

## ОТЖИГ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В ЭЛЕКТРОННО-ОБЛУЧЕННЫХ Mo/n-Si-СТРУКТУРАХ ШОТТКИ

Ф.П. Коршунов, И.Г. Марченко, Н.Е. Жданович

ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению»

ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Беларусь, e-mail: [jd@ifttp.bas-net.by](mailto:jd@ifttp.bas-net.by)

В работе приведены результаты исследования процессов отжига в интервале температур 20-450°C дефектов, образующихся в результате электронного облучения с энергией 6 МэВ Mo/n-Si-структур Шоттки. С помощью метода DLTS установлено наличие в запрещенной зоне облученных структур четырех энергетических уровней дефектов со следующими значениями энергии активации и сечения захвата основных носителей E1 – Ec-0,17 эВ и  $5,5 \times 10^{-14}$  см<sup>2</sup>; E2 – Ec-0,23 эВ и  $5,3 \times 10^{-15}$  см<sup>2</sup>; E3 – Ec-0,36 эВ и  $5,5 \times 10^{-16}$  см<sup>2</sup>; E4 – Ec-0,42 эВ и  $2,2 \times 10^{-14}$  см<sup>2</sup>. Сравнение параметров ловушек с известными из литературы значениями для радиационных дефектов в кристаллах Cz-Si позволило сделать вывод, что ловушка E1 соответствует акцепторному уровню комплекса вакансия-кислород (V-O) (A-центр), а ловушки E2 и E4 второму и третьему акцепторным уровням дивакансии. Уровень E3, по-видимому, является суперпозицией уровней с непрерывным набором энергий активации, которые относятся к зарядовым состояниям, образующимся в периферийном защитном слое SiO<sub>2</sub>. Уровень E3 отжигается при температуре 120°C и при этом наблюдается полное восстановление значения напряжения пробоя структур при малых дозах облучения. Остальные уровни отжигаются в диапазоне температур 280 - 450°C, причем процесс отжига сопровождается образованием и отжигом двух новых уровней дефектов и наблюдается корреляция исчезновения дефектов с полным восстановлением значения прямого падения напряжения и напряжения пробоя при больших дозах облучения.

### Введение

В настоящее время в полупроводниковой электронике все шире используются полупроводниковые диоды с барьерами Шоттки, что обусловлено их более высоким быстродействием и меньшими потерями в проводящем состоянии в сравнении с биполярными приборами [1]. В то же время недостаточно хорошо изучено поведение таких приборов в условиях их эксплуатации в полях различных излучений (электроны, нейтроны, ионы и т.д.) [2-4].

### Результаты

В работе исследовались эффекты, связанные с влиянием облучения при комнатной и повышенных (до 170°C) температурах, а также отжига в процессе выдержки облученных при комнатной температуре структур на напряжение пробоя ( $U_{Rb}$ ) и прямое падение напряжения ( $U_F$ ). Также снимались DLTS-спектры [5] структур для определения параметров (энергия активации и сечение захвата) основных радиационных дефектов, образующихся в результате облучения и последующего отжига в интервале температур 20 - 450°C.

В качестве объектов исследования использовались структуры с барьерами Шоттки, изготовленные на подложке из кремния КЭМ-0,003 n<sup>+</sup>-типа легированного мышьяком с удельным сопротивлением  $\rho = 0,003$  Ом\*см толщиной  $340 \pm 20$  мкм, на которую методом эпитаксии наносился слой кремния легированного фосфором с удельным сопротивлением  $\rho = 2,6-3,0$  Ом\*см толщиной  $8,0-8,8$  мкм. У структур создавалась охранное кольцо толщиной  $1,1-1,4$  мкм с поверхностным сопротивлением  $R_s = 1000 \pm 50$  Ом и по периферии наносился защитный слой SiO<sub>2</sub> толщиной  $0,65-1,0$  мкм. В качестве барьера использовался слой молибдена (Mo) марки МЧВП толщиной  $0,3 \pm 0,03$  мкм. Площадь кристаллов структур составляла  $8,6$  мм<sup>2</sup>.

Исследуемые структуры облучались электронами с энергией 6 МэВ на ускорителе "Элек-

троника У-003» при комнатной и повышенных температурах, а также гамма-квантами Co<sup>60</sup> на установке «Исследователь» в пассивном режиме при температуре 30°C. Интенсивность потока электронов составляла  $2 \cdot 10^{12}$  см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>, а интенсивность потока гамма-квантов  $4,5 \cdot 10^{10}$  см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>.

На рис. 1 представлены дозовые зависимости напряжения пробоя  $U_{Rb}$  и прямого падения напряжения  $U_F$  от флюенса электронов и дозы гамма-квантов.

