

## МАТРИЧНЫЕ МИКРОБОЛОМЕТРИЧЕСКИЕ ПРИЕМНИКИ ДЛЯ ИНФРАКРАСНОГО И ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНОВ

© 2009 г. М. А. Демьяненко\*, канд. физ.-мат. наук; Д. Г. Есаев\*, канд. физ.-мат. наук;  
В. Н. Овсяк\*, доктор физ.-мат. наук; Б. И. Фомин\*, канд. техн. наук;  
А. Л. Асеев\*, академик РАН; Б. А. Князев\*\*, \*\*\*, доктор физ.-мат. наук;  
Г. Н. Кулипанов\*\*\*, академик РАН; Н. А. Винокуров\*\*\*, доктор физ.-мат. наук

\* Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, г. Новосибирск

\*\* Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск

\*\*\* Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск

E-mail: esaev@thermo.isp.nsc.ru

Представлены результаты разработки фотоприемников для инфракрасного и терагерцового диапазонов на основе неохлаждаемых матричных микроболометрических приемников, изготовленных по золь-гель технологии. Продемонстрированы приемники форматом 320×240 элементов, имеющие в диапазоне 8–14 мкм температурное разрешение менее 100 мК и пороговую мощность 160 пВт/пиксел при времени отклика 12–16 мс. Пороговая мощность на длине волны 130 мкм составила 33 нВт/пиксел при визуализации терагерцового изображения форматом 160×120 со скоростью 90 кадр/с. Разработана конструкция сопряжения антенны с неохлаждаемым высокоомным микроболометром интегрального исполнения, позволяющая значительно увеличить чувствительность приемника в терагерцовом диапазоне.

*Ключевые слова:* микроболометр, антенна, оксид ванадия, неохлаждаемый, матричный, инфракрасный, терагерцовый, приемник.

Коды OCIS: 040.1240, 040.1880, 040.3060, 140.2600.

Поступила в редакцию 30.03.2009.

### Введение

За последнее время значительно вырос интерес к возможности детектирования и визуализации излучения в терагерцовом (ТГ) диапазоне (0,3–10 ТГц) для систем безопасности, в биологических, медицинских и других целях. В значительной степени это обусловлено тремя факторами.

1. Неметаллические и неполярные материалы прозрачны для ТГ излучения, что позволяет оперативно выявлять потенциально опасные вещества через скрывающую одежду, обувь, багажные сумки, пластиковые и картонные упаковки.

2. Материалы, важные с точки зрения безопасности, имеют характерные спектры пропускания и отражения в ТГ диапазоне, что дает возможность проводить их идентификацию с высокой степенью достоверности.

3. ТГ излучение малой интенсивности не представляет угрозу для здоровья живых организмов, что позволяет их сканирование без нанесения вреда.

Технология регистрации изображения хорошо разработана как в инфракрасном (ИК), так и миллиметровом диапазонах длин волн. Однако в ИК диапазоне большинство актуальных материалов непрозрачны, а в миллиметровом диапазоне длин волн у них отсутствуют характерные спектры пропускания и отражения, что затрудняет идентификацию этих веществ. Кроме того, системы визуализации в миллиметровом диапазоне работают на существенно больших длинах волн, что заметно ухудшает пространственное разрешение. Расширение спектральной области чувствительности в ТГ диапазон имеет большое значение также в радиоастрономии, физике плазмы и для исследования атмосферы.

В настоящее время наиболее чувствительными приемниками ТГ излучения являются криогенные сверхпроводниковые болометры антенного типа [1]. Их пороговая мощность, приведенная на 1 Гц полосы частот измерения, – мощность эквивалентная шуму (NEP)<sup>1</sup> – достигает  $9 \times 10^{-12}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup> при азотных температурах [2],  
<sup>1</sup> NEP – noise equivalent power.

$1,4 \times 10^{-14}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup> при гелиевых температурах [3] и  $3 \times 10^{-17}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup> при температуре порядка 0,1 К [4]. Такие приемники, обычно одиночные или в виде небольших массивов, используются для детектирования малых сигналов, например, в радиоастрономии и в системах обнаружения, использующих пассивное ТГ излучение, испускаемое самим объектом или отражаемое им излучение окружающего фона. В системах с активной подсветкой, использующих мощные ТГ излучатели (такие как квантовые каскадные лазеры [5] и лазеры на свободных электронах [6]), столь высокая чувствительность не требуется и актуальными становятся высокое пространственное разрешение, скорость визуализации изображения и удобство использования приемников. Для решения этих задач могут быть использованы матричные микроболлометрические приемники (ММБП) большого формата, чувствительность которых к ТГ диапазону была продемонстрирована в работах [7, 8]. Целью настоящей работы является разработка и исследование неохлаждаемых ММБП для ИК и ТГ диапазонов как антенного типа, так и без антенн.

