

Д. ф.-м. н. З. А. ИСКЕНДЕР-ЗАДЕ, к. ф.-м. н. М. Р. АХУНДОВ,  
к. ф.-м. н. Э. А. ДЖАФАРОВА, к. ф.-м. н. Ш. А. АЛИХАНОВА

Азербайджанский технический университет, Институт физики  
НАН Азербайджана, г. Баку  
E-mail: ssddb@azerin.com

Дата поступления в редакцию  
04.12.2003 г.

Оппонент к. ф.-м. н. В. В. КОВАЛЬЧУК  
(ЮГПУ им. К. Д. Ушинского, г. Одесса)

## ЭФФЕКТЫ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ И ПАМЯТИ В МОП-СТРУКТУРАХ Al-SiO<sub>2</sub>-Si

*Показана возможность практического применения Al-SiO<sub>2</sub>-Si-структур в создании стабильных и управляемых элементов памяти.*

Переключение с памятью в аморфных и поликристаллических полупроводниках, обусловленное возникновением кристаллического проводящего шнура между электродами [1], не отличается стабильностью характеристик — вследствие активного взаимодействия большинства халькогенидных материалов с металлами, приводящего к их растворению. Наиболее перспективным материалом для создания переключающих элементов является кремний, причем собственно переключателями в нем могут быть области с неупорядоченной структурой (SiO<sub>2</sub>, поликремний, α-Si), а монокристаллические участки могут служить для изготовления в них активных элементов интегральных схем обработки сигналов [2, 3].

В настоящей работе исследуются структуры Al-SiO<sub>2</sub>-Si с целью выяснения возможности их практического применения в создании стабильных и управляемых элементов памяти.

Исследуемые структуры Al-SiO<sub>2</sub>-Si изготавливались в сэндвичевом исполнении на основе кремниевых пластин *p*- и *n*-типов проводимости с различным удельным сопротивлением, соответствующим значению сопротивления, применяемого для изготовления логических и аналоговых интегральных схем.

Оксиды SiO<sub>2</sub> на полированных и химически обработанных пластинках Si толщиной 250—300 мкм были получены: а) термическим окислением во влажном кислороде; б) термическим окислением в атмосфере сухого кислорода; в) пиролитическим осаждением при термическом разложении тетраэтоксисилана. Толщина окисного слоя варьировалась в интервале 0,1—0,8 мкм. Контроль толщины окисла, устанавливаемый выбором режима окисления, осуществлялся оптическим и емкостным методами. После напыления алюминия с помощью фотолитографии формировались затворы различного диаметра.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) структур исследовались в статическом и динамическом режимах в интервале температур 77—460 К.

В исходном высокоомном состоянии образцов на *n*- и *p*-Si, окисел которых выращивался термическим и пиролитическим путями, соответственно, токи до определенного критического значения напряжения ( $U_{пор}$ )

весьма малы и подчиняются закону  $I \sim U^{3/2}$  и  $I \sim U^3$  (рис. 1, кривые а, б). Из измерений при  $U=5$  В оценено удельное сопротивление окисной пленки SiO<sub>2</sub> — оно составляет  $10^{15}$ — $10^{16}$  Ом·см. Анализ ВАХ показывает, что, во-первых, в высокоомном состоянии перенос заряда через исследованные структуры обусловлен током, ограниченным пространственным зарядом, и, во-вторых, пиролитические пленки более дефектны, и ловушки в них, вероятно, распределены неравномерно.

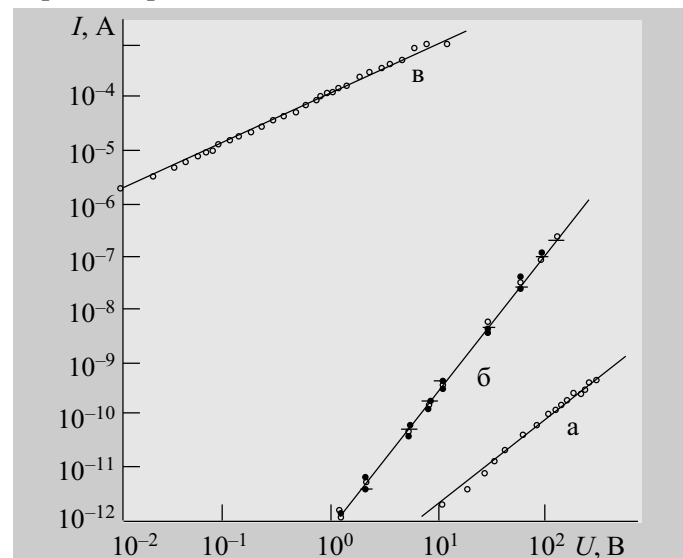


Рис. 1. ВАХ структур Al-SiO<sub>2</sub>-Si при комнатной температуре:

