

06.1

## **Зависимость скорости поверхностной генерации на границе раздела кремний–свинцово-боросиликатное стекло от условий формирования области неравновесного обеднения**

© П.Б. Парчинский, А.А. Насиров, Л.Г. Лигай,  
М.М. Алламбергенов, К.А. Исмаилов

Национальный университет Узбекистана  
Каракалпакский государственный университет  
E-mail: pavelphys@mail.ru

Поступило в Редакцию 25 января 2011 г.

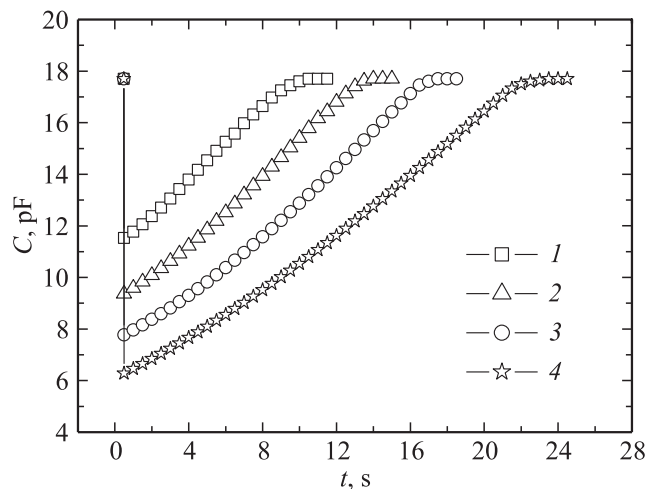
Методом изотермической релаксации емкости МДП-структуры исследованы генерационные характеристики границы раздела кремний–свинцово-боросиликатное стекло. Обнаружено, что эффективная скорость поверхностной генерации зависит от амплитуды импульса инверсионного напряжения, выводящего структуру из состояния равновесия. Показано, что обнаруженная зависимость может быть обусловлена инъекцией носителей заряда через границу раздела кремний–стекло с их последующей локализацией на ловушечных центрах в приповерхностной области стекла.

Легкоплавкие свинцово-боросиликатные (СБС) стекла широко применяются для защиты поверхности полупроводниковых приборов и структур на основе кремния и их герметизации [1–3]. При этом слои стекла могут наноситься как на слой термического диоксида кремния, выращенного на поверхности Si с целью ее пассивации, так и непосредственно на поверхность кремния. В последнем случае

низкие температуры нанесения стекла на поверхность Si позволяют уменьшить вероятность возникновения термодиффектов в его объеме и снизить величину механических напряжений на границе раздела полупроводник–диэлектрик [4,5]. Вышесказанное обуславливает интерес к изучению электрофизических характеристик границы раздела кремний–стекло. Одним из основных факторов, определяющих степень влияния границы раздела полупроводник–диэлектрик на характеристики полупроводниковых приборов является темп процессов поверхностной генерации–рекомбинации. В данной работе приводятся результаты исследований генерационных характеристик границы раздела Si–СБС-стекло, выполненных при помощи метода изотермической релаксации неравновесной емкости МДП-структуры.

Исследуемая граница раздела формировалась при нанесении СБС-стекла на поверхность Si при помощи электрофореза из суспензии, содержащей мелкодисперсную шихту стекла, с последующим оплавлением и отжигом. Температура оплавления составляла  $680^{\circ}\text{C}$ , время оплавления 10 min, температура отжига  $400^{\circ}\text{C}$ , время отжига 30 min. Толщина получаемого стеклянного покрытия составляла  $(2 \pm 0.2) \cdot 10^{-4}$  см. Состав и электрофизические свойства стекла соответствовали описанным в [6]. В целом процесс пассивации соответствовал стандартным технологическим режимам пассивации поверхности Si легкоплавкими стеклами. В качестве подложки использовались пластины кремния *n*-типа проводимости, с кристаллографической ориентацией  $\langle 111 \rangle$  и удельным сопротивлением  $60\text{--}80 \Omega \cdot \text{cm}$ .