### **Матричные микроболлометрические приемники без антенн**

ММБП представляет собой массив фоточувствительных микроболлометров мостикового типа [9], состоящих из термочувствительного сопротивления, подвешенного на слабо теплопроводящих несущих балках (“ножках”) над подложкой, на которой может быть изготовлено считывающее устройство (например мультиплексор). На подложке под болометром для увеличения поглощения ИК излучения наносится зеркало, зазор между которым и болометром составляет четверть длины волны середины рабочего диапазона. Этот вариант является наиболее оптимальным, поскольку позволяет использовать преимущества интегрального исполнения чувствительных элементов и схемы обработки сигналов на одном кремниевом кристалле, а также получить высокий коэффициент заполнения площади приемника чувствительными элементами. В качестве терморезистивного материала в неохлаждаемых микроболлометрах преимущественно используются оксиды ванадия [10] и аморфный кремний [11]. Далее нас будут интересовать микроболлометры на основе оксидов ванадия, в которых термочувствительное сопротивление в виде тонкого слоя заключено между двумя слоями нитрида кремния, являющимися

несущим материалом. В таких приемниках поглощение ИК и ТГ излучения происходит непосредственно в конструктивных элементах микроболлометра. В частности, в ИК диапазоне поглощение происходит в слоях нитрида кремния и обусловлено Si–N-связями, что задает область спектральной чувствительности ММБП интервалом 8–14 мкм [12]. Отмеченная в работах [7, 8] чувствительность таких микроболлометров в ТГ диапазоне, по нашим данным, обусловлена поглощением излучения в слоях оксида ванадия. На рис. 1 приведены спектры пропускания слоев оксида ванадия и нитрида кремния, выращенных на сапфировой подложке толщиной 0,2 мм. Половина каждой подложки оставалась не покрытой слоем и использовалась при нормировке коэффициентов пропускания. Видно, что слой оксида ванадия в диапазоне волн 30–200 мкм поглощает около 10% ТГ излучения, а в слое нитрида кремния поглощения не происходит.

Технологический маршрут изготовления ММБП состоит из следующих операций.

**1. Слой алюминия для контактов.** Нанесение производится на установке магнетронного распыления. Формируются контактные площадки микроболлометров к кремниевой схеме считывания. Толщина металла 0,6 мкм.

**2. Слой алюминия для зеркала.** Нанесение производится на установке магнетронного распыления. Формируются зеркала, в дальнейшем служащие для изготовления оптических резонаторов, расположенных под микроболлометрами и увеличивающих поглощение ИК излучения приемником. Толщина металла 0,1 мкм.

Указанные первые два этапа маршрута являлись дополнительными к стандартному технологическому маршруту изготовления кремниевой схемы считывания и выполнялись в ОАО “Ангстрем” (Москва).

**3. Жертвенный слой.** Производится нанесение полиимида методом центрифугирования, его предварительная сушка, формируются воронкообразные окна до алюминиевых контактных площадок, после чего проводится имидизация полиимида. Толщина жертвенного слоя 2,5 мкм.

**4. Нижний слой нитрида кремния.** Используется метод плазмохимического нанесения в реакторе с индукционно-связанной плазмой. Толщина пленки составляет 150 нм. Проводится плазмохимическое травление окон в слое нитрида кремния до алюминиевых контактных площадок.

**5. Пленка нихрома.** Магнетронным распылением формируются нихромовые шины, идущие

по нитридикремниевой “ножке” микроболметра, и контакты к оксиду ванадия. Толщина пленки 50 нм.

**6. Оксид ванадия.** Термочувствительные слои получали методами золь-гель технологии, используя при этом раствор изопророксида ванадила в изопропиловом спирте. Для получения слоев оксида ванадия требуемого состава сначала получали слои высшего оксида ванадия  $V_2O_5$ . Затем, чтобы получить слои с меньшим содержанием кислорода, в том числе  $VO_x$  с  $x \approx 2$ , проводился отжиг в восстановительных средах.

