

ТЕМПЕРАТУРНАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ ЗАРЯДА, НАКОПЛЕННОГО В СТРУКТУРАХ $\text{Al/Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}$

Н. И. Горбачук¹, Н. А. Поклонский¹, Е. А. Ермакова¹, С. В. Шпаковский²

¹Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030 Минск, Беларусь, e-mail: Gorbachuk@bsu.by

²ОАО «Интеграл», ул. Казинца 121А, 220108, Минск, Беларусь,
e-mail: shpaks@tut.by

Изучались МДП-структуры $\text{Al/Si}_3\text{N}_4/n\text{-Si}$ и МДОП-структуры $\text{Al/Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/n\text{-Si}$. Установлено, что структуры $\text{Al/Si}_3\text{N}_4/n\text{-Si}$ могут накапливать как положительный, так и отрицательный заряд, структуры $\text{Al/Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/n\text{-Si}$ — только отрицательный. Наличие слоя оксида кремния приводит за счет дополнительного энергетического барьера к повышению температурной стабильности накопленного в Si_3N_4 заряда. В интервале температур 300–550 К величина захваченного на ловушки заряда уменьшается не более чем на 20%.

Ключевые слова: энергонезависимая память; МДП-структуры; МДОП-структуры; электрический заряд; ВФХ.

TEMPERATURE STABILITY OF THE CHARGE, ACCUMULATED IN $\text{Al/Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}$ STRUCTURES

N. I. Gorbachuk¹, N. A. Poklonsky¹, K. A. Yermakova¹, S. V. Shpakovski²

¹Belarusian State University, Nezavisimosti Ave. 4, 220030 Minsk, Belarus

²JSC "Integral", Kazinets St. 121A, 220108, Minsk, Belarus

Corresponding author: N. I. Gorbachuk (gorbachuk@bsu.by)

The MIS-structures $\text{Al/Si}_3\text{N}_4/n\text{-Si}$ and MIOS-structures $\text{Al/Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/n\text{-Si}$ were studied. It was found that $\text{Al/Si}_3\text{N}_4/n\text{-Si}$ structures can accumulate both positive and negative charge, while $\text{Al/Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/n\text{-Si}$ structures — only negative charge. The presence of silicon oxide layer leads, due to an additional energy barrier, to an increase in temperature stability of the charge accumulated in Si_3N_4 . In the temperature range of 300–550 K the value of trapped charge decreases by no more than 20 %.

Key words: nonvolatile memory; MIS-structures; MIOS-structures; electric charge; C-V.

ВВЕДЕНИЕ

Основой ячеек энергонезависимой памяти являются приборные структуры, в которых реализуется процесс накопления заряда [1, 2]. В их качестве могут выступать структуры металл/оксид кремния/полупроводник (далее МОП-структуры) с плавающим затвором (на основе поликремния, силицидов металлов и т.п.), легированные МОП-структуры, структуры с массивами квантовых точек, либо структуры с многослойным диэлектриком. Простейшим примером структур с многослойным диэлектриком являются т.н. МДОП-структуры. В качестве диэлектрика в МДОП-структурах могут выступать оксид алюминия, гафния и т.п., или нитрид кремния [2–4].

Технологии формирования слоев нитрида кремния являются базовыми в производстве интегральных микросхем и хорошо отработаны. Поэтому использование нитрида кремния для создания элементов ячеек энергонезависимой памяти не должно встречать значительных технологических затруднений. Преимуществом нитридных структур перед памятью на транзисторах с плавающим затвором является меньшее требуемое напряжение для записи бита информации, меньшая деградация диэлектрика в процессе записи, большая радиационная стойкость [4–6]. Одним из важнейших параметров является температурная стабильность заряда, хранящегося в ячейках памяти.

Цель работы – исследовать возможность накопления заряда в МДП- и МДОП-структурах с нитридом кремния и его температурную стабильность.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе изучались МДП-структуры $\text{Al/Si}_3\text{N}_4/n\text{-Si}$ и МДОП-структуры $\text{Al/Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/n\text{-Si}$.

Структуры изготавливались на пластинах монокристаллического кремния КЭФ-4,5 с кристаллографической ориентацией (100), выращенного методом Чохральского. Толщина пластин – 380 мкм. Слой нитрида кремния Si_3N_4 толщиной 70 нм формировался методом химического осаждения из газовой фазы, содержащей смесь аммиака (NH_3) и моносилана (SiH_4), при пониженном давлении. Слой диоксида кремния SiO_2 толщиной 5 нм формировался термическим окислением кремния в сухом кислороде при температуре 800 °С.

