

*Н.А. ПОКЛОНСКИЙ, С.В. ШПАКОВСКИЙ, Н.И. ГОРБАЧУК, А.А. ШАНДИЦЕВ*

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОНТРОЛЬ ИНЖЕКТИРОВАННОГО  
В БАЗУ ЗАРЯДА И ВРЕМЕНИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ОБРАТНОГО  
СОПРОТИВЛЕНИЯ МОЩНЫХ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ  
ДИОДОВ**

With the help of universal measuring complex «UNIPRO» and special developed device method of switching from forward voltage to reverse for automated control of small reverse recovery time and charge accumulated in base of high-voltage fast acting diodes has been realized.

Для высокочастотных силовых преобразовательных устройств с индуктивной нагрузкой требуются мощные диоды с малым, инжектированным в базовую область зарядом  $Q$  и малым временем  $t_r$  восстановления обратного сопро-

тивления. Технологические приемы, с помощью которых уменьшают время восстановления обратного сопротивления диодов (легирование золотом, введение радиационных дефектов), могут приводить к увеличению прямого падения напряжения и обратных токов диодов [1, 21]. Поэтому при производстве мощных быстродействующих диодов особое внимание должно уделяться контролю быстродействия диодов на протяжении всего технологического маршрута. Одним из способов измерения  $t_r$  является метод переключения с прямого напряжения на обратное [3,4]. Однако существующая в настоящее время на УП «Завод Транзистор» методика не позволяет выполнять измерения на кристаллах (чипах) и автоматизировать этот процесс.

Цель работы - создание автоматизированной методики контроля инжектированного в базу заряда и времени восстановления обратного сопротивления мощных быстродействующих диодов как на кристаллах, так и на готовых приборах.

### Экспериментальная установка и методика измерений

Методика переключения с прямого напряжения на обратное для определения времени восстановления обратного сопротивления мощных быстродействующих диодов должна реализовываться на установке, которая обеспечивает, во-первых, значительный ток инжекции носителей заряда в базу диода и, во-вторых, позволяет измерять малое время восстановления [4].

В работе использовался созданный в БГУ универсальный измерительный комплекс «УНИПРО», работающий через параллельный (LPT) интерфейс компьютера. Базовая конфигурация комплекса состоит из цифрового осциллографа (ЦО) В-121 и генератора сигналов произвольной формы (ГСПФ) В-131. Генератор обеспечивает формирование сигналов напряжения с амплитудой до 8 В и временем нарастания/спада импульса до 10 нс. Выходное сопротивление канала генератора сигналов составляет  $(50 \pm 2,5)$  Ом, что ограничивает максимальный выходной ток (150 мА) и соответственно ток инжекции неосновных носителей заряда в базу диода. Это не позволяет контролировать динамические параметры мощных диодов в режимах их эксплуатации. Для увеличения прямого тока через диод до 1 А была разработана специальная измерительная приставка (рис. 1).

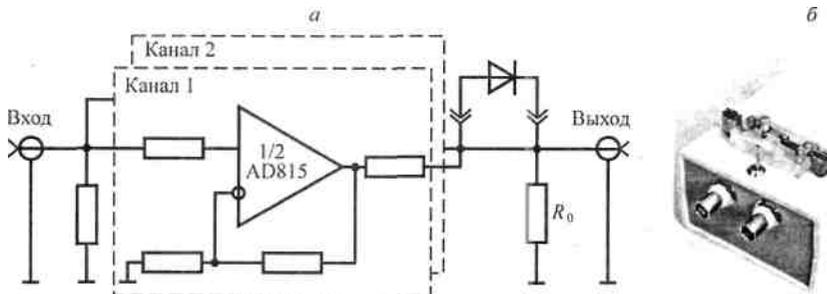


Рис. 1. Принципиальная схема (а) и внешний вид измерительной приставки (б)

