text{PbSnTe}<\text{In}>$  Films Prepared by MBE Technique / G. N. Feofanov, A. A. Frantsuzov, A. G. Klimenko, A. E. Klimov, et al. // Proceedings 1995 International Semiconductor Device Research Symposium, Charlottesville, USA. 1995. V.1. P. 291–295.
19. Климов А. Э., Шумский В. Н. Многоэлементные фотоприёмные устройства дальнего ИК-диапазона на основе гетероэпитаксиальных плёнок  $\text{PbSnTe}$ , легированных In, на  $\text{BaF}_2$  // в монографии «Матричные фотоприёмные устройства инфракрасного диапазона», под ред. С. П. Сеницы. Новосибирск: Наука, 2001. Гл. 6. С. 308-372.
20. Селективная фотопроводимость в  $\text{PbTe}(\text{Ga})$ , индуцированная локальной фононной модой / А. И. Белогорохов, И. И. Иванчик, С. В. Пономарёв, Е. И. Слынько, и др. // Письма ЖЭТФ. 1996. Т. 63, № 5. С. 342-346.
21. Performance and spectral response of  $\text{PbSnTe}(\text{In})$  far infrared detectors / D. R. Khokhlov, I. I. Ivanchik, S. N. Rains, D. M. Watson, et al. // Appl. Phys. Lett. 2000. V. 76. № 20. P. 2835-2837.
22. Klimov A. E., Shumsky V. N. Far infrared and submillimeter range photosensitive devices based on  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$  films: results and perspectives // Proc. SPIE. 2005. V. 5964. P.95-103.
23. Klimov A. E., Kubarev V. V., Shumsky V. N. Terahertz sensitivity of  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te:In}$  // The 8<sup>th</sup> Russia/CIS/Baltic/Japan Symposium on Ferroelectricity, Tsukuba, Japan, May 15-19, 2006, Abstracts, p. 63.
24. Фоточувствительность плёнок  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}<\text{In}>$  в терагерцовой области спектра / А. Н. Акимов, В. Г. Ерков, А. Э. Климов, В. В. Кубарев., и др. // ФТП, 2006, Т. 40, № 2. С. 169-173.
25. Klimov A. E., Kubarev V. V., Shumsky V. N. Terahertz sensitivity of  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te:In}$  // Ferroelectrics. 2007. V. 347. P. 111-119.
26. Чувствительность плёнок  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$  в субмиллиметровом диапазоне / А. Н. Акимов, В. В. Кубарев., И. Г. Неизвестный, О. В. Смолин, и др., // Прикладная физика. 2007. № 6. С.12-16.
27. Чувствительность плёнок  $\text{PbSnTe:In}$  к субмиллиметровому излучению в условиях полевой инжекции электронов / А. Н. Акимов, А. В. Беленчук, В. Г. Ерков, А. Э. Климов, и др. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2007. № 12. С. 18-24.
28. Шумский В. Н. Тонкоплёночные микроструктуры на основе  $\text{PbSnTe:In}$  как сенсоры инфракрасного и терагерцового излучения // Электроника Сибири. 2008. № 3. С.147-153.
29. Токи инжекции в узкозонном диэлектрике  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}<\text{In}>$  / А. Н. Акимов, В. Г. Ерков, А. Э. Климов, Е. Л. Молодцова, и др. // ФТП. 2005. Т. 39. № 5. С. 563-568.
30. Klimov A. E., Shumsky V. N. Shallow traps and limitation of injection current by space charge in  $\text{PbSnTe:In}$  narrow gap ferroelectric // Physica B. 2009. V. 404, № 23-24, P. 5028-5031.
31. Klimov A. E., Shumsky V. N. Localized States in Narrow-Gap Ferroelectric –Semiconductor  $\text{PbSnTe}$ : Injection Current, IR and THz Photosensitivity, Magnetic Field Effects // In: Ferroelectric-Physical Effects, Edited by M. Lallart, Rijeca, Croatia, 2011, Ch. 23. P. 527-552.
32. Перспективы применения твёрдых растворов  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te:In}$  с  $x > 0.3$  для фотоприёмников с расширенным спектральным диапазоном / А. Н. Акимов, Д. В. Ищенко, А. Э. Климов, И. Г. Неизвестный, и др. // Микроэлектроника 2013, Т. 42. № 2. С. 83-87.
33. Тонкоплёночные структуры  $\text{PbSnTe:In/BaF}_2/\text{CaF}_2/\text{Si}$  для монокристаллических матричных фотоприёмных устройств / А. Н. Акимов, А. В. Беленчук, А. Э. Климов, М. М. Качанова и др. // Письма в ЖТФ. 2009/ Т. 35, № 11, С. 88-95.

34. Growth of (111)-oriented PbTe films on Si(001) using a BaF<sub>2</sub> buffer / A. Belenchuk, A. Fedorov, H. Huhtinen, V. Kantser, et al. // Thin Solid Films. 2000. V. 358, № 1-2. P. 277-281.

*Статья поступила в редакцию 12.03.2015*

**Акимов Алексей Николаевич**

м.н.с. ИФП СО РАН имени А.В. Ржанова (630090, Новосибирск, пр. академика Лаврентьева, 13), тел. 8(383) 3-306-631, e-mail: lexa@isp.nsc.ru

**Климов, Александр Эдуардович**

д.ф.-м.н., заведующий лабораторией ИФП СО РАН имени А.В. Ржанова (630090, Новосибирск, пр. академика Лаврентьева, 13), тел. 8(383) 3-306-631, e-mail: klimov@isp.nsc.ru

**Неизвестный Игорь Георгиевич**

чл.корр. РАН, д.ф.м.н., советник РАН, (630090, Новосибирск, пр. академика Лаврентьева, 13), тел. 8(383) 3-306-631, e-mail: neizv@isp.nsc.ru

**Супрун Сергей Петрович**

к.ф.-м.н., с.н.с ИФП СО РАН имени А.В. Ржанова (630090, Новосибирск, пр. академика Лаврентьева, 13), тел. 8(383) 3-306-631, e-mail: suprun@isp.nsc.ru

**Шумский, Владимир Николаевич**

д.ф.-м.н., главный научный сотрудник ИФП СО РАН имени А.В. Ржанова, Лауреат Государственной премии в области науки и техники, (630090, Новосибирск, пр. академика Лаврентьева, 13), тел. 8(383) 3-307-883, e-mail: Shumsky@isp.nsc.ru

**Far-infrared and terahertz matrix detectors as the basis of one of the perspective areas for the development of radar systems**

**Aleksey N. Akimov, Alexander E. Klimov, Igor G. Neizvestny, Sergey P. Suprun, Vladimir N. Shumsky**

This paper considers modern detectors in the far-infrared and terahertz ranges to create additional channel for optical detection of objects in passive mode. Particular attention is paid to the matrix photonic detectors on the basis of solid PbSnTe:In solutions. The results are given indicating the fundamental possibility of creating a photonic detector. The absorption by band-band transitions must be used in such detectors. The results on development of monolithic photodetector equipment and threshold characteristics of detectors are analyzed.

*Keywords:* passive optical location, infrared and terahertz range, superconducting cooled bolometers, photon detectors of radiation.