

## ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЙ БОЛОМЕТРИЧЕСКИЙ ПРИЕМНИК С ОПТОЭЛЕКТРОННЫМ СКАНИРОВАНИЕМ

**Введение.** Открытие явления высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП) дает возможность построения чувствительных болометрических приемников азотного уровня охлаждения для детектирования излучения инфракрасной и миллиметровой областей спектра. Фотонные ИК детекторы, такие как фоторезисторы и фотодиоды на основе HgCdTe, работающие при температуре 77 К, демонстрируют исключительно высокие параметры для длин волн, меньших 20 мкм. На длинах волн свыше 20 мкм полупроводниковые детекторы имеют слабую чувствительность, сравнимую с чувствительностью пирозлектрических приемников, работающих без охлаждения ( $NEP \approx 5 \cdot 10^{-10} \text{ Вм/Гц}^{1/2}$ ) [1]. Экспериментально достигнутое значение оптической эквивалентной мощности шума  $NEP \approx 6.3 \cdot 10^{-13} \text{ Вм/Гц}^{1/2}$  в спектральном диапазоне 12 – 36 мкм для ВТСП болометров [2] более чем в 100 раз ниже, чем у коммерческих неохлаждаемых пирозлектрических детекторов соответствующего спектрального диапазона, что иллюстрирует преимущество использования болометров азотного уровня охлаждения.

Изучению и оптимизации режима работы высокотемпературных сверхпроводниковых болометрических детекторов было посвящено большое количество экспериментальных работ [3], на основании которых можно сделать вывод, что на сегодняшний день одиночные ВТСП болометры в средней и длинноволновой ИК областях по чувствительности составляют конкуренцию традиционным охлаждаемым фотонным детекторам. Тем не менее, практические задачи современной науки и техники, связанные с исследованием земной атмосферы и космического пространства, прикладные задачи астрономии, геологии, медицины, физики и т.д. требуют не только регистрации слабого излучения в ИК области, но и визуализации полей интенсивности этого излучения с высоким пространственным разрешением. Одноэлементные детекторы с механическим сканированием слишком медленны и громоздки для решения таких задач. Разработка же ВТСП болометрических матриц продолжает находиться на начальном уровне, т.к., несмотря на то, что механизмы детектирования излучения в таких приемниках подобны механизмам в одиночных чувствительных элементах, многие вопросы остаются нерешенными. При создании охлаждаемых матричных приемников необходимо комплексное решение проблем реализации высокой чувствительности, быстродействия и организации коммутации и считывания сигнала. В немногочисленных работах, посвященных разработке многоэлементных ВТСП детекторов, рассматривается практическая реализация устройств, состоящих лишь из нескольких элементов и не имеющих схемы считывания сигнала, пригодной для построения завершенных мультidetекторных систем [4 – 6]. Таким образом, до настоящего времени технологические трудности не позволили реализовать преобразователи ИК изображения на основе ВТСП.

**Постановка задачи.** Исследования детектирующих свойств высокотемпературных сверхпроводников с различным фазовым составом пленок показали, что фотоотклик в этих материалах определяется несколькими физическими механизмами как медленными, так и быстрыми. Медленные (или болометрические) составляющие отклика связаны с тепловыми процессами. При взаимодействии с излучением нормальные электроны переходят на более высокий энергетический уровень, а затем рассеивают эту энергию в столкновениях, разогревая кристаллическую решетку. Как правило, наблюдаемые при этом времена релаксации не превышают 1 мкс. Возможна и другая ситуация, объясняемая неравновесными процессами в электронной подсистеме. Рассматриваемые при этом разогрев электронного газа относительно кристаллической решетки и подавление параметра порядка в сверхпроводящей структуре позволяют ожидать быстродействие вплоть до пикосекунд [7]. Для неоднородных сверхпро-

водниковых пленок обсуждаются также механизмы джозефсоновского детектирования [8]. Практически каждый из указанных механизмов может быть использован при создании ИК детекторов. Однако, с точки зрения практического применения, наиболее перспективным представляется болометрический принцип детектирования, так как диапазон спектральной чувствительности тепловых приемников принципиально не ограничен, а амплитуда теплового отклика, как правило, значительно преобладает над другими составляющими [7]. Особенностью болометрического приема является чрезвычайно сильная зависимость амплитуды фотоотклика от таких параметров, как температура, ток смещения, уровень внешнего фона, величина магнитного поля [1]. Это обстоятельство позволяет предположить возможность возбуждения в сверхпроводниковой пленке локальной чувствительной области с помощью внешнего воздействия. В общем случае сверхпроводниковая пленка может включать в себя сверхпроводящие, нормальные и участки, находящиеся в резистивном состоянии. Максимальный фотоотклик, обусловленный тепловым механизмом детектирования, реализуется

