

Анализ способов снижения времени восстановления обратного сопротивления мощных быстродействующих диодов

Жукова Н. С., Крымко М. М., Ледовских А. П., Максимов А. Н., Сонов О. В.

Сформулированы требования к основным значениям параметров современных мощных быстродействующих диодов – времени восстановления обратного сопротивления и прямого падения напряжения. Предложены и проанализированы различные способы достижения требуемых параметров. Получены опытные образцы диодов со значениями времени обратного восстановления 25-30 нс и прямым падением напряжения 1,1 В.

Работа полупроводникового диода в импульсном режиме характеризуется быстрыми и частыми переходами из одного устойчивого состояния в другое. Предметом исследования являются переходные процессы, сопровождающие переключение диода, и возможности достижения малого прямого падения напряжения при максимальном прямом токе.

Процессы, связанные с переключением диода из нейтрального (обратного) в прямое направление, обуславливает инжекция неосновных носителей заряда, их распространение в области, удалённой от р-п перехода, и их накопление в этих областях.

Процессы, связанные с переключением диода из прямого направления в обратное (нейтральное), определяются рекомбинацией избыточных носителей заряда.

В случае высокого уровня инжекции при протекании прямого тока из-за спада концентрации избыточных дырок по мере удаления от границ р-п перехода можно наблюдать весь спектр значений уровня инжекции – от максимального до нулевого.

Время восстановления обратного сопротивления диода определяется рекомбинацией избыточных носителей заряда. Если не принимать никаких мер по снижению времени восстановления, оно будет иметь большое значение, так как время жизни носителей велико ($\tau = 80-150$ мкс). При таком значении времени жизни время восстановления обратного сопротивления диода может составлять порядка 500-1700 нс. Поэтому необходимо решать задачу снижения времени жизни неосновных носителей, при этом не очень ухудшить прямое падение напряжения на р-п переходе.

Для снижения времени жизни в кристалле создают рекомбинационные центры, сопровождаемые появлением разрешённого энергетического уровня (или системы уровней) внутри запрещённой зоны [1].

Эффективность рекомбинационных центров определяется вероятностью захвата носителей этим центром. Вероятность захвата зависит от сечения захвата рекомбинационного центра (ловушки). Чем больше сечение захвата, тем эффективнее происходит рекомбинация через этот центр.

При известных значениях концентрации ловушек (N_L), сечении захвата (δ_p, δ_n) и тепловой скорости (v_p, v_n) вероятность захвата определяется произведением данных величин, а время жизни неосновных носителей как величина, обратная вероятности захвата [2]:

$$\tau = 1 / N_L * \delta_p * v_p.$$

Современные требования к мощным быстродействующим диодам таковы, что они должны быстро переключаться (от единиц нс до 50 нс) при значениях прямого

падения напряжения от 1,1 до 1,25 В при прямых токах от 50 А до 100 А, обратном напряжении от 600 В до 1700 В [3,4].

Для получения требуемых значений прямого падения напряжения на уровнях токов от 50 А до 100 А и быстрого времени восстановления диода необходимо оптимизировать технологический процесс, поскольку эти параметры находятся в противоречии.

Осциллограмма для определения времени восстановления до проведения процессов снижения представлена на рис. 1. Значение времени восстановления составляет 468 нс для размера кристалла 10x10 мм.

