

НЕОХЛАЖДАЕМЫЕ МИКРОБОЛОМЕТРЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО SiGe ДЛЯ ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА

© 2013 г. А.В. ВОЙЦЕХОВСКИЙ, Н.А. КУЛЬЧИЦКИЙ*, А.А. МЕЛЬНИКОВ*, С.Н. НЕСМЕЛОВ

Томский государственный университет,

*Московский государственный технический университет радиотехники,
электроники и автоматики

e-mail: vav@elefot.tsu.ru, n.kulchitsky@gmail.com, melnikov@mirea.ru

За последние два десятилетия достигнут значительный прогресс в создании неохлаждаемых тепловых детекторов инфракрасного диапазона, которые приблизились по пороговым характеристикам к фотонным детекторам при значительно меньшей стоимости[1-4]. Одним из активно разрабатываемых перспективных типов тепловых детекторов являются болометры, принцип действия которых рассмотрен, например, в работах[1,5-7]. Наиболее широко используются металлические, термисторные и полупроводниковые болометры. Также недавно разработаны композитные и сверхпроводящие болометры[1]. На практике используются два типа детекторных структур: микромостик и конструкция на пленочной подложке (Рис. 1)[1].

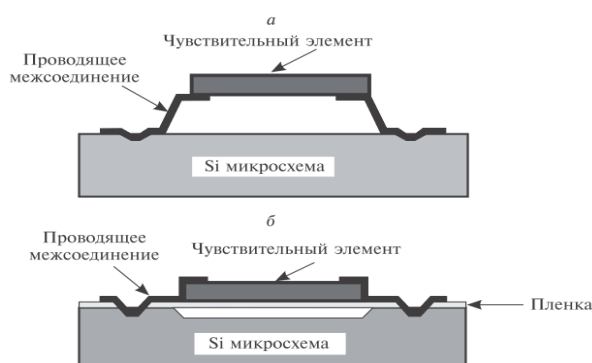


Рис. 1. Конструкции чувствительных элементов тепловых приемников: а) чувствительный элемент в форме микромостика, б) чувствительный элемент на тонкопленочной подложке[1].

В настоящее время наиболее широко используются для создания микроболометрических формирователей изображения оксид ванадия[4,8,9] и легированный α -Si:H[3,10]. Оксид ванадия VO_x обладает высокими значениями отрицательного температурного коэффициента сопротивления (ТКС), часто превышающими 4 %/К[1], на основе VO_x созданы матрицы форматом 320×240 с размером пикселя 50 мкм[1,11], а также форматом 320×240 и 640×480 с размером пикселя 37 и 23.5 мкм[12], соответственно. Однако, оксид ванадия – нестандартный материал для КМОП-технологии, изготовление VO_x в виде тонких пленок является сложным для управления процессом из-за узкого диапазона технологических параметров, обеспечивающих стабильность и оптимальность характеристик оксида. Металлы (Pt,Ni) совместимы с КМОП-технологией, но обладают низкими значениями температурного коэффициента сопротивления, а болометры на основе сверхпроводящих пленок требуют значительного охлаждения, что значительно повышает стоимость приборов. Болометры на основе α -Si:H,B [3,13-15] характеризуются большими уровнями шумов и теплопроводности, а кроме того этот материал нестабилен при тепловых обработках и под действием ультрафиолетового облучения. Болометры на основе карбида кремния SiC обладают высокими значения-

ми ТКС (4-6%), но для стабилизации свойств материала требуется отжиг при температурах около 1000°C , что несовместимо с КМОП-технологией.

Перспективны для создания микроболометров аморфные пленки $\text{a-Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{O}_y$ [16-18], но, несмотря на хорошие значения ТКС, а также совместимость технологии осаждения пленок с КМОП-технологией, матричные инфракрасные микроболометрические детекторы на основе $\text{a-Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{O}_y$ пока не созданы, что определяется высокими шумами в структуре, а также недостаточно отработанной технологией этого материала. Также разрабатываются в последние годы микроболометры на основе п-потенциальных ям [19], квантовых ям [20], аморфного германия [13,21], а также аморфного силицида германия [10,22,23].

Автор монографии [1] полагает, что основой для производства следующего поколения пленочных полупроводниковых болометров станут новые материалы (например, SiGe , Ge-Sn , Si-C , Si-N , Ge-S , Ge-N). В настоящее время ведутся исследования по повышению уровня обнаружительной способности полупроводниковых болометров, превышающей $10^9 \text{ см} \times \text{Гц}^{0.5} \times \text{Вт}^{-1}$ [1]. В данной работе рассмотрены технология и характеристики микроболометров на основе поликристаллического SiGe , относительно нового материала для производства микроболометров.

Технология создания микроболометров на основе поликристаллического SiGe

За последние десять-двенадцать лет поликристаллический силицид германия стал одним из основных материалов для разработок неохлаждаемых болометрических детекторов инфракрасного диапазона [24-38]. Поликристаллический силицид германия $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ обладает достаточно высокими значениями ТКС и относительно невысокой температурой отжига ($<650^{\circ}\text{C}$). Электрические свойства поликристаллического силицида германия рассмотрены, например, в работе [39]. При производстве болометрических детекторов обычно используют осаждение из газовой фазы при пониженном или атмосферном давлении (Inter-university MicroElectronic Center, IMEC совместно с XenICs, Belgium [24-35]; Institute of Microelectronics, Tsinghua University, Beijing, China) [36-38].

