

ВЛИЯНИЕ ЛОКАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА $\text{Si } p^+ - n - n^+$ -СТРУКТУРЫ БОЛЬШОЙ ПЛОЩАДИ

И. Г. Марченко, Н. Е. Жданович

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

Улучшение характеристик силовых полупроводниковых приборов (СПП), основы преобразовательной электротехники, остается главной задачей в деле развития энергосберегающих технологий в энергетике, промышленности, на транспорте и бытовой электронике.

В производстве биполярных СПП ключевого типа: диодов, транзисторов и тиристоров в настоящее время широко используются радиационные методы управления быстродействием. В случае технологического облучения (см., например, [1]) 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 достижение оптимального сочетания характеристик проводимости и переключения, токов утечки и их температурных коэффициентов в облученных быстродействующих приборах [2–5].

Цель настоящей работы – найти новое решение в улучшении совокупности статических и динамических характеристик СПП путем создания в приборной структуре зон повышенной рекомбинации (ЗПР) с помощью электронного облучения – технологически удобной и на сегодняшний день наиболее распространенной разновидности радиационной технологии управления быстродействием.

В качестве образцов использовались бескорпусные приборные структуры (чипы) промышленных $p^+ - n - n^+$ -силовых диодов (рис. 1а), а так же экспериментальные тестовые диодные элементы, изготовленные на монокристаллическом Si, легированном фосфором по Чохральскому (КЭФ) и с помощью ядерных реакций (КОФ). Структуры были сформированы по стандартной диодной технологии на исходных пластинах КЭФ-32 и КОФ-110 толщиной 500 мкм и диаметром от 5 до 56 мм путем последовательной диффузии алюминия, бора и фосфора из их окислов на воздухе. С одной стороны пластин проводилась диффузия бора с алюминием на глубину 50–110 мкм и формировался p^+ -слой анодной области, а с другой стороны – двухстадийная диффузия фосфора на глубину 50–70 мкм и формировался n^+ -слой катодной области.

Измерения основных параметров приборных структур проводилось с использованием общепринятых метрологических средств и методов.

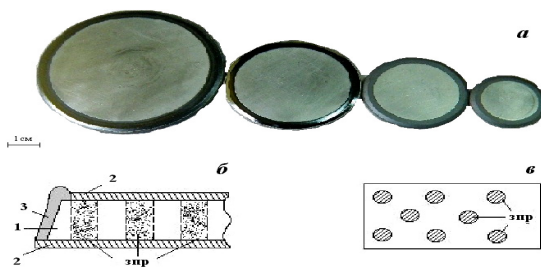


Рис. 1. а – чипы исследуемых диодов;
б – конструкция диодного элемента в разрезе:
1 – кремниевая пластина с $p^+ - n - n^+$ -структурой;
2 – контактные слои; 3 – защитное покрытие
поверхностной фаски; в – распределение
ЗПР по площади диода

Партия диодных элементов была разделена на две части: регулирование быстрого действия в одной из них производилось с помощью технологии полного, равномерного по площади, электронного облучения, в другой – локального электронного облучения. Облучение образцов проводилось на линейном импульсном ускорителе электронов с энергией частиц 4 МэВ (длительность импульса 5 мкс, частота следования импульсов 200 Гц). Образцы располагались в плоскости, перпендикулярной к направлению падающего электронного пучка, а облучение велось со стороны p^+ -области структуры. Интенсивность пучка электронов, падающего на экран (или на образец без экрана), составляла $2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, температура в зоне облучения не превышала 300 К.

При локальном режиме облучения между выходным окном ускорителя и образцами размещался плоский экран (материал Мо или Pb) с отверстиями цилиндрической формы, имеющий толщину, превышающую длину свободного пробега электронов с энергией 4 МэВ в материале экрана. В этом случае ускоренными электронами облучаются участки приборной структуры, расположенные под отверстиями в экране, а остальная ее часть защищается экраном непроницаемым для электронов. Защитные экраны с отверстиями были получены на масштабно - координатном прессе, оснащённом пробивочными пуансонами различного диаметра. Вид локальности, используемый в настоящей работе: ЗПР равномерно распределены по всей площади диодной структуры, исключая приповерхностную область диода, которая в процессе облучения полностью экранировалась от электронного пучка (рис. 1б, в).

