

05;06;07;12

Пленки VO_x с улучшенными боллометрическими характеристиками для ИК-матриц

© В.Ю. Зеров, Ю.В. Куликов, В.Г. Маляров, И.А. Хребтов,
И.И. Шаганов, Е.Б. Шадрин

ВНЦ «Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова»,
С.-Петербург
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 13 ноября 2000 г.

Сообщается о результатах исследований пленок оксида ванадия (VO_x), полученных на кремниевых подложках методом реактивного магнетронного распыления и предназначенных для использования в неохлаждаемых микроболлометрических матрицах. Определены условия осаждения пленок, позволяющие снизить уровень токового $1/f$ -шума в 3–10 раз, расширить динамический диапазон и интервал рабочих температур микроболлометров. Обнаружена зависимость уровня $1/f$ -шума в пленках VO_x от содержания в них фазы VO_2 и от размеров зерен этой фазы. Предполагается, что наблюдаемый $1/f$ -шум вызван мартенситными превращениями, характерными для фазового перехода полупроводник–металл в VO_2 .

За последние годы отмечается существенный прогресс в развитии инфракрасных изображающих систем различного назначения на основе неохлаждаемых микроболлометрических матриц (МБМ) [1,2]. В качестве термочувствительного слоя плоскостных приемных элементов МБМ широко используют пленки оксидов ванадия смешанного состава (VO_x). Тонкие пленки VO_x (0.1–0.2 μm) при комнатной температуре имеют сопротивление, удобное для согласования микроболлометров со считывающей электроникой, и температурный коэффициент сопротивления (ТКС) [3], обеспечивающий высокую вольтовую чувствительность микроболлометров (МБ). Пороговая чувствительность МБ не только обусловлена тепловым и джонсоновским шумами, но и зависит в области низких частот от уровня токового $1/f$ -шума термочувствительного слоя, который для боллометра является избыточным шумом.

Использование пленок VO_x в МБМ выдвигает также требования к их адгезионным свойствам, однородности по поверхности и температуре осаждения (ниже 500°C), согласованной с технологией формирования планарной считывающей электроники.

Целью данной работы было улучшение болометрических характеристик пленок VO_x , полученных методом реактивного магнетронного распыления и предназначенных для использования в неохлаждаемых МБМ.

В ходе работы проведена серия напылений пленок VO_x на установке Z-400 на кремниевые подложки марки КДБ-10 $\langle 100 \rangle$ толщиной $350 \mu\text{m}$ со слоем Si_3N_4 толщиной $0.25 \mu\text{m}$. С учетом опыта ранее проведенных исследований [3,4] были выбраны следующие условия напыления: температура подложки — 450°C , суммарное давление кислородно-аргоновой смеси в напылительной камере — $2.4 \mu\text{bar}$, мощность магнетрона — около 110 W и время напыления — 24 min . В небольших пределах варьировали парциальное давление кислорода (около значения $0.12 \mu\text{bar}$), напряжение магнетрона и время охлаждения образцов. Напыления проводили через съемные медно-никелевые маски с получением отдельных небольших участков пленки VO_x для снижения в них напряжений, связанных с различием термического коэффициента линейного расширения пленки и подложки.

Свойства полученных пленок сравнивали по результатам измерений по 4-зондовой схеме температурных зависимостей сопротивления и спектров шума при комнатной температуре. Размеры рабочей зоны VO_x в тестовых образцах были в пределах от 1.6×0.8 до $1.6 \times 1.2 \text{ mm}$ (второй размер — расстояние между потенциометрическими контактами).

Сопротивление образцов измеряли в диапазоне температур $20\text{--}95^\circ\text{C}$, причем как при их нагревании, так и при охлаждении, с целью регистрации петли гистерезиса фазового перехода, поскольку в состав пленок входил диоксид ванадия (VO_2). Анализ параметров петли гистерезиса перехода давал информацию о составе и структурном совершенстве образцов, а также о возможном интервале рабочих температур МБМ. Температурные зависимости сопротивления различных образцов представлены на рис. 1.

