

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ МЕТОДОВ ОТБОРА БИПОЛЯРНЫХ Si-СТРУКТУР ДЛЯ ЭЛЕКТРОНИКИ, РАБОТАЮЩЕЙ В КОСМОСЕ

И.Г. Марченко

НПЦ НАН Беларуси по материаловедению

ул. П. Бровки, 19, 220072 Минск, Беларусь, тел. +375-17-2841527,

e-mail: march@ifttp.bas-net.by

Исследовано влияние облучения высокоэнергетическими ($E = 6$ МэВ) электронами, используемого для отбраковочных испытаний Si p^+-n – диодов и для отбора образцов с однородной по партии радиационной стойкостью (РС). Показано, что за критерий отбора диодов с равномерной по партии РС можно принять одинаковость относительных изменений времени жизни неравновесных носителей заряда (ННЗ) – дырок τ_p в n -базе диода на начальном этапе облучения в условиях экстремальных температурных колебаний (от плюс 100 на солнечной стороне и до минус 100°C в тени) корпуса космического корабля (МКС) на орбите, дающее возможность аппроксимировать результаты на промежуточные температуры.

Введение

В настоящее время при исследовании космического пространства научная аппаратура все чаще выносятся на внешнюю поверхность искусственного спутника Земли, например, международной космической станции (МКС). Чтобы аппаратура на орбите работала без сбоев в течение расчетного времени, необходим специальный отбор элементной базы, на которой она будет построена. Одно из основных требований, предъявляемых к комплектующим аппаратуру элементам, связано с их отбором по критерию радиационной стойкости (РС) в условиях реальных температурных нагрузок [1,2]. По литературным данным суточные колебания температуры, характерные например, для внешней поверхности МКС на орбите, от плюс 100°C на солнечной стороне и до минус 100°C – в тени.

Цель настоящей работы – показать возможность использования облучения быстрыми электронами в отбраковочных испытаниях биполярных полупроводниковых приборов, связанных с оценкой стабильности их параметров и отбором образцов с однородной по партии радиационной стойкостью.

Основная часть

Основной эксперимент был проведен на низкочастотных p^+-n – диодах, полученных на кремнии n -типа проводимости, легированном фосфором до удельного сопротивления 18 – 30 Ом·см. Краткая техническая характеристика диодов: средний прямой ток при 100°C – 16 А; обратное напряжение – 1300-1800 В; прямое напряжение $\leq 1,35$ В.

Отбирались образцы, имеющие до облучения одинаковые прямые и обратные вольт-амперные характеристики (ВАХ). Для чистоты эксперимента, диоды, обладающие аномально высокой чувствительностью к воздействию ионизирующих излучений были исключены из процедуры испытаний путем предварительной радиационной отбраковки [3].

Параметры ВАХ контролировались в импульсном режиме по общепринятым методи-

кам. Время жизни неравновесных носителей заряда (ННЗ) – дырок τ_p в n -базе диодов определялось по длительности фазы высокой обратной проводимости при переключении диодной структуры из проводящего состояния в закрытое при высоком уровне инжекции [4]. Облучение диодов проводилось на ускорителе электронов с энергией частиц $E_{irr} = 6$ МэВ.

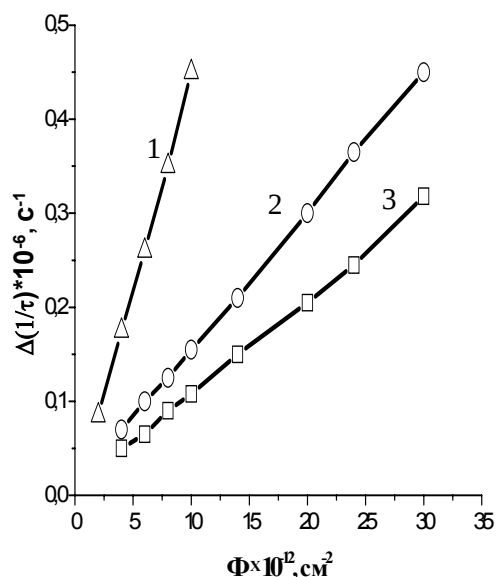


Рис. 1. Влияние облучения электронами с энергией 6 МэВ на обратную величину времени жизни неосновных носителей заряда в базовом слое p^+-n – диодов при различных температурах облучения: T_{irr} – 100 (1), 25 (2) и 100°C.

