

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов И. В., Белокопытов Г. В., Сычев В. М. Параметрические взаимодействия в диэлектрических резонаторах СВЧ из титаната стронция при температуре жидкого гелия.— Письма в ЖТФ, 1977, 3, № 19, 1011.
2. Горин Ю. Н., Рубан А. С. Параметрический усилитель на монокристалле титаната стронция, работающий при температуре 4,2 К.— Радиотехника и электроника, 1978, 23, № 1, 225.
3. Тишер Ф. Техника измерений на СВЧ. М., 1963, с. 262.
4. Beihe K. Über das Mikrovellenverhalten nichtlinear Dielektika.— Philips Res. Rept., 1970, Suppl. 2, 81.
5. Агафонов Ю. А., Вендик О. Г. и др. Исследование диэлектрических свойств титаната стронция на СВЧ в интервале температур 2,5—78°К.— Изв. АН СССР. Сер. физ., 1975, 39, № 4, 841.
6. Вендик О. Г., Платонова Л. М., Соколов А. И. Параметрический механизм потерь в сегнетокерамике в сильных СВЧ-полях.— Изв. АН СССР. Сер. физ., 1969, 33, № 7, 1167.
7. Прудан А. М. Исследование электрических свойств поликристаллических пленок титаната стронция в сильных электрических полях СВЧ. Автореф. канд. дис. Л., 1977.
8. Yasunaga H. Photoconductive anomaly as an evidence of the local ferroelectric phase transition around 47°K in SrTiO₃— J. Phys. Soc. Japan, 1970, 28, Suppl., 454.
9. Цикин А. Н., Штурбина Н. А. Термостимулированная проводимость в монокристаллах SrTiO₃— Физ. тв. тела, 1970, 12, № 11, 3353.
10. Лебсдева Н. Н., Агаронов Б. С. и др. Фотолюминесценция, термолюминесценция и термостимулированная проводимость в монокристаллах SrTiO₃.— Физ. тв. тела, 1977, 19, № 12, 3684.
11. Hächli U. T. Field-induced space-charge layer in strontium titanate.— Ferroelectrics, 1974, 7, N 2, 237.

Поступила в редакцию
02.03.79

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1980, Т. 21, № 3

УДК 621.528.6

**Н. Н. КОНОНКОВА, Э. М. РЕЙХРУДЕЛЬ,
Г. В. СМИРНИЦКАЯ**

НЕКОТОРЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОНКИХ W-ПЛЕНОК, НАНЕСЕННЫХ РАСПЫЛЕНИЕМ В РАЗРЯДЕ С ОСЦИЛЛИРУЮЩИМИ ЭЛЕКТРОНАМИ

Тонкие пленки тугоплавких металлов, в том числе W, находят все более широкое применение в микроэлектронике при производстве интегральных схем. Структура и свойства пленок зависят от распыляемого металла, температуры ($t_{\text{п}}$) и напряжения смещения ($V_{\text{см}}$) подложки, от состава остаточных газов и рабочего давления, от скорости напыления. В последние годы предпочтение отдается пленкам, полученным методом катодного распыления [1], в частности, в магнетронной системе [2]. В [3—5] рассматриваются электрические свойства и структура W-пленок, полученных испарением и распылением в высокочастотном диоде. Для получения тонких диэлектрических пленок авторы [6] использовали разряд с осциллирующими электронами.

В настоящей работе приводятся некоторые результаты исследования структуры и химического состава W-пленок, напыленных в разряде с осциллирующими электронами. Существование разряда при низком давлении и бомбардировка катодов ионами большой энергии создают определенные преимущества при использовании этого разряда для получения тонких пленок.

В данной работе пленки напылялись на подложки (NaCl, стекло), помещенные за цилиндрическим анодом из нержавеющей стали ($\varnothing=30$ мм, $L=30$ мм) с продольными прорезями шириной 5 мм, длиной 20 мм. Напыление материала с двух противоположных катодов создает равномерное распределение его по поверхности подложек. Облучение подложек потоками электронов заданной энергии (в зависимости от $V_{см}$), поступающими из разряда [7], обеспечивает очистку пленки от загрязнений в процессе напыления. Изменением $V_{см}$ и $t_{п}$ можно регулировать скорость осаждения пленки. Разрядная система

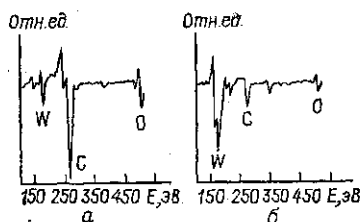


Рис. 1. Оже-спектры W-ката-
да: а — с поверхности катода,
б — с глубины образца

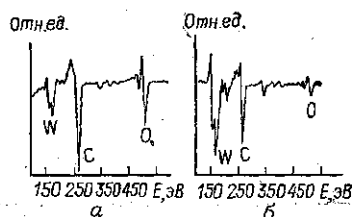


Рис. 2. Оже-спектры W-плен-
ки: а — с поверхности пленки,
б — с глубины образца, $a=$
 $2,5$ кВ, $H=550$ Э, $t_{п}=40^{\circ}\text{C}$,
 $V_{см}=0$

монтировалась в разборном стеклянном колпаке с 8 изолированными вводами. Ячейка имела катоды-диски $\varnothing=28$ мм из поликристалла W ($C < 0,1\%$, $O < 0,1\%$).

