Технология протонного облучения и возможности ее применения для улучшения характеристик силовых диодов и тиристоров

Губарев Владимир, Семенов Александр, Сурма Алексей, Столбунов Валерий

Введение

Управление рекомбинационными свойствами в слоях полупроводниковой структуры является одним из эффективных методов повышения быстродействия и улучшения ряда других важных характеристик силовых полупроводниковых приборов. В статье рассматриваются аспекты применения одной их таких технологий, основанной на облучении кремниевых структур ускоренными протонами.

Описана автоматизированная технологическая линия для протонного облучения силовых полупроводниковых приборов, позволяющая селективно вводить центры рекомбинации и имплантировать атомы водорода в кремниевую структуру на глубину до 1000 мкм.

Приводятся характеристики серии быстродействующих тиристоров, изготовленных с применением технологии протонного облучения. Приборы имеют исключительно малые времена выключения, весьма малые значения заряда обратного восстановления, импульсного тока обратного восстановления.

Имплантация атомов водорода при протонном облучении позволяет формировать в высокоомном n-слое полупроводниковой структуры локальные скрытые n’слои с пониженным значением удельного сопротивления. Рассмотрены возможности применения таких скрытых слоев для создания мощных импульсных динисторов, полупроводниковых ограничителей напряжения с увеличенной энергоемкостью.

Производственная технология протонного излучения

ЗАО «Протон-Электротекс» совместно с институтом теоретической и экспериментальной физики и Всероссийским электротехническим институтом разработали экономичную промышленную технологию протонного облучения полупроводниковых приборов.

Основой технологического комплекса является линейный протонный ускоритель с энергией 24 МэВ. (рис. 1)

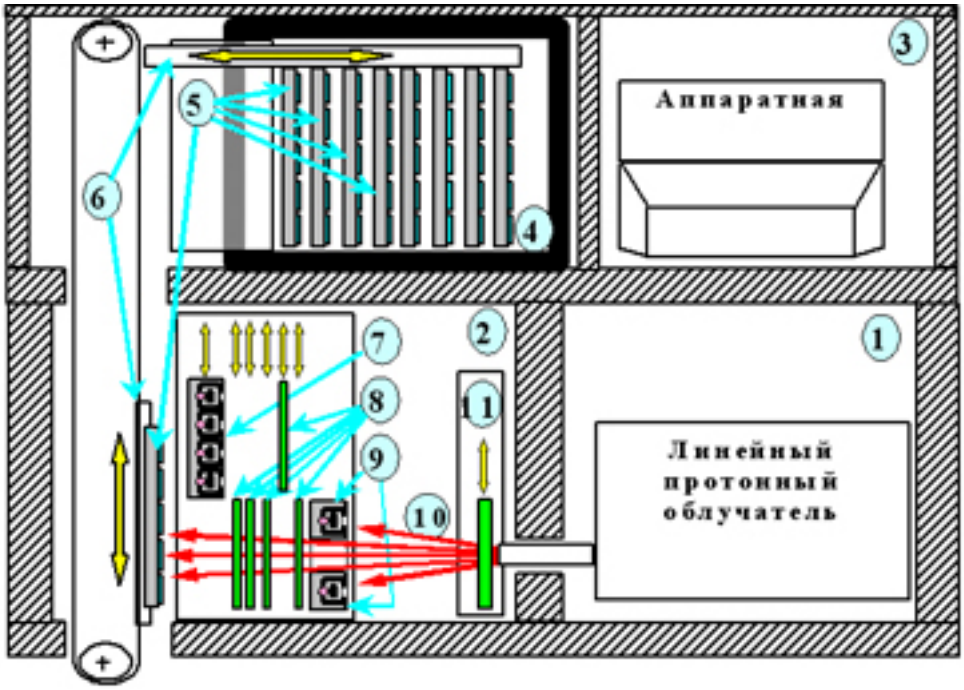


Рис. 1. Промышленный технологический комплекс для протонного облучения полупроводниковых приборов

1 – Помещение с протонным ускорителем; 2 – помещение облучения; 3 – аппаратная; 4 –накопитель кассет; 5 – кассеты с полупроводниковыми

структурами; 6 – система перемещения и позиционирования кассет; 7 – матрица с датчиками Фарадея для контроля распределения плотности протонного потока; 8 – система передвижных алюминиевых экранов для регулирования глубины пробега протонов в полупроводниковой структуре; 9 – Датчики для текущего контроля потока протонов ; 10 – протонный пучок; 11 – рассеивающий экран

Таким образом, технологический комплекс включает в себя блок с кассетами, в которых находятся полупроводниковые структуры до и после облучения (4), устройство перемещения и позиционирования облучаемых структур (6), системы датчиков Фарадея для контроля распределения плотности протонного потока и дозы облучения (7, 9), а также передвижные экраны для регулирования глубины проникновения протонов в полупроводниковой структуре (8). Специальный экран для рассеивания потока (11) в совокупности с механической системой перемещения и позиционирования облучаемых структур дают возможность облучать структуры диаметром до 125 мм.