Общеизвестно, что РС Si структур с p^+-n – переходами определяется устойчивыми изменениями их прямой ветви ВАХ, обусловленными уменьшением диффузионной длины носителей заряда и, как следствие, степени модуляции проводимости в базовом слое структуры. Эффект полной дозы состоит в постепенном ухудшении характеристик полупроводниковых диодных элементов, связанных с накоплением

радиационных дефектов (РД) в кристаллах. Для космической аппаратуры необходимым является отбор однородных по РС диодов с одинаковостью изменения параметров в пределах полной дозовой нагрузки.

Для осуществления процедуры отбора требуются небольшие дозы (не приводящих к уходу параметров) электронного облучения и определение тестового параметра диода, изменения которого были бы пропорциональны концентрации вводимых РД. Самой чувствительной диодной характеристикой к наличию любых структурных дефектов, в том числе и радиационных, является время жизни неравновесных носителей заряда τ_p в базовой, наименее легированной области, полупроводниковой структуры.

Экспериментально установлено [5], что этот электрический параметр в p^+-n -диодах на кремнии в достаточно широком и важном для практики диапазоне доз облучения (Φ) (гамма-квантами, быстрыми электронами, нейтронами и протонами) сохраняет линейный характер зависимости $\tau_p^{-1}(\Phi)$. Поэтому за критерий отбора диодов с равномерной по партии РС можно принять одинаковость относительных изменений τ_p ННЗ в базе диода на начальном этапе облучения в условиях экстремальных температурных колебаний корпуса космического корабля, дающие возможность аппроксимировать результаты на промежуточные температуры.

Рис. 1 иллюстрирует результаты, полученные в настоящей работе, по изменению величины $\Delta(1/\tau_p) = 1/\tau_{p\Phi} - 1/\tau_{p0}$ (τ_{p0} , $\tau_{p\Phi}$ – время жизни ННЗ до и после облучения соответственно) в диодах, в зависимости от температуры облучения (T_{irr}). Приведенные данные усреднялись по результатам измерений 5-7 образцов. Как видно из этого рисунка, скорость изменения величины τ_p , характеризуемая наклоном прямых $\Delta(1/\tau_p)(\Phi)$, существенно выше для пониженной $T_{irr} = -100^\circ\text{C}$, чем для $T_{irr} = 100^\circ\text{C}$. Это полностью соответствует физическим соображениям о взаимосвязи τ_p с эффективностью введения РД, проанализированной в работе [5].

Сущность технологии отбора заключается в том, чтобы выявить образцы с одинаковой начальной скоростью радиационного изменения τ_p ННЗ в p^+-n -диодов в условиях экстремальных (реальных) тепловых нагрузок космического пространства.

Тестирующее облучение следует вести при температуре -100°C и $+100^\circ\text{C}$ – минимальной и максимально возможной температуре корпуса космического аппарата, характерных в настоящее время для орбиты МКС, что значительно упрощает процедуру отбора. Доза облучения выбирается экспериментально. Она должна быть достаточной для того, чтобы уловить тенденцию начальной деградации τ_p .

Для силовых диодов, используемых на низких частотах, и для отдельных приборов, не соединенных друг с другом последовательно, регулирование времени жизни неравновесных

носителей заряда в приборной структуре не требуется, так как у каждого диода выбором исходного кремния уже гарантируется выполнение условия низкого падения напряжения в проводящем состоянии. При этом обеспечиваются значительные накопленный заряд и время обратного восстановления диода, но для данных условий применения это уже не имеет существенного значения. Поэтому вполне допустимо небольшое (в пределах 15% от начальной величины) изменение τ_p при тестирующем облучении.

Для отработки технологии отбора использовалась партия диодов в количестве 35 штук. Предварительный контроль параметров у отобранных приборов показал, что все диоды имеют значения параметров прямой и обратной ветви ВАХ, гарантированных заводом-изготовителем.

Для проведения отбора все 35 диодов облучались электронами с энергией 6 МэВ при интенсивности пучка $1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Сначала при температуре $-100 \pm 5^\circ\text{C}$ в течение 500 с., а затем при температуре $+100 \pm 5^\circ\text{C}$ также в течение 500 с. Доза облучения составила $1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$. Технология проведения отбора заключается в следующем.

1. У всех 35 диодов измеряется τ_p ННЗ. Учитывая, что концентрация основных носителей в области базы составляет $\sim 1,5\text{-}2,3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, условия опыта (величина импульса прямого тока 1 А при длительности до 80 мкс) соответствовали высокому уровню инжекции. Исходные значения τ_p ННЗ составляли от 20 до 25 мкс.

