

ВОПРОСЫ АТОМНОЙ НАУКИ И ТЕХНИКИ

СЕРИЯ:

**ФИЗИКА РАДИАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ
НА РАДИОЭЛЕКТРОННУЮ АППАРАТУРУ**

Научно-технический сборник

ВЫПУСК 1-2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И РАСЧЕТНЫЕ ОЦЕНКИ ПОВЫШЕНИЯ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ И УЛУЧШЕНИЯ КОМПЛЕКСА ПАРАМЕТРОВ ТРАНЗИСТОРНЫХ СТРУКТУР, ПОДВЕРЖЕННЫХ "ГЛУБОКОМУ" ОБЛУЧЕНИЮ БЫСТРЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ

Е.А. Ладыгин, П.Б. Лагов

Приведены результаты экспериментального исследования и расчетных оценок влияния режимов операций облучения быстрыми (6 МэВ) электронами и термического отжига на радиационную стойкость к статическому и импульсному излучению и электрические параметры кремниевых транзисторных структур. Разработаны оптимальные режимы радиационной и термической обработки, применение которых позволяет наряду с повышением радиационной стойкости эффективно регулировать и улучшать комплекс статических и динамических параметров транзисторов, а также значительно уменьшить их зависимость от уровня инжекции и температуры.

К транзисторным структурам, предназначенным для работы в полях статической и импульсной радиации, предъявляются требования по радиационной стойкости. Критерием оценки уровня стойкости кремниевых транзисторов к статической радиации обычно является выход наиболее чувствительного параметра h_{21E} за нормы ТУ, из чего следует необходимость применения различных конструктивно-технологических решений для уменьшения деградации времени жизни в базовой области и, следовательно, коэффициента передачи за счет образования радиационных центров (РЦ) [1–4].

Одним из методов снижения радиационной чувствительности времени жизни в исходных подложках и структурах является дополнительное легирование их литием, который в кремнии имеет высокую подвижность и активно взаимодействует с компонентами пар Френкеля, замедляя процесс образования глубоких РЦ и снижения времени жизни при облучении [5]. Для аналогичных целей рекомендуется также легирование кремния редкоземельными элементами, атомные размеры которых намного больше чем у кремния, в результате чего вокруг этих атомов возникают упругие поля сжатия, способные гетерировать на себя генерируемые радиацией вакансии и тем самым замедлять скорость снижения времени жизни. Несмотря на показанную на практике эффективность, все указанные методы имеют ряд технологических сложностей, особенно при использовании их для повышения радиационной стойкости полупроводниковых неоднородных структур. В первую очередь это связано с

неоднородностью распределения вводимых примесей по объему и поверхности структуры, что приводит к плохой воспроизводимости процесса и может способствовать выходу ряда других параметров структур за нормы ТУ. В силу указанных причин основным путем повышения радиационной стойкости транзисторных биполярных структур является оптимизация конструктивно-технологических решений при их разработке и изготовлении.

По нашему мнению, одним из наиболее эффективных методов повышения стойкости транзисторных структур к статической и импульсной радиации является применение различных вариантов радиационно-термической обработки (РТО) [6]. Физическая суть повышения стойкости при РТО заключается в предварительном (до эксплуатации в радиационной среде) введении РЦ в базовую область структур, приводящем к уменьшению времени жизни в базовой области и снижению его чувствительности к последующему воздействию радиации. Обеспечение оптимальных значений коэффициента передачи (60–80) после РТО достигается за счет использования исходных структур с повышенными значениями частотных параметров и h_{21E} (200–250) и более узкой областью активной базы. Наряду со снижением исходного времени жизни сужение базовой области также играет важную роль в повышении радиационной стойкости, так как в структурах с более узкими базами влияние времени жизни в базе на уменьшение h_{21E} снижается за счет роста дрейфовой составляющей тока носителей

