

05.2;06.3;11;12

## СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОНДЕНСАТОРНЫЕ СТРУКТУРЫ НА КРЕМНИИ ДЛЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ ЭНЕРГОЗАВИСИМОЙ ПАМЯТИ

© *В.В.Леманов, А.А.Иофан, К.Н.Соловьева,  
Ю.В.Фролов, В.К.Ярмаркин*

Наличие у сегнетоэлектриков остаточной поляризации и возможность управления ее знаком и абсолютной величиной путем приложения к сегнетоэлектрическим тонким пленкам относительно небольших управляющих напряжений (3–5 В) соответствующей полярности делают принципиально возможным использование этих материалов для создания интегральных микросхем энергозависимой памяти, характеризующихся более высоким быстродействием (меньшей длительностью циклов считывание–стирание–перезапись, достигающей 30 нс), большим числом допустимых циклов перезаписи (до  $10^{14}$  циклов) и более высокой радиационной стойкостью по сравнению с существующими в настоящее время видами электронно-стираемых перепрограммируемых запоминающих устройств [1–3]. В то же время, несмотря на имеющиеся сообщения о реализации указанных схем (см., например, [4]), их осуществление на практике встречает значительные трудности, так что высказывается даже мнение, что реальная интеграция сегнетоэлектрического материала не может быть осуществлена совокупностью традиционных технологических процессов и делает необходимым поиск новых подходов к технологии изготовления интегральных схем [5].

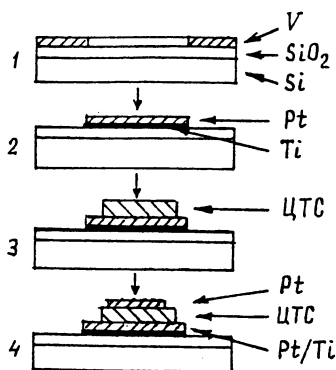
Одной из главных причин описанного положения является химическое взаимодействие сегнетоэлектрических тонких пленок с кремнием при температуре кристаллизационного отжига пленок, приводящее к изменению их состава, растрескиванию и к трудности их химического травления при формировании конденсаторных структур фотолитографическими методами [6]. Использование для формирования указанных структур метода реактивного ионного травления, требующего применения сложного дорогостоящего оборудования, кроме существенного удорожания процесса изготовления интегральных схем сопряжено с опасностью повреждения пленок радиационными дефектами.

Другое существенное препятствие на пути создания и широкого практического использования интегральных схем

энергозависимостей памяти на основе сегнетоэлектрических тонких пленок обусловлено присущим сегнетоэлектрикам (в большей или меньшей степени) явлением усталости, проявляющимся в уменьшении величины переключаемого заряда при многократных переключениях из поляризации сильными электрическими полями и не имеющим к настоящему времени убедительного физического объяснения (см., например, работы [7-9]). Особенно сильно указанное явление сказывается на работе динамических оперативных запоминающих устройств (ОЗУ), т. к. в этом случае каждое обращение к выбранной ячейке памяти сопровождается стиранием и последующим восстановлением (перезаписью) записанной ранее в эту ячейку памяти информации, т. е. переключением поляризации сегнетоэлектрика с частотой, определяемой тактовой частотой следования импульсов и объемом памяти рассматриваемого ОЗУ. По этой причине мы полагаем, что более целесообразным в настоящее время является использование сегнетоэлектрических тонких пленок для энергозависимого хранения информации в схемах статических ОЗУ, подобных предложенным ранее специалистами фирмы Ramtron Corp. [2], в которых сегнетоэлектрические конденсаторы подсоединяются к обычным КМОП кремниевым ячейкам металл-оксид-полупроводник) памяти лишь при отклонении (сбое) и последующем включении напряжения питания схемы.

