

ВЛИЯНИЕ РАДИАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ *Mo/n-Si*-СТРУКТУР С БАРЬЕРОМ ШОТТКИ

И. Г. Марченко, Н. Е. Жданович, П. М. Гурин

ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», march@iftt.bas-net.by

В настоящее время в полупроводниковой электронике все более широко используются полупроводниковые диоды с барьерами Шоттки, что обусловлено их высоким быстродействием 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]. В данной работе приводятся результаты исследования влияния радиационных дефектов, введенных в результате облучения электронами с энергией 6 МэВ, на статические параметры: напряжение пробоя (U_b) и прямое падение напряжения (U_F) при различных значениях прямого тока (I_F) диодов с Mo-барьером Шоттки на эпитаксиальном кремнии *n*-типа проводимости.

В работе представлены результаты исследования структур с барьерами Шоттки, изготовленных на полужелезе из кремния КЭМ-0,003 *n*⁺-типа легированного мышьяком с удельным сопротивлением $\rho = 0,003$ Ом·см толщиной 340 ± 20 мкм, на которую методом эпитаксии наносился слой кремния легированного фосфором с удельным сопротивлением $\rho = 2,6\text{--}3,0$ Ом·см толщиной $8,0\text{--}8,8$ мкм. У структур создавалась охранный кольцо толщиной $1,1\text{--}1,4$ мкм с поверхностным сопротивлением $R_s = 1000 \pm 50$ Ом и по периферии наносился защитный слой из двуоксида кремния толщиной $0,65\text{--}1,0$ мкм. В качестве барьера использовался слой молибдена (Mo) марки МЧВП толщиной $0,3 \pm 0,03$ мкм. Площадь кристаллов структур составляла $8,6$ мм².

Исследуемые структуры облучались электронами с энергией 6 МэВ на ускорителе электронов «Электроника У-003» при комнатной температуре в пассивном режиме. Интенсивность потока электронов составляла $2 \cdot 10^{12}$ см⁻²с⁻¹.

У исследуемых структур до и после облучения проводилось измерение прямого падения напряжения U_F , и обратных вольт-амперных характеристик (ВАХ). Определение параметров радиационных дефектов осуществлялось с использованием метода нестационарной спектроскопии глубоких уровней DLTS [5]. С помощью данного метода определялись концентрация глубоких уровней, энергия активации эмиссии носителей заряда и сечения захвата носителей на эти уровни.

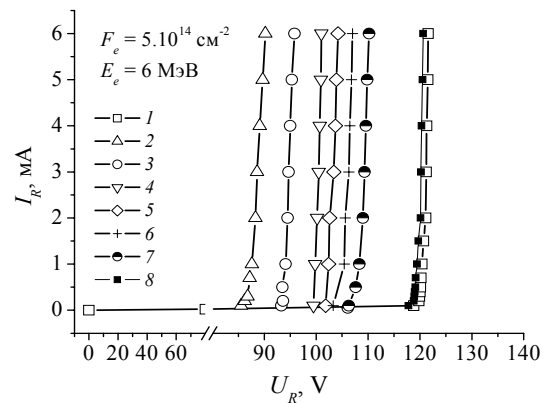


Рис. 1. Обратные вольт-амперные характеристики Mo-диодов Шоттки, измеренные при температуре 20 °C: 1 — до облучения и после облучения электронами с энергией 6 МэВ флюенсом $5 \cdot 10^{14}$ см⁻² и последующего изотермического отжига при комнатной температуре в течение следующего времени: 2 — 1 мин.; 3 — 20 мин.; 4 — 60 мин.; 5 — 8 часов; 6 — 25 часов; 7 — 30 дней; и 8 — после отжига при температуре 120 °C в течение 20 мин

На рис. 1 приведены обратные ВАХ исследуемых структур, измеренные до облучения (кривая 1) через 1, 20 и 60 мин. после облучения (кривые 2, 3, 4) через 8 и 25 часов после облучения (кривые 5, 6) и через 30 суток после облучения (кривые 6, 7), а также после облучения и последующего отжига при температуре 120 °С (кривая 8).