2. Диоды размещались в закрытом термоизолированном контейнере перед выходным окном ускорителя электронов У-003. Необходимая температура задавалась продувкой паров жидкого азота. Азот испарялся из сосуда Дьюара при помощи электропечи. Конструкция трубопровода предусматривала подогрев паров азота и, таким образом, возможность получения и поддержания в контейнере с диодами требуемой температуры.

3. В контейнере устанавливается $-100 \pm 5^\circ\text{C}$ и проводится первое облучение в течение 500 с. Пучок выключается.

4. Затем температура повышается до $+100 \pm 5^\circ\text{C}$ и проводится повторное облучение в течение 500 с. Пучок выключается. Температуру в контейнере доводят до комнатной и диоды извлекают из контейнера.

5. Все облученные диоды проходят процедуру электрических измерений. Изменений прямой и обратной ветви ВАХ не выявлено. Их параметры находятся в полном соответствии с требованиями ТУ. Статистика наблюдаемых изменений τ_p ННЗ следующая. Количество

диодов, у которых начальное значение τ_p уменьшилось в среднем на 7% составило 9 шт. (группа №1), на 11% - 21 шт. (группа №2) и на 15%- 5 шт. (группа №3). Причем минимальный

разброс по величине τ_p в пределах $\pm 2\%$, имеют диоды группы №2. Внутри групп №1 и №3 разброс составил 6 и 11% соответственно.

Из общего количества силовых диодов (35 шт.), представленных на испытания, выявлено 21 изделие (группа №2), у которых скорость изменения величины τ_p при облучении оказалась практически одинаковой. Это позволяет отобрать группу №2 диодов, как наиболее равномерную по радиационной стойкости, пригодной для комплектации космической аппаратуры.

Была проведена экспериментальная проверка однородности РС диодов из группы №2. С этой целью 21 диод группы №2 облучались различными дозами электронов с энергией $E_{irr}=6$ МэВ при средней интенсивности пучка электронов $2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ и на разных стадиях облучения измерялись их параметры: обратный ток и прямое падение напряжения. Установлено, что все отобранные диоды этой группы действительно сохраняют работоспособность в пределах допустимой для данного типа диодов дозы облучения и выходят из строя одновременно.

Заключение

Таким образом, комбинированное воздействие небольшими дозами радиации в условиях экстремальных тепловых нагрузок, которым может подвергаться аппаратура в процессе

эксплуатации, можно использовать как эффективное средство для отбора кремниевых диодов, однородных по стойкости к полной дозовой нагрузке, что обеспечит их стабильность работы в условиях космического пространства.

Полученные в данной работе результаты обладают достаточной общностью и могут быть использованы для разработки аналогичной технологии отбора биполярных Si приборов транзисторного и тиристорного типов.

Автор выражает благодарность Ф.П. Коршунову за интерес к работе и ее поддержку, а также Н.Е. Ждановичу за проведение некоторых измерений.

Список литературы

1. Галеев А., Малкин С., Семенов В. // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2009. – 1. – С. 42-44.
2. Горлов М.И., Емельянов В.А., Ануфриев Д.Л. Технологические отбраковочные и диагностические испытания полупроводниковых изделий. – Мн.: Бел. наука, 2006. – 367с.
3. Марченко И.Г. Способ отбраковки потенциально ненадежных силовых кремниевых диодов. Патент BY, № 13130 от 30.12.2009.
4. Lax V. and Neustadter S.F. // J. Appl. Phys. - 1954. - V. 25. - 9. - P. 1148-1154.
5. Коршунов Ф.П., Гатальский Г.В., Иванов Г.М. Радиационные эффекты в полупроводниковых приборах. – Мн.: Наука и техника, 1978. – 232 с.

RESEARCH OF RADIATION METHODS OF SELECTION OF BIPOLAR Si-STRUCTURES FOR ELECTRONICS OPERATING IN OUTER SPACE

Marchenko I. G

Scientific-Practical Materials Research Centre NAS of Belarus

P. Brovki str. 19, Minsk, 220072 Belarus E-mail: march@ifttp.bas-net.by

The influence of radiation exposure with high-energy ($E = 6$ MeV) electrons was researched for screening tests of Si p^+-p-n – diodes and for selection of samples with uniform batch radiation tolerance (RT). It was shown that the following can be taken as a criterion of selection of diodes with uniform batch RT: the similarity of relative alterations of lifetime value of non-equilibrium charge carriers (NECC) - τ_p holes in diode's n-base at the initial stage of radiation exposure in conditions of extreme temperature fluctuations (from $+100^\circ\text{C}$ on the sunny side to -100°C in the shade) of the spacecraft's body (ISS) on orbit, giving the possibility to approximate the results for intermediate temperatures.