Спектры шума измеряли в диапазоне частот $10\text{--}1000 \text{ Hz}$ при нескольких значениях тока смещения, вплоть до $250 \mu\text{A}$ (токами такого порядка питают микроболометры в матрицах). Выделенная токовая составляющая шума всех образцов удовлетворительно отвечала эмпи-

рическому выражению

$$U_I^2 = K \frac{I^2 R^2}{V f^n}, \quad (1)$$

где U_I^2 — средний квадрат напряжения токового шума в полосе частот $\Delta f = 1$ Hz; K — параметр, характеризующий конкретный образец; I — ток, протекающий через образец; R , V — сопротивление и объем рабочей зоны пленки соответственно; n — степень частотной зависимости. Это выражение отличается от известного [5] тем, что вместо безразмерного параметра Хоуге мы использовали параметр K ввиду отсутствия экспериментальных данных по концентрации носителей.

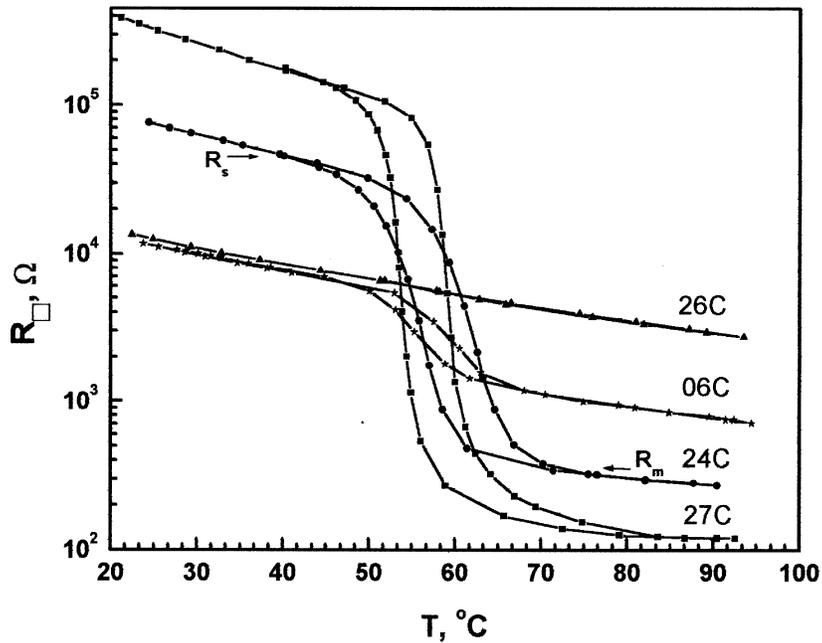


Рис. 1. Температурная зависимость сопротивления единицы площади тестовых образцов пленок VO_x (параметры см. в таблице). R_s , R_m — значения сопротивления образца соответственно в низкотемпературной и высокотемпературной точках схлопывания петли гистерезиса.

Электрофизические и шумовые параметры тестовых образцов VO_x пленок

| № образца | $R_{\square s}$, $\text{k}\Omega$ | ТКС, %/К | K , cm^3 | n | ΔT_L , $^{\circ}\text{C}$ | T_T , $^{\circ}\text{C}$ | ΔT_T , $^{\circ}\text{C}$ | R_s/R_m |
|-----------|------------------------------------|----------|-----------------------|-----|-----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|-----------|
| 27 С | 327 | 4.6 | 3.2×10^{-18} | 1.0 | 5.3 | 57 | 39.4 | 1200 |
| 24 С | 74 | 3.3 | 1.2×10^{-19} | 1.1 | 5.9 | 59 | 31 | 125 |
| 26 С | 12 | 2.6 | 3.4×10^{-21} | 1.2 | Явных перехода и петли нет | | | |
| 06 С | 11 | 2.7 | 2.4×10^{-22} | 0.6 | 3.9 | 58 | 19 | 5.1 |

Примечание. $R_{\square s}$, ТКС — сопротивление единицы площади и температурный коэффициент сопротивления при 25°C ; K , n — шумовой параметр и степень частотной зависимости $1/f$ -шума в соответствии с формулой (1); ΔT_L — ширина петли гистерезиса; T_T — температура фазового перехода; ΔT_T — протяженность перехода (между точками схлопывания петли гистерезиса); R_s/R_m — отношение значений сопротивления образца в низкотемпературной и высокотемпературной точках схлопывания.

Электрофизические и шумовые параметры некоторых тестовых образцов приведены в таблице.

