

06;12

©1993 г.

ПАРАМЕТРЫ СИЛОВЫХ КРЕМНИЕВЫХ ДИОДОВ, ОБЛУЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОНАМИ МАЛЫХ ЭНЕРГИЙ

*В.Н.Аринюшкин, Л.С.Берман, Е.М.Гейфман, А.В.Конюхов,
В.Н.Ломасов, Т.Т.Мнацаканов, А.Д.Ременюк*

Исследовано влияние облучения электронами с энергией 600 и 900 кэВ на распределение прямого падения напряжения и переходные характеристики силовых кремниевых диодов. Показано, что использование электронов малых энергий, дающих экспоненциальное убывание радиационных дефектов в глубь диода, приводит к улучшению коэффициента формы диода. Кроме того, в высоковольтных диодах с малым временем обратного восстановления уменьшается прямое падение напряжения по сравнению с равномерным введением радиационных дефектов.

Введение

Важнейшими параметрами силовых диодов являются падение напряжения при прямом токе $V_{пр}$, обратный ток $V_{обр}$, а также параметры переходного процесса выключения.

Для повышения быстродействия диодов используется управляемое уменьшение времени жизни неосновных носителей заряда $\tau_{нз}$ путем управляемого введения рекомбинационных центров (РЦ) как специальных примесей с глубокими уровнями (например, золото, платина), так и радиационных дефектов (РД). Неоднородное распределение РЦ по толщине базы (большая концентрация вблизи $p-n$ -перехода и ее уменьшение в глубь базы) и соответственно $\tau_{нз}$ (малое вблизи $p-n$ -перехода и его возрастание в глубь базы) позволяет улучшить параметры силовых диодов по сравнению с однородным распределением [1,2].

Неоднородное распределение РД может быть осуществлено путем облучения α -частицами или протонами с энергией в несколько МэВ [1,3]. При этом образуются РЦ: А-центры (комплекс вакансия-кислород) и дивакансии с концентрациями одного порядка. Дивакансии являются источником обратного тока, а возможность их отжига затрудняется тем, что их температура отжига (300–350°C) близка к температуре отжига А-центров. Кроме того, при облучении протонами образуются РД, являющиеся мелкими донорами, что приводит к неконтролируемому изменению сопротивления базы. Температура отжига этих мелких доноров $T = 500-600^\circ\text{C}$, т.е. значительно выше температуры отжига А-центров.

В работах [4,5] показано, что при облучении электронами малых энергий ($E = 350-600$ кэВ) концентрация А-центров убывает в глубь базы по

$$N_A = N_{\text{АП}} \exp(-x/L), \quad (1)$$

где $N_{\text{АП}}$ — концентрация А-центров на поверхности, x — расстояние от поверхности, L — характеристическая длина. Энергии облучающих электронов $E = 350, 400, 450$ и 600 кэВ соответствуют $L = 30, 50, 100$ и 300 мкм. При $E = 600$ кэВ отношение концентрации дивакансий к концентрации А-центров меньше 0.01.

Цель настоящей работы — исследование силовых кремниевых диодов, облученных электронами малых энергий.

Образцы и методика эксперимента

Диоды были изготовлены из нейтронно-легированного кремния с удельным сопротивлением $\rho \approx 140$ Ом·см. p^+ - n -переход создавался диффузией бора и алюминия ($T = 1250^\circ\text{C}$, $t = 38$ ч), глубина залегания p^+ - n -перехода $x_{jp} \approx 88$ мкм, толщина пластины $W = 360$ мкм. С другой стороны диода после сошлифовки p -слоя проведена диффузия фосфора на глубину 25–30 мкм для создания n^+ -слоя, на который наносился омический контакт.

Облучение проводилось в ускорителе электронов, стабильность энергии электронов ± 3 кэВ, интенсивность потока 10^{13} см $^{-2}$ ·с $^{-1}$. Использовались следующие условия облучения: для образцов группы 1 $E = 600$ кэВ, доза $\Phi = 9 \cdot 10^{15}$ см $^{-2}$; для образцов группы 2 $E = 900$ кэВ, доза $\Phi = 8.4 \cdot 10^{14}$ см $^{-2}$ была выбрана таким образом, чтобы длительность первой фазы процесса выключения по Лэксу t_0 [6] была такой же, что и для образцов группы 1; образцы группы 3 (контрольной) не были облучены. Все образцы из одной технологической партии, в каждой группе по 6 образцов.

