

Влияние γ -облучения на характеристики границы раздела кремний–свинцово-боросиликатное стекло

© П.Б. Парчинский[¶], 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 γ -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 γ -облучения по сравнению с границей раздела Si–SiO₂, 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 γ -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 γ -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 см². Толщина слоя диэлектрика, определенная по емкости МДП структур в режиме обогащения, равнялась $(2 \pm 0.1) \cdot 10^{-4}$ см.

Облучение исследованных МДП структур γ -квантами проводилось от источника ⁶⁰Co, 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

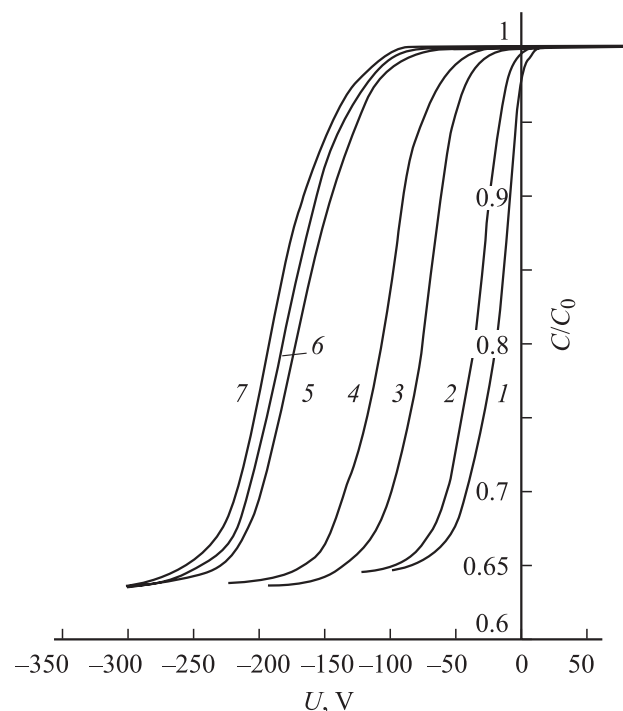


Рис. 1. Вольт-фарадные характеристики исследуемых структур: 1 — до γ -облучения, 2 — после облучения дозой 10^5 рад, 3 — после облучения дозой $5 \cdot 10^5$ рад, 4 — после облучения дозой 10^6 рад, 5 — после облучения дозой $5 \cdot 10^6$ рад, 6 — после облучения дозой 10^7 рад, 7 — после облучения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

[¶] E-mail: pavelphys@mail.ru

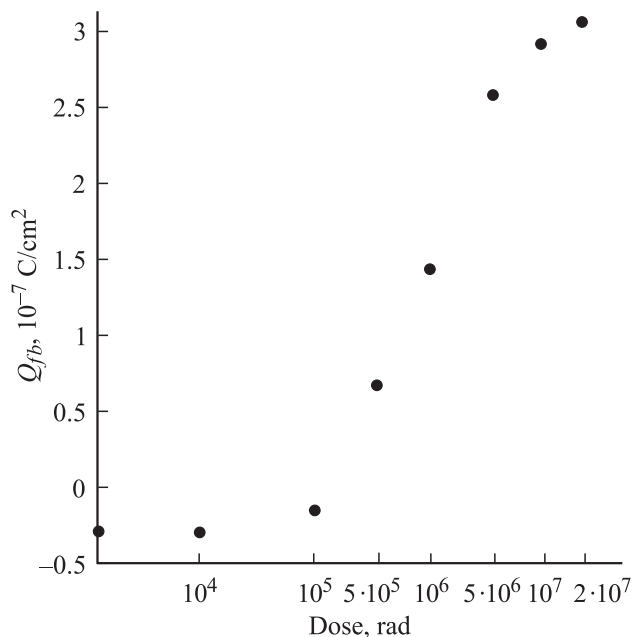


Рис. 2. Зависимость эффективного поверхностного заряда Q_{fb} (измеренного при напряжении плоских зон от дозы γ -облучения).

до и после облучения. Емкость структуры нормирована к емкости диэлектрика $C_0 = 35$ пФ. Как видно из представленных зависимостей, γ -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 γ -облучения. Отметим, что в диэлектриках необлученных МДП структур наблюдался отрицательный заряд величиной $Q_{fb} = (3.5\text{--}4.5) \cdot 10^{-8} \text{ Кл/см}^2$, природа которого рассмотрена в [10]. Из представленных зависимостей видно, что наибольшая скорость изменения Q_{fb} наблюдается при дозах облучения $5 \cdot 10^5\text{--}5 \cdot 10^6$ 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 $E = E_c - (0.32 \pm 0.04) \text{ эВ}$. На рис. 4 приведена зависимость величины dN_{ss}/dE от дозы облучения в середине запрещенной зоны ($E = E_c - 0.56 \text{ эВ}$) и в области локального максимума, а также в нижней половине запрещенной зоны при энергиях $E = E_c - 0.7 \text{ эВ}$. 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 $10^6\text{--}5 \cdot 10^6$ рад наблюдает-

