

Краткие сообщения

06;07;12

Неоднородные металлодиэлектрические пленки $\text{SiO}_x\langle\text{Fe}\rangle$ как материал для инфракрасных тепловых приемников излучения

© Е.В. Михайловская, И.З. Индутный, П.Е. Шепелявый

Институт физики полупроводников НАН Украины,
03028 Киев, Украина
e-mail: indutnyu@isp.kiev.ua

(Поступило в Редакцию 19 марта 2002 г.)

Описана вакуумная технология получения композитных металлодиэлектрических пленок $\text{SiO}_x\langle\text{Fe}\rangle$ с изменяющейся по толщине концентрацией металла в диэлектрической матрице SiO_x . Приведены результаты исследования отражения и пропускания таких пленок в ИК области спектра 2–12 μm и моделирования их оптических характеристик. В диапазоне температур 283–390 К исследованы термочувствительные свойства пленок $\text{SiO}_x\langle\text{Fe}\rangle$ с соотношением объемов фаз Fe (23%) и SiO (77%). Определено значение температурного коэффициента сопротивления (ТКС) для пленок такого состава. Показана возможность использования исследованных пленок в качестве чувствительного слоя микроболометра.

Введение

В последнее время уделяется много внимания работам малогабаритных тепловизионных камер и ИК отображающих устройств, в которых термочувствительный элемент выполнен в виде линейки или матрицы, составленной из идентичных неохлаждаемых тепловых приемников излучения (ТПИ) [1]. Основным преимуществом таких ТПИ является отсутствие системы криогенного охлаждения, что существенно упрощает конструкцию ИК отображающего устройства, уменьшает его вес, снижает стоимость и т.п. В отличие от фотонных приемников ТПИ могут работать в широкой ИК области спектра, поскольку у них отсутствует граница длинноволновой чувствительности. Класс ТПИ включает термодпары и болометры, оптико-акустические и пироэлектрические приемники. Наиболее простыми в изготовлении и поэтому достаточно распространенными являются болометрические матричные приемники. Чувствительный элемент микроболометра обычно содержит термочувствительный слой с высоким значением температурного коэффициента сопротивления (ТКС) и поглощающее покрытие. В качестве термочувствительного слоя чаще всего используются пленки диоксида ванадия [2,3] или аморфные пленки полупроводников [4,5]. Поглощающими элементами в микроболометрах могут быть тонкие металлические пленки (поглощение $\sim 50\%$ в широком спектральном интервале) или многослойные структуры, для которых возможно достижение резонансного поглощения $\sim 90\%$ в определенной спектральной полосе.

Однако наличие дополнительных слоев существенно увеличивает теплоемкость микроболометра и ухудшает его характеристики. Поэтому перспективной является разработка материалов, которые могли бы совмещать

функции термочувствительного и поглощающего слоев. В предыдущей работе [6] показано, что неоднородные металлодиэлектрические пленки могут обладать высоким поглощением в ИК области, которое сочетается с довольно высокими по сравнению с металлами значениями ТКС, что позволяет реализовать на одном слое как стадию поглощения ИК излучения, так и формирование электрического сигнала.

Настоящая работа посвящена изучению оптических и термодинамических свойств неоднородных металлодиэлектрических пленок, изготовленных на основе монооксида кремния (SiO) и железа (Fe). Работа содержит результаты экспериментальных исследований спектров отражения (R) и пропускания (T) пленок $\text{SiO}_x\langle\text{Fe}\rangle$ в области 2.0–12.0 μm и сопоставление этих спектров со спектрами R и T , рассчитанными в приближении „эффективной среды“, а также результаты исследований зависимости сопротивления пленок (r) и ТКС от температуры в диапазоне 283–390 К.

