

## ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ ПРОВОДИМОСТИ С ПАМЯТЬЮ В КРЕМНИЕВЫХ МДП СТРУКТУРАХ С ДИЭЛЕКТРИКОМ ИЗ ФТОРИДА ЭРБИЯ

В. А. Рожков, М. Б. Шалимова

Самарский государственный университет, 443011, Самара, Россия  
(Получена 15.06.1992. Принята к печати 14.09.1992)

Исследовано явление электрического переключения проводимости с памятью в кремниевых МДП структурах и структурах металл—диэлектрик—металл с диэлектрической пленкой фторида эрбия. Установлено, что структуры многократно и воспроизводимо переключаются из высокоомного ( $\sim 10^{11}$  Ом) в низкоомное ( $10^4$ — $10^5$  Ом) состояние и обратно под действием электрического напряжения определенной полярности. Оба состояния устойчивы и сохраняются при отключении питания. Время переключения проводимости составляет 0.6—1 мкс. Изучены свойства высокоомного и низкоомного состояний и определены зависимости порогового напряжения переключения от температуры.

Обнаружен эффект термического переключения проводимости структур. Показано, что явления переключения проводимости и памяти связаны с электронно-термическими процессами, происходящими в локальных участках пленки фторида эрбия, которые приводят к фазовому переходу в материале диэлектрика и формированию проводящего канала.

Развитие современных систем обработки информации вызывает необходимость разработки элементов, обладающих качественно новыми свойствами для записи и хранения информации. В этой связи явление электрического переключения проводимости с памятью представляет интерес и может быть использовано для создания электрических переключателей, элементов постоянной репрограммируемой памяти и других функциональных устройств [1, 2]. В настоящей работе описываются основные закономерности явления переключения проводимости с памятью, обнаруженного в МДМ (металл—диэлектрик—металл) и МДП структурах с диэлектрической пленкой фторида эрбия.

### Получение структур и методика исследования

МДП структуры изготавливались из монокристаллического кремния *n*- или *p*-типа проводимости марки КЭФ-5 (111) или КДБ-4.5 (100) соответственно. Перед нанесением пленки фторида эрбия пластины кремния толщиной 200—300 мкм подвергались механической и химико-динамической полировке. Пленка фторида эрбия толщиной  $d = 0.2$ — $0.55$  мкм получалась методом термического распыления в вакууме (при давлении  $\sim 10^{-5}$  Тор) порошкообразного  $\text{ErF}_3$  из молибденовой лодочки на установке типа ВУП-5. Установлено, что оптимальными свойствами обладают структуры, для которых пленка фторида эрбия изготавливается при температуре подложки  $\sim 300$  °С.

Электроды к пленке фторида эрбия диаметром 0.5—0.7 мм получались термическим испарением алюминия через трафарет. С обратной стороны на шлифованную поверхность кремния напылялся сплошной контакт из алюминия. Таким образом изготавливались МДП структуры типа  $\text{Al—ErF}_3\text{—Si}$ . Методом термического испарения в вакууме на полированной кремниевой подложке создавались также МДМ структуры типа  $\text{Al—ErF}_3\text{—Al}$ .

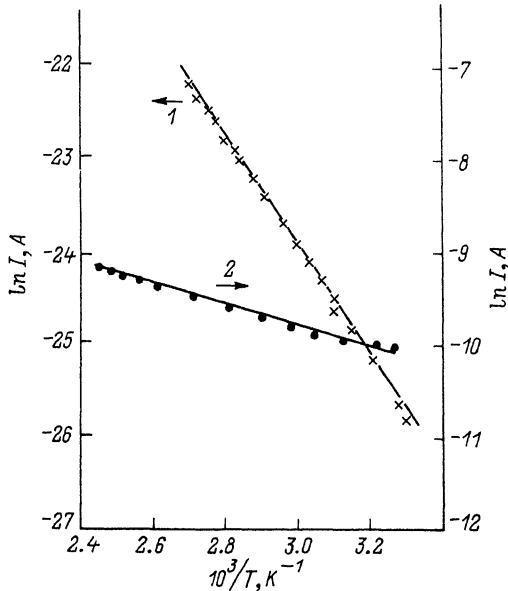


Рис. 1. Температурные зависимости тока кремниевой МДП структуры в высокоомном (1) и низкоомном (2) состояниях.

