

06

Особенности технологического облучения электронами кремниевых $p-n$ -структур большой площади

© И.Г. Марченко, Н.Е. Жданович

Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению, Минск
E-mail: march@ifftp.bas-net.by

Поступило в Редакцию 14 апреля 2011 г.

Исследовано влияние облучения ускоренными электронами (4 MeV) через защитные маски, формирующие зоны повышенной рекомбинации (ERZ) в базовой области p^+-n-n^+ -структур, на основные электрофизические характеристики кремниевых диодов, рассчитанных на токи до 600 А. Показано, что локальное облучение диодной структуры большой площади по сравнению с облучением всей структуры улучшает соотношение между временем обратного восстановления (t_{rr}) и потерями энергии в проводящем состоянии (U_F) при снижении чувствительности обратного тока (I_R) диода к температуре. Установлена зависимость соотношения t_{rr} , U_F и I_R в локально облученных структурах от условий эксперимента (размера ERZ).

Управление быстродействием является основной областью практического использования радиационных технологий в производстве биполярных силовых полупроводниковых приборов (СПП) ключевого типа: диодов, транзисторов и тиристоров. Современные исследования в этом направлении сосредоточены на достижении наилучшего сочетания частотных и статических характеристик приборов.

Ранее [1–5] было обнаружено улучшение совокупности электрических характеристик СПП, облученных протонами или низкоэнергетическими электронами. В этих работах обсуждаются преимущества использования рекомбинационных свойств радиационных дефектов (РД), введенных радиационным воздействием, локальным по глубине приборной структуры.

Типовые размеры полупроводникового элемента современных силовых приборов лежат в пределах от нескольких квадратных миллиметров до более 100 mm в диаметре. Они представляют удобный

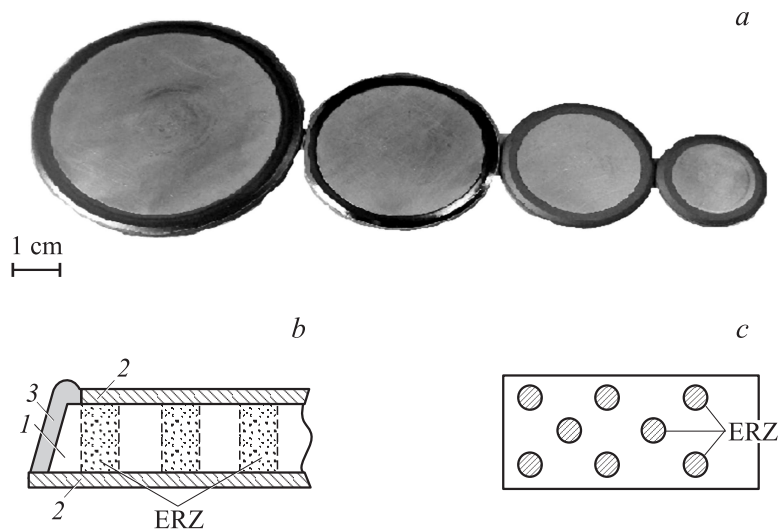


Рис. 1. *a* — чипы исследуемых диодов; *b* — схематическое изображение диодного элемента в разрезе с зонами повышенной рекомбинации (ERZ): 1 — кремниевая пластина с p^+-n-n^+ -структурой; 2 — контактные слои; 3 — пассивация поверхностной фаски; *c* — распределение ERZ по площади диода.

объект для радиационного воздействия, локального по площади, если в качестве такового использовать облучение электронами с энергией 1–10 MeV — технологически удобную и на сегодняшний день наиболее распространенную разновидность радиационной технологии управления быстродействием.

Цель настоящей работы — определить влияние электронного облучения, локального по площади, на соотношение основных электрических параметров кремниевых структур диодного типа и сопоставить полученные результаты с аналогичными зависимостями для протонного и полного электронного облучения.

Образцами служили чипы (приборные p^+-n-n^+ -структуры до посадки в корпуса) промышленных диодов (рис. 1, *a*), 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 техно-

логии на исходных пластинах КЭФ-32, 120 и КОФ-110 диаметром от 23 до 56 mm путем последовательной диффузии алюминия, бора и фосфора из их окислов на воздухе. Толщина n -базы составляла $\sim 250\text{--}300\ \mu\text{m}$.