Наибольших успехов при производстве болометров на основе поликристаллического SiGe добились бельгийские компании IMEC и XenICs, Leuven, Belgium [24-35]. Одиночные детекторы, разрабатываемые данными компаниями, имеют размеры от $25 \times 25 \text{ мкм}$ до $450 \times 450 \text{ мкм}$, типичные дозы легирования бором активной части детекторов равны $6 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$, а дозы легирования опор 10^{16} см^{-2} . При создании детекторов используются процессы осаждения из газовой фазы при атмосферном или пониженном давлении, ионная имплантация, отжиг при температурах 650 , 850 или 1050°C , химическое травление.

Известны разработки болометрических детекторов на основе поликристаллического SiGe (Institute of Microelectronics, Tsinghua University, Beijing) [36-38]. Для получения тонкой пленки SiGe использовалась система для осаждения из газовой фазы в ультравысоком вакууме, доза легирования активного слоя при ионной имплантации бора составляла $4 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$. Поддерживающие опоры микроболометра также выполняют функцию электрических контактов и для этой цели легировались путем ионной имплантации с дозой $5 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ и энергией 25 кэВ , после чего проводился отжиг при 650°C в течение 1 минуты в атмосфере N_2 . Для выделения областей детекторов применялись процессы сухого и влажного травления.

В работе [29] рассмотрено сильное влияние увеличения температуры при заключительных операциях выше 450°C на фронтальную и обратную стороны стандартной КМОП-подложки с алюминиевыми межсоединениями и вольфрамовыми затворами. Исследовались все характеристики КМОП-схем после отжига в течение 90 минут при 520°C . Показано, что основное влияние температуры отжига заключается в увеличении сопротивления линий межсоединений. Характер увеличения зависит от материала межсоединений.

До недавнего времени считалось, что необходимым процессом при создании микроболометров на основе поликристаллического SiGe является отжиг при температуре, большей, чем 650°C [40]. Из-за того, что операции отжига при такой температуре плохо совместимы с КМОП-технологией, в последние годы активно велись разработки альтернативных низкотемпературных технологий [29,40-44]. Так в ИФП СО РАН, Новосибирск ведутся исследования направленные на создание пленок поликристаллического силицида германия путем молекулярно-лучевого осаждения германия и кремния в сверхвысоком вакууме при относительно низких температурах ($<500^{\circ}\text{C}$) [42-44]. Поликристаллический SiGe может быть также получен в результате твердофазной кристаллизации пленки из аморфного силицида германия ($\alpha\text{-SiGe}$). Такая кристаллизация может происходить при низких температурах, но требует, по крайней мере, нескольких часов для формирования пленки поликристаллического материала на подложке SiO_2 [40,41]. В фирмах CASTI Universidade de Vigo, Spain и ENEA Frascati, Italy совместно разрабатывается технология кристаллизации пленок аморфного силицида германия при воздействии импульсного лазерного излучения (ArF-эксимерного лазера), позволяющая ускорить процесс твердофазной кристаллизации и понизить его температуру [40,41]. Несмотря на определенные успехи альтернативных технологий, в настоящее время созданы технологии и протестированы образцы микроболометров, созданных методом осаждения из газовой фазы.

В результате проведенных исследований механических напряжений показано, что поликристаллический SiGe, сформированный при атмосферном давлении, имеет напряжения сжатия (до 150 МПа), которые снижаются при повышении температуры отжига. При температуре отжига 900°C напряжения близки к нулю. Увеличение температуры отжига приводит к появлению напряжений растяжения (Рис. 2). Для поликристаллического SiGe, сформированного при сниженном до 40 торр давлении, характерны напряжения растяжения (около 80 МПа), которые практически не зависят от температуры отжига.

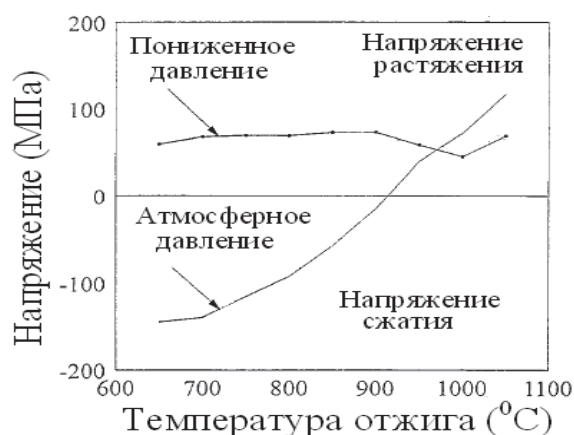


Рис. 2. Эффект влияния температуры отжига на релаксацию напряжений в поликристаллическом $\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}$ [25].