Измерялись вольт-амперные характеристики всех образцов. Для части образцов измерялось распределение прямого падения напряжения $V(x)$ путем перемещения зонда поперек плоско отшлифованного торца разрезанного диода. Точность установки зонда 5 мкм. Измерения выполнялись при плотности тока $j = 200$ А/см 2 .

Время жизни дырок в базе τ_p измерялось методом Лэкса при $j = 0.1$ А/см 2 . Параметры процесса обратного восстановления определялись по стандартной методике [7] (рис. 1).

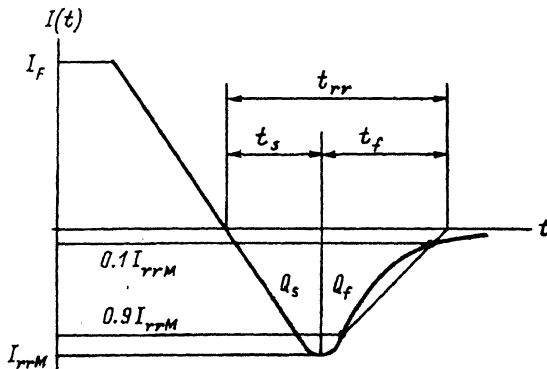


Рис. 1. Параметры процесса обратного восстановления.

I_F — амплитуда прямого тока, I_{rrM} — амплитуда выброса обратного тока, $Q_{rr} = Q_s + Q_f$ — заряд обратного восстановления, t_s — время запаздывания обратного напряжения, t_f — время спада обратного тока, $t_{rr} = t_s + t_f$ — время обратного восстановления.

Результаты измерений и их обсуждение

Основные результаты измерений сведены в таблицу. Облучение привело к увеличению прямого падения напряжения (одинаковому для групп 1 и 2), что объясняется уменьшением τ_p от 50 до 6.5 мкс. Время обратного восстановления t_{rr} для групп 1 и 2 почти одинаково, однако уменьшение энергии электронов позволяет получить более мягкий процесс восстановления — уменьшение коэффициента формы, а также уменьшение амплитуды выброса обратного тока и заряда обратного восстановления. Таким образом, уменьшение энергии облучающих электронов приводит к улучшению параметров силовых приборов.

| Номер группы | E , кэВ | $V_{пр}$, В | Q_{rr} , мкК | I_{rrM} , А | t_{rr} , мкс | k_{rr} | τ_p , мкс |
|--------------|--------------|--------------|----------------|---------------|----------------|----------|----------------|
| 1 | 600 | 2.1 | 109 | 73 | 3.4 | 0.28 | 6.5 |
| 2 | 900 | 2.12 | 153 | 112 | 3.3 | 0.66 | 6.5 |
| 3 | Необлученные | 1.17 | 374 | 112 | 8.1 | 0.64 | 50 |

Примечание. Приведены средние для каждой группы результаты. $k_{rr} = t_s/t_f$ — коэффициент формы (значения k_{rr} даны при $0.1I_{rrM}$). Остальные обозначения даны в подписи к рис. 1.

На рис. 2 приведены зависимости $V(x)$ для диодов, облученных при $E = 600$ и 900 кэВ. Их сравнение позволяет сделать следующие выводы.

