

УДК 621.315.5/6

ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕРМОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК ДЛЯ БЫСТРОДЕЙ- СТВУЮЩИХ МЭМС ИНФРАКРАСНЫХ ФОТОПРИЕМНЫХ МОДУЛЕЙ

К. т. н. В. В. Денискин, М. О. Рапидов, к. ф.-м. н. А. А. Шиляев,
к. ф.-м. н. В. В. Завьялов, к. т. н. Е. Ю. Шампаров

НИИ физических проблем им. Ф. В. Лукина, Институт энергетических проблем
химической физики РАН, Институт физических проблем им. П. Л. Капицы РАН
Россия, г. Москва
mor52@mail.ru

Исследованы основные элементы матричного приемника тепловизора. Установлены преимущества монокристаллических пленок висмута по сравнению с аморфными пленками металлов, применяемыми сегодня в инфракрасных фотоприемных модулях тепловизоров. Представлены результаты измерений тестовых структур на основе монокристаллических пленок висмута.

Ключевые слова: висмут, ИКФМ, монокристаллический, тепловизор, терморезистор

В настоящее время постоянный рост потребительского спроса на доступные высокочувствительные тепловизоры повышает актуальность работ по созданию новых МЭМС инфракрасных фотоприемных модулей (ИКФМ) для матричного приемника излучения (МПИ) тепловизоров. Применение новых материалов, сочетающих в себе свойства преобразователей тепловой энергии и поглотителей ИК-излучения и обладающих высокой устойчивостью к воздействию внешней среды, позволяет значительно упростить технологию изготовления ИКФМ. В качестве таких материалов можно использовать монокристаллические тонкопленочные структуры на основе полуметаллов. Например, весьма привлекательно [1] применение ИКФМ на основе эпитаксиальных монокристаллических слоев висмута, легированного сурьмой ($\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$), как в металлическом состоянии, так и в переходном состоянии «металл — диэлектрик». Пленки висмута, а также его сплавы с сурьмой в достаточно широком диапазоне температур могут иметь высокий температурный коэффициент сопротивления (ТКС), превышающий ТКС нормальных металлов. Необходимо отметить, что конструкция ИКФМ влияет на извлечение максимума потенциальных свойств терморезистивных слоев. Авторами [1] предложена конструкция МЭМС, которая должна повышать быстродействие ИКФМ.

Анализ состояния стандартных разработок фотоприемных модулей достаточно полно изложен в [2, 3]. С целью создания экспериментального неохлаждаемого МПИ тепловизора с применением ИКФМ повышенной чувствительности и быстродействия на основе эпитаксиальных монокристаллических слоев висмута на экспериментальных установках наших предприятий было проведено измерение и исследование специально изготовленных структур и узлов МЭМС ИКФМ. В частности, показана принципиальная возможность достижения величины поглощения ИК-излучения свыше 50% термочувствительными тонкопленочными структурами на основе монокристаллических пленок висмута, благодаря чему может быть повышена удельная обнаружительная способность по сравнению с известными аналогами, в которых она ограничена величиной примерно $10^8 \text{ см} \cdot \text{Вт}^{-1} \cdot \text{Гц}^{1/2}$.

Для экспериментальных работ по специально разработанной технологии монокристаллические пленки Bi и $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ выращивали на таких аморфных подложках как нитрид кремния и полиимид, а также на кремнии. Электронная микрофотография такой пленки висмута толщиной около 100 нм показана на рис. 1, на котором наглядно видна монокристаллическая структура. Высокая монокристаллическая структура висмутовых пленок на различных подложках была подтверждена результатами рентгеноструктурных исследований, при которых на всех полученных дифрактограммах выделяются интенсивные рефлексы при углах $22,4^\circ$, $45,8^\circ$ и $71,4^\circ$, которые отвечают осевым рефлексам (003), (006) и (009) соответственно от металлического висмута ромбоэдрической симметрии. Других рефлексов от висмута не наблюдалось.