Полученные данные свидетельствуют о том, что путем изменения давления при формировании слоев SiGe можно управлять возникающими напряжениями. Компенсация напряжений в многослойной структуре может быть обеспечена подбором соответствующих параметров чувствительного и поглощающего слоев. В результате проведенных рядом групп исследований показано, что электрические свойства поликристаллического SiGe хорошо подходят для создания инфракрасных детекторов. Температурный коэффициент сопротивления и удельное сопротивление поликристаллического SiGe практически не зависят от температуры отжига в интервале температур $650\text{--}850^{\circ}\text{C}$ (в некоторых работах предлагается проводить отжиг при температурах, не превышающих 520°C). На Рис. 3 приведена типичная зависимость сопротивления болометра на основе поликристаллического SiGe от температуры [25]. В работе [29] исследовано влияние уменьшения температуры отжига до температур, меньших 520°C на электрические свойства поликристаллического SiGe. Для достижения этой цели были изготов-

лены образцы $\text{Si}_{0.57}\text{Ge}_{0.43}$ с различными концентрациями бора (от 10^{17} до 2×10^{19} В/см³). На Рис. 4 иллюстрируется эффект изменения удельного сопротивления от уровня легирования при температурах отжига от 520⁰С до 650⁰С.

В общем, можно отметить, что сопротивление уменьшается от 100 до 0.3 Ом×см при увеличении концентрации бора от 10^{17} до 2×10^{19} В/см³. Для заданной концентрации бора сопротивление слабо зависит от температуры отжига в диапазоне температур 520-650⁰С, что свидетельствует о том, что отжиг при 520⁰С в течение 30 минут достаточен для активации примеси бора.

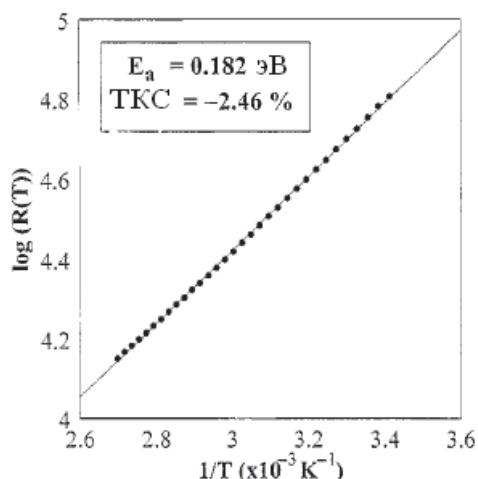


Рис. 3. Температурная зависимость сопротивления болометра. Кружки – экспериментальные результаты. Наклон прямой линии позволяет определить энергию активации[25].

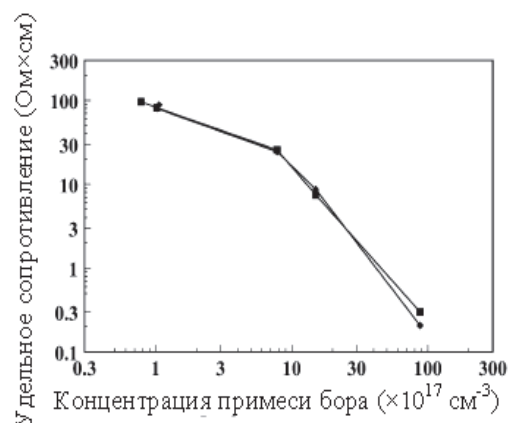


Рис. 4. Зависимость удельного сопротивления поликристаллического $\text{Si}_{0.43}\text{Ge}_{0.57}$, отожженного при температуре 520⁰С (кружки) и 650⁰С (квадраты), от концентрации легирующей примеси бора[29].

В Табл. 1 сравниваются основные электрические и тепловые характеристики болометрических детекторов различных типов. Из Табл. 1 видно, что болометрические детекторы на основе поликристаллического SiGe обладают тепловой постоянной времени, хорошо соответствующей типичной для систем реального времени кадровой скорости 30 Гц. Обозначение RPCVD означает, что нанесение SiGe осуществлялось при пониженном давлении (40 торр), а APCVD – при атмосферном давлении методом химического осаждения из паровой фазы[26]. Обозначение п-ямы означает потенциальные ямы в Si [19].

Таблица 1

Электрические и тепловые характеристики инфракрасных болометрических детекторов на основе поликристаллического SiGe и альтернативных материалов

Авторы	Материал	R, кОм	ТКС, %/K	τ , мс	G, Вт/K
Dong, [36,37]	поли-SiGe	350	-1.91	16.6	-
Leonov,[30]	поли-SiGe	17-82	-0.75- -1.4	10-14	5×10^{-8}
Sedky, [26]	поли-SiGe, RPCVD	10	-0.68	22.8	3.16×10^{-7}
Sedky, [26]	поли-SiGe, APCVD	143	-2	7.8	8×10^{-7}
Garcia, [22]	a-Si _{0.1} Ge _{0.9}	3×10^4	-3.7	300-500	5×10^{-7}
Iborra,[16]	a-Ge _x Si _{1-x} O _y	640	-4.21	1.8	2×10^{-6}
Torres,[21]	a-Ge:F	10^6	-5	100-800	2×10^{-7}
Tezcan,[19]	п-ямы	4.43	-0.5	3.2	6.7×10^{-7}

