

## Устойчивые к полевым повреждениям структуры кремний-сверхтонкий окисел (42 нм) — поликремний

© Д.А. Белорусов, Е.И. Гольдман, В.Г. Нарышкина, Г.В. Чучева<sup>†</sup>

Фрязинский филиал института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова  
Российской академии наук,  
141190 Фрязино, Россия

<sup>†</sup> E-mail: gvc@ms.ire.rssi.ru

Поступила в Редакцию 24 августа 2020 г.

В окончательной редакции 2 сентября 2020 г.

Принята к публикации 2 сентября 2020 г.

Приведены результаты исследований структур кремний–сверхтонкий окисел (42 Å)–поликремний, устойчивых к полевым повреждениям. Выяснилось, что происходящая с изменением полевого напряжения суммарная перезарядка сконцентрированных у границы раздела подложка–изолятор локализованных электронных состояний и неосновных носителей заряда близка к аналогичной характеристике структур с толщиной окисла 37 Å. Ток через SiO<sub>2</sub> в состоянии обогащения полупроводника увеличивается с напряжением гораздо сильнее, чем в состоянии обеднения. Причем асимметрия вольт-амперных характеристик по отношению к полярности падающего на изоляторе напряжения у образцов с толщиной SiO<sub>2</sub> 42 Å более резко выражена, чем у структур с окислом 37 Å. Объяснение такой асимметрии возможно, если потенциальный рельеф в изоляторе имеет максимум, существенно смещенный к границе раздела окисел — поликремний, а потенциал на ветви со стороны полупроводника значительно спадает к контакту с подложкой.

**Ключевые слова:** структуры металл–диэлектрик–полупроводник, сверхтонкий окисел, полевое повреждение, высокочастотные вольт-фарадные характеристики, вольт-амперные характеристики.

DOI: 10.21883/FTP.2021.01.50379.9511

### 1. Введение

Сверхтонкие (< 5 нм) пленки окисла кремния — это основной тип изолирующих слоев современных и будущих устройств наномасштабного диапазона. Из-за малой толщины электрические поля, возникающие в таких слоях при управляющих воздействиях на активные элементы современных полупроводниковых устройств, достигают нескольких единиц 10<sup>6</sup> В/см. При этих значениях полей в SiO<sub>2</sub> возникают значительные токи утечки и проявляются явления, ответственные за изменение свойств изолирующего промежутка — как обратимых, так называемое „повреждение окисла“, так и необратимых, мягкий пробой (soft breakdown). Подчеркнем, что, несмотря на допробойные значения указанных электрических полей, с ростом продолжительности воздействия вероятность перехода образца в необратимое состояние мягкого пробоя все равно возникает [1,2]. В нашей группе уже более десяти лет проводятся исследования изменений свойств сверхтонких окислов кремния после повреждения Si-МОП-структур в электрических полях [3–5]. Выяснилось [6], что имеется группа образцов с толщиной окисла  $h = 37 \text{ \AA}$ , у которых реакция на полевое воздействие типа повреждение практически отсутствует, т.е. с увеличением продолжительности выдержки при полевых напряжениях разной полярности вплоть до перехода в состояние мягкого пробоя у объектов практически не изменяются ни проводимость через окисел, ни распределение встроенного заряда. Естествен вопрос: насколько распространенным у сверхтонких окислов кремния явля-

ется свойство „неповреждаемости“ при стрессах в электрических полях. Для его разрешения авторы обратились к объектам с другой толщиной окисла —  $h = 42 \text{ \AA}$ , но приготовленным по той же технологической схеме, как и в [6]. В качестве образцов использовались Si-МОП-структуры с полевым электродом Al-*n*<sup>+</sup>-Si:P (концентрация доноров в поликремнии  $N_d^+ \approx 10^{20} \text{ см}^{-3}$ , площадь полевого электрода  $S = 1.6 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$ ), изолированным от (100) *n*-Si-подложки слоем полученного при высокотемпературном окислении SiO<sub>2</sub> с оптической толщиной  $\sim 4.2 \text{ нм}$ .