Технологический процесс даёт следующие возможности:

- Непрерывное облучение больших партий приборов. За один рабочий цикл можно облучить соответственно до 270 п/п структур диаметром 95–105 мм, до 360 структур диаметром 75–80 мм, до 450 структур диаметром 40–60 мм, или до 900 структур диаметром 24–32 мм.
- Небольшое время процесса облучения. Длительность одного рабочего цикла составляет 4–5 часов, включая время, необходимое для снижения остаточной радиоактивности в структурах и кассетах до безопасного уровня.
- Облучение производится в воздушной среде, нет необходимости создания вакуума в рабочей зоне.
- Контроль характеристик протонного потока и дозы облучения. Можно контролировать распределение плотности потока и энергетический спектр протонов в рабочей зоне. Эти измерения осуществляются мозаичным датчиком тока (7) и системой подвижных экранов (8) при тестировании протонного пучка перед рабочим циклом. Во время рабочего цикла производится контроль дозы облучения посредством токоприемников (9).
- Дистанционное управление передвижными экранами (8) для изменения длины пробега протонов в полупроводниковых слоях облученных структур. Регулировка длины пробега протонов в полупроводниковой структуре производится путем изменения суммарной толщины экранов, через которые проходит протонный пучок перед тем, как он достигает поверхности структуры. Длина пробега протонов в п/п структуре может варьироваться в пределах 0-1200 мкм с шагом 20 мкм.
- Высокий уровень радиационной безопасности.

Технология протонного облучения позволяет создавать в структуре полупроводникового прибора скрытые слои с уменьшенным временем жизни носителей заряда, а также скрытые слои с имплантированными атомами водорода. На рис. 2 показаны типичные для описанной выше технологии распределения по глубине кремниевой пластины величины

$$\frac{1}{\tau} - \frac{1}{\tau_0} \quad ,$$

где τ и τ_0 - значения времени жизни носителей заряда после и до облучения, соответственно, а также концентрации имплантированного водорода. Изменяя с помощью экранов величину пробега протонов (proton path length) Rp , можно задавать требуемую глубину этих скрытых слоев.

Слои с уменьшенным временем жизни с успехом применяются сегодня во многих типах силовых полупроводниковых приборов для оптимизации их частотных характеристик [1, 2, 3].

Имплантированный водород индуцирует в кремнии «мелкие» центры донорного типа, подобные по своим свойствам атомам традиционных донорных примесей, что позволяет создавать скрытые слои с измененным удельным сопротивлением [4]. Создание таких слоев позволяет значительно улучшить характеристики таких приборов, как высоковольтные ограничители напряжения и динисторы, а также интегрировать эти защитные элементы непосредственно в структуру других полупроводниковых приборов.

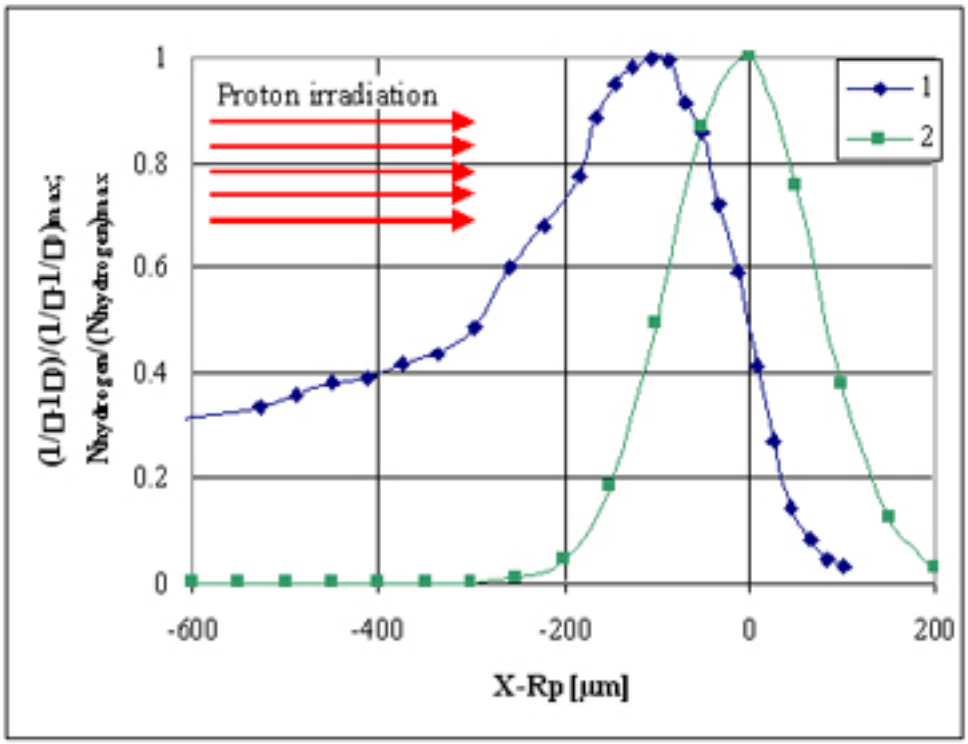


Рис. 2. Типичные распределения по глубине кремниевой пластины величины $1/\tau$ - $1/\tau_0$и концентрации имплантированного водорода.

