

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЕ БОЛОМЕТРЫ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЕВОЙ МЕМБРАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

© 2004 г. И. А. Хребтов, канд. техн. наук; А. Д. Ткаченко

ГОИ им. С.И. Вавилова, Санкт-Петербург

Представлен анализ состояния разработок высокотемпературных сверхпроводниковых (ВТСП) болометров на основе кремниевой мембранной технологии. Рассмотрены вопросы теории, включая обсуждение основных источников шумов и особенностей режимов работы болометров с учетом положительной и отрицательной электротепловой обратной связи, специфика получения качественных ВТСП пленок на кремниевых подложках, конструктивные и технологические особенности изготовления одиночных болометров с большой приемной площадкой и микроболометров для линейных и двумерных матриц. Анализируются результаты расчетного моделирования основных характеристик и проводится сравнение с экспериментом.

Коды OCIS: 040.3060.

Поступила в редакцию 16.05.2003.

Введение

После открытия высокотемпературной сверхпроводимости стало очевидно, что на основе этих новых материалов могут быть созданы высокочувствительные инфракрасные (ИК) болометры нового поколения [1]. Принципы работы высокотемпературных сверхпроводниковых (ВТСП) болометров, основанные на использовании резкой температурной зависимости сопротивления, критического тока или кинетической индуктивности, были рассмотрены в обзорах [2–5]. К настоящему времени показано, что ВТСП болометры являются одним из успешно развивающихся практических применений высокотемпературной сверхпроводимости. Рабочая температура, близкая к температуре жидкого азота 77 К, тонкопленочная технология, высокий температурный коэффициент сопротивления в области сверхпроводящего перехода обеспечивают высокую чувствительность и малую постоянную времени.

Теоретические оценки показывают возможность достижения обнаружительной способности $D^* \approx 2 \times 10^{10}$ см Гц^{1/2}/Вт, ограниченной флуктуациями фона в ИК области [1–7]. Как любой тепловой приемник излучения, ВТСП болометр имеет широкий спектральный диапазон чувствительности. На длинах волн, больших 20 мкм, ВТСП болометры не имеют конкурентов среди квантовых фотоприемников при той же температуре охлаждения [8]. Кроме того, микроболометры, изготовленные по кремниевой технологии, могут быть использованы при создании линейных и двумерных смотрящих матриц [8–10].

Современные ИК системы изображения создаются главным образом с использованием матриц на основе фоточувствительных полупроводниковых приемников из материалов типа HgCdTe или InSb, охлаждаемых жидким азотом. Такие устройства ха-

рактеризуются высокой стоимостью полупроводниковых материалов и ограниченным спектральным диапазоном. Теоретические оценки показывают, что при использовании ВТСП микроболометрических матриц ИК системы изображения, работающие в диапазоне длин волн 8–14 мкм, могут приблизиться к теоретическому пределу, определяемому как разность температур, эквивалентная шуму, равная NETD = 0,002 К [9].

Болометры на основе ВТСП пленок могут быть изготовлены с использованием современной кремниевой технологии. Стоимость ВТСП материалов значительно ниже, чем для матриц на основе охлаждаемых до азотных температур фотопроводящих полупроводниковых материалов, что обеспечивает существенные коммерческие преимущества. Таким образом, одиночные ВТСП болометры и микроболометрические матрицы имеют хорошие перспективы практического применения в ИК системах формирования изображений для контроля окружающей среды и геологической разведки, для транспортных задач и промышленного контроля, для экологического мониторинга Земли из космоса и астрофизических исследований, в медицине, ИК спектроскопии и радиометрии и др.

Настоящий обзор посвящен анализу современного состояния наиболее перспективных разработок ВТСП болометров на основе кремниевой планарной технологии. Рассмотрены вопросы теории, конструктивные и технологические особенности болометров классического типа. Субмиллиметровые антенные ВТСП микроболометры [11–13], получившие развитие в последние годы, для которых кремниевая мембранная технология также перспективна, требуют отдельного рассмотрения. Информацию об этом принципиально новом типе болометра можно найти также в работах, цитируемых в данном обзоре [3–5, 7].

1. Вопросы теории ВТСП болометров

1.1. Принцип действия болометров и расчет основных характеристик

Ниже рассмотрены некоторые теоретические вопросы, касающиеся основных характеристик болометров, включая чувствительность, постоянную времени и главным образом шумовые параметры, которые ранее обсуждались в [1–10, 14–16]. Принцип работы ВТСП болометра проиллюстрирован на рис. 1 [9].

Излучение поглощается чувствительным элементом с теплоемкостью C (тонкая ВТСП пленка на мембране), который имеет слабую связь через тепловую проводимость G с массивным основанием-подложкой. Поглощенное излучение приводит к нагреву ВТСП пленки, находившейся при температуре T_b , которая соответствует температуре середины сверхпроводящего перехода, и изменяет сопротивление R_b пропорционально температурному коэффициенту сопротивления $\beta = (1/R_b)(dR/dT)$. В зависимости от того, какое электрическое смещение используется, постоянный ток смещения I_b или напряжение смещения V_b , выходным сигналом будет изменение напряжения или тока соответственно.

В последние годы во многих работах обсуждалось влияние электротепловой обратной связи (ETF) на шумовые свойства криогенных болометров, особенно сверхпроводниковых болометров. Такая обратная связь возникает при работе в режиме с постоянным напряжением смещения (СVM) и токовым считыванием выходного сигнала. При этом появляется возможность уменьшить постоянную времени и расширить динамический диапазон болометров. Впервые внимание к этой проблеме было обращено в работе [17]. Позднее эффективность отрицательной ETF была показана для сверхпроводниковых болометров, работающих при температуре жидкого гелия 4 К и ниже [18]. Моделирование режимов

работы ВТСП болометров с положительной и отрицательной ETF были выполнены и обсуждены в ряде работ [14, 18–20] и обзоре [21].

Авторы работы [14] описали функциональное поведение болометра как электрической системы с замкнутой петлей обратной связи и получили новые выражения для его характеристик. Согласно этой модели вольтовая чувствительность S_V болометра, работающего при постоянном токе смещения (ССМ), т. е. в режиме с положительной ETF, равна:

$$S_V = \frac{\epsilon L_0}{I_b (1 - L_0) (1 + \omega^2 \tau_e^2)^{1/2}}, \quad (1)$$

где ϵ – коэффициент поглощения, $L_0 = \beta P_b / G$ – коэффициент обратной связи, $P_b = I_b^2 R_b$ – мощность электрического смещения, $\omega = 2\pi f$ – круговая частота, f – частота модуляции, τ – собственная постоянная времени, $\tau_e = \tau / (1 - L_0)$ – эффективное значение постоянной времени. Для устойчивой работы коэффициент L_0 должен быть меньше 1. Обычно при расчетах принимают $L_0 = 0,3$, чтобы исключить тепловую неустойчивость.

При использовании болометра в режиме с постоянным напряжением смещения, то есть при отрицательной ETF, токовая чувствительность записывается как

$$S_I = \frac{\epsilon L_0}{V_b (1 + L_0) (1 + \omega^2 \tau_e^2)^{1/2}}, \quad (2)$$

где $\tau_e = \tau / (1 + L_0)$ и $L_0 = V_b^2 \beta / R_b G$. Так как ВТСП пленка имеет положительный коэффициент β и в этом случае нет ограничения по напряжению смещения, значение L_0 может быть много больше единицы и болометр будет работать при сильном влиянии ETF. При этом эффективная постоянная времени τ_e может быть уменьшена в $(1 + L_0)$ раз за счет увеличения мощности электрического смещения P_b . Увеличение

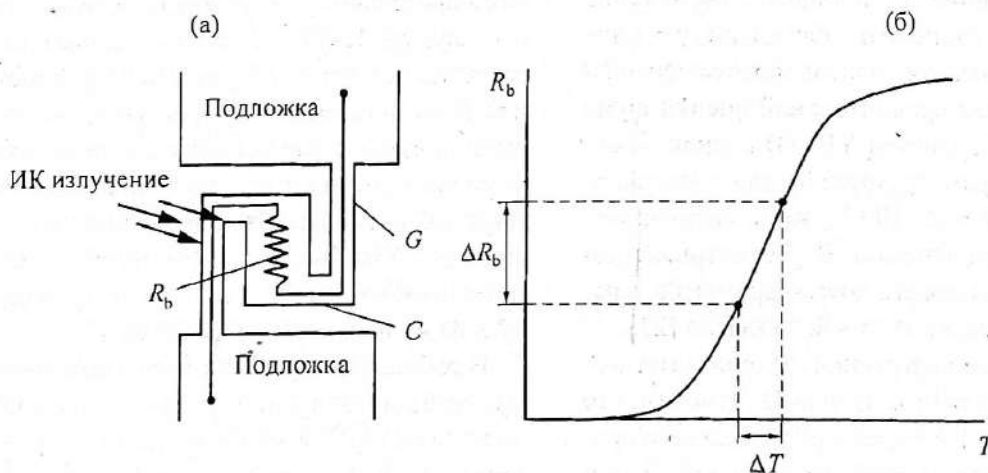


Рис. 1. Принцип действия ВТСП болометра мембранного типа: а – схематическое изображение болометра; б – изменение сопротивления болометра в области сверхпроводящего перехода при поглощении излучения [9].