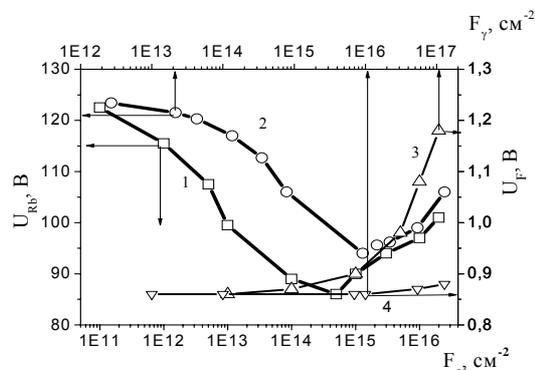


Рис. 1. Зависимости  $U_{Rb}$  и  $U_F$  от флюенса электронов с энергией 6 МэВ и дозы гамма-квантов Co<sup>60</sup>: 1 –  $U_{Rb}(F_e)$ ; 2 –  $U_{Rb}(F_\gamma)$ ; 3 –  $U_F(F_e)$ ; 4 –  $U_F(F_\gamma)$ .  $U_{Rb}$  измерялось при обратном токе  $I_R = 5$  мА, а  $U_F$  при  $I_F = 20$  А.

Как видно из рисунка, уменьшение значения обратного напряжения начинается при флюенсах порядка  $2 \times 10^{11}$  см<sup>-2</sup> и на зависимости  $U_{Rb}(F_e)$  наблюдается минимум при флюенсе порядка  $4-6 \times 10^{14}$  см<sup>-2</sup>. При дальнейшем увеличении  $F_e$  наблюдается рост  $U_{Rb}$  вплоть до значений  $F_e = 3 \times 10^{16}$  см<sup>-2</sup>. На аналогичной зависимости от гамма-квантов уменьшение значения  $U_{Rb}$  начинается при дозах порядка  $1 \times 10^{13}$  см<sup>-2</sup> и на зависимости  $U_{Rb}(F_\gamma)$  наблюдается минимум при дозе порядка  $5-8 \times 10^{15}$  см<sup>-2</sup>.

На зависимости  $U_F(F_e)$  (кр. 3), начиная с

$F_e=5 \times 10^{14}$  см<sup>-2</sup>, наблюдается увеличение значения  $U_F$ , которое коррелирует с участком роста на зависимости  $U_{Rb}(Fe)$ . В случае облучения гамма-квантами такой зависимости не наблюдается (кр. 4).

На рис. 2 приведены зависимости  $U_{Rb}$  от  $T_{irr}$  (кр. 1) и от  $t_{ann}$  после облучения (кр. 2).

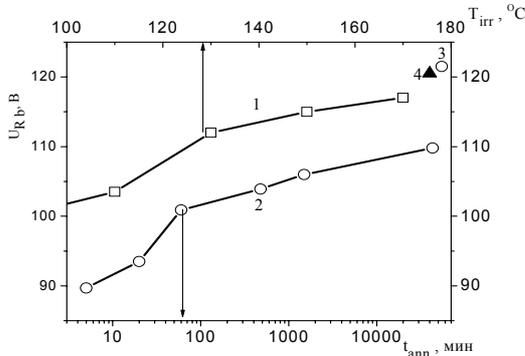


Рис. 2. 1 - зависимость  $U_{Rb}$  при  $I_R=5$  мА от  $T_{irr}$ ; ( $F_e=2 \times 10^{14}$  см<sup>-2</sup>); 2 - зависимость  $U_{Rb}$  при  $I_R=5$  мА от  $t_{ann}$  ( $F_e=2 \times 10^{14}$  см<sup>-2</sup>); 3 - значение  $U_{Rb}$  для необлученной структуры; 4 - значению  $U_{Rb}$  после отжига при 120°C в течение 20 мин. облученной и выдержанной при комнатной температуре структуры.

Как видно из зависимости 1 на рис. 2, при облучении при повышенных температурах с быстрым прекращением нагрева (уменьшение температуры в зоне облучения до комнатной происходило в течении 1 минуты) не происходит полного отжига введенных при облучении дефектов вплоть до температуры облучения 170°C, хотя при отжиге в течение 20 мин при 120°C наблюдается практически полное восстановление  $U_{Rb}$  (точки 3 и 4 на рис. 2).

На зависимости  $U_{Rb}$  от времени выдержки при температуре 20°C (кр. 2) наблюдается два различных участка. На первом участке (3-60 мин) наблюдается быстрое восстановление  $U_{Rb}$ , затем ход восстановления замедляется и даже при выдержке в течение 30 дней (и даже 1 года) не наблюдается полного восстановления значения  $U_{Rb}$ .