Наиболее важными характеристиками силового диода является прямое падение напряжения – U_{FM} , обратный ток – I_R , а также время обратного восстановления – t_{rr} и время жизни неравновесных дырок в базе τ_p . Соотношение U_F , I_R и t_{rr} , главным образом, и определяет уровень диода как биполярного силового ключа.

Из рисунка 2, где показано относительное изменение U_F , I_R и τ_p для образцов на КЭФ от флюенса электронов с энергией 4 МэВ в случае полного облучения, видно, что исследуемые в данной работе p^+-n-n^+ -структуры имеют типичный для силовых диодов вид зависимости радиационного изменения статических и динамических характеристик. Время жизни ННЗ и прямое напряжение изменяются от дозы почти

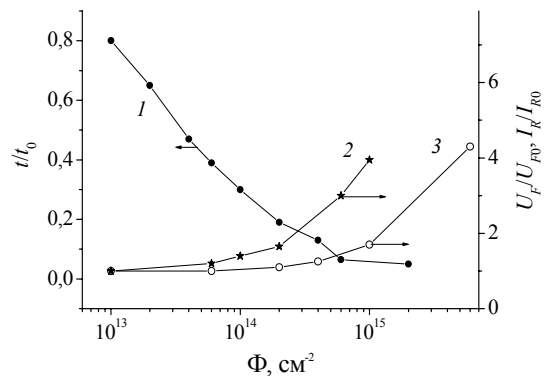


Рис. 2. Относительное изменение времени жизни ННЗ (1), прямого падения напряжения (2) и обратного тока (3) в p^+-n-n^+ - силовых диодах на КЭФ-32 от флюенса электронов с энергией 4 МэВ

синхронно, имея противоположный характер. Взаимосвязь этих параметров очевидна. Малейшее изменение времени жизни ННЗ в широкой базовой области силового диода влечет за собой уменьшение диффузионной длины носителей заряда (степени модуляции проводимости базы) и рост прямого падения напряжения. Так, пятикратное снижение времени жизни ННЗ в базовой области диодной структуры приводит к ~50 % росту прямого падения.

Изменение при облучении обратного тока в исследуемых диодах не столь критично, как изменение прямого напряжения. Наблюдаемая зависи-

мость I_R/I_{Ro} (Φ) (рис. 2, кривая 3) отражает, по-видимому, характер изменения при облучении основной компоненты обратного тока – тока генерации.

Как видно из рис. 2, возможности радиационного управления быстродействием p^+-n-n^+ -силовых диодов с помощью технологии обычного, равномерного по площади приборной структуры, электронного облучения весьма ограничены.

Сущность локального облучения заключается в том, что для сокращения времени рассасывания электронно-дырочной плазмы при переключении структуры прибора из проводящего состояния в блокирующее и улучшения частотных характеристик приборов, уменьшение τ_p ННЗ можно осуществлять не во всем объеме базовой области структуры, а лишь в некоторой его части. В условиях нашего эксперимента в базовых областях структур создаются, перпендикулярные плоскости p - n -перехода, цилиндрические зоны (рис. 1б) с высокой плотностью РД (ЗПР) и, как следствие, с малыми значениями τ_p , чередующиеся с необлученными участками с высоким значением τ_p . В процессе выключения прибора, кроме выноса ННЗ из базы, рассасывание заряда носителей будет происходить за счет их дрейфа и рекомбинацию в ЗПР. При этом эффективное (объемное) время жизни носителей ННЗ в базовой области локально - облученных образцов будет выше, чем в однородно облученных. Следовательно, при наличии ЗПР, меньшему значению t_{rr} , будет соответствовать большая величина τ_p и меньшее прямое падение напряжения.