### 2. Эксперимент и результаты

Структуры подвергались полевому стрессу при комнатной температуре при таких же полевых напряжениях  $V_g$ , как и при исследованиях повреждения сверхтонкого SiO<sub>2</sub> [3,5]<sup>1</sup>:  $V_g = -3.8 \text{ В}$  (обеднение подложки), минимальное время выдержки 16 мин и  $V_g = 3.2 \text{ В}$  (обогащение подложки), минимальное время выдержки 20 мин. До и после стресса на автоматизированной установке проводились измерения вольт-амперной (ВАХ) и высокочастотных вольт-фарадных характеристик (ВФХ) объектов на частотах 1(C<sub>1</sub>) и 0.5(C<sub>2</sub>) МГц с использованием прецизионного измерителя LCR Agilent E4980A [4]. Результаты проведенных исследований приведены в данной работе.

<sup>1</sup> Уменьшение значения поля в окисле по сравнению с опытами [6] было не более чем на 13%, что не существенно для целей исследования.

Оказалось, что выбранные нами образцы, так же как и структуры с более тонким окислом [6], устойчивы к полевым воздействиям. Измеренные сразу же после стресса ВАХ и ВФХ были практически неотличимы от соответствующих характеристик, зафиксированных до выдержки объектов в электрическом поле: расхождения составляли не более 2% в отличие от структур [5], где после снятия повреждающего напряжения наблюдалось уменьшение емкостей в разы. В работе [6] у не повреждающихся структур была обнаружена существенная асимметрия ВАХ: при близких по модулю напряжениях токи в области сильного обеднения полупроводника были на порядки меньше, чем при обогащении кремния. Чтобы понять, присуще ли данное свойство объектам с толщиной окисла 42 Å, были проведены измерения ВАХ и ВФХ по аналогии с [6] в специальном режиме, когда значения высокочастотных емкостей и тока отвечают одному и тому же состоянию образца. Повторим суть схемы опыта. Для каждой точки измерений из положения полевого напряжения  $V_g = 0$  на образец подавалось заданное  $V_g$ ; после окончания RC процессов ( $< 0.3$  с) фиксировался ток через окисел  $I$ , затем в течение 3 с через емкости  $C_1$  и  $C_2$ . После этого поданное напряжение сбрасывалось до нуля, и структура выдерживалась 6 с. Общая продолжительность измерений тока и емкостей при одном и том же значении напряжения на полевым электроде (6 с) существенно меньше, чем характерное время переходного процесса, связанного с перезарядкой локализованных электронных состояний на границе раздела (ГР) Si–SiO<sub>2</sub>, ( $> 100$  с). Такая процедура позволяет при измерениях минимизировать длительность пребывания образца в стрессовых условиях. Данные ВФХ, соответствующие двум высоким частотам, дают возможность определять концентрацию доноров у ГР Si–SiO<sub>2</sub>  $N_d$ , сопротивление полупроводниковой подложки  $R_b$  и зависимости от полевого напряжения следующих величин: изгиба зон в полупроводнике  $V_s$ , падения внешнего напряжения на изолирующем слое  $V_i$  и выраженной в см<sup>-2</sup> суммарной плотности встроенного заряда, заряда пограничных состояний и дырок на ГР  $p_{sq}$  [4,5,7].

