

**В.М. Кичак, Н.Г. Курилова, І.В. Слободян**

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

## **МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ КОМІРКИ ПАМ'ЯТІ НА БАЗІ ХАЛЬКОГЕНІДНИХ СКЛОПОДІБНИХ НАПІВПРОВІДНИКІВ**

### **Вступ**

Починаючи приблизно з 2000 року ведуться інтенсивні спроби розробити технологію серійного виробництва запам'ятовуючих пристроїв (ЗП) на речовинах із зміною фазового стану, так званих халькогенідних склоподібних напівпровідниках (ХСН). Виявлено, що такі речовини міняють свою будову при нагріванні, переходячи з кристалічної фази в аморфний стан і навпаки [1]. В теперішній час розроблені оптичні запам'ятовуючі пристрої (CD-ROM), які використовують ці явища. Виявилось, що при зміні фазових станів змінюються не тільки оптичні, але й електричні характеристики ХСН. Провідність кристалевого переходу відрізняється від провідності аморфного в десятки і навіть в сотні раз. Це і використовується в запам'ятовуючих пристроях на базі ХСН.

Крім енергонезалежності таких ЗП, важливою їх якістю є виключно висока радіаційна стійкість, нечутливість до електричних та магнітних полів, що дуже важливо при створенні аерокосмічних апаратів та військової техніки [2].

Значне зростання зацікавленості в ХСН обумовлене явищами швидкого зворотного і прямого перемикання таких плівок з стану з високим опором в стан з низьким опором [3]. В теперішній час існує декілька підходів до пояснення фізичної картини ефектів перемикання в ХСН, але математичні моделі, які б дали можливість описати їх вольт-амперні характеристики (ВАХ), визначити характерні точки і параметри таких ЗП практично не розроблені. В зв'язку з цим метою цієї роботи є побудова математичної моделі ЗП на базі ХСН і дослідження характерних точок ВАХ.

### **Математична модель комірки пам'яті на базі ХСН**

Типові перемикачі на базі ХСН являють собою шар матеріалу товщиною 1-5 мкм, який розміщується між двома електродами. Комірка пам'яті на базі такого перемикача являє собою з'єднання перемикача з напівпровідниковим діодом або транзистором, як це показано в [4].

У випадку, якщо до такої структури прикладається мала напруга її провідність є омичною і опір шару при кімнатній температурі становить  $10^5$  Ом. При електричних полях більше  $10^4$  В/см мають місце неомічні ефекти. Інколи, до моменту перемикання має місце швидке збільшення зворотного струму [4]. Перемикання має місце при досягненні критичного поля ( $\approx 10^5$  В/см) за дуже короткий проміжок часу, приблизно  $10^{-10}$  с. З ростом напруги, яка перевищує деяке мінімальне значення, при якому має місце перемикання, час затримки експоненціально зменшується. Вольт-амперна характеристика ефекта перемикання зображена на рис.1. У ввімкненому стані струм слабо залежить від температури та напруги [3].

Особливості склоподібних напівпровідників пов'язані з особливостями енергетичного спектру електронів. Наявність енергетичних областей з високою та низькою щільністю електронних станів – наслідок ближнього порядку. Тому можна умовно говорити про зонну структуру некристалічних речовин.

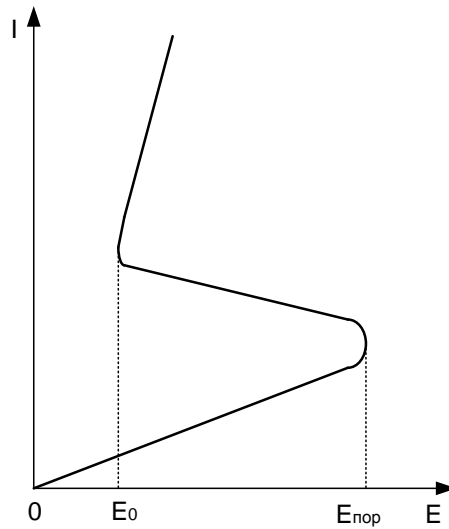


Рисунок 1 – Залежність сили струму  $I$  від напруженості електричного поля  $E$  в халькогенідному склі.  $E_{\text{пор}}$  – порогова напруженість (кінець стану ВИМКНЕНО),  $E_0$  – початок стану ВВИМКНЕНО

Але розупорядкованість структури призводить до появи додаткових дозволених електронних станів, щільність яких  $g(\epsilon)$  спадає вглиб забороненої зони, утворюючи «хвости» щільності станів (рис. 2, а).

