

06

Влияние электронного облучения, ослабленного алюминиевыми экранами, на электрические параметры кремниевых $p-n$ -структур

© И.Г. Марченко, Н.Е. Жданович

Государственное научно-производственное объединение
„Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению“,
Минск
E-mail: march@ifftp.bas.-net.by

Поступило в Редакцию 14 сентября 2009 г.
В окончательной редакции 21 января 2010 г.

Поведено исследование поведения времени жизни неравновесных носителей заряда τ , обратного тока I_R и прямой ВАХ в кремниевых p^+-n-n^+ -структурах при облучении электронами с энергией 6 MeV через плоские алюминиевые экраны толщиной d от 2 до 14 мм (массовой толщиной 0.5–3.8 g/cm²). В том случае, когда $d = 14$ мм (3.8 g/cm²), структуры обнаруживают существенно меньшее изменение I_R и ВАХ по сравнению с экранами $d = 2-12$ мм при одинаковом снижении в процессе облучения величины τ : от 20 до 1.5 μ s.

Известно [1], что при облучении кремниевых диодов любыми частицами и гамма-квантами с достаточно высокой энергией всегда происходит деградация их вентильных свойств, т. е. уменьшение прямой и увеличение обратной проводимости. Падение прямого напряжения при заданном токе и обратный ток при фиксированном смещении растут, а время восстановления обратного сопротивления, непосредственно связанное с временем жизни неосновных носителей заряда в базовой области диода, падает.

В случае технологического облучения при изготовлении быстродействующих приборов (см., например, [2–5]) добиваются компромиссного снижения времени восстановления обратного сопротивления диода (времени выключения транзистора или тиристора) при допустимом изменении (увеличении) обратных токов и потерь мощности в проводящем состоянии. Однако актуальной задачей все еще остается

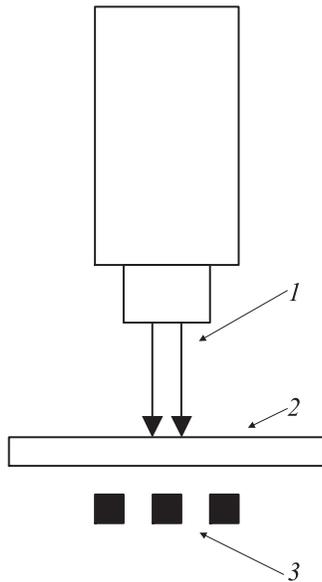


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 — электронный пучок ускорителя, 2 — экранирующая система, 3 — образцы.

достижение оптимального сочетания характеристик проводимости и переключения, токов утечки и их температурных коэффициентов в облученных быстродействующих приборах [6–8].

В настоящей работе наблюдалось улучшение соотношения τ , I_R и прямой ВАХ диодных структур, экранируемых в процессе высокоэнергетического электронного облучения алюминиевыми пластинами. Объектами исследования служили $p^+ - n - n^+$ -структуры (в дальнейшем $p - n$ -структуры), изготовленные на КЭФ-32, имеющие площадь $\sim 5 \text{ mm}^2$, толщину p^+ -области $\sim 60 \mu\text{m}$, n -области $\sim 300 \mu\text{m}$, n^+ -области $\sim 20 \mu\text{m}$. Для облучения использовался линейный импульсный ускоритель электронов с энергией частиц 6 MeV (длительность импульса $5 \mu\text{s}$, частота следования импульсов 200 Hz). Образцы располагались в плоскости, перпендикулярной к направлению падающего электронного пучка, а облучение велось со стороны p^+ -области структуры. Между выходным окном ускорителя 1 и образцами 3 размещалась экранирующая система 2 из набора алюминиевых пластин,

позволяющая изменять толщину экрана от 2 до 14 мм и осуществлять его охлаждение продувкой парами азота (рис. 1). Интенсивность пучка электронов, падающего на экран (или на образец без экрана), составляла $1 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, температура в зоне облучения не превышала 300 К.