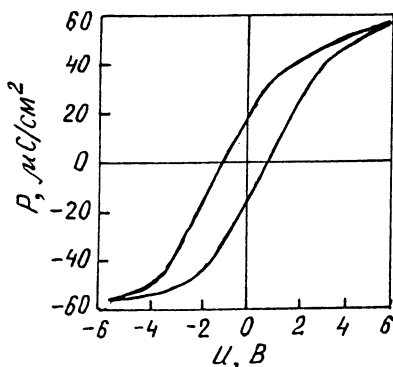
С учетом сказанного нами была предпринята попытка разработки технологического процесса формирования сегнетоэлектрических конденсаторных структур на поверхности кремниевых пластин, совместимого со стандартной КМОП технологией изготовления ИС, а также выполнено машинное моделирование модифицированной ячейки энергозависимой памяти статического ОЗУ.

На рис. 1 представлена использованная нами схема технологического процесса формирования сегнетоэлектрических тонкопленочных конденсаторных структур на поверхности кремния. Эта схема включает в себя обычные для кремниевой технологии операции нанесения и формирования металлических электродов (соответственно методами ВЧ магнетронного распыления и "взрывного" травления при использовании ванадия в качестве материала обратной маски), а также нанесения (золь-гель методом) и формирования требуемого рисунка (методом "мокрого" травления в смеси водных растворов фтористого натрия, соляной и азотной кислот) сегнетоэлектрических тонких пленок цирконата-титаната свинца (ЦТС) толщиной около 200 нм. Площадь рабочих участков сегнетоэлектрических пленок на поверхности платинового нижнего электрода в конден-



**Рис. 1.** Последовательность операций при формировании сегнетоэлектрических конденсаторных структур на кремнии: 1 — напыление ванадия  $\text{V}$  (100 нм) на поверхность термического окисла  $\text{Si}$  (500 нм) и вскрытие окон для нижнего электрода; 2 — напыление и “взрывное” травление нижнего электрода ( $\text{Pt/Ti}$  100/10 нм); 3 — нанесение пленки ЦТС (4 слоя по 50 нм), ее “мокрое” травление и кристаллизационный отжиг при  $600\text{--}650^\circ\text{C}$  в токе кислорода; 4 — нанесение и “взрывное” травление верхнего электрода ( $\text{Pt}$  100 нм) с последующим нормализационным отжигом при  $600\text{--}650^\circ\text{C}$  в токе кислорода.

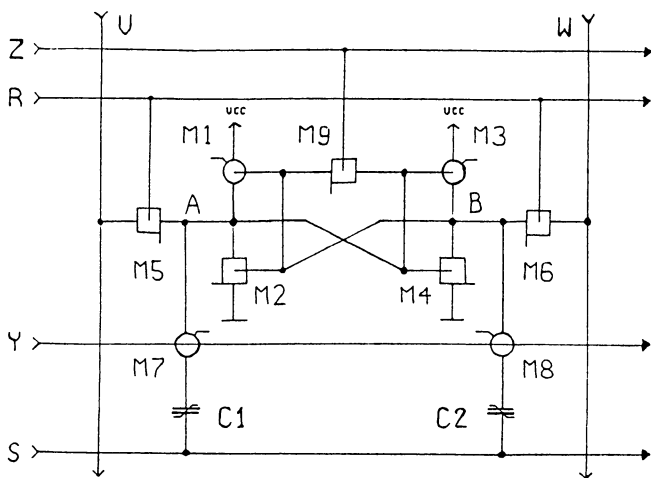
саторных структурах составляла  $10 \times 10$ ,  $20 \times 20$ ,  $50 \times 50$  и  $100 \times 100$  мкм. В качестве сходных растворов при получении пленок ЦТС (цирконат-титанат свинца) использовались растворы метилцеллозольватов свинца, циркония и титаната в метилцеллозольве, отвечающие составу пленок  $\text{Pb}_{0.05}\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48}\text{O}_3$  (растворы изготовлены во ВНИПИМ, г. Тула). “Мокрая” фотолитография сегнетоэлектрических пленок осуществляется в этой схеме после термической обработки пленок в токе кислорода при температуре  $500^\circ\text{C}$ , мин. Такая термообработка оказывается достаточной для того, чтобы обеспечить химическую устойчивость пленок по отношению к наносимому на их поверхность фоторезисту (типа ФП051), но не достаточной для того, чтобы вызвать заметное химическое взаимодействие пленок с кремнием в области их непосредственного контакта до проведения фотолитографии по слою пленки. Последующий (после фотолитографии, исключающей контакт пленки с кремнием) кристаллизационный отжиг сегнетоэлектрика при температурах  $600\text{--}650^\circ\text{C}$  не сопровождался каким-либо взаимодействием пленки с кремнием, приводя к формированию однородных, без трещин, участков сегнетоэлектрика на платиновом нижнем электроде вышеуказанных размеров (от  $10 \times 10$  до  $100 \times 100$  мкм), идентичных по своей кристаллической структуре и электрическим свойствам, описанным на-