Отбирались образцы, имеющие до облучения одинаковые прямые и обратные вольт-амперные характеристики. Прямое падение напряжения на диоде U_F , обратный ток I_R и время обратного восстановления диода t_{rr} контролировались в импульсном режиме по общепринятым методикам. Время жизни неравновесных носителей заряда (ННЗ)-дырок τ_p в n -базе структур, определялось методом Лэкса [6] при высоком уровне инжекции. Облучение диодов проводилось на ускорителе электронов с энергией частиц $E = 4\ \text{MeV}$. Образцы располагались в плоскости, перпендикулярной к направлению падающего электронного пучка, а облучение велось со стороны p^+ -области структуры. Интенсивность пучка электронов, падающего на образец, составляла $2 \cdot 10^{12}\ \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, температура в зоне облучения не превышала комнатной.

Партия образцов была разделена на две части: одну облучали по технологии равномерного по площади электронного облучения (назовем его полным облучением), а другую — локального по площади электронного облучения (облучение полупроводниковой структуры через защитные маски). Маски выполнялись из молибдена и имели цилиндрические отверстия (диаметр d и расстояние между отверстиями c) и толщину, превышающую длину пробега электронов с $E = 4\ \text{MeV}$ в материале экрана. Вид локальности, используемый в настоящей работе: отверстия в маске были равномерно распределены по всей площади диодной структуры (анодного контактного слоя), исключая область поверхностной фаски, которая полностью экранировалась от электронного пучка (рис. 1, b, c).

Как видно из рис. 2, где показано относительное изменение U_F , I_R и τ_p от флюенса равномерного электронного облучения и приведены температурные зависимости I_R до облучения и после двух фиксированных доз, возможности управления быстродействием p^+n-n^+ -диодов с помощью технологии полного облучения весьма ограничены. Сравнительно небольшое 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.

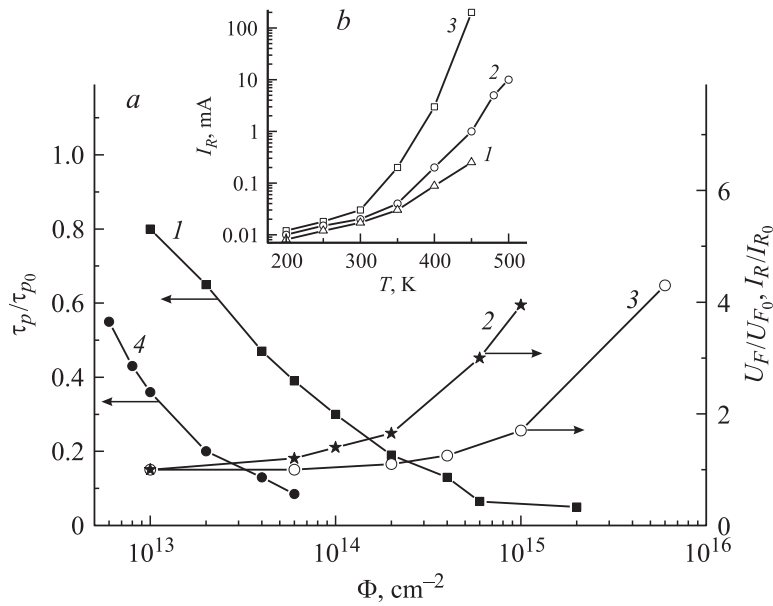


Рис. 2. *a* — относительное изменение времени жизни НЗ (1, 4), прямого падения напряжения (2) и обратного тока (3) в p^+-n-n^+ -диодах в зависимости от флюенса электронов с энергией 4 МэВ: 1–3 — для образцов на КЭФ-32; 4 — для КЭФ-120; *b* — температурные зависимости обратного тока в образцах на КЭФ-32: 1 — до облучения; 2 — $\Phi = 4 \cdot 10^{13}$ см $^{-2}$; 3 — $\Phi = 2 \cdot 10^{14}$ см $^{-2}$.

Для силовых диодов основным процессом, ограничивающим максимальную частоту работы прибора, является процесс восстановления блокирующих свойств $p-n$ -перехода при переключении из проводящего состояния. Для ускорения этого процесса обычно уменьшают τ_p носителей заряда в базовых слабо легированных слоях приборной структуры. Сущность локального облучения, как нового технологического приема, заключается в том, что для сокращения времени рассасывания электронно-дырочной плазмы при переключении структуры прибора в блокирующее состояние и улучшения его частотных характеристик уменьшение τ_p можно осуществлять не во всем объеме базы структуры, а лишь в некоторой его части. В условиях нашего эксперимента в базовых областях структур создаются перпендикулярные плоскости

$p-n$ -перехода, цилиндрические зоны с высокой плотностью РД и, как следствие, с малыми значениями τ_p — зоны повышенной рекомбинации (ERZ), 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 последующей рекомбинации в ERZ. При этом эффективное (объемное) время жизни носителей ННЗ в базовой области локально облученных образцов будет выше, чем в однородно облученных. Следовательно, при наличии ERZ меньшему значению t_{rr} будет соответствовать большая величина τ_p и, что особенно важно для технологии, меньшее прямое падение напряжения.

