

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЕ МИКРОТЕРМОМЕТРЫ ДЛЯ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ ПРИЕМНИКОВ ИК ИЗЛУЧЕНИЯ

ГОРДИЕНКО Э.Ю., СЛИПЧЕНКО Н.И.,
ГАРБУЗ А.С.

Показывается возможность создания высокотемпературных сверхпроводниковых (ВТСП) многоэлементных приемников ИК излучения с использованием поглощающих свойств подложки и чувствительных микротермометров. Для билинейки 2x16 элементов получены значения обнаружительной способности $10^9 \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} / \text{Вт}$ при разбросе 22%. Определены ограничения, накладываемые на геометрические размеры микротермометров.

1. Введение

С момента открытия ВТСП в 1986 году многие лаборатории и фирмы [1,2] изучают возможность использования этих материалов для создания детекторов инфракрасного диапазона. Актуальность этих работ объясняется, во-первых, отсутствием высокочувствительных приемников излучения азотного уровня охлаждения в диапазоне длин волн, превышающем 20 мкм, во-вторых, успехами в области детектирования длинноволнового ИК излучения, достигнутыми при использовании низкотемпературных сверхпроводников [3].

Исследования детектирующих свойств ВТСП структур с различным фазовым составом пленок показали, что физической основой создания высокочувствительных конкурентоспособных элементов, обеспечивающих регистрацию излучения в широком спектральном диапазоне, может стать тепловой механизм детектирования [4,5].

В известных разработках болометрических приемников, пригодных к интегральному исполнению, использованы мембранные конструкции на кремниевой основе. В этом случае предполагается обеспечение высокой чувствительности путем уменьшения тепловой связи элемента с окружающей средой, а вопросы коммутации сигнала решаются традиционно с помощью ПЗС структур, сформированных на кремниевой подложке [6,7].

Однако достичь серьезных успехов в построении преобразователей изображения, которые могли бы кардинально снизить стоимость ИК систем, повысить качество и расширить их функциональные возможности, пока не удалось. Это связано с характерными для мембранных конструкций трудностями обеспечения надежности и воспроизводимости характеристик элементов массива в сочетании с высокой детектирующей способностью.

Для решения этих проблем в данной работе предложен другой подход. Проведены эксперименталь-

ные исследования обнаружительной способности и разброса чувствительности многоэлементного приемника излучения формата 2x16, в котором функции чувствительного и приемного элементов разделены. Чувствительным элементом служит пленочный микротермометр, а приемным, или поглощающим, сама подложка. При этом появляется возможность оптимизировать противоречивые требования к конструкции и технологии изготовления детекторов. Уменьшение тепловой связи в этом случае достигается за счет уменьшения линейных размеров микротермометров и использования подложки SrTiO_3 , обладающей низкой теплопроводностью. Существенным преимуществом является также то, что данная подложка позволяет выращивать наиболее кристаллографически совершенные пленки и обеспечивает эффективное поглощение излучения в окне прозрачности атмосферы 8-14 мкм.

2. Исследуемые образцы

Работа проводилась в два этапа. На первом этапе из пленок $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ толщиной 0,1-0,3 мкм на подложке из SrTiO_3 , полученных методами лазерного и ВЧ-катодного распыления, с помощью фотолитографии формировались полоски размером 50x1000 мкм с токовыми и потенциальными контактами. При выборе технологий изготовления принимался во внимание тот факт, что электрические шумы в ВТСП пленках уменьшаются при упорядочении их кристаллической структуры. Поэтому рассматривались образцы, близкие к монокристаллическим, с преимущественной параллельной и перпендикулярной ориентацией оси с относительно подложки.

Для выращивания с-параллельных пленок использовалась двухстадийная схема — при условиях, близких к неравновесным, напылялись аморфные пленки стехиометрического состава по металлам методами ВЧ-катодного распыления с последующим высокотемпературным отжигом (*ex situ*). Для с-перпендикулярных пленок был реализован прямой синтез ВТСП соединения из потока материала мишени, создаваемого при импульсном лазерном испарении (*in situ*).

Для полученных образцов измерялись температурные зависимости сопротивления и шумового напряжения.

На втором этапе из того же материала изготавливался многоэлементный приемник ИК излучения и исследовались детектирующие свойства каждого элемента.

