

## Влияние $\gamma$ -облучения на характеристики границы раздела кремний–свинцово-боросиликатное стекло

© П.Б. Парчинский<sup>¶</sup>, С.И. Власов, А.А. Насиров

Национальный университет Узбекистана,  
700174 Ташкент, Узбекистан

(Получена 16 февраля 2004 г. Принята к печати 13 апреля 2004 г.)

Исследовано влияние  $\gamma$ -облучения на величину плотности поверхностных состояний на границе раздела кремний–свинцово-боросиликатное стекло. Установлено, что при дозах облучения, больших чем  $10^6$  рад, наблюдается возникновение локального максимума поверхностных состояний при энергии  $E = E_c - (0.32 \pm 0.04)$  эВ. Показано, что граница раздела Si–свинцово-боросиликатное стекло характеризуется меньшей чувствительностью к воздействию  $\gamma$ -облучения по сравнению с границей раздела Si–SiO<sub>2</sub>, полученной термическим окислением поверхности кремния.

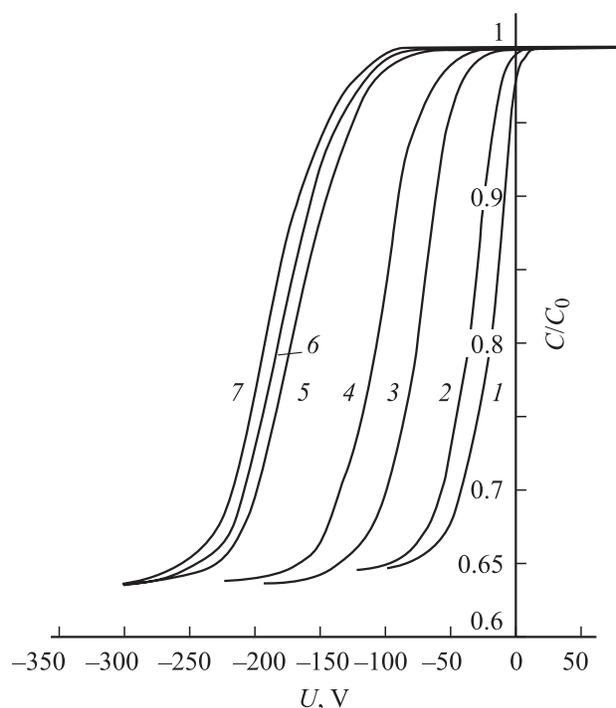
Легкоплавкие свинцово-боросиликатные (СБС) стекла широко применяются в полупроводниковом приборостроении для пассивации поверхностей полупроводниковых приборов и структур и их герметизации [1,2]. Известно, что изменение характеристик полупроводниковых приборов под влиянием радиации во многом определяется процессами накопления радиационно-индуцированного заряда в объеме изолирующих слоев и на границе раздела полупроводник–диэлектрик [3,4]. Однако процессы образования радиационно-индуцированного заряда в диэлектрических покрытиях на основе СБС стекол остаются до настоящего времени практически не исследованными. Это обуславливает интерес к изучению влияния облучения на характеристики пассивирующих и изолирующих слоев на основе СБС стекол, а также на характеристики границы раздела полупроводник–СБС стекло. Ранее нами было установлено, что облучение  $\gamma$ -квантами ведет к увеличению плотности эффективного поверхностного заряда на границе раздела кремний–СБС стекло, причем данный эффект обусловлен как накоплением радиационно-индуцированного заряда в объеме стекла, так и увеличением концентрации поверхностных состояний  $N_{ss}$  на границе раздела Si–стекло [5,6]. Цель данной работы — определение дозовой зависимости величины  $N_{ss}$  и исследование влияния  $\gamma$ -облучения на особенности спектра энергетического распределения поверхностных состояний по ширине запрещенной зоны кремния  $dN_{ss}/dE$ .

Исследуемые образцы изготавливались путем нанесения СБС стекла на подложку кремния *n*-типа, полученного методом бестигельной зонной плавки, с кристаллографической ориентацией (111). Состав стекла, его электрофизические характеристики и способ его нанесения на кремниевую подложку аналогичны описанным в [7]. Температура формирования границы раздела Si–стекло составляла 700°C. Для определения величин  $N_{ss}$  и  $dN_{ss}/dE$  использовался метод высокочастотных вольт-фарадных (*C–V*) характеристик [8]. Для его реализации путем вакуумного напыления управляющего электрода из алюминия на поверхность стекла

были изготовлены тестовые структуры типа металл–диэлектрик–полупроводник (МДП структуры). Площадь управляющего электрода полученных структур составляла 0.01 см<sup>2</sup>. Толщина слоя диэлектрика, определенная по емкости МДП структур в режиме обогащения, равнялась  $(2 \pm 0.1) \cdot 10^{-4}$  см.