Детекторы на основе поликристаллического силицида германия

В работе [25] исследовательской группы из IMEC, XenICs, Leuven, Belgium сообщается о разработке болометров на основе поликристаллического SiGe, имеющих

размеры от $10 \times 10 \text{ мкм}^2$ до $50 \times 50 \text{ мкм}^2$ и различные конфигурации поддерживающих опор. Для приложенного смещения 1.5 В достигнута чувствительность близкая к 10^3 В/Вт . Это значение может быть легко увеличено более чем на порядок, путем уменьшения ширины и толщины поддерживающих опор, что приближает чувствительность к уровню, типичному для лучших болометров.

В работе [26] той же группы сообщается о разработке болометров из поликристаллического SiGe, имеющих поперечные размеры от $50 \times 50 \text{ мкм}$ до $25 \times 25 \text{ мкм}$ (включая опоры). Тепловая изоляция обеспечивалась длинными опорами различной ширины. Авторы работы [26] отмечают три обстоятельства: 1) Два различных типа поликристаллического SiGe было изготовлено путем химического осаждения из газовой фазы при атмосферном давлении (APCVD), а также при пониженном давлении до 40 торр (RPCVD). Концентрация германия в пленке достигала 30 %. Это значение было выбрано для минимизации теплопроводности поликристаллического SiGe. Два материала обладали различными механическими свойствами, первый материал обладал большим напряжением сжатия, а второй – малым напряжением растяжения. 2) Поглощающий слой использован четвертьволнового типа, имеющий среднюю эмиссионную способность 90 % в спектральном диапазоне 8-14 мкм и тепловую емкость $2.4 \text{ Дж/м}^2\text{К}$. 3) Доза легирования в опорах составляла 10^{16} атомов бора на см^2 , что намного превышало концентрацию в активной части (которая обычно составляла 6×10^{13} атомов бора в см^2). Так, что сопротивление опор было много меньше, чем активной части. На Рис. 5 показана зависимость чувствительности от постоянного смещения для болометров, созданных по APCVD-технологии. Болометры имели различные теплопроводности и различные размеры. Концентрация бора в поликристаллическом SiGe составляла $3 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$.

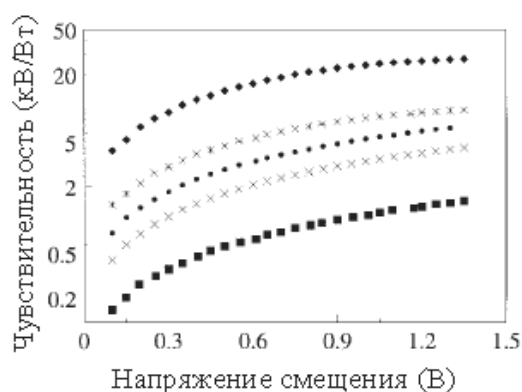


Рис. 5. Зависимость чувствительности от напряжения смещения для приборов, обладающих различными теплопроводностями (черные ромбы – $G=1.56 \times 10^{-7} \text{ Вт/К}$, звездочки – $G=4.7 \times 10^{-7} \text{ Вт/К}$, черные кружки – $G=8 \times 10^{-7} \text{ Вт/К}$, кресты – $G=1.3 \times 10^{-6} \text{ Вт/К}$, черные квадраты – $G=4.13 \times 10^{-6} \text{ Вт/К}$) [26].

Из Рис. 5 ясно, что чувствительность увеличивается при уменьшении теплопроводности. При смещении приборов постоянным током они нагреваются за счет протекания тока и ТКС уменьшается, поэтому чувствительность не увеличивается линейно при увеличении напряжения, а достигает определенного предела. Нагрев можно исключить при использовании импульсного смещения с периодом много меньшим, чем постоянная времени прибора. В этом случае чувствительность будет изменяться линейно при увеличении напряжения смещения. Тепловые постоянные времени изменялись от 22.8 мс до 1.55 мс в зависимости от размеров прибора и их теплопроводности.

Основные выводы, которые следует из экспериментальных исследований: шум типа $1/f$ всегда доминирует над шумом Джонсона, а шумом теплового сопротивления можно пренебречь. Улучшение характеристик прибора возможно при уменьшении компоненты шума типа $1/f$. Несмотря на высокие значения чувствительности и ТКС приборов размером $25 \times 25 \text{ мкм}$ по эффективной обнаружительной способности приборы размером $50 \times 50 \text{ мкм}$ не уступают из-за меньших значений шума типа $1/f$. Также можно отметить, что для приборов, созданных по RPCVD-технологии, несмотря на меньшие значения шума и теплопроводности, эффективная обнаружительная способность улучшается незначительно из-за заметного уменьшения ТКС.