Геометрия чувствительных элементов — микротермометров формировалась методами фотолитографии. На рис. 1 представлен фрагмент билинейки 2x16 элементов. На подложке SrTiO_3 толщиной 300 мкм размещаются $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ пленочные элементы толщиной 0,1, длиной 30 и шириной 10 мкм. Концы чувствительных элементов снабжены более широкими (30 мкм) токоподводящими проводниками из того же материала длиной 200 мкм,

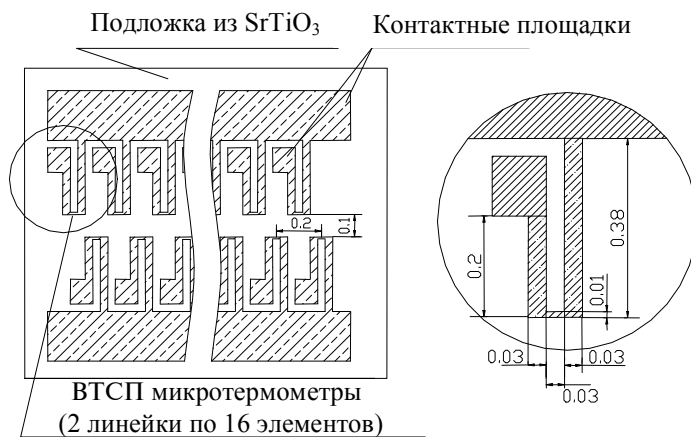


Рис. 1. Фрагмент билинейки 2x16 ВТСП микротермометров

заканчивающимися контактными площадками. Длина проводников превышает длину тепловой волны и, таким образом, возможный разогрев в области контактных площадок не влияет на температуру чувствительных элементов. Расстояние между микротермометрами обеспечивает тепловую развязку.

Образцы устанавливались в вакуумной части оптического криостата на тепловой платформе, имеющей постоянную времени 30 секунд. Температура платформы регулировалась в диапазоне 77–100 К и стабилизировалась с точностью 0.01 К. Входное окно криостата выполнено из KRS-5. Холодная диафрагма перед образцом обеспечивала требуемое поле зрения при минимуме фона.

3. Техника эксперимента

На первом этапе четырехзондовым методом проводились измерения температурной зависимости сопротивления ВТСП образцов при заданном токе 100 мкА и среднеквадратичного значения шумового напряжения при токе 100 мкА, 1 и 2,5 мА. Дальнейшее увеличение рабочего тока ограничивалось вследствие тепловой неустойчивости и возникающего температурного дрейфа. На втором этапе определялась обнаружительная способность каждого чувствительного элемента билинейки, для чего измерялись температурные зависимости фототклика на модулированный поток излучения и спектральная плотность шума микротермометров при максимальном (2,5 мА) токе смещения.

В качестве источника излучения прокалиброванного в единицах энергетической яркости использовалась модель абсолютно черного тела, имеющая фиксированные поддерживаемые температуры 400 и 500 К. Для модуляции потока излучения с частотами в диапазоне 5–2000 Гц применялся механический обтюратор. С помощью калиброванных диафрагм, расположенных в плоскости излучателя перед модулятором, создавалась облученность в плоскости образца 10^{-1} – 10^{-6} Вт/см². При оценке вольт-ваттной чувствительности непосредственно перед образцом устанавливалась диафрагма диаметром 100 мкм, имеющая азотную температуру. Диаметр диафрагмы определял эффективную площадь детектора.

Контроль входного сигнала осуществлялся с помощью эталонного пироэлектрического приемника с равномерной спектральной чувствительностью в диапазоне 2–15 мкм. Для измерения параметров фототклика, шумовых характеристик ВТСП образцов и микротермометров билинейки использовалась автоматизированная измерительная система на базе селективного нановольтметра “Unipan 232В” и анализатора формы сигнала “Philips PM3360”. Система позволяла проводить измерения параметров сигнала, шумового напряжения, спектра шума и обладала следующими характеристиками: шумовое напряжение измерительной системы, приведенное ко входу, не более 3 нВ/Гц^{1/2}; нижняя частота анализируемого сигнала $f_n=1,5$ Гц; верхняя частота анализируемого сигнала $f_v=150$ кГц (устанавливается программно), частотное разрешение $df=0,05\% f_v$.