Изучение вольт-амперных характеристик (ВАХ) проводилось на постоянном токе с использованием электрометрического вольтметра В7-30 или на переменном сигнале с помощью характериографа типа TR-4805. Кинетика переключения проводимости образцов исследовалась на запоминающем осциллографе С8-9А при действии одиночных прямоугольных импульсов напряжения. Вольт-фарядные характеристики, зависимости активного сопротивления и тангенса угла

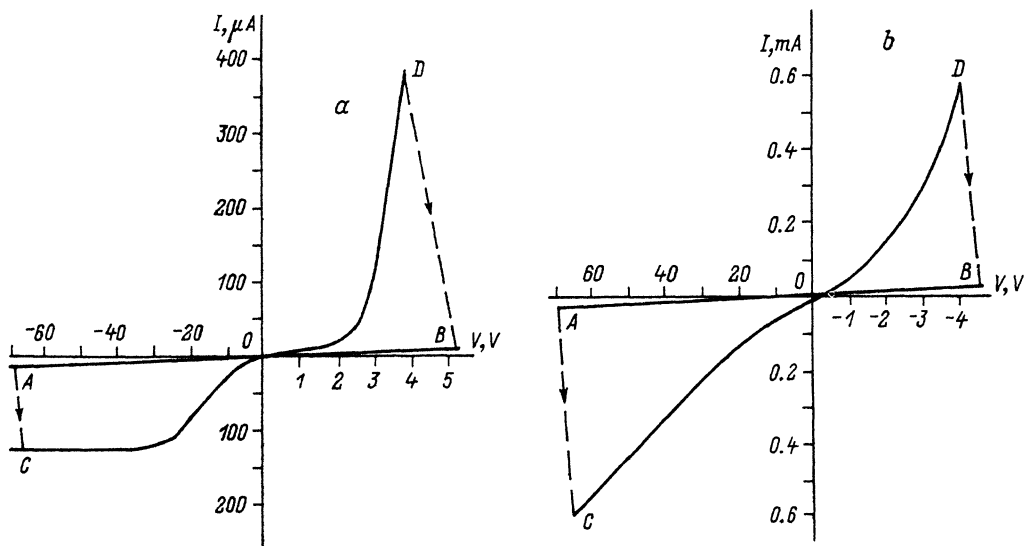


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика структуры Al—ErF<sub>3</sub>—Si. Подложка: а — n-, б — p-типа проводимости. Толщина диэлектрика 0,3 мкм.

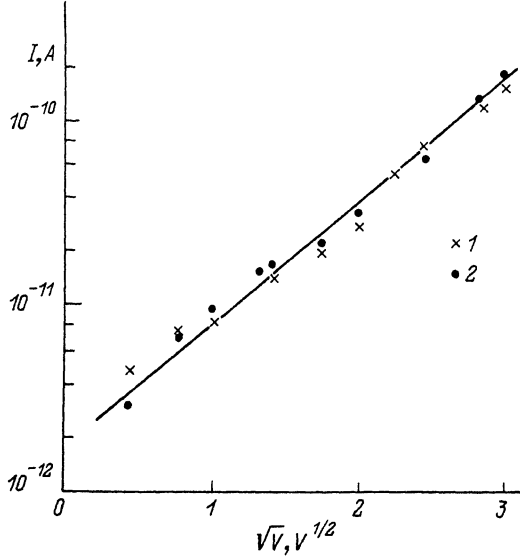


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика структуры Al—ErF<sub>3</sub>—*n*-Si в высокоомном состоянии в полулогарифмических координатах при положительной (1) и отрицательной (2) полярностях напряжения.

диэлектрических потерь ( $\text{tg } \delta$ ) от напряжения структур в низкоомном состоянии измерялись на частоте 1 МГц на приборе Е7-12.

### Экспериментальные результаты

Изготовленные МДП структуры в исходном состоянии обладали практически симметричными ВАХ и имели высокое сопротивление  $(2 \div 4) \cdot 10^{11}$  Ом. Температурная зависимость тока (рис. 1) в этом случае характеризуется энергией активации, равной 0.55 эВ в области температур 300—480 К.

