

УДК 621.382.33

В.А. Гусев, проф., д-р техн. наук,

Д.Г. Мурзин ст. преп., Е.Ю. Владыко, магистр

Севастопольский национальный технический университет

Студгородок, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: root@sevgtu.sebastopol.ua

ПОВЫШЕНИЕ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ МОЩНОГО БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА РАДИАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ

Проведен анализ и экспериментальные исследования особенностей взаимодействия альфа – частиц с полупроводником для повышения быстродействия транзисторных структур. Результаты экспериментальных исследований показали, что введение в технологический процесс производства мощных биполярных транзисторов радиационно-термической обработки пластин α -частицами позволило обеспечить двукратный запас по быстродействию.

Для мощных высоковольтных транзисторов, используемых в коммутационных схемах и преобразователях, необходимо с одной стороны обеспечение высоких пробивных напряжений, а с другой - обеспечение больших скоростей переключения. При работе биполярного транзистора в ключевом режиме его быстродействие определяется в основном процессами рассасывания накопленного заряда в коллекторе и описывается параметром, который называется временем выключения. Для уменьшения времени выключения необходимо уменьшать время жизни неосновных носителей заряда (ННЗ) в коллекторе при сохранении времени жизни ННЗ в других областях. Снижение времени жизни достигается путём введения рекомбинационных центров, например, легированием золотом или радиационной обработкой [1]. Однако при высокой концентрации рекомбинационных центров происходит удаление основных носителей заряда, что приводит к резкому увеличению удельного сопротивления, а следовательно, и к увеличению остаточного напряжения на транзисторе. Снижение падения напряжения открытого ключа можно добиться путём увеличения концентрации легирующей примеси, однако увеличение уровня легирования высокоомной области коллектора ограничено требуемым пробивным напряжением структуры. Вышеперечисленные ограничения делают актуальными исследования, направленные на улучшение технологии, при которой заметное снижение времени жизни неосновных носителей заряда в коллекторе, а следовательно, и времени выключения, происходит при незначительном изменении остальных параметров транзистора.

Большими возможностями создания рекомбинационных центров обладает проникающая радиация.

Использование методов радиационно-термической обработки нейтронами и электронами не позволяет добиться улучшения быстродействия при сохранении усилительных свойств прибора и напряжения насыщения, так как при применении этих видов излучений радиационные дефекты вводятся равномерно по всему объему полупроводниковых структур.

Облучение альфа-частицами имеет ряд отличительных особенностей. Во-первых, альфа-частицы имеют фиксированную глубину проникновения в полупроводник, в частности, в кремний. Глубина проникновения зависит от энергии частиц и наличия тормозных (экранирующих) слоев, расположенных на пути альфа-частиц. Во-вторых, в конце трека альфа-частиц создается максимальное число дефектов. В третьих, значительная часть дефектов, возникающих при облучении, является термостабильной [1,2].

Использование особенностей взаимодействия альфа-частиц с полупроводником и другими материалами, а именно, возможности создания произвольного профиля распределения рекомбинационных свойств кремния как по глубине, так и по площади структуры прибора, позволяет целенаправленно изменять электрофизические свойства материала в заданных областях прибора. Это дает возможность уменьшить время жизни носителей только в тех областях приборов, где происходит их накопление, снижающее их быстродействие. При этом практически не ухудшаются остальные параметры приборов, что особенно важно при использовании РТП в технологии ИС и транзисторов. Таким образом, имеется возможность реализации приборов с более высоким сочетанием предельных характеристик.

