

УДК 681.7:539.216.22

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ БОЛОМЕТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА ВАНАДИЯ И АМОРФНОГО ГИДРИРОВАННОГО КРЕМНИЯ

*В. Г. Маляров, И. А. Хребтов, Ю. В. Куликов,
И. И. Шаганов, В. Ю. Зеров*
ВНЦ "ГОИ им. С. И. Вавилова", С.-Петербург, Россия

Н. А. Феоктистов
ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург, Россия

Выбор материала чувствительного элемента неохлаждаемой микроболометрической матрицы в значительной степени определяет ее предельные параметры. В статье представлены результаты исследований сэндвичных и плоскостных болометрических структур на основе пленок $aSi:H$ и VO_2 соответственно. Пленки $aSi:H$ изготовлены методом плазмохимического газофазного осаждения, пленки VO_2 — методом реактивного магнетронного ионно-плазменного распыления. Сэндвичные структуры при площади 100×100 мкм имеют сопротивление ~ 20 кОм и температурный коэффициент сопротивления (ТКС) ≈ 2 %/К при 25 °С. Плоскостные структуры с рабочим участком 100×70 мкм при том же сопротивлении имеют ТКС $2,9$ %/К. Найдены способы снижения контактного шума тех и других структур. Сэндвичи, построенные в виде оптических резонаторов, поглощают 80 % излучения на длине волны 8 мкм. Показано, что может быть достигнуто поглощение плоскостных структур 50 – 80 % в полосе $8,5$ – 10 мкм.

Ключевые слова: неохлаждаемая матрица, микроболометр, плоскостная структура, сэндвичная структура, термочувствительный элемент, температурный коэффициент сопротивления, избыточный шум.

Введение

В последние годы активно разрабатываются многоэлементные ИК-премники нового типа — неохлаждаемые болометрические, пироэлектрические и термоэлектрические матрицы [1—4]. Макеты тепловизионных приборов (ТВП) на основе неохлаждаемых матриц [1, 2, 4] по температурной чувствительности приближаются к современным ТВП, в которых используются криогенные фотоэлектрические приемники и выгодно отличаются от них по эксплуатационным характеристикам и стоимости, благодаря отсутствию систем криогенного охлаждения и оптико-механического сканирования, что делает их доступными для широкого использования в промышленности, медицине, экологии, на транспорте и в сфере обслуживания. Болометрические неохлаждаемые матрицы считаются наиболее перспективными, т. к. они не нуждаются в модуляции ИК-потока, а методики их изготовления в наибольшей степени совместимы с современными тонкопленочными микроэлектронными технологиями.

Важным фактором достижения высоких технических характеристик микроболометрических матриц (МБМ) является выбор термочувствительного слоя, имеющего высокий температурный коэффициент сопротивления (ТКС) и низкий уровень избыточного шума, а также обеспечивающего хорошее поглощение излучения в рабочей спектральной области [4]. Высоким ТКС обладают полупроводниковые пленки, но им присущи избыточные токовые шумы. В связи с этим выбор материала чувствительного элемента является многоплановой задачей.

В зависимости от удельного сопротивления термочувствительного слоя возможны несколько вариантов построения чувствительного элемента [1, 3] — сэндвичный, плоскостной и сэндвич-плоскостной (рис. 1).

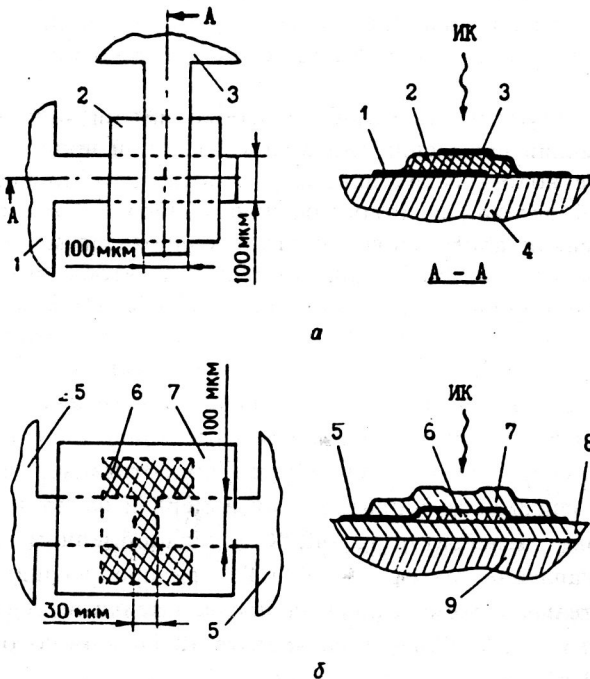


Рис. 1. Устройство микроболометрических структур:

а — сэндвичного типа; б — плоскостного типа;

1 — нижний Сг-электрод; 2 — термочувствительный аSi:H слой; 3 — верхний Сг-электрод; 4 — ситалловая подложка; 5 — Ti электроды; 6 — термочувствительный VO₂-слой; 7, 8 — слои SiO₂; 9 — кремниевая подложка

В структуре первого типа термочувствительный слой заключен между нижним и верхним пленочными металлическими электродами, что позволяет использовать полупроводниковые пленки с сопротивлением 10—100 кОм·см. Во втором случае термочувствительный участок пленки расположен в планарном зазоре между электродами и должен иметь низкое удельное сопротивление — 5—50 Ом·см. Структуры смешанного типа — более сложные в изготовлении, дают возможность применения пленок с промежуточными значениями удельного сопротивления.