Структуры проявляли свойство бистабильного электрического переключения проводимости. На рис. 2 представлены типичные ВАХ изучаемых образцов, изготовленных на кремниевых подложках *n*- и *p*-типа проводимости. Как показали исследования, МДП структуры могут находиться в двух устойчивых состояниях с существенно различными значениями сопротивления и различными ВАХ. В состоянии с высоким сопротивлением ( $R_b = (2-4) \cdot 10^{11}$  Ом, рис. 2, ветвь *AOB*) ток через структуру экспоненциально возрастает с ростом температуры. При этом ВАХ, построенные в координатах  $\ln I$  от  $\sqrt{V}$ , линейны (рис. 3), а образцы практически не выпрямляют электрический ток. Образцы находятся в высокоомном состоянии, пока электрическое напряжение, полярность которого соответствует обеднению поверхности полупроводника основными носителями заряда, не превысит некоторое пороговое значение  $V_{th}$ . При превышении порогового напряжения происходит резкое (на 5—6 порядков) уменьшение сопротивления образца и переключение его в низкоомное состояние (рис. 2, ветвь *COD*).

Сопротивление структур в низкоомном состоянии лежит в пределах  $R_l = 10^4 - 10^5$  Ом. В низкоомном состоянии МДП структуры обладают униполярной ВАХ с коэффициентом выпрямления  $K = 10-100$ , при этом температурная энергия активации проводимости (рис. 1) составляет 0.08 эВ. Полученное состояние устойчиво и сохраняется при отключении питания.

На рис. 4 представлены вольт-фарадные характеристики, зависимости активной части сопротивления и тангенса угла диэлектрических потерь от на-

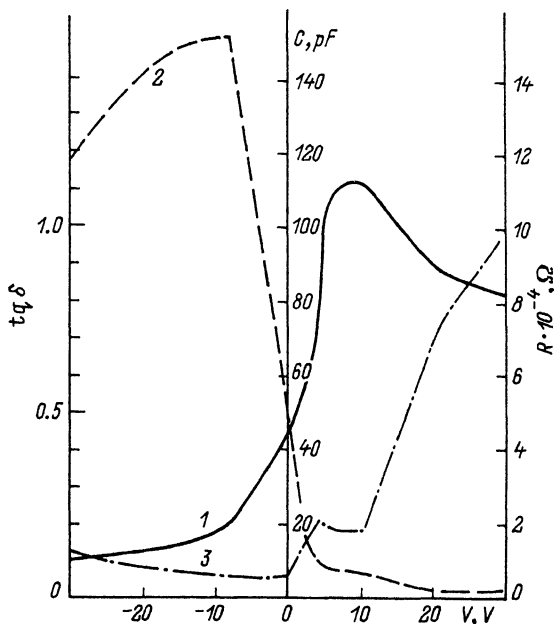


Рис. 4. Вольт-фарадная характеристика (1) и зависимости активного сопротивления (2) и тангенса угла диэлектрических потерь (3) от напряжения на МДП структуре в низкоомном состоянии.

пряжения МДП структуры в низкоомном состоянии. Видно, что емкость и потери структуры монотонно убывают, а сопротивление растет с возрастанием величины обедняющего напряжения, что характерно для аналогичных зависимостей  $p-n$ -переходов. В области больших отрицательных значений напряжения ( $V > -8$  В), соответствующих инверсии на поверхности полупроводника, наблюдаются уменьшение сопротивления и возрастание тангенса угла диэлектрических потерь.

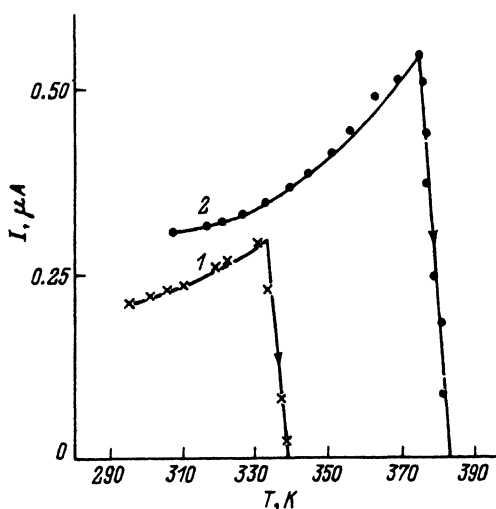


Рис. 5. Температурные зависимости тока МДП структуры в низкоомном состоянии и термическое переключение проводимости из низкоомного в высокоомное состояние при обедняющем напряжении  $-2$  В (1) и  $-4$  В (2).

