

7. Вяткин А. П., Максимова Н. К., Поппавной А. С., Степанов В. Е., Чалдышев В. А.— ФТП, 1970, т. 4, вып. 5, с. 915.  
 8. Солтамов У. Б., Гришин Е. С.— ЖТФ, 1958, т. 28, № 7, с. 1394.  
 9. Силцерс, Бейтс, Баллонофф.— ТИИЭР, 1974, № 8, с. 93.  
 10. Lindley W. T., Krag W. E., Wolfe C. M., Sasiela R. J., Murphy R. A., Hurwitz C. E., Kostishak D. F., Yakutis A. J., Foyt A. G.— Gallium Arsenide and related compounds, 1972, Symp. on GaAs, 1973, p. 295.

Поступила в редакцию  
30.10.82.

Кафедра радиотехники и физической электроники

УДК 621.396.69-181.48

В. М. БОРЗДОВ, В. М. МОЛОФЕЕВ

## ОЦЕНКА ВРЕМЕННОЙ СТАБИЛЬНОСТИ ТОНКИХ ПЛЕНОК $\beta$ -Ta

При старении отожженных пленок тантала, покрытых слоем поверхностного окисла, их электросопротивление определяется значением концентрации вещества (главным образом кислорода), продиффундировавшего в глубь пленки; при этом эффект электродиффузии не был замечен [1]. В [2] предложена модель старения тонких пленок нитрида тантала, полученная на основе решения уравнения диффузии из постоянного источника в полуограниченное твердое тело при экспоненциальном приближении дополнительной функции ошибок, что ведет к снижению точности аппроксимации реального физического процесса деградации.

В данной работе рассматривается математически более строгая диффузионная модель старения тонких пленок тантала, которую можно применить при оценке временной стабильности танталовых тонкопленочных резистивных элементов.

Положим, что на границе окисел — металлическая пленка поддерживается постоянная концентрация кислорода  $c_0$ . Для вывода зависимости электрического сопротивления пленки от количества продиффундировавшего в нее вещества воспользуемся правилом Маттиссена и будем считать, что для каждой точки объема справедливо выражение [3]:

$$\rho(x, t) = \rho_0 + \Delta\rho(x, t) = \rho_0 \left[ 1 + \frac{\Delta\rho(x, t)}{\rho_0} \right] = \rho_0 [1 + ac(x, t)],$$

где  $\rho_0$  — начальное удельное сопротивление пленки;  $c(x, t) = \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{4Dt}}\right)$  — относительная концентрация в ней кислорода,  $a = \Delta\rho_{\max}/\rho_0$  — постоянная величина, характеризующая максимальное относительное изменение ее сопротивления при данном механизме деградации. Тогда можно найти среднюю проводимость пленки:

$$\frac{\rho_0}{\rho(t)} = \frac{1}{d} \int_0^d \frac{dx}{1 + ac(x, t)}. \quad (1)$$

В силу высокой стабильности рассматриваемых пленок  $a \ll 1$ ,  $c(x, t) \leq 1$ , поэтому, разлагая  $\frac{1}{1 + ac(x, t)}$  в степенной ряд, из (1) получаем:

$$\begin{aligned} \frac{\rho(t)}{\rho_0} = 1 + & \left( \frac{1}{d} \int_0^d c(x, t) dx \right) a + \left\{ \left[ \frac{1}{d} \int_0^d c^2(x, t) dx \right]^2 - \frac{1}{d} \int_0^d c^2(x, t) dx \right\} a^2 + \\ & + \left\{ \left[ \frac{1}{d} \int_0^d c(x, t) dx \right]^3 - \frac{2}{d^2} \int_0^d c(x, t) dx \int_0^d c^2(x, t) dx + \frac{1}{d} \int_0^d c^3(x, t) dx \right\} a^3 + \dots \end{aligned} \quad (2)$$

