

Э. Ю. ГОРДИЕНКО

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГЛОЩАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ КОМБИНИРОВАННЫХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ БОЛОМЕТРИЧЕСКИХ ДЕТЕКТОРОВ

В болометрических детекторах ИК-излучения поглощательная способность является одним из важнейших параметров, от которого зависит не только эффективность преобразования, но и спектральный диапазон чувствительности. Поэтому определение коэффициента поглощения актуально при оптимизации параметров конструкции и разработке новых высокочувствительных болометрических элементов.

Одним из наиболее перспективных материалов для создания высокотемпературных сверхпроводниковых (ВТСП) болометрических приемников ИК-излучения является соединение $YBa_2Cu_3O_{7-x}$. Характерное поведение спектров поглощения этого материала в широком температурном и спектральном диапазонах рассматривалось в ряде работ [1, 2]. Тем не менее, конструктивные особенности детекторов и связанные с этим особенности физических процессов поглощения излучения приводят к тому, что общий коэффициент поглощения приемника определяется комплексом факторов, присущих каждой конструкции. В связи с этим актуальным является измерение коэффициента поглощения не материала болометра, а всего детектора в целом.

В данной работе в диапазоне длин волн 8 – 14 мкм проведены измерения коэффициента поглощения и относительной спектральной характеристики чувствительности ВТСП-болометрического приемника, особенностью которого является наличие пленочного $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ микротермометра, выполняющего функции чувствительного элемента, и прилегающей к нему части подложки из $SrTiO_3$, поглощающей излучение (рис. 1). Такое функциональное разделение позволило оптимизировать требования к конструкции и технологии изготовления детекторов. При этом достигалось увеличение чувствительности вследствие снижения тепловой связи за счет уменьшения линейных размеров микротермометра и использования подложки из

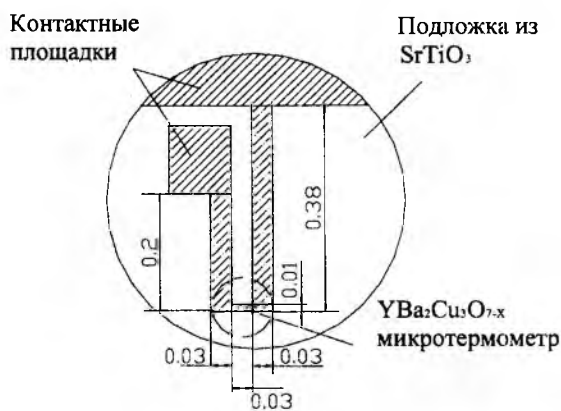


Рис. 1

$SrTiO_3$, обладающей низкой теплопроводностью. Геометрия микротермометра длиной 30 мкм, шириной 10 мкм и толщиной 0,1 мкм формировалась методами фотолитографии. Толщина подложки 300 мкм. Концы чувствительного элемента снабжены токопроводящими проводниками длиной 200 мкм из того же материала и заканчивающиеся контактными площадками. Длина проводников превышает длину тепловой волны и, таким образом, возможный разогрев в области контактных площадок не влияет на температуру чувствительного элемента.

Обычно для определения коэффициента поглощения тепловых приемников излучения используют метод эквивалентного замещения мощности оптического излучения джоулевым тепловыделением [3]. При этом отношение отклика на оптическое и эквивалентное электрическое воздействие соответствует значению коэффициента поглощения приемника. Однако данный метод не позволяет проводить измерение комбинированных болометрических структур, например, когда приемный и чувствительный элементы разделены. В этом случае нарушается принцип

эквивалентности электрического тепловыделения и поглощенного излучения, и полученные значения коэффициента поглощения занижаются. Измерение спектра ИК-поглощения с помощью болометрического эффекта, при котором изменение температуры образца, измеренное специальным термометром, пропорционально поглощаемой мощности, также применяется для определения поглощающих свойств материалов. При этом требуется механический контакт исследуемого образца и термометра, что может внести значительную погрешность в результат измерения. Кроме того требуется специальная подготовка образцов, а при их малых размерах этот метод практически не реализуем. Применение оптических методов [4], в основе которых лежат измерения коэффициентов отражения и пропускания, и дальнейший расчет доли поглощенной энергии в соответствии с законом Кирхгофа, широко используемый для измерения спектральных характеристик однородных структур на больших площадях, также имеют существенные трудности при диффузном характере отражения, малых размерах и других конструктивных особенностях детекторов.

Особый интерес представляет метод измерения коэффициента поглощения материала, когда используются его излучательные свойства при болометрической регистрации ИК излучения, предложенный в работе [5]. Однако для его реализации требуется пропускание через образец электрического тока определенной величины для разогрева. При этом, как и в случае метода эквивалентного замещения мощности оптического излучения джоулевым тепловыделением, он не применим для измерения поглощения комбинированных болометров.

В данной статье представлен и на примере выше описанного образца практически реализован метод определения коэффициента поглощения болометрического приемника путем измерения мощности его собственного излучения другим ИК-детектором. В этом случае удается избежать указанных трудностей.

