

**В.Т.С.П.-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ТЕПЛООВОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ**

© 2013 г. Э. Ю. Гордиенко, Г. В. Шустакова, Ю. В. Фоменко, Н. И. Глушук

*Физико-технический институт низких температур им. Б.И. Веркина НАН Украины**Украина, 61103, Харьков, просп. Ленина, 47**E-mail: gordiyenko@ilt.kharkov.ua*

Поступила в редакцию 17.07.2012 г.

Описан лабораторный макет преобразователя инфракрасного изображения, принцип действия которого основан на формировании и перемещении с помощью локального теплового воздействия чувствительной к внешнему излучению зоны на поверхности высокотемпературной сверхпроводящей (в.т.с.п.) пленочной структуры. Измерены основные параметры сформированной зоны: размер  $A \approx 95 \times 95 \text{ мкм}^2$ , обнаружительная способность  $D^* = 1.3 \cdot 10^8 \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2}/\text{Вт}$ , постоянная времени  $\tau = 6 \text{ мс}$ . Рассмотренный метод поэлементного считывания информации и болометрическая природа чувствительности приемника открывают перспективы использования преобразователя в широком спектральном диапазоне.

DOI: 10.7868/S0032816213030221

Задача создания высокоэффективных систем широкоформатного приема тепловых изображений с высоким температурным и пространственным разрешением остается актуальной, несмотря на большое количество работ, направленных на их разработку и промышленное изготовление. Это связано с существованием широкого круга задач, требующих расширения спектрального диапазона, в то время как большинство приемников излучения с высокими параметрами имеют область чувствительности в диапазоне до 20 мкм.

Открытие явления высокотемпературной сверхпроводимости (в.т.с.п.) дало возможность построения чувствительных принципиально неселективных болометрических приемников азотного уровня охлаждения для детектирования излучения инфракрасной (и.к.) и миллиметровой областей спектра. Достигнутое значение оптической мощности, эквивалентной шуму,  $NEP \approx 6.3 \cdot 10^{-13} \text{ Вт}/\text{Гц}^{1/2}$  в спектральном диапазоне 12–36 мкм для в.т.с.п.-болометров в 100 раз превышает чувствительность используемых в этом диапазоне коммерческих неохлаждаемых пироэлектрических детекторов [1].

Анализ показывает, что существенно улучшить характеристики и.к.-систем можно за счет увеличения числа чувствительных элементов в приемнике излучения [2]. При создании матричных приемников необходимо комплексное решение задач достижения высокой чувствительности, быстродействия и организации считывания информации с каждого элемента. Однако разработка многоэлементных устройств на основе в.т.с.п. в настоящее время находится на начальном уровне. Если создание одиночного болометрического элемента с высокими параметрами чувствитель-

ности и быстродействия, способного стать основой для построения матричных устройств, является реальной задачей [1], то считывание информации с массива таких приемников остается нерешенной проблемой.

В известных разработках пригодных к интегральному исполнению болометрических детекторов на мембранных конструкциях на кремниевой основе [3–5] предполагается вопросы коммутации сигнала решать традиционно с помощью п.з.с.-структур (приборов с зарядовой связью), сформированных на той же кремниевой подложке, что и матрица детекторов. Однако достичь каких-либо успехов в построении таких преобразователей и.к.-изображения пока не удалось из-за характерных для мембранных конструкций трудностей обеспечения надежности и воспроизводимости характеристик элементов массива, а также большого количества требуемых технологических операций, приводящих к деградации сверхпроводящих свойств в.т.с.п.-пленок [6].

Возможность использования сквид-мультиплексоров для поэлементного считывания информации матричных в.т.с.п.-детекторов [7] ограничивается узким динамическим диапазоном работы, нелинейностью передаточной функции и наличием избыточных  $1/f$ -шумов в в.т.с.п. сквид-усилителях [8]. Кроме того, сквид должен располагаться в непосредственной близости от детектора, что значительно снижает фактор заполнения матрицы, а также требует большого количества электрических соединений с электроникой последующей обработки сигнала.