Идея создания ЗПР в структуре СПП выдвигалась и ранее [6] и имела целью создание мощного быстродействующего тиристора, в котором для ускорения рассасывания заряда избыточных носителей в широкой базе вводились небольшие, локальные по площади, зоны повышенной рекомбинации. Они создавались диффузией золота в p - n - p -структуру через маски определенной формы. Поскольку ЗПР занимают малую часть площади прибора, они практически не влияют на потери мощности в прямом направлении. В то же время за счет полевого вытягивания носителей заряда из широкой базы тиристора в ЗПР, где темп рекомбинации выше, можно достичь существенного сокращения времени выключения прибора.

В таблице приведены параметры диодных структур после полного и локального облучения. Причем независимо от способа облучения и параметров локальности (размера отверстия в защитном экране – d и расстояния между отверстиями – c) образцы выравнивались по величине t_{rr} подбором дозы облучения. Одна группа образцов подвергалась полному облучению (флюенс облучения $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$); другая – локальному облучению (флюенс, необходимый для снижения t_{rr} до уровня 3,0 мкс, изменялся в зависимости от параметров локальности в интервале $1 \div 7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$). Обе группы образцов после облучения выдерживались при $T = 430^\circ \text{C}$ в течение 10 мин.

Таблица

Параметры диодных элементов (100 А/2,2кВ) при полном и локальном облучении

Способ облучения → Параметр диода	Полное облучение $\Phi = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$	Локальное облучение $\Phi = 1 \div 7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (параметры локальности)									
		d , мм					c , мм				
		0,5	0,75	1,0	1,5	2,0	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0
t_{rr} , мкс	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
τ_p , мкс	6,5	9,5	9,1	9,0	8,2	7,5	10,5	8,7	7,5	7,0	6,7
U_{FM} , В	2,65	1,9	1,95	2,0	2,2	2,5	1,8	2,0	2,3	2,45	2,6
I_R , мА	≤ 10	≤ 1	≤ 1	≤ 1	≤ 5	≤ 5	≤ 1	≤ 1	≤ 1	≤ 5	≤ 5

Как видно из таблицы, наилучшее соотношение между уровнем быстродействия t_{rr} и потерями в проводящем состоянии U_{FM} можно получить при расстоянии между соседними ЗПР, ненамного превосходящем ширину базовой области диода.

В лаборатории радиационных воздействий ГО «НПЦ НАНБ по материаловедению» разработана серия быстровосстанавливающихся мощных диодов для железнодорожного и городского электротранспорта на токи 100 – 1000А и напряжения от 2500 до 4500 В. Так в диодах с напряжением «загиба» 5–6 кВ достигнуты значения $U_{FM} \leq 2,5$ В и $t_{rr} = 2,5\text{--}3,5$ мкс.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (гранты Т07 – 131 и Ф10 – 123).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Коршунов, Ф. П.* Радиационные технологии / Ф. П. Коршунов // Наука народному хозяйству. Научное издание НАН Беларуси. 2002. С. 236.
2. *Hazdra, P.* Axial lifetime control in power diodes by irradiation with protons, alphas, low- and high-energy electrons / P. Hazdra [et al.] // Microelectronics J. 2004. V. 35. P. 249.
3. *Коршунов, Ф. П.* Влияние электронного облучения на обратно-смещенные n-Si p-n - структуры / Ф. П. Коршунов, И. Г. Марченко, Н. Е. Жданович // Известия НАН Беларуси. Сер. физ.-мат. наук. 2005. № 1. С. 78.
4. *Марченко, И. Г.* Особенности радиационной технологии силовых быстродействующих полупроводниковых диодов / И. Г. Марченко // Вестник Фонда фундаментальных исследований. 2008. № 4. С. 66.
5. *Марченко, И. Г.* Влияние электронного облучения, ослабленного алюминиевыми экранами, на электрические параметры кремниевых p-n-структур / И. Г. Марченко, Н. Е. Жданович // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. В. 10. С. 45.
6. *Грехов, И. В.* О новой возможности уменьшения времени выключения высоковольтных p-n-p-n -структур / И. В. Грехов, Л. С. Костина, В. Г. Сергеев // ФТП. 1971. Т. 5. В. 7. С. 1409.