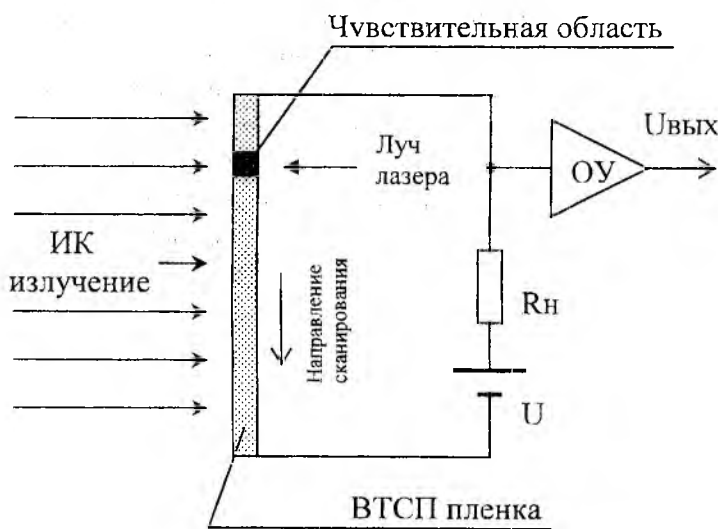


Рис. 1

Вследствие поглощения лазерного излучения происходит локальный нагрев участка пленки и переход этой области в резистивное состояние, где существует сильная температурная зависимость сопротивления. Изменение интенсивности лазерного излучения позволяет регулировать температуру локального нагрева и, следовательно, добиваться оптимального отклика чувствительной области. При перемещении лазерного луча вдоль ВТСП полосы одновременно происходит перемещение чувствительной области. Смещение всего образца постоянным током осуществляется через нагрузочное сопротивление  $R_n$  от источника напряжения  $U$ . Поскольку вследствие поглощения внешнего ИК излучения на ВТСП полоске существует температурный рельеф, а интенсивность локального теплового воздействия всегда постоянна, при перемещении чувствительной области на выходе усилителя  $OU$  будет наблюдаться переменный электрический сигнал, мгновенная амплитуда которого пропорциональна пространственному распределению интенсивности этого излучения. Это эквивалентно последовательному опросу цепочки элементарных приемников с размером, определяемым диаметром лазерного пучка и длиной тепловой диффузии. Очевидно, что конфигурация образца может быть произвольной. Например, ВТСП структура в форме меандра эквивалентна двумерной матрице детекторов. Таким образом, управление зоной аномальной чувствительности, в частности, ее перемещение, может стать основой создания новых многоэлементных

именно в области сверхпроводящего перехода (в резистивном состоянии). Очевидно, что воздействие на пленку, находящуюся в сверхпроводящем состоянии, внешним тепловым или магнитным полем в локальных точках может приводить к возникновению в этих областях резистивных участков с аномально высокой чувствительностью к внешнему излучению.

В настоящей работе рассмотрена возможность формирования чувствительных элементов с помощью локального теплового воздействия (рис. 1), создаваемого посредством лазерного луча, сфокусированного на поверхности узкой полоски ВТСП пленки, имеющей температуру ниже критической и находящейся в сверхпроводящем состоянии.

боллометрических приемников с электронным сканированием. Преимуществом таких приборов является существенное упрощение технологии изготовления и, как следствие, увеличение надежности и повторяемости характеристик.

