

УДК 535.231.6

Разработка 65-элементной неохлаждаемой микроболометрической линейки мембранного типа

*В. Г. Маляров, И. А. Хребтов, В. Ю. Зеров, Ю. В. Куликов,
И. И. Шаганов*

ВНЦ "ГОИ им. С. И. Вавилова", Санкт-Петербург, Россия

А. Д. Смирнов, Л. С. Рагузина

АЗОТ "Светлана-Электронприбор", Санкт-Петербург, Россия

Представлены структура и технология изготовления 65-элементных микроболометрических линейек (МБЛ) мембранного типа и результаты исследований их свойств. На постоянном токе смещения микроболометры с термочувствительным VO_x -слоем имеют обнаружительную способность $5 \cdot 10^7$ (см·Гц^{1/2})/Вт на частоте 12,5 Гц при постоянной времени 3 мс. Намечены пути улучшения чувствительности разработанных линейек.

Задача создания неохлаждаемых многоэлементных ИК-приемников на сегодняшний день не утрачивает своей актуальности [1—8]. Разработки неохлаждаемых микроболометрических ИК-матриц в последние годы проводятся в направлении как улучшения чувствительности и наращивания числа элементов, так и снижения стоимости. Последнее взаимосвязано с развитием нового класса тепловизионных приборов, имеющих минимальные цену, габаритные размеры, массу и энергопотребление и, как следствие, большие перспективы широкого использования [5—8].

Ряд современных задач получения ИК-изображения может быть решен с использованием неохлаждаемых линейных и матричных приемников сравнительно небольшого формата [2—8]. Представляемая работа имела целью раз-

работку технологии изготовления небольшой линейки микроболометров мембранного типа [9] с термочувствительным VO_x -слоем, которая допускала бы изготовление линейки на пластине с сформированной на ней электроникой считывания сигналов. К этой технологии предъявлялись также требования воспроизводимости, простоты и дешевизны. Кроме того, необходимо было проверить конструктивные решения и возможность достижения высоких вольтовой чувствительности и обнаружительной способности неохлаждаемых микроболометров.

Ниже дано описание топологии и структуры 65-элементных микроболометрических линеек, приведены основные особенности их изготовления и результаты исследований характеристик.

Устройство и технология изготовления чипов с микроболометрическими линейками

Устройство

Элемент линейного приемника представляет собой планарный пленочный микроболометр, имеющий многослойную структуру, приемная площадка которого вывешена на двух "ножках" над полостью в базовой кремниевой пластине (рис. 1).

Структура микроболометра содержит слой нижнего диэлектрика (Si_3N_4), термочувствительный слой (VO_x), пассивирующий термочувствительную зону, слой (SiO_2), слой металла электродов (Ti) и верхний защитный слой (SiO_2).

Посредством ножек, включающих слой металла, осуществляется необходимая тепловая связь чувствительного элемента с базовой пластиной и его электрическая связь с электронной схемой. Измеряемое излучение поглощает вся многослойная структура приемной площадки [10], а вариации ее температуры вызывают изменения сопротивления термочувствительного слоя, что при пропускании через болометр тока смещения и порождает электрический сигнал.

На пластине формировали 12 идентичных блоков, содержащих каждый по четыре МБЛ с растрами разводки. Кроме 65-элементных МБЛ, эти блоки содержали тестовые структуры для исследования электрофизических и шумовых свойств слоя VO_x по четырехзондовой схеме и для контроля сопротивления металлических слоев.

Четыре линейки в блоке, обозначенные как I, II (не показаны на рис. 1), III и IV, отличаются длиной, шириной и конфигурацией ножек подвески чувствительного элемента. Вариации конфигураций ножек давали возможность выбора оптимальной тепловой связи приемного элемента с базой при реализованной теплоемкости и требуемой постоянной времени микроболометра. Линейки I, II и III, IV попарно имеют общую шину, с которой электрически связаны микроболометры одним из двух электродов.

Топология микроболометра в линейках III и IV схематично показана на рис. 1, а. Шаг во всех линейках составляет 50 мкм, а размеры приемной площадки элементов — 46×46 мкм.

Изготовление

Технологический маршрут изготовления чипов с линейками включал нанесение на кремниевую пластину диаметром 60 мм последовательно слоев Si_3N_4 , VO_x , SiO_2 , Ti, SiO_2 и Au (на растры разводки) с толщинами, соответственно, 0,25; 0,2; 0,1; 0,1; 0,25 и 0,4 мкм. Формирование топологического рельефа на слоях проводили методами обычной фотолитографии, жидкостного и сухого травления. Основные этапы изготовления показаны на рис. 1, б. В конечном счете пластины разделяли на чипы, каждый из которых содержал один блок.