Можно ожидать, что и генерационный ток, прямо пропорциональный концентрации РД, также будет существенно ниже в локально облученных p^+-n-n^+ -структурах, чем в аналогичных образцах после полного облучения. Заметим, что при локальном облучении ток утечки и его вклад в обратный ток облученного диода будет минимизирован, так как поверхность структур не облучается ускоренными электронами. Это является существенным преимуществом локального облучения как способа управления быстродействием.

Идея создания ERZ в структуре СПП выдвигалась и ранее [7] 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, ERZ. Они создавались диффузией золота в $p-n-p-n$ -структуру через маски определенной формы. Поскольку ERZ 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 ERZ, где темп рекомбинации выше, можно достичь существенного сокращения времени выключения прибора.

Данные нашей работы показали, что можно действительно улучшить сочетание характеристик, технологически облученных СПП, если вместо полного облучения использовать локальное облучение электронами отдельных участков полупроводниковой приборной структуры. Результаты проведенных исследований представлены в таблице. Здесь сравниваются параметры p^+-n-n^+ -диодов (КОФ-110) на ток до 100 А и напряжение 2.2 kV после полного и локального облучения с

Параметры диодов при полном и локальном облучении электронами с $E = 4 \text{ MeV}$

Параметры	Полное облучение $\Phi = 2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$	Локальное облучение $\Phi = (1-7) \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$									
		$d, \text{ mm}$ при $c = 1 \text{ mm}$					$c, \text{ mm}$ при $d = 1 \text{ mm}$				
		0.5	0.75	1.0	1.5	2.0	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0
$t_{rr}, \mu\text{s}$	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
$\tau_p, \mu\text{s}$	6.5	9.5	9.1	9.0	8.2	7.5	10.5	8.7	7.5	7.0	6.7
$U_F, \text{V}^{(1)}$	2.65	1.9	1.95	2.0	2.2	2.5	1.8	2.0	2.3	2.45	2.6
$I_R, \text{mA}^{(2)}$	≤ 10	≤ 1	≤ 1	≤ 1	≤ 5	≤ 5	≤ 1	≤ 1	≤ 1	≤ 5	≤ 5

Условия измерений: 1 — $T_j = 25^\circ\text{C}$; 2 — $T_j = 125^\circ\text{C}$.

различными параметрами локальности, характеризуемой величинами d и c . Оценка степени влияния способа облучения на прямое падение напряжения U_F и обратный ток I_R проводилась путем сравнения значений этих параметров в образцах, имеющих одинаковую величину $t_{rr} \sim 3 \mu\text{s}$.

Одна группа образцов подвергалась полному облучению (флюенс облучения $2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$); другая — локальному облучению (флюенс, необходимый для снижения t_{rr} до уровня $3.0 \mu\text{s}$, изменялся в зависимости от параметров локальности в интервале $1-7 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$). Обе группы образцов после облучения выдерживались при $T = 430^\circ$ в течение 10 min.

Как видно из данных таблицы, наилучшие соотношения между уровнем быстрого действия t_{rr} и падением напряжения на структуре в проводящем состоянии U_F могут быть получены в том случае, если диаметр ERZ 0.5–0.75 mm, а расстояние между ERZ минимально. Это является следствием формирования в диодных p^+-n-n^+ -структурах в условиях локального облучения оптимального по площади структур распределения РД, определяющего совокупность их электрических характеристик. При этом по сравнению с полным облучением локальное облучение позволяет снизить до ~ 10 раз величину I_R .

Проводилось сравнение параметров диодных структур, выполненных на пластинах различного диаметра и рассчитанных на токи 100, 350 и 600 А, после полного и локального облучения. Установлено, что в локально облученных диодах с выпрямительным элементом большего