При варьировании давления кислорода всего на 10–20% получены образцы с широким спектром значений отношения сопротивлений в точках схлопывания (рис. 1) петли гистерезиса R_s/R_m , в том числе не имеющие явного перехода и сохраняющие полупроводниковую проводимость во всем исследуемом температурном интервале с небольшим изломом зависимости $R_{\square}(T)$ вблизи 60°C (образец 26 С). Из всевозможных окислов ванадия только VO_2 испытывает фазовый переход в данном диапазоне температур, поэтому отсутствие перехода полупроводник–металл свидетельствовало о крайне низком содержании микрообластей VO_2 в составе таких пленок. И наоборот, проводимость образца 27 С с наибольшим R_s/R_m имела металлический характер при температурах выше 80°C в подтверждение преимущественного VO_2 состава.

В группе образцов, представленных зависимостями $R_{\square}(T)$ на рис. 1, можно отметить следующие закономерности. Величина шумового параметра K , определенного при комнатной температуре, уменьшается со снижением отношения R_s/R_m , т. е. содержания фазы VO_2 , что иллюстрируют данные таблицы (образцы 27 С, 24 С и 26 С). С другой стороны, образец 06С, хотя и содержит (судя по отношению R_s/R_m) больше VO_2 , чем образец 26 С, но имеет меньший K . Сравнительный анализ

состояния поверхности образцов с помощью электронного сканирующего микроскопа показал, что меньший шум в этом случае наблюдался для образца с меньшими размерами зерен (рис. 2). Таким образом, на интенсивность шума в исследованных пленках влияют два основных фактора — содержание диоксида ванадия и размер его зерна.

Источником возникновения токового шума в исследованных пленках могут быть мартенситные превращения, характерные для фазового перехода полупроводник–металл в VO_2 [6]. При фазовом переходе в пленке, начинающемся с появления зародыша новой фазы в толще старой, изменяется объем элементарной ячейки кристалла VO_2 , что приводит к возникновению механических напряжений и сопутствующих им дислокаций внутри кристаллитов [7]. В кристаллитах малых размеров механические напряжения сравнительно легко разряжаются путем вытеснения дислокаций на близко расположенную границу зерна. В более крупных кристаллитах сброс напряжений путем выхода дислокаций на границу затруднен. Кроме того, в крупных зернах возникают 2–3 мартенситных зародыша, взаимодействующих друг с другом через поле упругих напряжений либо через поле мягких оптических фононов [8], причем второй механизм (ян-теллеровский механизм мартенситности) доминирует. При ян-теллеровском механизме зародыши новой фазы упорядочиваются в доменную сверхструктуру [8] с появлением механических напряжений на стенках доменов.

Важно отметить, что возникновение ян-теллеровской сверхструктуры в VO_2 может происходить при температурах, превышающих 8°C [8] и намного меньших температуры фазового перехода монокристаллического диоксида ванадия (67°C). При температурах выше 8°C появление и исчезновение мартенситных зародышей будет приводить к флуктуации механических напряжений и внутренних деформаций на доменных стенках. Поэтому в пленке с преимущественным содержанием VO_2 и крупными зернами флуктуации рассеяния электронов проводимости на напряженных доменных стенках должны активно проявляться при температурах значительно ниже температуры фазового перехода, в том числе комнатной, при которой производились измерения шумов. Следует упомянуть, что в работе [9] уже предлагалась модель возникновения $1/f$ -шума в пленке VO_2 , в результате флуктуаций внутренних деформаций в блоках, из которых она состоит.

По разрабатываемой технологической методике осаждения пленок VO_x ранее были изготовлены макетные образцы 65-элементной ли-