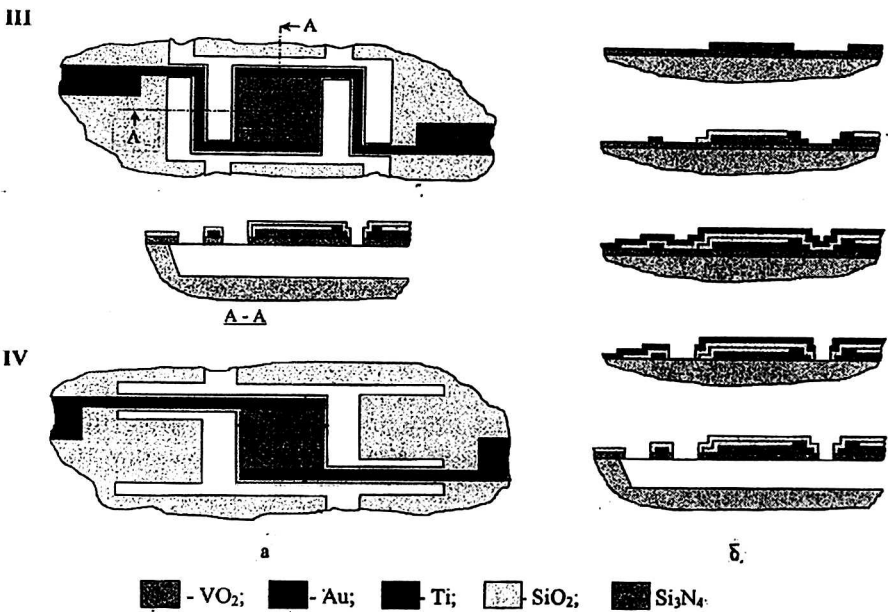


Рис. 1. Устройство микроболметров (а) и основные этапы их изготовления (б)

Ключевым технологическим этапом является получение под линейкой микроболметров канавки в подложке методом жидкостного анизотропного химического травления. Это необходимо для обеспечения мембранной подвески чувствительных элементов и достижения расчетной теплоизоляции их от подложки.

В целях определения момента прекращения и качества вытравливания канавки в подложке рядом с 65-тым элементом каждой линейки были предусмотрены тестовые элементы с такими же, как в рабочих элементах, окнами травления.

Основные технологические требования к слоям заключались в необходимости их осаждения при температуре подложки не выше 500°C , постоянстве состава, толщины и микроструктуры, а также в хорошей адгезии к нижеле-

жащим слоям. Так как использованные слои, кроме VO_x , являются традиционными для микроэлектронных технологий, выполнение названных требований не вызвало осложнений.

Получение качественных пленок оксида ванадия потребовало дополнительной технологической проработки. При этом стремились достичь максимальных значений температурного коэффициента сопротивления (ТКС) при комнатных температурах и поверхностном сопротивлении пленки 20—100 кОм и минимального токового шума после прохождения всего технологического маршрута. Наилучшие результаты были получены на пленках, изготовленных при температуре подложки 450 °С и прошедших отжиг при 400 °С [11].

Изображения фрагментов изготовленных МБЛ, полученные с помощью электронного сканирующего микроскопа, приведены на рис. 2, а, б. На рис. 2, а показаны фрагменты соседних линеек IV и III, а на рис. 2, б — элементы МБЛ III более крупным планом.

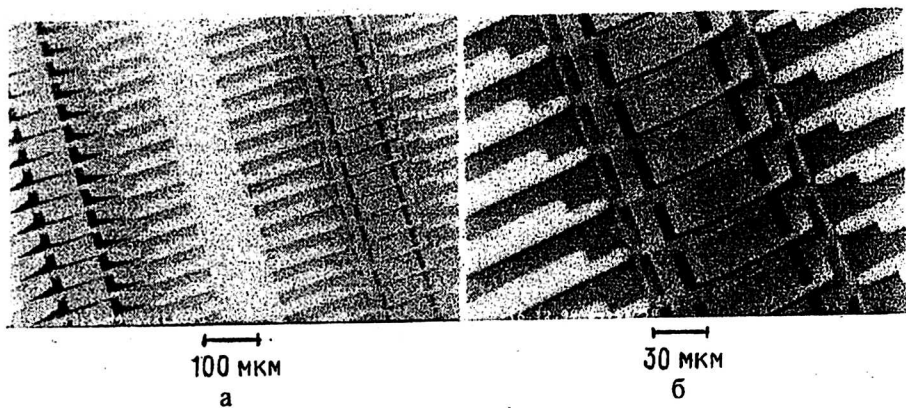


Рис. 2. Фотографии фрагментов микроболметрических линеек, полученные с помощью электронного сканирующего микроскопа:
а — линеек IV, III; б — линейки III в увеличенном виде