Методика эксперимента

Образцы для измерений готовились в соответствии с предложенным нами ранее способом получения светопоглощающих неоднородных покрытий на основе монооксида кремния и хрома [7], который заключается в термическом испарении смеси этих материалов в вакууме из одного испарителя. В настоящей работе в вакууме $2 \cdot 10^{-3}$ Па испарялась смесь порошков SiO и Fe на стеклянные, ситалловые и кремниевые подложки. Усредненное соотношение массового состава металла и окисла в полученном слое в первом приближении определялось соотношением масс порошков в испарителе, а их распределение — режимом испарения. Благодаря

разнице температур испарения SiO и Fe можно подобрать такой режим нагрева смеси, который обеспечивал бы необходимое распределение концентрации компонент в осаждаемом слое. Так, постепенное понижение температуры испарителя приводило к последовательному уменьшению доли металлической компоненты в потоке пара. Полученные таким образом слои представляли собой композитные пленки $\text{SiO}_x\langle\text{Fe}\rangle$ с изменяющейся по толщине концентрацией металла в диэлектрической матрице, причем максимум концентрации металла находился возле подложки, а минимум — на поверхности пленки. Последнее обстоятельство являлось определяющим для оптических и электрических свойств таких неоднородных металлодиэлектрических слоев. Контроль процесса напыления пленок осуществлялся калиброванным кварцевым резонатором, а их толщина измерялась микроинтерферометрическим методом и составляла от 2 до $3\ \mu\text{m}$.

Слои, которые получали термическим испарением моноксиды кремния в аналогичных условиях, имели состав SiO_x , где $x = 1.2-1.3$ [8], поэтому в работе мы используем обозначение исследуемых пленок в виде $\text{SiO}_x\langle\text{Fe}\rangle$. Измерение спектров отражения и пропускания в ИК области спектра проводили на пленках, напыленных на Si(100) подложки, на спектрометре ИКС-31. Для исследований термочувствительных свойств (ТКС и сопротивления) использовались пленки $\text{SiO}_x\langle\text{Fe}\rangle$, осажденные в вакууме на ситалловые подложки. Изготовленные на их основе образцы в виде монопикселя планарной конфигурации и площадью несколько квадратных миллиметров имели сверху контакты в виде напыления слоев Mn-Ag и подпаянных к ним тонких проводников и во время измерений находились в термостате. Ток смещения выбирался так, чтобы исключить джоулевый нагрев образца при измерениях.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 1, 2 (кривые 2) представлены экспериментально измеренные спектральные зависимости R и T напыленной пленки $\text{SiO}_x\langle\text{Fe}\rangle$ толщиной $2.73\ \mu\text{m}$. Соотношение масс порошков в испарителе составляло 50:50, что соответствовало соотношению объемов фаз Fe и SiO, равному 23:77. Режим нанесения выбирался таким, чтобы получить неоднородное распределение фаз в пленке с минимальным содержанием металла на ее поверхности. Такое распределение, как показано в предыдущей работе [9], обеспечивает низкую отражательную способность пленки в широком спектральном интервале. Как видно из рис. 1, 2, во всем исследованном спектральном интервале пленка характеризуется слабым пропусканием (меньше 1%), поэтому ее поглощательная способность определяется величиной $1-R$. В области $2-8.5\ \mu\text{m}$ поглощательная способность составляет около 90%. В более длинноволновой области $8.5-12\ \mu\text{m}$

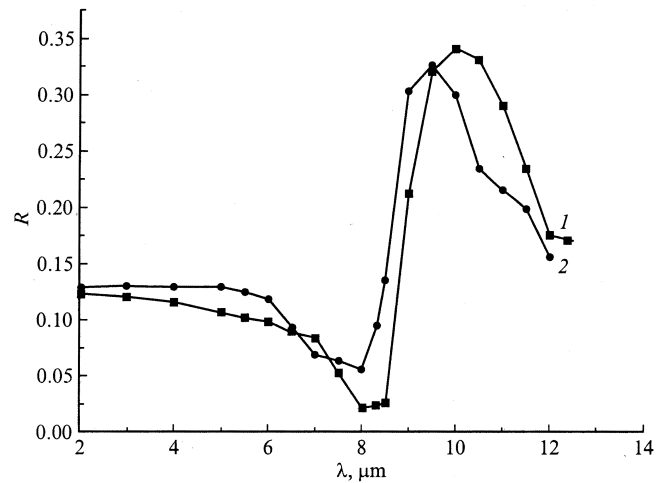


Рис. 1. Спектр отражения градиентного слоя $\text{SiO}_x\langle\text{Fe}\rangle$ (1 — расчет, 2 — экспериментальные данные).