На рис. 3 приведены DLTS спектры структур, облученных электронами ( $E=6$  МэВ  $F_e=2 \times 10^{14}$  см<sup>-2</sup>) и отожженных затем при 20-120°C. На спектре наблюдается, по крайней мере, четыре максимума, обусловленные эмиссией электронов с ловушек глубоких уровней. Значения энергии активации эмиссии электронов и сечения захвата оказались равными 0,17 эВ и  $5,5 \times 10^{-14}$  см<sup>2</sup> для ловушки E1, 0,23 эВ и  $5,3 \times 10^{-15}$  см<sup>2</sup> для ловушки E2, 0,42 эВ и  $2,2 \times 10^{-14}$  см<sup>2</sup> для ловушки E4.

Сравнение параметров ловушек с известными из литературы значениями для радиационных дефектов в кристаллах Cz-Si позволило сделать вывод, что ловушка E1 соответствует акцепторному уровню комплекса вакансия-кислород (V-O) (А-центр), а ловушки E2 и E4 второму и третьему акцепторным уровням дивакансии [6-8]. Форма и поведение максимума E3 отличается от анало-

гичных характеристик трех других максимумов на спектре, Во-первых, левое (низкотемпературное) плечо максимума E3 шире, чем правое (высокотемпературное) плечо. Вторая особенность – это то, что максимум пика E3 смещается в область более низких температур по мере увеличения температуры отжига.

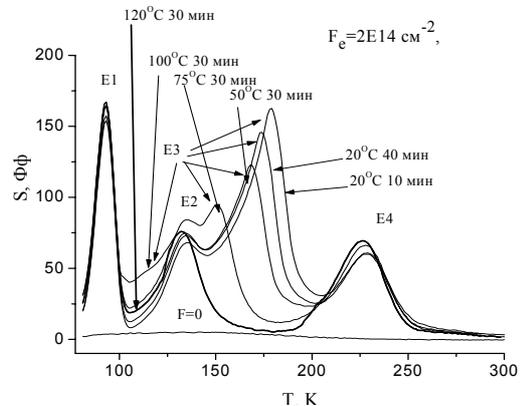


Рис. 3. DLTS спектры структуры, облученной электронами  $F_e=2 \times 10^{14}$  см<sup>-2</sup> и подвергнутой 30 мин. изохронному отжигу при различных температурах, указанных на рисунке. Спектры измерены при окне скоростей  $(5,23 \text{ мс})^{-1}$ .

Можно предположить, что сигнал ловушки E3 определяется центрами с непрерывным набором энергий активации, которые наблюдались ранее в МОП и МДП структурах [9,10], и которые также трансформируются в ходе отжига. Данные уровни могут относиться к зарядовым состояниям, которые образуются во время облучения в периферийном защитном слое SiO<sub>2</sub>.

На рис. 4 приведены спектры DLTS, для различных температур отжига структур.

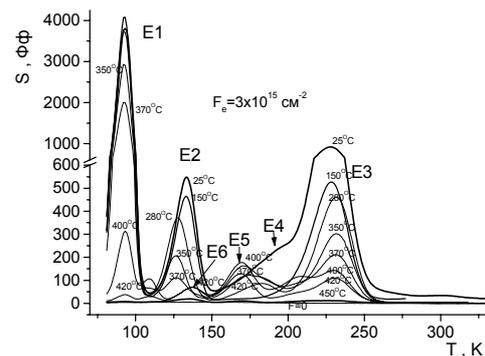


Рис. 4. DLTS спектры структур, облученных флюенсом электронов  $3 \times 10^{15}$  см<sup>-2</sup> и подвергнутых 30 мин. изохронному отжигу в диапазоне температур 20-450°C. Спектры измерены при окне скоростей  $(5,23 \text{ мс})^{-1}$ .

Видно, что уровни отжигаются в диапазоне температур 280-450°C, причем процесс отжига сопровождается образованием и отжигом двух новых уровней дефектов E5 и E6. При этом

происходит полное восстановление значения прямого падения напряжения и напряжения пробоя при больших дозах облучения.