Для эксперимента были отобраны образцы, имеющие до облучения одинаковые прямые и обратные вольт-амперные характеристики, значение $\tau \sim 20 \mu\text{s}$ и одинаковую величину барьерной емкости p - n -структур. ВАХ снимались при комнатной температуре в импульсном режиме (длительность импульса $200 \mu\text{s}$), а обратный ток контролировался при смещении 1000 В. Время жизни неосновных носителей заряда (ННЗ) в n -базе p - n -структур контролировалось методом Лэкса [9]. Учитывая, что концентрация основных носителей в области базы составляет $\sim 1.5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, условия опыта (величина импульса прямого тока 1 А при длительности до $80 \mu\text{s}$) соответствовали высокому уровню инжекции. Для получения информации о радиационных дефектах (РД) применялась методика нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней (DLTS). Спектры снимались при обратном смещении -10 V , скорости эмиссии $(0.523 \text{ ms})^{-1}$.

В нашем опыте облучение велось начиная с флюенса электронов $\Phi = 5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$. При такой дозе облучения (без экрана) измеряемое время жизни в образце снижалось до $1.5 \mu\text{s}$. При облучении экранированных образцов флюенс фиксировался, когда время жизни также снижалось до этого уровня ($1.5 \mu\text{s}$). Таким образом, на завершающем этапе облучения мы имели набор p - n -структур, облученных через экраны различной толщины, но имеющие одинаковое время жизни ННЗ в базовой n -области. На рис. 2 (кривая 1) показана зависимость флюенса электронов, необходимого для снижения τ в образцах до $1.5 \mu\text{s}$, от толщины экрана. Видно, что Φ растет пропорционально толщине экрана. Это согласуется с известным выражением для энергетических потерь быстрых электронов в материале экрана (Al) [10]. Интенсивность пучка электронов при этом уменьшается почти экспоненциально с ростом толщины экрана (поглотителя).

Здесь же, на рис. 2 (кривая 2), приведена зависимость приращения обратного тока $\Delta I_R = I_{R\Phi} - I_{R0}$ (I_{R0} , $I_{R\Phi}$ — величина тока до и после облучения соответственно) от флюенса (толщины экрана) в облученном образце. Видно, что с ростом Φ величина ΔI_R падает. Причем в интервале d от 10 до 14 мм ΔI_R снижается до 5 раз. Механизм этого явления остается пока невыясненным.

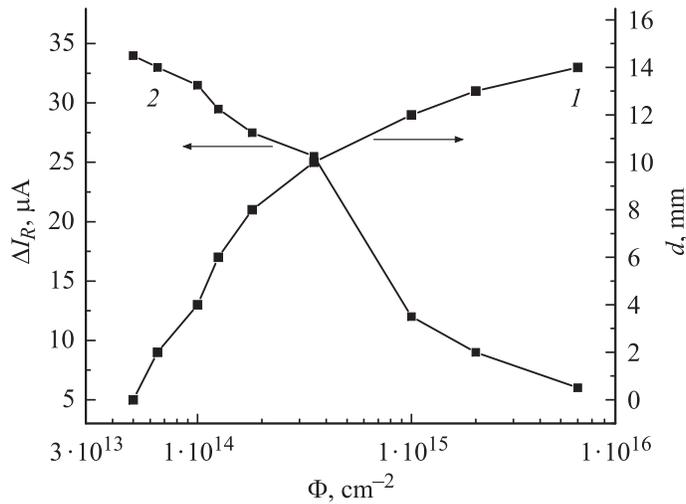


Рис. 2. Зависимость приращения обратного тока p^+n-n^+ -структуры от флюенса облучения (кривая 2) и зависимость флюенса, необходимого для снижения времени жизни носителей заряда с начального значения ($\sim 20 \mu s$) до величины $1.5 \mu s$, от толщины экрана (кривая 1).