Для создания омического контакта к непланарной стороне при температуре 1000 °С предварительно проводилась диффузия фосфора из газовой фазы PCl_3 в течение 6 мин. Удельное поверхностное сопротивление кремния после диффузии фосфора составляло 4,55 Ом/□. Металлизированные контакты формировались термическим напылением алюминия с последующим вжиганием при температуре 400 °С в атмосфере азота. Толщина слоя алюминия — 0,7 мкм. Площадь алюминиевой металлизации на планарной стороне структур составляла $1,85 \times 1,85 \text{ мм}^2$. Пластины кремния механическим скрайбированием разделялись на чипы площадью $2,5 \times 2,5 \text{ мм}^2$.

Регистрация вольт-амперных характеристик (ВАХ) проводилась на источнике-измерителе Keithley 2450 в режиме источника напряжения в диапазоне напряжений смещения от 0 до 60 В. Измерения модуля импеданса и угла сдвига фаз выполнялись с помощью прецизионного LCR измерителя Agilent 4980A. Амплитуда синусоидального измерительного сигнала составляла 40 мВ. Значение электрической емкости структур C рассчитывалось по стандартной методике [7]. Обзорные вольт-фарадные характеристики (ВФХ) измерялись в интервале от –40 до +40 В с шагом 0,1 В. Все измерения выполнялись при комнатной температуре, в темноте.

Для исследования термостимулированной релаксации накопленного заряда Q инжекция электронов осуществлялась подачей постоянного напряжения смещения $U = 40 \text{ В}$ в течение 10 минут. Кинетика релаксации заряда изучалась в изохронных условиях. Структуры выдерживались при определенной температуре T на воздухе в течение $\tau = 15$ минут. Температура варьировалась в интервале 175–400 °С. Время установления требуемой T составляло 3–7 минут. Релаксация заряда Q изучалась по изменению напряжения плоских зон, рассчитанному по стандартной методике из вольт-фарадных характеристик [8]. ВФХ регистрировались при комнатной темпера-

туре на частоте переменного тока $f = 1$ МГц в интервале U , обеспечивающем минимальную перезарядку центров захвата в диэлектрике в процессе измерения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Функционирование ячеек энергонезависимой памяти основано на изменении порогового напряжения МДП-транзистора под действием накопленного заряда. Зафиксировать накопление заряда в структурах с плавающим затвором, МОП- или МДОП-структурах можно по изменению напряжения плоских зон U_{fb} , что проявляется в «параллельном относительно оси напряжений» сдвиге вольтфарадных характеристик.

Регистрация ВФХ в диапазонах от -5 до $+5$ В и от $+5$ до -5 В не приводит к изменению напряжения плоских зон U_{fb} . Для исходных структур $Al/Si_3N_4/n-Si$ напряжение плоских зон составило $U_{fb} = -2,3$ В. На рисунке 1 представлены ВФХ структур $Al/Si_3N_4/n-Si$, зарегистрированные в диапазоне ± 40 В. Видно, что смена полярностей сканирования напряжения U при регистрации ВФХ, т.е. смена сканирования от отрицательных U (« \leftarrow ») к положительным (« \rightarrow ») на сканирование от « \rightarrow » к « \leftarrow », приводит к вышеупомянутому «сдвигу» ВФХ. Наблюдается то, что можно определить как гистерезис ВФХ вдоль оси напряжений U . Сдвиг ВФХ 1 в сторону отрицательных напряжений ($U_{fb} = -9,5$ В < 0) свидетельствует о накоплении положительного заряда, сдвиг ВФХ 2 в сторону положительных напряжений ($U_{fb} = 13,5$ В > 0) — отрицательного.

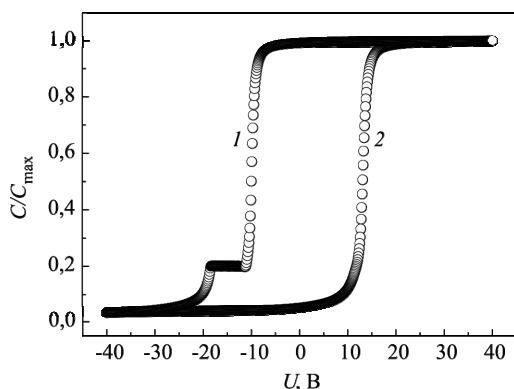


Рисунок 1. ВФХ структур $Al/Si_3N_4/n-Si$. Зависимость 1 получена при регистрации ВФХ в диапазоне от -40 В до $+40$ В; 2 — при регистрации в диапазоне от $+40$ В до -40 В