Формирование матрицы в.т.с.п.-детекторов и мультиплексора в отдельных слоях с последую-

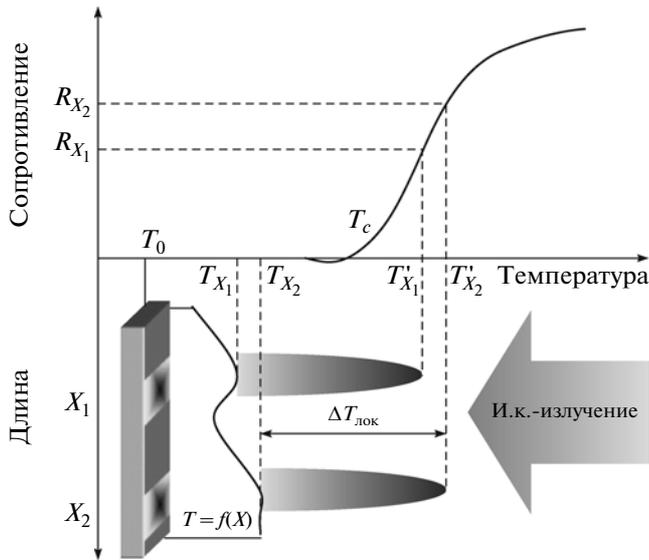


Рис. 1. Формирование чувствительных областей на поверхности в.т.с.п.-полоски.

шим их электрическим соединением (гибридная технология) имеет также определенные трудности. Прежде всего, это жесткие требования к качеству электрических соединений к в.т.с.п.-структурам, от которого зависит уровень контактных шумов, и сложность стабилизации температурного баланса, определяемого вкладом всех составляющих системы (в том числе и мультиплексора) при очень узкой температурной области реализации чувствительности в.т.с.п.-болметра ( $<1$  К).

Возможно, решение вышеуказанных проблем может быть найдено при использовании новых нетрадиционных методов считывания информации с массива болометрических элементов. Рассмотренный в данной работе подход для регистрации и.к.-изображения основан на перемещении чувствительной к внешнему излучению зоны, сформированной на сверхпроводящей сплошной протяженной пленочной структуре локальным тепловым воздействием. Предлагаемый подход может стать основой для создания высокоэффективных преобразователей и.к.-изображения на основе в.т.с.п.

Идея этого метода [9–11] поясняется на рис. 1, на котором рассмотрена болометрическая структура в виде узкой в.т.с.п.-полоски на подложке.

При поглощении и.к.-излучения на поверхности полоски формируется пространственный температурный рельеф  $T=f(X)$ , который отображает распределение интенсивности регистрируемого излучения. При этом прирост температуры  $\Delta T_{X_i}$  в каждой условно взятой области  $X_i$  в общем случае пропорционален доле мощности падающего излучения  $P_{X_i}$  и обратно пропорционален

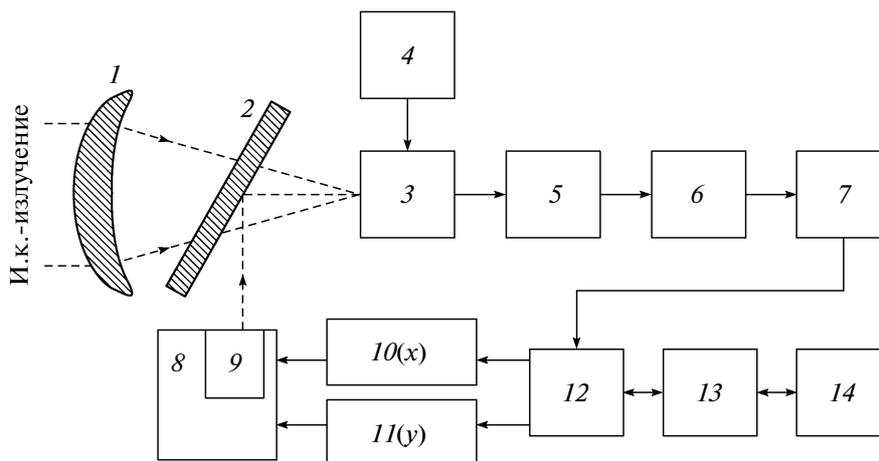
величине теплового связи  $G_{X_i}$  каждой из этих областей с теплостоком (охлаждающей платформой).