На рис. 3 представлены прямые ветви ВАХ образцов, облученных через экраны различной толщины. Причем кривая 2 получена при облучении образца со стороны p^+ -области ($\tau = 1.5 \mu s$), а кривая 3 — со стороны n^+ -области ($\tau = 2.4 \mu s$). В этом случае облучение осуществлялось одинаковой дозой электронов $\Phi = 6 \cdot 10^{15} cm^{-2}$. Как видно из этого рисунка, наблюдается заметное снижение прямого падения напряжения при фиксированной плотности тока для экрана с $d = 14 mm$ по сравнению с экранами меньшей толщины.

Таким образом, экранируя приборную структуру при высокоэнергетическом электронном облучении алюминиевыми пластинами определенной толщины, действительно можно получить улучшенное соотношение ее основных электрофизических параметров.

Одна из возможных причин наблюдаемого эффекта может быть связана с особенностями токопереноса в базе $p-n$ -структур с неоднородностью рекомбинационных свойств. Дело в том, что ввиду значительной толщины n -области структуры падающий электронный

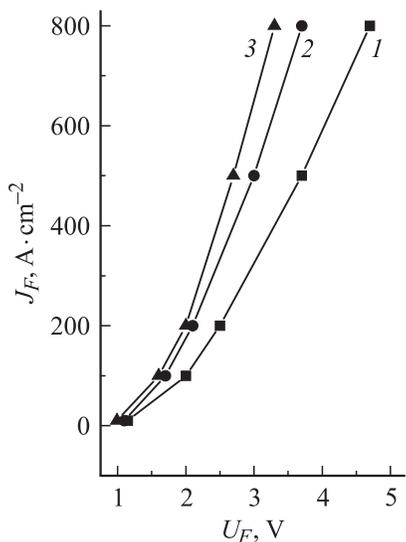


Рис. 3. Прямые ветви ВАХ облученных образцов: 1 — для экрана с толщиной 2–12 мм, 2, 3 — для экрана 14 мм.

поток, предварительно ослабленный алюминиевым экраном (14 мм) до величины энергии, близкой к порогу дефектообразования в кремнии, дополнительно замедляется, проходя по базе. В результате эта область структуры легируется РД неоднородно [10], формируя соответствующим образом ВАХ облученных образцов.

При взаимодействии с материалами экрана электронное облучение изменяется не только по интенсивности и энергии из-за наличия экранирования, но и по характеру — из-за возникновения вторичных излучений. Наиболее значительная вторичная радиация — это тормозное излучение, создаваемое при замедлении электронов. Оно представляет собой гамма-излучение с непрерывным спектром, испускаемое в основном в направлении проникновения электронов. Средняя энергия гамма-излучения равна приблизительно одной трети от первоначальной энергии электронов. Интенсивность тормозного излучения зависит линейно от атомного номера материала и квадратично от первоначальной энергии электронов. Как показано в работе [12], потоки фотонов с энергией свыше 100 keV для экранов из алюминия при электронном

облучении с энергией до 6 MeV в среднем более чем на три порядка ниже по сравнению с исходным потоком электронов. Так что за времена облучения, используемые в наших опытах (от 25 s при облучении без экрана и до 3000 s при облучении с экраном), поток тормозного излучения по нашим оценкам не превышает $3 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ и не дает заметного дефектообразующего вклада в изменение характеристик структур.

Что касается DLTS-спектров, которые мы фиксировали в слое в непосредственной близости от pn -перехода, то в контролируемых образцах в верхней половине запрещенной зоны кремния в общей сложности наблюдаются четыре энергетических уровня. Во-первых, дефект E1-A-центр с уровнем $E_C - 0.17 \text{ eV}$ (E_C — дно зоны проводимости) и сечением захвата электронов $\sigma_n = 2 \cdot 10^{-14} \text{ cm}^2$. Далее уровень E2 ($E_C - 0.23 \text{ eV}$, $\sigma_n = 2 \cdot 10^{-16} \text{ cm}^2$), принадлежащий двукратно отрицательному заряженному состоянию дивакансии. Затем пик E3 ($E_C - 0.31 \text{ eV}$, $\sigma_n = 2 \cdot 10^{-17} \text{ cm}^2$). За пик E4 ($E_C - 0.42 \text{ eV}$, $\sigma_n = 2 \cdot 10^{-16} \text{ cm}^2$) ответственны, по крайней мере, два центра: E-центр (вакансия — фосфор) и дивакансия (однократно отрицательно заряженное состояние). В нижней половине запрещенной зоны, исследованной в режиме с инжекцией дырок, отчетливо проявляется только один центр $E_V + 0.4 \text{ eV}$ (E_V — потолок валентной зоны) с сечением захвата дырок $\sigma_p = 3 \cdot 10^{-14} \text{ cm}^2$. Наблюдавшиеся уровни РД типичны для p - n -структур на n -Si [7].