Время жизни неосновных носителей заряда, определяющее скорость объёмной рекомбинации, является важнейшим физическим параметром приборов инжекционного типа. Оно связано с наличием ловушек, локальных центров, способных захватывать неравновесные носители. Несмотря на то, что при облучении в запрещённую зону полупроводника вводится целая система энергетических уровней, многие из которых могут быть рекомбинационными, время жизни в облучённом кристалле, как показывают эксперименты, определяется лишь одним-двумя доминирующими центрами. Как было показано в ряде работ [2], деградация времени жизни неравновесных носителей заряда в кремнии при воздействии облучения потоком α -частиц описывается известным выражением

$$\frac{1}{\tau(\Phi)} = \frac{1}{\tau_0} + k_t \Phi, \quad (1)$$

где $\tau(\Phi)$ – результирующее время жизни после воздействия потока; τ_0 – время жизни носителей до облучения; k_t – коэффициент радиационного изменения времени жизни.

Наиболее критичными параметрами, определяющими быстродействие ключа на мощном биполярном транзисторе, являются время рассасывания избыточного заряда и время спада коллекторного тока, которые в сумме составляют время выключения транзистора[3]

$$t_{pacc} = \tau_c \ln \left(\frac{I_{B1} + I_{B2}}{I_{Bsat} + I_{B2}} \right), \quad (2)$$

$$t_{СП} = (\tau_B + h_{21E} R_H \bar{C}_C) \ln \frac{I_{B2} + 0,9 I_{Bsat}}{I_{B2} + 0,1 I_{Bsat}},$$

где τ_C, τ_B – времена жизни носителей в коллекторе и базе соответственно; I_{B1}, I_{B2}, I_{Bsat} – прямой и обратный ток базы и ток базы насыщения; h_{21E} – коэффициент усиления тока базы в схеме с общим эмиттером; $\bar{C}_C$ – средняя емкость коллектора; R_H – сопротивление нагрузки ключа.

Как следует из (1) и (2), введение в структуру транзистора радиационных рекомбинационных центров приводит к уменьшению составляющих времени выключения и повышению быстродействия транзистора в импульсных схемах. Оценка эффективности способа радиационной обработки α -частицами для решения задач снижения времени выключения транзисторов с антиумножительным слоем была проведена экспериментальными исследованиями на кристаллах транзисторных структур n-p-n типа трех вариантов конструкции:

- с антиумножительным слоем и стандартной конструкцией эмиттера, размер кристалла 5,5х5,5 мм² (рисунок 1, а);
- с антиумножительным слоем и балластным сопротивлением в «полом» эмиттере, размер кристалла 5,5х5,5 мм² (рисунок 1, б)
- Традиционная конструкция транзистора типа КТ841, размер кристалла 5,5х5,5 мм².

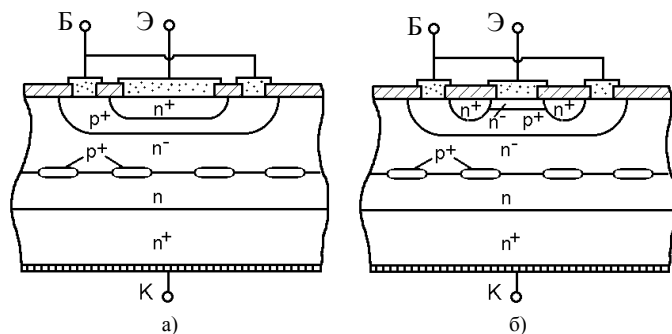


Рисунок 1 – Упрощенные поперечные разрезы исследуемых транзисторов

Тип источника α -частиц в экспериментах (АИП-Н, ТУ95.496-78) с изотопами плутония (Pu). Источники представляют собой эмалированные стальные подложки, на одну сторону которых нанесен и зафиксирован радиоактивный препарат с изотопами Pu. Для обеспечения гетерогенных по площади рекомбинационных свойств, необходимых для сохранения усилительных свойств транзистора (коэффициента передачи тока базы h_{21E}), использовалась защитная маска, ограничивающая локальные области базы от потока α -частиц. Топология маски представляет собой сетку с диаметром отверстия около 130 мкм и расстоянием между отверстиями порядка 50мкм. Защитная маска была изготовлена из ковара марки 29НК ГОСТ 14.058-78 толщиной 100 мкм, площадь отверстия $S=0,018 \text{ мм}^2$, 625 отверстий на кристалл размером $5,5 \times 5,5 \text{ мм}^2$. С целью упрощения процесса изготовления маски в последней отсутствовала строгая ориентация отверстий относительно активных областей эмиттера и базы.