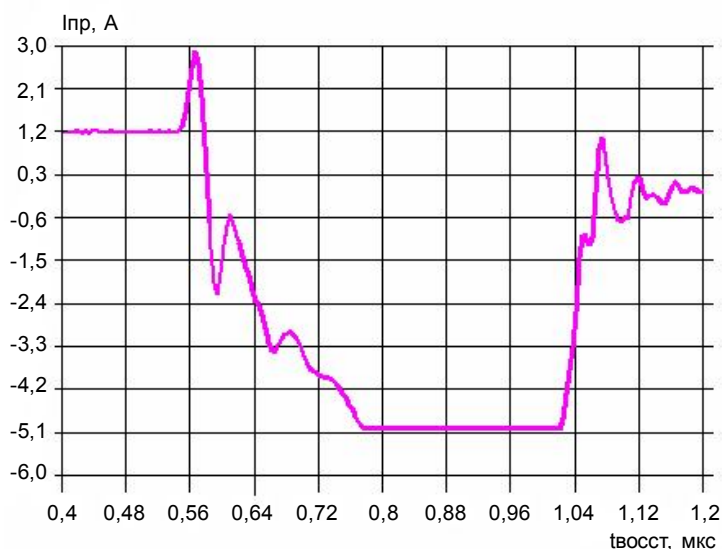


Рис. 1

Осциллограмма для определения времени восстановления до облучения для размера кристалла 10x10 мм

Работа проводилась по следующим направлениям:

- расчёт площади диода;
- исследование влияния легирования золотом в обратную сторону на прямое падение напряжения и время восстановления;
- исследование влияния дозы облучения α -частицами на прямое падение напряжения и время восстановления;
- исследование влияния дозы облучения α -частицами и электронами;
- исследование влияния облучения α -частицами с последующим отжигом и повторным облучением α -частицами.

Применяемая отечественная технология характеризуется использованием высокотемпературных диффузионных процессов для формирования диодов с требуемыми значениями обратных напряжений. Эмиттер диода создавался двустадийным методом – загонкой бора с последующей разгонкой в течение 60 минут в среде H_2O при температуре $T = 1060^\circ C$ и 240 минут в среде N_2 при температуре $T = 1200^\circ C$ в базу (эпитаксиальный слой) n-типа с удельным сопротивлением $7 \cdot 10^{13}$ - $7 \cdot 10^{14}$ Ом·см в зависимости от типа диода. Технологический процесс уменьшения времени восстановления методом облучения α -частицами проводился с последующим отжигом в инертной среде в диапазоне температур $T = 320$ - $370^\circ C$.

Расчёт распределения неравновесной плотности дырок в базе диода при прямом токе 100 А, проведённый в среде ISE TCAD, показан на рис. 2.

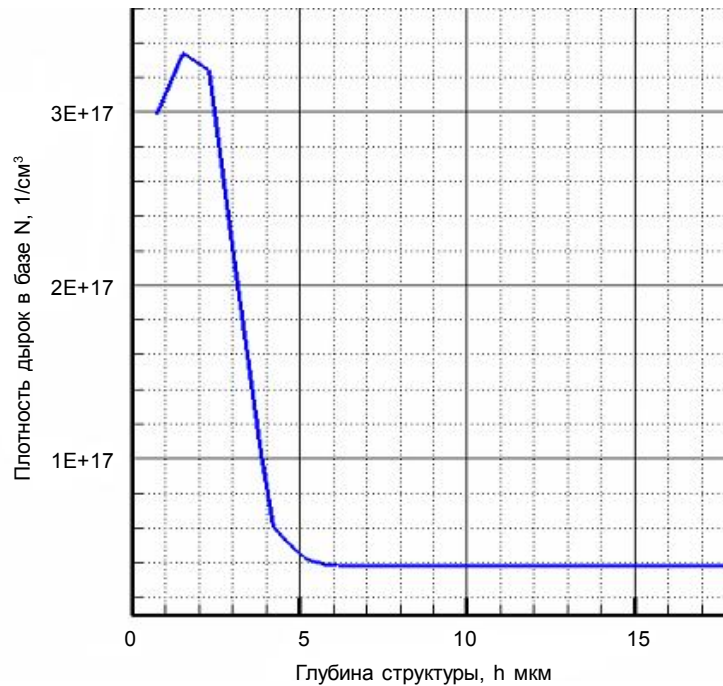


Рис. 2

Распределения плотности дырок в базе диода

В результате проведённых исследований и отработки технологических процессов были разработаны мощные быстродействующие диоды с характеристиками, отвечающими современным требованиям. Разработанный маршрут оптимизирован на стандартное оборудование и типовые технологические процессы. Технология создания мощных быстродействующих диодов представляется перспективной.