Приставка состоит из усилителя мощности, разъема для подключения измерительной ячейки с исследуемым диодом и нагрузочного резистора. Усилитель мощности построен на сдвоенном операционном усилителе (ОУ) AD815 фирмы Analog Devices, имеющем малое выходное сопротивление (от 4 до 5 Ом), защиту от перегрева и короткого замыкания. Для увеличения выходного тока оба ОУ включены параллельно. Для их согласования в выходные цепи последовательно включены резисторы с сопротивлением  $\sim 1$  Ом. На тыльной стороне приставки находится входной разъем для подачи сигнала, сформированного ГСПФ. Выходные разъемы расположены на лицевой панели. Левый предназначен для подачи напряжения с нагрузочного резистора на осциллограф. Разрабо-

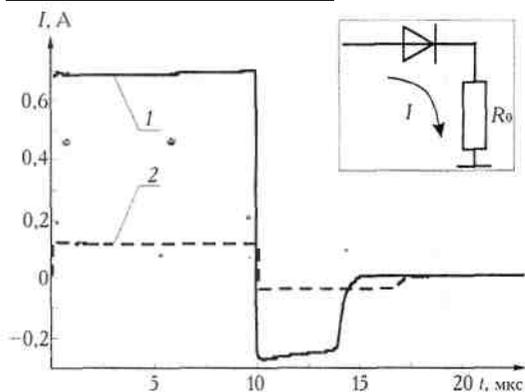


Рис. 2. Зависимости  $I(t)$  для исходных кристаллов диодов #1, полученные с использованием измерительной приставки (1) и без нее (2).  
На вставке – схема включения диода

сже возможность контроля времени диода методом модуляции ее про- рый разъем на лицевой панели.

Для измерения  $t_r$  и  $Q$  с генератора сигналов комплекса «УНИПРО» на диод с частотой следования  $f = 10$  кГц подавался прямоугольный сигнал с амплитудами прямого напряжения  $U_d = 5$  В (длительность  $t_i = 10$  мкс) и обратного напряжения  $U_r = -2$  В ( $t_i = 90$  мкс). Цифровым осциллографом регистрировалось пропорциональное току через диод падение напряжения на последо- вательно соединенном нагрузочном резисторе  $R_0 = 10$  Ом. Сопротивление нагрузочного резистора

выбиралось таким образом, чтобы обеспечить максимальный ток инжекции в базу и минимизировать постоянную времени  $RC$ -цепи, включающую сопротивление базы диода, барьерную емкость и сопротивление нагрузочного резистора. Время восстановления обратного сопротивления определялось от момента  $t_0$  прохождения тока через ноль до момента  $t_{0,25}$ , когда обратный ток падает до 25 % своего максимального значения (методика аналогична используемой на УП «Завод Транзистор»). Накопленный заряд в базе диода

определялся численным интегрированием:  $Q = \int_0^{t_{0,25}} I(t) dt$ . Схема подключения

диода при измерениях времени восстановления обратного сопротивления и инжектированного в базу диода заряда показана на вставке рис. 2. Измерения проводились при комнатной температуре.

### Исследуемые образцы

Для оценки уровня инжекции, обеспечиваемого измерительной приставкой (величины тока инжекции и накопленного в базе заряда), использовали диоды #1 с максимальным прямым током  $I_{пр} = 8$  А, максимальным обратным напряжением  $U_{обр} = 600$  В и временем восстановления  $t_r \geq 4$  мкс.

Проверку возможности измерения малых значений  $t_r$  проводили на промышленных кристаллах быстродействующих диодов со следующими эксплуатационными параметрами: #2 -  $I_{пр} = 2$  А,  $U_{обр} = 600$  В; #3 -  $I_{пр} = 8$  А,  $U_{обр} = 600$  В; #4 -  $I_{пр} = 15$  А,  $U_{обр} = 400$  В; #5 -  $I_{пр} = 2$  А,  $U_{обр} = 200$  В.