а, б — исходное закрытое состояние; в — открытое состояние

Начиная со значения напряжения  $U_{пор}$  величина тока скачком возрастает от  $10^{-9}$  до  $10^{-3}$  А, т. е. структура переходит из высокоомного состояния (ВС) в низкоомное (НС) (рис. 1, кривая в). В последнем состоянии структура может находиться произвольно долго. Переключение структуры из ВС в НС происходит при подаче постоянного и импульсного напряжений различной формы и длительности.

Экспериментально обнаружено, что напряжение первого включения структур линейно зависит от толщины окисного слоя (рис. 2). После первого переключения напряжение  $U_{пор}$  несколько уменьшается и в дальнейшем почти не меняется с числом переключений, т. е. происходит как бы формовка структур. Напряжение переключения практически не зависит от исходного удельного сопротивления кремниевой подложки и температуры в интервале 77—460 К.

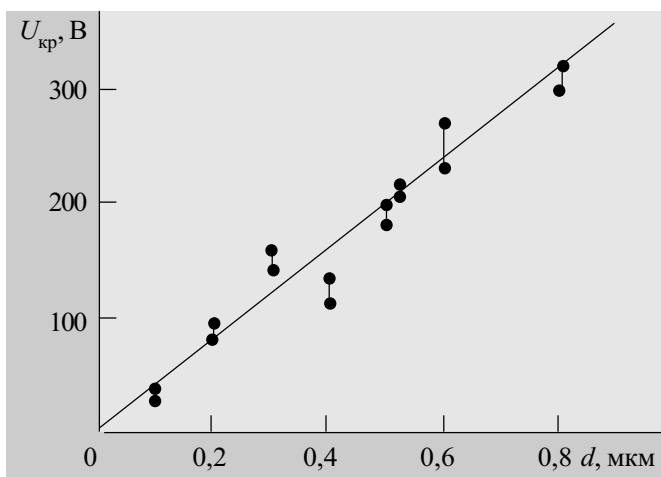


Рис. 2. Зависимость напряжения переключения  $U_{кр}$  от толщины окисной пленки  $d$

В состоянии НС ВАХ структур на основе  $p$ -Si симметрична и линейна, а сопротивление структуры практически не зависит от температуры и изменяется в пределах  $0,1—2,0$  кОм для различных образцов и при разном числе переключений. После переключения из ВС в НС остаточное напряжение составляет  $U_{ост} \approx 5...10$  В при токе  $I_{ост} \approx 2,5...5,0$  мА. Переход из НС обратно в ВС происходит при подаче одиночного импульса с амплитудой  $50—100$  В и длительностью  $5—10$  мкс. Максимальное число переключений (примерно  $10^6$ ) наблюдается в образцах с толщиной окисла  $0,6—0,8$  мкм, полученного в атмосфере сухого кислорода, что, по-видимому, объясняется тем, что такие окисные пленки более плотны, имеют меньше дефектов и обладают более низкой концентрацией поверхностных состояний на границе раздела с кремнием.

Для структур на основе  $n$ -Si в НС в зависимости тока от напряжения наблюдается сильная асимметрия (диодная характеристика) с коэффициентом выпрямления  $10^4—10^6$  при  $U=1$  В, причем прямой и обратный токи зависят от температуры (рис. 3).