**Экспериментальная часть и обсуждение результатов.** Экспериментальный образец был изготовлен из эпитаксиальной YBaCuO ВТСП пленки толщиной 200 нм, напыленной методом лазерного испарения на подложку из LaAlO<sub>3</sub> толщиной 500 мкм. Геометрия образца - полоска размером 3000 x 40 мкм (рис. 2), создавалась с помощью электроннолучевой литографии и последующего химического травления в 1% растворе H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>. С каждой стороны

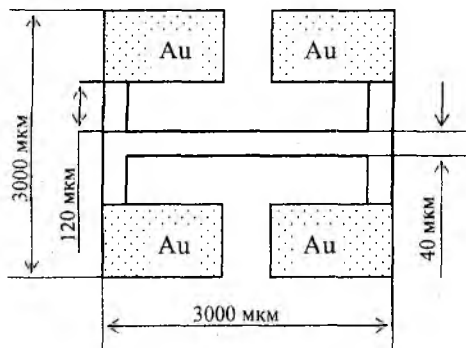


Рис.2.

полоска была снабжена токовыми и потенциальными контактами, покрытыми золотом толщиной 1 мкм магнитронным распылением через маску. Образец размещался в вакуумной части оптического азотного криостата на медной платформе, имеющей постоянную времени  $\approx 5$  с. Температура платформы регулировалась в диапазоне 80 – 95 К и стабилизировалась с точностью 0,005 К с помощью термостабилизатора. Контроль температуры осуществлялся с помощью полупроводникового термометра, закрепленного в непосредственной близости от образца. Криостат был снаб-

жен входным окном из ZnS, что позволяло воздействовать на образец излучением видимого и ИК диапазонов.

Измерения температурной зависимости сопротивления при транспортном токе 1,3 мА показали, что критическая температура образца  $T_0$  равна 87 К (рис. 3). Для исключения влияния сопротивления контактов измерения производились по четырехпроводной схеме. Ширина сверхпроводящего перехода составляла 1 К, а максимум крутизны температурной зависимости сопротивления  $\alpha = dR/dT$ , равной 286 Ом/К, реализовывался при температуре 87,4 К, что соответствовало сопротивлению образца 60 Ом. Для осуществления локального теплового воздействия на сверхпроводниковую пленку и, следовательно, пространственного выделения чувствительной области использовался лазерный полупроводниковый диод с длиной волны излучения 0,63 мкм и мощностью 5 мВт. Лазерный луч в поперечном сечении имел прямоугольную форму и точно фокусировался с помощью оптической системы на произвольном участке ВТСП полоски таким образом, что освещаемая им область имела линейные размеры 40 x 10 мкм. В исходном состоянии образец с транспортным током 1,3 мА охлаждался до температуры ниже критической ( $\approx 80$  К) и медленно нагревался до 90 К при помощи нагревателя, закрепленного на медной платформе. С помощью модуляции интенсивности лазерного излучения с частотой 1 Гц по четырехпроводной схеме одновременно измерялось сопротивление образца с локальным тепловым