L_0 ограничивается разностью температуры базы болометра и температуры сверхпроводящего перехода ВТСП пленки, которая практически составляет приблизительно 10 К при азотном охлаждении.

Для болометра в режиме с постоянным током смещения пороговая чувствительность определяется мощностью, эквивалентной шуму (NEP), которая в полосе $\Delta f = 1$ Гц равна

$$\text{NEP} = \frac{V_n}{S_V}, \quad (3)$$

где V_n – напряжение суммарного шума, состоящего из суммы независимых различных шумовых источников. Другой величиной, используемой для оценки пороговой чувствительности болометров, является обнаружительная способность D^* , которую удобно использовать для сравнения приемников с разными чувствительными площадками A :

$$D^* = \frac{A^{1/2}}{\text{NEP}}. \quad (4)$$

Принимая во внимание сумму шумовых составляющих, результирующую мощность, эквивалентную шуму, для ВТСП болометра, которая является одинаковой для режимов с постоянным током смещения и с постоянным напряжением смещения, можно записать как [1–7, 14, 17–19]:

$$\text{NEP}_{V,I} = \left\{ \frac{8\sigma k A \Omega T_b^5}{\epsilon} + \frac{\gamma 4k T_b^2 G}{\epsilon^2} + \left(\frac{4k T_b G^2}{\epsilon^2 \beta^2 P_b} + \frac{G^2 \alpha}{\epsilon^2 \beta^2 N A t^a} \right) [1 + \omega^2 \tau^2] \right\}^{1/2}, \quad (5)$$

где σ – постоянная Стефана–Больцмана, k – коэффициент Больцмана, α – шумовой параметр Хоуге, зависящий от качества ВТСП пленки [22], N – плотность носителей тока в пленке, равная 10^{21} см⁻³ в нормальном состоянии, A – площадь и t – толщина пленки, показатель степени a – близок к 1, $\gamma = 1$ для малых температурных градиентов между пленкой и криостатом [17]. Для сравнительной оценки шума $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (в дальнейшем YBCO)-пленок обычно используется параметр Хоуге α_N для нормального состояния при $T = 95$ – 100 К, когда сверхпроводимость полностью исчезает. В рассматриваемом случае можно использовать хоуге-параметр α в рабочей точке и зависимость $\alpha \sim R_b$ согласно [23].

Первое слагаемое выражения (5) описывает фотонный шум фона для угла зрения Ω . Заметим, что этот шум определяет NEP идеального теплового приемника и практически этой составляющей при оценке ВТСП болометров можно пренебречь. Второй член обусловлен фонным шумом, связанным

со случайным характером обмена энергией между приемным элементом болометра и теплостокком через тепловую проводимость G . Третий член зависит от джонсоновского шума сопротивления болометра R_b . Четвертый член обусловлен избыточным токовым $1/f$ -шумом, который зависит главным образом от качества ВТСП пленки. В выражении (5) не учитываются дополнительные источники шума, такие как температурные флуктуации криостата и шум предусилителя, появление которых обусловлено конкретным применением болометров.

Следует отметить, что составляющие NEP_R и $\text{NEP}_{1/f}$ зависят от тепловой постоянной времени τ , а не от τ_c , как в случае с S_V или S_I в выражениях (1), (2). Этот факт можно объяснить воздействием ЕТФ на джонсоновский шум, которым обычно пренебрегали ранее. В случае режима SVM действие мощности электрического смещения P_b может быть больше, чем в режиме ССМ. Так, согласно выражению (5) вклад джонсоновского шума уменьшается с увеличением P_b .

1.2. Расчетное моделирование чувствительности и шума ВТСП болометров

Результаты моделирования шумовых параметров ВТСП болометров различных конструкций обсуждались в ряде работ [3, 6, 8, 14–16, 24, 25]. Условия достижения пороговой чувствительности, ограниченной статистическим фотонным шумом, в зависимости от длины волны оптического излучения и тепловой проводимости были проанализированы в [6]. Зависимости D^* от длины волны для различных приемников представлены на рис. 2.

Для уменьшения NEP болометр должен работать в далекой ИК области, где инфракрасная мощность фоновой нагрузки (P_{IR}) мала. Так, при уменьшении тепловой проводимости G и, соответственно, фонного шума может быть достигнут уровень NEP, близкий к предельному значению, определяемому фотонным шумом. На рис. 2 жирные кривые показывают расчетное значение D^* для YBCO-болометра на Si и Si₃N₄ (в дальнейшем SiN)-мембранах. Эти кривые были получены при использовании оценки для минимально достижимого значения теплоемкости и тепловой проводимости и измеренного напряжения шума для YBCO-пленок. Как видно из рисунка, заметный выигрыш от ВТСП болометров можно ожидать на длинах волн более 20 мкм.

В работе [15] проведен расчетный анализ шумовых свойств GdBa₂Cu₃O_{7-x} (в дальнейшем GBCO)-болометра на YSZ*/Si-мембране [26] в частотном диапазоне $f = 1$ – 10 кГц при использовании эксперименталь-

* YSZ – yttria stabilized zirconia.

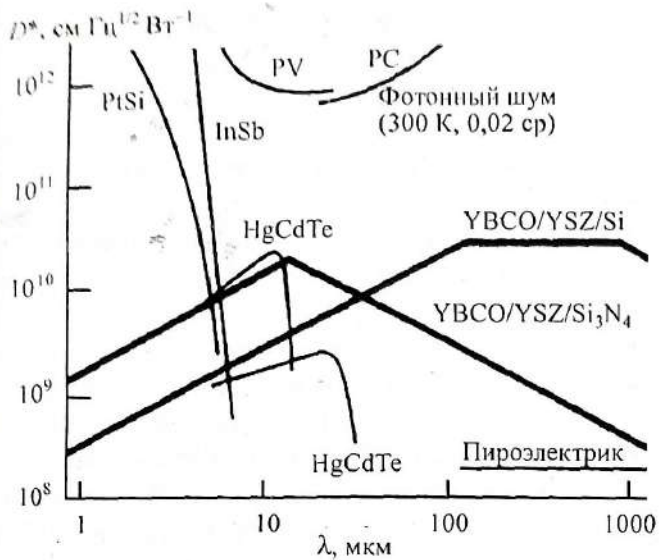


Рис. 2. Обнаружительная способность как функция длины волны для дифракционно-ограниченного микроболометрического пиксела с $\Omega = 0,02$ ср и $\tau = 10$ мс показана в сравнении с фотопроводящими приемниками, работающими при 77 К, и пирозлектрическими приемниками при 300 К [6]. PV и PC – фотовольтаический и фотопроводящий приемники соответственно.

но полученных характеристик: $G = 4,5\text{--}450$ мкВт/К и шумового параметра Хоуге $\alpha = 0,043\text{--}430$.

Из рис. 3, где представлена зависимость спектральной плотности мощности шума от частоты, видно, что фоновый шум приближается к суммарному уровню шума в диапазоне частот 20 Гц $< f < 200$ Гц. При $f < 4$ Гц $1/f$ -шум может дать существенную добавку, при $f > 1$ кГц джонсоновская составляющая шума становится основной, при температуре $T = 300$ К доминирующим становится фликкер-шум.

Рис. 4 иллюстрирует оценку возможности достижения NEP, ограниченной фоновым шумом [25].

