Акад. РАН, д. ф.-м. н. Ю. В. ГУЛЯЕВ, д. ф.-м. н. А. Г. ЖДАН, д. ф.-м. н. Г. В. ЧУЧЕВА

Россия, Фрязинский филиал ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН
E-mail: gvc@ms.ire.rssi.ru

Дата поступления в редакцию
09.11 2010 г.

Оппонент *к. т. н. В. В. ХЛОПОВ*
(ЦНИИРТИ им. Берга, г. Москва)

НОВЫЙ ПОДХОД К СОЗДАНИЮ УСТРОЙСТВ С ЭНЕРГОНЕЗАВИСИМОЙ ПАМЯТЬЮ НА ОСНОВЕ Si-МОП-ТРАНЗИСТОРОВ

Продемонстрирована возможность реализации на полевых транзисторах с изолированным затвором электронно-ионной памяти, которая может представлять интерес для разработки Flash-памяти нового поколения.

Хорошо известно, что в современной микроэлектронике используется несколько типов полупроводниковых устройств памяти, различающихся по быстродействию, объему, необходимости питания, габаритам и другим характеристикам. Многочисленные виды этих микросхем с различными параметрами можно разделить на две группы по отношению памяти к наличию питания, т. е. сохраняются ли записанные данные при выключенном питании или не сохраняются. Другой достаточно важной характеристикой является возможность доступа по любому адресу (т. е. к произвольной ячейке). Среди энергонезависимых типов памяти с произвольным доступом сейчас лидирует кремниевая Flash-память (NAND Flash-память), где в качестве элементов используются МОП-транзисторы с «плавающим» затвором. Однако заменить все существующие оптические и магнитные накопители этим типом носителя невозможно, поскольку в силу своего принципа действия Flash-память допускает лишь ограниченное количество циклов стирания и записи.

Решение данной проблемы заключается в поиске других принципов хранения и записи информации в существующих МОП-транзисторах, которые позволяли бы осуществлять неограниченное число циклов записи/перезаписи информации. Перспективным здесь может быть использование эффектов переноса ионов в подзатворном диэлектрике и их взаимодействия с каналом МОП-транзистора [1, 2].

В настоящей работе рассматриваются возможности реализации принципов Flash-памяти на основе эффектов электронно-ионного взаимодействия в кремниевых полевых транзисторах с изолированным затвором.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант №08-07-00360-а, грант №09-07-13594-офи_ц), и при частичном финансировании по программе фундаментальных исследований Президиума РАН №21 «Основы фундаментальных исследований нанотехнологий и наноматериалов».

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Для эксперимента были выбраны транзисторы с толщиной термического подзатворного оксида h=1000 Å, шириной электродов исток/сток W=1 мм, расстоянием между ними L=10 мкм. В [2] было показано, что изменения электрофизических характеристик транзисторов в результате ионной поляризации диэлектрика в режиме джоулева разогрева прибора током стока сохраняются при комнатной температуре в течение длительного времени. Продемонстрируем возможность записи/перезаписи информации на n-канальных Si-МОП-транзисторах при стандартных условиях работы современных запоминающих устройств.

Измерения проводили при комнатной температуре на компьютеризированной установке [3]. До поляризационной обработки оксида регистрировалась зависимость тока стока I от потенциала затвора V_g при напряжении на стоке V_d=0,1 В (**рис. 1**, кривая *1*). Затем при заданном потенциале затвора V_g=20 В подавалось напряжение на сток V_d=12 В в течение 1 мин. После такой обработки регистрировалась зависимость тока стока I от напряжения затвора V_g (рис. 1, кривая *2*). Сопоставление полученных эксперименталь-

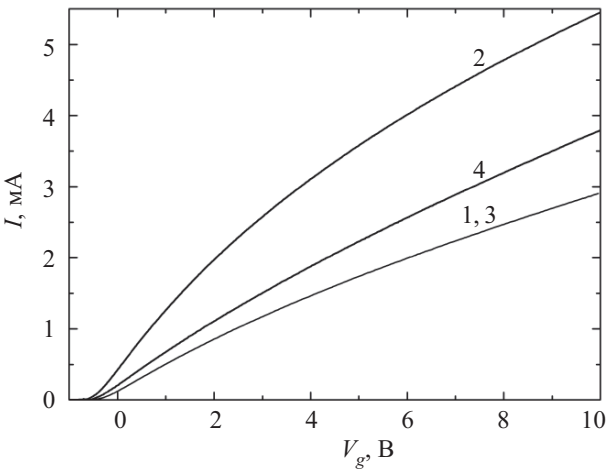

Рис. 1. Зависимость тока стока I от потенциала затвора V_g при напряжении на стоке V_d=0,1 В и температуре T=293 К: *1* — до поляризации; *2* — после поляризации оксида (запись информации); *3* — после стирания информации; *4* — промежуточное состояние