### Обсуждение результатов

Анализ полученных результатов позволяет предположить, что обусловленные облучением изменения напряжения пробоя при начальных стадиях облучения электронами с энергией 6 МэВ могут быть связаны с накоплением заряда в изолирующем слое SiO<sub>2</sub> структур с барьером Шоттки и образованием вследствие этого набора энергетических состояний с непрерывными значениями энергии активации. Введение такого заряда может приводить к понижению высоты потенциального барьера диодов Шоттки на периферии буферного слоя и, как следствие, к снижению напряжения пробоя. Облучение электронами с флюенсами выше  $5 \times 10^{14}$  см<sup>-2</sup> и гамма-квантами с дозами выше  $1 \times 10^{16}$  см<sup>-2</sup> приводит к увеличению удельного сопротивления материала базы, что, по-видимому, является одной из основных причин наличия участка роста на зависимости  $U_{Rb}(Fe, F\gamma)$  (рис. 1 кр.1,2). Зависимость  $U_{Rb}(Fe)$  в диапазоне флюенсов  $5 \times 10^{14}$  см<sup>-2</sup>- $3 \times 10^{16}$  см<sup>-2</sup> коррелирует с зависимостью  $U_F(Fe)$  (рис. 1 кр. 3). По-видимому, наблюдаемые изменения на зависимости  $U_F(Fe)$  могут быть связаны с обусловленными облучением изменениями удельного сопротивления эпитаксиального слоя. Отсутствие существенных изменений  $U_F$  при облучении гамма-квантами может быть связано с тем, что изменения параметра  $U_{Rb}$ , в этом случае происходят в диапазоне доз гамма-квантов в 20-30 раз меньшей, чем электронов, если сравнивать дозы по эффективности их воздействия на объемные характеристики кремния [2].

### Заключение

Таким образом, наблюдаемое поведение параметров электронно-облученных диодов Шоттки при отжиге в интервале температур 20-450°C обусловлено кинетикой накопления и отжига дефектов, образующихся как в объеме эпитаксиального кремния, так и в периферийном изолирующем слое SiO<sub>2</sub>.

### Список литературы

1. Huang, A. Q. Recent developments of power semiconductor devices // VPEC Seminar Proceedings, September. – 1995. - P. 1–9.
2. Коршунов Ф.П., Гатальский Г.В., Иванов Г.М. Радиационные эффекты в полупроводниковых приборах. - Мн.: Наука и техника, 1978. – 232 с.
3. Lewerentz B. M. S., Svensson B. G. // Physica Status Solidi (a). – 2006. – V. 114. – 2. - P. K147 - K151.
4. Shakirov U. A., Yunusov M. S. // Physica Status Solidi (a). – 2006. – V. 37. – 2. - P. 681 – 686.
5. Lang D.V. // J. Appl. Phys. – 1974. – 45. - P. 3023-3032.
6. Brotherton S.D, Bradley P. J. // Appl. Phys. – 1982. – 82. – P. 5720-5728.
7. Ewarye A.O., Sun E. J. // Appl. Phys. – 1976. – 47. - P. 3776-3780.
8. Markevich V.P, Peaker A.R, [et.al] // J. Phys: Condensed Matter. – 2003. – 15. – P. 2779-2789.
9. Антонова И.В, Й. Стано [и др.] // ФТП. – 2001. - Т. 35. - 8. - С. 948-953.
10. Берман Л.С. // ФТП. – 2002. - Т. 36. – 6. - С. 697-700..

## RADIATION DAMAGE ANNEALING IN ELECTRONIC IRRADIATED Mo/n-Si-SCHOTTKY STRUCTURES

Korshunov F.P., Marchenko I. G., Zhdanovich N.E.

Scientific-Practical Materials Research Centre NAS of Belarus

P. Brovki str. 19, Minsk, 220072 Belarus, e-mail: [jdanc@ifftp.bas-net.by](mailto:jdanc@ifftp.bas-net.by)

The work includes the results of research of annealing processes (in the temperature interval of 20-450°C) of defects forming as a result of electronic radiation exposure of Mo/n-Si-Schottky structures with the energy of 6 MeV. The following was determined with the help of DLTS method: the presence of four energetic levels of defects with the following values of activation energy and capture cross-section of majority carriers: E1 – Ec-0.17 eV and  $5.5 \times 10^{-14}$  cm<sup>2</sup>; E2 - Ec-0.23 eV and  $5.3 \times 10^{-15}$  cm<sup>2</sup>; E3- Ec-0.36 eV and  $5.5 \times 10^{-16}$  cm<sup>2</sup>; E4 - Ec-0.42 eV and  $2.2 \times 10^{-14}$  cm<sup>2</sup>. The comparison of traps with the values known from literature for radiation damage in Cz-Si crystals allowed making the conclusion that E1 trap corresponds to the acceptor level of vacancy-oxygen complex (V-O) (A-center), while E2 and E4 traps correspond to the second and the third acceptor levels of divacancy. It appears that E3 level is a superposition of the levels with continuous set of activation energies that are relating to charge states forming in peripheral protective layer of SiO<sub>2</sub>. Full annealing of E3 level occurs at 120°C with complete recovery of structures' breakdown voltage value. The remaining levels are annealed in the temperature range of 280-450°C with the annealing process accompanied by formation of two new defect levels, and with the correlation of disappearance of defects with the full recovery of the value of direct drop in voltage and breakdown voltage.