

УДК 535.231.6+621.382

Микроболометрический детектор, чувствительный в двух спектральных диапазонах

С. А. Жукова, В. Е. Турков, С. А. Демин, Б. В. Трошин

В работе представлены результаты разработки и реализации нового конструктивного варианта пикселя микроболометра, основным отличием от аналогичных известных конструкций которого является использование тонких пленок тантала в качестве поглощающего материала. Использование предлагаемых материалов и толщин слоев, составляющих пиксель, позволяет увеличить и достичь 98 % поглощения ИК-излучения при неоднородности 2,5 % в спектральном диапазоне 8—14 мкм, а также уравнивать коэффициенты и достичь равномерности поглощения в спектральном диапазоне 3—5 мкм и 8—14 мкм, повысить быстродействие и чувствительность. Снижение толщины слоев приводит к увеличению температуры пикселя в 3 раза с соответственным увеличением чувствительности болометра, но при сохранении его динамических характеристик.

PACS: 78.20.Ci, 07.57 Kp, 85.60.Gz

Ключевые слова: микроболометр, ИК-детектор, коэффициент поглощения, пиксель, микроболометрическая матрица, ИК-излучение, нанотолщинная пленка, тепловизор.

Введение

Производство микроболометрических матриц — это высокотехнологичный и дорогостоящий процесс, причем в мире существует немного компаний, которые способны их производить. Лидерами являются США (компании Flir Systems, Raytheon, UTC Aerospace Systems) и Израиль (фирма SemiConductor Devices). Из европейских производителей самой известной является французская фирма Sofradir и ее дочерняя компания ULIS. Крупнейшие производители ИК-детекторов в настоящее время отдают предпочтение конструкциям типа матричных неохлаждаемых массивов термодетектирующих элементов. Основными преимуществами таких термодетекторов являются

малая масса, прочность, надежность, низкая стоимость, нормальные рабочие температуры, совместимость технологии их изготовления с базовыми технологиями микроэлектроники.

Целью настоящей работы являлось создание конструкции пикселя, имеющего равные коэффициенты поглощения в двух спектральных диапазонах 3—5 мкм и 8—14 мкм без снижения разрешающей способности прибора. Использование пикселей, имеющих высокую поглощающую способность в двух спектральных диапазонах, позволяет расширить функциональные возможности микроболометра без снижения разрешающей способности прибора. В работе представлены результаты разработки и реализации нового конструктивного варианта пикселя микроболометра, основным отличием от аналогичных известных конструкций которого является использование тонких пленок тантала в качестве поглощающего материала. Это позволяет уменьшить толщины составляющих слоев и увеличить быстродействие пикселя за счет снижения теплоемкости и увеличения коэффициента поглощения пикселя.

Конструкция пикселей микроболометрического детектора

Уменьшение толщины слоев нитрида кремния и оксида ванадия позволяет ограничить вели-

Жукова Светлана Александровна, начальник научно-технологического комплекса нано- и микротехнологий.
Турков Владимир Евгеньевич, начальник НИЦ нанотехнологий, зам. ген. директора.
Демин Сергей Анатольевич, начальник лаборатории.
Трошин Богдан Васильевич, ведущий инженер.
ФГУП "Центральный научно-исследовательский институт химии и механики имени Д. И. Менделеева".
Россия, 115487, Москва, ул. Нагатинская, 16А.
Тел. +7 (499) 611-10-40.
E-mail: nicnt@cniihm.ru

Статья поступила в редакцию 30 июня 2016 г.

© Жукова С. А., Турков В. Е., Демин С. А.,
Трошин Б. В., 2016

чину теплоемкости пикселя и обеспечить увеличение быстродействия пикселя. Использование предлагаемых материалов и толщин слоев, составляющих пиксель, позволяет уравнивать коэффициенты, достичь равномерности поглощения в спектральном диапазоне 3—5 мкм и 8—14 мкм и повысить быстродействие.