В представляемой работе изучены в сравнении сэндвичные и плоскостные микроболометрические структуры с использованием, соответственно, слоев аSi:H и VO_2 . Тестовые структуры изготавливали с использованием съемных медно-никелевых масок. Площадь сэндвичей была $100 \times 100 \text{ мкм}^2$, термочувствительный участок в плоскостных структурах имел размеры $100 \times 70 \text{ мкм}$ (второй размер — зазор между электродами — в некоторых образцах был 30 мкм). Подложками сэндвичных структур были пластинки ситалла, а плоскостных — пластинки кремния (со слоями SiO_2 или Si_3N_4) толщиной 0,5 мм.

Сэндвичные структуры на основе пленок аSi:H

Пленки аморфного или поликристаллического кремния, пригодные для микроболометров, можно получить разнообразными методами [3, 5]. В настоящей работе был использован метод плазмохимического газофазного осаждения (ПХГФО) [6], т. к. он позволяет получать пленки с сопротивлением и ТКС в довольно широких пределах при низких температурах подложек ($\approx 250 \text{ }^\circ\text{C}$) из различных материалов. В качестве электродов использовали пленки хрома, полученные методом магнетронного распыления в аргоновой плазме на постоянном токе.

Изготовление структур Cr-aSi:H-Cr с необходимыми характеристиками сводилось к оптимизации напыления слоев Cr с заданной проводимостью, а также к оптимизации технологических параметров осаждения пленок аSi:H с максимальной энергией активации и достижению наиболее “омических” контактов электродов с пленкой аSi:H. Поверхностное сопротивление электродов (380 и 20 Ом) и толщина пленки аSi:H были выбраны так, чтобы получить оптический резонатор [3], “настроенный” на длину волны 10 мкм. Требуемое полное сопротивление структур (5—20 кОм) достигали слабым легированием пленок аSi:H фосфором, посредством ПХГФО силана с добавлением фосфина.

Для оценки электрофизических свойств изготовленных структур (как сэндвичных, так и плоскостных) проводили измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ), температурных зависимостей сопротивления и спектров шума. Температурные зависимости сопротивления измеряли на постоянном токе 0,1—4 мкА в диапазоне температур 18—40 $^\circ\text{C}$ в теплообменном газе (гелии). Шум исследовали в диапазоне частот 10—1000 Гц при пропускании токов от 0,7 до 12 мкА. Измерительная схема включала предварительный усилитель, собственный шум которого был 9 нВ/Гц^{1/2} на частоте 12 Гц и монотонно снижался до 1,5 нВ/Гц^{1/2} на 1 кГц, и анализатор спектра СК4-56.

Первые полученные высокоомные сэндвич-структуры обладали нелинейными ВАХ, причем при приложении напряжений в несколько вольт разной полярности пропускаемые токи отличались более чем на два порядка. Это различие

температурных зависимостей сопротивления (рис. 2, образец 56-5) свидетельствовало о наличии в контактах барьеров Шоттки. Для улучшения качества контактов в сэндвичи вводили приконтактные слои с повышенной концентрацией носителей (p^+ -слои) разной толщины и степени легирования. Наибольший эффект улучшения контактов получен на образцах с p^+ -слоями толщиной 400 Å и степенью легирования 2 % (см. рис. 2, образец 60-13). Это подтверждалось как совпадением величин сопротивления при разных полярностях приложенного напряжения, так и характером спектров шума (рис. 3, а). В измеренное напряжение шума образца 60-13 основной вклад вносили токовый шум и тепловой (джонсоновский) шум. При токе 1,1 мкА на частоте 30 Гц избыточный токовый шум образца 60-13 превышает джонсоновский шум в 1,7 раза. На частоте 1 кГц при том же токе измеренный шум полностью обусловлен джонсоновским шумом.