Для реализации метода изотермической релаксации емкости путем вакуумного напыления алюминиевого управляющего электрода площадью  $0.01 \text{ cm}^2$  на слой стекла создавались тестовые МДП-структуры. Измерения процесса релаксации неравновесной емкости полученных МДП-структур проводились в температурном интервале  $0 \div -60^{\circ}\text{C}$ . Для реализации состояния неравновесного обеднения на исследуемые структуры, находящиеся в состоянии равновесия при напряжении инверсии  $U_0$ , подавалось дополнительное напряжение  $\Delta U$ , переводящее структуры в состояние более глубокой инверсии. Использование такого режима для проведения измерений генерационных характеристик границы раздела позволяет пренебречь вкладом, обусловленным перезарядкой поверхностных состояний, в изменение величины неравновесной емкости [7]. Измерения высокочастотных вольт-фарадных зависимостей исследованных МДП-структур показали, что для всех структур состояние инверсии наступало при подаче на управляющий

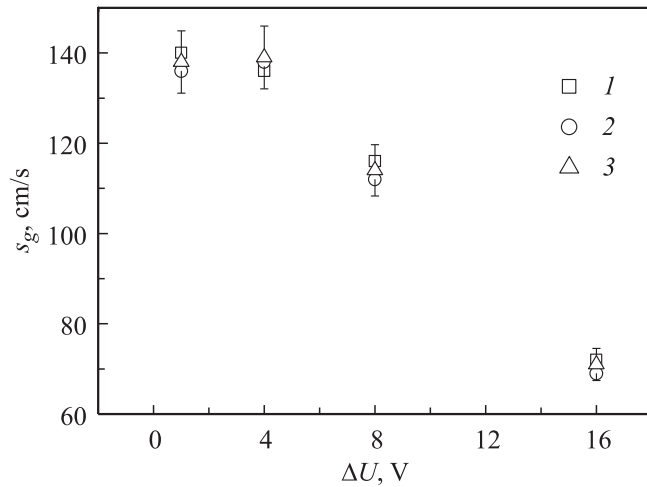


**Рис. 1.** Зависимости релаксации неравновесной емкости МДП-структуры, измеренные при температуре  $T = -30^\circ\text{C}$  и значениях  $U_0 = -32\text{ V}$  для различных значений  $\Delta U$ : 1 —  $\Delta U = -1\text{ V}$ ; 2 —  $\Delta U = -4\text{ V}$ ; 3 —  $\Delta U = -8\text{ V}$ ; 4 —  $\Delta U = -16\text{ V}$ .

электрод напряжений от 30 до  $-32\text{ V}$ . Исходя из этих данных, величина напряжения  $U_0$  при измерении процесса релаксации неравновесной емкости выбиралась в пределах от  $-32$  до  $-48\text{ V}$ .

На рис. 1 представлены типичные релаксационные зависимости одной из исследованных структур, измеренные для различных значений  $\Delta U$  при температуре  $-30^\circ\text{C}$ . Можно отметить, что начиная с  $\Delta U = -4\text{ V}$  скорость релаксации неравновесной емкости ( $dC/dt$ ), монотонно уменьшается с увеличением значений  $\Delta U$ . Так, величина  $dC/dt$ , определенная для релаксационных зависимостей, измеренных при  $\Delta U = -4\text{ V}$  и  $\Delta U = -16\text{ V}$  при равных значениях неравновесной емкости  $C(t) = 15\text{ pF}$ , составила  $0.72\text{ pF/s}$  и  $0.60\text{ pF/s}$  соответственно. При этом было обнаружено, что в пределах ошибки измерений величина  $dC/dt$  не зависит от величины напряжения  $U_0$ .

В МДП-структурах на основе Si в области температур ниже комнатных скорость изменения толщины неравновесной области пространственного заряда (ОПЗ), а следовательно, величина  $dC/dt$  определяется темпом процессов генерации неосновных носителей заряда в ОПЗ



**Рис. 2.** Зависимости эффективной скорости поверхностной генерации от величины  $\Delta U$ , определенные при  $T = -30^\circ\text{C}$  для различных значений опорного напряжения: 1 —  $U_0 = -32$  В; 2 —  $U_0 = -40$  В; 3 —  $U_0 = -48$  В.