Микроболометрический детектор представляет собой массив пикселей (см. рис. 1), размещенных на подложке, в которой сформирована схема управления и считывания показаний пикселей. Пиксель представляет собой мембрану, подвешенную на ножках над подложкой. Под мембраной расположен отражатель. Мембрана содержит три структурных слоя из нитрида кремния, слой, детектирующий излучение из оксида ванадия, и поглощающий падающее ИК-излучение тонкий слой тантала. Толщина слоя нитрида кремния не превышает 210 нм, толщина слоя оксида ванадия не превышает 170 нм, толщина поглощающего слоя из тантала составляет 3—20 нм, толщина отражателя, который изготавливается из золота или алюминия, не превышает 100 нм. Мембрана подвешена над отражателем с зазором. Величина зазора составляет от 1,0 до 2,8 мкм, точное значение зазора определяется по результатам оптического расчета пикселя на требуемый диапазон поглощения. Для предотвращения потерь тепла за счет теплопроводности окружающего газа массив пикселей вакуумируется и герметизируется в корпусе, который имеет окно, прозрачное для детектируемого излучения.

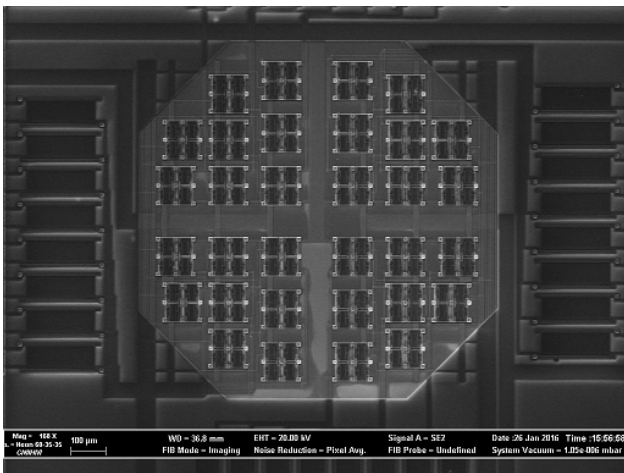


Рис. 1. СЭМ-изображение фрагмента микроболометрического детектора.

Микроболометрический детектор работает следующим образом: ИК-излучение, падающее на поверхность мембраны, поглощается тонким слоем тантала и слоями нитрида кремния, которые нагреваются вместе со слоем оксида ванадия. При увеличении температуры мембраны сопро-

тивление детектирующего слоя оксида ванадия уменьшается. Изменяющееся сопротивление детектирующего слоя фиксируется системой считывания, которая периодически считывает значения сопротивления пикселей. При прерывании излучения пиксель охлаждается за счет отвода тепла через ножки.

Пленка тантала при использовании отражателя, расположенного с зазором 2,5 мкм, формирует широкий пик поглощения с максимумом в диапазоне 8—9 мкм и пик следующего порядка в диапазоне 3—5 мкм. Нитрид кремния, входящий в состав мембраны, поглощает ИК-излучение в диапазоне длин волн 9—13,5 мкм [1] и при использовании отражателя, расположенного с зазором около 2,5 мкм, формирует пик поглощения с максимумом в диапазоне длин волн 11—13 мкм. Толщины пленок определяют абсолютную величину коэффициента поглощения, а величина зазора положение максимумов пиков поглощения. Таким образом, изменение толщины составляющих слоев мембраны микроболометрического детектора и величины зазора между мембраной и отражателем позволяет получить требуемые характеристики поглощения микроболометрического детектора.

Известны факторы, влияющие на быстродействие микроболометрического детектора. При отсутствии протекания тока смещения через детектирующий слой зависимость прироста температуры во времени описывается уравнением:

$$C \frac{d\theta}{dt} = G\theta = P_o;$$

где C — теплоемкость; G — термическая проводимость; P_o — падающая мощность излучения; θ — разность температур между мембраной и подложкой,

$$\theta = T - T_s;$$

где T — температура мембраны; T_s — температура подложки.

При модулировании падающей мощности с частотой ω решение уравнения имеет вид:

$$\theta(t) = \frac{\eta P_o}{G\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right);$$

где η — доля излучения поглощаемого мембраной (коэффициент поглощения); τ — термическая постоянная времени, определяемая как $\tau = C / G$.

