

Твердотельная электроника

УДК 621.382.3

А.В. Борисов, канд. техн. наук, В.А. Гусев, д-р техн. наук, Д.Г. Мурзин, канд. техн. наук

Радиационно-термическая обработка мощных биполярных транзисторов с антиумножительным слоем

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 альфа-частицами позволило обеспечить двукратный запас по быстродействию.

The influence of alpha-particles irradiation on parameters of power bipolar transistors with voltage dividing layer in bulk collector region was investigated. It was shown the switch off time of collector current was decreased in two times in result of such treatments.

Ключевые слова: *радиационно-термическая обработка, мощный биполярный транзистор, время выключения.*

Введение

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 «время выключения». Для уменьшения времени выключения необходимо уменьшать время жизни неосновных носителей заряда в коллекторе при сохранении времени жизни ННЗ в других областях. Снижение времени жизни достигается путем 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 достигается путем 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.

Влияние радиационно-термической обработки на биполярные транзисторы с антиумножительным слоем

Одним из способов повышения предельного напряжения биполярного транзистора является встраивание антиумножительного слоя в высокоомную область коллектора. Однако инерционность этих приборов остается на уровне традиционных структур транзистора. С целью увеличения быстродействия приборов в кремний обычно вводят золото. В ряде случаев введение золота не позволяет достичь нужного эффекта, поскольку растворимость его имеет предел. Кроме того, в процессе легирования золотом, оно преципитирует на дефектах кристаллической структуры, в результате чего снижается процент выхода годных приборов, и ухудшаются их характеристики. Большими возможностями создания рекомбинационных центров обладает проникающая радиация. Для управления свойствами материалов активных структур или приборов широко применяются радиационно-термические процессы (РТП), основанные на использовании стабильных радиационных дефектов. Наибольшее распространение получили РТП, направленные на увеличение быстродействия кремниевых биполярных приборов и интегральных схем (ИС). В основе этих РТП лежит использование рекомбинационных свойств радиационных дефектов, введение которых снижает время жизни неравновесных носителей

заряда, то есть улучшает параметры приборов, характеризующие их быстродействие (время нарастания, рассасывания и спада).

В теории дефектообразования радиационные дефекты делят на две основные группы: первичные и вторичные. К первичным радиационным дефектам относят точечные дефекты (пары вакансия-междоузельный атом) и области разупорядочения (локализованные области сильного повреждения кристаллической структуры с высоким содержанием точечных дефектов). При взаимодействии химических примесей с простыми радиационными дефектами происходит образование стабильных при комнатной температуре комплексов дефектов. Вторичные радиационные дефекты (комплексы вакансия-атом кислорода (А-центр), вакансия-атом основной легирующей примеси (Е-центр), дивакансии и др.) вносят в запрещенную зону полупроводника широкий спектр энергетических уровней, и определяют стабильные изменения электрофизических свойств кремния. Наиболее устойчивыми из рассматриваемых дефектов являются А-центры, температура отжига которых выше 570-600 К.

При облучении полупроводника тяжелыми частицами основными типами дефектов являются: простые дефекты типа пар Френкеля, области разупорядочения, сложные дефекты (А-центры, Е-центры и др.), дивакансии.

Радиационные дефекты в общем случае могут создаваться любым излучением с энергией, превышающей порог дефектообразования. В существующих методах радиационно-термической обработки применяется, как правило, протонное, электронное, альфа- и гамма-излучение.

Действие излучений приводит к изменению большинства параметров биполярного транзистора, однако, среди них можно выделить основной – коэффициент передачи тока, уменьшение которого при облучении – наиболее существенный фактор деградации прибора. 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]. Вся энергия альфа-частиц расходуется на акты первичной ионизации и первичные смещения. В результате вторичных процессов образуются области разупорядочения и точечные дефекты, которые при взаимодействии друг с другом и атомами примеси образуют радиационные дефекты различной сложности, что приводит к изменению электрофизических свойств облучаемого материала. Возможность изменения глубины проникновения альфа-частиц в кремний позволяет регулировать концентрационный профиль распределения рекомбинационных центров в структурах приборов [1]. За счет малого тормозного радиуса альфа-частиц в различных материалах с большой атомной массой возникает возможность создания локальных рекомбинационных областей по площади прибора при облучении через маску, что позволяет повышать предельную совокупность параметров полупроводниковых приборов. 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 объемной 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 запрещенную зону полупроводника вводится целая система энергетических уровней, многие из которых могут быть рекомбинационными, время жизни в облученном 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 альфа-частиц описывается известным выражением:

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

где $\tau(\Phi)$ – результирующее время жизни после воздействия потока Φ ; τ_0 – время жизни носителей до облучения; k_f – 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].

$$t_{\text{расс}} = \tau_K \ln \left(\frac{I_{B1} + I_{B2}}{I_{Bнас} + I_{B2}} \right),$$

$$t_{\text{сп}} = (\tau_B + h_{21Э} R_H \bar{C}_K) \ln \frac{I_{B2} + 0,9 I_{Bнас}}{I_{B2} + 0,1 I_{Bнас}}, \quad (2)$$

где τ_K , τ_B – время жизни носителей в коллекторе и базе соответственно; I_{B1} , I_{B2} , $I_{Bнас}$ – прямой и обратный ток базы и ток базы насыщения; $h_{21Э}$ – коэффициент усиления тока базы в схеме с общим эмиттером; \bar{C}_K – 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 альфа-частицами для решения задач снижения времени выключения транзисторов с антиумножительным слоем была проведена экспериментальными исследованиями на кристаллах транзисторных структур п-р-п типа трех вариантов конструкции:

- вариант 1: с антиумножительным слоем и стандартной конструкцией эмиттера, размер кристалла (5,5x5,5) мм² (рис. 1, а);
- вариант 2: с антиумножительным слоем и балластным сопротивлением в «полум» эмиттере, размер кристалла (5,5x5,5) мм² (рис. 1, б);

- вариант 3: традиционная конструкция транзистора типа КТ841, размер кристалла (5,5x5,5) мм².

Тип источника альфа-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 $h_{21Э}$), использовалась защитная маска, ограничивающая локальные области базы от потока альфа-частиц. Топология маски представляет собой сетку с диаметром отверстий ~130 мкм и расстоянием между ними порядка 50 мкм. Защитная маска была изготовлена из ковара марки 29НК ГОСТ 14.058-78 толщиной 100 мкм, площадь отверстия $S = 0,018$ мм², 625 отверстий на кристалл размером (5,5x5,5) мм². С целью упрощения процесса изготовления маски в последней отсутствовала строгая ориентация отверстий относительно активных областей эмиттера и базы.

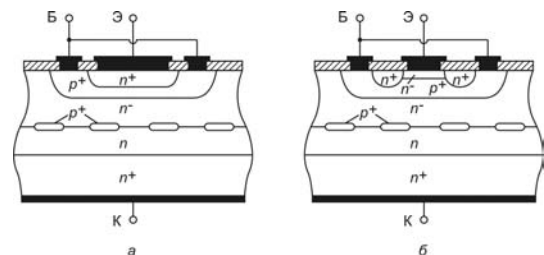


Рис. 1. Упрощенные поперечные разрезы исследуемых транзисторов

С целью установления необходимой дозы для уменьшения инерционности переходных процессов пластины со структурами трех вариантов были подвержены облучению в течение 4, 8 и 24-х часов. Из каждой пластины были сформированы партии по 50 транзисторов. С помощью ультразвуковой притирки осуществлялась посадка кристаллов на кристаллодержатель при температуре 400 °С. Далее проводилось измерение электропараметров транзистора и вычислялось их среднее значение. Зависимость электропараметров от времени экспозиции (дозы) для исследуемых трех вариантов структуры транзистора приведены на рис. 2. Полученные результаты свидетельствуют о существенном улучшении быстродействия после экспозиции в течение 8 часов. При дальнейшем увеличении времени облучения до 24-х часов наблюдается асимптотическое насыщение времени спада и рассасывания, в то время как на-

пряжение U_{CEsat} на открытом ключе значительно возрастает. После этого кристаллы с транзисторными структурами отжигались при температуре 300 °С в среде N₂ в течение 2, 8, 20, 32 и 42-х часов с измерением электропараметров. Эксперименты показали, что при температуре 300 °С длительность отжига низкоактивных 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 (рис. 3) с повышенной температурой, обеспечивающий временные параметры транзистора идентичные с результатами изотермического отжига.

