

УДК 539.219.3

О МЕХАНИЗМЕ ВЫКЛЮЧЕНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕЙ

С.И.Коняев, Х.И.Кляус

Известно [1-3], что большую роль в механизме переключения тонкопленочных элементов М-Д-М играют диффузионные явления. Это объясняется тем, что многие результаты экспериментов не могут быть описаны с позиции электронных процессов, в частности, в [2] показано, что при включении элемента в диэлектрической пленке формируется сильно легированный канал, в котором перенос заряда в состоянии высокой проводимости обусловлен проводимостью по примесям. В рамках этой модели выключение элемента связано с уменьшением концентрации примеси в канале до значения, при котором ток в тонкопленочной системе определяется проводимостью диэлектрика.

В этой связи представляет интерес рассмотрение диффузионной модели механизма переключения элемента типа "с памятью" из состояния с высокой проводимостью в состояние с низкой проводимостью.

Если энергия ионизации примеси $\omega > kT$, то примесные атомы находятся в невозбужденном состоянии. Поэтому при отключенных источниках питания уменьшение концентрации примеси обусловлено свободной диффузией примесных атомов в диэлектрик, окружающий сильно легированный канал. Уравнение диффузии, описывающее этот процесс, имеет вид

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \nabla^2 N, \quad (1)$$

где N — концентрация примеси в сильно легированном канале, D — коэффициент диффузии примесных атомов, t — время.

Так как диаметр легированного канала значительно меньше расстояния между соседними включенными элементами, то процесс уменьшения концентрации примеси в канале можно рассматривать как диффузию из источника конечных размеров в неограниченное тело. Для простоты рассмотрим одномерный случай. Пусть начальное распределение концентрации таково, что $N(x, 0) = 0$ всюду, кроме области проводящего канала, где $N(x, 0) = N_0$. Тогда [4]

$$N(x, t) = \frac{N_0}{2} \left(\operatorname{erf} \frac{d+x}{2\sqrt{Dt}} + \operatorname{erf} \frac{d-x}{2\sqrt{Dt}} \right), \quad (2)$$

где d — радиус канала, x — координата, $\operatorname{erf} y$ — функция ошибок Гаусса.

Через время $t_{кр}$ концентрация примеси в проводящем канале уменьшится до значения, равного критическому ($N_{кр}$), и при временах, больших $t_{кр}$, сопротивление переключающего элемента резко увеличивается, так как оно в дальнейшем будет определяться проводимостью диэлектрика.

Для вычисления времени $t_{кр}$ функцию ошибок Гаусса в выражении (2) разложим в ряд и ограничимся первым членом. Тогда

$$t_{кр} \approx \frac{d^2}{\pi D} \left(\frac{N_0}{N_{кр}} \right)^2 \quad (3)$$

Выражение (3) справедливо при

$$t \gg \frac{d^2}{4D} \left(\frac{N_0}{N} \right)^{2/3} \quad (4)$$

Оценим такую критическую концентрацию примеси, при которой её проводимость в условиях комнатной температуры будет пренебрежительно малой.

Известно, что потенциал V на расстоянии r от иона определяется выражением

$$V = -q^2/\epsilon r,$$

где q — заряд иона. Атом примеси будет ионизирован при $V \leq kT$. В элементарном объеме $\frac{1}{N_{кр}}$ находится в среднем один атом примеси. С другой стороны, при температуре ионизации T_u радиус атомной оболочки равен

$$r = q^2/\epsilon k T_u$$

Тогда

$$N_{кр} = \frac{3}{4\pi} \left(\frac{\epsilon k T_u}{q^2} \right)^3. \quad (5)$$

Для переключающего элемента со структурой $Al-Se-SiO-Ag$ при температуре $\sim 500^\circ K$ обратный ток выключения равен нулю [5], а диэлектрическая проницаемость пленки селена, легированной серебром, равна ~ 11 [6]. Критическая концентрация, вычисленная при этих значениях по формуле [5], для серебра в указанной структуре составляет $\sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

Подставив в (3) полученное значение критической концентрации, $d = 0,5 \text{ мкм}$, $D_0 = 10^{-8} \text{ см}^2/\text{сек}$ [6] и $N_0 = 10^{20} \text{ см}^{-3}$, получим $t \approx 10^7 \text{ сек}$, что согласуется с экспериментальными данными [6].

Используя выражения (3) и (5) и зависимость коэффициента диффузии от температуры для времени хранения состояния высокой проводимости элементом, можно записать

$$t_{кр} = \frac{16\pi}{9} \frac{N_0^2 d^2}{D_0} \left(\frac{q^2}{\epsilon k T_u} \right)^6 \exp \left(\frac{Q}{RT} \right), \quad (6)$$

где Q — энергия активации атомов примеси, R — универсальная газовая постоянная. Прологарифмировав (6) и взяв производную от полученного выражения по $\left(\frac{1}{T} \right)$, получим

$$\frac{d \left[\ln \left(\frac{t_{кр}}{A} \right) \right]}{d \left[\frac{1}{T} \right]} = \frac{Q}{R}, \quad (7)$$

где

$$A = \frac{16\pi}{9} \frac{(N_0 d)^2}{D_0} \left(\frac{Q^2}{E k T_u} \right)^6 \text{ сек}$$

Выражение (7) позволяет определить энергию активации атомов металлической примеси в пленке диэлектрика, исходя из экспериментальной зависимости времени хранения состояния высокой проводимости от температуры. Энергия активации диффузии атомов серебра, определенная по наклону прямой $\ln t_{\text{до}} = f\left(\frac{1}{T}\right)$ по экспериментальным данным работ [5,7], составляет $\sim 0,15$ эв., что согласуется с литературными данными [8].

Л и т е р а т у р а

1. ГАМАН В.И., БАЗАРОВ В.Д. Динамические вольт-амперные характеристики тонкопленочных диодов на основе халькогенидных стекол. - "Известия вузов. Физика", 1968, Т.10, №7.
2. OKUSHI H., SAITO M., KUKICHI M., MOTAMODA A. Observation of on and off the polarized (letter 8) memory effects in GaSe thin films. - "Solid State Commun.", 1971, v.9, №13, p.991-994.
3. КОНЯЕВ С.И., КЛЯУС Х.И., МИНИН А.И. Тонкопленочный коммутационный элемент со структурой металл-диэлектрик-металл. - "Вычислительные системы". Материалы ко 2 Всесоюзной конференции. Секция 4., Новосибирск, 1968.
4. БОЛТАКС Б.Д. Диффузия в полупроводниках. М., Изд. "ФМ", 1961.
5. КЛЯУС Х.И., КОНЯЕВ С.И. Электрофизические характеристики тонкопленочной системы $Al-Se-SiO-Ag$. - "Вычислительные системы", Новосибирск, 1971, вып. 46, стр. 98.
6. KLEIN G. Diffusion von Silber in Selen. - "Annalen der Physik", 1955, F.6, B. 16, №1, S.1.
7. КЛЯУС Х.И., КОНЯЕВ С.И., ШАПОЧАНСКАЯ З.В. К вопросу о механизме работы переключающего тонкопленочного диода на основе селена. - "Вычислительные системы. Труды I Всесоюзной конференции. Вып. 5". Новосибирск, "Наука" СО, 1968.
8. ЧИЖИКОВ Д.В., СЧАСТЛИВЫЙ В.П. Селен и селениды, М., "Наука", 1964.

Поступила в ред.-изд.отд.

27 июля 1972 г.