С целью установления необходимой дозы для уменьшения инерционности переходных процессов пластины со структурами трех вариантов были подвергнуты облучению в течение 4, 8 и 24 часов. Из каждой пласти-

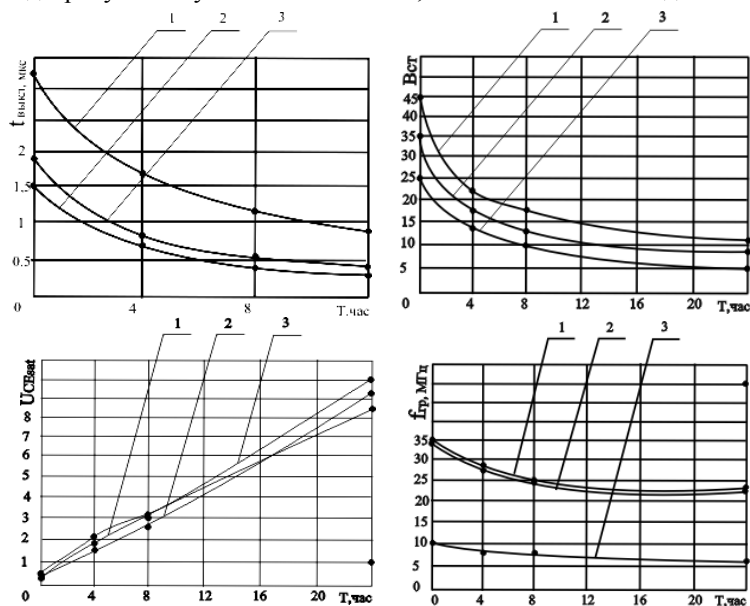


Рисунок 2 – Зависимость электропараметров исследуемых структур от времени облучения α -частицами: 1,2,3 – соответственно три варианта конструкции транзистора

ны были сформированы партии по 50 транзисторов. С помощью ультразвуковой притирки осуществлялась посадка кристаллов на кристаллодержатель при температуре 400°C . Далее проводилось измерение электропараметров транзистора и вычислялось их среднее значение. Зависимость электропараметров от времени экспозиции (дозы) для исследуемых трех вариантов структуры транзистора приведены на рисунке 2. Полученные результаты свидетельствуют о существенном улучшении быстродействия после экспозиции в течение 8 часов. При дальнейшем увеличении времени облучения до 24 часов наблюдается асимптотическое насыщение времени спада и рассасывания, в то время как напряжение $U_{CE sat}$ на открытом ключе значительно возрастает. После этого кристаллы с транзисторными структурами отжигались при температуре 300°C в среде N_2 в течение 2, 8, 20, 32 и 42 часов с измерением электропараметров. Эксперименты показали, что при температуре 300°C длительность отжига низкоактивационных радиационных центров рекомбинации должна превышать 32 часа, что увеличивает продолжительность технологического процесса. С целью сокращения

времени операции изотермического стабилизирующего отжига был предложен форсажный отжиг пластин (рисунок 3) с повышенной температурой, обеспечивающий идентичные результаты с изотермическим отжигом временные параметры транзистора.

Для подтверждения возможности сокращения длительности термического отжига был проведен форсажный отжиг пластин с максимальной температурой обработки в конвейерной печи типа У-105А в среде N_2 , общее время отжига с учетом загрузки и выгрузки – 40 мин. Полученные результаты (по 50 транзисторам) приведены в таблице 1.