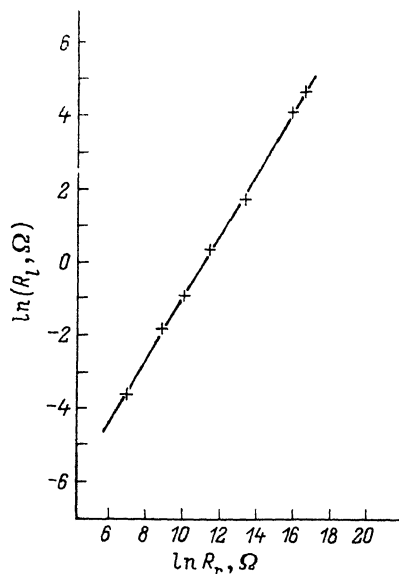


Рис. 6. Зависимость сопротивления структуры Al—ErF<sub>3</sub>—Al в низкоомном состоянии от величины нагрузочного сопротивления.

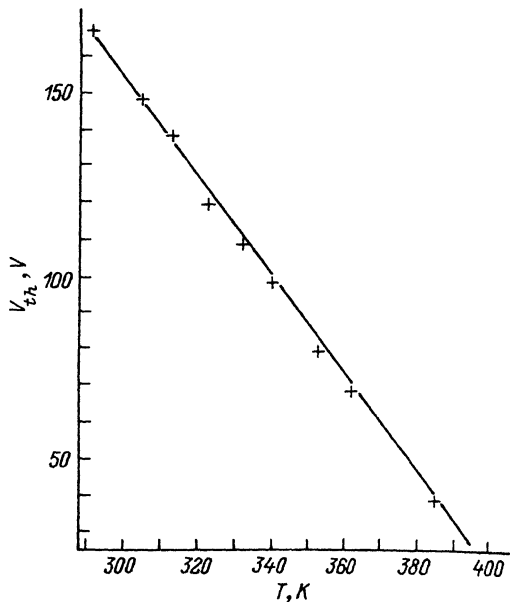


Рис. 7. Температурная зависимость порогового напряжения переключения МДП структуры Al—ErF<sub>3</sub>—Si из высокоомного в низкоомное состояние.

Переключение структуры в исходное, высокоомное состояние осуществляется при противоположной полярности напряжения, когда величина тока через образец достигает значения 100—600 мкА. При этом напряжение обратного переключения для различных образцов лежит в пределах  $V_0 = 3—20$  В. Структура воспроизводимо и многократно (более  $10^4$  раз) переключается из одного состояния в другое и обратно как на постоянном, так и импульсном напряжении, причем оба состояния сохраняются длительное время (более 30 суток) при комнатной температуре и выключенном напряжении. Время переключения проводимости из одного состояния в другое и обратно составляет 0.6—1 мкс. Переключение структур из высокоомного в низкоомное состояние характеризуется напряженностью электрического поля в диэлектрике  $\sim 3.5 \cdot 10^6$  В/см, причем величина порогового напряжения  $V_{th}$  возрастает линейно с увеличением толщины пленки фторида эрбия. Структуры с напыленными алюминиевыми контактами обладают значениями порогового напряжения на 30—40 В меньшими, чем с прижимными металлическими электродами. Обратное переключение из низкоомного в высокоомное состояние характеризуется небольшим возрастанием напряжения переключения при увеличении толщины диэлектрического слоя.

Переключение структуры из низкоомного в высокоомное состояние может быть произведено также термическим способом как при приложении напряжения, так и при прогреве образцов без питающего напряжения при температуре 340—400 К. Причем термическое переключение проводимости происходит при значительно меньших значениях электрического напряжения по сравнению с электрическим переключением и наблюдается при обеих полярностях питающего напряжения. Характерно увеличение температуры переключения с увеличением напряжения питания при полярности, соответствующей обеднению поверхности полупроводника (рис. 5).

МДМ структуры типа Al—ErF<sub>3</sub>—Al также обладают свойством электрического переключения проводимости с памятью под действием постоянного или импуль-

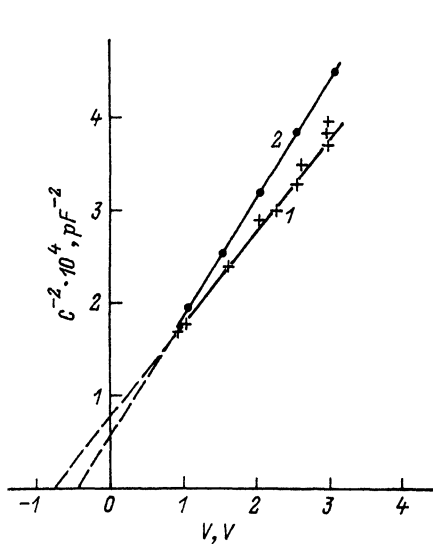


Рис. 8. Вольт-фарадные характеристики структуры Al—ErF<sub>3</sub>—Si в низкоомном состоянии. Подложка: 1 — *p*-, 2 — *n*-типа проводимости.

