

06;08

## Влияние ультразвуковой обработки на генерационные характеристики границы раздела полупроводник—стекло

© С.И. Власов, А.В. Овсянников, Б.Н. Заверюхин

Национальный университет Узбекистана, Ташкент

E-mail: vlasov@uzsci.net

В окончательной редакции 8 ноября 2008 г.

Показана возможность определения временной зависимости скорости поверхностной генерации носителей заряда по кинетике релаксации емкости структур металл—стекло—полупроводник. Установлено, что ультразвуковая обработка границ раздела полупроводник—стекло приводит к изменению временной зависимости, уменьшая абсолютное значение скорости поверхностной генерации.

PACS: 72.50.+b, 73.20.At, 73.40.Sx

Межфазная граница раздела полупроводник—диэлектрик является составной частью большинства современных полупроводниковых приборов. В то же время эта граница является наиболее чувствительным элементом по отношению к внешним воздействиям.

Изучению влияния внешних воздействий на свойства переходных слоев полупроводник—диэлектрик посвящено большое количество работ. Но эти работы, как правило, посвящены исследованию наиболее широко используемой в полупроводниковой электронике системы кремний—диоксид кремния [1–3].

Однако в ряде случаев система кремний—диоксид кремния обладает некоторыми недостатками. К таким недостаткам относится высокая температура ( $T = 900 \div 1200^\circ\text{C}$ ) формирования слоя  $\text{SiO}_2$ , приводящая к перераспределению примесных центров по толщине полупроводниковой подложки, что обусловлено различными коэффициентами сегрегации [4], а также возникновение в полупроводнике термодефектов [5–7].

Использование легкоплавких свинцово-боросиликатных стекол позволяет совмещать высокие изоляционные характеристики и простоту получения диэлектрических покрытий. С этой точки зрения актуальным является изучение природы электрофизических процессов, протека-

ющих в покрытых на основе свинцово-боросиликатных стекол при внешних воздействиях.

Влияние термических, механических, полевых и радиационных воздействий на свойства границ раздела монокристаллический Si–стекло изучено достаточно подробно [8–11]. Целью настоящей работы являлось изучение влияния ультразвукового воздействия на генерационные характеристики межфазной границы раздела системы полупроводник–многокомпонентное стекло. Для изучения генерационно-рекомбинационных свойств межфазных границ наиболее часто используется методика изотермической релаксации емкости структуры металл–диэлектрик–полупроводник (МДП) при формировании заряда инверсионного слоя [12,13]. Эта методика основана на регистрации временного изменения емкости структуры МДП, к которой приложено постоянное инверсионное напряжение ( $V_1$ ), после приложения к ней импульса напряжения ( $V_2$ ), соответствующего увеличению заряда инверсионного слоя ( $V_2 > V_1$ ). Для описания процесса изменения емкости структуры МДП во времени используется соотношение [13]:

$$\frac{1}{C^3(t)} \frac{dC(t)}{dt} = \frac{Sn_i}{C_d N_m e e_0} + \frac{n_i}{C_d N_m \Phi} \left( \frac{C_\infty}{C(t)} - 1 \right) \frac{1}{C_\infty}, \quad (1)$$

где  $C(t)$  — мгновенное значение измеряемой емкости,  $C_d$  — емкость слоя диэлектрика,  $C_\infty$  — емкость структуры в конце процесса релаксации,  $N_m$  — концентрация примеси в полупроводнике,  $n_i$  — концентрация примеси в собственном полупроводнике,  $\tau$  — время жизни термически генерированных носителей заряда,  $S$  — скорость поверхностной генерации,  $e$  — диэлектрическая проницаемость полупроводника,  $e_0$  — диэлектрическая постоянная. При выводе соотношения (1) автором работы [13] предполагалось, что скорость поверхностной генерации есть величина постоянная и, следовательно, в процессе релаксации емкости ее значение не изменяется.