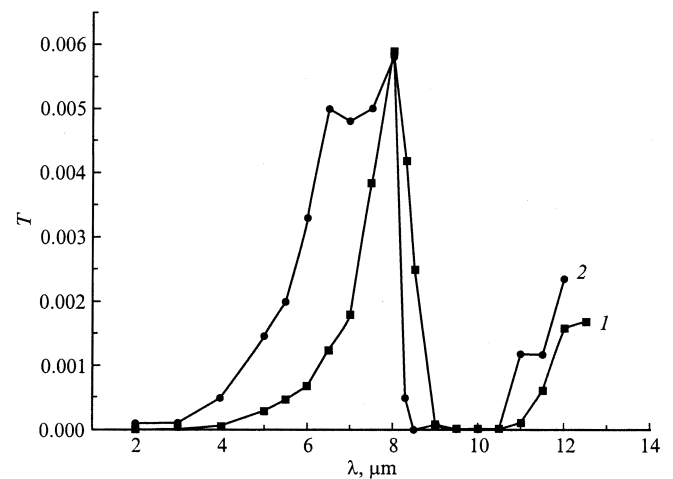


Рис. 2. Спектр пропускания градиентного слоя $\text{SiO}_x\langle\text{Fe}\rangle$ (1, 2 — то же, что и на рис. 1).

наблюдается рост коэффициента отражения, который достигает максимума (32.5%) в области $9.5\ \mu\text{m}$. Такие особенности в спектре отражения связаны с наличием в этой области характерной для SiO_x полосы поглощения, обусловленной колебательной модой Si-O связи [10]. Указанная полоса проявляется и в спектре пропускания (рис. 2, кривая 2). Однако и в этой области пленка характеризуется достаточно высокими значениями поглощательной способности — от 85 до 67.5%.

Моделирование оптических характеристик таких слоев в ИК области было выполнено с использованием той же методики [9], которая применялась для видимой области спектра. Предполагалось, что напыленная пленка представляет собой металлодиэлектрический слой, состоящий из оксидной матрицы с металлическими включениями, концентрация которых изменяется линейно по

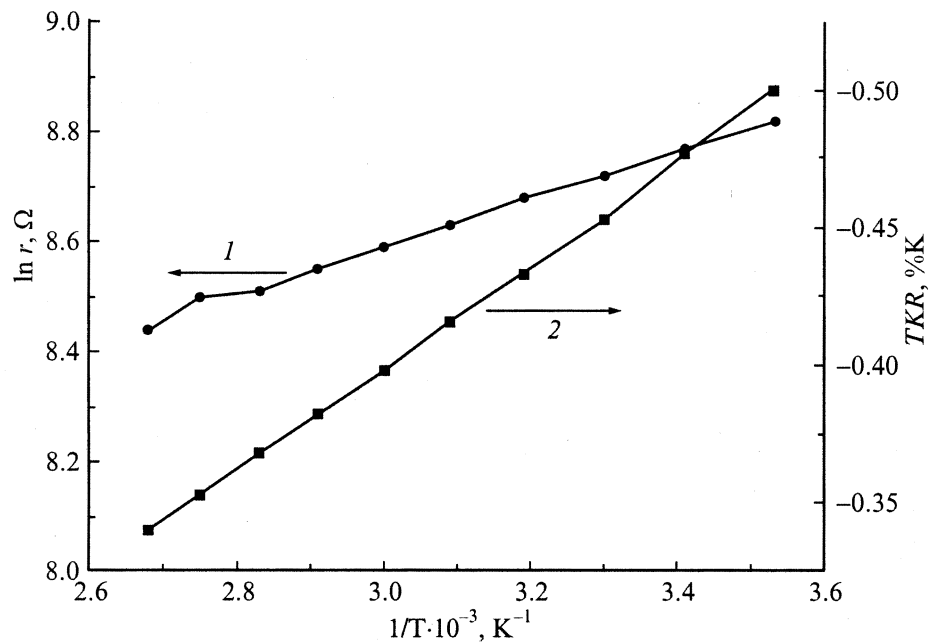


Рис. 3. Зависимость сопротивления (1) и температурного коэффициента сопротивления (2) пленки $\text{SiO}_x(\text{Fe})$ (размеры образца $0.8 \times 2 \text{ mm}$, толщина $2.73 \mu\text{m}$) от температуры.