При прерывании потока излучения на болометр мембрана пикселя остывает в соответствии с уравнением:

$$\theta(t) = \frac{\eta P_0}{G\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}} \left(1 - e^{-\frac{t_n}{\tau}} \right) e^{-\frac{t-t_n}{\tau}},$$

где t_n — время нагрева мембраны.

Из этого уравнения вытекает, что при сравнении двух пикселей микроболометрических детекторов, нагреваемых и охлаждаемых до одинаковых температур, действительны соотношения:

$$t_{n2} = Kt_{n1}; \quad t_{c2} = Kt_{c1};$$

где t_{n1}, t_{n2} — время нагрева мембраны излучением; t_{c1}, t_{c2} — сумма времени нагрева и охлаждения мембраны до одинаковых температур; K — коэффициент изменения длительности цикла,

$$\tau_2 = K\tau_1;$$

$$K = \eta_1 C_2 / (\eta_2 C_1),$$

где η_1, η_2 — коэффициенты поглощения падающего излучения мембранами; C_1, C_2 — теплоемкости мембран.

Исходя из этого, в качестве критерия быстрого действия пикселя можно рассматривать отношение η/C .

Увеличение быстрого действия возможно за счет снижения теплоемкости нагреваемой мембраны пикселя и/или увеличения коэффициента поглощения мембраны.

Уменьшение теплоемкости нагреваемой мембраны пикселя возможно путем уменьшения геометрических размеров пикселей и уменьшения толщины составляющих слоев. Уменьшение размеров пикселя ограничено технологическими возможностями изготовления, а снижение толщины составных элементов ограничено падением коэффициента поглощения мембраны.

Для обеспечения корректного построения изображения микроболометрическим детектором необходимо также иметь равномерное поглощение пикселем по всему спектральному диапазону. В этом случае искажение изображения за счет неоднородности поглощения по спектральному диапазону будет минимальным.

Метод изготовления матрицы пикселей микроболометрических детекторов

Разработка метода проводилась в научно-исследовательском центре (НИЦ) нанотехнологий ФГУП «ЦНИИХМ» на технологической линии по разработке и изготовлению миниатюрных микроэлектромеханических систем (МЭМС) (см. рис. 2).

Оборудование линии позволяет обрабатывать пластины диаметром от 25 до 150 мм, в т. ч. и нестандартные, но вписывающиеся в диаметр 150 мм. Созданная технологическая линия в настоящее время позволяет изготавливать объемные микроструктуры МЭМС. В том числе имеются все технологические процессы для изготовления микроболометрических матриц. Имеется материаловедческо-технологический задел по изготовлению структур как на твердых, так и на гибких подложках. Линия оснащена литографическим, ионно-вакуумным, плазменным и измерительным оборудованием ведущих мировых производителей (SUSS, EVG, Sawatec, Carl Zeiss, Load Point и др.). Минимальный размер микроэлементов, формируемых на линии, составляет 0,6 мкм, а нанозлементов — 10 нм на площади 1 см².

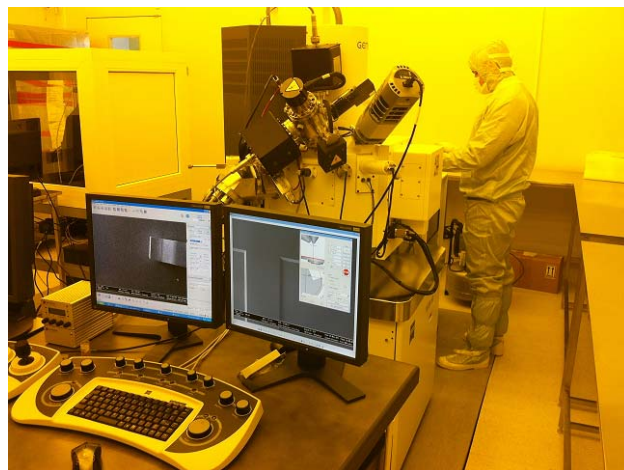


Рис. 2. Технологическая линия nano- и микроэлектромеханических систем НИЦ нанотехнологий ФГУП «ЦНИИХМ».