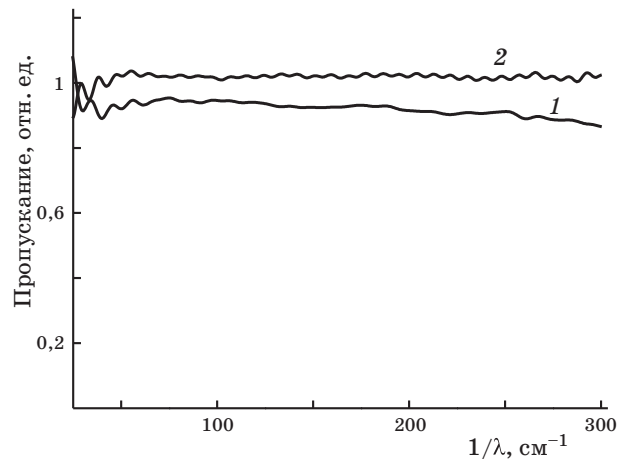
**7. Верхний слой нитрида кремния** полностью аналогичен нижнему слою нитрида кремния. Путем плазмохимического травления формируется нитридикремниевый мостик.

**8. Удаление жертвенного слоя.** Полиимид удаляется в кислородной плазме после предварительного разрезания пластины кремния на отдельные чипы.

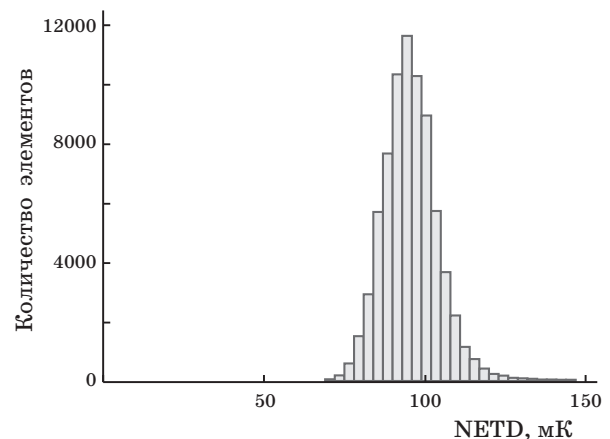
### Образцы неохлаждаемых фотоприемных устройств на основе ММБП

В качестве схемы считывания использовались мультиплексоры формата  $320 \times 240$  и  $160 \times 120$ , разработанные совместно ОАО “Ангстрем” и ОАО ЦНИИ “Циклон” (Москва). Считывание сигналов с элементов ММБП, работающих в режиме импульсного смещения, организовано построчно с использованием 320 (или 160 для меньшего формата) мостовых схем Уинстона. Одно плечо мостов построено из выбранной строки матрицы чувствительных микроболметров и вынесенной за пределы матрицы строки “термически закороченных” болометров, т. е. выполненных без вакуумного зазора; другое плечо – из микроболметра дополнительного столбца чувствительных, но затененных от ИК излучения микроболметров и одного “термически закороченного” болометра. Такая схема включения обеспечивает сохранение баланса моста даже при значительном разогреве чувствительных элементов матрицы в процессе считывания сигнала. Кроме того, она мало чувствительна к шумам напряжения смещения моста и сопротивлению болометров. Предусмотрена также балансировка входных напряжений 320 (или 160) дифференциальных интегрирующих усилителей внешним напряжением, единым для всех усилителей.

Микроболметрический приемник имел шаг матрицы  $51 \times 51$  мкм, фактор заполнения 0,55. Ширина несущей “ножки” составляла 1,6–2,0 мкм. Экранирование от ИК излучения до-



**Рис. 1.** Спектры пропускания слоев оксида ванадия толщиной 100 нм (1) и нитрида кремния толщиной 300 нм (2), выращенных на сапфировой подложке.