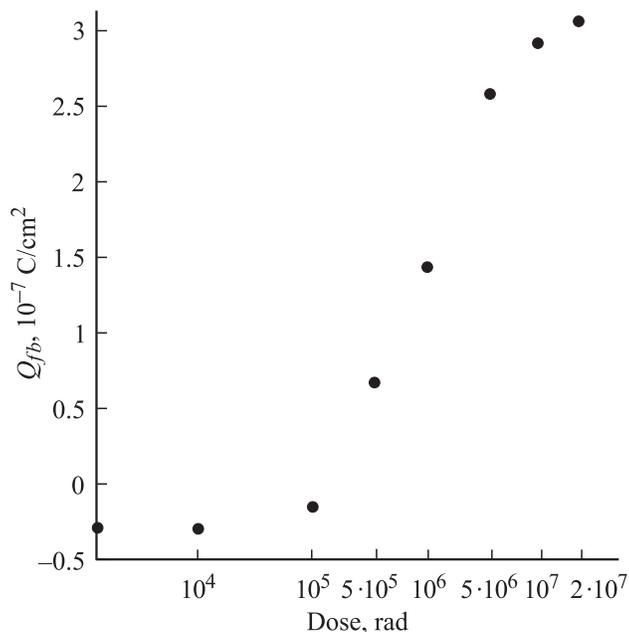
Облучение исследованных МДП структур  $\gamma$ -квантами проводилось от источника <sup>60</sup>Co, без смещения на полевом электроде. Доза облучения последовательно увеличивалась от  $10^4$  до  $2 \cdot 10^7$  рад.

На рис. 1 представлены типичные *C–V*-зависимости, полученные для одной из исследованных МДП структур



**Рис. 1.** Вольт-фарадные характеристики исследуемых структур: 1 — до  $\gamma$ -облучения, 2 — после облучения дозой  $10^5$  рад, 3 — после облучения дозой  $5 \cdot 10^5$  рад, 4 — после облучения дозой  $10^6$  рад, 5 — после облучения дозой  $5 \cdot 10^6$  рад, 6 — после облучения дозой  $10^7$  рад, 7 — после облучения дозой  $2 \cdot 10^7$  рад.

<sup>¶</sup> E-mail: pavelphys@mail.ru



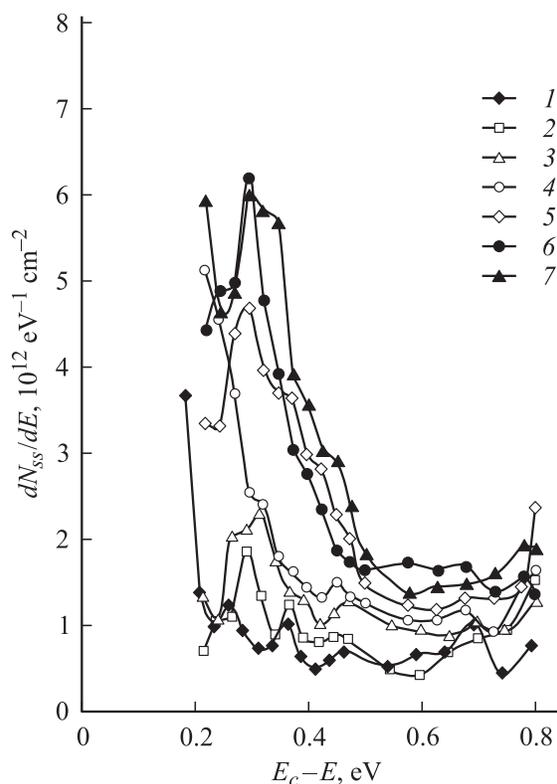
**Рис. 2.** Зависимость эффективного поверхностного заряда  $Q_{fb}$  (измеренного при напряжении плоских зон от дозы  $\gamma$ -облучения).