Начальная температура теплостока  $T_0$  выбирается таким образом, что вся полоса находится в сверхпроводящем состоянии, а пространственный температурный рельеф нигде не превышает критической температуры  $T_c$ . Таким образом электрическое сопротивление всего образца равно нулю. Следующей задачей является считывание этого температурного рельефа и однозначная привязка значений прироста температуры  $\Delta T_{X_i}$  к положению на поверхности в.т.с.п.-полоски. Для этой цели на локальном участке полоски фокусируется лазерное излучение, создающее перегрев участка на  $\Delta T_{лок}$ . Участок переходит в резистивное состояние, где появляется значительная температурная зависимость сопротивления.

В этом случае сопротивление всей полоски равно сопротивлению только локального участка, разогреваемого лазерным лучом, а величина сопротивления пропорциональна сумме температур  $T_0$ ,  $\Delta T_{лок}$  и прироста температуры  $\Delta T_{X_i}$  этого участка, вызванного поглощением пространственной доли излучения от теплового объекта. Так как предполагается постоянство температур  $T_0$  и  $\Delta T_{лок}$ , при перемещении лазерного зонда вдоль полоски ее электрическое сопротивление будет промодулировано функцией пространственного температурного рельефа  $T=f(X)$ , а при подаче напряжения смещения на концах полоски появляется переменный электрический сигнал, огибающая которого повторяет пространственное распределение интенсивности регистрируемого излучения теплового объекта. Это равноценно последовательному опросу цепочки отдельных элементарных приемников.

В отличие от традиционных многоэлементных приемных устройств, где чувствительные элементы имеют четкие размеры и физически отделены друг от друга, в данном случае понятие “отдельный элемент” является условным. Однако, как показано экспериментально, для чувствительной области, выделенной на поверхности в.т.с.п.-полоски с помощью лазерного зонда, могут быть определены размеры и измерены ее характеристики чувствительности. Поэтому термин “многоэлементный приемник” относительно рассматриваемой в.т.с.п.-структуры является справедливым. Очевидно, что подобная сверхпроводниковая полоска может быть рассмотрена как линейка приемников, а структура в форме меандра – как двумерная матрица детекторов.

Важной особенностью предлагаемого подхода является существенное упрощение организации опроса отдельных элементов, так как для сопряжения приемной структуры и мультиплексора может использоваться только два электрических соединения. Также необходимо отметить значи-



**Рис. 2.** Блок-схема в.т.с.п.-преобразователя. 1 – и.к.-объектив; 2 – германиевый фильтр; 3 – в.т.с.п.-приемник в оптическом криостате; 4 – термостабилизатор; 5 – предварительный усилитель; 6 – синхронный детектор; 7 – аналого-цифровой преобразователь; 8 – подвижная платформа; 9 – источник локального теплового воздействия; 10 – шаговый двигатель горизонтальной развертки; 11 – шаговый двигатель вертикальной развертки; 12 – управляющий микропроцессор; 13 – параллельный интерфейс; 14 – персональный компьютер.

тельное упрощение технологии изготовления и, как следствие, повышение надежности.

Для исследования возможности практической реализации предложенного метода был разработан и изготовлен лабораторный макет в.т.с.п.-преобразователя и.к.-изображения. Блок-схема макета представлена на рис. 2.

В.т.с.п. фотоприемная структура 3 размещалась на охлаждаемой платформе в вакуумной части оптического азотного криостата. Температура охлаждаемой платформы регулировалась в диапазоне 80–90 К и стабилизировалась с точностью 0.005 К при помощи термостабилизатора 4. Входное окно оптического криостата было изготовлено из материала ZnS, что позволяло воздействовать на исследуемую приемную структуру как и.к.-излучением от регистрируемого теплового объекта, так и коммутирующим излучением видимого диапазона.