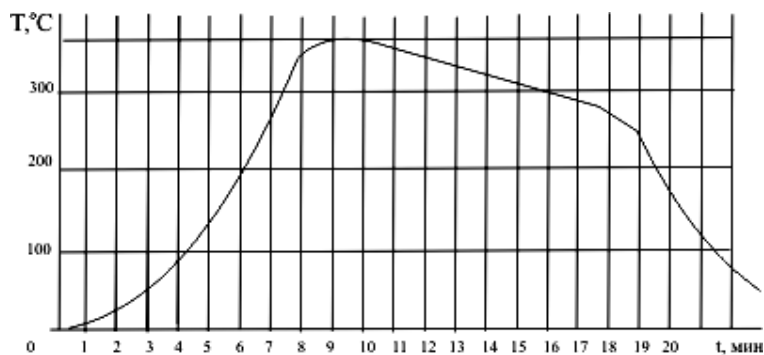


Рисунок 3 – Зависимость температуры от времени при термическом отжиге в форсажном режиме

Таблица 1 – Результаты измерений электрических параметров транзисторов, прошедших α -обработку (8 часов) и форсажный отжиг в конвейерной печи

Этапы обработок	Средние значения электропараметров					
	$h_{21Э}$	$t_{сн},$ мкс	$\tau_{расс},$ мкс	$f_{ГР},$ МГц	$U_{CESAT},$ В	$U_{BESAT},$ В
До α -обработки	35	0,2	1,3	35	0,36	1,0
α -обработка	9	0,075	0,4	8,5	3,2	1,14
Отжиг	37	0,11	0,75	32	0,44	1,01

При экспериментальных данных (таблица 1) после α -обработок различной длительности видно, что α -обработка через защитную маску без

строгой ориентации относительно активных областей приводит к снижению всех электрических параметров ($\overline{h_{21Э}}$, $\overline{\tau_{cn}}$, $\overline{\tau_{pacc}}$, $\overline{f_{зр}}$) (незначительно U_{BESAT}) для всех вариантов конструкций. Последующий стабилизирующий отжиг при $T=300^{\circ}\text{C}$ приводит к почти полному восстановлению значений электрических параметров $\overline{h_{21Э}}$, $\overline{U_{CESAT}}$, $\overline{U_{BESAT}}$, $\overline{f_{зр}}$ до исходных значений (до облучения), а значения временных параметров $\overline{t_{сп}}$ оказываются ниже исходных значений в 2 раза, $\overline{t_{pacc}}$ в – 1,6 раза.

Проведение стабилизирующего отжига в форсажном режиме конвейерной печи в среде N_2 дает за значительно меньшее время (около 40 мин) по сравнению с 42 часами стандартной выдержки при $T=300^{\circ}\text{C}$ практически аналогичные результаты, что значительно снижает длительность и энергетические затраты технологического процесса. Введение в технологический процесс производства мощных биполярных транзисторов радиационно-термической обработки пластин α -частицами позволило обеспечить двукратный запас по быстродействию и исключить достаточно трудоемкие операции контроля импульсных характеристик, что повышает наряду с функциональными свойствами транзисторов их экономические показатели.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на изучение влияния радиационных дефектов вводимых α -обработкой в структуру транзисторов с последующим термоотжигом на повышение устойчивости транзисторов к другим видам радиационного облучения, в частности, к нейтронному излучению, что имеет свою большую практическую значимость.

Библиографический список

1. Vobecky J. Optimization of Power Diode Characteristics by Means of Ion Irradiation / J. Vobecky, P. Hazra, I. Homola // IEEE Trans. On El. Dev., 1996. — V. 43. — №12. — P. 2283 – 2289.
2. Гусев В.А. Радиационно-термическая обработка α -частицами кремниевых эпитаксиальных структур и импульсных диодов на их основе/ В.А. Гусев, А.В. Борисов. // Электроника и связь, 2000. — №8. — Т. 2. — С. 298 – 300.
3. Блихер А. Физика силовых биполярных и полевых транзисторов / А. Блихер. — Л.: Энергоатомиздат, 1986. — 248 с.

Поступила в редакцию 05.02.04 г.