до и после облучения. Емкость структуры нормирована к емкости диэлектрика  $C_0 = 35$  пФ. Как видно из представленных зависимостей,  $\gamma$ -облучение ведет к сдвигу  $C$ - $V$ -кривых в сторону отрицательных напряжений, что свидетельствует о возникновении в стекле положительного радиационно-индуцированного заряда  $Q_i$ . Одновременно наблюдается изменение наклона  $C$ - $V$ -зависимостей, что, согласно [8], является следствием увеличения плотности значения  $N_{ss}$  на границе раздела Si-СБС стекло. В то же время отметим, что доза облучения  $10^4$  рад не ведет к сколь-нибудь заметному изменению вида  $C$ - $V$ -характеристик исследованных МДП структур и, следовательно, к изменению значений  $N_{ss}$ . Некоторое уменьшение значений минимальной емкости в облученных МДП структурах, наблюдаемое при дозах облучения  $5 \cdot 10^6$  рад и выше, может быть следствием частичной компенсации полупроводниковой подложки в процессе радиационного дефектообразования [4]. Так, значение эффективной концентрации носителей заряда, определенное согласно [9], составляло  $n_0 = (1 \pm 0.05) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  в исходных МДП структурах и  $n_0 = (1.2 \pm 0.05) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  в МДП структурах, облученных дозой  $10^7$  рад.

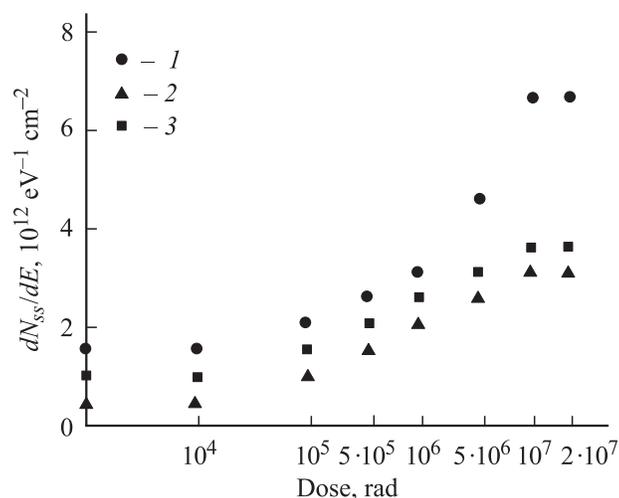
На рис. 2 приведена зависимость величины эффективного поверхностного заряда, измеренного при напряжении плоских зон,  $Q_{fb}$  от дозы  $\gamma$ -облучения. Отметим, что в диэлектриках необлученных МДП структур наблюдался отрицательный заряд величиной  $Q_{fb} = (3.5-4.5) \cdot 10^{-8} \text{ Кл/см}^2$ , природа которого рассмотрена в [10]. Из представленных зависимостей видно, что наибольшая скорость изменения  $Q_{fb}$  наблюдается при дозах облучения  $5 \cdot 10^5-5 \cdot 10^6$  рад. При дозах облу-

чения свыше  $5 \cdot 10^6$  рад изменение величины  $Q_{fb}$  значительно уменьшается, что свидетельствует о насыщении радиационно-индуцированного заряда.

На рис. 3 приведены типичные спектры плотности поверхностных состояний на границе раздела кремний-СБС стекло в исследуемых структурах, полученные до и после облучения. Значения  $dN_{ss}/dE$  определялись путем сравнения экспериментальных  $C$ - $V$ -зависимостей с теоретическими, рассчитанными согласно [11]. Обращает на себя внимание то, что увеличение значений  $dN_{ss}/dE$  в облученных структурах происходит неравномерно, в верхней половине запрещенной зоны Si величина плотности поверхностных состояний изменяется значительно сильнее, чем в нижней. Кроме того, в верхней половине запрещенной зоны наблюдается локальный пик значений  $dN_{ss}/dE$  при энергиях  $E = E_c - (0.32 \pm 0.04)$  эВ. На рис. 4 приведена зависимость величины  $dN_{ss}/dE$  от дозы облучения в середине запрещенной зоны ( $E = E_c - 0.56$  эВ) и в области локального максимума, а также в нижней половине запрещенной зоны при энергиях  $E = E_c - 0.7$  эВ. Из представленных зависимостей видно, что вплоть до дозы облучения  $10^6$  рад скорость изменений значений  $dN_{ss}/dE$  для всех рассмотренных значений энергии практически одинакова. При дозах облучения  $10^6-5 \cdot 10^6$  рад наблюдает-



**Рис. 3.** Спектры плотности поверхностных состояний исследуемых структур: 1 — до  $\gamma$ -облучения, 2 — после облучения дозой  $10^5$  рад, 3 — после облучения дозой  $5 \cdot 10^5$  рад, 4 — после облучения дозой  $10^6$  рад, 5 — после облучения дозой  $5 \cdot 10^6$  рад, 6 — после облучения дозой  $10^7$  рад, 7 — после облучения дозой  $2 \cdot 10^7$  рад.