В качестве источника локального теплового воздействия использовался лазерный полупроводниковый диод 9 с длиной волны излучения 0.63 мкм и фиксированной мощностью 5 мВт. С помощью германиевого фильтра 2, расположенного под углом 45° к оптической оси системы и одновременно выполняющего функцию поворотного зеркала для коммутирующего излучения, лазерный луч попадал в оптический криостат через его входное окно и точно фокусировался на приемной плоскости в.т.с.п.-структуры, при этом длина освещаемой им области на поверхности сверхпроводниковой полоски составляла 10 мкм. Для уменьшения теплового растекания по приемной площадке лазерное излучение модулировалось с предварительно рассчитанной частотой 20 кГц, при которой диаметр теплового пятна от

лазерного зонда не превышал диаметр кружка рассеяния и.к.-объектива, а взаимное тепловое влияние соседних элементов при их опросе было сведено к минимуму.

Лазерный диод – источник локального теплового воздействия – располагался на подвижной платформе 8. Платформа имела возможность перемещаться в вертикальном и горизонтальном направлениях таким образом, что лазерный луч также перемещался по приемной поверхности в.т.с.п.-структуры, выделяя тем самым локальные чувствительные области на различных ее участках. Перемещения платформы в двух взаимно перпендикулярных направлениях осуществлялись при помощи шаговых двигателей ПБМГ-200-265 (10 и 11) с мгновенным углом поворота оси (шагом) 1.8°, что соответствовало перемещению на 8 мкм. Управление шаговыми двигателями осуществлялось от электронного блока на базе сигнального процессора ADSP-2181KS133 (12), представляющего собой 16-разрядный микропроцессор с высокой скоростью выполнения команд и развитым интерфейсом для подключения периферийных устройств.

Такая организация управления положением источника локального теплового воздействия позволила точно осуществлять пространственное выделение отдельных чувствительных областей на приемной плоскости исследуемой в.т.с.п.-структуры, а также гибко программировать любой закон сканирования. Лазерный луч источника локального теплового воздействия построчно перемещался по приемной плоскости с одинаковым шагом 8 мкм в вертикальном и горизонтальном направлениях, образуя прямоугольный растр форматом до 256 × 256 точек.

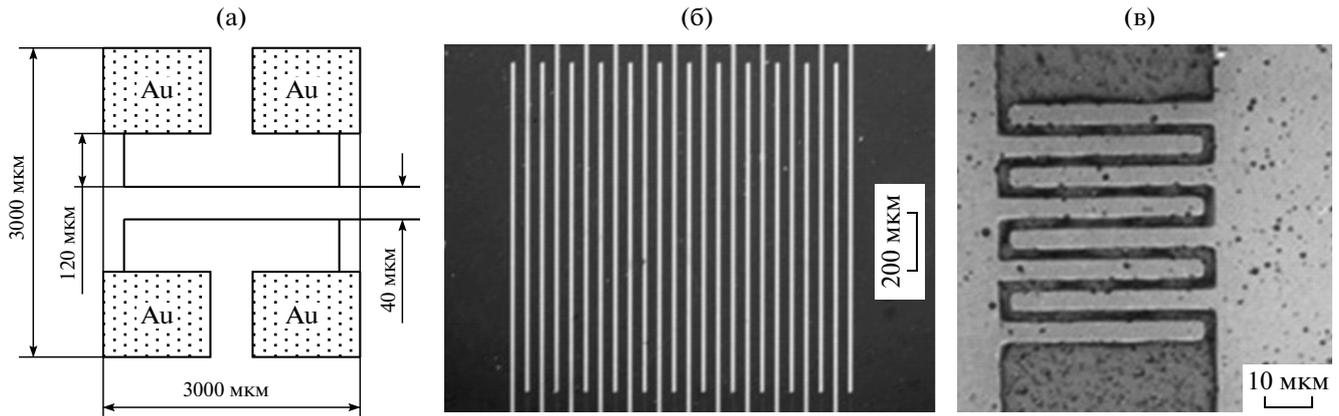


Рис. 3. Фоточувствительные элементы: а — эскиз геометрии в.т.с.п.-структуры, эквивалентной линейке детекторов; б — меандр, эквивалентный матрице детекторов; в — тестовый меандр.

В качестве тепловых источников использовались модель абсолютно черного тела (а.ч.т.), модулированное излучение которого фокусировалось на в.т.с.п.-структуру с помощью и.к.-объектива *I*, и второй лазерный диод с длиной волны 0.63 мкм, излучение которого, расфокусированное до диаметра поперечного сечения  $\approx 100$  мкм и ослабленное с помощью поляризационного фильтра, заводилось в криостат аналогично излучению коммутирующего лазера. Модуляция излучения а.ч.т. осуществлялась механическим модулятором в виде вращающегося диска с отверстиями. Частота вращения диска стабилизировалась с помощью электронного стабилизатора.