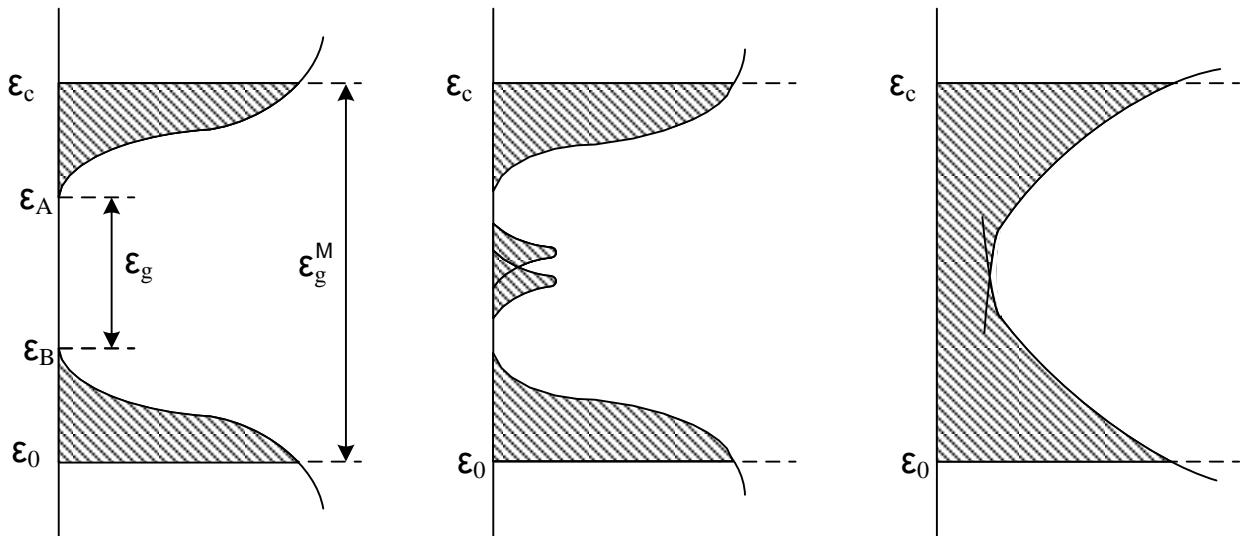


Рисунок 2 – Схеми енергетичного спектру ХСН  $\text{As}_2\text{Se}_3$ . Области локалізованих станів заштриховані.  $\epsilon_A, \epsilon_B$  – границі областей з високими щільностями станів;  $\epsilon_g^M$  - заборонена зона по рухливості;  $\epsilon_c, \epsilon_0$  – локалізовані і делокалізовані стани

Електронні стани в «хвостах» діляться на локалізовані і делокалізовані (струмопровідні). Різкі границі між цими станами називають краями рухливості ( $\epsilon_c$  та  $\epsilon_0$ ), відстань між якими називається забороненою зоною або щільною рухливості.

Максимуми щільності додаткових дозволених станів  $g(\epsilon)$  обумовлені дефектами структури і вони можуть виникати всередині щілини і перекриватись один з одним, як і самі «хвости» (рис.2,б,в).

У відповідності з цим розрізняють три механізми провідності, які переважають у різних температурних інтервалах.

Якщо переміщення носіїв заряду, збуджених за край рухливості, проходить по делокалізованих станах, то статична провідність  $\sigma$  в широкому діапазоні температур визначається за виразом [3]

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(\frac{E_A - E_F}{kT}\right), \quad (1)$$

де  $E_F$  – рівень Фермі,  $\sigma_0 \approx 10^3 \dots 10^4$  1/(Ом·см).

У випадку стрибкоподібного переміщення носіїв заряду, збуджених в локалізованих станах поблизу країв рухливості (наприклад в стані  $E_A$  і  $E_C$ ) статична електропровідність визначається так

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(\frac{-E_A - E_F + W}{kT}\right), \quad (2)$$

де  $W$  – енергія активації стрибка,  $\sigma_0 \leq 10$  Ом<sup>-1</sup>·см<sup>-1</sup>.