Для предохранения подложек от загрязнения при очистке катодов ионной бомбардировкой внутри анода установлен соосный с ним подвижной цилиндр. Поворот внутреннего цилиндра извне магнитом открывал подложки в нужный момент. Температура подложки в интервале от 40 до 200°C регулировалась подогревателем и контролировалась термопарой. Несколько прорезей в аноде позволяли одновременно вести напыление на подложки из разных материалов при различных $V_{см}$ и $t_{п}$. Установка откачивалась ионным насосом до давления порядка 10^{-8} мм рт. ст. Распыление проводилось в атмосфере Ag при $p \approx 3 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. Для непрерывного поддержания в рабочей части системы (в колпаке) сверхвысокого вакуума колпак переключался на стеклянный ионный насос с автономным питанием [8]. Параметры разряда выбирались так, чтобы соответствовать максимальному значению разрядного тока I_p при заданных V_a и H ($V_a=2-3$ кВ, $H=550$ Э). При этом энергия ионов и углы их падения в центральную часть катода максимальны; коэффициент катодного распыления также наибольший [8]. При изменении I_p от 0,6 до 0,97 мА скорость напыления менялась от 0,1 до 3,5 Å/мин.

Полученные пленки имели толщину от (20 ± 4) до (70 ± 2) нм. Химический анализ пленок показал наличие C и O. Для подтверждения полученного химического состава пленок был произведен послойный оже-анализ материала катода и пленок. Оже-спектры снимались на установке фирмы Varian.

На рис. 1 показаны оже-спектры с поверхности W-катада (а) и с его глубины (б), полученные травлением ионами Ag в течение 10 мин при напряжении пучка 3 кВ. Видно, что травление приводит к уменьшению пиков C и O, адсорбированных на поверхности катода из воз-

духа. Дальнейшее травление не изменяло оже-спектра. Наличие примесей С и О в материале катода связано с технологией получения W. На рис. 2 даны оже-спектры с поверхности пленки (а) и с глубины (б) после травления ее ионами Ag в течение 10 мин при 3 кВ. Увеличение концентрации С и О на поверхности пленки объясняется сорбцией их из воздуха, так как технология анализа требовала пребывания пленок на воздухе. Травление пленки в течение 20 мин не привело к изменению

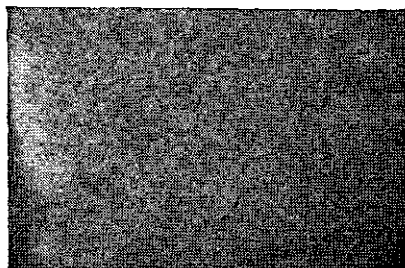


Рис. 3. Изображение W-пленки просвечивающем электронном микроскопе. Толщина пленки 350 Å, увеличение $\times 100\,000$. $V_a = 3$ кВ. $H = 550$ Э, $V_{cm} = 330$ В, $t_n = 182^\circ\text{C}$

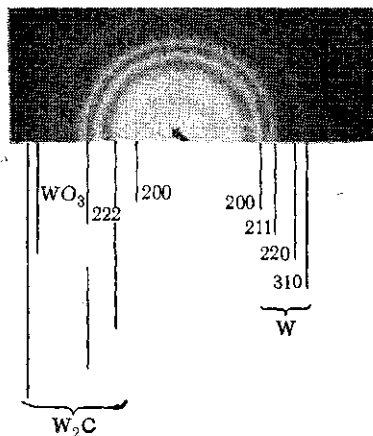


Рис. 4. Электронограмма W-пленки. Ускоряющее напряжение 100 кВ

оже-спектра. После травления в течение 30 мин начало сказываться влияние стеклянной подложки, пик О увеличивался. На рис. 3 приведена фотография пленки в просвечивающем электронном микроскопе. Видно, что полученные пленки имеют преимущественно мелкозернистую структуру с размером зерен от 5 до 15 нм. Структура пленок определялась по электронограммам. На рис. 4. показана электронограмма пленки с подложки из NaCl. Полученные пленки имеют поликристаллическую структуру. Наряду с ОЦК решеткой W (параметр решетки $a_0 = 0,316$ нм) был обнаружен окисел WO_3 с тетрагональной решеткой ($a_0 = 0,525$ нм, $c_0 = 0,39$ нм), а также W_2C с гексагональной структурой ($a_0 = 0,3$ нм, $c_0 = 0,47$ нм) (точность измерения $\pm 0,002$ нм). Такие же параметры свойственны массивному образцу [3, 4]. Увеличенная относительная интенсивность линий WO_3 и W_2C , соответствующая большим межплоскостным расстояниям, объясняется тем, что на электронограмме эти соединения выражены самыми интенсивными линиями. Так, плоскость (200) WO_3 имеет относительную интенсивность 100. Сильной является и первая линия, соответствующая W_2C .