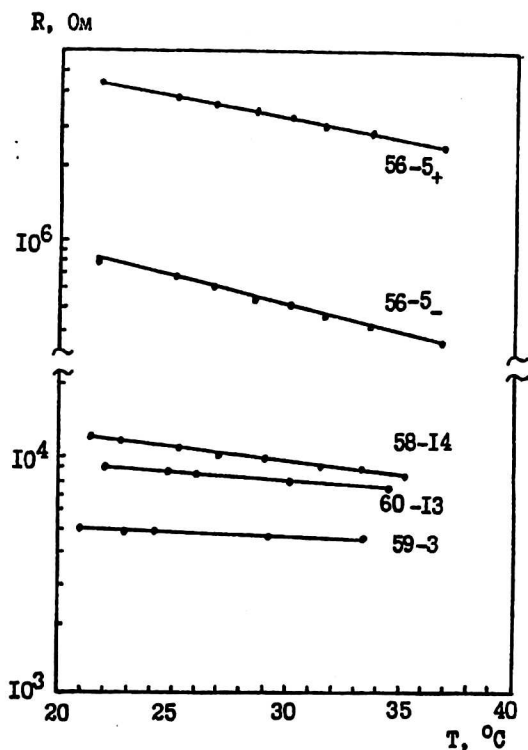


Рис. 2. Температурная зависимость сопротивления сэндвич-структур с приконтактными p^+ -слоями (Уровень легирования термочувствительного слоя образцов, толщина и уровень легирования p^+ -слоев приведены в табл. 1)

Основные результаты электрических и шумовых измерений сэндвич-структур сведены в табл. 1. Максимальным ТКС (2,1 %/К) при сопротивлении 10-17 кОм среди структур с хорошими контактами обладают образцы со степенью легирования aSi:H слоя 0,1 % (образец 58-14). Повышение степени легирования до 0,3 % существенно снизило ТКС (образец 59-1).

В табл. 1 приведены значения шумового параметра H , найденные в соответствии с известной эмпирической формулой низкочастотного токового шума

$$U_I^2 = HI^2 R^2 / f^a, \tag{1}$$

где U_I^2 — спектральная плотность мощности токового шума;

I — ток через образец;

В структуре первого типа термочувствительный слой заключен между нижним и верхним пленочными металлическими электродами, что позволяет использовать полупроводниковые пленки с сопротивлением 10—100 кОм·см. Во втором случае термочувствительный участок пленки расположен в планарном зазоре между электродами и должен иметь низкое удельное сопротивление — 5—50 Ом·см. Структуры смешанного типа — более сложные в изготовлении, дают возможность применения пленок с промежуточными значениями удельного сопротивления.

В представляемой работе изучены в сравнении сэндвичные и плоскостные микроболометрические структуры с использованием, соответственно, слоев аSi:H и VO_2 . Тестовые структуры изготавливали с использованием съемных медно-никелевых масок. Площадь сэндвичей была 100×100 мкм², термочувствительный участок в плоскостных структурах имел размеры 100×70 мкм (второй размер — зазор между электродами — в некоторых образцах был 30 мкм). Подложками сэндвичных структур были пластинки ситалла, а плоскостных — пластинки кремния (со слоями SiO_2 или Si_3N_4) толщиной 0,5 мм.

Сэндвичные структуры на основе пленок аSi:H

Пленки аморфного или поликристаллического кремния, пригодные для микроболометров, можно получить разнообразными методами [3, 5]. В настоящей работе был использован метод плазмохимического газофазного осаждения (ПХГФО) [6], т. к. он позволяет получать пленки с сопротивлением и ТКС в довольно широких пределах при низких температурах подложек (≈ 250 °С) из различных материалов. В качестве электродов использовали пленки хрома, полученные методом магнетронного распыления в аргоновой плазме на постоянном токе.

Изготовление структур Cr-aSi:H-Cr с необходимыми характеристиками сводилось к оптимизации напыления слоев Cr с заданной проводимостью, а также к оптимизации технологических параметров осаждения пленок аSi:H с максимальной энергией активации и достижению наиболее “омических” контактов электродов с пленкой аSi:H. Поверхностное сопротивление электродов (380 и 20 Ом) и толщина пленки аSi:H были выбраны так, чтобы получить оптический резонатор [3], “настроенный” на длину волны 10 мкм. Требуемое полное сопротивление структур (5—20 кОм) достигали слабым легированием пленок аSi:H фосфором, посредством ПХГФО силана с добавлением фосфина.

Для оценки электрофизических свойств изготовленных структур (как сэндвичных, так и плоскостных) проводили измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ), температурных зависимостей сопротивления и спектров шума. Температурные зависимости сопротивления измеряли на постоянном токе 0,1—4 мкА в диапазоне температур 18—40 °С в теплообменном газе (гелии). Шум исследовали в диапазоне частот 10—1000 Гц при пропускании токов от 0,7 до 12 мкА. Измерительная схема включала предварительный усилитель, собственный шум которого был 9 нВ/Гц^{1/2} на частоте 12 Гц и монотонно снижался до $1,5$ нВ/Гц^{1/2} на 1 кГц, и анализатор спектра СК4-56.

Первые полученные высокоомные сэндвич-структуры обладали нелинейными ВАХ, причем при приложении напряжений в несколько вольт разной полярности пропускаемые токи отличались более чем на два порядка. Это различие

температурных зависимостей сопротивления (рис. 2, образец 56-5) свидетельствовало о наличии в контактах барьеров Шоттки. Для улучшения качества контактов в сэндвичи вводили приконтактные слои с повышенной концентрацией носителей (n^+ -слои) разной толщины и степени легирования. Наибольший эффект улучшения контактов получен на образцах с n^+ -слоями толщиной 400 Å и степенью легирования 2 % (см. рис. 2, образец 60-13). Это подтверждалось как совпадением величин сопротивления при разных полярностях приложенного напряжения, так и характером спектров шума (рис. 3, а). В измеренное напряжение шума образца 60-13 основной вклад вносили токовый шум и тепловой (джонсоновский) шум. При токе 1,1 мкА на частоте 30 Гц избыточный токовый шум образца 60-13 превышает джонсоновский шум в 1,7 раза. На частоте 1 кГц при том же токе измеренный шум полностью обусловлен джонсоновским шумом.