Ці два види провідності можуть мати місце в ХСН.

Розглянемо зразок комірки пам'яті (плівку ХСН) товщиною  $a$  та довжиною  $b$ , статичний опір якої можна визначити за виразом:

$$R = \frac{b}{a\sigma} = \frac{b}{a\sigma_0 \exp\left(\frac{E_A - E_F}{kT}\right)}; \quad R = \frac{b}{a\sigma} = \frac{b}{a\sigma_0 \exp\left(\frac{E_A - E_F + W}{kT}\right)} \quad (3)$$

Якщо до зразка прикладається напруга, то потужність, яка підводиться  $P_{\text{підв}} = U_{\text{підв}} \cdot I_{\text{підв}}$  витрачається на нагрівання зразка і областей, що до нього прилягають.

Потужність, яка відводиться від зразка внаслідок теплопровідності і подальшого розсіювання в навколишньому просторі буде пропорційна температурі нагрівання зразка  $(T - T_0)$  і обернено пропорційна тепловому опору зразка  $R_{\text{Тнс}}$ .

$$P_{\text{підв}} = (T - T_0) / R_{\text{Тнс}},$$

де  $R_{\text{Тнс}}$  – тепловий опір між зразком і навколишнім середовищем, який визначається величиною потужності, яка відводиться від зразка в навколишнє середовище при різниці температур в 1 К;  $T$  – температура каналу, по якому проходить електричний струм,  $T_0$  – температура середовища, що оточує активну область зразка.

Через деякий час після подачі напруги на ХСН встановлюється тепла рівновага між потужністю, що виділяється і відведеною потужністю у вигляді тепла

$$U_{\text{підв}} \cdot I_{\text{підв}} = (T - T_0) / R_{\text{Тнс}}. \quad (4)$$

Перепишемо рівняння теплового балансу у вигляді

$$U^2/R = I^2 R = (T - T_0) / R_{\text{Тнс}}. \quad (5)$$

де  $R$  визначається у відповідності з виразами (3).

Тоді з рівняння (5) з урахуванням (3) можна отримати рівняння для вольт-амперної характеристики зразка з ХСН в параметричній формі

$$U = \sqrt{\frac{a\sigma_0(T - T_0)}{b \cdot R_{\text{Тнс}}} \exp\left(\frac{E_A - E_F}{kT}\right)}, \quad I = \sqrt{\frac{b \cdot (T - T_0)}{a\sigma_0 \cdot R_{\text{Тнс}}} \exp\left(-\frac{E_A - E_F}{kT}\right)}. \quad (6)$$

Величина  $(E_A - E_F)/k$  являє собою не що інше, як коефіцієнт температурної чутливості ХСН, який в літературі прийнято позначати літерою  $B$ .

Використовуючи (6), проведемо дослідження екстремумів ВАХ. Для цього необхідно продиференціювати вираз (6) по температурі та прирівняти отриманий вираз до нуля.

$$\frac{dU}{dT} = \frac{\frac{a\sigma_0}{b \cdot R_{Tnc}} \cdot \exp\left(\frac{B}{T}\right) \cdot \left(1 - \frac{(T - T_0) \cdot B}{T^2}\right)}{2 \sqrt{\frac{a\sigma_0(T - T_0)}{b \cdot R_{Tnc}} \cdot \exp\left(\frac{B}{T}\right)}} = 0 \quad (7)$$

або  $T^2 - BT + BT_0 = 0$ , звідки

$$T = \frac{B \pm \sqrt{B^2 - 4BT_0}}{2}. \quad (8)$$

Аналіз виразу (7) показує, що функція має розрив в точках  $T=T_0$  і, крім того, точки екстремумів при реальних значеннях температур відсутні, оскільки вираз  $B^2 - 4BT_0$  приймає, як правило, значення менші нуля.