Ограничимся в разложении (2) двумя первыми членами:

$$\frac{\rho(t)}{\rho_0} = 1 + \left( \frac{1}{d} \int_0^d c(x, t) dx \right) a.$$

Очевидно, что второе слагаемое здесь представляет собой среднюю концентрацию диффузанта в пленке. Используя результаты работы [4], получаем окончательно:

$$\frac{\Delta\rho(t)}{\rho_0} = \frac{ac_0}{\sqrt{\pi}d} \sqrt{4Dt} = \frac{b}{\sqrt{\pi}d} \sqrt{4D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right)t}, \quad (3)$$

где  $D_0$  — предэкспоненциальный фактор;  $E_a$  — энергия активации процесса диффузии кислорода в Ta;  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — температура, К.

Модель вида (3), выражающая зависимость относительного изменения электросопротивления пленок от нескольких независимых и случайных параметров, распределенных нормально: толщины  $d$ , энергии активации  $E_a$  и температуры  $T$ , использована для оценки временной стабильности тонкопленочных резистивных элементов из  $\beta$ -Ta при нормальной температуре их эксплуатации  $T_n$ . Результаты машинного и натурального экспериментов при температурах  $T > T_n$  показали, что распределение времени до отказа (выхода значения  $\frac{\Delta\rho(t)}{\rho_0}$  за установленный предел) можно аппроксимировать логарифмически нормальным законом:

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma t} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right)^2\right], \quad (4)$$

где  $\mu$  и  $\sigma$  — параметры распределения,  $-\infty < \mu < +\infty$ ,  $\sigma > 0$ . С целью упрощения вычислений положим в дальнейшем значение  $\sigma$  известным.

Точечную оценку параметра  $\mu$  функции (4) в этом случае при нормальной температуре эксплуатации можно получить, используя метод максимума правдоподобия. Логарифмическая функция правдоподобия неоднородной выборки, полученной объединением результатов имитационного моделирования и ускоренных испытаний при  $T > T_n$ , будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \ln L = & \sum_{i=1}^k \Delta n_i \ln \left[ \Phi\left(\frac{\ln t_i - \mu}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{\ln t_{i-1} - \mu}{\sigma}\right) \right] + N_2 \ln \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} + \\ & + \sum_{j=1}^{N_2} \ln \frac{1}{t_j} - \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{j=1}^{N_2} [\ln t_j - (\mu + \mu')]^2, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\Delta n_i = n_i - n_{i-1}$  — количество элементов, отказавших на интервале времени от  $t_i$  до  $t_{i-1}$ ;  $k$  — количество интервалов группирования,  $\sum_{i=1}^k \Delta n_i = N_1$  и  $N_2$  — общее количество элементов, взятых соответственно при ускоренных и машинных испытаниях, причем  $N_1 < N_2$ ,  $\Phi\left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right)$  —

нормальная функция распределения;  $\mu'$  — параметр ошибки, учитывающий систематическую погрешность, возникающую из-за того, что построенная модель (3) лишь до некоторой степени точно описывает реальный физический процесс деградации резистивной пленки. Из физических соображений следует, что  $|\mu'| \leq \alpha$ , где значение постоянной  $\alpha$  устанавливается априорно.

Для отыскания значений  $\mu$  и  $\mu'$  при  $T > T_n$  необходимо найти максимум выражения (5) при ограничении на  $\mu'$ . Эта задача сводится к задаче на простой экстремум, если  $\left| \frac{1}{N_2} \sum_{j=1}^{N_2} \ln t_j - \hat{\mu} \right| \leq \alpha$ , где  $\hat{\mu}$  значение  $\mu$ , доставляющее максимум функции:  $\sum_{i=1}^k \Delta n_i \ln \left[ \Phi\left(\frac{\ln t_i - \mu}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{\ln t_{i-1} - \mu}{\sigma}\right) \right]$ .

Его можно найти, используя, например, итерационный метод Рао [5].