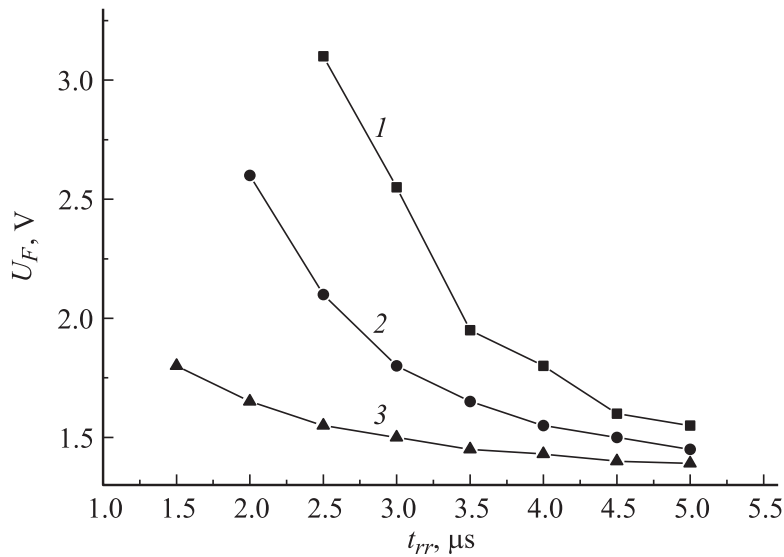


Рис. 3. Корреляция изменения прямого падения напряжения с временем обратного восстановления для p^+n-n^+ -диодов на КОФ-110, облученных электронами с энергией 4 MeV (1, 2), и для p^+n-n^+ -диодов на $n\text{-Si}$ ($110 \Omega \cdot \text{cm}$), облученных протонами с энергией 3.3 MeV (3) по данным работы [5]; 1 — полное электронное облучение; 2 — локальное по площади электронное облучение (параметры локальности: $d = 1 \text{ mm}$; $c = 0.75 \text{ mm}$); 3 — протонное облучение (локальность по глубине).

диаметра снижение U_F относительно полного облучения выражено сильнее. Например, для диодов на 100 А оно составляет 0.65 V, а для диодов на 600 А — 0.8 V.

Рис. 3 иллюстрирует взаимосвязь изменения U_F с t_{rr} для p^+n-n^+ -диодов в случае полного (кривая 1) и локального электронного облучения (кривая 2). Здесь же приведена зависимость $U_F(t_{rr})$ (кривая 3), взятая из работы [5], для протонного ($E = 3.3 \text{ MeV}$) облучения диодных структур для случая, при котором пик концентрации РД расположен в n -базе диода вблизи анодного p^+n -перехода. В [5] использовались диоды с приблизительно теми же значениями параметров слоев, что и в исследованных диодах данной работы. Как видно из рис. 3, локальное электронное облучение по сравнению с протонным дает несколько

худшее соотношение между параметрами выключения и потерями в проводящем состоянии. Следует заметить, что в настоящее время использование протонов, хотя и более эффективный, но достаточно дорогой способ регулирования времени жизни ННЗ в полупроводниковых структурах, и поэтому носит ограниченный и в большей мере исследовательский характер.

Локальное облучение отдельных участков приборной структуры ускоренными электронами дает хорошо воспроизводимые результаты. Требуется лишь подобрать для конкретного типа полупроводниковой структуры наилучшее соотношение параметров локальности. Заметим, что для транзисторных и тиристорных структур с большой площадью кристалла, имеющих различные конфигурации контактных электродов, локальное облучение может предоставить еще большие возможности в изменении соотношения размеров облучаемых и защищаемых участков структуры прибора.

Таким образом, реализация локального облучения электронами, как нового технологического приема управления быстродействием полупроводниковых структур большой площади, а также других методов [8–10] в разработках новых структур и при совершенствовании существующих позволяет надеяться, что улучшение параметров СПП будет продолжаться, обеспечивая тем самым дальнейший прогресс в области силовой электроники.

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

Список литературы

- [1] *Hazdra P., Vobecky J., Dorschner H., Brand K.* // *Microelectronics J.* 2004. V. 35. P. 249–257.
- [2] *Коршунов Ф.П., Марченко И.Г., Жданович Н.Е.* // *Изв. АН Беларуси. Сер. физ.-мат. наук.* 1997. № 1. С. 117–121.
- [3] *Губарев В.Н., Сурма А.М., Ковров А.В., Семенов А.Ю.* // *Прикладная физика.* 2001. № 4. С. 85–92.
- [4] *Козлов В.А., Козловский В.В.* // *ФТП.* 2001. Т. 35. В. 7. С. 769–795.
- [5] *Hazdra P., Vobecky J.* // *Sol. St. Electron.* 1994. V. 37. P. 127–135.
- [6] *Lax V., Neustadter S.F.* // *J. Appl. Phys.* 1954. V. 25. N 9. P. 1148–1154.
- [7] *Грехов И.В., Костина Л.С., Сергеев В.Г.* // *ФТП.* 1971. Т. 5. В. 7. С. 1409–1414.

- [8] *Марченко И.Г., Жданович Н.Е.* // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. В. 10. С. 45–51.
- [9] *Ладыгин Е.А., Коновалов М.П., Орлова М.Н.* и др. // ВАНТ. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2006. В. 1–2. С. 29–37.
- [10] *Горбань А.Н., Кравчина В.В., Гомольский Д.М., Солодовник А.И.* // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2008. № 3. С. 36–40.