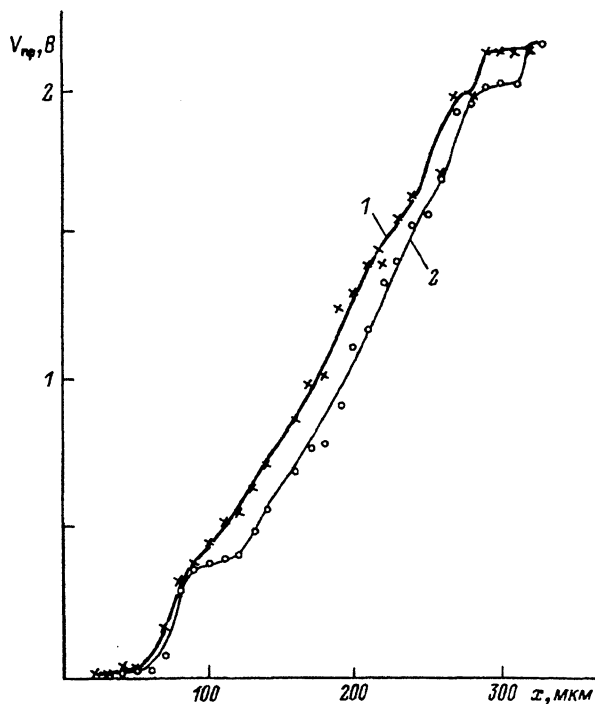


Рис. 2. Распределение прямого падения напряжения по глубине диодов, облученных электронами с энергией 600 кэВ.

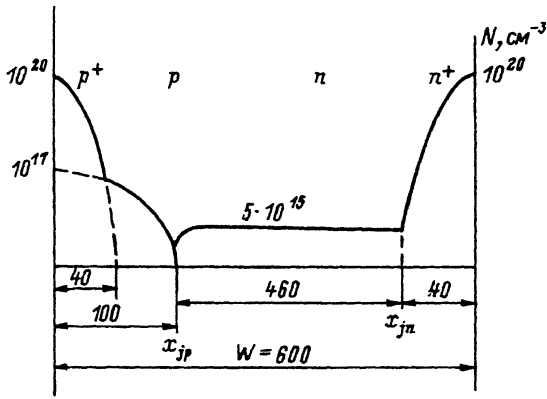


Рис. 3. Схема диодной структуры. x_{jp} — глубина p - n -перехода, W — толщина базы, x_{jn} — глубина n^+ -слоя; размеры даны в мкм.

а) В сильно легированной части p -области можно пренебречь падением напряжения (при $x = 60$ мкм имеем $V \leq 0.02-0.03$ В). В менее легированной части p -области ($60 \text{ мкм} < x < 80$ мкм) падение напряжения почти одинаково для образцов, облученных при разных энергиях ($\Delta V \approx 0.3$ В).

б) В базе при $80 < x < 130$ мкм для $E = 600$ кэВ (кривая 1) имеем $\Delta V = 0.47$ В, а для $E = 900$ кэВ (кривая 2) — 0.30 В. Это различие объясняется следующим образом. Введение РЦ приводит к увеличению прямого падения напряжения, зависящему как от концентрации, так и от распределения РЦ. С другой стороны, инжекция дырок приводит к уменьшению сопротивления базы на расстоянии порядка диффузионной длины L_p от p - n -перехода. При $E = 900$ кэВ (распределение РЦ в базе равномерное) имеем $L_p = 75$ мкм. Действительно, в интервале $80 < x < 130$ мкм ΔV изменяется мало. При $E = 600$ кэВ концентрация РЦ спадает в глубь базы, вблизи p - n -перехода она больше, чем в случае $E = 900$ кэВ (при равных средних τ_p). Поэтому вблизи p -области сопротивление базы и прямое падение напряжения больше в случае $E = 600$ кэВ.

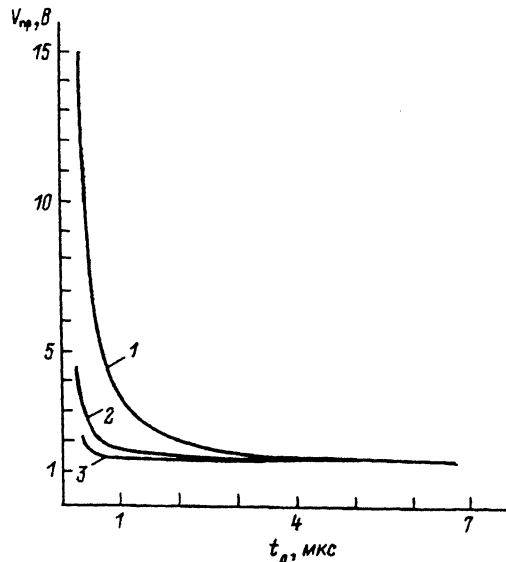


Рис. 4. Зависимость прямого падения напряжения V_{np} от длительности первой фазы процесса выключения t_0 . L , мкм: 1 — ∞ ($N_{pц} = \text{const}$), 2 — 100, 3 — 50.