Инфракрасный германиевый объектив *I* представлял собой трехлинзовую оптическую систему с фокусным расстоянием 50 мм, относительным отверстием 1:0.85, коэффициентом пропускания и.к.-излучения  $\approx 0.95$  в спектральном диапазоне 1–18 мкм и минимальным кружком рассеяния в фокальной плоскости  $\approx 50$  мкм (что близко к теоретическому значению для данного спектрального диапазона).

Для усиления сигнала фотоотклика использовался малошумящий предварительный усилитель 5 на основе интегрального операционного усилителя AD797 с коэффициентом усиления 200 в полосе частот 200 Гц – 100 кГц. Приведенное ко входу напряжение собственных шумов предварительного усилителя не превышало 1 нВ/Гц<sup>1/2</sup>. Дальнейшее усиление и обработка сигнала фотоотклика осуществлялись при помощи синхронного детектора 6. При помощи 12-разрядного аналого-цифрового преобразователя 7 на основе интегральной схемы ADS7862 протектированный сигнал преобразовывался в цифровой код, дальнейшая обработка которого осуществлялась сигнальным процессором 12. Сигнальный процессор также осуществлял запись данных во внут-

ренний буфер и передачу информации в персональный компьютер 14.

Разработанное для дальнейшей обработки сигнала программное обеспечение имело большой набор функций, позволяющих выводить в удобной графической форме на экран монитора двумерное изображение исследуемой в.т.с.п.-структуры с использованием цветовой палитры, отражающей интенсивность регистрируемого сигнала. Программное обеспечение позволяло также осуществлять цифровую фильтрацию изображения, изменение яркости и контрастности изображения, вычитание уровня постоянного фона, построение профилей интенсивности регистрируемого сигнала в любом направлении, запись информации в графических форматах, совместимых со стандартными пакетами обработки цифровых изображений и др.

В качестве фоточувствительных элементов использовались 2 варианта планарных в.т.с.п.-структур, топология и размер которых представлены на рис. 3а и 3б соответственно: полоска длиной 3 мм и шириной 40 мкм — аналог линейки детекторов, и меандр площадью  $1.5 \times 1.5$  мм<sup>2</sup> (23 в.т.с.п.-полоски шириной 50 и длиной 1500 мкм с зазором между ними 10 мкм) — аналог матрицы детекторов. Обе геометрии в.т.с.п.-микроструктур были сформированы с использованием электронно-лучевой литографии и химического травления [12] на основе эпитаксиальных пленок с осью *C*, перпендикулярной подложке, — пленок  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  толщиной 200 нм на подложках  $\text{SrTiO}_3$  или  $\text{LaAlO}_3$  толщиной 500 мкм.

Для отработки и оптимизации используемых технологических процессов изготовления пленок и формирования геометрических структур предварительно была изготовлена серия тестовых в.т.с.п.-образцов с геометрией в виде полоски шириной 3 мкм, свернутой в меандр площадью  $50 \times 50$  мкм<sup>2</sup> (рис. 3в). Измерения характеристик тестовых об-

разцов показали, что применяемые технологические процессы могут быть основой для создания многоэлементных болометрических детекторов, так как не приводят к деградации сверхпроводящих свойств пленок, обеспечивают высокую точность формирования геометрии и повторяемость параметров изготовленных структур.

Так как в используемом нами макете мощность излучения источника локального теплового воздействия имела фиксированное значение, максимальное значение сигнала фотоотклика выделенной области достигалось выбором начальной температуры  $T_0$  всего образца. Эта температура предварительно определялась экспериментально по величине фотоотклика на излучение от внешнего источника.

На рис. 4 представлены изображения в.т.с.п.-полоски, на которую падает расфокусированный ослабленный луч второго лазерного диода. Видно, что при перемещении локального теплового воздействия вдоль сверхпроводниковой полоски вследствие последовательного перехода ее участков в резистивное состояние происходит проявление температурного рельефа, созданного внешним излучением.