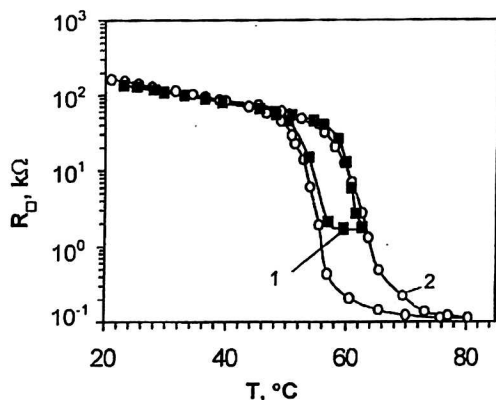
Характеристики микроболметров в линейках

Исследования свойств МБЛ, проводимые в вакуумируемом термостате, включали измерения и оценку разброса значений сопротивления элементов, измерение вольт-амперных характеристик (ВАХ) выборочных микроболметров и определение из них вольтовой чувствительности S_0 , измерение температурной зависимости сопротивления $R(T)$ элементов и определение ТКС и тепловой проводимости G связи чувствительного элемента с теплоотком. Кроме того, были проведены измерения при постоянном токе смещения вольтовой чувствительности S_f микроболметров к модулированному потоку ИК-излучения и ее частотной зависимости, измерения сигнала и шума на частоте 12,5 Гц и определение обнаружительной способности D^* микробо-

лометров при облучении их потоком излучения абсолютно черного тела (АЧТ).

Количество дефектных элементов (с нарушенной структурой или с сопротивлением, отличающимся более чем в 1,5 раза от среднего) в кристалле с четырьмя МБЛ составило менее 3 %. Некоторые линейки вообще не содержали дефектных пикселей. Разброс по сопротивлению в них не превышал 9 %, а по ТКС — 3 %. Следует отметить, что микролометры в таких линейках имели практически те же значения ТКС, что и тестовые элементы большого размера, не прошедшие обработки по технологическому маршруту. Температурная зависимость $R(T)$ микролометров и тестовых элементов почти совпадает как в области полупроводниковой проводимости, так и на фазовом переходе (рис. 3).

Рис. 3. Температурная зависимость сопротивления единицы площади:
1 — микролометра 1-III-1;
2 — тестового образца, не прошедшего химической обработки



Значения тепловой проводимости G микролометров в линейках I и III близки к расчетным. Элементы в линейках II и IV имеют G , в несколько раз больше расчетной, что объясняется неполным удалением кремния подложки из-под ножек из-за значительной удаленности их концов от центра чувствительного элемента. Разброс по значениям G в одной линейке не превышал 40 % и может быть уменьшен при более тщательном контроле процесса вытравливания канавки в подложке.

Исследованные микролометры имели избыточный токовый шум со спектром типа $1/f$. По величине коэффициента токового шума, приведенного к единице площади, микролометры близки к тестовым структурам, не подвергшимся химической обработке. Контактной составляющей токового шума микролометры не имели на большей части изготовленных чипов.

Результаты исследований электро- и теплофизических свойств некоторых микролометрических элементов, полученных на двух различных пластинах, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Электрофизические свойства микроболومترических элементов в линейках

№ элемента	R при 25 °С, КОМ	ТКС при 25 °С, %/К	$I_{S_{\max}}$, мКА	$R_{S_{\max}}$, КОМ	S_{\max} из ВАХ, В/Вт	G, Вт/К
1-II-61	116	3,4	17,3	83	$1,6 \cdot 10^4$	$2,4 \cdot 10^{-6}$
1-III-1	128	3,3	10,6	91	$2,7 \cdot 10^4$	$8,5 \cdot 10^{-7}$
2-III-1	93,6	3,4	9,6	68,5	$3,0 \cdot 10^4$	$5,3 \cdot 10^{-7}$
2-III-3	102	3,3	11,2	74	$2,5 \cdot 10^4$	$8,0 \cdot 10^{-7}$
2-IV-63	85,8	3,1	13,5	76,2	$1,3 \cdot 10^4$	$2,4 \cdot 10^{-6}$
4-III-63	28,6	2,7	0,7	17	$1,0 \cdot 10^4$	$1,6 \cdot 10^{-6}$
4-IV-3	25,8	2,9	1	15	$7,0 \cdot 10^3$	$4,0 \cdot 10^{-6}$

Примечания: 1. Первая цифра в обозначении элемента соответствует номеру чипа, римская цифра отражает разновидность линейки, последняя цифра соответствует номеру элемента в линейке. Чипы 1 и 2 получены на одной пластине, а чип 4 — на другой.

