

## СКОРОСТЬ ПОВЕРХНОСТНОЙ ГЕНЕРАЦИИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА ПО ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ПОЛУПРОВОДНИК-СТЕКЛО

Национальный университет Узбекистана им. М. Улугбека,  
Студенческий городок, 700174, г. Ташкент, Республика Узбекистан, [vlasov@uzsci.net](mailto:vlasov@uzsci.net)

Межфазная граница раздела полупроводник-диэлектрик является составной частью большинства современных полупроводниковых приборов. Для изучения генерационно-рекомбинационных свойств межфазных границ наиболее часто используется методика изотермической релаксации емкости структуры металл - диэлектрик - полупроводник (МДП) в ходе формирования заряда инверсионного слоя [1]. Эта методика основана на регистрации изменения емкости структуры МДП, к которой подается 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

$$\frac{1}{C^3(t)} \frac{dC(t)}{dt} = \frac{Sn_i}{C_d N_m \varepsilon \varepsilon_0} + \frac{n_i}{C_d N_m \tau} \left( \frac{C_\infty}{C(t)} - 1 \right) \frac{1}{C_\infty}, \quad (1)$$

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,  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость полупроводника,  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная [2]. При выводе соотношения (1) автором работы [2] принималось, что скорость поверхностной генерации есть величина постоянная и, следовательно, в процессе релаксации емкости ее значение не изменяется.

Увеличение величины импульса напряжения, прикладываемого к структуре, приводит к изменению искривления энергетических зонных диаграмм. При этом часть заполненных электронами поверхностных состояний оказывается выше уровня Ферми в случае полупроводника  $n$ -типа проводимости (см. рис. 1). Процесс термической генерации приводит к высвобождению электронов и изменению заряда поверхностных состояний. В процессе термической ионизации сначала высвобождаются электроны с той части поверхностных состояний, которая имеет более высокое значение энергии, то есть расположенная ближе к зоне проводимости. Затем последовательно высвобождаются электроны с более глубокой части поверхностных состояний. Если плотность поверхностных состояний в рассматриваемом энергетическом интервале ( $\Delta E$ , рис. 1) 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 [3–5]. Если импульсное увеличение напряжения соответствует энергетическому участку с неоднородным распределением плотности поверхностных состояний, то скорость поверхностной генерации явится функцией времени. Более того, при переключении напряжения  $V_1 \rightarrow V_2$ , соответствующего инверсии поверхностной проводимости, в первый момент времени имеет место расширение слоя объемного заряда полупроводника от  $W_2$  до  $W_1$  (см. рис. 1). В дальнейшем, по мере объемной и поверхностной термической генерации, происходит накопление неосновных носителей заряда в полупроводнике, вблизи границы раздела полупроводник-диэлектрик, то есть увеличение заряда инверсионного слоя. Увеличение заряда инверсионного слоя приводит к экранированию электрического поля, проникающего в полупроводник, и толщина слоя объемного заряда полупроводника уменьшается от  $W_1$  до  $W_2$ . При этом за счет уменьшения напряженности электрического поля происходит уменьшение искривления энергетических зонных диаграмм, и часть поверхностных состояний, локализованных в энергетическом промежутке  $\Delta E$ , заполняется электрона-

ми. Следовательно, в процессе релаксации емкости структуры МДП скорость поверхностной генерации носителей заряда не является постоянной величиной, а зависит от времени.