Результаты исследований приведены в таблице.

Осциллограммы представлены на рис. 3-5.

Проведено сравнение различных способов снижения времени восстановления обратного восстановления мощных быстродействующих диодов.

На параметры диода (время восстановления и прямое падение напряжения) существенно влияет размер кристалла. При больших площадях р-п перехода получаются малые значения $U_{пр}$ и достаточно большие значения $t_{восст}$; при малых площадях р-п перехода, наоборот, достаточно малые значения $t_{восст}$ и большие значения $U_{пр}$.

Таким образом, метод легирования золотом и метод облучения α -частицами и электронами, дающие примерно одинаковые значения времени восстановления, перспективны только для кристаллов малого размера, при этом прямое падение напряжения в кристаллах, легированных золотом, существенно выше.

На рисунке 4 приведена осциллограмма времени восстановления обратного сопротивления диода Д2 после двойного облучения α -частицами. Этот способ является наиболее перспективным для снижения времени восстановления обратного сопротивления диодов, так как после его воздействия параметры диодов отвечают современным требованиям не только по прямому падению напряжения при больших значениях прямого тока, но и требованиям обратного напряжения.

Метод двойного облучения α -частицами даёт незначительный выигрыш по времени восстановления по сравнению с однократным облучением α -частицами. Это можно объяснить тем, что при инъекции неосновные носители проникают на всю глубину эпитаксиального слоя диода. Центры рекомбинации, созданные при одинарном и двойном

облучении α -частицами, располагаются на глубине 20-25 мкм, в результате чего рекомбинация неосновных носителей возможна только на указанной глубине. Анализируя значения прямого падения напряжения при однократном и двойном облучении α -частицами, можно предположить, что снижение значения времени восстановления при двойном облучении α -частицами происходит за счёт увеличения сечения ловушек.

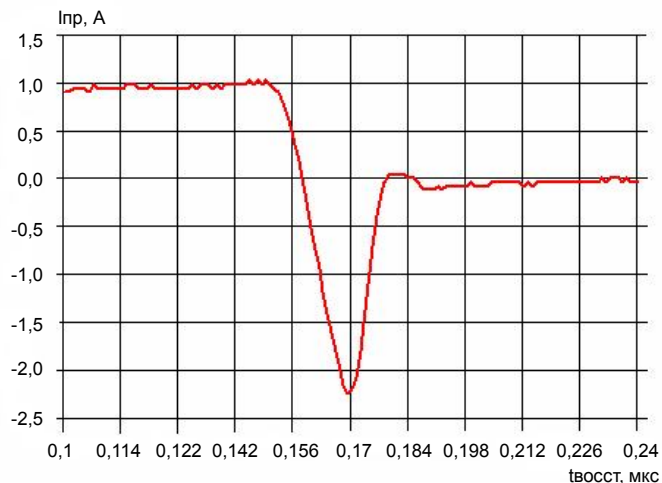


Рис. 3

Осциллограмма для определения времени восстановления при легировании золотом диода Д2 5-4,3 мм, $t_{\text{восст}} = 12$ нс

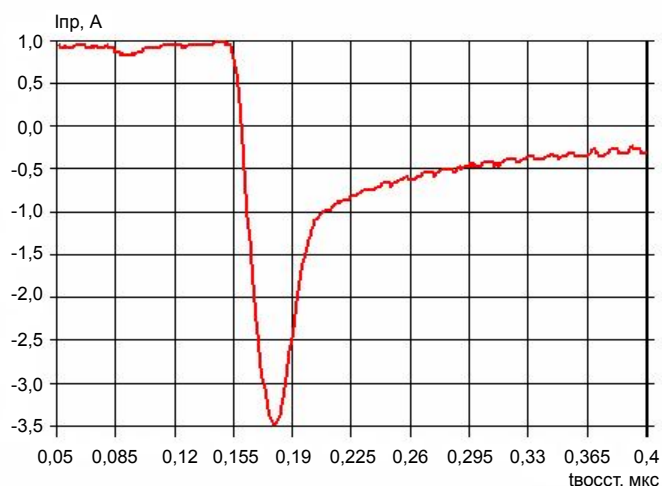


Рис. 4

Осциллограмма для определения времени восстановления при однократном облучении α -частицами диода Д2 10-10 мм, $t_{\text{восст}} = 35$ нс

