

НОВЫЕ МЕТОДЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОНАМИ КРЕМНИЕВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР

И. Г. Марченко, Н. Е. Жданович

ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», E-mail: march@ifitp.bas-net.by

В настоящей работе описываются результаты, полученные при технологическом электронном облучении Si приборных структур с *p-n*-переходами различных типов, с целью повышения их быстродействия (1), радиационной стойкости (2) и возможности отбраковки потенциально ненадежных экземпляров приборов (3).

1. Основной областью использования электронного облучения — как наиболее распространенной на сегодняшний день разновидности технологии управления быстродействием полупроводниковых приборов (ПП) ключевого типа: диодов, транзисторов и тиристоров, является контролируемое уменьшение времени жизни неравновесных носителей заряда (ННЗ) в их полупроводниковых структурах. Новые разработки в радиационной технологии всегда представляют интерес, так как существует вероятность, что они позволят преодолеть некоторые из ограничений, связанных с существующими методами и создать ПП более пригодные для практического применения. Современные исследования в этом направлении сосредоточены на достижении наилучшего сочетания частотных и статических характеристик приборов.

Для ПП на основе эпитаксиальных *p-n*-структур, имеющих, как правило, тонкие базовые области, допускающие повышенные дозы технологического облучения, наилучшие результаты по улучшению совокупности статических и частотных характеристик приборов могут быть получены при двухстадийной радиационной обработке. Её суть заключается в том, что сначала проводят облучение электронами приборных структур при повышенных температурах, а затем - при пониженных или комнатных температурах.

«Горячее» облучение способствует переходу полупроводниковых кристаллов в более равновесное, по сравнению с исходным, состояние. В результате, на начальном этапе облучения, когда концентрация вводимых радиационных центров рекомбинации невелика, доминирующим в приборной полупроводниковой структуре становится процесс снижения под действием факторов облучения концентрации рекомбинационно – активных центров химической природы.

Последующее облучение, предварительно облученных при повышенной температуре структур, с целью увеличения их быстродействия, позволяет получить хорошие характеристики и достичь малого разброса приборов по быстродействию путем выбора условий облучения, отличных от режимов электронного облучения приборов на объемном материале.

Предложенный способ был апробирован на диодных p^+n - структурах, изготовленных на эпитаксиальном кремнии (КЭФ-30, толщина базы ~40 мкм) и рассчитанных на прямой ток до 10 А при прямом падении напряжения до $U_F \leq 1,2-1,5$ В. Данные об изменении τ_0/τ_Φ , где τ_0 и τ_Φ - время жизни ННЗ до и после облучения соответственно и величины U_F при изменении температуры, времени и флюенса двухступенчатого облучения сведены в таблицу 1.

Таблица 1.

Изменение времени жизни неосновных носителей заряда и прямого падения напряжения в приборных структурах на эпитаксиальном кремнии, облученных электронами с энергией 4 МэВ

№ пар	Температура, время и флюенс облучения						τ_0/τ_{Φ} , от.ед	U_F , В
	T, °C	t, с	Φ , см ⁻²	T, °C	t, с	Φ , см ⁻²		
1	220	400	$\sim 1,2 \cdot 10^{13}$	-180	2700	$\sim 5,5 \cdot 10^{15}$	5	1,5
2	270	450	$\sim 8,5 \cdot 10^{13}$	-150	2700	$\sim 8,2 \cdot 10^{15}$	7	<1,5
3	300	550	$\sim 9 \cdot 10^{13}$	-25	2850	$\sim 8,5 \cdot 10^{15}$	8	1,2
4	315	580	$\sim 1 \cdot 10^{14}$	25	3000	$\sim 9 \cdot 10^{15}$	7	1,2
5	330	600	$\sim 1 \cdot 10^{14}$	150	3000	$\sim 1 \cdot 10^{16}$	7,5	1,5
6	350	1000	$\sim 1,6 \cdot 10^{14}$	250	5000	$\sim 1,65 \cdot 10^{16}$	10	>1,5