На сайте компании XenlCs в 2003 году была размещена реклама коммерчески выпускаемых компанией дискретных детекторов на основе болометров из поликристаллического SiGe[33]. Эти детекторы чувствительны к инфракрасному излучению в спектральном диапазоне 8-12 мкм и предназначены для бесконтактного измерения температуры, спектроскопии, контроля технологических процессов, охранных систем, противопожарных датчиков. Детекторы типа XSNГ-8.0-001-А имеют размер 450×450 мкм², но отмечается возможность создания по заказу детекторов любой формы и размеров (от 30×30 мкм² до 1×1 мм²). Рабочая температура детекторов может изменяться от -40° С до 70° С. Максимальный отклик детекторов наблюдается при длине волны 10.2 мкм, при этом уменьшение спектрального отклика по диапазону 8-14 мкм не превышает 10%. Сопротивление детекторов составляет 700 кОм, тепловая постоянная времени - 21 мс, обнаружительная способность 3×10^8 см×Гц^{0.5}/Вт при частоте 10 Гц, чувствительность при этой частоте превышает 1.5×10^4 В/Вт. Следует отметить, что экспериментальные тестовые детекторы данных производителей обладают обнаружительной способностью до 2.26×10^9 см×Гц^{0.5}/Вт.

Микроболометры разработанные группой из Institute of Microelectronics, Tsinghua University, Beijing [36,37] обладают максимальной обнаружительной способностью, равной 8.3×10^8 см×Гц^{0.5}/Вт, при частоте 15 Гц. Чувствительность микроболометров при 10 Гц равна 1.7×10^4 В/Вт, а тепловая постоянная времени 16.5 мс. Отмечено, что низкочастотный шум (шум типа 1/f) доминирует при частотах, меньших 100 Гц, в диапазоне частот 100-150 Гц шум типа 1/f сравним по величине с шумом Джонсона, а при частотах, больших 150 Гц, доминирует шум Джонсона. В результате исследований зависимости обнаружительной способности от напряжения смещения выбрано оптимальное значение, которое составляет 12.5 В.

В Табл. 2 приведены пороговые характеристики болометров на основе различных материалов. Несмотря на относительно небольшие значения ТКС (0.68-2 %/°С) болометрические детекторы на основе поликристаллического SiGe обеспечивают хорошие пороговые характеристики (обнаружительная способность до 2.26×10^9 см×Гц^{0.5}/Вт, NETD - 70-85 мК). Для сравнения, NETD для болометров на основе a-Ge_xSi_{1-x}O_y составляет 3.85 К. Из Табл. 2 видно, что, несмотря на высокие значения чувствительности по напряжению для болометров на основе a-Si_{0.1}Ge_{0.9}:H и a-Ge:F (1.9×10^6 В/Вт и 4.2×10^6 В/Вт, соответственно), болометры на основе поликристаллического силицида германия имеют существенно большие значения обнаружительной способности (до 2.26×10^9 см×Гц^{0.5}/Вт), чем, например, болометры на основе a-Si_{0.1}Ge_{0.9}:H (10^5 см×Гц^{0.5}/Вт) из-за меньших шумов в детекторах на основе поликристаллического силицида германия.

Таблица 2

Сравнительные пороговые характеристики инфракрасных болометрических детекторов на основе поликристаллического SiGe и альтернативных материалов

Авторы	Материал	R _v , кВ/Вт	D, см×Гц ^{0.5} /Вт
Dong, [36,37]	поли-SiGe	15 (5 В, 10 Гц)**	8.3×10^8 (15 Гц)
Leonov,[30]	поли-SiGe	55-190 (2В, 30 Гц)	10^9 - 1.4×10^9
Sedky, [26]	поли-SiGe, RPCVD	16.45 (5 В, 10 Гц)	2.26×10^9
Sedky, [26]	поли-SiGe, APCVD	28.1 (5 В, 10 Гц)	1.59×10^9
Garcia, [22]	a-Si _{0.1} Ge _{0.9} :H	1900(550 нА)	10^5
Iborra,[16]	a-Ge _x Si _{1-x} O _y	0.38(100 нА)	4.8×10^7
Torres,[21]	a-Ge:F	4200(8.3 В)	2.6×10^6
Tezcan*,[19]	п-ямы	4(5В, 30 Гц)	1.2×10^9

*данные численного моделирования;

**в скобках значений столбца R_v приведены напряжение или ток смещения, а также для некоторых детекторов частота измерений.

Следует отметить, что по известным литературным данным в настоящее время выпуск линейных и малых двумерных матриц освоен только бельгийской компанией XenICs [27,30,31]. Выпускались линейные матрицы размером до 122 элементов и двумерные матрицы размером 14×14 элементов. Планировался выпуск больших линейных матриц размером до 200 элементов, а также больших двумерных матриц 160×128 элементов[31]. Использование ряда оригинальных методов оптимизации характеристик детекторов и тонких пикселей (0.2 мкм) с U-профилями обеспечило малые значения NETD(<100 мК). Предварительные данные свидетельствуют о прекрасной однородности свойств матричных детекторов.