**Рис. 2.** Гистограмма распределения NETD по элементам ММБ ФПУ формата  $320 \times 240$  при угле зрения  $60^\circ$ .

полнительного столбца чувствительных микроболметров осуществлялось П-образной балкой, изготовленной из легированного кремния и приклеенной к кристаллу с мультиплексором вакуумным эпоксидным клеем. После предварительной отбраковки ММБП и сортировки по качеству было изготовлено и исследовано несколько матричных микроболметрических (ММБ) фотоприемных устройств (ФПУ) форматом  $320 \times 240$  и  $160 \times 120$ , в том числе с разностью температур, эквивалентной шуму (NETD)<sup>2</sup> менее 100 мК при угле зрения  $60^\circ$ . На рис. 2 приведена типичная гистограмма распределения NETD по элементам ММБ ФПУ форматом  $320 \times 240$ . ФПУ состоят из малогабаритного вакуумного корпу-

<sup>2</sup> NETD – noise equivalent temperature difference.

са, снабженного просветленным германиевым окном, геттера, термоэлектрического охладителя и транзисторного датчика температуры для стабилизации рабочей температуры ММБП. Использовались также окна из высокоомного кремния, обладающие большим пропусканием в ТГ диапазоне. Вакуумный корпус, снабженный медным штенгелем и 35 металлостеклянными токовыводами, изготавливался из ковара вакуумной индукционной плавки 29НК-ВИ. После откачки и обезгаживания корпуса проводилась активация геттера, после чего штенгель вакуумно-плотно пережимался. Используемый геттер активировался прогревом путем пропускания через него электрического тока и допускал повторную многократную активацию, что позволяет продлить срок службы ФПУ. Термоэлектрический охладитель размерами 20×20×3,5 мм имел максимальную хладопроизводительность 2,7 Вт при температуре “горячей стороны” 50 °С и позволял при потребляемой мощности, не превышающей 2 Вт, поддерживать рабочую температуру ММБП 20 °С при изменении температуры окружающей среды от –50 °С до +50 °С. Вес ФПУ 50 г.

Температурные чувствительности  $S_T$  исследованных ММБ ФПУ, измеренные при изменении температуры протяженного абсолютно черного тела (АЧТ) от 25 °С до 35 °С и напряжении смещения чувствительного микроболометра  $V_B = 2$  В, имеют достаточно узкие гистограммы распределения по элементам ММБП со средними значениями  $\langle S_T \rangle = 3-6$  мВ/К, изменяющимися от образца к образцу. Типичное значение шума выходного напряжения каждого чувствительного элемента ММБП, измеренного по 64 последовательным кадрам,  $V_{out} = 0,4$  мВ. Количество дефектных элементов, т. е. имеющих NETD вдвое большую средней, составляло от 3 до 5%. Пороговая мощность в ИК диапазоне, найденная по соотношению

$$P_{th,IR} = NETD(dP/dT)A/(4F^2 + 1), \quad (1)$$

составляла  $1,6 \times 10^{-10}$  Вт/пиксел. Здесь  $dP/dT$  – изменение мощности излучения единицы поверхности АЧТ в рабочем диапазоне длин волн 8–14 мкм при изменении его температуры  $T$  на один градус,  $A$  – площадь пиксела микроболометрической матрицы,  $F$  – относительное отверстие АЧТ. Теплопроводность микроболометров, измеренная по методике [13] на тестовых микроболометрах, расположенных на краю кристалла ММБП, составила примерно  $1 \times 10^{-7}$  Вт/К. Время тепловой релаксации  $\tau_0$ , измеренное по методи-

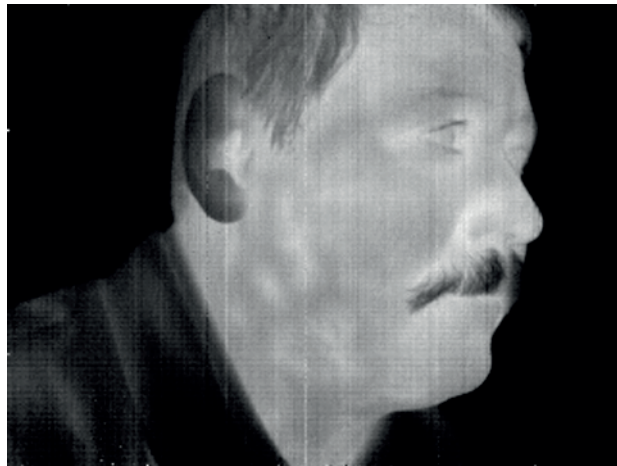


Рис. 3. Тепловое изображение, полученное с использованием неохлаждаемого ММБ ФПУ форматом 320×240, работающего на частоте 50 Гц, и германиевого объектива с относительным отверстием 1:1.