2. Обеспечение работоспособности полупроводниковых приборов в условиях длительного воздействия проникающих излучений – одна из основных проблем при их использовании в различных объектах ядерной и космической техники. Основным принципом повышения радиационной стойкости дискретных полупроводниковых приборов является использование для их изготовления исходного полупроводникового материала, характеристики которого (диффузионная длина, концентрация носителей заряда и т.д.) обладают низкой чувствительностью к радиационному воздействию. Стойкость приборов к воздействию ионизирующего излучения возрастает, например, по мере увеличения уровня легирования исходного кремния, т.е. его электропроводности.

Известно, что термообработка «кислородного» Si n-типа в диапазоне 400- 500°С существенно увеличивает его электропроводность. Это связано с введением структурных дефектов донорного типа. В результате их введения концентрация носителей заряда в исходном материале увеличивается. Если аналогичной термообработке подвергается приборная структура, то это приведет к изменению характеристик самого прибора, определенных нормами ТУ для приборов данного типа. Это нежелательное явление. Необходимо добиться компромисса и ввести такую концентрацию термодоноров, чтобы электропроводность исходного кремния возросла в пределах, когда основные эксплуатационные характеристики прибора еще не выходят за пределы норм ТУ. В этом случае более радиационно-стойким будет прибор на основе материала с большей проводимостью, как имеющий более высокую исходную степень дефектности.

Сущность предложенного нами способа повышения радиационной стойкости bipolarных кремниевых структур основана на возможности проведения их термообработки при одновременном воздействии электронного облучения.

Вероятно, при термообработке приборных структурах в условиях облучения небольшой интенсивности (интенсивность - количество электронов, падающих на 1см^2 поверхности кристалла в 1с) более эффективно вводятся термодоноры самых различных типов (конфигураций), определенное сочетание которых обуславливает наилучшее поведение электрических характеристик прибора при последующем радиационном воздействии.

Объектами служили силовые $p^+ - n$ – диоды (КЭФ-32), рассчитанные на ток 10 - 15 А и запорное напряжение до 1000 В. Их помещали в капсулу, где задавалась и поддерживалась постоянной в период всего процесса обработки определенная температура из диапазона $400-450^\circ\text{C}$. Так, например, при достижении в капсуле температуры 425°C и выдержке образцов без облучения в течение 300 сек., диоды подвергали облучению электронами с энергией 4 МэВ и интенсивностью пучка электронов $1 \cdot 10^{10} - 5 \cdot 10^{10} \text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$ в течение 1800 – 2700 сек при температуре 425°C . После выключения электронного пучка структуры снова выдерживались в капсуле без облучения при температуре 425°C в течение 300 сек.

После радиационно-термической обработки и корпусирования диоды подвергались процедуре испытаний на радиационную стойкость. С этой целью их облучали электронами с энергией 4 МэВ при интенсивности потока частиц $2 \cdot 10^{12} \text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$ и комнатной температуре. В качестве критерия радиационной стойкости использовалось двукратное увеличение прямого падения напряжения на диоде U_F при прямом токе 10А. Обратный ток I_R контролировался при напряжении 500В и температуре 125°C . В таблице 2 приведены результаты испытаний диодов на радиационную стойкость после термо - радиационной обработки.

Как видно из данных, приведенных в таблице, радиационно-термическая обработка диодных структур позволяет получить приборы в 5-8 раз более радиационно – стойкие, чем в случае простой термообработки, без облучения.

Таблица 2.