В работе [38] научной группы из Institute of Microelectronics, Tsinghua University, Beijing сообщается о создании монолитной неохлаждаемой матрицы размером 8×8 болометрических детекторов из поликристаллического силицида германия. Пленки поликристаллического SiGe наносились путем газового осаждения в сверхвысоком вакууме. Исследована зависимость ТКС от температуры отжига. Для уменьшения теплопроводности болометра термистор из поликристаллического SiGe поддерживался четырьмя опорами, образуя микромостик. Измерения и расчеты показали, что средняя чувствительность составляет 1.07×10^4 В/Вт при однородности 10.5 % без коррекции и времени теплового отклика 10.5 мс. Обнаружительная способность достигала 3.75×10^8 см×Гц^{0.5}/Вт при частоте модуляции 30 Гц и напряжении смещения 5 В.

Оптимизация характеристик микроболометров для инфракрасных формирователей изображения сталкивается с противоречивыми требованиями. Для увеличения чувствительности надо минимизировать теплопроводность, но при данном объеме прибора это приводит к большому значению тепловой постоянной времени. Отклик пикселя становится более медленным по сравнению со временем формирования кадра (частота кадров обычно 30 Гц или выше). Логическое решение этой проблемы заключается в уменьшении толщины прибора, но уменьшение толщины прибора приводит к резкому уменьшению прочности и изгибу пикселя. В компании XenICs предложен способ решения связанных с изгибом тонких пикселей проблем, который заключается в формировании активного слоя специальной формы (U-профиль), что повышает механическую прочность структур (Рис. 6). Для обеспечения хороших пороговых характеристик детекторов важен правильный выбор материала и параметров поглощающего слоя (обычно для повышения эффективности поглощения используют поглощающие слои толщиной в четверть длины волны излучения, хотя при строгом расчете оптимальной толщины поглощающего слоя следует учитывать спектры излучения объектов и спектры пропускания атмосферы и входной оптической системы). Перспективно применение для создания поглощающих слоев тонких металлических пленок.

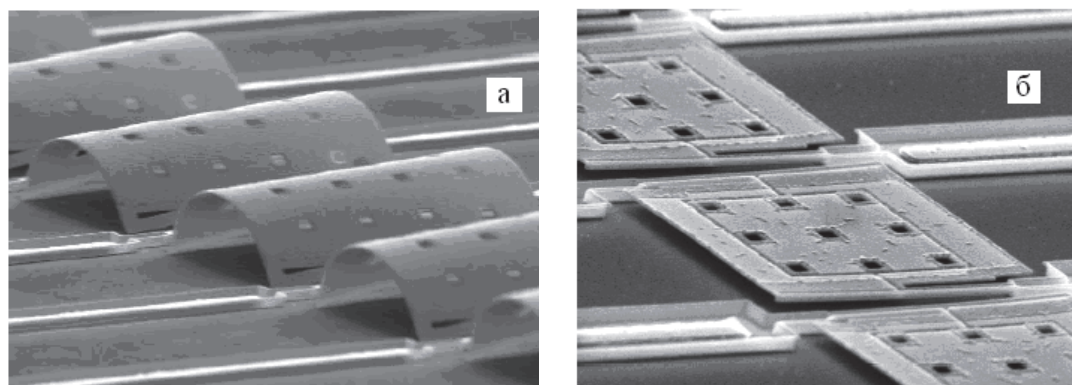


Рис. 6. Изображения линейных матриц на основе микроболометров из поликристаллического SiGe с толщиной слоя 0.26 мкм, полученные при помощи сканирующего электронного микроскопа: (а) неоптимизированные процессы; (б) – после оптимизации процессов создания поглощающего слоя TaN и формирования U-профиля в пикселе[30].