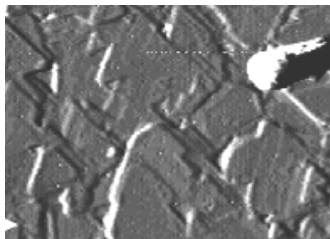


Рис. 1. Микрофотография монокристаллической пленки Bi (площадь 3×5 мкм)

Детально исследованы температурные изменения (в интервале 4,2—300 К) сопротивления, подвижности носителей заряда эпитаксиальных пленок висмута и $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ различной толщины на аморфной подложке. Проанализировано поведение концентрации и подвижности носителей заряда. Показано, что ТКС наноструктурированных пленок в зависимости от концентрации Sb и размера образцов может принимать значение (0,5—2) %/К. На рис. 2 приведен пример полученных температурных зависимостей сопротивления пленок висмута при различном содержании в них сурьмы.

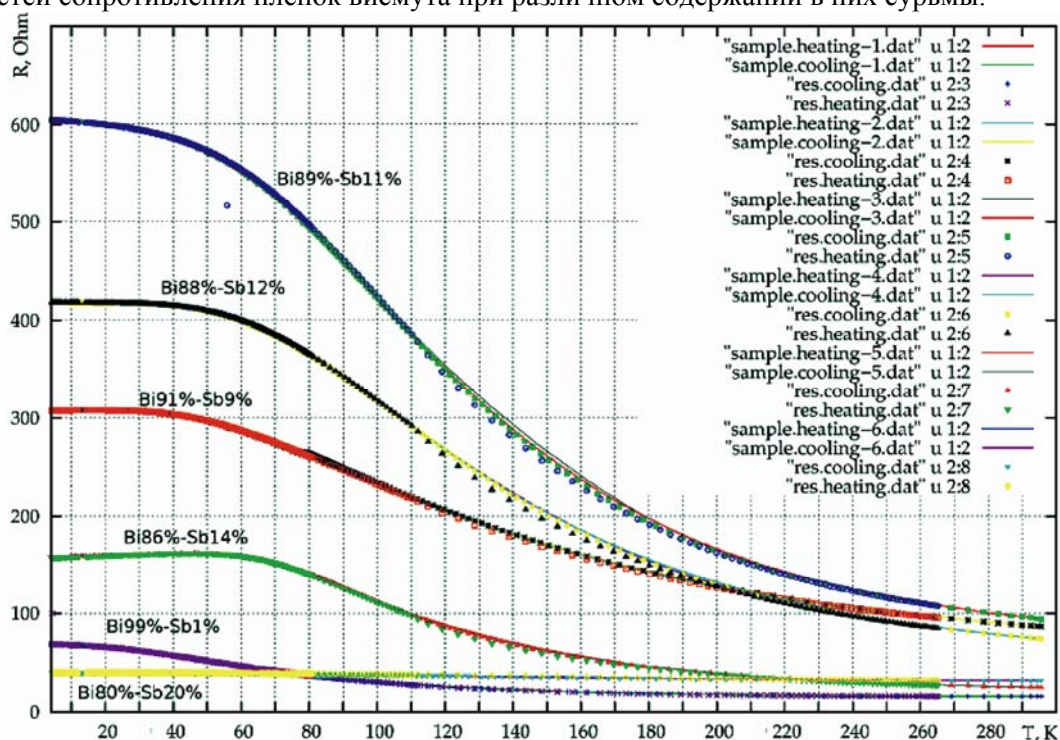


Рис. 2. Зависимость сопротивления пленок $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ от температуры (x — в атомарных %)

Как прототип ИКФМ конструкции авторов [1] на кремниевых пластинах были изготовлены тестовые кристаллы с набором структур и узлов ИКФМ на основе монокристаллических пленок висмута, при этом чувствительный элемент выполнялся из протяженных полосок тонкопленочного монокристаллического материала в виде меандра (рис. 3) на тонких диэлектрических мембранах разных типов. На таких тестовых кристаллах были проведены измерения основных характеристик экспериментальных образцов ИКФМ. В частности, подтверждено, что электронные свойства пленок висмута разной толщины значительно различаются и не совпадают со свойствами массивного образца висмута. Например, подтверждено, что в отличие от объемного висмута, проявляющего металлические свойства, сопротивление пленок висмута возрастает с уменьшением температуры, т.е. пленки висмута проявляют диэлектрические свойства [4].