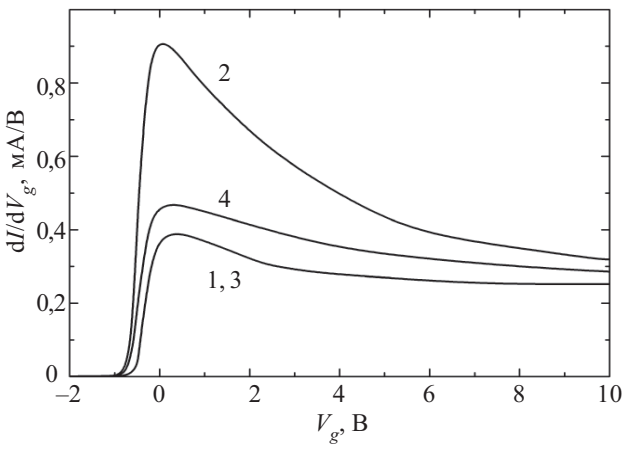

Рис. 2. Зависимость производной dI/dV_g от потенциала затвора V_g для кривых, представленных на рис. 1 (нумерация та же)

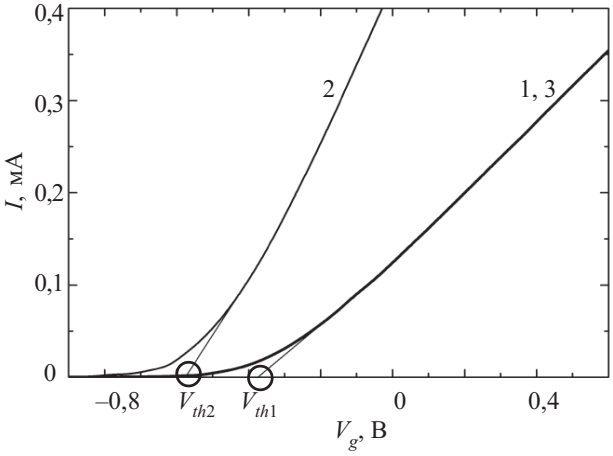

Рис. 3. Иллюстрация процедуры определения порогового напряжения транзистора V_{th} (рис. 1, кривые *1*, *2*) (V_{th1}≈ –0,3 В; V_{th2}≈ –0,5 В)

ных кривых показывает, что поляризация оксида сопровождается существенным увеличением тока стока и крутизны характеристики и приводит к небольшому сдвигу порогового напряжения транзистора.

На **рис. 2** представлены зависимости производных dI/dV_g от потенциала затвора V_g, характеризующие эффективную подвижность электронов μ* в *n*-канале («подвижность эффекта поля»). Эти кривые получены численным дифференцированием кривых *1* и *2* рис. 1 с применением процедуры сглаживания по адаптивному алгоритму Тихонова [4].

Согласно [5], эффективная подвижность электронов определяется как

$$\mu^* = \frac{1}{C_i}\frac{d\sigma_s(V_g)}{dV_g},$$

где $C_i = \varepsilon_0\varepsilon_i/h = 3{,}448\cdot10^{-8}$ Ф/см^2 — удельная «емкость оксида»;

ε_0, ε — диэлектрическая проницаемость вакуума и оксида, соответственно;

σ_s — удельная поверхностная проводимость инверсионного канала, $\sigma_s = IL/(WV_d)$.

Эффективная подвижность электронов μ* для точек максимума кривых *1* и *2* на рис. 2 — μ^*_{m1} и μ^*_{m2} составляет соответственно 1130 и 2667 см^2/(В·с) (V_d=0,1 В), т. е. после поляризации оксида максимальное значение μ* возрастает примерно в 2,3 раза. Пороговое напряжение транзистора V_{th} (кривые *2* на рис. 1 и 2) сдвигается в сторону отрицательных значений V_g на величину ΔV_{th}=0,2 В. Значение V_{th} определялось линейной экстраполяцией до пересечения с осью V_g кривых зависимости $I(V_g)$, измеренной при малых V_g [5] (**рис. 3**). Отметим, что кривая *2* на рис. 1 соответствует режиму «запись информации».