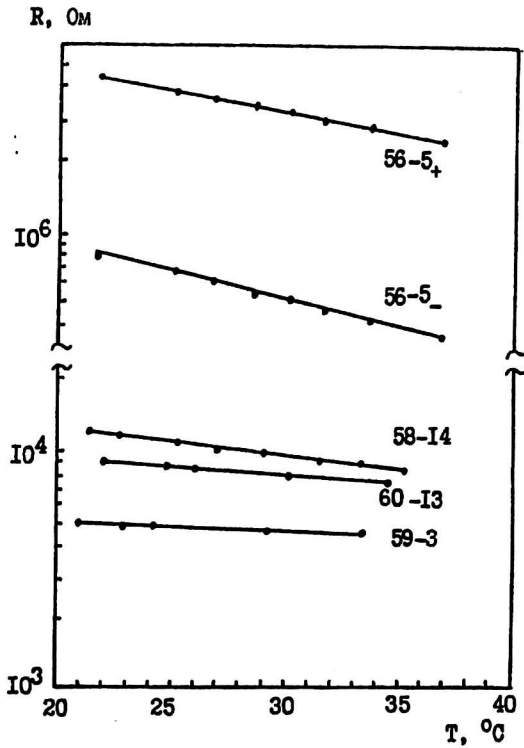


Рис. 2. Температурная зависимость сопротивления сэндвич-структур с приконтактными n^+ -слоями (Уровень легирования термочувствительного слоя образцов, толщина и уровень легирования n^+ -слоев приведены в табл. 1)

Основные результаты электрических и шумовых измерений сэндвич-структур сведены в табл. 1. Максимальным ТКС (2,1 %/К) при сопротивлении 10-17 кОм среди структур с хорошими контактами обладают образцы со степенью легирования $aSi:H$ слоя 0,1 % (образец 58-14). Повышение степени легирования до 0,3 % существенно снизило ТКС (образец 59-1).

В табл. 1 приведены значения шумового параметра H , найденные в соответствии с известной эмпирической формулой низкочастотного токового шума

$$U_I^2 = HI^2 R^2 / f^a, \tag{1}$$

где U_I^2 — спектральная плотность мощности токового шума;

I — ток через образец;

R — сопротивление образца;

f — частота;

a — показатель степени частотной зависимости.

Показатель a для сэндвич-структур был $\sim 1,0$, за исключением образцов с сильнолегированным термочувствительным слоем.

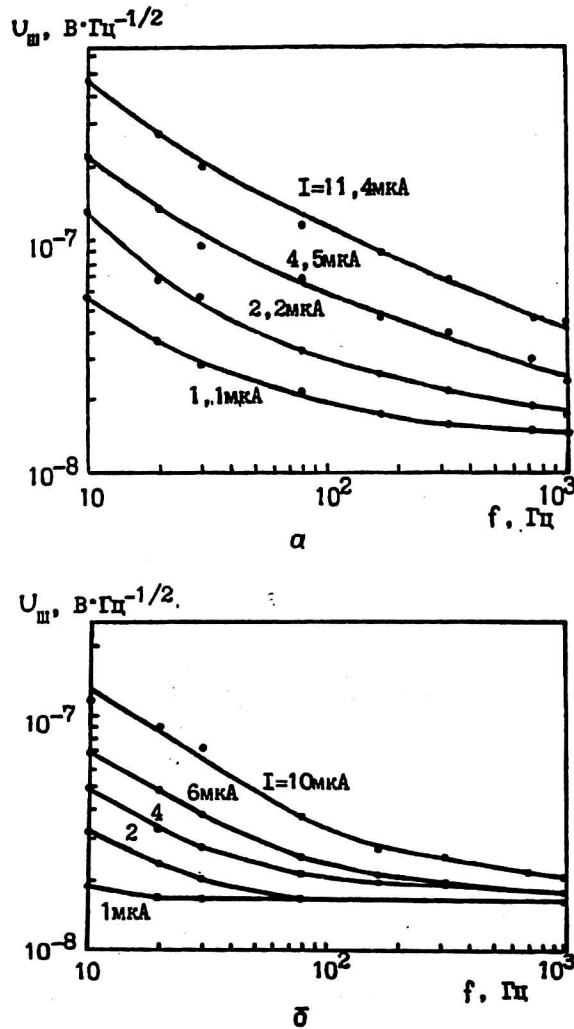


Рис. 3. Частотная зависимость результирующего шума при разных токах: а — сэндвичного образца 60-13; б — образца 12-4-плоскостного типа