кам [13, 14], составляло 12–16 мс. Среднеквадратическое отклонение относительного сопротивления болометров по массиву матрицы [14] для различных ФПУ равно 2–4%. На рис. 3 приведен пример теплового изображения, полученного с помощью изготовленного ММБ ФПУ форматом 320×240 и германиевого объектива с  $F = 1$ .

### Измерение чувствительности ММБП в терагерцовом диапазоне

Экспериментально чувствительность ММБ ФПУ в ТГ диапазоне измеряли путем сопоставления интенсивности падающего излучения и сигнала ММБП. Использовали излучение лазера на свободных электронах с длиной волны  $\lambda = 130$  мкм [6]. Лазер генерирует непрерывную последовательность импульсов длительностью около 50 пс, следующих с частотой 5,6 МГц. Относительная ширина спектральной линии около 0,3%. Длина волны излучения могла плавно перестраиваться от 120 до 235 мкм. Поскольку распределение интенсивности излучения, падающего на ФПУ (непосредственно перед входным окном), и распределение интенсивности в плоскости матрицы микроболометров, вообще говоря, различны (например, вследствие интерференции на окне и разного пространственного положения окна и матрицы), то необходимо использовать интегральные величины интенсивности падающего излучения и сигнала ММБП. Для этой цели излучение фокусировалось в пятно меньше размера матрицы чувствительных микроболометров и сначала одиночным прием-



ником определяли его относительное распределение по координатам. Затем термочувствительным интерферометром [15] на основе плоскопараллельной пластинки из стекла К8 проводили абсолютное измерение интенсивности в максимуме распределения  $I_{\max}$ . Плоский волновой фронт видимого излучения полупроводникового лазера (длина волны 665 нм) отражался от двух поверхностей пластинки и формировал на экране интерференционную картину, которая записывалась цифровой видеокамерой. Измеряемое ТГ излучение нагревало тонкий поверхностный слой пластинки, что приводило к изменению ее показателя преломления и толщины и, как следствие, к сдвигу интерференционных полос. Для стекла К8 сдвиг на одну полосу соответствует 5,1 Дж/см<sup>2</sup> поглощенной энергии. Измеряя время между двумя минимумами или максимумами и учитывая коэффициент отражения от пластины, равный 0,16, можно определить мощность падающего излучения. Время между двумя соседними максимумами интерференционной картины составляло около 1 с, что достаточно мало и позволяет пренебречь как охлаждением пластины воздухом, так и перераспределением тепла вдоль поверхности пластины за счет теплопроводности. В результате измеренная нами интегральная интенсивность излучения  $I_{\text{int}}$  у окна приемника составила 9,8 Вт.