**Рис. 2.** Петля диэлектрического гистерезиса конденсаторной структуры Pt-ЦТС-Pt/Ti на кремнии (площадь электродов  $10^{-4} \text{ см}^2$ , частота 1 кГц).

ми ранее в [10], тонкопленочным структурам, полученным на сплошном платиновом покрытии кремния диаметром 60 мм и не подвергавшихся фотолитографированию. На рис. 2 представлена типичная для полученных описанным способом структур петля диэлектрического гистерезиса, измеренная по схеме Сойера-Тауэра и свидетельствующая об их достаточно высоком качестве применительно к использованию в устройствах памяти.

Для экспериментальной проверки работоспособности полученных структур в составе ячеек памяти ОЗУ и уточнения требований к ним (по толщине пленки, площади электродов и др.) нами была разработана схема тестового ОЗУ, состоящего из двух кристаллов: кристалла собственно ОЗУ, содержащего 4 ячейки памяти со схемами и изготавливаемого по стандартной КМОП технологии, и кристалла, содержащего набор сегнетоэлектрических конденсаторов различных типоразмеров, присоединяемого электрически к кристаллу ОЗУ. С целью повышения надежности срабатывания ячеек памяти при восстановлении их состояния после отключения питания схемы и для снижения требований к параметрам используемых в их составе сегнетоэлектрических конденсаторов схема сегнетоэлектрического ОЗУ, содержащая обычно 8 транзисторов (два из которых — ключи для подключения конденсаторов), была дополнена девятым  $n$ -канальным транзистором, замыкающим при его открывании плечи триггера ячейки памяти и переводящим триггер в высокочувствительное состояние неустойчивого равновесия в момент подключения конденсаторов к ячейке (рис. 3).



**Рис. 3.** Модифицированная схема ячейки памяти энергонезависимого ОЗУ на основе сегнетоэлектрических тонких пленок: M1–M19 — полевые транзисторы, в том числе: M1, M3, M7 и M8 — p-канальные, M2, M4, M5, M6 и M9 — n-канальные. Включение в схему дополнительного транзистора M9, управляемого напряжением на шине Z, облегчает перевод триггера в высокочувствительное состояние неустойчивого равновесия, что приводит к повышению надежности срабатывания схемы и снижению требований к сегнетоэлектрическим конденсаторам C1 и C2, подключаемым к ячейке напряжением на шине Y.

Как показало выполненное нами моделирование работы сегнетоэлектрических ячеек памяти на ЭВМ с использованием программы PSPICE, для надежного восстановления состояния ячеек в этом случае оказывается достаточным относительно небольшого (не более 20%) различия эффективных значений емкости конденсаторов C1 и C2 в процессе их перезарядки при повторном включении напряжения питания схемы. Указанное различие (при одинаковых значениях емкости конденсаторов, измеренных на напряжении, меньшем коэрцитивного, и составляющих в рассмотренном нами случае величину от 1 до 100 пф) определяется отношением величины переключаемой поляризации сегнетоэлектриков в этих конденсаторах к непереключаемой (линейной) поляризации под действием приложенного к ним напряжения. Принимая величину переключаемой поляризации сегнетоэлектрика равной удвоенному значению его остаточной поляризации, получаем из данных рис. 2 величину вышеуказанного отношения порядка 80%, существенно превышающую требуемую для надежного срабатывания рассматриваемой ячейки памяти. В качестве иллюстрации, на рис. 4 приведены временные диаграммы напряжений на шинах Y, Z и в