Таблица 1

Стойкость транзисторных структур к статической радиации

Вариант технологии	$\Phi_{0,5}, \text{см}^{-2}$ (<i>n-p-n</i>)	$\Phi_{0,5}, \text{см}^{-2}$ (<i>p-n-p</i>)
1. Маршрутная технология 1 ($h_{21E}=60-80$)	$2,3 \cdot 10^{15}$	$1,5 \cdot 10^{15}$
2. Маршрутная технология 2 ($h_{21E}=200-250$)	$1,8 \cdot 10^{15}$	$1,2 \cdot 10^{15}$
3. Маршрутная технология с диффузией Au ($N_{Au} \sim 3 \cdot 10^{15} \text{см}^{-3}$) ($h_{21E}=60-80$)	$2,1 \cdot 10^{15}$	$1,3 \cdot 10^{15}$
4. Маршрутная технология с РТО в режимах: 6 МэВ электроны ($\Phi_e=5 \cdot 10^{15} \text{см}^{-2}$, $\phi_e=2 \cdot 10^{12} \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$), отжиг (300 °С, 60 мин) ($h_{21E}=60-80$)	$4,0 \cdot 10^{15}$	$3,1 \cdot 10^{15}$
5. Маршрутная технология с РТО в режимах: 6 МэВ электроны ($\Phi_e=2 \cdot 10^{16} \text{см}^{-2}$, $\phi_e=2 \cdot 10^{12} \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$), отжиг (350 °С, 60 мин) ($h_{21E}=60-80$)	$6,2 \cdot 10^{15}$	$5,0 \cdot 10^{15}$

от эмиттера к коллектору [7].

Критерием радиационной стойкости транзисторных структур к статическому излучению является поток быстрых частиц $\Phi_{0,5}$, при котором наблюдается снижение коэффициента передачи h_{21E} в 2 раза от исходного значения. В табл. 1 приведены значения $\Phi_{0,5}$, полученные из экспериментальных результатов по облучению транзисторных структур *n-p-n*- и *p-n-p*-типа (КТ312, 313, 315, 361) различных вариантов изготовления быстрыми (6 МэВ) электронами при плотности потока частиц $\phi_e=10^{12} \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Как видно из полученных результатов, наибольшее повышение радиационной стойкости (в 3–4 раза) по сравнению с исходной технологией дает использование методики «глубокого» облучения при проведении РТО. При этом наблюдается уменьшение различий в стойкости структур *n-p-n*- и *p-n-p*-типа: у исходных структур (варианты 1–3) значения $\Phi_{0,5}$ отличаются в 1,6–1,8 раза, а прошедших РТО – лишь в 1,2–1,3 раза.

В целях повышения уровня бессбойной работы транзисторных структур в полях импульсной радиации требуется применение конструктивно-технологических решений, направленных на снижение уровня протекающих через транзистор импульсных токов при воздействии радиации, которые напрямую зависят от диффузионной длины неосновных носителей заряда в коллекторной области структуры, ширины области пространственного заряда (ОПЗ) коллекторного перехода и глубины его залегания. Для повышения стойкости транзисторных структур к ионизационным процессам используют диффузионное легирование рекомбинационными примесями золота, платины и др., создающими глубокие уровни. Однако диффузионные методы введения примесей с глубокими уровнями имеют плохую воспроизводимость и низкую экономическую эффективность. Кроме того, в результате

неравномерности распределения по кристаллу, выхода на поверхность и образования скоплений указанных примесей на локальных участках использование этих методов для повышения стойкости к импульсной радиации зачастую негативно сказывается на ряде других параметров и характеристик структур.

С учетом полученных результатов проанализируем эффективность РТО для повышения стойкости транзисторных структур к импульсной радиации. Величина первичного фототока I_Φ , а следовательно, и стойкость к импульсному гамма-излучению определяется длиной собирания носителей заряда, которая в транзисторных структурах определяется суммой [8]

$$L = \frac{r_{jk}}{2} + d_K + L_K, \quad (1)$$

где r_{jk} – глубина залегания коллекторного перехода; d_K – ширина области пространственного заряда перехода коллектор-база; L_K – диффузионная длина неосновных носителей заряда в коллекторе.

$$I_\Phi = q\gamma P_\gamma A_K \left(\frac{r_{jk}}{2} + d_K + L_K \right), \quad (2)$$

где γ – удельная скорость генерации пар при $P_\gamma=1 \text{ рад/с}$ ($\gamma_{Si}=4 \cdot 10^{13} \text{ рад}^{-1} \cdot \text{см}^{-3}$); P_γ – мощность дозы, рад/с; A_K – площадь коллекторного перехода, $A_K \approx 5 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$.

В табл. 2 представлены результаты расчета первичного фототока I_Φ , протекающего в транзисторных *n-p-n*- (верхняя строка) и *p-n-p*-структурах (нижняя строка) различных технологических вариантов при мощности дозы гамма-квантов $P_\gamma=10^{10} \text{ рад/с}$, обратном напряжении на коллекторе $U_{КБ}=10 \text{ В}$ и электрофизических параметрах, входящих в выражения (1) и (2). При

расчете диффузионной длины в коллекторе использовались известные данные по подвижностям $\mu_p=400 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ и $\mu_n=1000 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ и экспериментальные результаты по времени рассасывания [4]. Значения d_K вычислены из вольт-фарадных характеристик коллекторного перехода.