Наряду с толщиной пленки, на свойства ИКФМ влияют также размеры тонкопленочного $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ резистивного элемента. Такие свойства исследовались на структурах (рис. 3) с различными размерами элементов. Ширина элементов варьировалась от 100 до 1800 нм. Результаты измерений параметров резистивных элементов при толщине пленки Bi 100 нм показаны в таблице.

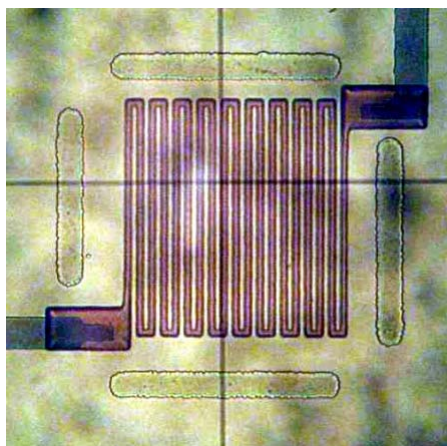


Рис. 3. Микрофотография экспериментальной структуры ИКФМ (площадь меандра 70×70 мкм)

Параметры экспериментальных структур

Сопротивление меандра, кОм	Поверхностное сопротивление пленки, Ом/кв	Ширина проводящих полос, мкм	ТКС при температуре 293 К, %/К
1500	42	0,1	0,67
200	40	0,7	0,58
36	38	1,5	0,52

Исследования тестовых структур на основе монокристаллических пленок из висмута показали, что такие пленки имеют повышенную термочувствительность и характеризуются минимальным тепловым шумом. Его напряжение $V_{ш}$ определяется по формуле Найквиста: $V_{ш}^2 = 4K_B TRf$, где R — сопротивление терморезистора, f — рабочая полоса частот, K_B — константа Больцмана, T — температура в К. Измеренные значения $V_{ш}$ составляют порядка 50 нВ для терморезистора с сопротивлением 100 кОм.

Исследования подтвердили перспективность разработки ИКФМ на основе монокристаллических пленок $Bi_{1-x}Sb_x$, которые одновременно выполняют функции термочувствительного элемента и поглотителя ИК-излучения. В них практически отсутствуют низкочастотные шумы, наблюдаемые в используемых сегодня аморфных пленках, и при этом они обладают высокой термочувствительностью. Пиксел МПИ на основе новых тонкопленочных монокристаллических структур позволяет реализовать преимущества схем считывания — накопление сигнала (заряда) в течение всего телевизионного кадра. Это в конечном счете приближает создание недорогих МПИ для тепловизоров.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Шилиев А.А., Кик М.А., Денискин В.В. Быстродействующий микромеханический приемник электромагнитного излучения // Естественные и технические науки.— 2012.— № 5.— С. 313—316.
2. Филачев, А.М., Андрушин С.Я. Состояние разработок микроболометрических матриц в Государственном научном центре «НПО Орион» // Прикладная физика. — 2000.— № 5.— С. 5—17.
3. Тарасов, В.В., Якушенков Ю.Г. Инфракрасные системы «смотрящего типа». — Москва: Логос, 2004.
4. Комник, Ю.Ф., Бухштаб, Е.И. Наблюдение квантового и классического размерных эффектов в поликристаллических тонких пленках висмута // ЖЭТФ.— 1968.— Т. 54.— С. 63—68.

V. V. Deniskin, M. O. Rapidov, A. A. Shilyev, V. V. Zavyalov, E. Yu. Shamparov
Studies of temperature-sensitive elements based on single-crystal films for high performance MEMS IR FPA modules.

Basic structures and components for MEMS thermal imager matrix have been investigated. The basic advantages of single-crystal bismuth films compared to amorphous metal films used today in IR FPA thermal imagers has been determined. Measurement results for test structures based on single-crystal bismuth films are presented.

Keywords: *bismuth, IR FPA, single crystal, thermal imager, thermistor.*