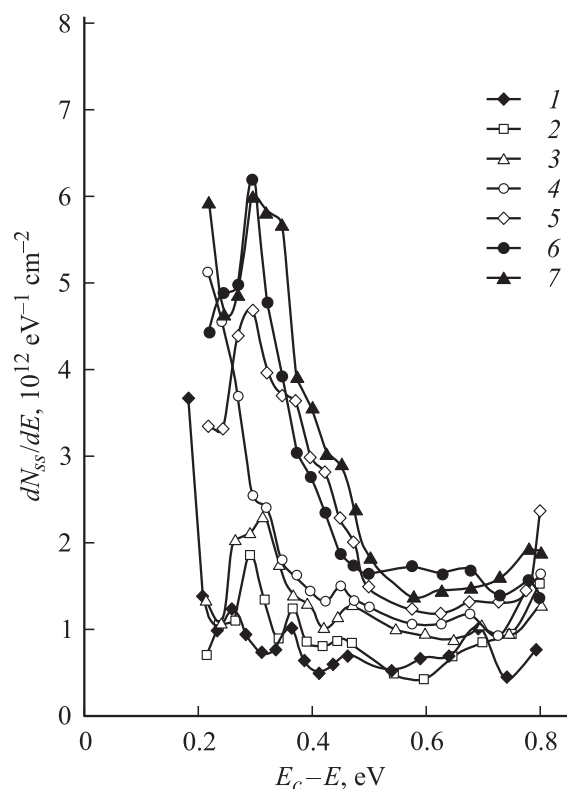


Рис. 3. Спектры плотности поверхностных состояний исследуемых структур: 1 — до γ -облучения, 2 — после облучения дозой 10^5 рад, 3 — после облучения дозой $5 \cdot 10^5$ рад, 4 — после облучения дозой 10^6 рад, 5 — после облучения дозой $5 \cdot 10^6$ рад, 6 — после облучения дозой 10^7 рад, 7 — после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

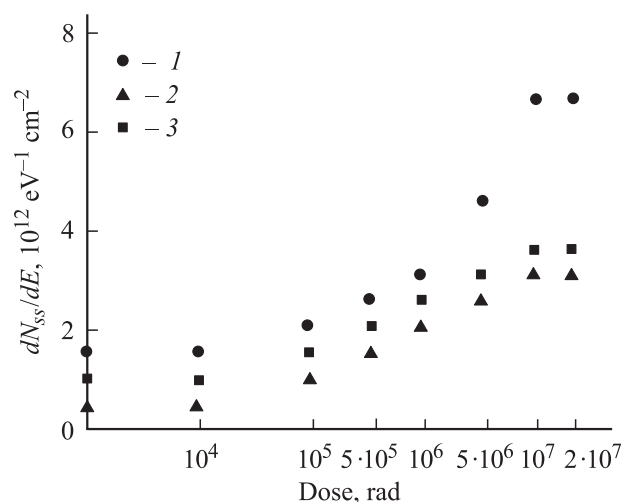


Рис. 4. Зависимость плотности поверхностных состояний от дозы γ -облучения: 1 — при $E = E_c - 0.32$ эВ, 2 — при $E = E_c - 0.56$ эВ, 3 — при $E = E_c - 0.7$ эВ.

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-SiO₂, 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-SiO₂ и Si-СБС стекло. Более того, для обеих границ раздела возникновение локального пика значений dN_{ss}/dE носит пороговый характер. Вышесказанное позволяет предположить, что физические процессы, обуславливающие образование поверхностных состояний под влиянием облучения на границах раздела Si-SiO₂ 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-SiO₂ 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-SiO₂. 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-SiO₂, полученной при термическом окислении поверхности Si. Так, согласно [3,17,18], при облучении γ -квантами в диапазоне доз $10^5 - 10^6$ рад плотность поверхностных состояний на границе раздела Si-SiO₂ 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 SiO₂ ($\alpha = 0.4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) отличаются более чем на порядок [2]. Поэтому на границе раздела Si-SiO₂, 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-SiO₂. 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-SiO₂ 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. Furukawa, K. Nanzawa, 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. Олматов. 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. Адилов. 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. Заугольников, 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 γ -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 γ -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. It has been shown that the Si–lead-borosilicate glass interface is less sensible to irradiation effects than the Si–SiO₂ interface that is formed by the Si surface oxidation.