На рис. 1 представлены зависимости емкостей образца от напряжения, измеренные при комнатной температуре в состоянии до полевого стресса. Расчеты на основе данных ВФХ по методике, описанной в [5,7], привели к значениям:  $N_d = 1.65 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup> и  $R_b = 73$  Ом. Эти величины почти такие же, как и полученные в [6]:  $N_d = 1.65 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup> и  $R_b = 88$  Ом. График  $p_{sq}(V_g)$  показан на рис. 2; состоянию плоских зон отвечает напряжение  $V_g = -0.19$  В. Видно, что кривые, демонстрирующие перезарядку ГР Si–SiO<sub>2</sub>, в объектах с толщиной окисла 4.2 нм (данная работа) и 3.7 нм [6] близки друг к другу: при изменении  $V_g$  от  $-0.5$  до  $-6$  В увеличение  $p_{sq}$  составило  $\Delta p_{sq} = 1.0 \cdot 10^{13}$  см<sup>-2</sup> при  $h = 42$  Å и  $\Delta p_{sq} = 1.4 \cdot 10^{13}$  см<sup>-2</sup> при  $h = 37$  Å. Значения  $\Delta p_{sq}$  на порядок выше, чем в повреждающихся структурах [5,8]. Так же, как и [6] в области обеднения полупроводника,

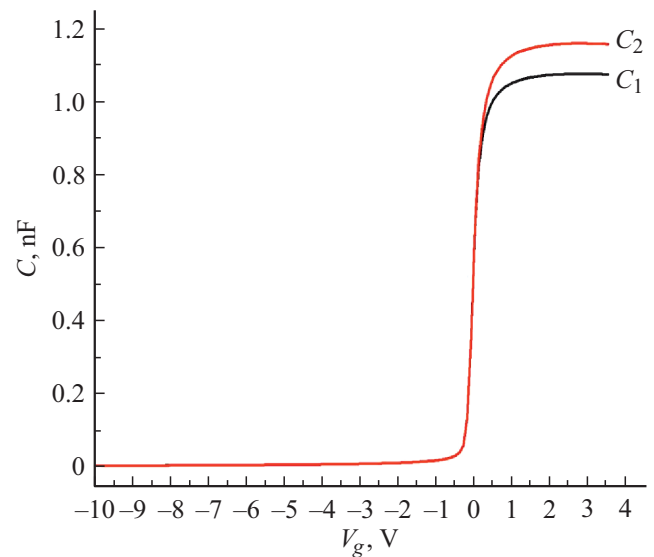


Рис. 1. Высокочастотные вольт-емкостные зависимости образцов, измеренные при комнатной температуре. Емкости:  $C_1$  — при 1 МГц,  $C_2$  — при 0.5 МГц.

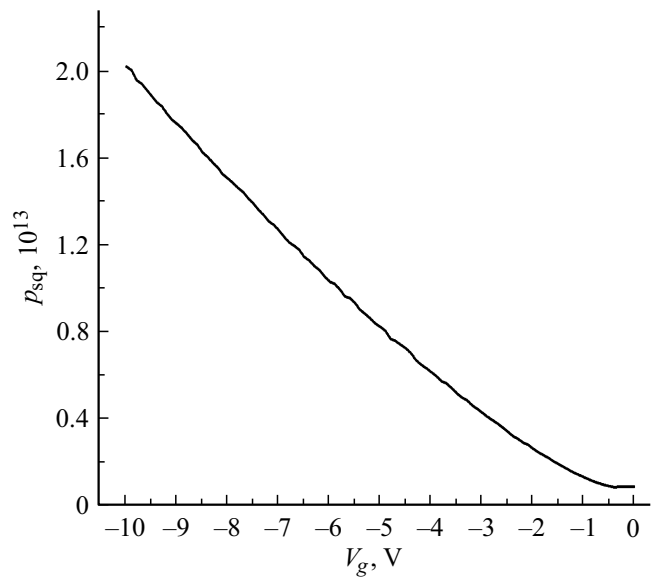
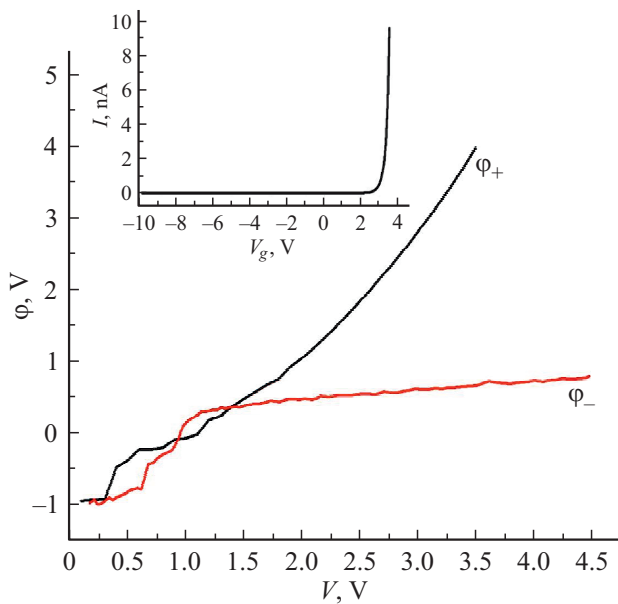