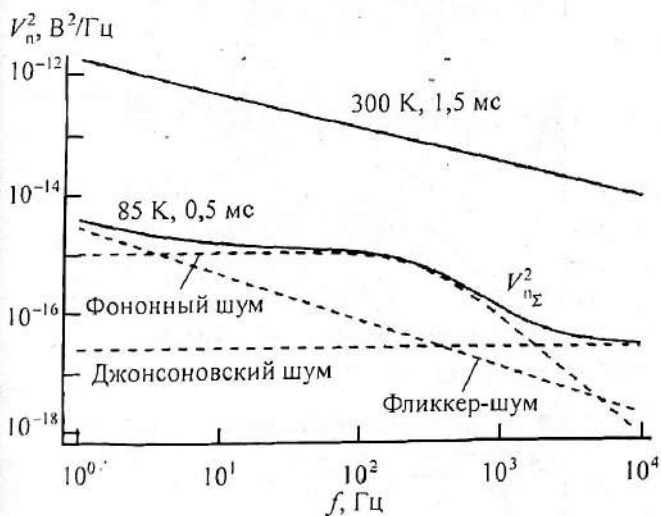


Рис. 3. Спектральная плотность мощности шума V_n^2 как функция частоты при $T = 85$ К ($\tau = 0,5$ мс) и $T = 300$ К ($\tau = 1,5$ мс) для GBCO-болометра на YSZ/Si-мембране [15, 26].

Видно, что требование $NEP < 3 \times 10^{-12}$ Вт/Гц^{1/2} в данном конкретном случае накладывает ограничения на верхний предел для $G = 5 \times 10^{-6}$ Вт/К.

Результаты моделирования, представленные выше, касаются болометров с постоянным током смещения, то есть с положительной электротепловой обратной связью (режим ССМ). Расчетный анализ ВТСП болометра YSZ/Si-мембранного типа в режиме с пассивной отрицательной обратной связью (режим СVM) был проведен в работах [20, 27].

2. Технология одиночных и матричных ВТСП болометров

Ключевым требованием к конструкции и технологии изготовления современных ВТСП болометров является обеспечение малой теплоемкости чувствительного элемента и высокой степени его теплоизоляции от базовой подложки. Тепловая изоляция повышает чувствительность и уменьшает фоновый шум болометра, уменьшение теплоемкости снижает его тепловую постоянную времени. Кроме этого, необходимо иметь качественные ВТСП пленки с высоким температурным коэффициентом сопротивления в области сверхпроводящего перехода, обладающие низким уровнем избыточных шумов и не подверженные деградации. Наиболее технологичным типом болометра, удовлетворяющим этим требованиям, является болометр мембранного типа.

Процесс изготовления мембранной структуры должен быть согласован с технологическими требованиями напыления сверхпроводящих пленок. В последние годы практически была показана возможность создания высокочувствительных ВТСП болометров с использованием кремниевых планар-

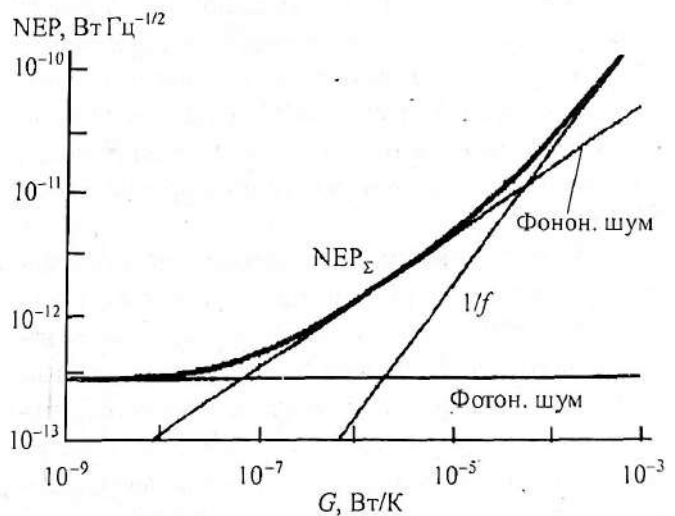


Рис. 4. Расчетная эквивалентная мощность шума NEP для GBCO-болометра на YSZ/Si/SiN-мембране с $A = 1$ мм² как функция тепловой проводимости G , постоянная времени τ взята равной 0,1 с для всех G [25].

ных технологий. Выбор кремния в качестве материала для подложек объясняется развитой технологической базой по его обработке и возможностью формирования на одной подложке болометрических структур и элементов считывающей электроники.

2.1. Технологические методики получения ВТСП пленок на кремниевых подложках

Различие коэффициентов температурного расширения, несоответствие кристаллических решеток между ВТСП соединениями и кремнием затрудняют задачу получения качественных сверхпроводящих пленок на кремнии. Однако основной проблемой являются химическое взаимодействие и диффузия между пленкой и кремниевой подложкой при высоких температурах 600–900 °С, необходимых при напылении пленок. В работе [28] показано, что между $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ и Si взаимодействие происходит при температурах не ниже 500 °С и заключается в образовании слоя силикатов бария и слоя продуктов распада фазы $YBa_2Cu_3O_{7-x}$. С учетом этих факторов между ВТСП пленкой и кремнием вводятся буферные слои YSZ ($ZrO_2 + 10\% Y_2O_3$) – оксид циркония, стабилизированный в кубической фазе оксидом иттрия, и CeO_2 , которые препятствуют протеканию химических реакций и обеспечивают эпитаксиальный рост ВТСП пленки. Последний предпочтительнее из-за лучшего согласования параметров его кристаллической решетки с ВТСП материалом, однако прямое эпитаксиальное наращивание его на Si (100) не удается. Поэтому в качестве буфера используются как слои YSZ, так и двойные эпитаксиальные слои CeO_2/YSZ .

В работе [29] пленки YBCO и буферные слои YSZ изготавливались лазерной абляцией в *in situ* процессе. Пленки YBCO толщиной 500 Å имели высокую степень кристаллического совершенства, узкую ширину перехода порядка 1 К, высокую плотность критического тока $2,2 \times 10^6$ А/см² при 77 К, но оставались напряженными из-за большой разницы в коэффициентах термического расширения между Si и YBCO.

В [30] было показано, что нанесение слоя YSZ может производиться при температуре подложки, пониженной до 650 °С, обеспечивая получение менее напряженных буферных слоев и уменьшая тем самым вероятность разрушения мембраны в процессе изготовления пленочных структур. В этой же работе особое внимание уделено подготовке поверхности кремния перед нанесением тонкопленочных структур.

Технология получения структуры YBCO/ CeO_2 /YSZ с двойным буферным слоем описана в [31]. Слои осаждались *in situ* лазерной абляцией из разных мишеней на Si (001)-подложку. Получены качественные эпитак-

сиальные с-ориентированные YBCO-пленки толщиной 40 нм с критической температурой до 88 К и плотностью критического тока до 10^6 А/см² при 77 К.

Для обеспечения долговременной стабильности параметров ВТСП пленок на них наносятся пассивирующие слои. Эти слои защищают пленки от воздействия атмосферы, которое может привести к их деградации с ухудшением сверхпроводящих свойств и увеличением фликкер-шума. Нанесение Ag, Au или полимерных покрытий может защитить пленку, существенно замедлив деградацию [32–34]. В качестве материала защитного покрытия, как и при изготовлении буферного слоя [35], может быть использован YSZ. Он инертен по отношению к YBCO и может пропускать кислород при температурах 400–500 °С, обеспечивая возможность корректировки содержания кислорода в YBCO-пленке. В работе [34] исследовалось влияние металлических (Au и AgAu) пассивирующих слоев на уровень шума YBCO-пленок. Оригинальная технология пассивации окислами PtO_x позволила путем металлизации этих окислов при их лазерной обработке получать надежные электрические контактные слои [36].