Для получения качественного изображения (максимальный фотоотклик опрашиваемого участка при нахождении остальной части полоски в сверхпроводящем состоянии) при заданных параметрах лазерного зонда оптимальная температура данной в.т.с.п.-структуры составляет 86.6 К. При дальнейшем увеличении температуры вся полоска переходит в резистивное состояние, а отклик опрашиваемого участка падает (крутизна сопротивления  $dR/dT$ , пройдя через максимум, убывает).

Для измерения параметров отдельных элементов аналога матрицы детекторов были оценены размеры формируемых локальных чувствительных областей. При заданных параметрах лазерного зонда (диаметр луча, мощность, частота модуляции) эти размеры определяются процессами растекания по приемной площадке в.т.с.п.-структуры температурного рельефа, формируемого при поглощении излучения, и зависят от тепловых свойств материалов пленки и подложки (теплопроводность, теплоемкость, коэффициент поглощения и др.) и теплового дизайна в.т.с.п.-структур.

Площадь одиночного чувствительного элемента определялась экспериментально по пространственному распределению напряжения фотоотклика при детектировании модулированного излучения теплового источника с известными размерами (а.ч.т. с калиброванной диафрагмой на выходе полости). Поскольку использованный и.к.-объектив обеспечивал наименьший кружок рассеяния  $\varnothing 50$  мкм, диаметр отверстия диафрагмы также выбирался равным 50 мкм.

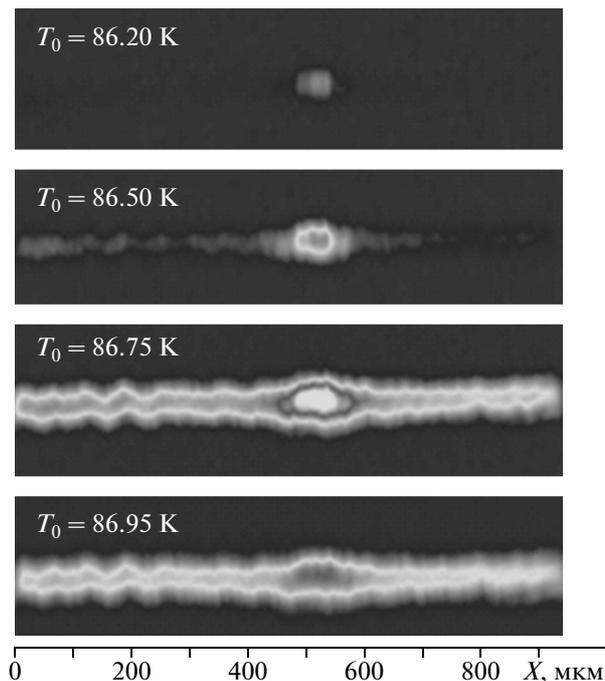
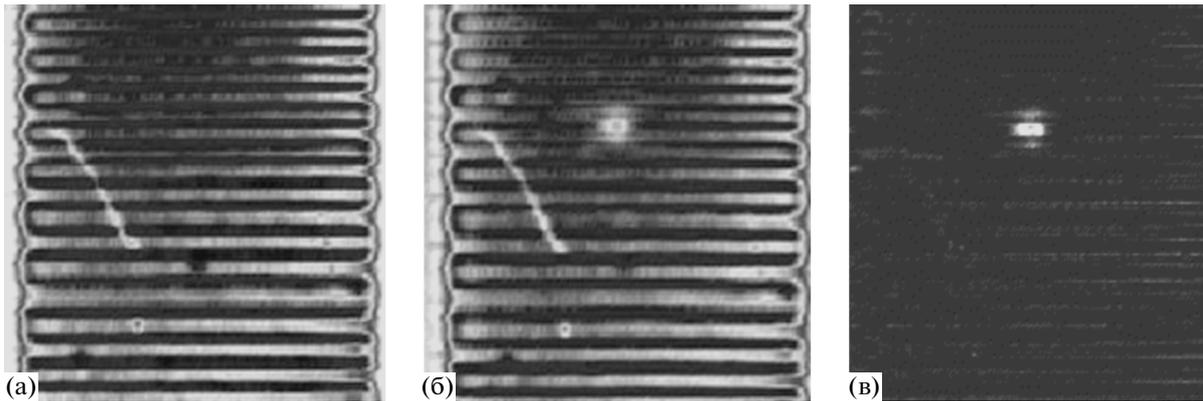


Рис. 4. Зависимость амплитуды фотоотклика выделенной чувствительной области от температуры в.т.с.п.-структуры.