Використовуючи вирази (6) можна визначити диференціальний опір комірки пам'яті на базі ХСН

$$r = \frac{dU}{dI} = \frac{dU}{dT} \cdot \frac{dT}{dI} = \exp\left(\frac{2B}{T}\right) \cdot \frac{T^2 - BT + BT_0}{T^2 + BT - BT_0}$$

та коефіцієнт нелінійності комірки пам'яті, який визначається як відношення статичного опору  $R$  до диференціального опору  $r$

$$\beta = \frac{R}{r} = \frac{U}{I} \cdot \frac{dI}{dU}.$$

Таким чином, отримані вирази для ВАХ комірки пам'яті на базі ХСН дають можливість розрахувати основні параметри, але вони не дають можливості описати поведінку комірки пам'яті в широкому діапазоні зміни напруг, оскільки з літератури відомо, що ВАХ може мати дві точки екстремуму як при прямій, так і при зворотній напрузі. Тому при визначенні напруги необхідно враховувати дію підкладки, на яку нанесена плівка ХСН. При малій провідності плівки необхідно враховувати опір розтікання в підкладці. В цьому випадку вираз (6) для визначення падіння напруги буде мати вигляд [5]

$$U = \sqrt{\frac{a\sigma_0(T - T_0)}{b \cdot R_{Tnc}} \exp\left(\frac{B}{T}\right)} + R_s \cdot I,$$

де  $R_s$  – опір розтікання.

У випадку, якщо використовується з'єднання плівки ХСН з діодною структурою, струм  $I$  та опір  $R_s$  визначають з ВАХ напівпровідникового діода і його опору.

Якщо щільність станів на рівні Фермі  $E_F$  кінцева, то в провідність будуть вносити вклад носії заряду з енергією, близькою до  $E_F$ . Ці носії будуть здійснювати стрибки між локалізованими станами аналогічно тому, як це має місце при домішковій провідності в сильнолегованих кристалічних напівпровідниках. Цю провідність можна визначити за виразом [3]

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right),$$

де  $\Delta E$  – енергія активації стрибка.

Тоді залежність струму, що протікає через комірку пам'яті, від температури можна записати так:

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right). \quad (9)$$

Підставивши (9) в (4), отримаємо вираз для визначення напруги

$$U_{mid} = \frac{T - T_0}{R_{thc} \cdot I_0} \exp\left(\frac{\Delta E}{kT}\right). \quad (10)$$

Провівши дослідження на екстремум виразу (10) по аналогії з [5], отримаємо значення температури для екстремальних точок

$$T = \frac{\Delta E}{2kT} \pm \sqrt{\left(\frac{\Delta E}{2k}\right)^2 - \frac{\Delta E}{k} \cdot T_0}. \quad (11)$$

Аналіз виразу (11) показує, що ВАХ комірки пам'яті може мати два екстремуми при умові, що корені рівняння (11) будуть дійсними та різними, тобто якщо

$$\left(\frac{\Delta E}{2k}\right)^2 > \frac{\Delta E}{k} \cdot T_0, \quad (12)$$

або  $\Delta E > 4kT_0$ .

Прості підрахунки показують, що умова (12) виконується при значеннях  $T_0$  до 1000 К, тому можна вважати, що вираз (10) якісно повторює хід ВАХ комірки пам'яті на базі ХСН.

### **Висновки**

Показано, що існуючі параметричні моделі, які описують ВАХ перемикаючого елемента на базі ХСН, який має S-подібну характеристику, не дають можливості визначити точки, при яких напруги приймають екстремальні значення.

Запропонована математична модель, яка дає можливість якісно описати хід ВАХ комірки пам'яті на базі ХСН.

### **Літературні джерела**

1. Чабан И.А. Эффект переключения в халькогенидных стеклах. – Физика твердого тела, 2007, том 49, вып.3
2. Асмаков С. Перспективные технологии: итоги и прогнозы / С. Асмаков, Н. Елманова, С. Пахомов, А. Прохоров, О. Татарников // КомпьютерПресс, 2007. – № 1 – С. 4–35.
3. Мотт Н., Девис Э. Электронные процессы в некристаллических веществах. – 2-е изд. – М.: Мир, 1982 – Т.2 – 568 с.
4. Схемотехника БИС постоянных запоминающих устройств/ О.А. Петросян, И.Я. Козырь, Л.А. Коледов, Ю.И. Щетинин. – М.: Радио и связь, 1987 – 323 с.
5. Пасынков В.В., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы. СПб «Лань» - 2006. – 480 с.