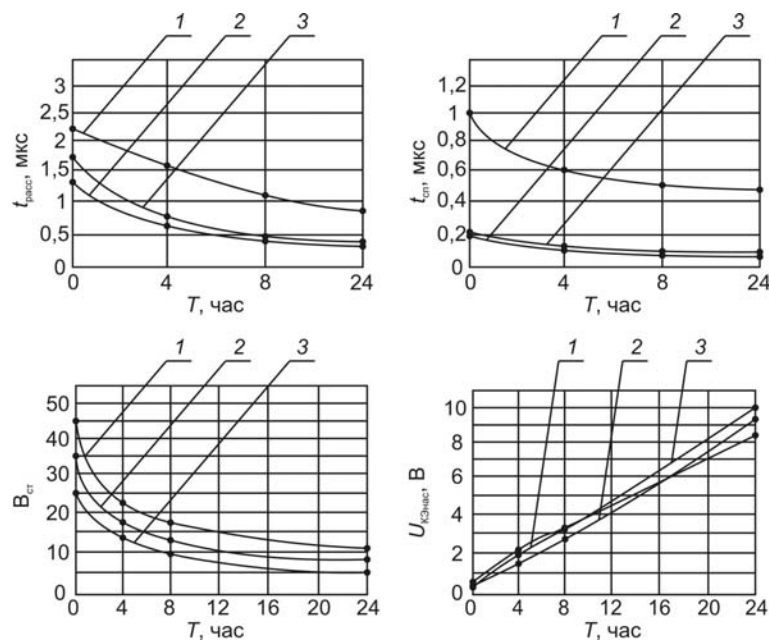


Рис. 2. Зависимость электропараметров исследуемых структур от времени облучения альфа-частицами: 1, 2, 3 – соответственно три варианта конструкции транзистора

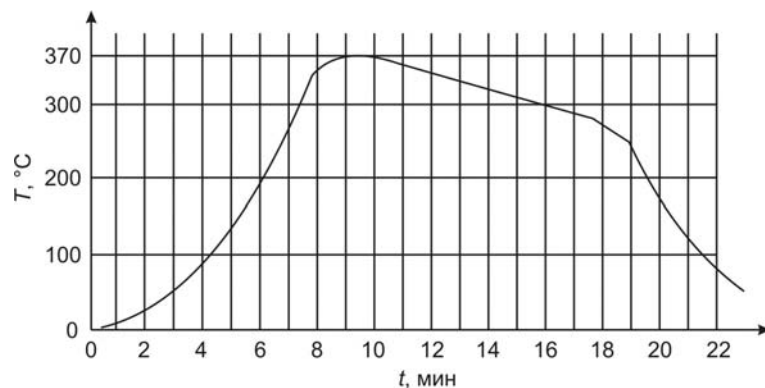


Рис. 3. Зависимость температуры от времени при термическом отжиге в форсажном режиме

Для подтверждения возможности сокращения длительности термического отжига был проведен форсажный отжиг пластин с максимальной температурой обработки 370 °С в кон

вейерной печи типа У-105А в среде N₂, общее время отжига с учетом загрузки и выгрузки – 40 минут. Полученные результаты (по 50 транзисторам) приведены в табл. 1.

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

Этапы обработок	Средние значения электропараметров					
	$h_{21Э}$	$\tau_{сп}$, мкс	$\tau_{расс}$, мкс	$f_{гр}$, МГц	$U_{кЭНАС}$, В	$U_{БЭНАС}$, В
До альфа-обработки	35	0,2	1,3	35	0,36	1,0
Альфа-обработка	9	0,075	0,4	8,5	3,2	1,14
Отжиг	37	0,11	0,75	32	0,44	1,01

Анализируя экспериментальные данные (табл. 1) после альфа-обработок различной длительности видно, что альфа-обработка через защитную маску без строгой ориентации относительно активных областей приводит к снижению всех электрических параметров ($\overline{h_{21Э}}$, $\overline{\tau_{сп}}$, $\overline{\tau_{расс}}$, $\overline{f_{гр}}$), (незначительно $U_{БЭНАС}$) для всех вариантов конструкций. Последующий стабилизирующий отжиг при $T = 300$ °С приводит к почти полному восстановлению значений электрических параметров $h_{21Э}$, $U_{кЭНАС}$, $U_{БЭНАС}$, $f_{гр}$ до исходных значений (до облучения), а значения временных параметров $\tau_{сп}$, оказываются ниже исходных значений в 2 раза, $\tau_{расс}$ – в 1,6 раза.

Выводы

- Проведение стабилизирующего отжига в форсажном режиме конвейерной печи в среде N_2 дает за значительно меньшее время (около 40 минут) по сравнению с 42 часами стандартной выдержки при $T = 300$ °С практически аналогичные результаты, что значительно снижает длительность и энергетические затраты технологического процесса.
- Введение в технологический процесс производства мощных биполярных транзисторов радиационно-термической обработки пластин альфа-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 альфа-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.

Литература:

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. – Т. 2, № 8. – С. 298–300.
3. *Блихер А.* Физика силовых биполярных и полевых транзисторов / А. Блихер. – Л. : Энергоатомиздат, 1986. – 248 с.