2.2. Одночные болометры на Si- и Si/SiN-мембранах

Конструктивные особенности болометра мембранного типа поясняет рис. 5. В массивной подложке тем или иным способом формируется мембранное окно толщиной не более 1 мкм. Чувствительным элементом служит тонкая ВТСП пленка с рабочей температурой, соответствующей температуре середины сверхпроводящего перехода. Пленка распола-

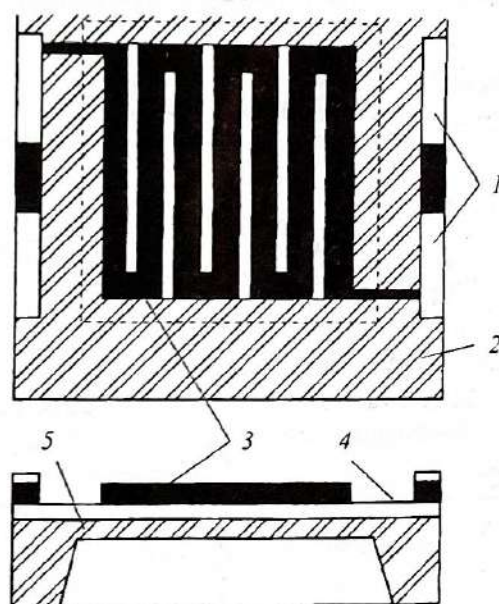


Рис. 5. Конструкция болометра мембранного типа. 1 – контактные площадки, 2 – подложка, 3 – ВТСП пленка, 4 – буферный слой, 5 – мембрана.

гается на мембране, что обеспечивает высокую степень теплоизоляции пленки от массивной подложки и, соответственно, высокую чувствительность приемника. В принципе такая конструкция позволяет получить многоэлементные мембранные структуры с однородными теплофизическими свойствами.

Основное различие в разрабатываемых конструкциях, пригодных для изготовления матриц на их основе, заключается в технологии изготовления мембраны. Мембрана может быть сформирована вытравливанием Si-подложки со стороны, обратной рабочей, и представлять собой Si-«окошко» толщиной 0,6–1 мкм в массиве подложки. Один из вариантов этой технологии был развит при разработке приемного устройства для ИК области спектра [26, 36, 37].

В подложке из (100)-ориентированного монокристалла кремния в растворе КОН вытравливалась полость так, что над ней формировалась мембрана из кремния, легированного бором, с размерами 1 мкм × 1 мм × 1 мм. На мембрану наносились: буферный слой YSZ толщиной 500 Å, сверхпроводящая пленка $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ толщиной также 500 Å и пассивирующий слой PtO_x [36]. В окончательном виде сверхпроводящая пленка представляла собой меандр, занимающий площадь $0,85 \times 0,85$ мм², с шириной полоски 50 мкм и ее общей длиной 1 см (заполнение 69%).

В работе [38] была предпринята попытка использования мембранной конструкции при разработке ВТСП болометров с электрическим замещением для абсолютных измерений в ИК, видимой и ультрафиолетовой областях спектра. Si-мембрана изготавливалась так же, как в выше цитируемой работе [26]. Особенностью болометра является большой размер приемной площадки 4×4 мм при толщине мембраны 2,8 мкм и расположение пленочного нагревателя на полимерном изолирующем слое поверх ВТСП пленки.

Технологии, при которых материалом несущего слоя мембраны является Si, полностью не исключают образования микротрещин в ВТСП пленках при многократном термоциклировании [15]. Поэтому получили развитие методики, в которых слой кремния удаляется полностью и ВТСП пленка лежит на мембране только из буферного слоя YSZ [10, 16, 39–41] или в качестве мембраны используется многослойная структура YSZ/Si/SiN, в которой очень тонкий (2000 Å) слой монокристаллического кремния исключает термические деформации и появление микротрещин [14].

В этом случае несущей является SiN-мембрана, обладающая большей механической прочностью и гораздо более низкой теплопроводностью по сравнению с кремниевой, что способствует снижению NEP и повышению чувствительности приемника. Однако для выращивания эпитаксиальной сверхпроводнико-

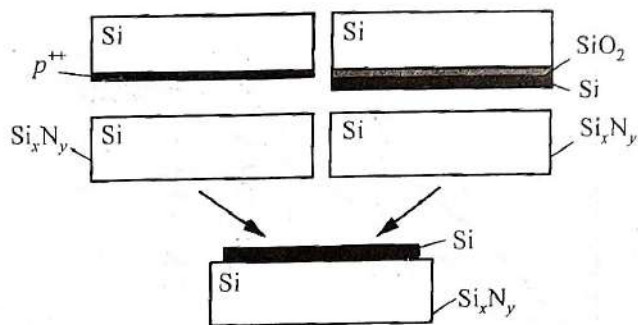


Рис. 6. Технология диффузионного спекания «bond-and-etch-back» [14].

вой пленки необходимо, чтобы поверх SiN-мембраны был слой монокристаллического Si и, соответственно, буферные слои. Для этого была разработана технология диффузионного спекания двух стандартных пластин кремния, на одной из которых химическим осаждением из паровой фазы выращивается одномикронный слой ненапряженного SiN (рис. 6).

Перед спеканием поверхность нитрида кремния улучшается химико-механической полировкой. После спекания пластин тонкий слой Si поверх SiN получают травлением верхней пластины в КОН с изопрпиловым спиртом с остановкой травления на предварительно имплантированном слое бора или двуокиси кремния.

Далее возможны два варианта изготовления мембранного болометра, в которых аналогично уже описанной технологии получается болометр с приемной площадкой $0,85 \times 0,85$ мм, но висящей на 8 «ножках» [42]. В первом варианте (рис. 7) между ножками остается сплошной утоньшенный до 250 нм SiN-слой. Полная площадь мембраны может быть от 2×2 до $4,5 \times 4,5$ мм², соответственно меняется и длина «ножек». Во втором варианте с использованием реактивного ионного травления через маску слой SiN между

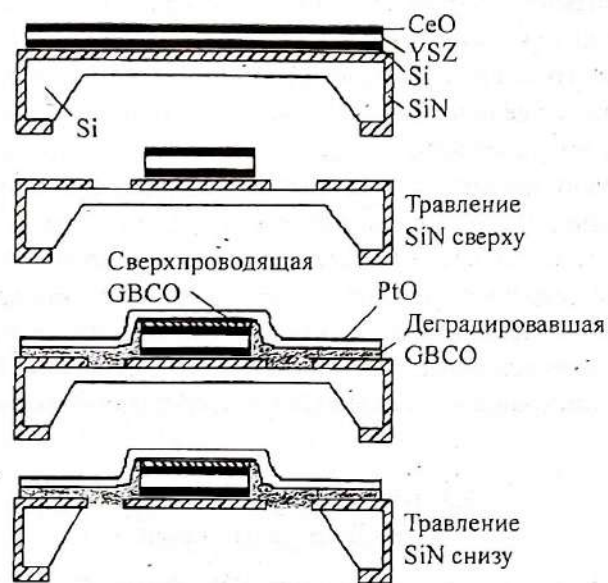


Рис. 7. Технология изготовления SiN-мембранной конструкции [42].

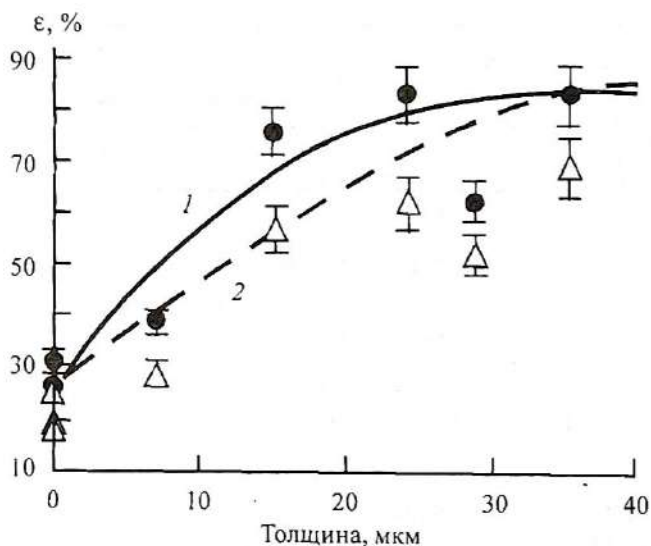


Рис. 8. Коэффициент поглощения золотой черни в зависимости от толщины слоя [43]: 1 – проводимость черни $\sigma = 300 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{м}^{-1}$, 2 – $\sigma = 100 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{м}^{-1}$.

“ножек” удаляется полностью и приемная площадка висит только на “ножках”. Ширина “ножек” 40 мкм и длина – 1,6–2,2 мм для мембраны $4,5 \times 4,5 \text{ мм}^2$. Вывешивание на ножках уменьшает G примерно в 7 раз по сравнению со сплошной SiN-мембраной.