Рис. 2. Зависимость от полевого напряжения суммарной плотности встроенного заряда, заряда пограничных состояний и дырок на границе раздела Si–SiO<sub>2</sub>.

оказалось, что  $V_i \propto V_g/2$  означает, что измерения проводились в нестационарном, неравновесном по отношению к неосновным носителям заряда (генерация дырок запаздывает) состоянии образца.

На рис. 3 показаны зависимости тока через окисел от падения напряжения на изолирующем слое при положительной (инжекция электронов из полупроводника) и отрицательной (инжекция электронов из полевого электрода) полярностях  $V_g$ . Для наглядности ВАХ приведены в линейном и в логарифмическом масштабах. Здесь  $V = V_g$  при  $V_g > 0$  и  $V = -V_i$  при  $V_g < 0$ ; гра-



**Рис. 3.** Вольт-амперные характеристики изолирующего промежутка Si-MOП-структур, измеренные при комнатной температуре.  $\varphi(V)$  — функция логарифма тока от напряжения на окисле. На вставке — зависимость тока от полевого напряжения в реальном масштабе.

фики ветвей тока в логарифмическом масштабе строились по правилу:  $\varphi_+(V) = \lg[I(V_g)/I_n]$  — при  $V_g > 0$ ,  $\varphi_-(V) = \lg[|I(V_i)/I_n|]$  при  $V_g < 0$ , где  $I_n = 10^{-12}$  А — нормировочное значение тока. Отметим, что токи перезарядки  $qS(dp_s/dt)$  ( $q$  — элементарный заряд,  $t$  — время) на 1.5–2 порядка меньше  $I$ . Это следует из результатов измерений переходных характеристик тока и емкостей при нескольких напряжениях  $V_g$ . Из рис. 3 видно, что асимметрия ВАХ по отношению к полярности падающего на изоляторе напряжения у образцов с толщиной  $\text{SiO}_2$  42 Å более резко выражена, чем у структур с окислом 37 Å. У объектов из настоящей работы ток в состоянии обогащения полупроводника в интервале напряжений (0–3.5) В увеличивается на 5 порядков, а в состоянии обеднения всего на один. У образцов из работы [6] это соотношение было 5/3.

### 3. Заключение

Таким образом, можно констатировать, что, по крайней мере, для части сверхтонких слоев  $\text{SiO}_2$ , полученных при высокотемпературном окислении кремния, типично свойство устойчивости к полевым повреждающим воздействиям. Выявление природы данного обстоятельства возможно только при постановке ряда специальных совместных технологических и физических исследований и не является целью данной работы. Обсудим особенности изолирующих слоев, лежащие в основе другого свойства подобных объектов — асимметричности ВАХ по отношению к полярности внешнего напряжения. Для