Заключение

Таким образом, в настоящее время разработаны основные технологические процессы для формирования монолитных микроболометрических детекторов на основе поликристаллического силицида германия, которые перспективны для создания на их основе неохлаждаемых и относительно недорогих матриц фокальной плоскости для спектрального диапазона 8-12 мкм. Важной задачей разработчиков детекторов на основе поликристаллического силицида германия является снижение температуры отжига для лучшей совместимости технологии создания болометров и стандартных КМОП-процессов. Следует отметить, что в последние пять лет детекторы на основе поликристаллического силицида германия испытывают острую конкуренцию с быстро прогрессирующими микроболометрами на основе аморфного кремния и аморфного силицида германия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Рогальский А.* Инфракрасные детекторы / Пер. под ред. А.В. Войцеховского. Новосибирск: Наука, 2003. 636 с.
2. *Tissot J.L.* IR detection with uncooled focal plane arrays. State-of-the art and trends // Opto-electronics review. 2004. Vol. 12(1). P. 105-109.
3. *Tissot J.L., Troulleau C., Fieque B., Crastes A., Legras O.* Uncooled microbolometer detector: recent developments at ULIS// Opto-Electronics review. 2005. 14(1). P.25-32.
4. *Алиев В.Ш., Васильева Л.Л., Демьяненко М.А., Есаев Д.Г., Овсяк В.Н., Фомин Б.И.* Свойства слоев оксидов ванадия, используемых в качестве термочувствительных элементов неохлаждаемых матричных микроболометрических приемников// Тезисы докладов 21 Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. 25-28 мая 2010. Москва, Россия. С.95.
5. *Bhan R.K., Saxena R.S., Jalwania C.R., Lomash S.K.* Uncooled infrared microbolometers arrays and their characterization techniques// Defence Science Journal. November 2009. Vol.59. №6. P.580-589.
6. *Демьяненко М.А., Кравченко А.Ф., Овсяк В.Н.* Неохлаждаемые резистивные микроболометры. Ч. I. Режим постоянного смещения // Автометрия. 2005. т.41. №1. С.88- 103.
7. *Демьяненко М.А., Кравченко А.Ф., Овсяк В.Н.* Неохлаждаемые резистивные микроболометры. Ч. II. Режим импульсного смещения// Автометрия. 2005. т.41, №5. С.108- 122.
8. *Демьяненко М.А., Есаев Д.Г., Марчишин И.В., Овсяк В.Н., Фомин Б.И.* Поглощение инфракрасного и терагерцового излучения в неохлаждаемых микроболометрических приемниках// Тезисы докладов 21 Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. 25-28 мая 2010. Москва, Россия. С.99.
9. *Chen C., Ma H., Xiang S., Yi X.* Fabrication and performance of microbolometer arrays based on nanostructured vanadium oxide thin films// Smart Materials and Structures. 2007. Vol.16. №3. P.696.
10. *Ambrosio R., Moreno M., Mireles J., Torres A., Kosarev A., Heredia A.* An overview of uncooled infrared sensors technology based on amorphous silicon and silicon germanium alloys// Physica Status Solidi (c). April 2010. Vol.7. №3-4. P.1180-1183.
11. *Radford W., Murphy D., Ray M., Prost S., Kennedy A., Soch K., Coda R., Lung G., Moody E., Gleichman D.* 320×240 microbolometer focal plane array for uncooled application// Proc. SPIE. 1995. Vol.2552. P.675.
12. *Oda N., Yoneyama H., Sasaki T., Sano M., Kurashina S. Hosako I., Sekine N., Sudoh T., Irie T.* Detection of terahertz radiation from quantum cascade laser using vanadium oxide microbolometer focal plane arrays// Proc. SPIE. 2008. Vol.6940. P.69402Y.
13. *Енукова Т.А., Иванова Н.Л., Куликов Ю.В., Маляров В.Г., Хребтов И.А.* Аморфные пленки кремния и германия // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. № 13. С. 21-26.

14. *Enukova T.A., Ivanova N.L., Kulikov Yu.V., Malyarov V.G., Khrebtov I.A.* Amorphous silicon and germanium films for uncooled microbolometers // Technical Physics Letters. 1997. Vol. 23. №7. P. 504-506.
15. *Almasri, M., Bai Xu, Castracane, J.* Amorphous silicon two-color microbolometer for uncooled IR detection// Sensors Journal. April 2006. Vol.6. №2. P.293–300.
16. *Iborra E., Clement M., Herero L.-L., Sangrador J.* IR uncooled bolometers based on amorphous $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{O}_y$ on silicon micromachined structures // Journal of microelectromechanical systems. 2002. Vol. 11. № 4. P. 322-329.
17. *Ahmed A.H.Z., Tait R.N.* Characterization of amorphous $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{O}_y$ for micromachined uncooled bolometers application// Journal of Applied Physics. 2003. Vol. 94. № 8. P. 5326-5332.
18. *Ahmed A., Tait R.N.* Noise behavior of amorphous $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{O}_y$ for microbolometers application// Infrared Physics and Technology. 2005. Vol. 46. P. 468-472.
19. *Tezcan D.S., Kocer F., Akin T.* An uncooled microbolometer infrared detector in any standard CMOS technology // The 10th Int. Conf. On Solid-State Sensor&Actuators (TRANSDUCER-99). June 7-10, 1999. Sebdai: Japan. P.610-613.
20. *Wissmar G.E., Radamsson H.H., Yamamoto Y., Tillack B., Vieider C., Andersson J.Y.* SiGe quantum wells for uncooled long wavelength infra-red radiation (LWIR) sensors// Journal of Physics: Conference Series. 2008. Vol. 100. Part 4. P. 042029.
21. *Torres A., Kosarev A., Garsia Cruz M.L., Ambrosio R.* Uncooled micro-bolometer based on amorphous germanium film// Journal of Non-Crystalline Solids. 2003. Vol. 329. P. 179-183.
22. *Garcia M., Ambrosio R., Torres A., Kosarev A.* IR bolometers based on amorphous silicon germanium alloys// Journal of Non-Cristalline Solids. 2004. Vol. 338. P. 744-748.
23. *Yon J.J., Nieto J.P., Vandroux L., Imperinetti P., Rolland E., Goudon V., Vialle C., and Arnaud A.* Low-resistance a-SiGe-based microbolometer pixel for future smart IR FPA// Proc. SPIE. 2010. Vol. 7660. P.76600.
24. Fresh Patents № 9787004428 May 1997. Method of fabrication of an infrared radiation detector and infrared detector device / P. Fiorini, S. Sedky, M. Caymax, C. Baert.
25. *Sedky S., Fiorini P., Caymax M., Verbist A., Baert C.* IR bolometers made of polycrystalline silicon germanium// Sensor and Actuators. 1998. №. A66. P. 193-199.
26. *Sedky S., Fiorini P., Baert K., Hermans L., Mertens R.* Characterization and optimization of infrared poly SiGe bolometers // IEEE transactions on electron devices. 1999. Vol. 46. № 4. P. 675-682.
27. *Moor P.-D., John J., Sedky S., VanHoof C.* Linear arrays of fast uncooled poly-SiGe microbolometers for IR detection // Proc. SPIE. 2000. Vol. 4028. P. 27-34.
28. *Moor P.-D., Kavadias S., Leonov V., Van Hoof C.* Process development of fast and sensitive polySiGE microbolometer arrays // Proc. SPIE. 2001. Vol. 4228. P. 94-99.
29. *Sedky S., Witvrouw A., Baert K.* Poly SiGe, a promising material for MEMS monolithic integration with the driving electronics // Sensor and Actuators. 2002. № A97-98. P. 503-511.
30. *Leonov V.N., Perova N.A., Vermeieren J., Grietens B., Goessens C., Moor P.D., Van Hoof C.A.* Optimization of design and technology for uncooled poly-SiGe microbolometer arrays // Proc. SPIE. 2002. Vol. 4721. P. 122-133.
31. *Leonov V.N., Perova N.A., Vermeiren J.P., Grietens B., Goessens C., Moor P.D., Van Hoof C.A.* Micromachined poly-SiGe bolometer arrays for infrared imaging and spectroscopy // Proc. SPIE. 2003. Vol. 4945. P. 54-63.
32. Handbook of Infrared Detection Technologies / Edited by Mohamed Henini and Manijeh Razeghi. Elsevier Advanced Technology, PO Box 150 Kidlington Oxford OX5 1 AS, UK,2002, 518 p.
33. 8-14 micrometers microbolometer arrays, march 2003, реклама продукции на сайте www.XenICs.com
34. Пат. США № 2005/0012040 A1, U.S. class: 250/338.4, заявл. 17.08.2004, опубл. 20.01.2005. Fiorini P., Sedky S., Caymax M., Baert C., Interuniversitair Microelektronica