Все типы кристаллов диодов изготавливали по стандартному технологическому маршруту с использованием кремниевых подложек (пластин), легированных сурьмой (плоскость (111), удельное сопротивление  $\rho = 0,01$  Ом·см, толщина 460 мкм), на которых эпитаксиально наращивали слой кремния, легированный фосфором. Область анода ( $p$ -тип) создавали ионной имплантацией бора (энергия  $E = 60$  кэВ, доза  $D = 20$  мКл/см<sup>2</sup>) в эпитаксиальный слой «-»-типа. Отжиг дефектов, вводимых ионным легированием, и разгонку примеси выполняли в окислительной атмосфере при температуре  $T_a = 1200$  °С в течение 8 ч (глубина залегания  $pn$ -перехода  $x_j = 16$  мкм). Охранные кольца вокруг  $pn$ -перехода формировали диффузией атомов фосфора при температуре  $T = 1040$  °С в течение 10 мин. Для создания омического контакта к  $p$ -Si с планарной стороны напыляли алюминий толщиной 4,5 мкм. Перед напылением на коллекторную сторону трехслойной (Ti:Ni:Ag) металлизации толщиной 1,2 мкм пластины утоняли до

270 мкм. Для повышения быстродействия диодов (достижения необходимого времени восстановления) были использованы два технологических приема: облучение быстрыми электронами и диффузия золота. Кристаллы диодов #3 и #4 облучали электронами со средней энергией  $E=3,5$  МэВ и флюенсами  $\Phi=2 \times 10^{16}$  см<sup>-2</sup> (#3) и  $\Phi=4 \times 10^{16}$  см<sup>-2</sup> (#4). Радиационные дефекты в диодах #3 и #4 отжигали при  $T_a=475$  °С в течение 10 мин в среде N<sub>2</sub>. Диффузию золота проводили на кристаллах диодов #2 и #5 (масса «навески» золота при формировании методом термического напыления поверхностного источника диффузии атомов Au составила 32 мг для кристаллов диодов #2 и 35 мг - для #5).

**Результаты и их обсуждение**

Преимущества использования измерительной приставки наглядно прослеживаются на рис. 2, где представлены две зависимости тока  $I$  от времени  $t$  для диода #1 с большим временем восстановления. Зависимости  $I(t)=U(t)/R_0$  рассчитаны на основе осциллограмм напряжения  $U(t)$ . Зависимость 1 соответствует измерениям, выполненным с использованием измерительной приставки, зависимость 2 - без приставки. Видно, что площади под отрицательными участками зависимостей 1 и 2, соответствующие заряду, накопленному в базе диодов, сильно отличаются друг от друга. Если для измерения без приставки величина прямого тока через диод составляет 118 мА и в базе накапливается заряд  $Q_{0,25}=257,8$  нКл, то в случае использования измерительной приставки при тех же параметрах подаваемого с генератора сигнала через диод проходит ток 720 мА и в базе накапливается заряд  $Q=981$  нКл.

Таким образом, измерительная приставка позволила при одних и тех же параметрах сигнала, сформированного ГСПФ, увеличить ток инжекции и заряд, накопленный в базе диода; время восстановления обратного сопротивления для диода #1 в этом случае составило  $t_r=4,2$  мкс, без приставки -  $t_r=7,1$  мкс.

Возможности комплекса «УНИПРО» совместно с разработанной приставкой по измерению малых  $t_r$  и  $Q$  были апробированы на кристаллах быстродействующих диодов. Зависимости  $I(t)$  представлены на рис. 3. Результаты измерения времени восстановления обратного сопротивления  $t_r$  и заряда  $Q$ , накопленного в базе высоковольтных быстродействующих диодов, приведены в