Сопоставление электронографических исследований и оже-анализа позволяет сделать вывод, что в разряде с осциллирующими электронами можно получать пленки, химический состав которых не отличается от состава распыляемого объекта. Увеличенное содержание С и О в пленках объясняется сорбцией их поверхностными слоями при соприкосновении с атмосферой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Francombe M. Growth of epitaxial films by sputtering.—Vide, 1976, 31, N 183, 96.
2. Schiller S., Heisig V., Goedicke K. Electron beam evaporation and high-

- rate sputtering with plasmatron/magnetron system — a comparison.— Vak. Techn., 1978, 27, N 3, 75.
3. Balalikin N. I., Buch J., Katrasev V. V., Skrupnik A. V.— Production of Thin Tungsten Films.— Thin Solid Films, 1976, 38, 255.
 4. Палатник Л. С. и др. Образование фаз в тонких пленках W и Mo.— Кристаллография, 1972, 17, 1222.
 5. Hoffman D. W., Thornton I. A. The compressive stress transition in Al, V, Zr, Nb and W metal films sputtered at low working pressures.— Thin Solid Films, 1977, 45, N2, 387.
 6. Ведерников В. А., Гурин В. И., Данилина Т. И. Получение равномерных по толщине пленок с помощью пеннинговской газоразрядной камеры.— Приборы и техника эксперимента, 1976, № 3, 243.
 7. Рейхрудель Э. М., Смирницкая Г. В., Нгуен Хыу Ти. Об электронных и ионных токах на электроды в пеннинговском разряде.— Радиотехника и электроника, 1968, 13, № 5, 902.
 8. Рейхрудель Э. М., Смирницкая Г. В. Разряд с осциллирующими электронами и его применение в вакуумных насосах.— Электроника и ее применение, 1976, 8, 43.

Поступила в редакцию
07.03.79

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1980, Т. 21, № 3

УДК 548.3:534.01

В. Г. ЗУБОВ, Л. П. ОСИПОВА, Н. Д. КУНДИКОВА

ВЛИЯНИЕ ДЕФЕКТОВ НА ХАРАКТЕР ФОНОН-ФОНОННЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В КРИСТАЛЛИЧЕСКОМ КВАРЦЕ

Цель настоящей работы — изучить влияние различных дефектов на характер фонон-фононных взаимодействий в кристаллическом кварце.

Исследования проведены на основе сравнения и анализа температурной зависимости частоты и ширины линий комбинационного рассеяния в спектрах необлученного кварца и кварца, облученного в реакторе потоками быстрых нейтронов $4,0 \cdot 10^{18}$ и $4,5 \cdot 10^{19}$ н/см².

Изучение температурной зависимости частоты и ширины линий в спектрах комбинационного рассеяния (СКР) позволяет получить информацию о характере фонон-фононных взаимодействий в кристаллах [1—4]. Фонон-фононные взаимодействия приводят к изменению собственной энергии кристалла $S_p = -\Delta\omega + i\Gamma$, действительная часть $-\Delta\omega$ которой определяет сдвиг частоты, а мнимая часть $i\Gamma$ — обратное время жизни фонона [2, 3]. В работах [2, 3] для изменения частоты линий СКР получены выражения, которые в высокотемпературном приближении (при $T > \theta_D$, где θ_D — температура Дебая) можно представить в виде

$$\Delta\omega(T, \omega) = -T [-\Delta\omega_A^{(4)} + \Delta\omega_S^{(3)}] - T^2 [\Delta\omega_B^{(4)} + \Delta\omega_\Gamma^{(4)}]. \quad (1)$$

В формуле (1) вклад в полное изменение частоты $\Delta\omega_2^{(3)}$ определяется трехфононными взаимодействиями, а $\Delta\omega_2^{(4)}$, $\Delta\omega_3^{(4)}$ и $\Delta\omega_4^{(4)}$ — четырехфононными и связаны (соответственно) с диаграммами А, Б, В, Г, представленными на рис. 1 [3]. Из соотношения (1) видно, что при наличии четырехфононных взаимодействий приводит одновременно к квадратичному уменьшению и к линейному увеличению частоты. Трехфононные взаимодействия приводят только к линейному уменьшению частоты.