РАЗВИТИЕ РАБОТ В ОБЛАСТИ РАДИАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ СИЛОВЫХ И БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

И.Г. Марченко, Н.Е. Жданович
ГНПО «Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению»
ул. П. Бровки, 19, 220072 Минск, Беларусь, тел.+375-17-2841527,
e-mail: march@ifttp.bas-net.by

Излагается обзор результатов работ авторов, посвященных развитию физических основ новых методов использования проникающих излучений в производстве силовых и быстродействующих биполярных полупроводниковых приборов (СПП) на основе многослойных *Si*- структур. Обсуждаются новые приемы радиационно-технологических обработок, с использованием циклического, высокотемпературного и локального электронного (4 и 6 МэВ) облучения, для создания СПП с характеристиками, более пригодными для практического применения. Дальнейшее их улучшение видится в отыскании наиболее удачных решений при выборе режимов радиационной обработки для конкретных типов приборных структур.

Введение

Проблема создания мощных и быстродействующих полупроводниковых приборов связана с достижением малых значений времени жизни неравновесных носителей заряда (ННЗ) τ в базах, что обеспечивает быстродействие, низких величин падения напряжения на приборной структуре в проводящем состоянии и малых генерационных токов обратно-смещенных p-n-переходов, что приводит к уменьшению мощности рассеяния и увеличению запираемого напряжения. Современные исследования в этом направлении сосредоточены на достижении наилучшего сочетания частотных и статических характеристик приборов.

Как известно, основы радиационной технологии базируются на детальном изучении физических эффектов, влияющих на перенос, накопление и рекомбинацию носителей заряда высокой плотности в облученной полупроводниковой структуре. Сама идея о возможности использования рекомбинационных свойств радиационных центров (РЦ) при создании приборов электронной техники появилась достаточно давно [1,2] и для сравнительно маломощных приборов на токи (I) в единицы ампер (А) при напряжении (U) $\leq$ 600 В, уже разработаны и освоены радиационные методы увеличения быстродействия [3,4]. Однако их использование применительно к силовым приборам, где величины I и U могут достигать нескольких кА и кВ, сильно затормозилось. Основным физическим ограничением на пути развития радиационной технологии быстродействующих биполярных Si-структур стали явления, приводящие к уменьшению степени модуляции базовых слоев полупроводниковых структур и росту обратных токов, а также недостаточная, с точки зрения переходных процессов в мощных приборах, термическая стабильность РЦ, свойства которых используются в технологии.

Основная часть

Существует два пути повышения быстродействия Si СПП при контролируемом уменьшении величины τ в их полупроводниковых структурах. Во-первых, за счет введения в приборную Si-структуру таких РЦ, которые бы обеспечивали хорошее сочетание характеристик проводимости и переключения, токов утечки и их температурных коэффициентов. Во-вторых, за счет выбора профиля распределения РЦ в объеме базовых областей для оптимального сочетания характеристик в открытом и закрытом состояниях.

Чаще всего при создании силовых и быстродействующих полупроводниковых приборов с помощью радиационной технологии добиваются разумного компромисса в сочетании совокупности статических и частотных характеристик приборов, которые имеют противоположный характер зависимости от времени жизни неравновесных носителей заряда в полупроводниковой структуре. Оценим возможности использования электронного облучения при различных способах набора дозы облучения для решения этой технологической задачи.

В настоящей работе описываются результаты, полученные при циклическом, высокотемпературном и локальном электронном облучении Si многослойных структур с p-n-переходами [5-8].

Для облучения образцов использовались линейные ускорители электронов с энергией частиц 4 и 6 МэВ при средней плотности пучка электронов $2\cdot10^{12}$ см$^{-2}$с$^{-1}$. Облучение проводилось в интервале температур (T_{irr}) 20-400^{O}C.

Образцами служили p^{+}-n-n^{+}-структуры до посадки в корпуса промышленных диодов, изготовленных на монокристаллическом n-Si, легированном фосфором в процессе выращивания по Чохральскому (КЭФ) и с помощью ядерных реакций (КОФ). Структуры были сформированы по стандартной диодной технологии на исходных пластинах КЭФ-32, 120 и КОФ-110 диаметром от 23 до 56 мм путем последовательной диффузии алюминия, бора и фосфора из их окислов на воздухе. Толщина n- базы составляла ~ 250-300 μm.