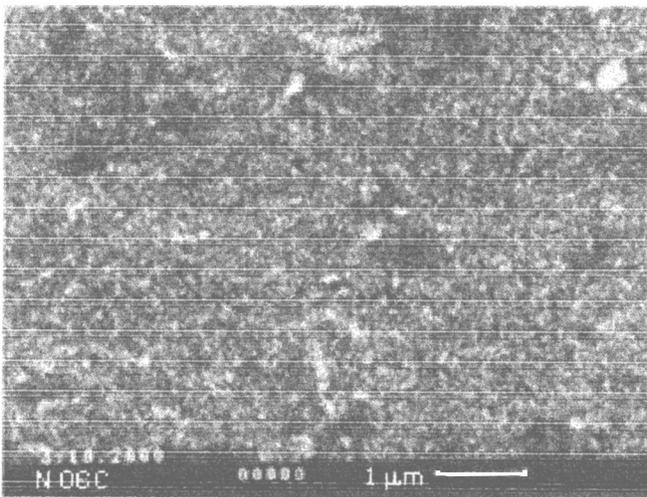
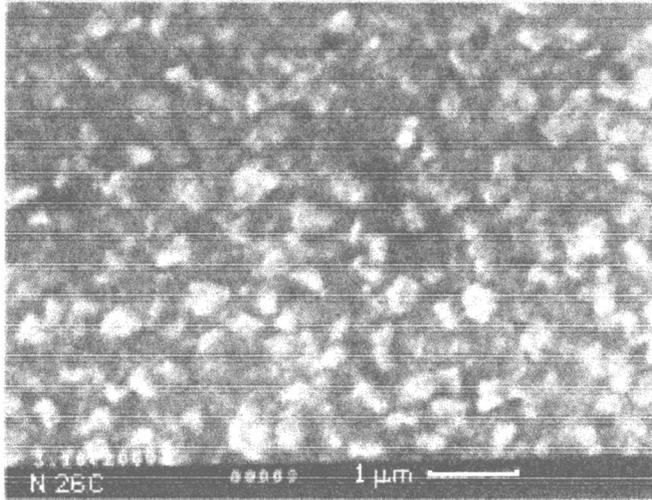


Рис. 2. Фотографии поверхности образцов 26С и 06С, полученные на электронном сканирующем микроскопе "CamScan".

нейки МБ мембранного типа площадью $46 \times 46 \mu\text{m}$ с использованием фотолитографии, жидкостного и ионного травления [10]. Достигнутое значение обнаружительной способности микроболометров ($D^* = 5 \cdot 10^7 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$) в значительной мере ограничивалось уровнем токового $1/f$ -шума ($K = 4.4 \cdot 10^{-20} \text{ cm}^3$). В настоящей работе получены пленки VO_x со значительно меньшими токовыми шумами ($K = (2.4-34) \times 10^{-22} \text{ cm}^3$). Использование таких пленок в МБМ позволит увеличить обнаружительную способность микроболометров в 3–10 раз. Кроме того, отсутствие перехода полупроводник–металл в термочувствительной пленке способствует расширению диапазонов линейности и/или рабочих температур микроболометров.

Список литературы

- [1] Хребтов И.А., Маляров В.Г. // Оптический журнал. 1977. Т. 64. № 6. С. 3–17.
- [2] Breen T., Kohin M., Marshall C.A., Murphy R., White T., Leary A., Parker T. // Proc. SPIE. 1999. V. 3698. P. 308–319.
- [3] Malyarov V.G., Khrebtov I.A., Kulikov Yu.V., Shaganov I.I., Zerov V.Yu., Feoktistov N.A. // Proc. SPIE. 1999. V. 3819. P. 136–142.
- [4] Зеров В.Ю., Куликов Ю.В., Леонов В.Н., Маляров В.Г., Хребтов И.А., Шаганов И.И. // Оптический журнал. 1999. Т. 66. № 5. С. 8–12.
- [5] Hooge F.N., Kleinpenning T.G.M., Vandamme L.K.G. // Rep. Prog. Phys. 1981. V. 44. N 5. P. 479–532.
- [6] Хахаев И.А., Чудновский Ф.А., Шадрин Е.Б. // ФТТ. 1994. Т. 36. № 6. С. 1643–1649.
- [7] Bruckner W., Opperman H., Reichelt W.F., Terukov E.I., Tschudnovskii F.A. // Akademie-Verlag, Berlin, 1994. V. 1983. S. 252.
- [8] Вихнин В.С., Гончарук И.Н., Давыдов В.Ю., Чудновский Ф.А., Шадрин Е.Б. // ФТТ. 1995. Т. 37. № 12. С. 3580–3596.
- [9] Байдакова М.В., Бобыль А.В., Маляров В.Г., Третьяков В.В., Хребтов И.А., Шаганов И.И. // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. В. 13. С. 58–65.
- [10] Malyarov V.G., Khrebtov I.A., Smirnov A.D., Raguzina L.S., Zerov V.Yu., Kulikov Yu.V., Shaganov I.I. // Proc. SPIE. 2000 (in press).