Анализ процесса релаксации емкости структуры МДП (изготовленной на основе полупроводника  $n$ -типа проводимости) показал следующее. Если плотность поверхностных состояний в рассматриваемом интервале энергии распределена равномерно, то число электронов, генерированных в единицу времени, также является постоянным. Следовательно, скорость поверхностной генерации в данном случае также является величиной постоянной. Однако распределение поверхностных состояний по ширине запрещенной зоны полупроводника, как правило,

имеет достаточно сложную форму [9–11]. Если импульсное увеличение напряжения соответствует энергетическому участку с неоднородным распределением плотности поверхностных состояний, то скорость поверхностной генерации будет являться функцией времени. Для подтверждения сказанного, при помощи метода [13], была измерена  $C(t)$ -зависимость для структур Al-*n*-Si-стекло–Al. Использовалось свинцово-боросиликатное стекло следующего весового состава: SiO<sub>2</sub> — 33%; PbO — 40%; B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — 24%; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — 2%; Ta<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — 1%. Оплавление исходной шихты проводилось на пластины Si (КЭФ-15 с кристаллографической ориентацией  $\langle 100 \rangle$ ) при температуре  $T = 700^\circ\text{C}$  в течение времени  $t = 30 \text{ min}$ , с последующим отжигом при температуре  $T = 400^\circ\text{C}$  в течение времени  $t = 10 \text{ min}$ .

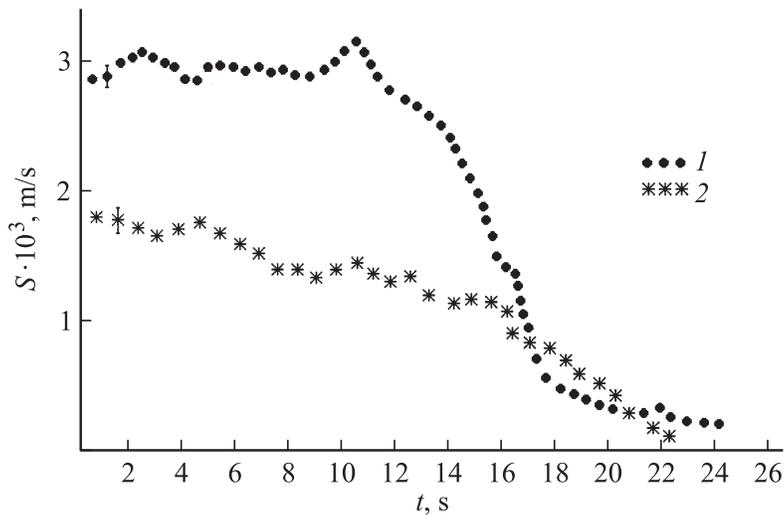
Методика исследования заключалась в том, что проводились измерения релаксационных зависимостей структур МДП до и после облучения ультразвуковыми волнами (УЗВ). Образцы облучались продольными ультразвуковыми волнами частотой  $f = 2.5 \text{ MHz}$  и мощностью  $P = 0.5 \text{ W/cm}^2$  в течение времени  $t = 45 \text{ min}$ . Звукопроводом между пьезопреобразователем, электрически соединенным с ультразвуковым генератором, и исследуемым образцом являлась жидкость. Измерения релаксационных зависимостей емкости проводились в темноте на частоте  $F = 150 \text{ KHz}$ , в интервале температур  $T = 30 \div 50^\circ\text{C}$ , после переключения напряжения  $V_2 = 4 \text{ V}$  на  $V_2 = 22 \text{ V}$ .