Как видно из рисунка, сразу после облучения наблюдается значительное уменьшение напряжения пробоя образцов (до 30 %), причем на предпробойном участке никаких существенных изменений на зависимости $U_R(I_R)$ не наблюдается. В ходе дальнейшей выдержки приборов при температуре 20 °С происходит увеличение напряжения прибора, причем с наибольшей скоростью этот процесс проходит на протяжении первого часа после облучения. Дальнейшая выдержка на протяжении 30 дней приводит к дополнительному восстановлению значения напряжения пробоя (см. кривую 7), однако полного восстановления данного параметра не наблюдается даже при выдержке на протяжении 1 года.

Обратное напряжение восстанавливается практически до исходного значения после отжига облученных образцов при температуре 120 °С в течение 20 мин (кривая 8).

На рисунке 2 (кривая 1) представлена зависимость напряжения пробоя, измеренного при обратном токе 5 мА от флюенса электронов с энергией 6 МэВ. Измерения проводились на партиях образцов по 5 шт., при этом каждый образец измерялся через десять минут после окончания облучения. Как видно из рисунка уменьшение значения обратного напряжения начинается при флюенсах порядка $2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ и на зависимости $U_R(F)$ наблюдается минимум при флюенсе порядка $4\text{--}6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$. При дальнейшем увеличении F наблюдается рост напряжения пробоя вплоть до значений $F = 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$.

На рисунке 2 (кривая 2) приведена зависимость прямого падения напряжения U_F от флюенса электронов.

Как видно из рисунка 2 (кривая 2) начиная с дозы облучения $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ наблюдается монотонное увеличение значения U_F с увеличением дозы электронного облучения.

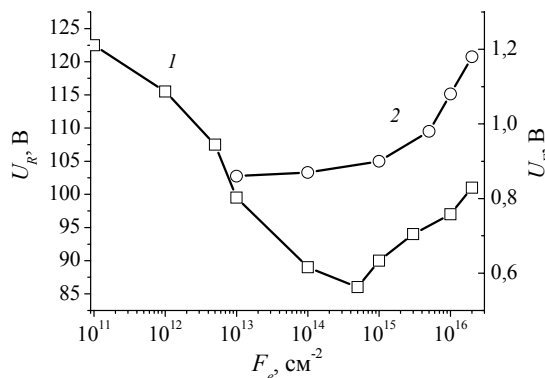


Рис. 2. 1 – зависимость напряжения пробоя U_b при $I_R = 5 \text{ мА}$ от суммарной дозы электронов с энергией 6 МэВ;
2 – зависимость прямого падения напряжения U_F , измеренного при токе $I_F = 20 \text{ А}$ от суммарной дозы электронов с энергией 6 МэВ

На рисунке 3 приведены DLTS спектры Мо диодов Шоттки, облученных электронами с энергией 6 МэВ флюенсом $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ и отожженных впоследствии при температурах 20–120 °С.

На приведенном на рисунке 3 спектре наблюдается, по крайней мере, четыре максимума, обусловленные эмиссией электронов с ловушек глубоких уровней. Электронные характеристики центров определялись из зависимостей Аррениуса по T^2 -скорректированным скоростям электронной эмиссии, измеренным при различных окнах скоростей [5]. Значения энергии активации эмиссии электронов и сечения захвата оказались равными 0,17 эВ и $5,5 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2$ для

вушки E1, 0,23 эВ и $5,3 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ для ловушки E2, 0,42 эВ и $2,2 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2$ 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) (A-центр), а ловушки E2 и E4 второму и третьему акцепторным уровням дивакансии [6–8]. Форма и поведение максимума E3 отличается от аналогичных характеристик трех других максимумов на спектре. Во-первых, левое (низкотемпературное) плечо максимума E3 шире чем правое (высокотемпературное) плечо. Вторая необычная особенность – это то, что максимум пика E3 смещается в область более низких температур по мере увеличения температуры отжига. 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 SiO₂.