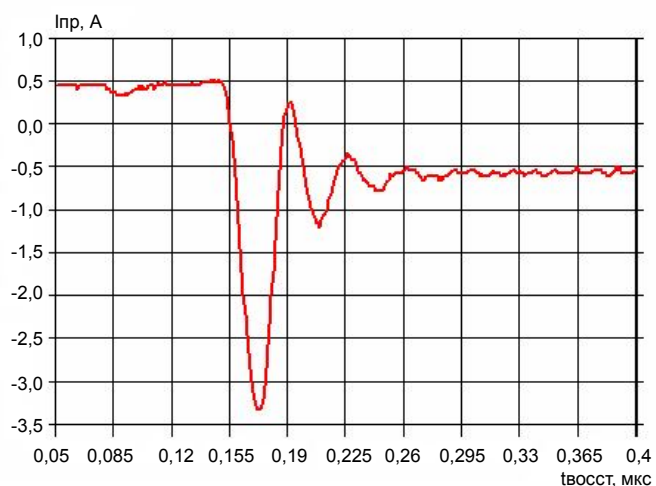


Рис. 5

Осциллограмма для определения времени восстановления при двойном облучении α -частицами диода Д2 10-10 мм, $t_{\text{восст}} = 25$ нс

Результаты различных способов уменьшения времени восстановления обратного сопротивления

Тип диода и размер кристалла, мм	Способы уменьшения времени восстановления				Параметры диода		
	Легирование золотом	Облучение α -частицами	Облучение α -частицами и электронами	Облучение α -частицами + α -частицами	$U_{пр}$, В	$t_{восст}$, нс	$U_{обр}$, В
Д1 (5,0÷4,3)	1000С, 30 мин	-	-	-	1,38	8÷10	100
Д2 (5,0÷4,3)	1000С, 30 мин	-	-	-	4,6	10÷12	600
Д1 (10÷10)	-	$5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$	-	-	1,09	55	100
Д2 (10÷10)	-	$5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$	-	-	1,15	40	600
Д1 (5,0÷4,3)	-	$5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$	-	-	0,9	10÷15	100
Д2 (5,0÷4,3)	-	$5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$	-	-	0,94	20	600
Д1 (5,0÷4,3)	-	-	$\dot{\alpha}=2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ $e=1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$	-	0,9	6÷9	100
Д2 (5,0÷4,3)	-	-	$\dot{\alpha}=2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ $e=1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$	-	2,3	8÷12	600
Д1 (10÷10)	-	-	-	$\dot{\alpha}=5,7 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ $\dot{\alpha}=4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$	1,1	30÷35	100
Д2 (10÷10)	-	-	-	$\dot{\alpha}=5,7 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ $\dot{\alpha}=4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$	1,1	25÷30	600

Заключение

Наиболее перспективным методом снижения времени обратного восстановления при приемлемых значениях прямого падения напряжения является однократное облучение α -частицами; двойное облучение α -частицами, дающее незначительно лучшие результаты времени восстановления, технологически длительнее и дорогостоящее.

Литература

1. Научно-технический отчет к ОКР «Петуния», Москва, 2003.
2. С.Зи. Физика полупроводниковых приборов. - М.: Мир, 1984.
3. Microsemi: Ultrafast Recovery Rectifier Diode - Catalog, www.microsemi.com, 12. 2008.
4. International Rectifier: Ultrafast, Soft Recovery Diode - Catalog, www.irf.com 02.99.