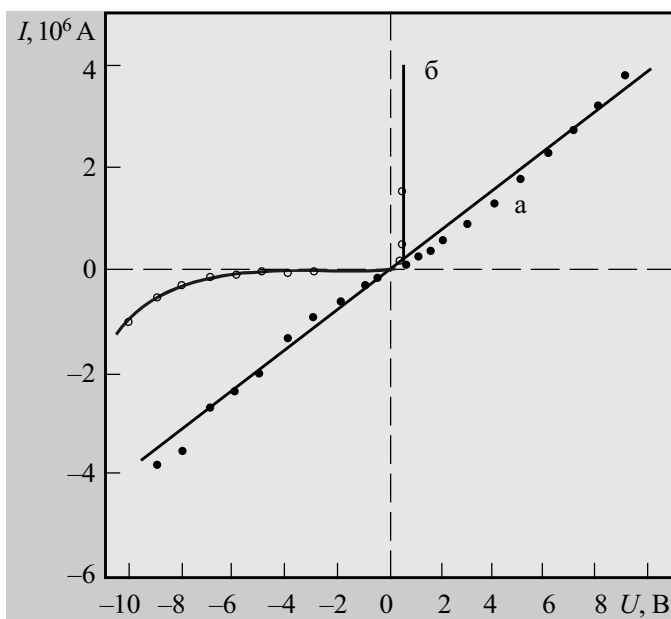


Рис. 3. ВАХ структур  $Al-SiO_2-n-Si$  при комнатной температуре:

$a$  — закрытое состояние;  $b$  — открытое состояние

Исследования показывают, что токи через структуру в высокопроводящем состоянии на основе как  $p$ -Si, так и  $n$ -Si, не зависят от площади металлического контакта и удельного сопротивления исходного кремния.

Нами исследована также кинетика переключения. Эти исследования позволяют получить весьма ценную информацию о физике процессов, ответственных за эффект переключения и памяти. Переходные процессы характеризуют быстроедействие структуры, которое необходимо учитывать при определении сфер применения переключающих элементов в устройствах электроники.

Исследования проводились в режиме одиночного импульса и на импульсах большой скважности. При этом на экране двухкоординатного осциллографа одновременно наблюдались падение напряжения и ток через структуры.

До значения напряжения переключения структура находится в высокоомном состоянии, поэтому приложенное напряжение полностью падает на образце, и форма выходного импульса повторяет форму исходного. При достижении напряжения  $U_{пор}$  переключение начинается с конца импульса с задержкой  $\tau_{зд}$ . При постоянной длительности импульса с увеличением его амплитуды  $\tau_{зд}$  включения уменьшается. В предельном значении порогового напряжения переключение происходит почти без задержки на переднем фронте импульса.

Исследования показывают, что не только время задержки, но и собственное время включения ( $\tau_{вкл}$ ,  $\tau_0$ ) экспоненциально уменьшаются с ростом амплитуды импульса напряжения и выражаются эмпирическими формулами  $\tau_{зд} = \tau_{з0} \exp(-\alpha U)$  и  $\tau_{вкл} = \tau_0 \exp(-\beta U)$ , где для различных образцов  $\alpha = 0,13...0,15$  В<sup>-1</sup>, задержка включения при малых амплитудах импульса  $\tau_{з0} = (1...3) \cdot 10^{-3}$  с,  $\beta = 0,16...0,18$  В<sup>-1</sup>,  $\tau_0 = (5...8) \cdot 10^{-4}$  с.

Во всех исследованных структурах  $\tau_{зд}$  на порядок больше собственного времени включения.

Экспериментальные факты показывают, что для переключения структур в НС необходима определенная энергия, которая накапливается во время задержки, причем необходимым условием переключения является величина тока.

Обобщая экспериментальные данные, можно сказать, что процессы задержки и переключения в структурах  $Al-SiO_2-Si$  обусловлены электронным механизмом, причем доминирующим механизмом переключения является ударная ионизация. В сильных электрических полях ( $E \geq 10^6$  В/см) электроны, эмитированные из алюминиевого электрода в пленку  $SiO_2$ , при столкновении ионизируют атомы и молекулы и в результате приводят к лавинному размножению носителей, т. е. пробой окисной пленки. Так как пленка  $SiO_2$ , как правило, дефектна, то пробой происходит по микроплазмам, что подтверждается колебаниями тока и напряжения в момент включения. С другой стороны, инжектированные носители захватываются глубокими уровнями, что приводит к появлению задержки переключения.