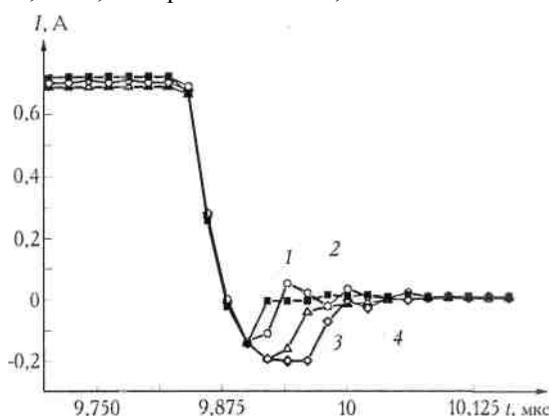


Рис. 3. Зависимость  $I(t)$  для диодов с малым временем восстановления:

1 - для кристаллов диодов #5, 2 - #4, 3- #2, 4 - #3

таблице, где также представлены результаты измерения  $t_r$  готовых диодов (в корпусе КТ-28-2) на установке УП «Завод Транзистор».

Из таблицы видно, что результаты измерений  $t_r$  диодов #3, #4, #5,

выполненные на комплексе «УНИПРО» и установке УП «Завод Транзистор», с точностью до 10 % согласуются друг с другом.

**Результаты измерения времени восстановления обратного сопротивления и заряда, накопленного в базе высоковольтных быстродействующих диодов**

Параметр	№ об/ раза			
	2	3	4	5
$t_r$ , нс (комплекс «УНИПРО»)	80 ± 2	107 ± 3	50 ± 3	34 ± 3
$t_r$ , нс* (УП «Завод Транзистор»)	65 ± 3	90 ± 3	55 ± 3	35 ± 3
$Q$ , нКл	10,13	16,375	5,0	1,45

Примечание. \*Режим измерения на установке УП «Завод Транзистор»:  $I_{пр}=1$  А,  $U_{обр}=-30$  В,  $dI_{пр}/dt=50$  А/мкс,  $I_{обр}=0,25I_{обр\max}$ -Заряд, накопленный в базе, не измеряется.

Расхождения в значениях  $t_r$  для диодов #2 могут быть обусловлены тем, что измерения проводились на кристаллах и готовых приборах из разных партий. В этом случае толщина пленок золота, а соответственно и концентрация примеси Au в базах диодов могут отличаться из-за несовершенства технологического процесса. Измерительный комплекс совместно с разработанной приставкой позволяет уверенно определять время восстановления  $t_r \approx 40$  нс. При времени восстановления  $t_r \leq 40$  нс на участке обратного импульса осциллограммы регистрируется только одна экспериментальная точка (см. рис. 3). Естественным ограничением по определению малых величин времени восстановления обратного сопротивления является частота дискретизации аналого-цифрового преобразователя ( $f_d = 100$  МГц) цифрового генератора сигналов и время нарастания фронта импульса.

\* \* \*

Таким образом, в работе с помощью универсального измерительного комплекса «УНИПРО» и специально разработанной приставки методом переключения с прямого напряжения на обратное было определено время восстановления и заряд, накопленный в базе мощных быстродействующих диодов при токе инжекции порядка  $\approx 1$  А. Показана возможность использования комплекса «УНИПРО» для автоматизированного контроля малого времени обратного восстановления и заряда, накопленного в базе, как на кристаллах (чипах), так и на готовых приборах.

1. З и С . Физика полупроводниковых приборов: В 2 кн. М., 1984.
2. Радиационные методы в твердотельной электронике / В.С. Вавилов и др. М., 1990.
3. Изучение неравновесных процессов в материалах микроэлектроники и структурах на их основе / И.И. Колковский и др. Мн., 1996.
4. ГОСТ 18986.8-73. Диоды полупроводниковые. Метод измерения времени обратного восстановления. М., 1983.
5. П а в л о в Л.П. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов. М., 1987.

Поступила в редакцию 12.01.05.

**Николай Александрович Поклонский** - доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики полупроводников и наноэлектроники.

**Сергей Васильевич Шпаковский** - инженер-конструктор НПО «Интеграл».

**Николай Иванович Горбачук** - кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики полупроводников и наноэлектроники.

**Александр Александрович Шандицев** - научный сотрудник НИЛИИС кафедры информатики.