в) В базе при $150 < x < 320$ мкм для $E = 600$ кэВ имеем $\Delta V = 1.3$ В, а для $E = 900$ кэВ — 1.5 В. Большее значение для образцов группы 2 объясняется большей концентрацией РЦ в этом интервале для образцов этой группы.

г) Скачок ΔV при 320 мкм объясняется падением напряжения на контакте к области n^+ .

Результаты эксперимента сравниваются с расчетом. Расчет зависимости $V_{\text{пр}}$ от t_0 (длительности первой фазы выключения по Лэксу при отношении прямого тока к обратному 0,5, $j = 140$ А/см² и сопротивлении нагрузки 1 Ом) был выполнен для структуры, показанной на рис. 3. Метод расчета изложен в [8–10]. В расчете использовались параметры А-центров: энергия $E = E_c - 0.17$ эВ, сечение захвата электрона и дырки $\sigma_n = 10^{-15}$ см², $\sigma_p = 3 \cdot 10^{14}$ см². Результаты расчета приведены на рис. 4 для случаев равномерного распределения концентрации РЦ по глубине базы (кривая 1) и для случая убывания концентрации РЦ в глубь базы по формуле (1) (кривая 2 и 3). Из сравнения расчетных зависимостей следует, что при $t_0 < 3$ мкс экспоненциальное распределение $N_{\text{РЦ}}(x)$ позволяет значительно уменьшить $V_{\text{пр}}$. При $t_0 > 4-5$ мкс зависимости $V_{\text{пр}}(t_0)$ близки как при равномерном, так и при экспоненциальном распределении $N_{\text{РЦ}}(x)$. Результаты расчета согласуются с экспериментом: при $\tau_p = 6.5$ мкс ($t_0 = 3.2$ мкс) для $E = 600$ кэВ и для $E = 900$ кэВ значения $V_{\text{пр}}$ близки.

Выводы

Уменьшение концентрации рекомбинационных центров в глубь базы дает следующие преимущества по сравнению с их равномерным распределением: 1) улучшение коэффициента формы процесса обратного восстановления, 2) при длительности первой фазы обратного восстановления $t_0 < 3$ мкс уменьшение прямого падения напряжения.

Список литературы

- [1] Wondrak W., Silber D. // Physica. 1985. Bd 129(B,C). N 1-3. P. 322-326.
- [2] Велмре Э.Э., Дерменжи П.Г., Удал А.Э. // Электротехника. 1984. № 3. С. 47-51.
- [3] Берман Л.С., Маляренко А.М., Ременюк А.Д. и др. // ФТП. 1988. Т. 22. Вып. 5. С. 844-848.
- [4] Берман Л.С., Витовский Н.А., Воронков В.В. и др. // ФТП. 1989. Т. 23. Вып. 4. С. 753-756.
- [5] Берман Л.С., Витовский Н.А., Ломасов В.Н., Ткаченко В.Н. // ФТП. 1990. Т. 24. Вып. 10. С. 1816-1822.
- [6] Lax M., Neustadter S.F. // J. Appl. Phys. 1954. Vol. 25. N 6. P. 1148-1155.
- [7] Евсеев Ю.А. Полупроводниковые приборы для мощных преобразовательных устройств. М.: Энергия, 1978. 192 с.
- [8] Mnatsakanov T.T., Rostovtsev I.L., Philatov N.I. // Sol. St. Electr. 1987. Vol. 30. N 6. P. 579-585.
- [9] Мнацаканов Т.Т., Ростовцев И.Л., Филатов Н.И. // ФТП. 1984. Т. 18. Вып. 7. С. 1293-1996.
- [10] Мнацаканов Т.Т., Ростовцев И.Л., Филатов Н.И. // Электронное моделирование. 1986. Т. 8. № 1. С. 40-43.