Диафрагма а.ч.т. располагалась на оптической оси перед и.к.-объективом на расстоянии заднего фокуса объектива. В этом случае размер изображения диафрагмы, сфокусированного на произвольном участке одной из полосок в.т.с.п.-меандра, также составлял 50 мкм. Сканирование в.т.с.п.-структуры источником локального теплового воздействия осуществлялось с шагом 8 мкм. Измеренный в результате синхронного детектирования фотоотклика на частоте модуляции коммутирующего излучения диаметр теплового пятна от излучения а.ч.т. составил  $L \approx 95$  мкм (по уровню 0.37).

Таким образом, можно считать, что площадь чувствительного элемента, определяемая параметрами лазерного зонда, длиной тепловой диффузии, aberrациями и дифракцией оптической системы, в данном случае составляет  $A \approx 95 \times 95$  мкм<sup>2</sup> (для упрощения считаем, что элемент имеет форму квадрата). Так как приемные элементы должны располагаться на расстоянии друг от друга не меньше  $L$ , можно сделать вывод о том, что рассмотренная в.т.с.п. болометрическая структура в виде меандра (рис. 3б) эквивалентна матрице детекторов форматом  $12 \times 14$  элементов.

При измерении вольт-ваттной чувствительности отдельных элементов аналога матрицы детекторов интенсивность излучения а.ч.т. модулировалась с частотой 300 Гц. Вся в.т.с.п.-структура находилась в сверхпроводящем состоянии при температуре, соответствующей максимальной амплитуде фото-



**Рис. 5.** Изображение теплового источника, полученного в.т.с.п.-детектором (меандром) с опросом элементов локальным тепловым воздействием: **а** – фон (видны дефекты и разброс чувствительности в.т.с.п.-структуры); **б** – и.к.-изображение теплового источника; **в** – и.к.-изображение теплового источника при вычитанном фоне.

отклика отдельных элементов. Лазерный луч локального теплового воздействия позиционировался на поверхность полосок в.т.с.п.-меандра с шагом  $\approx 100$  мкм. Синхронное детектирование сигнала осуществлялось на частоте модуляции а.ч.т.

В каждой точке измерялось напряжение сигнала фотоотклика и определялось значение вольтваттной чувствительности опрашиваемого элемента. При размере единичного чувствительного элемента  $95 \times 95$  мкм<sup>2</sup> средняя по элементам вольтваттная чувствительность составила  $S = 20$  В/Вт.

Для определения обнаружительной способности и мощности, эквивалентной шуму, отдельных элементов матрицы были проведены измерения шумового напряжения исследуемой в.т.с.п.-структуры в полосе частот 200 Гц–20 кГц, а также его отдельных спектральных составляющих на частотах 200 и 500 Гц, 1 и 20 кГц. Было выявлено, что преобладающими в исследуемой структуре являются флуктуации напряжения, соответствующие избыточному шуму, которые и определяют минимальную детектируемую мощность регистрируемого излучения. Также был оценен поэлементный разброс обнаружительной способности ( $\approx 22\%$ ), обусловленный дефектами пленки и неоднородностью отведения тепла в теплосток.

При площади чувствительного элемента  $95 \times 95$  мкм<sup>2</sup> были получены следующие средние параметры элемента аналога в.т.с.п.-матрицы: вольтваттная чувствительность  $S = 20$  В/Вт; мощность, эквивалентная шуму,  $NEP = 7.5 \cdot 10^{-11}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup>; обнаружительная способность  $D^* = 1.3 \cdot 10^8$  см $\cdot$ Гц<sup>1/2</sup>/Вт; постоянная времени  $\tau = 6$  мс.