Рассмотренная выше технология исключает фотолитографические процессы по ВТСП пленке на кремнии, которые часто приводят к деградации пленок и ухудшению их параметров.

Для увеличения поглощения и улучшения равномерности спектральной характеристики болометров в дальней ИК области спектра, для которой эти болометры предназначаются, использовались поглощающие покрытия. Измеренный коэффициент поглощения мембранной конструкции без дополнительного покрытия составлял примерно 0,26% в области 2–15 мкм [26]. В качестве поглотителя использовали золотую чернь, которая наносилась испарением золота в азотной атмосфере [43]. На рис. 8 показана зависимость коэффициента поглощения ϵ от толщины слоя золотой черни. Видно, что ϵ растет с увеличением толщины и при толщине 25 мкм составляет 83%. Сопоставлением постоянной времени приемника до и после нанесения черни было определено, что она меняется незначительно.

Достоинством описанной конструкции является возможность получения элементов с большой приемной площадкой – до нескольких квадратных миллиметров, что перспективно при создании ВТСП болометров для длинноволновой ИК спектроскопии.

2.3. ВТСП микроболометры и линейки на их основе

При изготовлении линеек и матриц на основе ВТСП микроболометров формирование мембранных структур проводится вытравливанием сверху

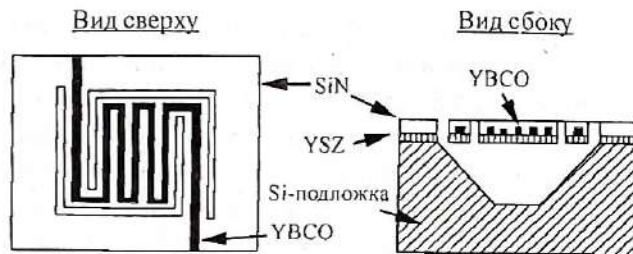


Рис. 9. Мембранный микроболометр [10].

кремния под чувствительным элементом с применением как жидкостного, так и ионно-плазменного травлений [10, 16, 39–41]. В этом случае может быть обеспечен большой коэффициент заполнения матрицы, более высокая механическая прочность всей подложки и большая гибкость по регулированию соотношения теплоемкости и теплопроводности, то есть тепловой постоянной времени микроболометра и его чувствительности.

В [10] описана технология, разработанная для изготовления мембранных микроболометров с линейными размерами мембран от 50 до 150 мкм (рис. 9). Мембрана состоит из нескольких слоев (по порядку снизу): буферный слой YSZ (1100 \AA), YBCO-пленка (680 \AA), пассивирующий слой YSZ (300 \AA), сверху несущий слой SiN общей толщиной 1 мкм. Как видно, в данном случае меандр из ВТСП пленки заключен между слоями YSZ и вывешен над ямкой на “ножках” – своих крайних полосках. Ямки формируются жидкостным травлением сверху через окошки в SiN и YSZ. При размере мембраны $105 \times 140 \text{ мкм}$ длина ножек 200 мкм, ширина – 8 мкм.

Измеренная чувствительность элементов в линейке микроболометров формата 1×64 , изготовленных по такой технологии [39], менялась менее чем на 20% по всей длине 6-миллиметровой линейки. Коэффициент заполнения линейки составлял 74%, выход годных образцов был на уровне 50%. Авторы считают, что потери обусловлены в основном неудовлетворительной пассивацией YBCO-пленки и нарушением целостности SiN слоя через проводники и контактные площадки.

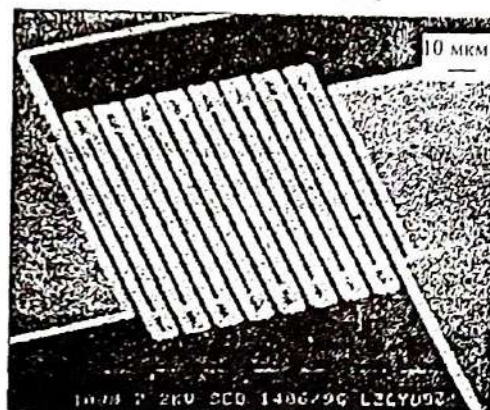


Рис. 10. Микроболометр в виде висящих мостиков [16, 40].

Параметры ВТСП болометров мембранного типа

№ образца	Лит. источник	Мембрана	A/t , мкм ² /мкм	T_b , К	R_b , Ом	β , 1/К	G , мкВт/К	τ , мс	S_V , кВ/Вт	D^* , см Гц ^{1/2} /Вт	$D^*/\tau^{1/2}$, см Гц/Вт
1	[5, 26]	YSZ/Si	850×850/1	84,5	6400	0,6	300	0,4	0,85	$3,8 \times 10^9$	$1,9 \times 10^{11}$
2	10	YSZ	140×105/0,07	80,7	8000	0,6	0,085	110	32	8×10^9	$2,2 \times 10^{10}$
3	14	YSZ/Si/SiN	970×970/1	89,9	3600	3,8	15	115	4,76	$1,8 \times 10^{10}$	7×10^{10}
4	38	CeO/YSZ/Si	4000×4000/2,8		0,4		1900	16,8		$4,1 \times 10^9$	$3,2 \times 10^{10}$
5	16	CeO/YSZ	100×100/0,08	85			0,62	0,56	12	$2,5 \times 10^9$	$1,1 \times 10^{11}$
6	44	CeO/YSZ	50×50/0,16	88,7	50	3	0,8	1,2	5,6	$4,2 \times 10^9$	$1,2 \times 10^{11}$
6	44	CeO/YSZ	50×50/0,16	71,7	100	2,4	0,3	5	3,1	8×10^9	$1,1 \times 10^{11}$
7	42	CeO/YSZ/Si/SiN	970×970/0,62	88,7	8000	1,1	3,5	550	2,5	$5,4 \times 10^{10}$	$7,3 \times 10^{10}$
8	48	YSZ/Si/SiN	850×850/1	90,5	7400	1,5	110	6	1,73	$5,6 \times 10^9$	$7,3 \times 10^{10}$

* GBCO-пленка, другие – YBCO-пленки; t – толщина мембраны; S_V и D^* получены из оптических измерений; только болометры № 3 и № 7 имели поглощающее покрытие – золотую чернь с $\epsilon \approx 70\%$. Размеры SiN-мембраны для образцов: № 3 – 3×3 мм, № 8 – 1,2×1,2 мм.

В [16, 40] предложена технология, при которой каждая из полосок меандра оказывается отдельно вывешенной между Si-пьедесталами, находящимися в поворотных точках меандра. Размеры меандра – 100×100 мкм, число полосок – 17, ширина полоски 4 мкм. После формирования меандра (рис. 10)

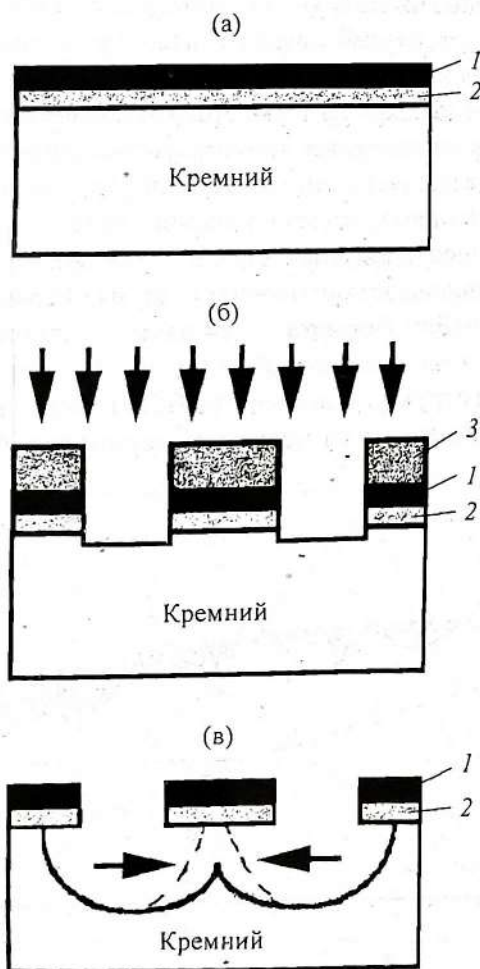


Рис. 11. Технология изготовления микроболометра, показанного на рис. 10 [16, 40]. а – напыление, б – фотолитография и ионное травление YBCO до кремния, в – реактивное ионное травление в SF₆. 1 – YBCO, 2 – буферные слои, 3 – фоторезист.