Таблица 1

Параметры сэндвичных структур с пленкой $a\text{Si:H}$ и приконтактными n^+ -слоями

Номер образца	R_p , КОМ	R_s , КОМ	K_n , %	K_n^+ , %	dn^+ , А	$ a $, % К	H	a
56-5	773	4400	0,008	0,1	100	5,1 ₊	$8 \cdot 10^{-10}$	1,0
58-14	15,8	16,5	0,1	2	200	2,1 ₊	$5 \cdot 10^{-10}$	1,1
59-1	5,2	5,3	0,3	2	200	0,7	$4 \cdot 10^{-12}$	0,7
60-13	9,1	9,1	0,1	2	400	1,7	$2 \cdot 10^{-10}$	1,0

Отношение максимального к минимальному сопротивлению одной серии сэндвичей (16 образцов на подложке 30x48 мм²) в худшем случае составляло 1,8, а разброс по ТКС не превышал 30 %. Последнее объясняется разбросом электрофизических свойств пленки aSi:H, а причиной первого является, кроме того, разброс в размерах съемных масок и качестве их прилегания к подложке.

Плоскостные структуры на основе VO₂-пленок

Пленки диоксида ванадия для плоскостных структур получали методом реактивного магнетронного ионно-плазменного распыления ванадиевой мишени. После проведения первой серии исследований [7] были выбраны оптимальные основные технологические параметры — парциальное давление кислорода в камере, мощность разряда и плотность тока магнетрона. В настоящей работе варьировали температуру подложки (500—400 °С) и время напыления (30—15 мин)

при средней скорости осаждения 1,8 Å/с. В качестве электродов использовали полученные магнетронным распылением пленки титана с поверхностным сопротивлением 100 Ом, поскольку Ti является наиболее подходящим материалом для микроболометров в матрице.

Плоскостная структура позволяет использовать 4-зондовый метод исследования шума, поэтому топология съемных масок для напыления электродов этих структур предусматривала формирование двух дополнительных “потенциальных” электродов. Это давало возможность выделить из измеренного шума структуры шум контактов термочувствительного слоя с электродами. Этот шум удалось устранить посредством очистки приконтактных зон пленки VO₂ в плазме тлеющего разряда перед напылением пленки Ti.

Пример спектров шума плоскостной структуры с очищенными приконтактными зонами приведен на рис. 3, 6. Результирующее напряжение шума образца 12-4 на частоте 30 Гц при токе 10 мкА в четыре раза превышает напряжение джонсоновского шума, а при токе 1 мкА — равно ему. Степень частотной зависимости токового шума α в (1) для исследованных образцов имела значения в пределах 0,9—1,2.

Отличие плоскостных образцов по шумовому параметру H (табл. 2) и степени α указывает на различие структур пленок VO₂. В работе [8] мы установили некоторые корреляции шумовых характеристик со структурой и технологическими параметрами изготовления пленок VO₂. Такие исследования позволяют в дальнейшем улучшить шумовые характеристики микроболометров.

Таблица 2

Параметры плоскостных структур с VO₂-пленкой и очищенными приконтактными зонами

Номер абзаца	T , °С	t_{\min}	$R_{\text{Г}}$, кОм	$ \alpha $, %/К	H	α
10-3	500	30	9,3	3,0	$4 \cdot 10^{-9}$	1,2
11-4	500	20	17	2,3	$2 \cdot 10^{-9}$	1,2
12-4	450	20	20	2,9	$4 \cdot 10^{-11}$	1,2
16-4	450	15	28	2,9	$2 \cdot 10^{-9}$	1,0
17-6	450	20:3	15	2,5	$2 \cdot 10^{-10}$	0,9

Обозначения в табл. 1 и 2:

R_+ , R_- — сопротивления образца при разных направлениях измерительного тока;

K_n — степень легирования термочувствительного n -слоя;

K_n^+ — степень легирования n -слоев;

d_n^+ — толщина n^+ -слоев;

α — ТКС при 25 °С;

H — шумовой параметр (см. (1));

a — степень частотной зависимости токового шума;
 T — температура напыления;
 t — время напыления;
 R_{\square} — сопротивление единицы площади при 25 °С.

Мы начали также исследование особенностей работы VO_2 болометра в интервале температур, включающем фазовый переход пленки VO_2 [9]. Установлено влияние на чувствительность болометра к модулированному потоку излучения петли гистерезиса температурной зависимости сопротивления пленки и дано его объяснение. Выявлены особенности зависимости избыточного шума болометра в области фазового перехода как от тока, так и от частоты. Задачу выбора и стабилизации рабочей температуры следует решать с учетом параметров конкретного VO_2 -болометра и условий его применения.

Оптические характеристики структур

Обеспечение высокого ИК-поглощения микроболометра является важной задачей разработки МБМ. В микроболометрах для этой цели необходимо использовать оптические свойства тонкопленочных структур, включающих пленки электродов, термочувствительного слоя и пассивирующие пленки, т. к. традиционные для тепловых приемников способы, такие как нанесение чернящих покрытий, здесь не приемлемы.