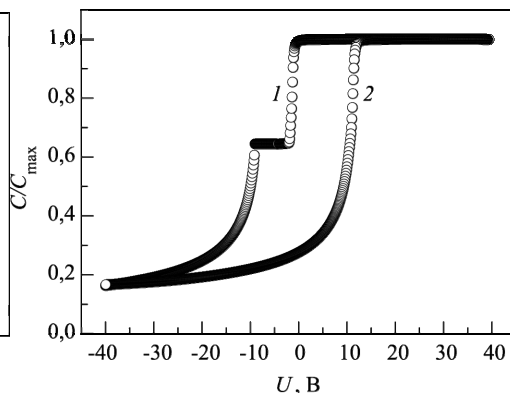


Рисунок 2. ВФХ структур $Al/Si_3N_4/SiO_2/n-Si$. Зависимость 1 получена при регистрации ВФХ исходной структуры в диапазоне от -40 В до $+40$ В; 2 — при регистрации в диапазоне от $+40$ В до -40 В

Отметим, что при многократном последовательном повторении циклов регистрации от « \leftarrow » к « \rightarrow » и наоборот наблюдается качественная воспроизводимость результатов. Таким образом, можно заключить, что структуры $Al/Si_3N_4/n-Si$ могут накапливать как положительный, так и отрицательный заряд. Однако эксперименты по определению времени удержания как положительного, так и отрицательного заряда в структурах $Al/Si_3N_4/n-Si$ показали неудовлетворительные результаты. Время, в течение которого накопленный заряд уменьшался в два раза, не превышало нескольких часов.

С точки зрения хранения накопленного в Si_3N_4 заряда структуры $\text{Al}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/n\text{-Si}$ представляются предпочтительными. Наличие слоя оксида кремния создает дополнительный энергетический барьер и способствует удержанию заряда. На рисунке 2 представлены ВФХ структур $\text{Al}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/n\text{-Si}$. Видно, что в отличие от структур $\text{Al}/\text{Si}_3\text{N}_4/n\text{-Si}$ происходит накопление только отрицательного заряда ($U_{\text{fb}} = 12 \text{ В} > 0$). Вторым существенным отличием является то, что при многократных повторных регистрациях ВФХ «-» к «+» и наоборот воспроизводится кривая 2, т.е. величина накопленного заряда сохраняется. Для исходных структур $\text{Al}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/n\text{-Si}$ $U_{\text{fb}} = -1,1 \text{ В}$.

Для определения условий инжекции отрицательного заряда в структуры $\text{Al}/\text{Si}_3\text{N}_4/n\text{-Si}$ и $\text{Al}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/n\text{-Si}$ регистрировались ВАХ. Полученные зависимости представлены на рисунке 3 в координатах Пула-Френкеля ($\lg I - U^{1/2}$).

Как следует из представленных данных, начиная со значений напряжения $U_p = 36 \text{ В}$, что соответствует напряженности электрического поля $E_p = 5,1 \text{ МВ/см}$, ВАХ структур $\text{Al}/\text{Si}_3\text{N}_4/n\text{-Si}$ испытывает резкий рост. Согласно [8], это может быть связано с непосредственным участием ловушек Si_3N_4 в переносе заряда. Для структур $\text{Al}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/n\text{-Si}$ «граничное» напряжение больше — оно составляет 43 В , соответственно $E_p = 6,1 \text{ МВ/см}$. При меньших напряжениях смещения, согласно [8, 9], перенос заряда подчиняется закону Ома. Вид ВАХ при малых значениях разности потенциалов ($U < U_p$) вероятно определяется сочетанием омических токов и токов эмиссии Шоттки, развивающихся вдоль периметра металлического контакта.

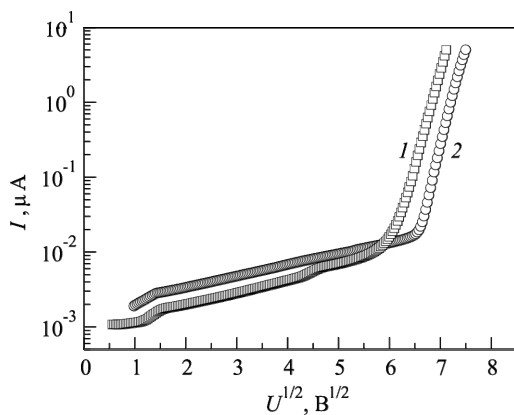


Рисунок 3. ВАХ структур:
1 — $\text{Al}/\text{Si}_3\text{N}_4/n\text{-Si}$;
2 — $\text{Al}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/n\text{-Si}$