Если выделяемого при пробое тепла недостаточно для расплавления электродного материала, то переключение носит моностабильный характер, что со-

гласуется с экспериментальными результатами, полученными при исследовании структур в импульсном режиме. А если в момент переключения выделяется достаточная энергия, то локальная температура системы возрастает настолько, что в области выделения этой энергии структура  $\text{SiO}_2$  разрушается и заполняется расплавленным материалом электрода. Последний, в свою очередь, под действием электрического поля и локально выделяемого тепла переносится через окисную пленку к подложке, образуя металлический микроканал диаметром 1—3 мкм. Эти предположения подтвердились также тем, что в случаях, когда атомы алюминия проникали в подложку, в ней образовывался  $p$ - $n$ -переход, как показало электронно-микроскопическое исследование.

Экспериментально обнаружено, что при воздействии на структуру одиночными импульсами порогового напряжения при относительно высоких значениях ограничивающего сопротивления  $R_{\text{огр}}$  с конца импульса возникают осцилляции напряжения и тока. С увеличением амплитуды импульса на  $\Delta U \leq 5$  В число колебаний возрастает и они постепенно заполняют весь импульс. В случае термического окисла наблюдаются колебания почти синусоидальной формы, а для пиролитического окисла осцилляции тока и напряжения носят релаксационный характер. Осцилляции тока и напряжения наблюдаются и при низких частотах ( $f \leq 50$  Гц). Частота колебаний тока и напряжения возрастает с ростом приложенного напряжения и для большинства структур составляет 0,4—1,0 МГц. Более стабильные колебания наблюдаются в структурах с пиролитическим окислом.

Эти явления качественно могут быть объяснены следующим образом. Так как осцилляции тока и напряжения обнаруживаются только при относительно

высоком значении ограничительного сопротивления  $R_{\text{огр}}$  и узком интервале напряжения ( $\Delta U \leq 5$  В), то ясно, что ток, текущий через структуры, недостаточен для удержания системы в НС. Увеличение тока через структуру приводит к перераспределению напряжения между  $R_{\text{огр}}$  и структурой, которое, в свою очередь, приводит к уменьшению тока и повторному перераспределению напряжения, т. е. наблюдается осцилляция. Наблюдаемые осцилляции могут быть связаны также с дефектностью пленки  $\text{SiO}_2$ , т. е. перезарядкой глубоких примесных центров, т. к. в наиболее дефектных пиролитических структурах наблюдаются наиболее устойчивые осцилляции. Осцилляция не связана с тепловыми эффектами, т. к. с ростом частоты импульсов напряжения влияние тепловых эффектов растёт и структура переходит в НС без осцилляции.

\*\*\*

Таким образом, проведенные исследования показали возможность использования кремниевых МОП-структур в качестве стабильных элементов памяти, конструктивно и технологически согласующихся с изготовлением ИС хранения и обработки информации.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Милов А. А. Переключающие приборы на основе аморфных полупроводниковых материалов // Электронная техника. Сер. Микроэлектроника.— 1971.— Вып. 3.— С. 3—13.
2. Касимов Ф. Д. Физические свойства и функциональные возможности локальных пленок моно- и поликремния // Тез. докл. 12-й Всесоюз. конф. по микроэлектронике. Ч. 2.— Тбилиси.— 1987.— С. 175—176.
3. Abdullayev A. G., Kasimov F. D. The simultaneous growth of mono- and polycrystalline silicon films // Thin Solid Films.— 1984.— Vol. 115, N 3.— P. 237—243.



Украинский проспект электроники

<http://tkoe.wallst.ru/elektroniks.html>

## Научно-производственное предприятие “Карат”



79031, г. Львов, ул. Стрийська, 202,  
тел. 63-10-65, 63-83-03, факс: 63-22-28, 63-50-69  
E-mail: carat@novas.lviv.ua

*Научно-тематическое направление деятельности предприятия — материалы электронной техники.*

#### Основные виды продукции:

*материалы микроэлектроники, керамические материалы электронной техники, материалы оптоэлектроники, квантовой электроники и оптики, материалы акустоэлектроники, магнитоэлектроники, криоэлектроники, технологические материалы для монтажно-сборочных работ и печатных плат.*

*Услуги: испытания, тестирование и сертификация материалов в аккредитованной Госстандартом Украины лаборатории.*