Как видно из представленных результатов, ослабление роли диффузионной длины в коллекторе и расширение коллекторного перехода способствуют выравниванию значений I_Φ в $n-p-n$ - и $p-n-p$ -структурах. Наибольшая эффективность наблюдается при использовании методики "глубокого" облучения (вариант 5), обеспечивающей повышение стойкости $n-p-n$ -структур в

3,5; $p-n-p$ -структур в 4,3 раза и соответственно уменьшения различий в значениях I_Φ с 50 до 25 %.

Таким образом, применение РТО с использованием "глубокого" облучения более эффективно и позволяет повысить стойкость транзисторных структур к статической и импульсной радиации в 3–4 раза. При этом эффект повышения радиационной стойкости более ярко проявляется в изначально менее стойких $p-n-p$ -структурах. Это приводит к выравниванию стойкости структур $n-p-n$ - и $p-n-p$ -типа с 50–60 % до 20–25 % и позволяет достигать большей симметричности показателей стойкости комплементарных биполярных структур.

Таблица 2

Параметры, характеризующие стойкость транзисторных $n-p-n$ - и $p-n-p$ -структур к импульсному гамма-излучению

Вариант технологии по табл. 1	$r_{jk}/2$, мкм	d_K , мкм	L_K , мкм	L , мкм	I_Φ , мА
1	1,1	1,1	16,0	18,2	58
	1,0	1,1	25,0	27,1	86
2	0,9	1,1	16,0	18,0	57
	0,8	1,1	25,0	26,9	85
3	1,0	1,3	8,5	10,8	31
	0,9	1,3	13,2	15,4	44
4	1,0	1,6	4,6	7,2	23
	0,9	1,6	7,2	9,7	31
5	0,9	2,0	2,0	4,9	16
	0,8	2,0	3,2	6,0	19,5

Таблица 3

Электрические параметры маломощных кремниевых транзисторных $n-p-n$ - и $p-n-p$ -структур при РТО (варианты 4–5) и с обычной технологией (варианты 1–3)

Параметр	Вариант технологии				
	1	2	3	4	5
t_S , нс ($I_K^{\text{нап}}=50 \text{ мА}$)	230–260	230–260	50–100	20–25	3–5
Температурный коэффициент t_S ТКВР, %/°C	1,3	1,3	1,15	0,65	0,45
f_T , МГц ($I_B=5 \text{ мА}$)	120–140	400–500	150–200	200–250	400–450
Диапазон h_{21E} ($I_K=0,1\text{--}30 \text{ мА}$, $T=25^\circ\text{C}$) и ИКН	25–75 (3)	55–250 (4,5)	20–80 (4)	35–75 (2,1)	50–75 (1,5)
Диапазон h_{21E} ($I_K=20 \text{ мА}$, $T=-60\text{...}+125^\circ\text{C}$) и ТКН	40–150 (3,75)	70–350 (5)	40–150 (3,75)	45–105 (2,3)	50–90 (1,8)
$U_{ЗБпроб}$, В ($I_{Зобр}=1 \text{ мкА}$)	5,0	5,2	4,7	5,8	6,5
$U_{КБпроб}$, В ($I_{Кобр}=1 \text{ мкА}$)	40	40	35	45	55
$\Phi_{0,5}$, 10^{15} см^{-2} ($n-p-n/p-n-p$)	2,3/1,5	1,8/1,2	2,1/1,3	4,0/3,1	6,2/5,0
I_Φ , мА ($P_T=10^{10} \text{ рад/с}$ ($n-p-n/p-n-p$))	58/86	57/85	31/44	23/31	16/19,5
ИКН= $h_{21E}^{\text{max}}(20 \text{ мА})/h_{21E}^{\text{min}}(0,1 \text{ мА})$, [отн.ед.] – инжекционный коэффициент h_{21E} ; ТКН= $h_{21E}^{\text{max}}(+125^\circ\text{C})/h_{21E}^{\text{min}}(-60^\circ\text{C})$, [отн.ед.] – температурный коэффициент h_{21E} .					