сечению слоя. Средняя объемная концентрация металла составляет 23% (как и в испарителе). Для описания оптических постоянных (показателей преломления n и поглощения k) такого композита использовалась теория эффективной диэлектрической функции статистической гетеросистемы, предложенная Бруггеманом [11] и Ландауером [12]. Поскольку оптические постоянные SiO_x для $x = 1.2-1.3$ в ИК области детально не измерены, мы использовали в качестве n - и k -матрицы данные для SiO из работы [13], а n и k для железа взяты из [14]. Полученные спектральные зависимости n и k для композитов с различным содержанием Fe использовались при моделировании отражения и пропускания напыленной пленки. R и T неоднородного слоя рассчитывались с применением матричной теории Абеле, изложенной для диэлектрических структур в [15], а для неоднородных непоглощающих — в [16]. Более подробно методика расчета описана в [9]. Поскольку распределение концентрации Fe в слое экспериментально не исследовалось, а задавалось условиями напыления, мы выполнили расчеты R и T слоя для различных градиентов концентрации металла, сохраняя постоянной усредненную концентрацию. При этом минимизировалось отклонение экспериментальных и рассчитанных спектров в зависимости от величины градиента.

На рис. 1, 2 (кривые 1) приведены оптимальные значения рассчитанных спектров R , T градиентного слоя $\text{SiO}(\text{Fe})$ толщиной $2.73 \mu\text{m}$. Эти кривые соответствуют линейному увеличению объемной доли железа в слое от 42% на границе с подложкой до 4% на поверхности слоя. Видно неплохое совпадение рассчитанных

и экспериментальных кривых, что свидетельствует о применимости модели неоднородного металлодиэлектрического слоя. Однако наблюдаются и некоторые отличия, связанные с теми приближениями и упрощениями, которые применялись в расчетах. Во-первых, в спектрах отражения наблюдается сдвиг структуры, связанной с колебательной полосой, в длинноволновую сторону по сравнению с экспериментом. Это вызвано тем, что мы использовали для описания матрицы оптические данные SiO , а не SiO_x . Известно [10], что положение максимума колебательной полосы зависит от индекса стехиометрии и сдвигается в коротковолновую сторону при увеличении x , что наблюдается и в нашем случае. Кроме того, несколько искажается и форма полос, особенно в спектре пропускания. По-видимому, в процессе испарения возможно взаимодействие SiO и Fe в испарителе с образованием некоторой доли силицидов железа, которые могут модифицировать состав матрицы и вызывать появление дополнительных полос в ИК области.

Критериями выбора материала для термочувствительного слоя микроболометра являются в общем случае его сопротивление, ТКС и теплоемкость [1]. Исследование электрофизических свойств металлодиэлектрических пленок показало, что их сопротивление существенным образом зависит от состава. Варьируя содержание металла в пленке, можно изменять ее удельное сопротивление в очень широких пределах: от характерных для диэлектрика-оксида до металла. Сопротивление неоднородных слоев в основном определяется областью слоя с максимальной концентрацией металла, однако

зависит также и от величины градиента концентрации. Изменение объемного соотношения между проводящей (Fe) и непроводящей (SiO_x) фазами, а также характер распределения частиц по размерам существенно влияют и на величину ТКС [16].

Для определения величины ТКС неоднородных пленок $\text{SiO}_x\langle\text{Fe}\rangle$ проведены измерения зависимости их сопротивления r от температуры. Образцы для измерений представляли собой отдельные монопиксели размерами $0.8 \times 2 \text{ mm}$ на ситалловой подложке. Изменяя содержание металла (средняя концентрация от 13 до 23 объемных процентов) и подбирая соответствующий режим напыления смеси SiO–Fe, удалось получить пленки, величина ТКС которых при 293 К изменялась в пределах $(0.3\text{--}1.2)\%K^{-1}$. Величина сопротивления (для пикселей указанного размера) находится в пределах от сотен Ω до сотен $K\Omega$, что соответствует интервалу оптимальных значений сопротивлений для микролометров [1]. Максимальные значения ТКС наблюдались для наиболее высокоомных образцов.