Предварительно измерялась относительная спектральная характеристика чувствительности путем сравнения сигналов фотоотклика образцового и исследуемого детекторов на модулированное излучение различного спектрального состава. Функциональная схема измерительной установки показана на рис. 2.

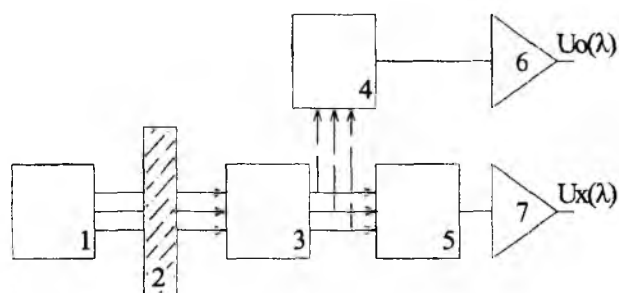


Рис. 2

В качестве источника излучения (1) использовалась модель абсолютно черного тела (АЧТ), имеющая фиксированную температуру 500 К. Длина волны излучения задавалась с помощью набора аттестованных инфракрасных дисперсионных фильтров (2), охватывающих диапазон длин волн 8 – 14 мкм. Модуляция потока излучения осуществлялась с помощью механического модулятора (3).

Для контроля мощности излучения на выходе модулятора использовался образцовый пироэлектрический полостной детектор (4) с известной спектральной характеристикой чувствительности. Исследуемый приемник (5) размещался в вакуумной части оптического криостата на тепловой платформе, температура которой могла изменяться в диапазоне 77 – 100 К и стабилизировалась с точностью до 0,01 К на сверхпроводящем переходе ВТСП микротермометра. Холодная диафрагма диаметром 100 мкм, размещенная непосредственно перед образцом, обеспечивала необходимое поле зрения. Напряжение сигнала фотоотклика с образцового и исследуемого приемников усиливалось усилителями (6), (7) и измерялось селективным нановольтметром «Unipan 232 В». Относительная спектральная характеристика чувствительности, приведенная на рис. 3, рассчитывалась по формуле:

$$S(\lambda) = \frac{U_x(\lambda)}{U_o(\lambda) \cdot S_x(\lambda)_{\max}}, \quad (1)$$

где: $U_x(\lambda)$ – напряжение сигнала отклика исследуемого приемника на излучение с длиной волны λ ; $U_o(\lambda)$ – напряжение сигнала отклика образцового приемника на излучение с длиной волны λ ; $S_x(\lambda)_{\max}$ – максимальное значение отношения сигналов отклика исследуемого и образцового приемников в измеряемом интервале длин волн.

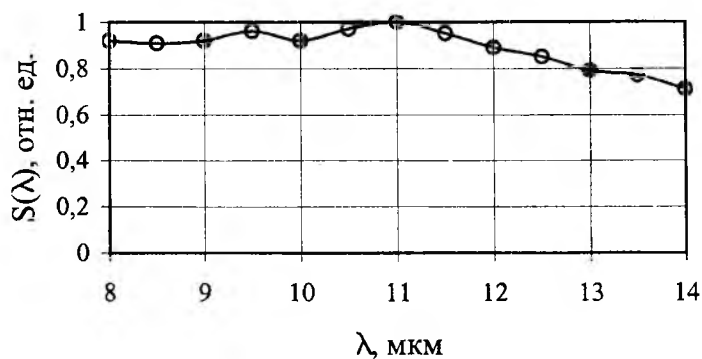


Рис. 3

Наибольший интерес для практических применений с точки зрения достижения предельных характеристик чувствительности представляет измерение абсолютного значения коэффициента поглощения. Вследствие того, что полученная нами экспериментальная зависимость относительной спектральной характеристики чувствительности не имеет резких изменений, для определения интегрального коэффициента поглощения исследуемого болометра в диапазоне длин волн 8 – 14 мкм был использован тот факт, что для подобной узкой спектральной области коэффициент поглощения поверхности равен её коэффициенту излучения [6]. В общем случае плотность потока мощности излучения с поверхности при температуре T в спектральном диапазоне $\lambda_1 - \lambda_2$ определяется выражением [7]:

$$P_{(\lambda_1-\lambda_2)} = \varepsilon \cdot \delta \cdot T^4 \cdot b, \quad (2)$$

где: $P_{(\lambda_1-\lambda_2)}$ – плотность потока мощности в спектральном диапазоне $\lambda_1 - \lambda_2$, (Вт/см²); ε – коэффициент излучения; δ – постоянная Стефана-Больцмана, ($\delta = 5,669 \cdot 10^{-12}$ Вт·см⁻²·К⁻⁴); T – температура поверхности, (К); b – доля энергии интегрального излучения в спектральном диапазоне $\lambda_1 - \lambda_2$.