При изготовлении микроболометрического детектора использовались хорошо известные в микроэлектронике операции последовательного нанесения покрытий, фотолитографии и травления покрытий, основные положения которых представлены в работах [2—7]. Использовали технологию изготовления трехмерных структур с использованием полиимидных жертвенных слоев, особенности технологии представлены в статьях [7—10]. Разработанные методы и процессы обеспечивают создание структур со следующими характеристиками: минимальный размер элементов 0,5 мкм, точность воспроизведения рисунка 10 нм, точность совмещения 20 нм, однородность нанесения слоев по пластине диаметром 150 мм 0,6—1,2 %, степень деформации мостика не более 0,1 %. Температурный коэффициент сопротивления терморезистивного слоя составил 1,7—2,1 %.

В соответствии с разработанным процессом реализована следующая последовательность операций:

– на поверхность предварительно изготовленной пластины с электронной подсистемой наносят жертвенный слой, а именно, слой полиимида, толщина которого после процесса имидизации составляет величину, равную высоте резонансного зазора; одновременно слой полиимида играет роль планаризирующего покрытия;

– осуществляют травление полиимида с использованием защитной маски; при получении защитной маски для травления полиимида используют металлы или диэлектрики типа окиси кремния, окиси алюминия или нитрида кремния; хорошие результаты были получены с применением нитрида кремния;

– формируют нитрид кремния;

– вскрывают контактные окна в нитриде кремния до металла контактов, при этом используется травление через фоторезистивную маску;

– для формирования контактов напыляется металл нихром с последующим травлением через фоторезистивную маску;

– в качестве терморезистивного слоя используется окись ванадия, напыляемая с мишени ванадия методом реактивного нанесения в кислородной плазме с магнетрона, топологический рисунок выполняется методом фотолитографии;

– на окись ванадия наносятся последовательно следующие слои: нитрида кремния, тантала, нитрида кремния с последующим травлением многослойной структуры через фоторезистивную маску плазмохимическим методом. Далее проводится травление жертвенного слоя через нитридную маску в кислородной плазме при одновременном стравливании фоторезиста с поверхности нитрида кремния.

Результаты реализации микроболометрических детекторов

Для оценки механических и теплофизических характеристик пикселей микроболометрических детекторов использовали тестовые структуры, представляющие собой изготовленные по описанной выше технологии образцы с размерами пикселей 50×50 и 25×25 мкм. Исследования поглощения в области $3\text{--}14$ мкм проводили методом инфракрасной спектроскопии с помощью спектрофотометра Nicolett, деформацию пикселя оценивали с помощью зондового микроскопа и оптического профилметра.

В таблице приведены примеры реализации микроболометрических детекторов, а также получаемые характеристики для диапазонов длин волн $3\text{--}5$ мкм и $8\text{--}14$ мкм. Использование тонкой

пленки тантала, в качестве поглощающего материала позволило изготовить детектор, имеющий равные коэффициенты поглощения D для диапазонов $3\text{--}5$ мкм и $8\text{--}14$ мкм, и снизить неоднородность внутри спектральных диапазонов. Под понятием «неоднородность поглощения» подразумевается отношение разности между максимальным и минимальным значением к среднему значению коэффициента поглощения D в заданном спектральном диапазоне. Также изготовлен пиксель имеющий коэффициент поглощения 80 % во всем спектральном диапазоне $3\text{--}14$ мкм при неоднородности коэффициента поглощения не более 13 % (см. рис. 3). Увеличение быстродействия достигается за счет снижения теплоемкости и увеличения коэффициента поглощения, в результате чего происходит повышение чувствительности и удельной обнаружительной способности микроболометрического детектора. Примеры реализации пикселей, работающих в одном спектральном диапазоне ($3\text{--}5$ мкм или $8\text{--}14$ мкм) и их характеристики также приведены в таблице. Использование предлагаемых материалов и толщин слоев, составляющих пиксель типа 3, позволяет увеличить и достичь 98 % поглощения ИК-излучения при неоднородности 2,5 % в спектральном диапазоне $8\text{--}14$ мкм. Снижение толщины слоев приводит к увеличению температуры пикселя в 3 раза с соответственным увеличением чувствительности болометра, при сохранении его динамических характеристик.