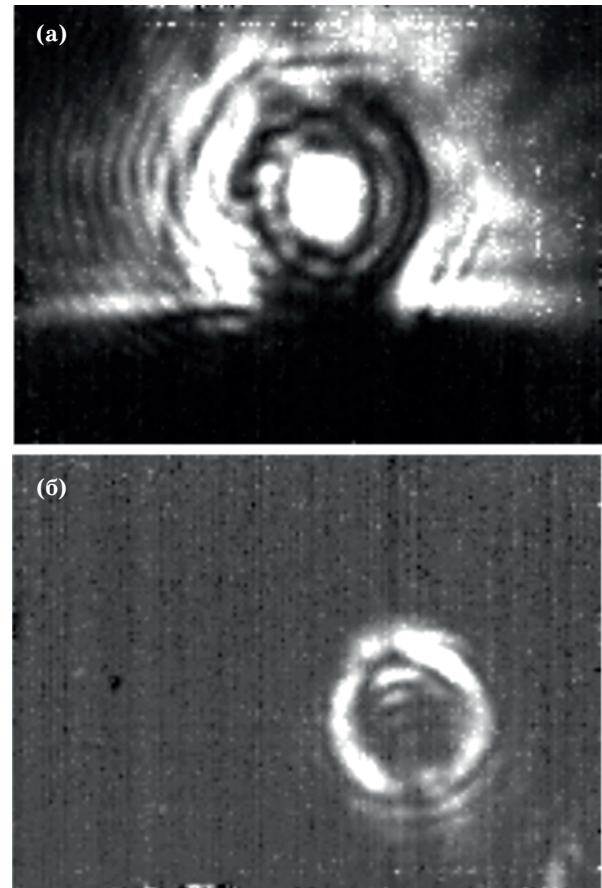
При измерении сигнала ММБП  $U_S$  падающее излучение ослаблялось поляризатором в 50 раз, а для повышения динамического диапазона ММБП напряжение смещения микроболометров  $V_B$  уменьшалось с 2 до 1 В, что вдвое понижало его чувствительность и разброс темновых значений выходного напряжения  $V_{\text{out}}$ . Суммируя значения сигнала по всем пикселям, находили его интегральное значение  $U_{S,\text{int}}$ , которое составило  $3 \times 10^6$  мВ. При этом абсолютная средняя чувствительность ММБП при  $V_B = 1$  В составила  $S = U_{S,\text{int}} / I_{\text{int}} = 3 \times 10^6 / (9,8/50) \approx 1,5 \times 10^4$  В/Вт. Учитывая, что среднеквадратическое значение шума ММБП не зависит от типа регистрируемого излучения и составляло  $U_n \approx 0,5$  мВ, находим пороговую мощность  $P_{\text{th,THz}} = U_n / S$ , которая оказывается равной  $3,3 \times 10^{-8}$  Вт/пиксел. Учитывая, что интегрирование сигнала схемой считывания проводилось в течение времени  $\tau_i = 20$  мкс и, следовательно, средний шум на 1 Гц полосы частот  $\langle U_{nf} \rangle = U_n \sqrt{2\tau_i}$  составлял  $3 \times 10^{-6}$  В/Гц<sup>1/2</sup>, найдем мощность, эквивалентную шуму,  $\text{NEP}_{\text{THz}} = \langle U_{nf} \rangle / S = 2 \times 10^{-10}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup>.

Теоретически пороговую мощность в ТГ диапазоне  $P_{\text{th,THz}}$  можно оценить по известной

пороговой мощности для ИК диапазона  $P_{\text{th,IR}}$  путем сопоставления коэффициентов поглощения излучения в болометре и коэффициентов пропускания окон для двух этих диапазонов:

$$P_{\text{th,THz}} \approx 2P_{\text{th,IR}} \frac{\eta_{\text{IR}}}{\eta_{\text{THz}}} \frac{\tau_{W,\text{IR}}}{\tau_{W,\text{THz}}} \left( \frac{2\pi}{\lambda} 2d \right)^{-2}. \quad (2)$$

Здесь  $\eta_{\text{IR}}$  и  $\eta_{\text{THz}}$  – коэффициенты поглощения излучения в ИК и ТГ диапазонах, принимаемые равными 0,5 и 0,1 соответственно;  $\tau_{W,\text{IR}}$  и  $\tau_{W,\text{THz}}$  – коэффициенты пропускания просветленного для ИК диапазона германиевого окна в ИК и ТГ областях, равные 1 и 0,2 соответственно;  $d$  – толщина зазора между болометром и зеркалом, равная 2,5 мкм;  $\lambda$  – длина волны ТГ излучения, на которой проводилось измерение чувствительности ММБП. Коэффициент 2 в начале выражения (2) и последний множитель учитывают соответственно вдвое пониженное напряжение смещения болометра при работе



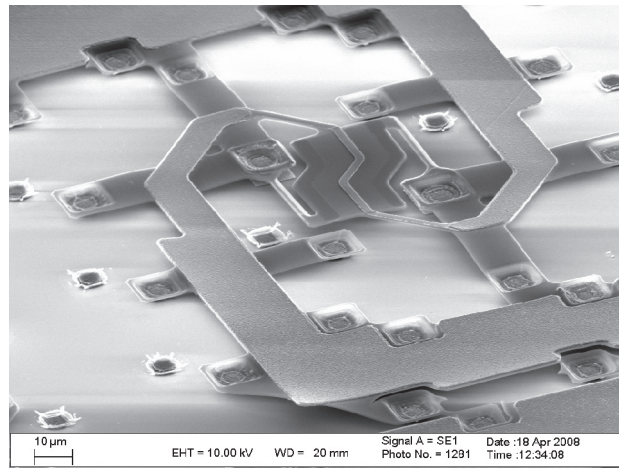
**Рис. 4.** Изображения скрытых объектов в режиме на просвет (а) и на отражение (б), полученные с использованием неохлаждаемого ММБ ФПУ форматом 160×120, работающего на частоте 90 Гц, и излучения лазера на свободных электронах. а – гайка М8, закрытая листом винипласта толщиной 2 мм, б – гайка М8, закрытая листом писчей бумаги.