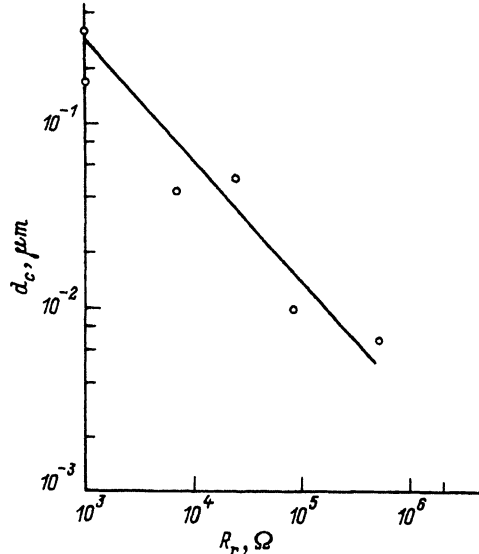


Рис. 9. Зависимость диаметра проводящего канала в диэлектрической пленке от величины сопротивления нагрузки.

ного напряжения. При этом для ограничения энергии, вводимой в образец при переключении в низкоомное состояние от источника питания, последовательно с МДМ структурой включалось нагрузочное сопротивление  $R_L$ , величины от 250 Ом до 20 МОм. В этом случае переключение происходило по нагрузочной линии, а сопротивление МДМ структуры в низкоомном состоянии лежало в пределах от  $3 \cdot 10^{-2}$  до  $10^3$  Ом в зависимости от сопротивления нагрузки. Величина сопротивления образца в низкоомном состоянии  $R_I$  зависит от значения сопротивления нагрузки (рис. 6), подчиняясь соотношению

$$R_I = R_0 + AR_L^\alpha, \quad (1)$$

где  $\alpha = 0.75-1.05$ ,  $R_0$  и  $A$  — постоянные.

Величина порогового напряжения переключения МДМ и МДП структур из высокоомного в низкоомное состояние возрастает почти в 6 раз при уменьшении температуры образца от 400 до 290 К (рис. 7).

Вольт-фарадные характеристики образцов в низкоомном состоянии при обратном напряжении в координатах  $1/C^2$  от  $V$  линейны (рис. 8) и подобны аналогичным зависимостям, наблюдаемым для кремниевых *p*—*n*-переходов.

МДП структуры в низкоомном состоянии обладают ВАХ диодного типа, которые позволяют определить из величины сопротивления растекания размеры проводящего канала, возникающего в пленке диэлектрика при переключении в низкоомное состояние. Значения диаметра канала  $d_c$ , определенные по сопротивлению растекания полупроводника  $R_s$  согласно формуле

$$d_c = \frac{\rho}{2R_s}, \quad (2)$$

где  $\rho$  — удельное сопротивление кремния, на постоянном и переменном (частоты 1 МГц) сигналах близки между собой и зависят от величины сопротивления нагрузки, используемой при переключении МДП структуры при обогащающих

поверхность полупроводника полярностью переключającego напряжения (рис. 9). Диаметр  $d_c$  проводящего канала возрастает от  $7 \cdot 10^{-3}$  до 0.3 мкм при уменьшении величины нагрузочного сопротивления с 500 до 1 кОм и может быть описан следующей эмпирической зависимостью:

$$d_c = BR_t^\beta, \quad (3)$$

где  $B$  и  $\beta$  — постоянные.

### Обсуждение результатов

Анализ настоящих данных в сравнении с результатами по переключению и памяти в халькогенидных материалах [1, 2] и оксидных пленках металлов [3-8] обнаруживает их качественную корреляцию. Переключение проводимости с памятью обычно связывается со структурными изменениями материала, которые вызываются разогревом под действием высокой плотности тока [2], с изменением элементного состава материала [7, 8], или с массопереносом материала электрода через пленку диэлектрика под действием электрического поля [9].

Как показали исследования, эффект переключения МДП и МДМ структур в проводящее состояние не зависит от материала электрода и наблюдается на образцах как с напыленными, так и с прижатыми контактами. Переключение проводимости структур, изготовленных на основе  $p$ -кремния, происходит при противоположной полярности напряжения по сравнению с образцами из  $n$ -кремния. Это свидетельствует о том, что электромиграция ионов из металлических электродов как механизм переключения изучаемых структур маловероятна.