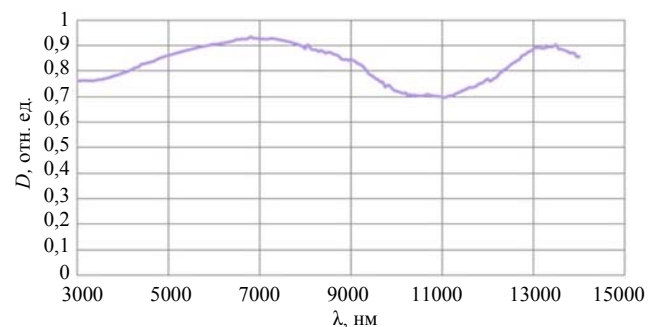


Рис. 3. Спектр поглощения D пикселя 2 типа.

Использование пленок тантала толщиной менее 3 нм нецелесообразно вследствие снижения величины и повышения неоднородности коэффициента поглощения. При толщине пленки тантала более 20 нм и применении пленок нитрида кремния толщиной более 210 нм возрастает неоднородность коэффициента поглощения и снижается быстродействие пикселя. Толщина оксида ванадия также ограничена возрастающей теплоемкостью мембраны пикселя.

Таблица

Структура и характеристики пикселя

Структура мембраны пикселя		Рабочий диапазон				Предельные значения	
		3—5+8—14 мкм (тип 1)	3—14 мкм (тип 2)	8—14 мкм (тип 3)	3—5 мкм (тип 4)	3—5 мкм	8—14 мкм
№ слоя	Материал	Толщина, нм					
1	Si ₃ N ₄	50	178	50	147	210	50
2	VO _x	145	120	163	120	170	120
3	Si ₃ N ₄	150	50	50	210	210	50
4	Ta	11	8	4	15	20	3
5	Si ₃ N ₄	30	30	30	30	210	30
6	Зазор	2740	1010	1980	2710	2700	1980
7	Отражатель (Au)	100	100	100	100	100	100
Характеристики пикселя							
Поглощение в диапазоне 3—5 мкм		0,830	0,800	0,549	0,956	0,963	0,472
Поглощение в диапазоне 8—14 мкм		0,830	0,800	0,980	0,751	0,661	0,916
η/С, кг-град/Дж (быстродействие)		0,814	0,792	1,202	0,714	0,460	1,347
Неоднородность поглощения в диапазоне 3—5 мкм		0,068	0,062	0,814	0,038	0,100	0,996
Неоднородность поглощения в диапазоне 8—14 мкм		0,102	0,130	0,025	0,152	0,168	0,124
Прирост быстродействия		0,50	0,47	1,22	0,54	-0,01	1,49
Снижение неоднородности коэффициента поглощения		0,27	0,18	0,80	0,33	0,26	0,00

Заключение

Разработана конструкция пикселя микроболометрического детектора, имеющего равные коэффициенты поглощения в двух спектральных диапазонах (3—5 мкм и 8—14 мкм), основным отличием от аналогичных известных конструкций которого является использование нанотолщинных пленок тантала в качестве поглощающего материала, что позволяет уменьшить толщины составляющих слоев, увеличить быстродействие за счет снижения теплоемкости и увеличения коэффициента поглощения пикселя. Результаты работы могут быть использованы при разработке и изготовлении микроболометрических матриц на основе терморезистивного слоя из оксида ванадия с различными размерами пикселей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карзанов В. В., Марков К. А., Сдобняков В. В., Демидов Е. С. // Физика и техника полупроводников. 2002. Т. 36. Вып. 9. С. 1060.
2. Демин С. А., Жукова С. А., Турков В. Е., Трошин Б. В. / Патент RU 2574524 С1 от 10.02.2016 г.
3. Жукова С. А., Обижаев Д. Ю., Турков В. Е., Рискин Д. Д., Кудрявцев П. Н., Четверов Ю. С. // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 5. С. 41.
4. Обижаев Д. Ю., Жукова С. А., Бабаевский П. Г., Четверов Ю. С. // Нано- и микросистемная техника. 2009. № 9. С. 14.
5. Жукова С. А., Обижаев Д. Ю., Жуков А. А., Бабаевский П. Г. // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 9. С. 20.
6. Жуков А. А., Жукова С. А., Четверов Ю. С., Бабаевский П. Г. // Прикладная физика. 2005. № 6. С. 154.
7. Zhukov A. A., Zhukova S. A., Tchetterov Y. S., Babaevsky P. G. // Proceedings of SPIE. 2005. Vol. 5834. P. 282.
8. Zhukov A. A., Zhukova S. A., Korneeva G. A., Tchetterov Yu. S. // Proceedings of SPIE. 2004. Vol. 5398. P. 166.
9. Babaevsky P. G., Zhukov A. A., Zhukova S. A., Tchetterov Yu. S., Shapoval S. Yu. // Proceedings of SPIE. 2004. Vol. 5398. P. 171.
10. Zhukova S. A., Zhukov A. A., Drachev A. I. // High Energy Chemistry. 2005. Vol. 39. No. 3. P. 232.