После проведенных опытов часть транзисторов с «записанной информацией» оставляли на длительное время в лабораторных условиях. Как оказалось, записанная информация может храниться годами. Другая часть приборов подвергалась исследованиям, направленным на поиск оптимального режима стирания информации. Для этого значения напряжения на затворе, стоке и время выдержки варьировали в широком диапазоне. Эксперименты проводили следующим образом: вначале на затвор и сток прикладывалось напряжение, соответствующее условиям «записи», затем на затвор скачком подавали отрицательное напряжение и поддерживали его определенное время при неизменном значении V_d. Был найден оптимальный режим, результат которого демонстрирует кривая *3* на рис. 1, совпадающая с кривой *1* (V_g=–20 В, время выдержки 1 мин).

Для сравнения рассмотрим принцип работы Flash-памяти [6]. В простейшем случае каждая ячейка хранит один бит информации и состоит из одного полевого транзистора со специальной электрически изолированной областью («плавающим» затвором), способной хранить заряд многие годы. Наличие или отсутствие заряда кодируется одним битом информации. При записи заряд перемещается на «плавающий» затвор одним из двух способов, который зависит от типа ячейки: методом инжекции «горячих» электронов или туннелированием электронов. Стирание содержимого ячейки (снятие заряда с «плавающего» затвора) связано с туннеллированием. Как правило, наличие заряда на транзисторе понимается как логический «0», а его отсутствие — как логическая «1». Поведение транзистора зависит от количества электронов на «плавающем» затворе. «Плавающий» затвор играет ту же роль, что и конденсатор в устройствах динамической памяти с произвольным доступом (DRAM), т. е. хранит запрограммированное значение. Во Flash-памяти эти два состояния различаются по величине заряда, перемещенного на «плавающий» затвор транзистора. Многие компании начали выпуск микросхем Flash-памяти, в которых одна ячейка хранит два бита. Технология хранения двух и более битов в одной ячейке получила название MLC (multilevel cell — многоуровневая ячейка). В технологии MLC используется аналоговая природа ячейки памяти. В отличие от «обычной» Flash-памяти, MLC способна различать более двух величин зарядов, перемещенных на «плавающий» затвор, и, соответственно, большее число состояний. При этом каждому состоянию в соответствие ставится определенная комбинация значений битов. Во время записи на Flash-

памяти помещается количество заряда, соответствующее необходимому состоянию. От величины заряда на «плавающем» затворе зависит пороговое напряжение транзистора, которое можно измерить при чтении и определить по нему записанное состояние, а значит и записанную последовательность битов.

Полученные результаты экспериментов с *n*-канальными Si-МОП-транзисторами полностью соответствуют схеме работы Flash-памяти. В нашем случае роль «плавающего» затвора играют положительные ионы, находящиеся у границы раздела «оксид—кремний». «Размещение» электронов на ионах (в результате чего возникают нейтральные ассоциаты [7, 8], т. е. ион+электрон+деформация решетки SiO_2), как и их уход, происходит за счет туннельных переходов носителей заряда между разрешенной зоной полупроводника и связанными с ионами локализованными состояниями. Поскольку ионная поляризация оксида сопровождается увеличением тока стока и крутизны характеристики транзистора в два и более раза (рис. 1, 2, а также [1, 2]), запись, чтение и стирание информации можно осуществлять как с помощью сдвига порогового напряжения транзистора, так и изменением тока стока и крутизны. По-видимому, предложенная «ячейка памяти» может находиться не в двух состояниях — «0» или «1», а еще и в промежуточных, т. е. вести себя аналогично многоуровневой ячейке MLC (рис. 1, кривая *4*). Таким образом, за счет варьирования значений напряжения затвора, потенциала стока и продолжительности токовой нагрузки (которая определяется размерами транзистора) можно изменять записанные состояния в ячейке памяти, что и создает основы для разработки приборов Flash-памяти нового поколения.

Из работ по исследованию эффектов электронно-ионного взаимодействия в Si-МОП-структурах [1, 2, 7, 8] следует, что по сравнению с традиционной Flash- памятью память, построенная на основе ионной поляризации транзистора, более долговечна, что повышает надежность запоминающих устройств. Запись может храниться гораздо дольше, т. к. электрону «невыгодно» покидать нейтральный ассоциат. В случае же типовой Flash-памяти электроны со временем могут уходить с «плавающего» затвора транзистора за счет туннельного перехода («просачиваться»). Вследствие миниатюризации ячеек памяти данный эффект будет происходить быстрее, а соответственно и потеря данных будет происходить раньше. Запись и стирание информации происходит в режиме туннелирования Фаулера–Нордгейма, что в итоге приводит к полевому повреждению изолирующего слоя [9]. В нашем случае поля в оксиде намного меньше и повреждения не происходит.