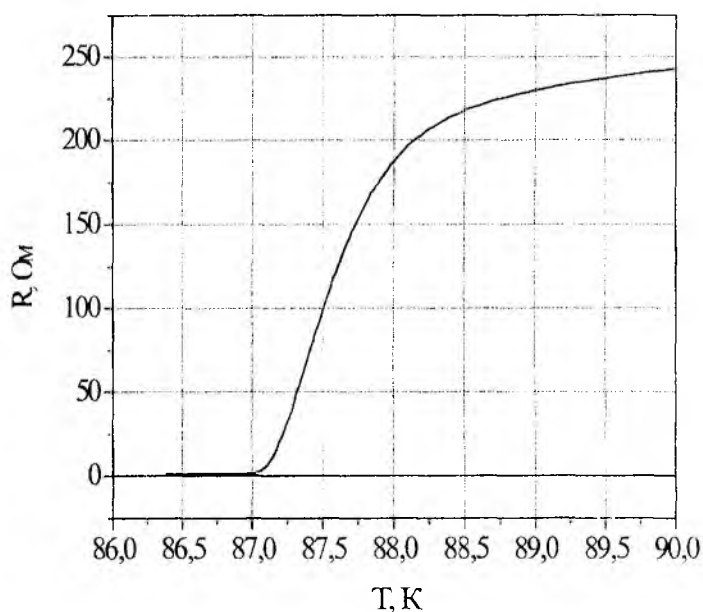


Рис. 3

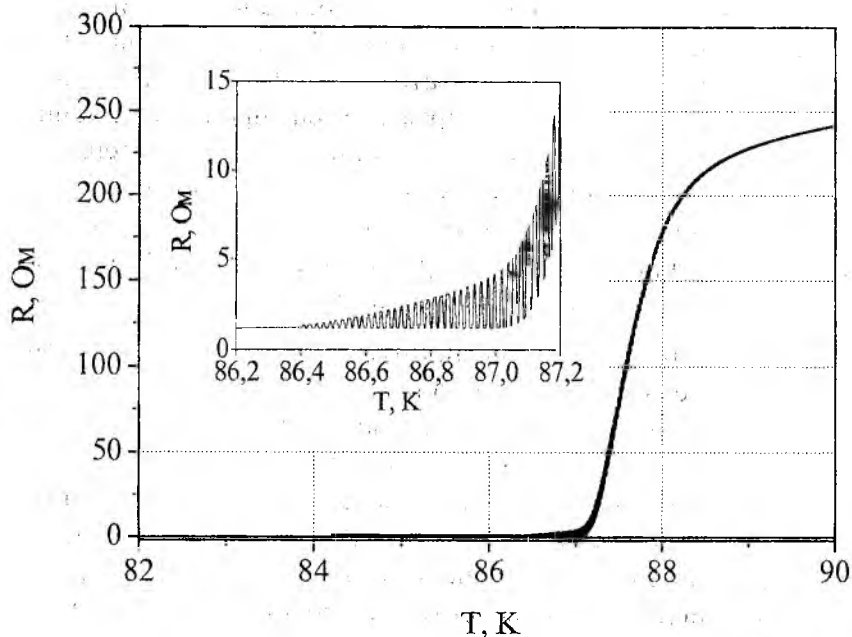


Рис. 4

воздействием и без него (рис. 4). Измерения осуществлялись с использованием стандартных мультиметров и контролировались при помощи персонального компьютера через LabView интерфейс.

Как видно на рис. 4, появление электрического сопротивления исследуемого образца, вызванное переходом небольшой локальной области в резистивное состояние при воздействии лазерного излучения, происходит при температуре 86,3 K. Учитывая тот факт, что критическая температура образца равна 87 K, можно сделать вывод, что в данном случае лазерный луч создает перегрев локальной области ВТСП полоски на 0,7 K. Из рис. 4 также видно, что температурная зависимость сопротивления всего образца в диапазоне температур 86,3 – 87 K определяется только сверхпроводящим переходом небольшого участка, подверженного локальному тепловому воздействию. В связи с тем, что оставшаяся часть полоски находится в сверхпроводящем состоянии и не имеет температурной зависимости сопротивления, чувствительной к внешнему излучению будет только выделенная область. По всей видимости, размер этой области может быть оценен по величине сопротивлений образца с локальным тепловым воздействием и без него. Мы предположили, что ход температурной зависимости сопротивления ВТСП полоски в целом и отдельных ее участков одинаков. Для расчетов использовались значения сопротивлений в точках с максимальной крутизной этих зависимостей (1,2 Ом при  $T = 86,7 K$  и 60 Ом при  $T = 87,4 K$  для образца с локальным тепловым воздействием и без него, соответственно). Так как сопротивление локальной выделенной области в 50 раз меньше общего сопротивления полоски, то во столько же раз будет меньшей и его длина. Учитывая, что общая длина ВТСП полоски равна 3000 мкм, размер выделенной области равен 60 x 40 мкм. Очевидно, что такой локальный чувствительный элемент может быть образован на любом участке полоски путем перемещения лазерного луча. Для иллюстрации такой возможности было проведено измерение пространственного распределения интенсивности излучения лазерного луча в поперечном сечении. С этой целью расфокусированное излучение по-