- Centrum (IMEC), Leuven (BE), «Method of fabrication of an infrared radiation detector and infrared detector device».
35. Пат. США № 7,320,896 B2, U.S. class: 438.14, 438.149, 438;250.338.1, МПК: H01L 21/00; заявл.28.12.2006, опубл. 22.01.2008. Fiorini P., Sedky S., Caymax M., Baert C. «Infrared Radiation Detector».
 36. Dong L., Yue R.-F., Liu L.-T. Characterization of uncooled poly SiGe microbolometer for infrared detection // Chin. Phys. Lett. 2003. Vol. 20. № 5. P. 770-773.
 37. Dong L., Yue R., Liu L. An uncooled microbolometer infrared detector based on poly-SiGe thermistor // Sensor and Actuators. 2003. № A105. P. 286-292.
 38. Ruifeng Y., Dong L., Litian L. Monolithic Uncooled 8 × 8 Bolometer Arrays Based on Poly-SiGe Thermistor// International Journal of Infrared and Millimeter Waves. 2006. Vol.27. N. 7. P.995-1003.
 39. King T.J., McVittie J.P., Saracwat K.C. Electrical properties of heavily-doped polycrystalline silicon-germanium films// IEEE Transaction on Electron Devices. 1994. Vol. 41. № 2. P. 228-232.
 40. Chiussi S., Serra C., Serra J., Gonzales P., Leon B., Urban S., Andra G., Bergmann J., Falk F., Fabbri F., Fornarini L., Martelli S., Rinaldi F. Laser crystallisation of poly-SiGe for microbolometers // Applied Surface Science. 2002. Vol.186. P. 166-172.
 41. Chiussi S., Lopez E., Serra J., Gonzalez P., Serra S., Leon B., Fabbri F., Fornarini L., Martelli S. Influence of laser fluence in ArF-excimer laser assisted crystallisation of a-SiGe:H films // Applied Surface Science. 2003. Vol. 208/209. P. 358-363.
 42. Чистохин И.Б., Михайловский И.П., Фомин Б.И., Черепов Е.И. Поликристаллические слои сплава кремний-германий для неохлаждаемых болометрических приемников ИК-излучения // Прикладная физика. 2003. № 2. С. 98-101.
 43. Chistokhin I.B., Michailovsky I.P., Fomin B.I., Cherepov E.I. Polycrystalline layers of silicon-germanium alloy for uncooled IR bolometers // Proc. SPIE. 2003. Vol. 5126. P. 407-414.
 44. Чистохин И.Б., Гутаковский А.К., Дерябин А.С. Структура и электрофизические свойства поликристаллических пленок SiGe, полученных методом молекулярно-лучевого осаждения // ФТП. 2007. т.41. в.3. С.352-355.