2. S_{\max} — максимальная вольтовая чувствительность, определенная из вольт-амперных характеристик; $I_{S_{\max}}$, $R_{S_{\max}}$ — ток через микроболومتر и его электрическое сопротивление при максимальной чувствительности; G — теплопроводность между микроболметром и теплоотком.

Примеры токовой зависимости вольтовой чувствительности $S_0(I)$, найденной из ВАХ двух микроболметров, которые максимально различались по величине G в одной линейке, показаны на рис. 4. Для сравнения приведены зависимости $S_0(I)$ микроболметров в вакууме и при нормальном давлении воздуха. Появление второго максимума на $S_0(I)$ при увеличении тока характерно для болометров на основе VO_x , имеющего фазовый переход, и связано с наличием абсолютного максимума крутизны dR/dT зависимости $R(T)$ в начале перехода. Однако при работе с модулированным потоком излучения на постоянном токе смещения болометра второй максимум $S_0(I)$ не реализуется вследствие петли гистерезиса фазового перехода [12].

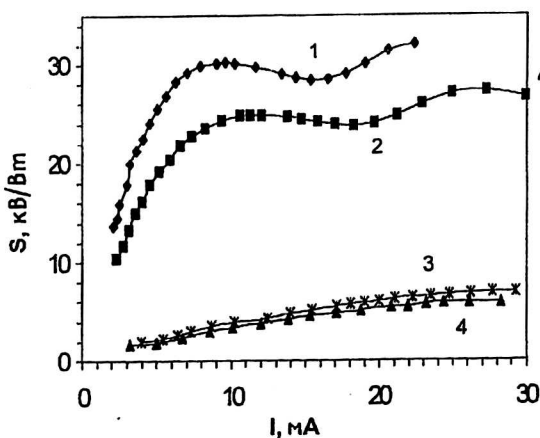


Рис. 4. Зависимость от тока смещения вольтовой чувствительности, найденной из вольт-амперных характеристик: 1 и 2 — микроболметров 2-III-1 и 2-III-3 в вакууме; 3 и 4 — микроболметров 2-III-3 и 2-III-1 при нормальном давлении воздуха

В табл. 2 приведены примеры характеристик, полученных из оптических измерений на постоянном токе, при облучении микроболметров модулированным излучением He—Ne-лазера на длине волны $\lambda = 3,39$ мкм и излучением модели АЧТ с температурой полости 104 °С ($\lambda_{\max} = 7,7$ мкм). Из постоян-

ной времени τ , найденной по частотным зависимостям оптической вольтовой чувствительности и тепловой проводности G при тех же значениях тока смещения, определены значения теплоемкости C микроболометров. Эти значения близки для разных микроболометров и составляют $\approx 2,2 \cdot 10^{-9}$ Дж/К. При такой теплоемкости возможно улучшение чувствительности и D^* в 2,5—4 раза при одновременном увеличении τ до 10^{-2} с за счет уменьшения G посредством удлинения и уменьшения ширины ножек подвески.

Таблица 2

Характеристики микроболометров в линейках, полученные из оптических измерений

№ элемента	I , мкА	R , кОм	$U_{ш}$, В/Гц ^{1/2}	Лазер, $\lambda = 3,39$ мкм		АЧТ, $T = 104$ °С		τ , мс	C , Дж/К
				S_f , кВ/Вт	D^* , (см·Гц ^{1/2})/Вт	S_f , кВ/Вт	D^* , (см·Гц ^{1/2})/Вт		
1-III-1	8,7	100	$1,4 \cdot 10^{-5}$	2,7	$8,8 \cdot 10^5$	—	—	2,4	$2,1 \cdot 10^{-9}$
2-III-1	2,8	96	$1,0 \cdot 10^{-6}$	2,7	$9,8 \cdot 10^6$	10	$4,6 \cdot 10^7$	4,0	$2,2 \cdot 10^{-9}$
2-III-3	4	100	$1,1 \cdot 10^{-6}$	2,7	$1,4 \cdot 10^7$	12	$4,9 \cdot 10^7$	2,8	$2,2 \cdot 10^{-9}$

Примечание: I , R — ток через микроболометр и его сопротивление в рабочей точке, соответственно; $U_{ш}$ — напряжение шума микроболометра на частоте 12,5 Гц в полосе $\Delta f = 1$ Гц; S_f — вольтовая чувствительность к модулированному излучению с частотой $f = 12,5$ Гц; D^* — обнаружительная способность; τ , C — постоянная времени и теплоемкость микроболометра, соответственно.