Обнаружительная способность детекторов определялась из соотношения:

$$D^* = A^{1/2} \cdot U_s / (U_n \cdot W),$$

где D^* – обнаружительная способность; A – эффективная площадь приемника; U_s – среднеквадратичное напряжение сигнала, снимаемое с образца; U_n – среднеквадратичное шумовое напряжение, приведенное к единичной полосе; W – среднеквадратичное значение модулированного потока излучения, поглощаемого эффективной площадкой приемника.

4. Результаты эксперимента

Для оценки получаемых пленок с точки зрения создания болометрических детекторов проводились исследования крутизны сверхпроводящего перехода и спектральной плотности шума. В качестве критерия оценки нами выбрано отношение величин приведенного шума и относительного температурного коэффициента, позволяющее для элементов различной конфигурации оценивать ограничения обнаружительной способности:

$$K_t = (U_n / U_{cm}) / [(dR/dT) \cdot (I/R)],$$

где U_n – шумовое напряжение; U_{cm} – напряжение смещения; R – сопротивление образца; dR/dT – крутизна температурной зависимости сопротивления.

Эта величина имеет размерность температуры и равна флуктуациям температуры образца, эквивалентным шуму. Она показывает, на какую минимальную температуру должен разогреться чувствительный элемент вследствие поглощения ИК излучения, чтобы полезный сигнал превысил шум. Поскольку для теплового детектора

$$U_s / W \sim (dR/dT) \cdot (I/G) \cdot I,$$

где G – тепловая проводимость между чувствительным элементом и окружающей средой; I – ток смещения, то можно записать:

$$D^* \sim (dR/dT) \cdot I / U_n \sim (I/R) \cdot (dR/dT) \cdot (U_{cm} / U_n) \sim 1 / K_t,$$

Как видно из последнего выражения, обнаружительная способность детектора обратно пропорциональна значению K_t материала, из которого он будет изготовлен. Очевидно, что критерием оценки качества пленок с точки зрения создания приемников следует считать минимум этой величины для каждого образца.

На рис. 2,а,б представлены температурные зависимости указанного критерия и сопротивления для двух образцов: образца с преимущественной ориентацией оси **c**, перпендикулярной к подложке, и образца с преимущественной ориентацией оси **c**, параллельной подложке.

В общем случае шумовое напряжение на образце определяется суммой отдельных составляющих:

- шумами теплопроводности;
- $1/f$ избыточным шумом;
- тепловым шумом;
- шумом электронно-измерительного тракта.

Однако качество самих пленок определяется уровнем избыточных шумов. Проведенная оценка отдельных составляющих позволила выделить эту компоненту. Поэтому полученные значения K_t соответствуют уровню избыточного токового шума.

Характерно, что независимо от кристаллографической ориентации образцов зависимости K_t имеют минимум в области сверхпроводящего перехода, который обусловлен, с одной стороны, особенностями температурного хода сопротивления, а с другой – наличием дополнительных источников шума в низкоомной части перехода [8].

Так как температурные флуктуации, обусловленные статистической природой теплообмена, линейно связаны с температурой, форма и особенности полученных зависимостей также подчеркивают наличие избыточного шума в исследованных структурах. Ранее при исследовании избыточных шумов в монокристаллах [9] было установлено, что при протекании тока вдоль оси **c** кристалла в области сверхпроводящего перехода наблюдается резкое возрастание приведенного шума, в то время, как при протекании тока в плоскости **a-b** кристалла увеличение шума отсутствует. Однако проведенные исследования показали, что минимальные температурные флуктуации, эквивалентные избыточному токовому шуму, в отличие от собственно шумового напряжения, для обоих образцов с параллельной и перпендикулярной ориентацией оси **c** относительно подложки имеют близкие значения ($2-3 \cdot 10^{-8} \text{ К/Гц}^{1/2}$). Другими словами, несмотря на различия в природе и поведении флуктуационных процессов, для боломет-

рических применений, при значительной степени структурной упорядоченности, ориентация пленок относительно подложки не является определяющим фактором. Возможно, это связано с тем, что **c**-параллельные пленки имеют идеальное эпитаксиальное сопряжение с монокристаллической подложкой и практически свободны от крупномасштабных дефектов. Это может быть особенно важно при малых размерах микротермометров.

Оценка составляющих шума показывает, что основными факторами, ограничивающими обнаружительную способность, являются шумы, обусловленные естественными температурными флуктуациями, и избыточные токовые шумы:

$$NEP = (4kT^2G + K_t^2G^2)^{1/2},$$

где NEP- эквивалентная мощность шума; k – постоянная Больцмана.