Анализ полученных результатов позволяет предположить, что обусловленные облучением изменения напряжения пробоя при начальных стадиях облучения электронами с энергией 6 МэВ может быть связано с накоплением заряда в изолирующем слое SiO₂ 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 дозами выше $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ приводит к увеличению удельного сопротивления материала базы, что является одной из основных причин наличия участка роста на зависимости $U_b(F)$ (рис. 2, кривая 1). Зависимость $U_b(F)$ в диапазоне флюенсов $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2} - 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ коррелирует зависимостью $U_F(F)$ (рис. 2, кривая 2). Повидимому, наблюдаемые изменения на зависимости $U_F(F)$ могут быть связаны с обусловленными облучением изменениями удельного сопротивления эпитаксиального слоя.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант Ф10 – 123).

ЛИТЕРАТУРА

1. Huang, A. Q. Recent developments of power semiconductor devices / A. Q. Huang // VPEC Seminar Proceedings, September 1995, p. 1.

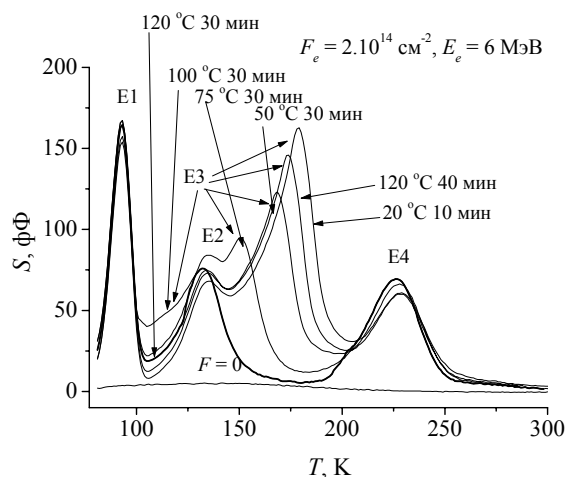


Рис. 3. DLTS спектры Мо диодов Шоттки облученных флюенсом электронов $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ и подвергнутых 30 мин отжигу при различных температурах, указанных на рисунке. Спектры измерены при окне скоростей $(5,23 \text{ мс})^{-1}$

2. *Claeys, C.* Radiation Effects in Advanced Semiconductor Materials and Devices. / C. Claeys, E. Simoen // Springer, Berlin, 2002.
3. *Lewerentz, B. M. S.* Capacitance-Voltage Characteristics of Au-Si Schottky Diodes: Influence of Electron Irradiation / B. M. S. Lewerentz, B. G. Svensson // Physica Status Solidi (a). 2006, V. 114. № 2. P. K147.
4. *Shakirov, U. A.* Influence of X-irradiation on silicon Schottky diodes / U. A. Shakirov, M. S. Yunusov // Physica Status Solidi (a). 2006, V. 37. № 2. P. 681.
5. *Lang, D. V.* Deep-level transient spectroscopy: A new method to characterize traps in semiconductors / D. V. Lang // J Appl Phys. 1974. V. 45. P. 3023.
6. *Brotherton, S. D.* Defect production and lifetime control in electron and gamma-irradiated silicon / S. D. Brotherton, P. J. Bradley // Appl Phys. 1982. V. 82. P. 5720.
7. *Ewarye A. O., Sun E. J.* // Appl Phys. 1976. V. 47. P. 3776.
8. *Markevich, V. P.* Defects Reactions Associated with Divacancy Elimination in Silicon / V. P. Markevich [et al.] // J Phys: Condensed Matter. 2003. V. 15. P. S2779.
9. *Антонова, И. В.* Состояния на границах и центры с глубокими уровнями в структурах / И. В. Антонова [и др.] // ФТП. 2001. Т. 35. В. 8. С. 948.
10. *Берман, Л. С.* Моделирование энергетического спектра поверхностных состояний структур металл–диэлектрик–полупроводник с учетом тока через диэлектрик / Л. С. Берман // ФТП. 2002. Т. 36. В. 6. С. 697.