полупроводника и на границе раздела полупроводник–диэлектрик [8]. Очевидно, что темп процесса генерации в ОПЗ полупроводника пропорционален толщине ОПЗ, поэтому при равных значениях емкости зависимость  $dC/dt$  от  $\Delta U$  будет определяться только зависимостью темпа процесса поверхностной генерации от  $\Delta U$ . Действительно, обработка представленных на рис. 1 релаксационных зависимостей по методу [9] показала уменьшение величины эффективной скорости поверхностной генерации ( $s_g$ ) при увеличении  $\Delta U$  (рис. 2). Отметим, что аналогичные зависимости  $dC/dt$  и  $s_g$  от  $\Delta U$  наблюдались во всем диапазоне исследованных температур.

Для анализа обнаруженных зависимостей рассмотрим подробнее процесс релаксации неравновесной емкости МДП-структуры. При этом будем иметь в виду, что эффективная скорость поверхностной генерации на границе раздела полупроводник–диэлектрик определяется как плотностью поверхностных генерационных центров, так и наличием на границе раздела флуктуаций поверхностного потенциала [10–12]. Кроме того, ранее нами было обнаружено наличие в области СБС-стекла, прилегающей к границе раздела с полупроводником, ловушечных центров,

способных обмениваться носителями заряда с разрешенными зонами полупроводника [13]. При этом, как было показано в [14,15], процессы перезарядки ловушечных центров в приповерхностной области диэлектрика могут также вносить определенный вклад в величину  $s_g$ .

Известно, что в режиме инверсии величина заряда инверсионного слоя  $Q_i$ , быстро увеличивается с ростом инверсионного напряжения, экранируя объем полупроводника от проникновения в него электрического поля, в результате чего падение напряжения в ОПЗ полупроводника и ее стационарная (равновесная) толщина не зависят от приложенного к структуре внешнего напряжения [8]. Однако процесс формирования инверсионного слоя требует определенного времени, поэтому при подаче на МДП-структуру дополнительного напряжения  $\Delta U$ , у границы раздела формируется область неравновесного обеднения, толщина которой много больше толщины равновесной ОПЗ. При этом практически все избыточное напряжение  $\Delta U$  падает на ОПЗ полупроводника. По мере формирования заряда инверсионного слоя толщина ОПЗ и величина напряжения, падающего в этой области, уменьшаются, а величина падения напряжения на слое диэлектрика  $U_d$ , напротив, увеличивается.

Поскольку толщина неравновесной ОПЗ увеличивается с увеличением значений  $\Delta U$ , то при заданном значении толщины ОПЗ величины  $Q_i$  и  $U_d$  будут тем больше, чем больше был импульс напряжения  $\Delta U$ , выводящего структуру из равновесного состояния. Однако тот факт, что величина  $dC/dt$  не зависит от значений опорного напряжения  $U_0$ , свидетельствует о том, что скорость поверхностной генерации не зависит от величин  $Q_i$  и  $U_d$ . Это обстоятельство позволяет предположить наличие дополнительных факторов, определяющих возникновение зависимости  $s_g$  от  $\Delta U$ .

Таким фактором, на наш взгляд, может являться инжекция носителей заряда через границу раздела полупроводник–стекло с их последующей локализацией на ловушечных центрах в области стекла, прилегающей к границе раздела. Поскольку вероятность процесса инжекции тем выше, чем больше величина падения напряжения на слое неравновесной ОПЗ [16], увеличение величины  $\Delta U$  ведет к увеличению величины заряда, инжектированного в стекло из ОПЗ полупроводника. Захваченный в диэлектрике заряд может приводить к уменьшению флуктуаций поверхностного потенциала, уменьшая тем самым величину  $s_g$ . Кроме того, изменение степени заполнения ловушечных центров