Как видно из рис. 1, возможности управления быстродействием p^{+}-n-n^{+}- диодов с помощью технологии равномерного облучения весьма ограничены. Сравнительно небольшое

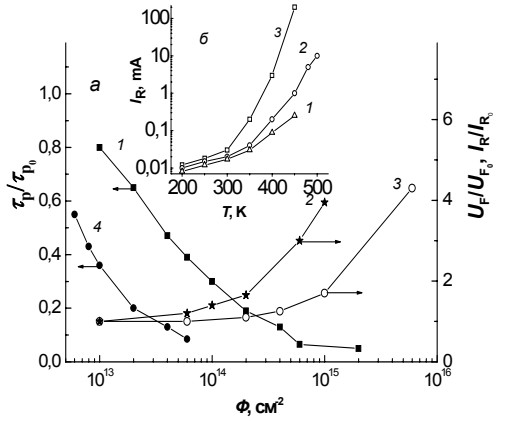

Рис. 1. *а* - относительное изменение времени жизни ННЗ (*1, 4*), прямого падения напряжения (*2*) и обратного тока (*3*) в p^+-*n*-n^+- диодах от флюенса электронов с энергией 4 МэВ: *1-3* — для образцов на КЭФ – 32; *4* — для КЭФ – 120;
б - температурные зависимости обратного тока в образцах на КЭФ – 32: *1* – до облучении; *2* –Ф = $4\cdot10^{13}$см$^{-2}$; *3* – Ф = $2\cdot10^{14}$см$^{-2}$

изменение времени жизни ННЗ в широкой базовой области диода приводит к росту прямого падения напряжения и резкому росту генерационных токов при максимальных рабочих температурах, приводящему к ухудшению мощностных характеристик.

Для улучшения этой ситуации нами была реализована идея формирования зон повышенной рекомбинации (ЗПР) в приборных структурах путем их локального облучения электронами через защитные маски. Идея создания ЗПР в структуре СПП выдвигалась и ранее [9] и имела целью получение мощного быстродействующего *p-n-p-n* - тиристора, в котором для ускорения рассасывания заряда избыточных носителей в широкой *n*-базе вводились небольшие, локальные по площади тиристорной структуры, ЗПР. Они создавались диффузией золота в p-n-p-n-структуру через маски определенной формы. Поскольку ЗПР занимают малую часть площади полупроводниковой структуры, они в меньшей степени способствуют росту падения напряжения на приборе в проводящем состоянии. В то же время за счет полевого вытягивания основных носителей заряда из широкой базы тиристора в ЗПР, где темп рекомбинации выше, можно достичь существенного сокращения времени выключения прибора.

В лаборатории радиационных воздействий ГО «НПЦ НАНБ по материаловедению» разработана серия быстровосстанавливающих мощных диодов для железнодорожного и городского электротранспорта на токи 100 – 1000А и напряжения от 2500 до 4500 В.

Для изготовления диодов использовался ядерно-легированный Si. При этом оптимальное сочетание времени обратного восстановления (t_{rr}) и прямого падения напряжения (U_F) получено при создании ЗПР неравновесных носителей заряда в объеме прибора. Так в диодах с напряжением «загиба» 5-6 кВ достигнуты значения U_F≤2,5 В и t_{rr}=2,5-3,5 мкс. (при равномерном облучении наблюдается значительно худшее соотношение U_F≤3,5 В и t_{rr}=2,5-3,5 мкс.).

На рис. 2 представлены результаты электронного облучения p^+-*n*-n^+-структур при повышенных температурах.

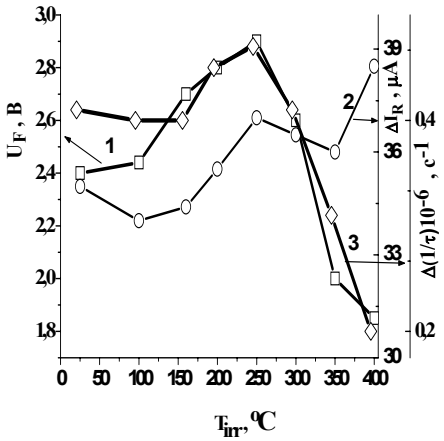

Рис. 2. Зависимость прямого падения напряжения (1), приращения обратного тока (2) и величины, обратной времени жизни неравновесных носителей заряда (3) в кремниевой p^+-*n*-n^+- структуре, от температуры облучения

Как видно из этого рисунка, рост прямого падения напряжения в облученных диодах, обусловленный увеличением скорости объемной рекомбинации (снижением τ_p) и уменьшением диффузионной длины неравновесных дырок в n-базе, практически полностью повторяет кривую $\Delta(1/\tau_p)$ от T_{irr}. Приращение обратного тока от T_{irr} (рис. 2, кр. 3) имеет слабо выраженную тенденцию к увеличению с ростом T_{irr} и отражает, вероятно, характер изменения при облучении основной компоненты обратного тока – тока генерации. Наблюдаемое совпадение зависимости U_F и ΔI_R от T_{irr} при T_{irr} ≤250^{O}C дает основание полагать, что в данном интервале температур в определении характеристик облученных p^+-*n*-n^+- диодах доминирует один и тот же тип РЦ, в то время как в облученных при T_{irr} > 250^{O}C образцах генерация и рекомбинация носителей заряда идут через различные РЦ.