в YBCO-пленке и буферном CeO₂/YSZ-слое изотропным реактивным ионным (Хе) травлением в SF₆ кремний вытравливается из-под полосок меандра, так что YBCO/CeO₂/YSZ-пленка оказывается свободно висящей (рис. 11).

По схожей технологии в работе [41] была создана такая же конструкция: свободно висящий меандр с шириной полосок 3 мкм, длиной 210 мкм, также поддерживаемый лишь Si-пьедесталами в поворотных точках. Коэффициент поглощения приемника оценивается в 1%, но, по мнению авторов, он может быть увеличен нанесением поглощающих покрытий. Интересно отметить, что изготовленные образцы не подвержены деградации и не требуют пассивирующих слоев.

Достоинством рассмотренных технологий является то, что Si полностью удаляется из-под чувствительного элемента после выращивания ВТСП пленки. Характерной особенностью является необходимость обеспечения доступа травителя сверху под вывешиваемую структуру, что накладывает ограничения на ее площадь. Поэтому они более перспективны для создания линеек и матриц с размерами элементов меньше 100×100 мкм.

3. Характеристики ВТСП болометров мембранного типа

В этом разделе приведены экспериментальные данные по характеристикам для одиночных ВТСП болометров с большими приемными площадками и для микроболометров в составе линеек и матриц. Размеры чувствительных элементов, теплофизические данные и рабочие характеристики образцов приведены в таблице и на рис. 12–15.

На рис. 12 приведены температурные зависимости сопротивления и напряжения шума для одного из первых высокочувствительных GBCO-болометров на кремниевой мембране с большой приемной

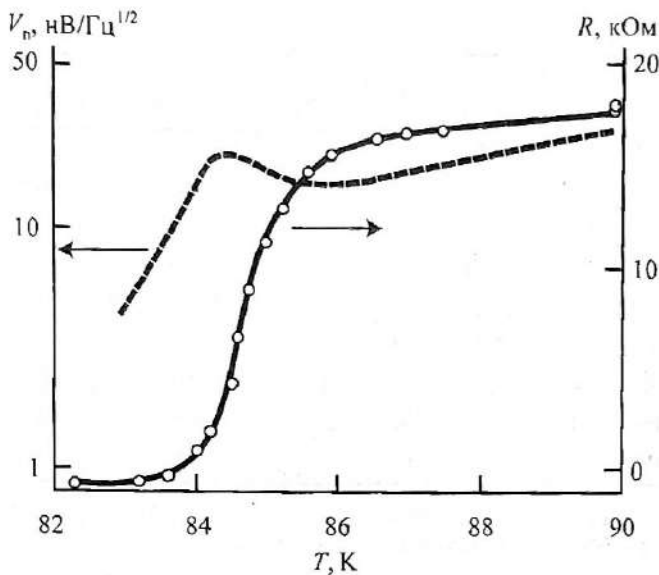


Рис. 12. Температурные зависимости сопротивления и напряжения шума одиночного GBCO-болометра на кремниевой мембране [26].

площадкой [26] (см. разд. 2.2). Пик шума соответствует максимуму крутизны перехода dR/dT , доказывая преобладание фоновой составляющей шума.

Спектральные исследования шумов (см. рис. 13) также подтвердили возможность достижения обнаружительной способности D^* на уровне ограничения фоновым шумом [15]. Из рис. 13 видно, что на частотах $f < 10$ Гц $1/f$ -шум является доминирующим и плотность мощности шума V_n^2 следует зависимости: $V_n^2 \sim 1/f^{(0.8-1.0)}$. При рабочих температурах и на частотах $10 < f < 200$ Гц в области максимального сигнала болометра плотность мощности шума

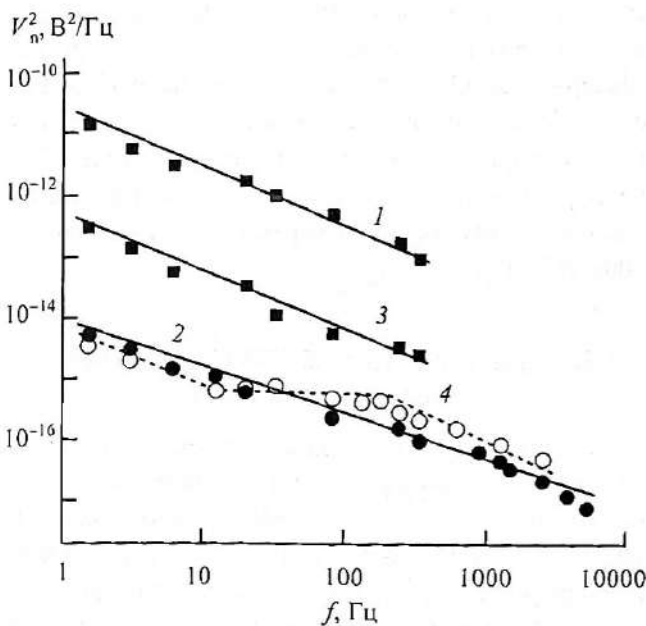


Рис. 13. Спектр плотности мощности шума $V_n^2(f)$ GBCO-болометра на YSZ/Si-мембране [15]. Свежий образец № 1: 1 - $I_b = 0,24$ мА, $T = 300$ К; 2 - $I_b = 1,1$ мА, $R_b = 0,001R_N$; свежий образец № 2: 4 - $I_b = 0,24$ мА, $R_b = 0,3R_N$; деградированный образец № 2: 3 - $I_b = 0,24$ мА, $R_b = 0,5R_N$.

V_n^2 имеет плато, обусловленное доминированием фоновым шумом. Фликкер-шум на частотах выше 10 Гц уменьшается, в то время как фоновый шум имеет постоянный уровень до 200 Гц. На более высоких частотах фоновый шум начинает уменьшаться как $V_n^2 \sim 1/f^2$, то есть сильнее, чем избыточный токовый $1/f$ -шум. В результате суммарный шум на высоких частотах обусловлен в основном джонсоновским шумом.

На рис. 14 представлен типичный спектр напряжения шума $V_n(f)$ для GBCO-болометра на YSZ/Si/SiN-мембране при постоянном токе смещения. Этот болометр отличается от рассмотренного выше на YSZ/Si-мембране меньшей тепловой проводимостью и, соответственно, большей постоянной времени, однако и более высокой чувствительностью (см. № 3 в таблице). Показаны расчетные спектры фоновым, джонсоновского шума, аппроксимированного $1/f$ -шума и шума измерительной установки и их суммарное значение. Можно отметить, что на частотах между 0,2 и 3 Гц измеренный спектр также полностью определяется фоновым шумом.

О достижении фоновым предела для микроболометров, разрабатываемых для матриц, сообщалось в работах [10, 44]. Однако на низких частотах все же преобладал $1/f$ -шум. Авторы указывают на несколько возможных источников этого шума: структурное несовершенство ВТСП пленок, шум контактов, температурные флуктуации криоохладителя и шум предусилителей. Из рис. 15 видно, что частотная зависимость измеренного шума микроболометра линейки формата 1×64 заметно отличается от расчетного в области $f < 2$ Гц.

На структурное качество ВТСП пленки на кремнии воздействуют несколько механизмов: большие

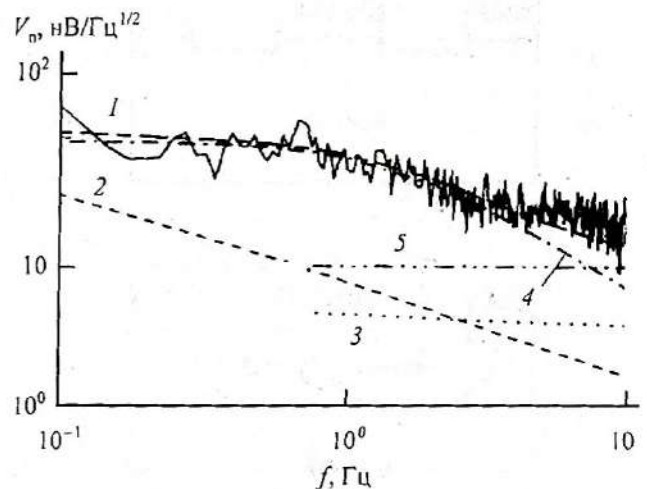


Рис. 14. Частотная зависимость напряжения V_n шума GBCO-болометра на YSZ/Si/SiN-мембране при $T = 98,5$ К, $I_b = 17,8$ мкА, $R_b = 1,89$ кОм [14]. 1 - сумма, 2 - $1/f$ шум, 3 - джонсоновский шум, 4 - фонов. шум, 5 - измерительный уровень.