**Рис. 4.** Зависимость плотности поверхностных состояний от дозы  $\gamma$ -облучения: 1 — при  $E = E_c - 0.32$  эВ, 2 — при  $E = E_c - 0.56$  эВ, 3 — при  $E = E_c - 0.7$  эВ.

ся резкое увеличение образования скорости поверхностных состояний при энергиях  $E = E_c - 0.32$  эВ. Таким образом, эффект неоднородного увеличения плотности поверхностных состояний носит пороговый характер и проявляется лишь при дозах облучения, больших чем  $10^6$  рад. При дальнейшем увеличении дозы облучения скорость изменения величины  $dN_{ss}/dE$  уменьшается для всех значений энергии, что свидетельствует о насыщении величины плотности поверхностных состояний.

Подобное неоднородное увеличение величины плотности поверхностных состояний по ширине запрещенной зоны Si и возникновение локального максимума в энергетическом спектре плотности поверхностных состояний в верхней половине запрещенной зоны кремния (при энергиях  $E_c - 0.3-0.4$  эВ) ранее наблюдалось при исследовании влияния различных типов облучения на границу раздела Si-SiO<sub>2</sub>, полученную при термическом окислении поверхности Si [3,12–16]. При этом данные работы [13,14] свидетельствуют о том, что данные эффекты проявляются лишь при дозах облучения, больших чем  $5 \cdot 10^5$  рад. Таким образом, наблюдается качественное соответствие изменений, происходящих под влиянием облучения, в спектрах плотности поверхностных состояний на границе раздела Si-SiO<sub>2</sub> и Si-СБС стекло. Более того, для обеих границ раздела возникает локальный пик значений  $dN_{ss}/dE$  носит пороговый характер. Вышесказанное позволяет предположить, что физические процессы, обуславливающие образование поверхностных состояний под влиянием облучения на границах раздела Si-SiO<sub>2</sub> и Si-СБС стекло, имеют общую природу.

Данные работ [14,15] свидетельствуют о том, что возникновение пика значений  $dN_{ss}/dE$  при энергиях

$E = E_c - 0.3-0.4$  эВ на границе раздела Si-SiO<sub>2</sub> обусловлено возникновением собственных дефектов границы раздела под влиянием облучения. Такими дефектами, согласно [15], являются ненасыщенные валентные связи атомов Si, возникающие при разрыве напряженных связей на границе раздела Si-SiO<sub>2</sub>. Аналогичный процесс разрыва напряженных связей наблюдается, по-видимому, и на границе раздела Si-СБС стекло.

В то же время отметим, что исследованная в данной работе граница раздела Si-СБС стекло обладает более высокой радиационной стойкостью по сравнению с границей раздела Si-SiO<sub>2</sub>, полученной при термическом окислении поверхности Si. Так, согласно [3,17,18], при облучении  $\gamma$ -квантами в диапазоне доз  $10^5-10^6$  рад плотность поверхностных состояний на границе раздела Si-SiO<sub>2</sub> увеличивается в 7–12 раз. Полученные нами данные свидетельствуют, что при аналогичных дозах облучения значения плотности поверхностных состояний на границе раздела Si-СБС стекло, даже в области локального пика, увеличиваются не более чем в 5 раз, а величина  $dN_{ss}/dE$  в середине запрещенной зоны Si увеличивается всего в 2.5–3 раза.

Более высокую стойкость границы раздела Si-СБС стекло по отношению к облучению можно объяснить следующим образом. Температурные коэффициенты линейного расширения Si ( $\alpha = 4.5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ) и SiO<sub>2</sub> ( $\alpha = 0.4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ) отличаются более чем на порядок [2]. Поэтому на границе раздела Si-SiO<sub>2</sub>, образованной при термическом окислении поверхности кремния, существуют значительные механические напряжения, приводящие к возникновению большого числа напряженных связей, которые легко разрываются при воздействии облучения [3]. Величина температурного коэффициента линейного расширения СБС стекла, исследованного в данной работе,  $\alpha = 5.1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  близка к величине коэффициента линейного расширения Si. Кроме того, температура формирования границы раздела Si-СБС стекло существенно ниже температур, при которых обычно происходит термическое окисление поверхности кремния. Вышеуказанные факторы приводят к тому, что величина механических напряжений на границе раздела Si-СБС стекло существенно меньше, чем на границе раздела Si-SiO<sub>2</sub>. Соответственно меньше и число напряженных связей, разрыв которых при воздействии облучения ведет к увеличению плотности поверхностных состояний.