В целом можно сказать, что система уровней РД качественно совпадает для всех исследованных образцов. Для A-центра, основного рекомбинационного уровня ННЗ в электронно-облученных pn -структурах, получено совпадение по концентрации в образцах с одинаковым временем жизни ННЗ. Различие в DLTS-спектрах в условиях данного эксперимента отмечено для глубоких центров E3 и E4. Их концентрация при максимальной толщине экрана примерно на 25% меньше, чем в образцах, облученных без экрана, что, возможно, и обеспечивает снижение генерационных токов в экранируемых структурах. Следует ожидать, что в глубине базы соотношение концентраций рекомбинационных и генерационных центров будет иным, чем вблизи pn -перехода.

Таким образом, отмеченные особенности поведения параметров $p^+ - n - n^+$ -структур, экранированных в процессе высокоэнергетического электронного облучения пластинами алюминия, могут быть связаны с изменением в этих условиях концентрационного соотношения вводимых РД и характера их распределения в объеме облучаемой структуры.

Вопрос о том, какая из этих двух причин основная, требует дальнейшего исследования.

Авторы выражают благодарность Ф.П. Коршунову за интерес к работе и ее поддержку, а также С.Б. Ластовскому за помощь в проведении DLTS-измерений.

Список литературы

- [1] *Вавилов В.С., Ухин Н.А.* Радиационные эффекты в полупроводниках и полупроводниковых приборах. М.: Атомиздат, 1969. 312 с.
- [2] *Витман В.Ф., Кутлахметов А.В., Решетин В.П., Шаховцов В.И., Шуман В.Б.* // Тез. докл. Республ. совещания „Радиационные повреждения в твердых телах“. Киев, 1974. С. 73–75.
- [3] *Коршунов Ф.П.* // Вестник АН СССР. 1982. № 11. С. 80–87.
- [4] *Патент США № 7049674.* Оpubл. 23.05.2006. Патент Беларуси № 11307. Оpubл. 05.08.2008.
- [5] *Горбань А.Н., Кравчина В.В., Гомольский Д.М., Солодовник А.И.* // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2008. № 3. С. 36–40.
- [6] *Губарев В.Н., Сурма А.М., Ковров А.В., Семенов А.Ю.* // Прикладная физика. 2001. № 4. С. 85–92.
- [7] *Hazdra P., Vobecky J., Dorschner H., Brand K.* // Microelectronics J. 2004. V. 35. P. 249–257.
- [8] *Шукина И., Некрасов М.* // Силовая электроника. 2004. № 1. С. 15–17.
- [9] *Lax V., Neustadter T.J.* // J. Appl. Phys. 1954. V. 25. N 9. P. 1148–1154.
- [10] *Стародубцев В.С., Романов А.М.* Прохождение заряженных частиц через вещество. Ташкент: Изд-во АН УзССР, 1962. 227 с.
- [11] *Берман Л.С., Витовский Н.А., Воронков В.В., Ломасов В.Н., Ременюк А.Д., Ткаченко В.Н., Толстобров М.Г.* // ФТП. 1989. Т. 23. С. 753–756.
- [12] *Stassinopoulos E.G., Raymond James P.* // Proc. IEEE. 1988. V. 76. N 11. P. 23–43.