С помощью набора германиевых дисперсионных фильтров также были проведены исследования чувствительности одного из элементов меандра в спектральных диапазонах 3–5, 8–12 мкм и 1–18 мкм [13]. В исследуемых спектральных диапазонах были выявлены изменения чувстви-

тельности, не превышающие 20%, что подтверждает болометрическую природу отклика и принципиальную возможность создания неселективных болометрических детекторов на основе в.т.с.п.

Для иллюстрации на рис. 5б представлен фрагмент полученной на макете преобразователя термограммы меандра с изображением теплового объекта  $\varnothing 50$  мкм (диафрагмы а.ч.т.). Как видно по фоновой термограмме меандра (рис. 5а), используемая в.т.с.п.-пленка имеет точечные и протяженные технологические дефекты и неоднородный тепловой контакт подложки с охлаждающей платформой (более низкая температура в верхней центральной части). Термограмма на рис. 5в получена путем вычитания фона.

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о принципиальной возможности использования предложенного подхода для организации поэлементного считывания информации при создании многоэлементных и.к.-детекторов на основе в.т.с.п. Учитывая тот факт, что именно проблема мультиплексирования отдельных элементов на сегодняшний день остается основным сдерживающим фактором развития в.т.с.п.-фотоэлектроники, рассмотренный метод может стать основой для построения широкоформатных приемных систем на основе в.т.с.п.

Полученные сравнительно невысокие параметры: размер сформированного элемента  $L \approx 95$  мкм, обнаружительная способность  $D^* = 1.3 \cdot 10^8$  см $\cdot$ Гц<sup>1/2</sup>/Вт и поэлементный разброс чувствительности  $\approx 22\%$  обусловлены не принципиальными ограничениями метода, а связаны с качеством используемых пленок (наличием избыточных шумов и др.) и геометрией изготовленных структур. Улучшение параметров преобразователя может быть достигнуто за счет совершенствования технологии изготовления в.т.с.п. приемных структур и оптимизации теплового дизайна приемника (оптимизации размеров пленочных структур и

подложки, использования поглощающих покрытий, разделения функций чувствительных и приемных элементов [14], добавления микроантенн и др.).

Работа выполнена в рамках бюджетного финансирования НАН Украины и является продолжением работ, проводимых в Физико-техническом институте низких температур НАН Украины и Аргоннской национальной лаборатории (США).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Berkowitz S.J., Hirahara A.S., Char K., Grossman E.N. // Appl. Phys. Lett. 1996. V. 69. № 14. P. 2125.
2. Богомолов П.А., Сидоров В.И., Усольцев И.Ф. Приемные устройства ИК-систем. М.: Радио и связь, 1987. С.24.
3. Sánchez S., Elwenspoek M., Gui C. et al. // J. Microelectromechanical Syst. 1998. V. 7. № 1. P. 62.
4. Nivelle M.J., Bruijn M.P., Korte P.A.J. et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 1999. V. 9. P. 3350.
5. Neff H., Khrebtov I.A., Tkachenko A.D. et al. // Thin Solid Films. 1998. V. 324. P. 230.
6. McDonald D.J., Phelan R.J., Vale L.R. et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 1997. V. 7. P. 3091.
7. Lee A.T., Gildemeister J.M., Richards P.L. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 1997. V. 7. P. 2378.
8. Jenks W., Thomas I., Wikswo J. // SQUIDS. Encyclopedia of Applied Physics. 1997. V. 19. P. 457.
9. Yefremenko V., Gordiyenko E., Shustakova G. et al. // Proc. SPIE. 2005. V. 5783. P. 967.
10. Yefremenko V., Gordiyenko E., Pishko V. et al. US Patent 7,274,019 B2. 25 Sept. 2007; <http://patft.uspto.gov>.
11. Гордиенко Э.Ю., Ефременко В.Г., Слипченко Н.И., Пишко В.В. // Радиотехника. 2004. № 139. С.120.
12. Гордиенко Э.Ю., Ефременко В.Г., Новосад В.А. // Технологии приборостроения. 2003. № 1. С.15.
13. Yefremenko V., Gordiyenko E., Shustakova G. et al. // J. Phys.: Conference Series. 2006. V. 43. P. 1342.
14. Гордиенко Э.Ю., Слипченко Н.И., Гарбуз А.С. // Радиоэлектроника и информатика. 2002. № 3. С.38.