Структуры сэндвичного типа могут быть использованы в роли оптического резонатора [3]. Для этого поверхностное сопротивление верхнего пленочного электрода должно быть согласовано с волновым сопротивлением вакуума (377 Ом), нижний электрод должен быть высокоотражающим, т. е. иметь поверхностное сопротивление < 20 Ом, а толщина h термочувствительного слоя — удовлетворять соотношению

$$4nh = \lambda, \quad (2)$$

где n — коэффициент преломления слоя; λ — длина волны излучения, которое нужно поглотить.

Чтобы получить резонансное поглощение в сэндвиче со слоем $a\text{Si:H}$ на $\lambda = 10$ мкм, нужна толщина слоя $h = 0,7$ мкм.

В плоскостных структурах можно использовать собственное поглощение слоев, защищающих сверху и снизу термочувствительный слой и интерференционные явления на границах названных слоев. Плоскостная структура не предполагает высокоотражающей металлической пленки под приемной площадкой микроболометра и поэтому часть излучения проходит через нее. С другой стороны, для эффективной теплоизоляции приемной площадки ее отделяют от подложки вакуумным зазором. Это тоже может быть использовано с целью увеличения поглощения микроболометра, если зазор сделать четвертьволновым для центральной длины волны требуемой полосы поглощения.

Исследование оптических свойств сэндвичных и плоскостных структур проводили [10], используя образцы размерами 5×10 и 100×100 мкм, которые получали совместно на одной подложке. Размеры больших образцов позволяли проводить спектрофотометрические измерения с помощью стандартного ИК-оборудования. Измерения спектров пропускания и отражения в диапазоне длин волн $2,5$ — 25 мкм были проведены на двухлучевом спектрометре IR-75, оборудованном дополнительной отражательной приставкой. На малых образцах проведена оценка коэффициента поглощения на длинах волн $10,6$ и $3,4$ мкм путем измерения болометрического отклика образцов на лазерное облучение. В ка-

честве сигналов сравнения принимался отклик структур, покрытых 5—10-мкм слоем черной краски ЕСР-2200 фирмы "ЗМ" (США), поглощающей не менее 96 % излучения в диапазоне 3—22 мкм.

Экспериментальные спектры отражения двух сэндвичных образцов представлены на рис. 4, а. Такая как такие структуры не пропускают излучения, то их спектр отражения дает полную информацию о спектре поглощения. Коэффициент поглощения сэндвичных образцов составляет не менее 60 % в интервале 6—12 мкм и 78—81 % — на 8 мкм. Имеется еще узкая полоса поглощения (76—78 %) вблизи длины волны 2,8 мкм. Измерение поглощения лазерного излучения структур 100x100 мкм дали значения 69 и 51 % на длинах волн 10,6 и 3,4 мкм соответственно. Видно, что оптический резонатор оказался "настроенным" на длину волны 8 мкм из-за того, что толщина полученных пленок аSi:H была ближе к 0,6 мкм и, возможно, из-за расхождения реального значения их коэффициентов преломления с заложенным в расчет. Центральную длину волны полосы поглощения можно сместить до 10 мкм, увеличив толщину пленок аSi:H на 0,1—0,2 мкм.

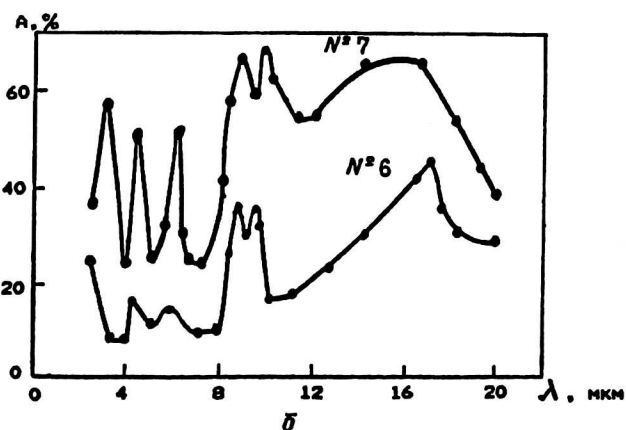
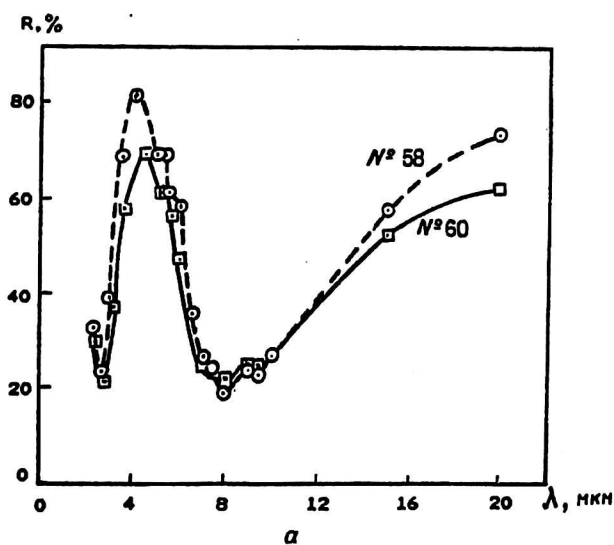
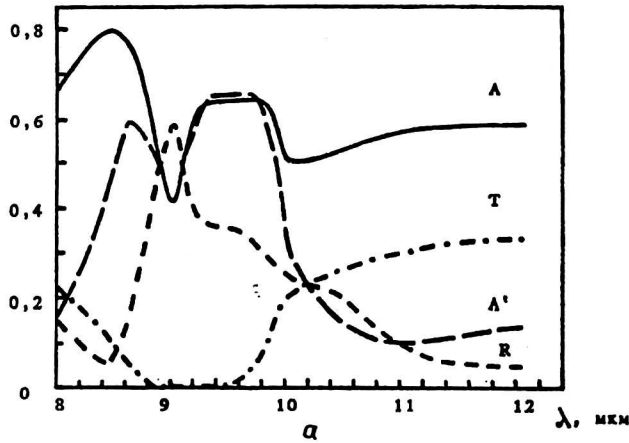