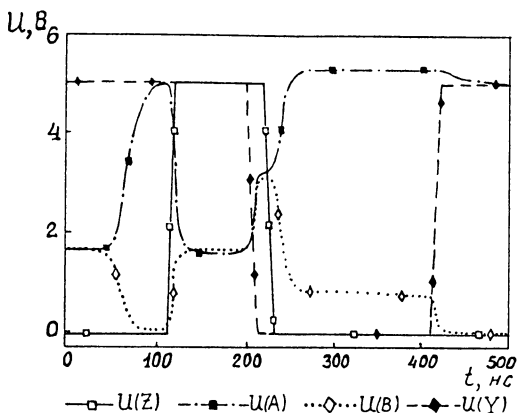


Рис. 4. Диаграмма напряжений на различных участках схемы ячейки памяти сегнетоэлектрического ОЗУ при восстановлении состояния ячейки после повторного включения напряжения питания схемы. Положительный импульс напряжения на шине  $Z$  уравнивает потенциалы в точках  $A$  и  $B$  ячейки памяти, представленной на рис. 3; отрицательный импульс на шине  $Y$  подключает к ячейке сегнетоэлектрические конденсаторы  $C1$  и  $C2$ , токи перезарядки которых устанавливают триггер в исходное (до отключения напряжения питания) состояние.

точках  $A, B$  ячейки памяти, изображенной на рис. 3, при восстановлении состояния ячейки после повторного включения напряжения питания схемы. При этом на шину  $S$  ячейки подается постоянный сигнал высокого уровня, близкий к напряжению питания; на шину  $Y$  подается импульс напряжения высокого уровня, закрывающий транзисторы  $M7$  и  $M8$ ; на шину  $Z$  (с некоторой задержкой относительно импульса на шине  $Y$ ) также подается сигнал высокого уровня, открывающий транзистор  $M9$  и переводящий триггер в состояние неустойчивого равновесия. Через 200 нс после включения напряжения питания на шину  $Y$  подается сигнал низкого уровня, открывающий транзисторы  $M7$  и  $M8$ , так что конденсаторы  $C1$  и  $C2$  подключаются к триггеру и устанавливают его в состояние, предшествовавшее отключению напряжения питания схемы. Через 200 нс после этого на шину  $Y$  подается сигнал высокого уровня, закрывающий транзисторы  $M7$  и  $M8$  и отключающий конденсаторы от триггера, после чего ячейка ОЗУ готова к работе в обычном режиме.

#### Список литературы

- [1] Scott J.F., Araujo C.A.P.D. // Science. 1987. V. 246. P. 1400–1405.
- [2] Weber S. Electronics. 1988. N 4. P. 91–94.
- [3] Iverson W.R. // Electronics. 1988. N 4. P. 94–95.
- [4] Bland T., Obhi J., Patel A., Kirby P., Robinson M., Kerr J. // Proc. 1 Europ. Meet. Integr. Ferroelectrics. Nijmegen. 1995. Abstr. P. 84.

- [5] *Petrovsky V.I., Vorotilov K.A., Yanovskaya M.I., Obintseva I.E., Solovjeva L.I., Valeev A.S.* // Proc. 1 Europ. Meet. Integr. Ferroelectrics. Nijmegen. 1995. Abstr. P. 91.
- [6] *Jones R.E., Maniar P.D., Campbell A.C., Moazzami R., Dupuie J.L., Gregory R.B., Kottke M.L.* // Integr. Ferroelectrics. 1995. V. 6. P. 81-92.
- [7] *Duicker H.M., Beale P.D., Scott J.F., Araujo C.A., P.D. Melnick B.M., Cuchiaro J.D., McMillan L.D.* // J. Appl. Phys. 1990. V. 68. P. 5783-5791.
- [8] *Araujo C.A.P.D., Zuleeg R., Mihara T., Watanabe H., Carrico A., McMillan L.D., Scott J.F.* // Integr. Ferroelectrics. 1992. V. 1. P. 305-322.
- [9] *Pawkaczyk Cz., Tagantsev A.K., Brooks K., Reaney I.M., Kissurska R., Setter N.* // Integr. Ferroelectrics. 1995. V. 8. P. 293-316.
- [10] *Ярмаркин В.К., Зайцева Н.В., Штельмах С.В., Моторный А.В.* // ФТТ. 1995. Т. 37. В. 2. С. 324-336.

Поступило в Редакцию  
25 октября 1995 г.

---