Зависимость флюенса облучения, при котором наблюдается двукратный рост U_F , от интенсивности и времени облучения предварительной термообработки диодов при 425°C

Интенс. обл., $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$, темп. обл., $^\circ\text{C}$	$5 \cdot 10^9$ 425	$1 \cdot 10^{10}$ 425	$2,5 \cdot 10^{10}$ 425	$5 \cdot 10^{10}$ 425	$1 \cdot 10^{11}$ 425	Т/обр. без обл.
Время обл.,с	3500	2700	2200	1800	1000	
Флюенс обл., см^{-2}	$6,5 \cdot 10^{14}$	$1,5 \cdot 10^{15}$	$2 \cdot 10^{15}$	$2,5 \cdot 10^{15}$	$2,0 \cdot 10^{15}$	$< 3 \cdot 10^{14}$
Обр. ток I_R	норма ТУ	норма ТУ	норма ТУ	норма ТУ	У 30% диодов I_R выше нормы ТУ	У 55% диодов I_R выше нормы ТУ

3. Как известно, проверка параметров ПП на соответствие ТУ не гарантирует их надежную работу. Основной причиной ранних отказов ПП является несовершенство исходных полупроводниковых материалов и недостаточная точность технологических режимов. В результате приборные структуры могут содержать различные дефекты. Эти дефекты не обнаруживаются при проверке электрических параметров и на функциональном контроле, поэтому их называют скрытыми дефектами (СД). Наиболее действенными методами выявления СД и отбраковки некачественных и потенциально ненадежных приборов являются технологические отбраковочные и диагностические испытания ПП. Они основаны на провоцировании отказов (нарушении стабильности параметров) ПП путем активации СД в физической структуре кристалла. Для активации этих дефектов применяют методы термического, электрического, термоэлектрического и радиационного воздействия. Для контроля используют зависимость какого – либо чувствительного параметра ПП от дестабилизирующих факторов.

Нами разработан способ отбраковки потенциально ненадежных силовых Si диодов, предрасположенных к сбоям по параметрам обратной ветви вольтамперной характеристики. Он включает одновременное радиационное и термическое воздействие на диод, измерение обратного тока диода до и после воздействия и отбраковку диодов на основе изменений этого параметра. Причем отбраковку осуществляют после проведения в процессе облучения термоциклирования в диапазоне температур от -60 до 125°C в течение 20 – 30 мин. Для отбраковки использовалось облучение электронами с энергией 4 МэВ при средней интенсивности пучка электронов $1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. За критерий отбраковки принимался выход величины обратного тока диода за пределы допустимых значений более чем на 10%.

Термоциклирование при воздействии небольших доз ионизирующего облучения не приводит к значительному дефектообразованию в объеме полупроводника, а ускоряет лишь протекание эффектов на поверхности приборных структур, повышая достоверность выявления приборов, имеющих СД.

Использовались высоковольтные диоды Д112-10 в количестве 25 штук. Предварительный контроль показал, что все диоды имеют значения параметров прямой и обратной ветви ВАХ, гарантированных заводом–изготовителем.

Измерение (при номинальном обратном напряжении 1000В и температуре 125°C) обратного тока (I_R) у всех 25 диодов до и после проведения радиационно – термической обработки дало следующие результаты. У трех диодов I_R превысил начальное (до обработки) значение на 11, 14 и 21%, соответственно; у 20 диодов превышение I_R было в пределах 2 – 7%, а у двух диодов I_R даже снизился на 8 и 12%. Таким образом, из 25 приборов следует отбраковать, как потенциально ненадежные, три диода с наибольшим изменением I_R .

Для проверки достоверности отбраковки использовалось тестирующее облучение всей партии. С этой целью диоды облучались различными флюенсами электронов с энергией 4 МэВ при средней интенсивности пучка электронов $2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ и на разных стадиях облучения измерялись их параметры: обратный ток и прямое падение напряжения. Установлено, что отбракованные диоды действительно выходят из строя при дозах облучения, при которых остальные приборы (22 диода) сохраняют работоспособность.

Таким образом, используя термоциклирование в комбинации с ускоряющим воздействием ионизирующего облучения, как более эффективное средство, чем облуче-

ние при фиксированной температуре, для активации поверхностных дефектов и контролируя величину тока в обратно – смещенных диодах можно оперативно и высокой достоверностью выявить образцы потенциально ненадежных приборов, predisposed к «первоочередному» выходу из строя при любых дестабилизирующих воздействиях: термических, электрических, термоэлектрических и радиационных.

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