Выполненное исследование показало, что главным условием оптимизации параметров Si диодов при электронном облучении — как наиболее распространенной на сегодняшний день разновидности технологии управления быстродействием, является точный подбор температурного режима этого вида обработки для конкретного изделия. Так, для p^+-*n*-n^+-диодов, полученных на n-Si (КЭФ, КОФ), при одинаковой величине τ_p в базовом слое диодов, прямое падение напряжения можно снизить до 30% и в ~2-3 раза уменьшить зависимость обратного тока от температуры эксплуатации в случае их облучения при T_{irr} = 300°C (КЭФ), или при T_{irr} =

350°C (КОФ), по сравнению с другими температурами диапазона T_{irr} = 20 - 400°C.

На рис. 3 показаны зависимости обратного тока p^+-n-n^+ -диодов. Одна группа образцов подвергалась ступенчатому пятикратному облучению дискретным флюенсом Φ=2·10^{13}см$^{-2}$ с 10-минутной выдержкой при T=180^{O}C после каждой, кроме 5-ой, ступени облучения – (кривая 2), а другая- однократному облучению флюенсом Φ=1·10^{14}см$^{-2}$. Общая доза облучения для обеих групп была, таким образом, одинаковой - Φ=1·10^{14}см$^{-2}$.

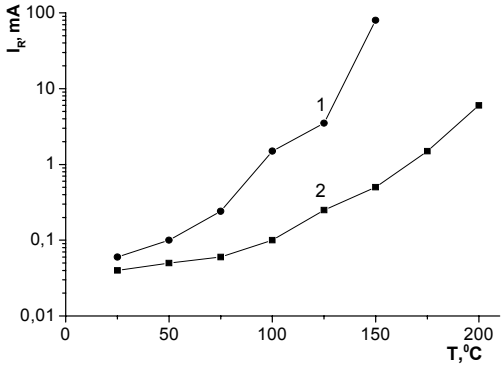

Рис. 3. Температурные зависимости обратного тока p^+-n-n^+ -диода (U_R=500 В) после обычного (1) и циклического облучения (2)

Как видно из этого рисунка, температурная зависимость обратного тока более плавная при циклическом облучении и его рост в условиях эксперимента не превышает 10 mA. Следовательно, область безопасной эксплуатации диодных элементов после циклического радиационно-термического воздействия может быть расширена до 175 - 200^{O}C.

Заключение

Таким образом, наблюдаемое поведение параметров Si p^+-n-n^+-структур при циклическом, высокотемпературном и локальном электронном облучении может быть связано как с изменением концентрационного соотношения вводимых радиационных дефектов, так и с характером их распределения в объеме структуры.

Для выбора того или иного способа технологического электронного облучения при создании быстродействующих СПП необходимо учитывать конструктивно-технологические особенности конкретных изделий.

Для получения максимального эффекта от этого приема, проведению операции облучения основной партии приборов должна предшествовать процедура контрольного облучения тестовых структур, которые прошли полный цикл тех же технологических обработок, что и приборы основной партии.

Авторы выражают благодарность Ф.П. Коршунову за интерес к работе и ее поддержку.

Список литературы

1. *Corton U.R.* // Nature. – 1957. – 179. – P. 864.
2. *Носов Ю.Р.* // ФТТ. – 1962. – 4. – С. 3665.
3. *Витман В.Ф., Кутлахметов А.В., Решетин В.П. и др.* Тез. докл. Республ. совещания «Радиационные повреждения в твердых телах». - Киев, 1974. – С. 73-75.
4. *Коршунов Ф.П.* // Вестник АН СССР. – 1982. – 11. - С. 80-87.
5. Марченко И.Г. // Вестник Фонда фундаментальных исследований. – 2008. – 4. - С. 66-72.
6. *Марченко И.Г. Жданович Н.Е.* // Письма в ЖТФ. – 2010. – Т. 36. – 10. - С. 45-51.
7. *Марченко И.Г.* // Вестник Фонда фундаментальных исследований. – 2010. - 4. - С. 125-132.
8. *Марченко И.Г., Жданович Н.Е.* // ФТП. - 2011 (в печати).
9. *Грехов И.В., Костина Л.С., Сергеев В.Г.* // ФТП. – 1971. – 5. – С. 1414.

DEVELOPMENT OF WORKS IN THE AREA OF RADIATION TECHNOLOGY OF POWER AND FAST SEMICONDUCTOR DEVICES

I.G. Marchenko, N.E. Zhdanovich
Scientific-Practical Materials Research Centre NAS of Belarus
P. Brovki str. 19, Minsk, 220072 Belarus, e–mail: march@ifttp.bas-net.by

Includes an overview of the results of works of authors dedicated to the development of basic physics of new methods of use of penetrating radiation for manufacturing power and fast bipolar semiconductor devices (PSCDs) on the basis of multi-layer *Si*-structures. New methods of radiation and technological processing are discussed with the use of cyclical, high-temperature, and local electronic (4 and 6 MeV) radiation exposure for creation of PSCDs with properties more suitable for practical application. Their further improvement lies in finding more successful solutions when choosing radiation processing regimes for specific types of device structures.