Особенностью исследуемых образцов является сильно неупорядоченная структура пленки фторида эрбия, которая обуславливает неравномерное распределение тока и температуры в диэлектрике, а также формирование канала с высокой плотностью тока. Увеличение плотности тока ведет к повышению температуры в канале, что приводит к дальнейшему увеличению тока. Образование памяти происходит в перегретой ветви шнура тока и связано, по-видимому, с фазовым переходом  $I$  рода, происходящим в канале слоя фторида эрбия. Сформировавшийся низкоомный шнур является термодинамически устойчивым и обеспечивает более высокую проводимость канала относительно высокоомной среды фторида эрбия. Совместное действие электрического поля и температуры вызывает разрыв ионных связей фторида эрбия и образование ионов эрбия, которые дрейфуют в электрическом поле к отрицательному электроду и формируют металлический канал в слое фторида эрбия. По мере накопления ионов эрбия у отрицательного электрода толщина диэлектрического слоя в этой области уменьшается, а напряженность электрического поля возрастает, что вызывает дальнейшее увеличение тока. Наличие положительной обратной связи в канале приводит к быстрому процессу образования проводящего металлического канала из эрбия в матрице диэлектрического переключającego слоя и переключению элемента в низкоомное состояние, которое запоминается и сохраняется.

Таким образом, переключение элемента из высокоомного в низкоомное состояние соответствует фазовому превращению материала пленки фторида эрбия, когда в диэлектрической матрице формируется проводящий канал металлического эрбия, окруженный областью с избыточным фтором.

При формировании проводящего канала и снижении сопротивления слоя диэлектрика происходит перераспределение напряжения на элементе, т. е. уменьшение падения напряжения на пленке  $\text{ErF}_3$  и увеличение падения напряжения в обедненной области полупроводниковой подложки вблизи границы с  $\text{ErF}_3$ . При этом область пространственного заряда кремния ограничивает протекающий ток и предотвращает необратимый пробой пленки фторида эрбия. Поэтому эффект переключения в проводящее состояние наблюдается только при обедняющем

поверхности полупроводника напряжении или при наличии ограничивающего ток сопротивления нагрузки.

В низкоомном состоянии ток через МДП структуру зависит от состояния поверхности полупроводника. В случае обогащения поверхности полупроводника сопротивлением структуры в основном определяется сопротивлением слоя  $\text{ErF}_3$ , а при противоположной полярности напряжения — совокупным действием пленки фторида и обедненной области пространственного заряда полупроводника. Это объясняет униполярные свойства структуры в низкоомном состоянии. Отсутствие насыщения обратного тока на ВАХ в низкоомном состоянии обусловлено, видимо, малой степенью идеальности образующегося поверхностного барьера Шоттки в контакте проводящий канал—кремний.

При пропускании тока противоположной полярности, величина которого больше порогового значения, материал проводящего канала разогревается, что приводит к взаимной диффузии и химическому взаимодействию атомов эрбия и фтора с образованием фторида эрбия. При этом область проводящего канала восстанавливает свои диэлектрические свойства и структура переключается в исходное высокоомное состояние.

Данный вывод подтверждается наблюдаемым в структурах эффектом термического переключения структуры из низкоомного в высокоомное состояние. Однако малые размеры проводящего канала (доли мкм) не позволяют определить его фазовый состав. Проведенные исследования показывают перспективность использования изучаемых структур в качестве элементов постоянной репрограммируемой памяти, а также электрических и тепловых переключателей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Ф. Г. Старос, Л. П. Крайзмер. Полупроводниковые интегральные запоминающие устройства, 112, Л. (1973).
- [2] И. Я. Лямичев, И. И. Литвак, Н. А. Ощепков. Приборы на аморфных полупроводниках и их применение, 128. М. (1976).
- [3] A. M. Goodman. *J. Appl. Phys.*, 34, 329 (1963).
- [4] В. А. Рожков, А. И. Петров. *ЖТФ*, 11, 49 (1985).
- [5] В. А. Рожков, А. И. Петров, Е. А. Милотин. *Микроэлектрон.*, 13, 247 (1984).
- [6] F. Argall. *Sol. St. Electron*, 11, 535 (1968).
- [7] D. C. Bullock, D. J. Epstein. *Appl. Phys. Lett.*, 17, 199 (1970).
- [8] P. Wachter. *Phys. Lett. A*, 41, 391 (1972).
- [9] Б. А. Малахов, В. И. Покалякин, А. Н. Горелов, А. Б. Ормонт. *Микроэлектрон.*, 7, 463 (1978).

Редактор Л. В. Шаронова

---