Типичная зависимость сопротивления r таких образцов от температуры T , построенная в координатах $\ln r - T^{-1}$, показана на рис. 3 (кривая 1). Представленные результаты получены на неоднородной пленке $\text{SiO}_x\langle\text{Fe}\rangle$ с такими же параметрами, как и на рис. 1, 2 (толщина $2.73 \mu\text{m}$, среднее соотношение объемов фаз Fe и SiO равно 23:77). Видно, что сопротивление образца с повышением температуры уменьшается, т.е. исследуемые пленки обладают отрицательным значением ТКС, а его величина при комнатной температуре равна $-0.47\%K^{-1}$ и несколько понижается с повышением температуры (рис. 3, кривая 2). Отрицательное значение ТКС, по видимому, связано с характером проводимости этих пленок (проводимостью туннельного типа по каналам протекания, по аналогии, например, с керметными пленками Au–SiO близкого состава, механизм проводимости которых довольно подробно изучен [16,17]).

Выводы

С помощью термического испарения в вакууме получены неоднородные металлодиэлектрические пленки $\text{SiO}_x\langle\text{Fe}\rangle$, которые характеризуются низким коэффициентом отражения и высокой поглощательной способностью в ближней и средней ИК области спектра. Оптические параметры таких слоев описываются в модели эффективной диэлектрической функции статистической гетеросистемы оксидная матрица–металлические включения, концентрация которых изменяется линейно по толщине слоя. Электрическое сопротивление и ТКС полученных пленок, как и их оптические свойства, зависят от содержания металлических включений и величины градиента их концентрации. В частности, для пленок с усредненным соотношением объемов фаз Fe и SiO, равным 23:77, величина ТКС при комнатной температуре

составляет $-0.47\%K^{-1}$. Такие неоднородные металлодиэлектрические слои могут быть использованы в качестве чувствительного слоя микролометра, совмещающего функции поглощения ИК излучения и формирования электрического сигнала.

Список литературы

- [1] Хребтов И.А., Маляров В.Г. // Оптический журнал. 1997. Т. 64. № 6. С. 3–17.
- [2] Зеров В.Ю., Куликов Ю.В., Леонов В.Н. и др. // Оптический журнал. 1999. Т. 66. № 5. С. 8–12.
- [3] Changhong Chen, Xinjian Yi, Jing Zhang, Xingrong Zhao // Infrared Physics and Technology. 2001. Vol. 42. P. 87–90.
- [4] Liddiard K.C. // Infrared Phys. 1986. Vol. 26. N 1. P. 3–49.
- [5] Liddiard K.C., Unewisse M.H., Reinhold O. // Proc. SPIE. 1994. Vol. 2225. P. 62–71.
- [6] Shepeliavii P.E., Michailovskaya K.V., Indutnyi I.Z. // Intern. Conf. „Advanced materials“. Kiev, 1999. P. 52.
- [7] Шепелявый П.Е., Михайловская Е.В., Индутный И.З. и др. // Оптическая техника. 1995. № 2 (6). С. 16–17.
- [8] Братусь И.Я., Юхимчук В.А., Березинский Л.И. и др. // ФТП. 2001. Т. 35. Вып. 7. С. 854–860.
- [9] Индутный И.З., Шепелявый П.Е., Михайловская Е.В. и др. // ЖТФ. 2002. Т. 72. Вып. 6. С. 67–72.
- [10] Nakamura M., Mochizuki Y., Usami K. et al. // Sol. St. Commun. 1984. Vol. 50. N 12. P. 1079–1081.
- [11] Bruggerman D.A.G. // P.I. Ann. Phys. (Leipzig). 1935. Vol. B 24. N 7. P. 636–664.
- [12] Landauer R. // Journ. Appl. Phys. 1952. Vol. 23. N 7. P. 779–784.
- [13] Handbook of optical constants of Solid / ed E.D. Palik., London: Acad. Press. INC, 1985. P. 805.
- [14] Johnson P.B., Christy R.W. Phys. Rev. B. 1974. Vol. 9. N 12. P. 5056–5076.
- [15] Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970. 856 с.
- [16] Якобсон Р. // Физика тонких пленок. М.: Мир, 1978. Т. 8. С. 61–105.
- [17] Morris J.E. // Thin Solid Films. 1972. Vol. 11. P. 299–311.