Анализ взаимодействия подвижных частиц в диэлектрическом слое [10] показал, что при концентрации ионов менее $5 \cdot 10^{13}$ см$^{-2}$ латерального распада системы нейтральных ассоциатов не происходит. В настоящее время имеются широкие возможности выбора диэлектрика и методов введения подвижных ионов в оксид (обработка образцов солями соответствующих элементов, ионная имплантация, нанесение требуемого элемента методом испарения в вакууме и т. п.). Из всего сказанного следует и еще одно преимущество рассматриваемого подхода к созданию устройств памяти — возможность восстановления конфигурации систем путем деполяризации и повторной ионной поляризации изолирующих слоев. Отметим и возможность повышения подвижности электронов в канале инверсии при ионной поляризации подзатворного оксида. Это явление представляет значительный интерес в отношении субмикронных полевых транзисторов, быстродействие которых в результате такой простой обработки должно возрастать.

Вводы

Таким образом, показана возможность реализации устройств долговременной перестраиваемой электронно-ионной памяти с произвольным доступом на кремниевых полевых транзисторах с изолированным затвором. Запись и стирание информации производят электротермическим способом. Простота варьирования режима записи, перезаписи, стирания за счет подбора значений напряжения на затворе, стоке и продолжительности токовой нагрузки позволяет в существенных пределах изменять базовые характеристики ячеек памяти. Полученные результаты дают основания полагать, что по сравнению с традиционной кремниевой Flash-памятью такое запоминающее устройство будет более надежно и долговечно.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ.

1. Гуляев Ю. В., Ждан А. Г., Чучева Г. В. Увеличение подвижности электронов в инверсионном канале Si-МОП-транзистора при ионной поляризации подзатворного окисла // Физика и техника полупроводников.— 2007.— Т. 41, № 3.— С. 357—360. [Gulyaev Yu. V., Zhdan A. G., Chucheva G. V. // Fizika i tekhnika poluprovodnikov. 2007. Vol. 41, N 3. P. 357]

2. Ждан А. Г., Нарышкина В. Г., Чучева Г. В. Автокоррекция характеристик полевых транзисторов в режиме спонтанной объемно-зарядовой ионной поляризации подзатворного окисла // Физика и техника полупроводников.— 2009.— Т. 43, № 5.— С.705—707. [Zhdan A. G., Naryshkina V. G., Chucheva G. V. // Fizika i tekhnika poluprovodnikov. 2009. Vol. 43, N 5. P.705]

3. Гольдман Е. И., Ждан А. Г., Чучева Г. В. Определение коэффициентов ионного переноса в диэлектрических слоях на поверхности полупроводников по динамическим вольт-амперным характеристикам деполяризации // Приборы и техника эксперимента.— 1997.— № 6.— С. 110—115. [Gol'dman E. I., Zhdan A. G., Chucheva G. V. // Pribory i tekhnika eksperimenta. 1997. N 6. P. 110]

4. Гуляев Ю. В., Ждан А. Г., Приходько В. Г. Применение метода регуляризации Тихонова к задачам спектроскопии локализованных электронных состояний в твердых телах / Препринт ИРЭ РАН. Москва.— 1984.— № 46 [Gulyaev Yu. V., Zhdan A. G., Prikhod'ko V. G. /Preprint IRE RAN. Moskva. 1984. N 46.]

5. Зи С. Физика полупроводниковых приборов.— М.: Мир, 1984. [Zi S. M.: Mir, 1984]

6. Наконечный А. Энциклопедия flash-памяти. http://www.akcent.ru/index.phtml?parent_id=9841 [Nakonechnyi A. Entsiklopediya flashpamyati]

7. Гольдман Е. И., Ждан А. Г., Чучева Г. В. Электропроводность изолирующего слоя на поверхности полупроводника, обусловленная электронно-ионным взаимодействием у межфазной границы // Физика и техника полупроводников. — 1999.— № 8.— С. 933—939. [Gol'dman E. I., Zhdan A. G., Chucheva G. V. // Fizika i tekhnika poluprovodnikov. 1999. N 8. P. 933]

8. Goldman E. I., Zhdan A. G., Chucheva G. V. Ion transport phenomena in oxide layer on the silicon surface and electron-ion exchange effects at the SiO_2/Si interface // J. Appl. Phys.— 2001.— Vol. 89, N 1.— P. 204—2Г8.

9. Komiya K., Omura Y. Spectroscopic characterization of stress-induced leakage current in sub 5-nm-thick silicon oxide film // J. Appl. Phys.— 2002.— Vol. 92, N 5.— С. 2593—2601.

10. Гольдман Е. И. Концентрация упругой неустойчивости распределения ионов и нейтральных частиц в изолирующем слое на поверхности полупроводника. // Физика и техника полупроводников.— 2006.— № 10.— С. 1209—1217. [Gol'dman E. I. // Fizika i tekhnika poluprovodnikov. 2006. N 10. P. 1209]