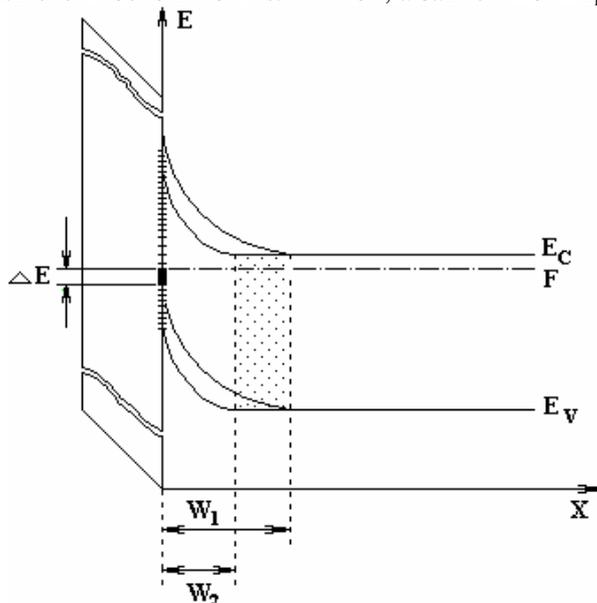


Рис.1. Модель энергетической зонной диаграммы структуры МДП с указанием энергетической области перезаряжающихся поверхностных состояний

Для подтверждения сказанного при помощи метода [2] измерена  $C(t)$  зависимость для структур Al-n-Si-стекло – Al. Использовалось свинцово-боро-силикатное стекло следующего масспроцентного 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 <100>) при температуре 700 °С в течение 30 минут с последующим отжигом при температуре 400 °С в течение 10 минут.

Измерения релаксационных зависимостей проводились в темноте на частоте 150 кГц при температуре  $T = -50^{\circ}\text{C}$  после переключения напряжения 4 → 18 В. Полученные зависимости, одна из которых приведена на рис. 3 (кривая 1), обрабатывались при помощи соотношения (1). На рис. 2 приведена одна из полученных зависимостей, откуда в предположении постоянства скорости поверхностной генерации в соответствии с методикой [2] находилось значение скорости поверхностной генерации  $S = 55 \text{ см/с}$ .

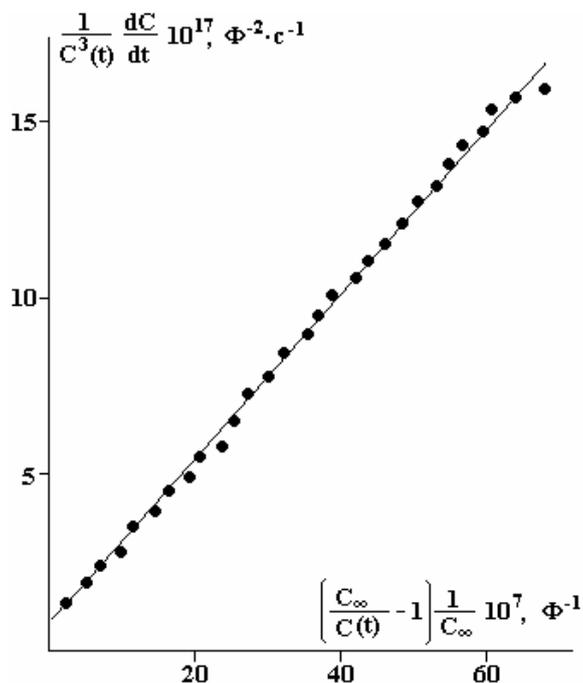


Рис. 2. Экспериментальные значения  $C(t)$  для одной из структур МДП, построенные при помощи выражения (1)

Далее, используя начальные условия релаксационной зависимости  $C(t)$  и значение емкости структуры в первый момент релаксации, решаем уравнение (1) относительно времени:

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

где  $A = \frac{Sn_i}{C_d N_m \epsilon \epsilon_0}$ ;  $B = \frac{n_i}{C_d N_m \tau}$ ;  $\eta$  – постоянная интегрирования, равная