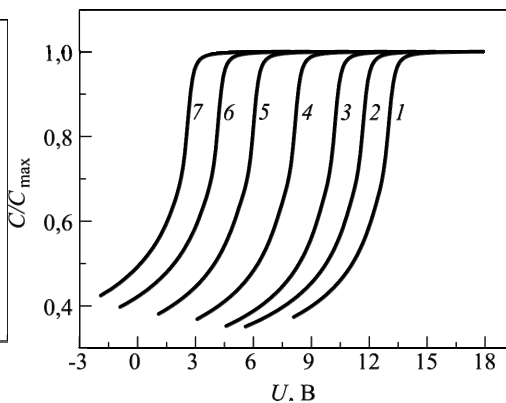


Рисунок 4. ВФХ структур $\text{Al}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/n\text{-Si}$, зарегистрированные: после инжекции (1) и после выдержки при температурах $T = 270 \text{ }^\circ\text{C}$ (2); $315 \text{ }^\circ\text{C}$ (3); $350 \text{ }^\circ\text{C}$ (4); $375 \text{ }^\circ\text{C}$ (5); $395 \text{ }^\circ\text{C}$ (6); $400 \text{ }^\circ\text{C}$ (7)

На рисунке 4 представлена серия ВФХ структур $\text{Al}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/n\text{-Si}$. Прослеживается закономерный сдвиг ВФХ: напряжение плоских зон U_{fb} снижается от $U_{fb} = 13,2$ В (для структур сразу после инжекции) до $U_{fb} = 2,8$ В (для структур после выдержки при $T = 400$ °С). Это свидетельствует об уменьшении заряда, накопленного в диэлектрике. Зависимость относительного уменьшения заряда Q/Q_0 от температуры термообработки представлена на рисунке 5. Видно, что быстрое уменьшение заряда начинается при температурах $T \geq 550$ К. Это превышает верхний предел рабочих температур интегральных микросхем на кремнии и приближается к значениям температур, при которых начинается деградация полимеров. Таким образом, энергонезависимая память, разработанная на основе структур $\text{Al}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/n\text{-Si}$ будет способна хранить информацию в достаточно экстремальных условиях.

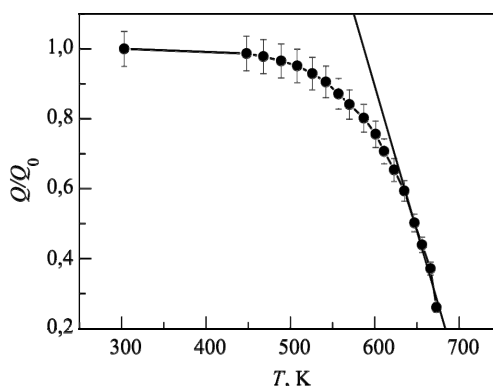


Рисунок 5. Зависимость относительного уменьшения заряда Q/Q_0 от температуры термообработки

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что структуры $\text{Al}/\text{Si}_3\text{N}_4/n\text{-Si}$ могут накапливать как положительный, так и отрицательный заряд, структуры $\text{Al}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/n\text{-Si}$ — только отрицательный. Показано, что наличие слоя оксида кремния приводит за счет дополнительного энергетического барьера к повышению температурной стабильности накопленного в Si_3N_4 заряда. Установлено, что в интервале температур 300–550 К величина заряда уменьшается не более чем на 20 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Brewer, J. E. Nonvolatile memory technologies with emphasis on flash / Ed. by J. E. Brewer, M. Gill. – Hoboken: Wiley, 2208. – 779 p.
2. Sharma, A.K. Semiconductor Memories: Technology, Testing, and Reliability / A.K. Sharma. – Hoboken: Wiley, 1997. – 473 p.
3. SONOS Memories: Advances in Materials and Devices / K. Ramkumar [et al.] // MRS Advances. – 2017. – Vol. 2, №4. – P. 209–221.
4. Gentil, P. Multilayer dielectrics for memory applications / P. Gentil // Instabilities in Silicon Devices / Ed. by B. Gerard, V. Andre. – The Netherlands: North Holland, 1999. – Ch. 5, Vol. 3. – P. 341–404.
5. A low voltage SONOS nonvolatile semiconductor memory technology / M.H. White [et al.] // Proceedings of Nonvolatile Memory Technology Conference, Albuquerque, June 24–26, 1996 / IEEE, 1996. – P. 52.
6. Memory characteristics of MNOS capacitors fabricated with PECVD silicon nitride / M.A. Khaliq [et al.] // Solid-State Electronics. – 1988. – Vol. 31, №8. – P. 1229–1233.
7. Impedance spectroscopy: Theory experiment and applications / Ed. by E. Barsoukov, J. R. Macdonald. – New York: Wiley, 2005. – 595 p.
8. Физика полупроводниковых приборов: в 2-х кн. / под ред. С. Зи. – М.: Мир, 1984. – Кн. 1. – 456 с.; Кн. 2. – 460 с.
9. Current Transport and Maximum Dielectric Strength of Silicon Nitride Films / S.M. Sze // J. Appl. Phys. – 1967. – Vol. 38. – P. 2951.