Рис. 4. Экспериментальные спектры отражения (R) и поглощения (A): а — сэндвичных структур; б — плоскостных структур

Спектры поглощения двух образцов плоскостных структур, полученные по измеренным спектрам пропускания и отражения, представлены на рис. 4, б. Образец № 6 содержит пленку VO_2 толщиной 0,3 мкм, нанесенную на пленку SiO_2 толщиной 0,1 мкм, а образец № 7 — на пленку VO_2 толщиной 0,3 мкм, заключенную между двумя пленками SiO_2 толщиной 0,8 мкм. В диапазоне 8—12 мкм образец № 6 поглощает 15—35 % излучения, а образец № 7, отличающийся толщиной нижней SiO_2 пленки и наличием верхней защитной пленки, поглощает 40—67 %. Однако в обоих образцах спектр поглощения формируют многослойные структуры, включающие кремниевую подложку. В микроболометрах, как было отмечено, пленка VO_2 с защитными слоями должна быть отделена от подложки вакуумным зазором. Для этого вытравливают специальный “жертвенный” слой под чувствительным элементом. Измерение спектрофотометрических характеристик таких структур на стандартных ИК-спектрометрах не представляется возможным. Оценить их поглощение можно, сочетая экспериментальные данные с расчетными методами.

На рис. 5, а представлены расчетные спектры отражения, пропускания и поглощения в интервале 8—12 мкм структуры № 7.

A, R, T, отн. ед.



A, R, T, отн. ед.

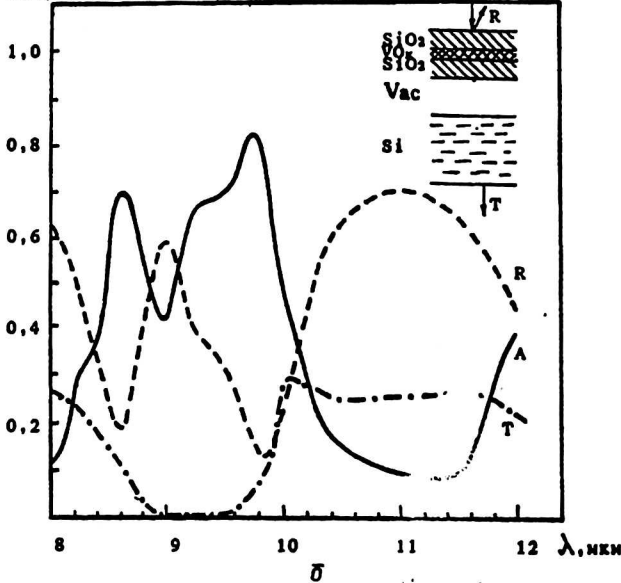


Рис. 5. Расчетные спектры отражения (R), пропускания (T) и поглощения (A): а — образца № 7 (A — спектр поглощения свободной системы $\text{SiO}_2\text{—VO}_2\text{—SiO}_2$); б — системы $\text{SiO}_2\text{—VO}_2\text{—SiO}_2\text{—Vac—Si}$ (при толщинах SiO_2 — 0,8 мкм, VO_2 — 0,3 мкм, Vac — 2,5 мкм, Si — 500 мкм)

В расчет заложены измеренные оптические характеристики подложки и характеристики SiO_2 и VO_2 , заимствованные из [11, 12] и скорректированные с учетом экспериментальных данных на длине волны 10,6 мкм, полученных в процессе отработки технологии получения соответствующих слоев. Удовлетворительное в основном согласие расчетных и экспериментальных данных дает основание пойти дальше и оценить расчетным путем поглощение трехслойной системы $\text{SiO}_2\text{—VO}_2\text{—SiO}_2$, находящейся в вакууме. Спектр поглощения в этом случае показан на рис. 5, а, кривая А. Существенное расхождение кривых А и А' наблюдается на длинах волн более 10,5 мкм. Это объясняется увеличением поглощения кремниевой подложки на этих длинах волн, что влияет на формирование кривой А и не влияет на формирование кривой А'.