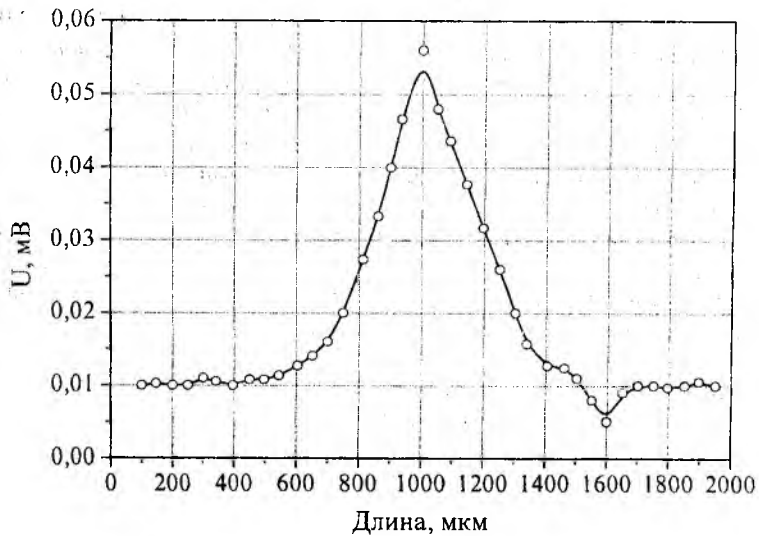


Рис. 5

лупроводникового лазерного диода подавалось через входное окно оптического криостата и освещало часть ВТСП полоски, создавая на ее поверхности слабый пространственный температурный рельеф, отражающий распределение интенсивности вдоль лазерного пятна. Мощность излучения ослаблялась при помощи оптического поляризатора. ВТСП образец находился в сверхпроводящем состоянии при температуре 86,7 К, которая стабилизировалась с точностью 0,005 К. Другой полупроводниковый лазерный диод, создающий локальное тепловое воздействие и формирующий чувствительную область, перемещался вдоль полоски с шагом 50 мкм. Интенсивность его излучения модулировалась с частотой 10 Гц. Сигнал фотоотклика снимался со всего образца и регистрировался при помощи синхронного детектора. Результаты измерений амплитуды отклика вдоль ВТСП полоски показаны на рис. 5.

**Выводы.** Таким образом, предложенный метод формирования чувствительной к внешнему излучению области в ВТСП структурах может стать основой для создания мультиспектральных многоэлементных болометрических детекторов. Преимуществом метода является существенное упрощение технологии изготовления детекторов, а также решение вопроса коммутации отдельных элементов, который до настоящего времени остается нерешенным. При помощи внешнего теплового воздействия на YBaCuO полоске 3000 x 40 мкм сформирована локальная чувствительная область размером 60 x 40 мкм. Экспериментально показано, что перемещение чувствительной области вдоль полоски эквивалентно последовательному опросу цепочки отдельных элементов линейки детекторов.

Авторы выражают благодарность канд. физ.-мат. наук В. А. Новосаду, Аргонская национальная лаборатория, США, за полезные замечания. Работа в Аргонской национальной лаборатории была поддержана через программу BES (Basic Energy Science, U.S. Department of Energy), контракт No. W-31-109-ENG-38.

**Список литературы:** 1. *Richards P.L.* Bolometers for infrared and millimeter waves // *J. Appl. Phys.* 1994. V. 76. N 1. P. 1-24. 2. *Berkowitz S.J., Hirahara A.S., Char K., Grossman E.N.* Low noise high-temperature superconducting bolometers for infrared imaging // *Appl. Phys. Lett.* 1996. V. 69. N 14. P. 2125-2127. 3. *Kreisler A.J., Gaugue A.* Recent progress in high-temperature superconductor bolometric detectors: from the mid-infrared to the far-infrared range // *Supercond. Sci. Technol.* 2000. V. 13. P. 1235-1245. 4. *Delerue J., Gaugue A., Teste P., Garistan E., Klisnik G., Redon M., Kreisler A.* YBCO Mid-infrared bolometer arrays // *IEEE Transactions on Applied superconductivity.* 2003. V. 13. N 2. P. 176-179. 5. *Johnson B., Ohnstein T., Han C.* YBaCuO superconductor microbolometer arrays fabricated by silicon micromachining // *IEEE Transactions on Applied superconductivity.* 1993. V. 3, N 4. P. 2856-2859. 6. *Mai Z., Zhou X., Song W.* Infrared radiation detector linear arrays of high-Tc superconducting thin films // *Infrared Phys. Technol.* 1997. V. 38. P. 13-16. 7. *Аксаев З.Е., Гершензон Е.М., Гольцман Г.Н.* Механизмы детектирования электромагнитного излучения в пленках YBaCuO // *СФХТ.* 1990. № 8. С. 1933-1947. 8. *Дмитренко И.М., Журавель А.П., Сиваков А.Г. и др.* Пространственное разделение областей с болометрической и неболометрической компонентами отклика пленок ВТСП методом низкотемпературной лазерной сканирующей микроскопии // *Физика низких температур.* 1993. Т. 19. № 10. С. 1055-1064.

Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 26.05.2004