Минимизируя затем по  $\mu'$  выражение  $\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{j=1}^{N_2} [\ln t_j - (\mu - \mu')]^2$  и считая найденный параметр ошибки не зависящим от температуры, имитационным моделированием на ЭВМ, можно определить параметры распределения (4) при нормальных условиях.

Исходные данные и результаты оценки временной стабильности пленок  $\beta$ -Та, полученных методом высокочастотного плазменного распыления в атмосфере аргона при давлении  $3,99 \cdot 10^{-1}$  Па и отожженных на воздухе при температуре 350 °С в течение 1 ч, следующие:

| $b, r^{-1}$           | $d, \text{\AA}$ | $\sigma_d, \text{\AA}$ | $E_a, \text{ЭВ}$ | $\sigma_{E_a}, \text{ЭВ}$ | $T, \text{К}$ | $\sigma_T, \text{К}$ | $\sigma$ | $\mu + \mu'$ | $\mu'$ | $\mu_{T_n}$ |
|-----------------------|-----------------|------------------------|------------------|---------------------------|---------------|----------------------|----------|--------------|--------|-------------|
| $0,113 \cdot 10^{15}$ | 1500            | 100                    | 1,22             | 0,015                     | 448           | 5                    | 0,57     | 4,67         | 0,95   | 20,45       |

## ЛИТЕРАТУРА

1. Сыноров В. Ф. и др. Физические основы надежности интегральных схем.— М., 1976.
2. Fischer J. S.— In: Proc. 1968 Electron. Compon. Conf., 1968, p. 229.
3. Welter J.-M., Witt I.-D.— Metal. Trans. A, 1981, v. 12A, p. 1877.
4. Борздов В. М.— Вестн. Белорусского ун-та. Сер. 1, физ., мат. и мех., 1982, № 2, с. 8.
5. Rao C. Advanced Statistical Methods in Biometric Research.— New York, 1952.

Поступила в редакцию  
14.03.83.

Кафедра радиофизики

УДК 541.144.8 : 541.49

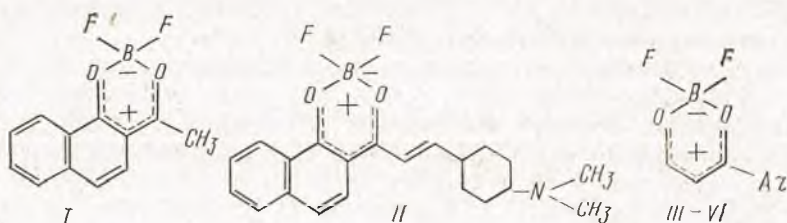
КБЕУ ХАК ТУАН

## ФОТОУСТОЙЧИВОСТЬ БОРСОДЕРЖАЩИХ ОРГАНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Органические комплексы бора обладают сравнительно сильным поглощением в сине-зеленой области спектра и хорошо люминесцируют при возбуждении их в длинноволновую полосу поглощения.

Применение их в качестве красителя или активных сред в генераторах требует необходимости изучения их фотоустойчивости.

С этой целью в настоящей работе исследуется фотоустойчивость ряда борсодержащих комплексных соединений: 2, 2-дифтор-4-метилнафто [2, 1-с] — 1, 3, 2-диоксаборина (I), 2, 2-дифтор-4-(4-диметиламиностирил) нафто [2, 1-с] — 1, 3, 2-диоксаборина (II) и 2, 2-дифтор-4-арил-1, 3, 2-диоксаборинов (III — VI).



где Ar = Ph (III), 2-нафтил (IV), 4-MeOPh (V), 4-PhPh (VI)

Регистрация спектров поглощения растворов указанных борсодержащих органических комплексов (I — VI) и наблюдение их изменений при облучении осуществлялось спектрофотометром «Specord UVVIS-M 40». При изучении фотоустойчивости растворов соединений I, III — VI облучение производилось ртутной лампой мощностью 1000 Вт в основную полосу электронного спектра поглощения через светофильтр, выделяющий область длин волн 365 нм. Освещение раствора вещества II прово-