в приповерхностной области стекла может изменять темп процесса обмена носителями заряда между полупроводником и диэлектриком, что также может приводить к уменьшению значений  $s_g$ . Отсутствие зависимости величин  $dC/dt$  и  $s_g$  от  $\Delta U$ , при значениях  $\Delta U$  менее 4 В, в этом случае можно объяснить тем, что при малых значениях  $\Delta U$  величина инжектированного в стекло заряда недостаточна для оказания заметного влияния на ход физических процессов, определяющих величину эффективной скорости поверхностной генерации.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что увеличение амплитуды напряжения, выводящего МДП-структуру из состояния равновесия, ведет к уменьшению значений эффективной скорости поверхностной генерации. Данный эффект может быть обусловлен влиянием заряда, инжектированного из ОПЗ полупроводника и захваченного на ловушечные центры, локализованные в диэлектрике вблизи границы раздела с полупроводником, на ход процессов, определяющих скорость формирования заряда инверсионного слоя на границе раздела кремний–свинцово-боросиликатное стекло. В этом случае величина  $s_g$ , определяемая из метода изотермической релаксации емкости, зависит не только от концентрации поверхностных генерационных центров, но и от концентрации ловушечных центров в диэлектрике, способных обмениваться носителями заряда с объемом полупроводника, в связи с чем исследование зависимости величины  $s_g$  от  $\Delta U$  может быть использовано для контроля качества диэлектрических слоев, наносимых на поверхность Si в процессе изготовления полупроводниковых приборов. С другой стороны, при наличии процессов инжекции носителей заряда через границу раздела полупроводник–диэлектрик влияние инжектированного заряда на поверхностные генерационные токи должно приниматься в расчет при анализе и интерпретации результатов измерений генерационных характеристик границы раздела полупроводник–диэлектрик.

## Список литературы

- [1] Shimbo M., Furukava K., Tanzava K., Fukada K. // Sol. St. Science and Technology. 1987. V. 134. N 1. P. 156–160.
- [2] Flowers P.L. // J. Elektrochev. Soc. 1981. V. 128. N 10. P. 2179–2183.
- [3] Shimbo M., Furukava K., Tanzava K., Higuchi T. // IEEE Transaction on Electron Devices. 1988. V. ED 35. N 1. P. 124–128.

- [4] Власов С.И., Овсянников А.В., Заверюхин Б.Н. // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. В. 7. С. 41–45.
- [5] Власов С.И., Абылов Т.П., Эргашева М. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. В. 10. С. 83–87.
- [6] Власов С.И., Парчинский П.Б., Олматов Б.А. // Неорганические материалы. 2000. Т. 36. № 5. С. 608–610.
- [7] Берман Л.С., Лебедев А.А. Емкостная спектроскопия глубоких центров в полупроводниках. Л.: Наука, 1981. 176 с.
- [8] Kang J.S., Schroder D.K. // Phys. St. Sol. (A). 1985. V. 89. N 13. P. 13–44.
- [9] Zerbst M. // Z. Angew. Phys. 1966. V. 22. N 1. P. 30–33.
- [10] Гольдман Е.И., Ждан А.Г. // ФТП. 1995. Т. 29. С. 428–437.
- [11] Гольдман Е.И. // ФТП. 1993. Т. 27. В. 2. С. 269–276.
- [12] Меньшикова Т.Г., Бормонтов А.Е. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. В. 9. С. 65–72.
- [13] Власов С.И., Парчинский П.Б., Тургунов У.Т. // Неорганические материалы. 2002. Т. 38. № 6. С. 750–754.
- [14] Власов С.И., Парчинский П.Б., Лигай Л.Г. // Микроэлектроника. 2003. Т. 32. № 2. С. 121–123.
- [15] Парчинский П.Б., Лигай Л.Г., Мансуров Х.Ж., Йулчиев Ш.Х. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. В. 7. С. 40–44.
- [16] Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Т. 1. М.: Мир, 1984. 456 с. (Пер. с англ. Sze S.M. Physics of Semiconductors Devices. New York: John Wiley & Sons, 1981).