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

Используя соотношения (1)–(3) и экспериментально определенные значения  $C(t)$ ,  $C_d$ ,  $C_\infty$ ,  $N_m$ ,  $S$  и  $\tau$ , находим расчетную зависимость  $t = t(C/C_\infty)$  в предположении постоянства во времени скорости поверхностной генерации  $S$  и сравниваем ее с экспериментальной зависимостью. На рис. 3 приведены экспериментальная (кривая 1) и расчетные (кривая 2, 3) зависимости релаксации емкости (нормированной к величине стационарной емкости  $C_\infty$ ) структуры МДП. Видно, что указанные зависимости совпадают друг с другом лишь на начальном участке релаксационной кривой. Используя метод оптимального подбора параметров и экспериментальную зависимость релаксации емкости структуры МДП при фиксированной температуре, найдена эмпирическая зависимость скорости поверхностной генерации от времени в течение всего процесса релаксации. Найденную зависимость можно аппроксимировать при помощи численных методов обработки следующим выражением:

$$S = S_0 [0,5 - 0,3 \text{Arctg}(t)], \quad (4)$$

где  $S_0$  – скорость поверхностной генерации в начальный момент времени.

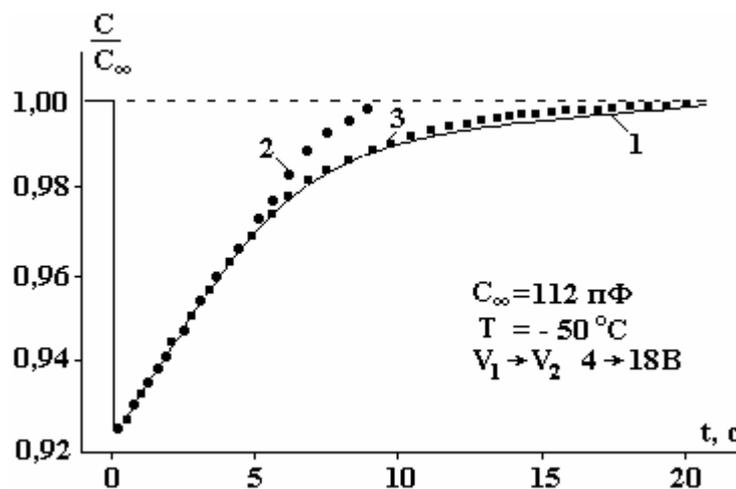


Рис. 3. Экспериментальная (1) и расчетные (2,3) зависимости темновой релаксации емкости структуры МДП в процессе увеличения заряда инверсионного слоя после переключения напряжения от 4 до 18 В

Сравнение расчетной зависимости  $t = t(C/C_\infty)$  в предположении временной зависимости скорости поверхностной генерации  $S$ , описываемой выражением (4) (кривая 3 на рис. 3), с экспериментальной зависимостью (кривая 1) показало значительное совпадение обеих зависимостей.

На основании приведенных данных можно сделать вывод о том, что в структурах МДП, изготовленных на основе кремния  $n$ -типа проводимости, покрытого слоем свинцово-боро-силикатного стекла, скорость поверхностной генерации является функцией времени, которая приближенно описывается соотношением (4).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Kang J.S., Schroder D.K. The Pulsed MIS Capacitor // Phys. Stat. Sol. (a). 1985. 89, 13. P. 13–43.
2. Zerbst M. Relaxation effects on holbeiter isolator-grenzflochen // Z. Angew. Phys. 1962. № 30. P. 22–29.
3. Парчинский П.Б., Власов С.И., Насиров А.А. Влияние  $\gamma$ -облучения на характеристики границы раздела кремний-свинцово-боро-силикатное стекло // Физика и техника полупроводников. 2004. Т.38. Вып.11. С. 1345–1348.
4. Парчинский П.Б. Влияние ультразвуковой обработки на плотность поверхностных состояний на границе раздела кремний-диоксид кремния, облученной  $\gamma$ -квантами // Микроэлектроника. 2005. Т. 34. № 6. С. 420–423.
5. Берман Л.С. Анализ временной нестабильности параметров границы раздела диэлектрик-соединение  $A^3B^5$  методом изотермической релаксации емкости // Физика и техника полупроводников. 1977. Т. 31. № 1. С. 78–81.

Поступила 28.08.07

### Summary

It is offered the method for determining of time-dependence of surface generation velocity on semiconductor-dielectric interface. It is shown that surface generation velocity is a time function in MDS-structures of n-Si covered by the lead-boron-silicate glass.

---