с ТГ излучением и уменьшение поглощения ТГ излучения в оксиде ванадия, обусловленное тем, что оно происходит вблизи узла стоячей волны, образующейся при отражении падающего излучения от зеркала, расположенного под болометром. Используя вышеуказанные значения и  $P_{th,IR} = 1,6 \times 10^{-10}$  Вт/пиксел, получим пороговую мощность в ТГ диапазоне  $P_{th,THz} = 3,4 \times 10^{-8}$  Вт/пиксел, практически совпадающую с экспериментальным значением.

Визуализация объектов в ТГ диапазоне проводилась с помощью ММБ ФПУ форматом  $160 \times 120$  элементов на длине волны 130 мкм при использовании излучения лазера на свободных электродах, ослабленного поляризатором. В качестве объектива использовали полиэтиленовые и фторопластовые линзы. Максимальная скорость передачи изображения в персональный компьютер составила 90 кадр/с. На рис. 4 приведены примеры изображений, полученных в режиме на просвет и на отражение. Отношение сигнал/шум составляло 300 и более.

### ММБП антенного типа

В сверхпроводящих болометрах антенного типа нагрузкой для антенны является сам микроболометр, имеющий сопротивление, согласованное с импедансом антенны, который по порядку величины равен 100 Ом. Неохлаждаемые болометры на основе оксидов ванадия имеют сопротивление порядка 100 кОм, что представляет определенную трудность для согласования антенны с нагрузкой и требует нового конструктивного решения. В нашей конструкции нагрузкой для антенны является не сам термочувствительный элемент микроболометра, а узкая металлическая полоска, нанесенная на верхний слой нитрида кремния между контактами к слою оксида ванадия и, следовательно, имеющая хороший тепловой контакт с микроболометром, но электрически изолированная от термочувствительного слоя. Длина полоски 70 мкм, ширина 2 мкм и толщина 200 нм, сопротивление – порядка 100 Ом. Антенна выполнена из хорошо проводящего металла и подвешена над кремниевой схемой считывания на высоте 2,5 мкм (толщина вытравленного жертвенного слоя из полиимида) с помощью растяжек из нитрида кремния (см. рис. 5). Такая конструкция в интегральном исполнении при размерах антенн  $250 \times 250$  мкм позволяет изготовить на кремниевом кристалле размером  $20 \times 20$  мм матрицу чувствительных элементов форматом до  $64 \times 48$



**Рис. 5.** Фрагмент неохлаждаемого матричного болометрического приемника с антенной, подвешенной на растяжках из нитрида кремния. Размер пиксела  $250 \times 250$  мкм. Снимок сделан с помощью сканирующего электронного микроскопа.

элементов, предназначенную для регистрации изображения в ТГ диапазоне.

В качестве схемы считывания использовали тот же мультиплексор форматом  $160 \times 120$ , что и для неохлаждаемого ММБП без антенн. Для того чтобы максимально исключить разброс и невоспроизводимость параметров микроболометров и уверенно сравнивать эффективность работы приемников с антеннами и без антенн, на одном кремниевом кристалле располагались массивы микроболометров с “квазиспиральными” антеннами размером  $150 \times 150$  и  $250 \times 250$  мкм, а также болометры без антенн. Измерения показали, что на длине волны 130 мкм чувствительность болометрических приемников с антеннами обоих размеров в 4–6 раз выше, чем болометрических приемников без антенн. Тем самым продемонстрирована принципиальная работоспособность предложенной конструкции неохлаждаемых высокоомных микроболометров антенного типа. Дальнейший путь увеличения чувствительности состоит в оптимизации конструкции микроболометра и антенны.