Очевидно, что уменьшения NEP и, соответственно, увеличения D^* можно добиться за счет уменьшения теплопроводности G . При $G = 4kT^2/K_t^2$ обе составляющие шума равны. Для микротермометра на массивной подложке можно считать $G = 2\pi\lambda a$, где λ – удельный коэффициент теплопроводности подложки; a – линейный размер микротермометра. Тогда для рассматриваемых в данной работе пленок ВТСП и с учетом полученных значений K_t линей-

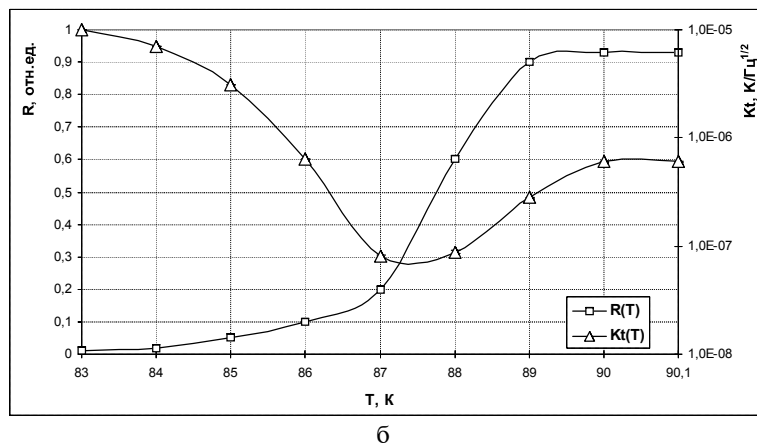
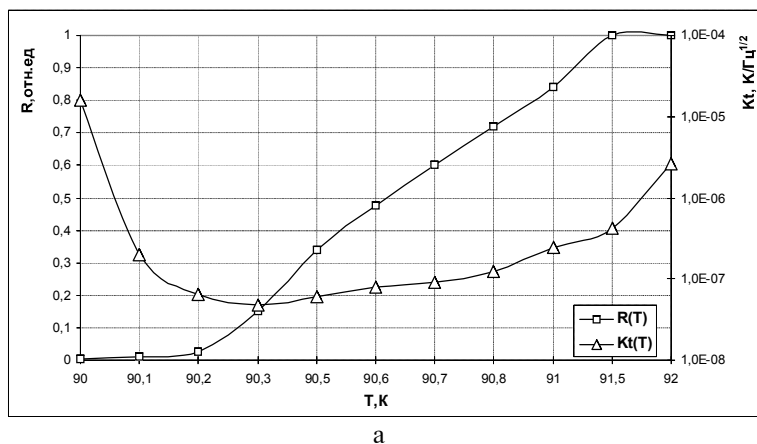


Рис. 2. Температурные зависимости сопротивления и критерия K_t для **c** перпендикулярных пленок (а); температурные зависимости сопротивления и критерия K_t для **c** параллельных пленок (б)

ный размер чувствительного элемента, при котором естественные температурные флуктуации и флуктуации, эквивалентные избыточному шуму, равны, должен составлять 30–50 мкм. Таким образом, проведенная работа позволяет для различных конструктивных решений найти размеры чувствительного элемента, при которых избыточный шум не является определяющим.

На рис.3 представлены значения обнаружительной способности для элементов билинейки чувствительных детекторов, конструкция которой была описана выше.

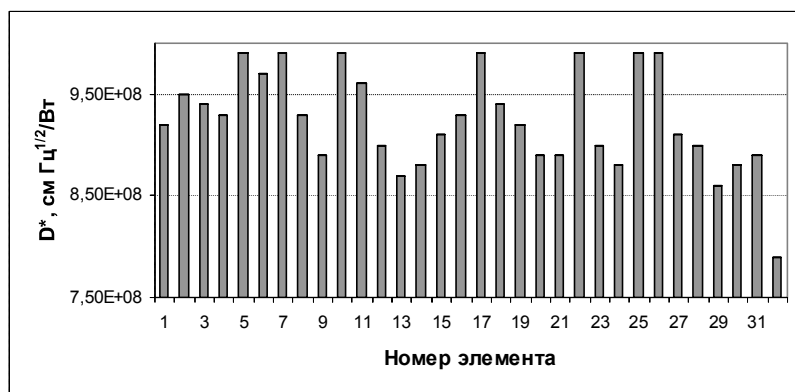


Рис.3. Обнаружительная способность ВТСП микротермометров билинейки 2x16

Основная погрешность в определении коэффициента преобразования обусловлена неопределенностью размеров приемной площадки. Выбранные значения 100x100 мкм соответствуют длине тепловой волны в подложке на частоте 50 Гц. Разброс обнаружительной способности (22%) может быть связан с наличием примесных фаз и поликристаллических частей, возникающих в процессе синтеза пленок. Кроме того, достаточно тонкие пленки чувствительны к дефектам поверхности подложки.