сверхтонких пленок окиси кремния важным обстоятельством является не прямоугольная форма потенциального барьера, создаваемого изолирующим промежутком. Поскольку переходные слои между кристаллическим Si и  $\text{SiO}_2$ , а также между окислом и полевым электродом из поли-Si занимают не менее 40% объема сверхтонкого диэлектрика [9], то они фактически во многом определяют свойства изолятора. Переходы от подложки к окислу и от окисла к поликремнию образуются в неодинаковых технологических процессах, имеют разную кристаллическую структуру. Поэтому естественно ожидать и разных (несимметричных) по форме координатных зависимостей потенциального изолирующего профиля на этих контактах. Для объяснения асимметричного вида ВАХ следует считать, что потенциальный рельеф в изоляторе имеет максимум, существенно смещенный к ГР окисел — поликремний; потенциал на ветви со стороны полупроводника значительно спадает к контакту с подложкой. При такой форме барьер „съедается“ электрическим полем в  $\text{SiO}_2$  гораздо быстрее в случае инжекции электронов из полупроводника, чем из полевого электрода. Точный ответ на вопрос о форме потенциала в сверхтонком изолирующем промежутке должно дать построение реального рельефа, разделяющего подложку и полевого электрод, на основе методики, развитой в [10].

### Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания и частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проекты РФФИ № 18-29-11029-мк, № 19-07-00271-а и № 19-29-03042-мк).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] J.S. Suehle. In: *Defects in Microelectronic Materials and Devices*, ed. by D.M. Fleetwood, S.T. Pantelides, R.D. Schrimpf (Boca Raton, CRC Press, 2008) chap. 15, p. 437.
- [2] J. Suñé, Ern. Y. Wu. In: *Defects in Microelectronic Materials and Devices*, ed. by D.M. Fleetwood, S.T. Pantelides, R.D. Schrimpf (Boca Raton, CRC Press, 2008) chap. 16, p. 465.
- [3] Е.И. Гольдман, Н.Ф. Кухарская, В.Г. Нарышкина, Г.В. Чучева. *ФТП*, **45** (7), 974 (2011).
- [4] Е.И. Гольдман, А.И. Левашова, С.А. Левашов, Г.В. Чучева. *ФТП*, **49** (4), 483 (2015).
- [5] Е.И. Гольдман, С.А. Левашов, В.Г. Нарышкина, Г.В. Чучева. *ФТП*, **51** (9), 1185 (2017).
- [6] Е.И. Гольдман, С.А. Левашов, Г.В. Чучева. *ФТП*, **53** (4), 481 (2019).
- [7] Е.И. Гольдман, Н.Ф. Кухарская, С.А. Левашов, Г.В. Чучева. *ФТП*, **53** (1), 46 (2019).

- [8] Е.И. Гольдман, Ю.В. Гуляев, Г.В. Чучева. Радиотехника, **8**, 58 (2015).
- [9] А.П. Барабан, В.В. Булавинов, П.П. Коноров. *Электроника слоев на кремнии* (Л., Изд-во ЛГУ, 1988).
- [10] Е.И. Гольдман, А.Г. Ждан, Н.Ф. Кухарская, М.В. Черняев. ФТП, **42**(1), 94 (2008).

Редактор Г.А. Оганесян

### **Silicon—ultrathin oxide (4.2 nm)—polysilicon structures resistant to field damage**

*D.A. Belorusov, E.I. Goldman, V.G. Naryshkina,  
G.V. Chucheva*

Fryazino Branch of the Kotelnikov Institute  
of Radioengineering and Electronics  
of Russian Academy of Sciences,  
141190 Fryazino, Russia

**Abstract** Results of studies of silicon—silicon-ultrathin oxide (42 Å)—polysilicon structures structures stable resistant to field damage are presented. It was found that the total recharging of localized electronic states and minority charge carriers, concentrated at the substrate-insulator interface, which occurs with a change in the field voltage and is close to the same characteristic of structures with an oxide thickness of 37 Å. The current, flowing through SiO<sub>2</sub>, in the enrichment state of the semiconductor increases with increasing voltage much more strongly than in the state of depletion. Moreover, the asymmetry of current-voltage characteristics in relation to the polarity of the voltage, falling on the insulator in samples with a thickness of 42 Å SiO<sub>2</sub> is more pronounced than in structures with an oxide of 37 Å. An explanation for this asymmetry is possible, if the potential relief in the insulator has a maximum, significantly shifted to the oxide—polysilicon interface, and the potential on the branch from the semiconductor side significantly decreases to the contact with the substrate.