Полученные зависимости  $C(t)$  обрабатывались при помощи соотношения (1), откуда в предположении постоянства скорости поверхностной генерации, в соответствии с методикой [13] находилось начальное значение скорости поверхностной генерации  $S_0$ . Далее, используя начальное значение емкости структуры МДП, в первый момент релаксации, решая уравнение (1) относительно времени, получаем следующее соотношение:

$$t = \frac{B - AC_\infty}{B^2C_\infty} \ln(C) + \frac{AC_\infty - B}{B^2C_\infty} \ln(BC - BC_\infty - ACC_\infty) - \frac{1}{BC} + \eta, \quad (2)$$

где  $A = \frac{S n_i}{C_d N_m e e_0}$ ;  $B = \frac{n_i}{C_d N_m}$ ;  $\eta$  — постоянная интегрирования, равная

$$\eta = -\frac{(B - AC_\infty)}{B^2C_\infty} \ln(c) + \frac{(AC_\infty - B)}{B^2C_\infty} \ln(BC_n - BC_\infty - ACC_\infty) + \frac{1}{BC_n}. \quad (3)$$



Временные зависимости скорости поверхностной генерации носителей заряда для контрольной (1) и облученной УЗВ (2) структур Al-n-Si-стекло-Al.

Используя соотношения (1)–(3) и экспериментально определенные значения  $C(t)$ ,  $C_d$ ,  $C_\infty$ ,  $N_m$ ,  $S$  и  $\tau$ , находим зависимость  $t = t(C/C_\infty)$  и далее зависимость  $S = S(t)$ . На рисунке приведены экспериментально измеренные при температуре  $T = 32^\circ\text{C}$  временные зависимости скорости поверхностной генерации  $S(t)$ . Из рисунка видно, что в структуре МДП, облученной ультразвуковыми волнами, скорость поверхностной генерации меньше по сравнению с контрольной структурой МДП, а временная зависимость скорости поверхностной генерации является более плавной. Учитывая, что распределение плотности поверхностных состояний по ширине запрещенной зоны кремния, после облучения ультразвуком, изменяется незначительно (в отличие от структур МДП, изготовленных на основе  $p$ -кремния и слоя  $\text{SiO}_2$  [14]), можно сделать следующий вывод: ультразвуковое облучение структур металл–стекло–полупроводник приводит к перестройке напряженных валентных связей на межфазной границе раздела полупроводник–стекло, с одновременным увеличением сечения захвата локализованных на них электронов.

## Список литературы

- [1] *Литовченко В.Г., Горбань А.П.* Основы физики микроэлектронных систем металл–диэлектрик–полупроводник. Киев: Наук. думка, 1978. Г. 1. С. 21–27.
- [2] *Барабан А.П., Булавинов В.В., Коноров П.П.* Электроника слоев SiO<sub>2</sub> на кремнии. Л.: ЛГУ, 1988. Т. 1. С. 6–10.
- [3] *Ретинский С.М.* // ФТП. 2001. Т. 5. В. 9. С. 1050–1061.
- [4] *Буренков А.Ф., Комаров Ф.Н.* // Микроэлектроника. 1988. Т. 17. В. 3. С. 256–260.
- [5] *Гребен В.А.* Полупроводниковые приборы для мощных высоковольтных преобразовательных устройств. М., Энергия, 1978. 192 с.
- [6] *Александров О.В., Афонин Н.Н.* // ФТП. 1998. Т. 32. В. 1. С. 56–61.
- [7] *Александров О.В., Афонин Н.Н.* // ФТП. 2005. Т. 39. В. 6. С. 67–71.
- [8] *Власов С.И., Парчинский П.Б., Тургунов У.Т.* // Неорганические материалы. 2002. Т. 38. № 6. С. 750–754.
- [9] *Власов С.И., Адылов Т.П., Эргашева М.А.* // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. В. 10. С. 83–87.
- [10] *Парчинский П.Б., Насиров А.А.* // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. В. 18. С. 65–70.
- [11] *Парчинский П.Б., Олматов Б.А.* // Неорганические материалы. 2000. Т. 36. № 5. С. 608–610.
- [12] *Kang J.S., Schroder D.K.* // Phys. Stat. Sol. (a). 1985. V. 89. N 13. P. 13–43.
- [13] *Zerbst M.* // Z. Angew. Phys. 1962. N 30. P. 22–29.
- [14] *Заверюхина Н.Н., Заверюхина Е.Б., Власов С.И., Заверюхин Б.Н.* // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 6. С. 36–42.