Тем не менее, полученные значения обнаружительной способности $10^9 \text{ см Гц}^{1/2} / \text{Вт}$ и разброса ее значений позволяют сделать вывод о перспективности использованного подхода при условии решения проблемы коммутации сигнала. Основой построения ВТСП многоэлементного приемника с электронным сканированием могут стать предложенные ранее [10] принципы управления координатной чувствительностью сверхпроводниковых детекторов с помощью локального теплового воздействия.

5. Заключение

В результате проделанной работы показана возможность создания ВТСП многоэлементных приемников ИК излучения с использованием поглощающих свойств подложки и чувствительных микротермометров. Определены критерии оценки пленочных структур с точки зрения болометрических применений. Получена информация для определения геометрических размеров микротермометров в матричных приемниках.

- Литература:** 1. Лихарев К.К., Семенов В.К., Зорин А.В. Новые возможности сверхпроводниковой электроники // Сверхпроводимость (Итоги науки и техники ВИНТИ АН СССР). Москва. 1988. Т.1. С.75. 2. Afanasyev A.S., Divin Yu. Ya., Gubankov V.N. et al. On the mechanism of electromagnetic radiation detection by YBaCuO thin films // ISEC. Tokyo. 1989. P.226-228. 3. Clarce J., Hoffer G.I., Richards P.L., Yeh N.H. // J. Appl. Phys. 1977. V.48. P.4865. 4. Бандурян Б.Б., Гапонов С.В., Дмитренко И.М., Ефременко В.Г. и др. Болометрические и шумовые свойства ВТСП структур // Физика низких температур. 1990. Т.16, №1. С.70-79. 5. Richards P.L., Vergheze S., Geballe T.H., Spielman S.R. The high-Tc superconducting bolometer // IEEE Transaction on Magnetics. 1989. V.25, N2. P.1335-1338. 6. Sanchez S., Elvenspoek M., Heidenblut T., Schwierzi B., Michalke W., Steinbeib E. Low noise high-Tc superconducting bolometers on silicon nitride membranes for far-infrared detection // J. Appl. Phys. 1997. V.82. P.4719-4726. 7. Burnus M., Hefle G., Heidenblut T., Khrebtov I.A. et al. IR detector system based on high-Tc superconducting bolometer on Si membrane // Proc. SPIE 1996. V.2746. P.4580-4583. 8. Бродянский А.П., Дмитренко И.М., Гарбуз А.С., Ефременко В.Г. и др. Наблюдение неомической компоненты спонтанных флуктуаций проводимости в тонких пленках $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ // Физика низких температур. 1994. Т.20, №9. С.974-977. 9. Song Y., Misra A., Crooker P.P. et al. // Phys.Rev.B, 1992, V.45, N.13, P.7574-7577. 10. Efremenko V.G. HTSC detectors // Proc. SPIE (Material science and material properties for infrared optoelectronics) 1997. V.3182. P.39-45.

Поступила в редколлегию 05.09.2002

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Боршев В.Н.

Гордиенко Эдуард Юрьевич, аспирант кафедры МЭПУ ХНУРЭ. Научные интересы: инфракрасная техника. Адрес: Украина, 61072, Харьков, ул. 23 Августа, 29/А, кв.42, тел. 30-67-71.

Слипченко Николай Иванович, канд. техн. наук, профессор ХНУРЭ. Научные интересы: твердотельная электроника. Адрес: Украина, 61141, Харьков, ул. Клочковская, 195, кв.78, тел. 40-90-20.

Гарбуз Александр Сергеевич, мл. науч. сотр. ФТИНТ АН Украины. Научные интересы: технология и свойства тонких пленок. Адрес: Украина, 61011, Харьков, ул. Ак. Богомольца, 5, кв. 100, тел. 30-85-94.