В ходе контроля основных статических и динамических параметров и характеристик транзисторных *n-p-n*- и *p-n-p*-структур установлено, что использование методики "глубокого" облучения при РТО (вариант 5) позволяет значительно улучшить весь комплекс электрических параметров исследуемых структур (табл. 3). Для сравнения приведены параметры исходных структур, изготовленных по маршрутной технологии, структур с диффузией рекомбинационной примеси золота и структур, прошедших РТО в обычных режимах.

Как видно из представленных результатов, практически по всему комплексу параметров достигается значительный положительный эффект (от десятков до сотен процентов). Получение такого уникального сочетания параметров является результатом интеграции методики "глубокого" облучения и изотермического отжига, позволяющей локализовать РЦ с высокими рекомбинационными характеристиками в областях активной базы, коллектора и коллекторного перехода, и использования исходных структур с наиболее подходящими конструктивно-технологическими и электрофизическими параметрами для проведения РТО: узкой базовой областью ($\leq 0,5$ мкм), высокими исходными значениями h_{21E} и граничной частоты f_T . При этом в активной базе создается профиль концентрации термостабильных РЦ (концентрация РЦ возрастает от эмиттера к коллектору), смещающий "центр тяжести" рекомбинационных потерь (особенно при малых токах коллектора) из ОПЗ эмиттерного перехода в глубь активной базы [2, 4, 7].

Из анализа данных табл. 3 следует, что введение в маршрутную технологию транзисторных *n-p-n*- и *p-n-p* структур РТО в оптимально выбранных режимах (вариант 5) наряду с повышением радиационной стойкости позволяет получить ряд положительных результатов:

- улучшить импульсные параметры t_s (время рассасывания) не менее чем в 50 раз и снизить в 2,5–3 раза их зависимость от температуры во всем рабочем диапазоне (от -60 до $+125$ °C);
- получить оптимальное сочетание частотных f_T и усилительных h_{21E} параметров: $f_T=400\text{--}450$ МГц, $h_{21E}=60\text{--}80$;
- ослабить в 2 раза зависимость коэффициента передачи от уровня инжекции и температуры во всем рабочем диапазоне токов коллектора и температур;
- улучшить электропрочность транзисторных структур, повысить пробивные

напряжения эмиттерного и коллекторного переходов на 20–30 %;

- экспериментально показать гораздо большую эффективность методики "глубокого" облучения в сравнении с операцией диффузии рекомбинационной примеси золота и обычной методикой РТО для повышения радиационной стойкости и улучшения комплекса статических и динамических параметров и характеристик транзисторных структур.

Таким образом, использование нового физически обоснованного подхода при введении радиационной технологической обработки с использованием "глубокого" облучения в технологию транзисторных *n-p-n*- и *p-n-p*-эпитаксиально-планарных структур позволило получить структуры с повышенной радиационной стойкостью и наилучшим сочетанием электрических параметров, что значительно расширяет область их применения, в том числе в составе комбинированных структур.

Литература

1. Лагов П.Б., Ладыгин Е.А. Кинетика накопления глубоких радиационных центров в неоднородных кремниевых структурах. // Известия вузов. Материалы электронной техники. 1999. № 1. С. 53–55.
2. Ладыгин Е.А., Горюнов Н.Н., Лагов П.Б. и др. // Материалы второй Всероссийской конференции «Кремний-2000», 9–11 февраля 2000 г. МИСиС. Москва. С. 275–283.
3. Ладыгин Е.А., Лагов П.Б., Сурма А.М. и др. // Материалы второй Всероссийской конференции «Устройства и системы энергетической электроники» УСЭЭ-2000, 29 марта 2000 г. С. 84–85.
4. Лагов П.Б. Радиационно-термические процессы в кремниевых биполярных структурах и их влияние на электрофизические параметры: Кандидатская диссертация. М.: МИСиС, 1999.
5. Вавилов В.С., Ухин Н.А. Радиационные эффекты в полупроводниках и полупроводниковых приборах. М.: Атомиздат, 1969.
6. Лагов П.Б., Ладыгин Е.А. Повышение радиационной стойкости кремниевых биполярных *n-p-n*- и *p-n-p*-транзисторов к импульсному и статическому излучению при радиационно-термической обработке // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 1998. Вып. 1–2. С. 114–117.
7. Ладыгин Е.А., Лагов П.Б., Осипов Г.А. Улучшение усилительных, импульсных и температурных характеристик кремниевых маломощных транзисторов при обработке быстрыми электронами и отжиге // Там же. 1996. Вып. 1–3. С. 95–100.
8. Larin F. Radiation effects in Semiconductors Devices. New York-London-Sydney.: John Wiley & Sons, Inc. 1968.