Microbolometer detector that is sensitive in two spectral bands

S. A. Zhukova, V. E. Turkov, S. A. Demin, and B. V. Troshin

FSUE CNIHM
16A Nagatinskaya str., Moscow, 115487, Russia
E-mail: szh17@ya.ru

Received June 30, 2016

The performance of microbolometers could be improved by configuration of pixels with high values of IR absorption and absorption uniformity in the 3—5 and 8—14 μm spectral band and decreased thermal capacity, resulting in an increase of microbolometer sensitivity and speed of response. This was an aim of the present work. This paper presents the development of a new configuration of the microbolometer pixel with tantalum thin film used as an IR absorbing layer with high value of IR absorption (98 %) and low absorption non-uniformity (2.5 %) in the 8—14 μm spectral band, and also with high value of IR absorption (80 %) and low absorption non-uniformity (13 %) in the 3—14 μm spectral band. It has been found that reduction of the pixel layers' thicknesses causes a threefold increase in microbolometer sensitivity with the dynamic range held constant.

PACS: 78.20.Ci, 07.57.Kp, 85.60.Gz

Keywords: microbolometer, IR-detector, absorption coefficient, pixel, microbolometers matrix, IR-radiation, nanothick film, infrared Imaging.

REFERENCES

1. V. V. Karzanov, K. A. Markov, V. V. Sdobnjakov, and E. S. Demidov, *Semiconductors* **36**, 9, 1060 (2002).
2. S. A. Demin, S. A. Zhukova, V. E. Turkov, and B. V. Troshin, Patent RU 2574524 C1 (10.02.2016).
3. S. A. Zhukova, D. Yu. Obizhaev, V. E. Turkov, D. D. Riskin, P. N. Kudrjavitsev, and Y. S. Chetverov, *J. of Nano and Microsystem Technique*, No. 5, 41 (2014).
4. D. Yu. Obizhaev, S. A. Zhukova, P. G. Babaevsky, and Yu. S. Chetverov, *J. of Nano and Microsystem Technique*, No. 9, 14 (2009).
5. S. A. Zhukova, D. Yu. Obizhaev, A. A. Zhukov, and P. G. Babaevsky, *J. of Nano and Microsystem Technique*, No. 9, 20 (2007).
6. A. A. Zhukov, S. A. Zhukova, Y. S. Tchetverov, and P. G. Babaevsky, *Prikladnaya Fizika*, No. 6, 154 (2005).
7. A. A. Zhukov, S. A. Zhukova, Y. S. Tchetverov, and P. G. Babaevsky, *Proc. of SPIE* **5834**, 282 (2005).
8. A. A. Zhukov, S. A. Zhukova, G. A. Korneeva, and Yu. S. Chetverov, *Proc. of SPIE* **5398**, 166 (2004).
9. P. G. Babaevsky, A. A. Zhukov, S. A. Zhukova, Yu. S. Chetverov, and S. Yu. Shapoval, *Proc. of SPIE* **5398**, 171 (2004).
10. S. A. Zhukova, A. A. Zhukov, and A. I. Drachev, *High Energy Chemistry* **39**, 232 (2005).