Таким образом, факт существования количественных различий в изменениях величины  $dN_{ss}/dE$  при равных дозах облучения не противоречит сделанному ранее предположению о том, что процессы радиационного дефектообразования на границах раздела Si-SiO<sub>2</sub> и Si-СБС стекло имеют общую природу. В то же время более высокая радиационная стойкость границы раздела Si-СБС стекло обуславливает перспективность применения СБС стекла для пассивации и защиты поверхностей полупроводниковых приборов, работающих в условиях повышенного радиационного фона.

## Список литературы

- [1] M. Shimbo, K. Furukava, K. Nanzava, K. Fukada. J. Electrochem. Soc., **134**, 156 (1987).
- [2] И.Г. Пичугин, Ю.М. Таиров. *Технология полупроводниковых приборов* (М., Высш. шк., 1984).
- [3] В.С. Першенков, В.Д. Попов, А.В. Шальнов. *Поверхностные радиационные эффекты в ИМС* (М., Энергоатомиздат, 1988).
- [4] В.С. Вавилов, Б.М. Горин, Н.С. Данилин, А.Е. Кив, Ю.А. Нуров, В.И. Шаховцев. *Радиационные методы в твердотельной электронике* (М., Радио и связь, 1990).
- [5] П.Б. Парчинский. Письма ЖТФ, **28** (22), 17 (2002).
- [6] П.Б. Парчинский, С.И. Власов, С.З. Зайнабидинов, А.А. Насиров, В.А. Абдуазимов, Б.А. Бабаджанов. Узб. физ. журн., **4**, 200 (2002).
- [7] С.И. Власов, П.Б. Парчинский, Б.А. Олмагов. Неорг. матер., **36**, 608 (2000).
- [8] С. Зи. *Физика полупроводниковых приборов* (М., Мир, 1984) т. 1.
- [9] K.H. Zaineger, F.P. Heiman. Sol. St. Technol., **13**, 49 (1970).
- [10] П.Б. Парчинский, С.И. Власов, А.А. Насиров, Т.П. Адиллов. Письма ЖТФ, **22** (2), 46 (1996).
- [11] J.R. Brews. Sol. St. Electron., **20**, 607 (1977).
- [12] S.K. Lai. Appl. Phys. Lett., **39**, 58 (1981).
- [13] T.P. Ma, G. Scogan, R. Leone. Appl. Phys. Lett., **27**, 61 (1975).
- [14] T.P. Ma. Appl. Phys. Lett., **27**, 615 (1975).
- [15] С.Н. Козлов, А.Н. Невзоров, Т.Г. Чайковская. Микроэлектроника, **15**, 283 (1986).
- [16] Г.Н. Галкин, Р.У. Абасова, Е.А. Боброва, В.С. Вавилов. ФТП, **16**, 2158 (1982).
- [17] С.З. Зайнабидинов, С.И. Власов, Е.Г. Заугольникова, И.Н. Каримов, Г.А. Халиков. ФТП, **19**, 1191 (1985).
- [18] В.Я. Киблик, Р.О. Литвинов, В.Г. Литовченко, Н.М. Литовченко. Укр. физ., журн., **22**, 1097 (1977).

Редактор Л.В. Беляков

## Effect of $\gamma$ -irradiation on silicon–lead-borosilicate glass interface

*P.B. Parchinskii, S.I. Vlasov, A.A. Nasirov*

National University of Uzbekistan,  
700174 Tashkent, Uzbekistan

**Abstract** Effect of  $\gamma$ -irradiation on the surface state density at the Si-lead-borosilicate glass interface have been studied. For doses more then  $10^6$  rad the local peak of surface states in the upper half of the band gap ( $E = E_c - 0.32 \pm 0.04$  eV) was observed. In has been shown that the Si-lead-borosilicate glass interface is less sensible to irradiation effects than the Si-SiO<sub>2</sub> interface that is formed by the Si surface oxidation.