### Выводы

Разработаны и изготовлены неохлаждаемые матричные микроболометрические приемники для инфракрасного и терагерцового диапазонов. Для приемников форматом  $320 \times 240$  элементов в диапазоне 8–14 мкм получены температурное

разрешение менее 100 мК и пороговая мощность 160 пВт/пиксел при времени отклика 12–16 мс. Показана чувствительность микроболометрических приемников на основе диоксида ванадия к излучению терагерцового диапазона. Пороговая мощность на длине волны 130 мкм составила 33 нВт/пиксел. Разработанная конструкция сопряжения антенны с неохлаждаемым высокоомным микроболометром интегрального исполнения позволяет значительно увеличить чувствительность приемника.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Richards P.L. Bolometers for infrared and millimeter waves // *J. Appl. Phys.* 1994. V. 76. № 1. P. 1–24.
2. Rice J.P., Grossman E.N., Rudman D.A. Antenna-coupled high-Tc air-bridge microbolometer on silicon // *Appl. Phys. Lett.* 1994. V. 65. P. 773–775.
3. Luukanen A., Pekola J.P. A superconducting antenna-coupled hot-spot microbolometer // *Appl. Phys. Lett.* 2003. V. 82. P. 3970–3972.
4. Lee A.T., Richards P.L., Nam S.W., Cabrera B., Irwin K.D. A superconducting bolometer with strong electrothermal feedback // *Appl. Phys. Lett.* 1996. V. 69. P. 1801–1803.
5. Williams B.S., Kumar S., Hu Q., Reno J.L. High-power terahertz quantum-cascade lasers // *Electron. Lett.* 2006. V. 42. № 2. P. 89–91.
6. Bolotin V.P., Vinokurov N.A., Kayran D.A., Knyazev B.A., Kolobanov E.I., Kotenkov V.V., Kubarev V.V., Kulipanov G.N., Matveenko A.N., Medvedev L.E., Miginsky S.V., Mironenko L.A., Oreshkov A.D., Ovchar V.K., Popik V.M., Salikova T.V., Serednyakov S.S., Skrinsky A.N., Shevchenko O.A., Scheglov M.A. Status of the Novosibirsk terahertz FEL // *Nuclear Instr. and Methods in Phys. Res.* 2005. V. A543. P. 81–85.
7. Lee A.W.M., Qin Q., Kumar S., Williams B.S., Hu Q., Reno J.L. Real-time terahertz imaging over a stand-off distance (>25 meters) // *Appl. Phys. Lett.* 2006. V. 89. 141125.
8. Dem'yanenko M.A., Esaev D.G., Knyazev B.A., Kulipanov G.N., Vinokurov N.A. Imaging with a 90 frames/s microbolometer focal plane array and high-power terahertz free electron laser // *Appl. Phys. Lett.* 2008. V. 92. 131116.
9. Rogalski A. Infrared detectors. Singapore: Gordon and Breach Science Publishers, 2000. 681 с.
10. Blackwell R., Lacroix D., Bach T., Ishii J., Hyland S., Geneczko J., Chan S., Sujlana B., Joswick M. Uncooled VOx thermal imaging systems at BAE Systems // *Proc. SPIE.* 2008. V. 6940. 694021-1.
11. Fieque B., Robert P., Minassian C., Vilain M., Tissot J.L., Crastes A., Legras O., Yon J.J. Uncooled amorphous silicon XGA IR FPA with 17 μm pixel-pitch for High End applications // *Proc. SPIE.* 2008. V. 6940. 69401X-1.
12. Овсяк В.Н., Шашкин В.В., Демьяненко М.А., Фолин Б.И., Васильева Л.Л., Соловьев А.П. Неохлаждаемые матричные микроболометрические приемники ИК излучения на основе золь-гель VOx // *Прикладная физика.* 2005. № 6. С. 114–117.
13. Чистохин И.Б., Демьяненко М.А. Определение тепловых параметров микроболометров из электрических измерений // *Прикладная физика.* 2006. № 1. С. 91–95.
14. Dem'yanenko M.A., Fomin B.I., Ovsyuk V.N., Marchishin I.V., Parm I.O., Vasil'ieva L.L., Shashkin V.V. Uncooled 160×120 microbolometer IR FPA based on sol-gel VOx // *Proc. SPIE.* 2005. V. 5957. 59571R.
15. Винокуров Н.А., Князев Б.А., Кулипанов Г.Н., Матвиенко А.Н., Попик В.М., Черкасский В.С., Щеглов М.А. Визуализация излучения мощного терагерцового лазера на свободных электронах с помощью термочувствительного интерферометра // *ЖТФ.* 2007. Т. 77. № 7. С. 91–100.