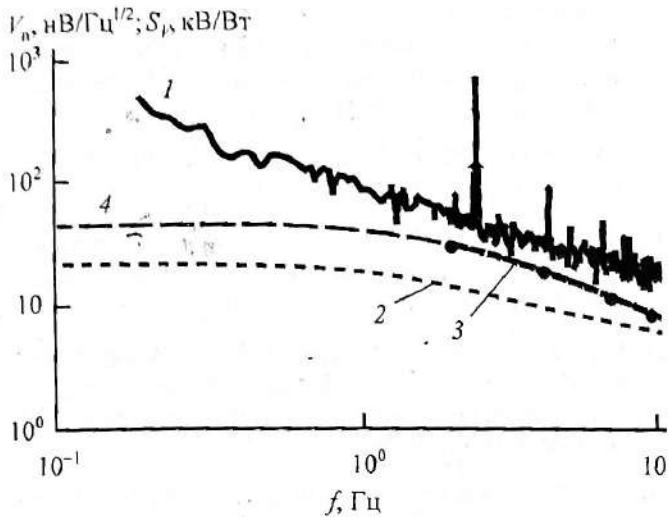


Рис. 15. Частотные зависимости измеренных и расчетных напряжений шума и чувствительностей YBCO-микроболометра [39]. 1 – измеренный шум, 2 – теоретический шум, 3 – измеренная чувствительность, 4 – теоретическая чувствительность.

расхождения в параметрах решеток между буферным слоем и сверхпроводящей пленкой; большое различие в коэффициентах теплового расширения и их температурных зависимостях для ВТСП пленки и подложки, что приводит вследствие термоциклов к появлению микротрещин вдоль кристаллографических направлений; несплошность буферного слоя, приводящая к диффузии материала подложки в ВТСП пленку. Эти факторы могут являться причиной деградации пленки, ухудшения ее электрофизических параметров и в первую очередь увеличения уровня избыточного $1/f$ -шума [15, 45]. Увеличение шума сопровождается появлением узких температурно-зависимых пиков шума на “хво-

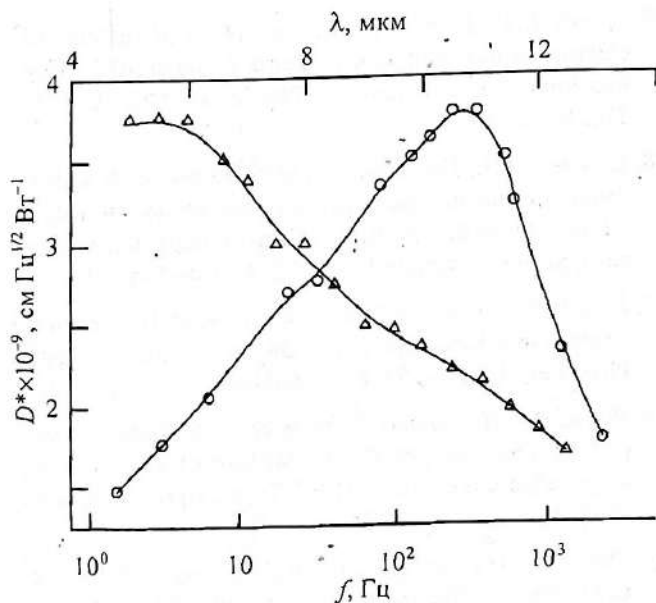


Рис. 16. Экспериментальные зависимости D^* от длины волны оптического излучения (Δ) и частоты его модуляции (O) для болометра № 1 в таблице [26].

сте” сверхпроводящего перехода, что детально исследовалось в ряде работ [15, 45–47].

Рис. 16 иллюстрирует экспериментальные зависимости D^* от длины волны оптического излучения и частоты его модуляции для болометра № 1 в таблице [26]. Обнаружительная способность достигает максимума, обусловленного коэффициентом поглощения чувствительного элемента $\epsilon = 0,26$, на длинах волн $\lambda \approx 5\text{--}7$ мкм при частоте модуляции в области 300 Гц, что соответствует ограничению чувствительности фоновым шумом.

В работе [48] сообщались результаты исследования режима с активной отрицательной электротепловой обратной связью для болометра, конструктивно выполненного подобно образцу № 3 в таблице. Этот болометр № 8 (в таблице приведены параметры в режиме с постоянным током смещения) отличается отсутствием золотой черни и меньшими размерами SiN-мембраны. Используя аналоговую электронную схему, удалось получить коэффициент отрицательной электротепловой обратной связи около 15 и во столько же раз повысить быстродействие болометра при сохранении величины инвариантного параметра $D^*/\tau^{1/2} = (7\text{--}10) \times 10^{10}$ см Гц/Вт.

Болометр № 4 в таблице [38], разрабатываемый для радиометрических измерений, имеет очень низкое сопротивление – порядка 0,4 Ом, так как YBCO-пленка имела форму квадрата. По этой причине D^* болометра была ограничена шумом предусилителя.

4. Заключение

Рассмотренные выше технологии изготовления ВТСП болометров доказывают возможность их совместности с технологической базой современной планарной микроэлектроники, что делает очень перспективной разработку болометрических фотоприемных устройств различного назначения. Мембранные структуры обеспечивают высокую тепловую изоляцию (коэффициент теплопотерь болометра $G \approx 10^{-7}$ Вт/К) и малую теплоемкость чувствительного элемента ($C \approx 10^{-9}$ Дж/К) и позволяют широко варьировать размеры приемных площадок от 50×50 мкм до 3×3 мм, быстродействие болометра от 10^{-1} до 10^{-4} с и обнаружительную способность D^* до $5,4 \times 10^{10}$ см Гц $^{1/2}$ /Вт.

На основе ВТСП болометров с использованием средств современной кремниевой микроэлектроники возможна разработка линеек и матриц большого формата, интегрированных со схемами считывающей электроники, с обнаружительной способностью D^* до 8×10^9 см Гц $^{1/2}$ /Вт. Такие многоэлементные приемники излучения линейного типа будут отличаться равномерной чувствительностью в широком спек-

ральном диапазоне от УФ до ИК области. Их использование возможно в видеоспектрометрических комплексах, в составе оптико-электронных систем воздушного и космического базирования, в прецизионной тепловизионной технике.