На рис. 5, б представлены расчетные спектры оптических характеристик структуры $\text{SiO}_2\text{—VO}_2\text{—SiO}_2$, расположенной над кремниевой подложкой с вакуумным зазором 2,5 мкм. Из сравнения кривых А' и А видно, что наличие подложки и выбранного зазора существенно увеличило поглощение в интервале 8,5—10,3 мкм, а также на длинах волн $> 11,5$ мкм. Микроболометр с идентичной структурой чувствительного элемента будет поглощать от 50 до 83 % излучения в полосе 8,5—10 мкм и от 10 до 50 % — в полосе 10—12 мкм. Для улучшения поглощения плоскостных структур в диапазоне 8—14 мкм следует оптимизировать толщину защитных слоев и их состав. Полезно комбинирование пленок SiO_2 с пленками Si_3N_4 , которые обладают лучшим поглощением в интервале 10—14 мкм и, кроме того, допускают больший выбор как материала жертвенного слоя, так и травителей, которые используются при изготовлении микроболометров.

Заключение

Проведены сравнительные исследования электрических, шумовых и оптических свойств микроболометрических сэндвичных и плоскостных структур на основе пленок аSi:H и VO_2 соответственно. С точки зрения сочетания значений ТКС и удельного сопротивления оба материала в полной мере отвечают требованиям микроболометрических матриц.

Найдены способы снижения контактных шумов структур обоих видов до уровня, при котором их вклад в результирующий шум пренебрежим. Продолжаются работы по снижению собственного токового шума термочувствительных слоев.

Плоскостные структуры обладают лучшим потенциалом в плане минимизации теплоемкости чувствительного элемента микроболометра из-за меньших толщины термочувствительного слоя и площади металлических электродов. В сэндвич-структурах проще организовать высокое ИК-поглощение в требуемой полосе длин волн. Однако вследствие проявления эффекта поля из-за малого зазора между электродами, сэндвичные структуры должны работать при меньших токах смещения, чем плоскостные. Это ограничивает достижимую вольтовую чувствительность микроболометров сэндвичного типа. В конкретных разработках следует учитывать все обстоятельства, отмеченные выше.

Литература

1. Wood R. A. // Proc. SPIE. 1993. V. 2020. P. 322.
2. Hanson C. // Ibid. P. 330.
3. Liddiard K. C. // Ibid. V. 1969. P. 206.

4. Хребтов И. А., Маляров В. Г. //Оптический журнал. 1997. Т. 64. № 6. С. 3.
5. Unewisse M. H., Graig B. I., Watson R. J., Liddiard K. C. //Proc. SPIE. 1995. V. 2554. P. 43.
6. Зеров В. Ю., Куликов Ю. В., Маляров В. Г., Феоктистов Н. А., Хребтов И. А. //Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. № 12. С. 63.
7. Груздева А. П., Зеров В. Ю., Коновалова О. П., Куликов Ю. В., Маляров В. Г., Хребтов И. А., Шаганов И. И. //Оптический журнал. 1997. Т. 64. № 12. С. 38.
8. Байдакова М. В., Бобыль А. В., Маляров В. Г., Третьяков В. В., Хребтов И. А., Шаганов И. И. //Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. № 13. С. 58.
9. Зеров В. Ю., Куликов Ю. В., Леонова В. Н., Маляров В. Г., Хребтов И. А., Шаганов И. И. //Оптический журнал (в печати).
10. Леонов В. Н., Маляров В. Г., Хребтов И. А., Шаганов И. И., Феоктистов Н. А. // Там же. 1998. Т. 65. № 1. С. 18.
11. Золотарев В. Н. и др. — Л.: Химия, 1985. — 376 с.
12. Barker A. et. al. //Phys. Rev. Letters. 1966. V. 17. № 26. P. 1286.

В части исследования шумов работа поддержана РФФИ по проекту № 960218563. Авторы признательны А. В. Бобылю за полезные обсуждения.

COMPARATIVE INVESTIGATIONS OF BOLOMETRIC PROPERTIES OF THIN-FILM STRUCTURES BASED ON VANADIUM DIOXIDE AND AMORPHOUS HYDRATED SILICON

V. G. Malyarov, I. A. Khrebtov, Yu. V. Kulikov, I. I. Shaganov, V. Yu. Zerov

S. I. Vavilov State Optical Institute
St.-Peterburg, Russia

N. A. Feoktistov

A. F. Ioffe Physical and Technical Institute,
St.-Peterburg, Russia

This paper presents the results of studies of sandwich and planar bolometric structures based on aSi:H and VO₂ films accordidgly. From the point of view of the TCR and resistivity value combination both materials completely satisfy the requirements of microbolometric array. Sandwiches constructed to act as an optical cavity absorb 80 % of radiation at 8 μm wavelength. It is shown that the planar structures absorption of 50–80 % can be reached in the 8,5–10 μm band.