Величина этого потока $P_{(\lambda_1-\lambda_2)}$ может быть измерена при помощи высокочувствительного ИК-приемника с необходимой спектральной характеристикой. В данной работе для определения интегрального коэффициента излучения в качестве такого приемника использовался охлаждаемый до температуры 77 К фоторезистор из CdHgTe размером 100 × 100 мкм и

со спектральной чувствительностью в диапазоне 8 – 14 мкм. Схема измерительной установки показана на рис.3. Все её детали, за исключением электроники, размещались в азотном криостате. Исследуемый образец (1) был установлен на тепловой платформе (2), температура которой регулировалась в интервале 77 – 100 К. Перед образцом устанавливалась охлаждаемая диафрагма (3) диаметром 100 мкм и обеспечивающая необходимое поле зрения. В непосредственной близости располагался CdHgTe – фоторезистор (4) с оптической системой в виде германиевой линзы диаметром 10 мм. По-

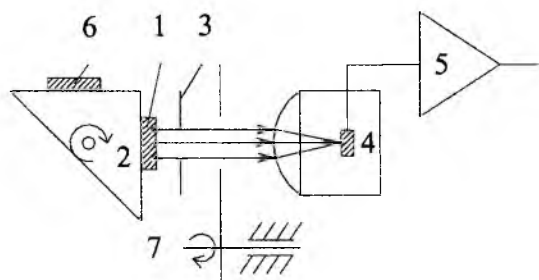


Рис. 4

скольку температура фоновой обстановки не превышала 100 К, он имел достаточно высокую чувствительность ($NEP \sim 10^{-14} \text{ Вт/Гц}^{1/2}$). Сигнал фотоотклика усиливался усилителем (5). Дальнейшая обработка и измерение сигнала производилась селективным нановольтметром «Unipan 232 В». Для модуляции потока излучения с исследуемого образца использовался охлаждаемый механический модулятор (7). На тепловой платформе располагался специальным образом обработанный участок (6) с коэффициентом излучения, близким к единице, и используемый как эталонный излучатель. При помощи поворотного устройства с разорванной тепловой связью и выведенного на поверхность криостата, платформа имела возможность поворачиваться вокруг своей оси на 90° , тем самым помещая в поле зрения фотодетектора либо исследуемый образец, либо эталонный излучатель. Коэффициент излучения, в нашем случае эквивалентный коэффициенту поглощения, рассчитывался как отношение сигналов фотоотклика CdHgTe – детектора на потоки излучения с исследуемого образца и эталонного излучателя. При этом небольшой температурный дрейф механического модулятора вследствие его вращения не влияет на результаты измерений. Кроме того, такая измерительная схема также исключает систематическую составляющую погрешности, а общая погрешность определяется только случайной погрешностью измерительного прибора, в нашем случае селективного нановольтметра «Unipan 232 В».

Определенное значение интегрального коэффициента поглощения исследуемого комбинированного болометра в диапазоне 8 – 14 мкм при температуре 90,5 К, соответствующей его рабочей точке, равно 0,7. Учитывая вклад микротермометра и участка подложки в процесс поглощения излучения, пропорциональный их площадям, полученное значение хорошо согласуется с результатами измерения коэффициентов поглощения для пленки $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ и подложки из SrTiO_3 , полученных с использованием метода ИК-отражения в диапазоне 8 – 14 мкм и равных 0,5 и 0,8 соответственно.

Таким образом, представленный метод позволяет измерять коэффициент поглощения как материалов, так и сложных комбинированных структур, что особенно важно при определении поглощательной способности готовых приемников излучения, когда предпочтительны бесконтактные неразрушающие методы измерения.

Экспериментально определено, что использование в ВТСП болометрах в качестве поглощающего элемента подложки из SrTiO_3 позволяет реализовать эффективное поглощение 70 % в диапазоне 8 – 14 мкм. Выявленные небольшие неоднородности относительной спектральной характеристики чувствительности согласуются с аномалиями оптических свойств используемой подложки из титаната стронция.

Список литературы: 1. Kamaras K., Porter C.D., Doss M.G. Exitonic absorption and superconductivity in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ // Phys. Rev. Lett., 1987. V. 59, N 8. P. 919 – 922. 2. Константинов В.Л., Старк С.Ю., Цидильковский И.М. Оптические свойства тонких пленок $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ в ИК области спектра // Письма в ЖЭТФ, 1988. Т. 48, N 11. С. 605 – 607. 3. Коноводченко В.А. и др. Определение абсолютного коэффициента поглощения сверхпроводниковых неизотермических болометров // В кн.: Тепловые приемники излучения. Л.: ГОИ, 1980. С. 170 – 171. 4. Гершензон Е.М. и др. Измерение энергетической щели в соединении $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ по спектру ИК-поглощения // Письма в ЖЭТФ, 1987. Т. 46, N 5. С. 186 – 189. 5. Дмитренко И.М. и др. Способ измерения коэффициента поглощения ВТСП материалов // Сверхпроводимость: физика, химия, техника, 1990. Т. 3, N 4. С. 640 – 646. 6. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением. М.: Мир, 1975. 934 с. 7. Хадсон Р. Инфракрасные системы. М.: Мир, 1972. 534 с.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 16.12.2002