Работа выполнена с частичной поддержкой ФЦП "Интеграция", проект Б 0034, РФФИ "Ведущие научные школы", грант 00-15-99-067.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kruse P.W. Physics and applications of high- T_c superconductors for infrared detectors // *Semicond. Science and Technol.* 1990. V. 5. P. S229-S240.
2. Хребтов И.А. Сверхпроводниковые инфракрасные и субмиллиметровые приемники излучения (обзор) // *ОМП.* 1991. № 5. Т. 58. С. 3-16.
3. Richards P.L. Bolometers for infrared and millimeter waves // *J. Appl. Phys.* 1994. V. 76. P. 1-24.
4. Zhang Z.M., Frenkel A. Thermal and nonequilibrium responses of superconductors for radiation detectors // *J. Supercond.* 1994. V. 7. P. 871-884.
5. Kraus H. Superconductive bolometers and calorimeters // *Super. Sci. Technol.* 1996. V. 9. P. 827-842.
6. Richards P.L., Clarke J., Leoni R. et al. Feasibility of the high- T_c superconducting bolometer // *Appl. Phys. Lett.* 1989. V. 54. P. 283-285.
7. Хребтов И.А. Анализ параметров ВТСП-болометров // *Сверхпроводимость: физика, химия, техника.* 1992. Т. 5. С. 555-563.
8. Verghese S., Richards P.L., Char K. et al. Feasibility of infrared imaging arrays using high- T_c superconducting bolometers // *J. Appl. Phys.* 1992. V. 71. P. 2491-2498.
9. Johnson B.R., Kruse P.W. Silicon microstructure superconducting microbolometer infrared arrays // *Proc. SPIE.* 1993. V. 2020. P. 2-11.
10. Johnson B.R., Foote M.C., Marsh H.A., Hunt B.D. Epitaxial $YBa_2Cu_3O_7$ superconducting infrared microbolometers on silicon // *Proc. SPIE.* 1994. V. 2267. P. 24-30.
11. Леонов В.Н., Хребтов И.А. Антенные тепловые приемники излучения (обзор) // *ПТЭ.* 1993. № 4. С. 11-38.
12. Rice R., Grossman E.N., Rudman D.A. Antenna-coupled high- T_c air bridge microbolometer on silicon // *Appl. Phys. Lett.* 1994. V. 65. P. 773-775.
13. Gaugue A., Ulysse C., Adam A. et al. High- T_c hot electron superconducting bolometer for terahertz applications // *Physica C.* 2002. V. 372-376. P. 383-386.
14. Nivelle M.J.M.E. de, Bruijn M.P., Vries R. de et al. Low noise high- T_c superconducting bolometers on silicon nitride membranes for far-infrared detection // *J. Appl. Phys.* 1997. V. 82. P. 4719-4726.
15. Neff H., Khrebtov I.A., Tkachenko A.D. et al. Noise bolometric performance and aging of thin high T_c superconducting films on silicon membranes // *Thin Solid Films.* 1998. V. 324. P. 230-238.
16. Mechin L., Villegier J., Bloyet D. Suspended epitaxial $YBaCuO$ microbolometers fabricated by silicon micro-machining: Modeling and measurements // *J. Appl. Phys.* 1997. V. 81. P. 7039-7047.
17. Mather J.C. Bolometer noise: nonequilibrium theory // *Appl. Opt.* 1982. V. 21. P. 1125-1129.
18. Lee A.T., Richards P.L., Nam S.-W. et al. Superconducting bolometer with strong electrothermal feedback // *Appl. Phys. Lett.* 1996. V. 69. P. 1801-1803.
19. Lee A.T., Gildemeister J.M., Lee S.-F. et al. Voltage-biased high- T_c superconducting infrared bolometers with strong electrothermal feedback // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 1997. V. 7. P. 2378-2381.
20. Neff H., Lima A.M.N., Deep G.S. et al. Nonlinearity and electrothermal feedback of high- T_c transition edge bolometers // *Appl. Phys. Lett.* 2000. V. 76. P. 640-642.
21. Иванов К.В., Хребтов И.А. Сверхпроводниковые болометры с электротепловой обратной связью // *Оптический журнал.* 2001. Т. 68. № 12. С. 79-87.
22. Hooge F.N., Kleinpenning T.G., Vandamme L.K. Experimental studies of $1/f$ noise // *Rep. Prog. Phys.* 1981. V. 44. P. 479-532.
23. Kiss L.B., Svedlindh P. Noise in high T_c superconductors // *IEEE Trans. Electron. Devices.* 1994. V. 4. P. 2112-2122.
24. Neff H. Modelling and optimisation of high- T_c superconducting bolometers: The effect of film thickness // *J. Appl. Phys.* 1991. V. 69. P. 8375-8379.
25. Korte P.A.J. de, Nivelle M.J.M.E. de, Winjbergen J.J. Bolometric detector for OH-observation // *Proc. SPIE.* 1995. V. 2578. P. 294-303.
26. Neff H., Laukemper J., Khrebtov I.A. et al. Sensitive high- T_c transition edge bolometer on a micromachined silicon membrane // *Appl. Phys. Lett.* 1995. V. 6. P. 2421-2423.
27. Ivanov K.V., Lima A.M.N., Neff H. et al. Effects of electrothermal feedback on high- T_c superconducting transition edge bolometers // *Physica C.* 2002. V. 372-376. P. 432-435.
28. Бешенков В.Г., Головчанский М.Е., Марченко В.А. Взаимодействие на границах раздела монокристалла $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ с Si, SiC, SiO₂ // *Сверхпроводимость: физика, химия, техника.* 1989. Т. 2. С. 136-140.
29. Fork D.K., Fenner D.B., Barton R.W. et al. High critical currents in strained epitaxial $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ on Si // *Appl. Phys. Lett.* 1990. V. 57. P. 1161-1163.
30. Burnus M., Heidenblut T., Nefle G. et al. Reduced temperature processing of YSZ buffer layers for HTSC transition edge bolometer // *IEEE Trans. Appl. Supercon.* 1993. № 5. P. 2419-2422.
31. Mechin L., Villegier J.C., Rolland G., Laugier F. Double CeO₂/YSZ buffer layer for the epitaxial growth of $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ films on Si (001) substrates // *Physica C.* 1996. V. 269. P. 124-130.
32. Протасов Е.А., Собакин И.В., Скопинцев Ю.П., Иванов А.А. Стабилизация критических параметров тонких

- пленок Y-Ba-Cu-O с помощью пассивирования серебром // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. В. 17. С. 86-90.
33. *Morohashi S., Tamura H., Yoshida A., Hasuo S.* Plasma polymerization for high T_c oxide superconductors // *Appl. Phys. Lett.* 1988. V. 52. P. 1897-1898.
 34. *McDonald D.G., Phelan R.J., Vale Jr.L.R. et al.* Passivation, transition width, and noise for YBCO bolometers on silicon // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 1999. V. 9. P. 4471-4474.
 35. *Кравченко К.Ю., Марченко В.А.* Защита пленок $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ от атмосферной деградации // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. В. 24. С. 45-49.
 36. *Steenbeck K., Steinbeiss E., Redlich L. et al.* Passivation contacting of HTC film structure // In Freghardt H.C. (ed.) *Appl. Superconductivity*. DGM Verlag, Oberursel., 1993. P. 1593-1596.
 37. *Burnus M., Nefle G., Heidenblut T. et al.* IR detection system based on high- T_c superconducting bolometer on Si membrane // *Proc. SPIE.* 1996. V. 2746. P. 290-296.
 38. *Vale L.R., Ono R.H., McDonald D.G., Phelan R.J.* Large area $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ bolometers on Si substrates // *Supercond. Sci. Technol.* 1999. V. 12. P. 856-858.
 39. *Johnson B.R., Foote M.C., Marsh H.A.* High performans linear arrays of $YBa_2Cu_3O_7$, superconducting infrared microbolometers on silicon // *Proc. SPIE.* 1995. V. 2475. P. 56-60.
 40. *Mechin L., Villegier J., Langlois P. et al.* Sensitive IR bolometers using superconducting $YBaCuO$ air bridges on micromachined silicon substrates // *Sensors&Actuators.* 1996. V. A55. P. 19-23.
 41. *Barth R., Siewert J., Jaekel C., Wolf H.* Epitaxial $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ air-bridge microbolometers on silicon substrates // *J. Appl. Phys.* 1995. V. 78. P. 4218-4221.
 42. *Nivelle M.J.M.E. de, Bruijn M.P., Korte P.A.J. de et al.* High- T_c bolometers with silicon-nitride spiderweb suspension for far-infrared detection // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 1999. V. 9. P. 3350-3356.
 43. *Becker W., Fettig R., Gaymann A., Ruppel W.* Black gold deposit as absorber for far Infrared Radiation // *Phys. Status Solidi.* 1996. V. B 194. P. 241-255.
 44. *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. P. 2125-2127.
 45. *Khrebtov I.A.* Noise properties of high temperature superconducting bolometers // *Fluctuation and Noise Letters.* 2002. V. 2. № 2. P. R51-R70.
 46. *Леонов В.Н., Хребтов И.А.* Исследование шумов $YBaCuO$ микроболметров // *Сверхпроводимость: физика, химия, техника.* 1991. Т. 4. P. 1371-1376.
 47. *Bobyl A.V., Gaevski M.E., Karmanenko S.F. et al.* Magneto-depending noise of a single latent weak link in $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ film // *Physica C.* 1996. V. 266. P. 32-40.
 48. *Хребтов И.А., Ткаченко А.Д., Иванов К.В., Штайнбайс Е.* Исследование режима активной электротепловой отрицательной обратной связи для высокотемпературного сверхпроводникового болометра // *Оптический журнал.* 2001. Т. 68. № 4. С. 63-67.