Для увеличения обнаружительной способности необходимо также снижение уровня токового шума термочувствительных слоев при одновременном уменьшении их толщины до 0,15—0,1 мкм в целях снижения теплоемкости. Решение этой задачи требует дальнейшей работы над улучшением структурного совершенства пленок VO_x .

Заключение

Разработаны структура и технология изготовления 65-элементной линейки неохлаждаемых микроболометров мембранного типа. Проверена эффективность конструктивных решений микроболометров с термочувствительным слоем VO_x , приемной площадкой 46×46 мкм и шагом расположения в линейке 50 мкм.

Сравнительно простая технология допускает изготовление линейки на кристалле с сформированной электроникой считывания и групповую обработку пластин, что снижает трудоемкость и стоимость изготовления одного линейного приемника.

Микроболометры изготовленных линеек имеют обнаружительную способность $\approx 5 \cdot 10^7$ (см·Гц^{1/2})/Вт, изготовленную на постоянном токе смещения при облучении модулированным с частотой 12,5 Гц излучением АЧТ ($\lambda_{\text{пик}} = 7,7$ мкм). При этом постоянная времени микроболометров составляет 3—4 мс.

Реализованная теплоемкость $\approx 2 \cdot 10^{-9}$ Дж/К оставляет возможность увеличения чувствительности за счет удлинения и/или уменьшения ширины ножек мембранной подвески чувствительного элемента. Резервы повышения чувствительности заключаются также в улучшении структуры и уменьшении толщины термочувствительного слоя.

Литература

1. Tissot J.-L., Rothan F., Vedel C., et al. LETI/LIR's amorphous silicon uncooled microbolometer development//Proc. SPIE. 1998. V. 3379. P. 139—144.
2. Pape D., Jerominek H., Alain C., et al. 256x1 and 256x40 pixel bolometer arrays for space and industrial application//Ibid. V. 3436. P. 325—331.
3. Saint-Pe O., Dubet D., Duthil P., et al. Study of uncooled focal plane array for thermal observation of the Earth//Ibid. P. 593—604.
4. Moor P. De, Sedky S., Sabuncuoglu D., Van Hoof C. Linear arrays of uncooled poly SiGe microbolometers for IR detection//Ibid. 1999. V. 3876. P. 256—259.
5. Brady J., Schimert T., Ratcliff D., et al. Advances in amorphous silicon uncooled IR systems//Ibid. P. 161—167.
6. Balcerak R. S. Uncooled IR Imaging: technology for the next generation//Ibid. P. 110—117.
7. Reago D. A., Horn S., Campbell J. and Vollmerhausen R. Third generation imaging sensor system concepts//Ibid. V. 3701. P. 108—117.
8. Jerominek H., Picard F., Swart N. R., et al. Micromachined, uncooled, VO₂-based, IR bolometer arrays//Ibid. 1996. V. 2746. P. 60—71.
9. Мальяров В. Г., Хребтов И. А., Куликов Ю. В. и др. Сравнительные исследования болометрических свойств тонкопленочных структур на основе диоксида ванадия и аморфного гидрированного кремния//Прикладная физика. 1999. Вып. 2. С. 86—96.
10. Мальяров В. Г., Шаганов И. И., Куликов Ю. В. и др. Оптимизация параметров пленок VO_x, предназначенных для изготовления микроболометрических матриц//Письма в ЖТФ. 2000. (В печати).
11. Зеров В. Ю., Куликов Ю. В., Леонов В. Н. и др. Особенности работы болометра на основе пленки диоксида ванадия в интервале температур, включающем фазовый переход//Оптический журнал. 1999. Т. 66. № 5. С. 8—12.

Авторы признательны Т. А. Енуковой, А. П. Груздевой, Г. А. Мотовиловой
за техническую помощь, оказанную при изготовлении
микроболометрических линеек.

Development of 65x1 uncooled membrane type microbolometer array

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

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

A. D. Smirnov, L. S. Raguzina

"Svetlana-Electronpribor" Company, St.-Petersburg, Russia

This paper presents the structure and technology of 65-elements linear array of membrane type microbolometers, and the research results of its properties. DC biased microbolometers with VO_x thermosensitive layer have detectivity of 5·10⁷ (cm·Hz^{1/2})/W at 12,5 Hz frequency, and response time of 3 ms. The ways of improvement of developed linear array sensitivity are planned.