Proton irradiation - Протонное облучение

Nhydrogen – описка, надо Hydrogen – водород

Rp (мм)

Новая серия быстродействующих тиристоров с контролируемым зарядом обратного восстановления

Применение рассмотренной выше технологии позволило ввести в производство новую серию быстродействующих тиристоров с уменьшенным зарядом обратного восстановления.

Подобные приборы имеют следующие характерные особенности:

Контроль времени жизни методом протонного облучения катодной стороны тиристорной структуры. Толщина предварительных алюминиевых экранов выбрана таким образом, что область окончания пробега протонов в кремниевой структуре находится в районе анодного p-n перехода. В этом случае время жизни в районе анодного pn перехода (та) может быть в 2-3 раза меньше, чем время жизни в районе коллекторного pn перехода (тс). Подобный осевой профиль времени жизни позволяет оптимизировать отношение VTM и Qrr: значение Qrr может быть сокращено в 1,5-2 раза при том же значении VTM используя данных осевой профиль вместо традиционного однородного профиля.

Плотная сетка катодных шунтирующих элементов (распределенной катодной шунтировки). Шунты распределены по площади области эмиттера, расстояние между соседними элементами составляет примерно 400 мкм. Такая сетка позволяет получить достаточно малое время выключения при достаточно высоком времени жизни в районе коллекторного p-n перехода.

Разветвленный управляющий электрод с регенеративным усилением тока управления (рис. 3.). Разветвленный электрод, а также достаточно высокие значения времени жизни в районе коллекторного pn перехода и в p-базе обеспечивают быстрое включение всей тиристорной области, и кроме того позволяют сократить потери энергии при включении и увеличить di/dt-стойкость.

Рис. 3. Кремниевые структуры тиристоров, составляющих новую серию

Кремниевые структуры тиристорв имеют диаметр 32, 40, 56 мм (рис. 3)

Соотношение параметров Qrr и tq, блокирующего напряжения (UDRM, URRM), среднего тока в открытом состоянии (ITAV) и некоторые другие параметры новых тиристоров представлены в таблице 1.

Благодаря уменьшенным значениям Qrr и tq , новые тиристоры могут работать в диапазонах частот соответственно: до 30 кГц для блокирующего напряжения 1000–1500 В, до 10 кГц для блокирующего напряжения 2200 В и 2–5 кГц для блокирующего напряжения 3400 В.

Топология тиристорной структуры адаптирована для работы при высокой частоте. Приборы могут надежно функционировать при повторяющемся di/dt = 800 – 1250 А/мкс.

Тип	V_{DRM},V_{RRM}	I_{DRM}, I_{RRM}	I_{TSM}	$(di/dt)_{crit}$	I_{TAV} (T_c)	U_{TM}	$(dv/dt)_{crit}$	Q_{rr}	t_q	R_{thjc}
	V	mA	kA	A/µs	A(°C)	V	V/µs	µC	µs	°C/W
ТБИ133-400	300…1000	50	7	1600	400(90)	2,4	1000	100	8; 10; 12,5; 16	0,04
ТБИ143-400	800…1500	70	8	2000	400(90)	2,85	1000	100	6,3; 8; 10	0,032
ТБИ143-500	800…1500	70	9	2000	500(85)	2,4	1000	200	12,5; 16; 20; 25	0,032
ТБИ143-630	800…1500	70	10	2000	630(80)	2,3	1000	250	16; 20; 25	0,032
ТБИ243-400	1200..2200	70	8	2000	400(88)	2,85	1000	300	20;25;32	0,034
ТБИ243-500	1200..2200	70	9	2000	500(85)	2,4	1000	300	25; 32	0,034
ТБИ243-630	1200..2200	70	10	2000	630(80)	2,3	1000	350	25;32;40	0,034
ТБИ143-500	300…1000	70	9	2000	500(85)	2,4	1000	80	5; 6,3	0,032
ТБИ153-800	500…1200	120	19	2000	800(85)	2,5	1000	200	10; 12,5; 16,0	0,021
ТБИ153-1000	800…1500	120	20	2000	1000(80)	2,25	1000	300	12,5; 16; 20; 25	0,021
ТБИ153-1250	800…1500	120	21	2000	1250(70)	2,1	1000	350	16; 20; 25; 32	0,021
ТБИ253-800	1200..2200	120	17	2000	800(85)	2,5	1000	400	25; 32; 40	0,021
ТБИ253-1000	1200..2200	120	18	2000	1000(75)	2,35	1000	450	25; 32; 40	0,021
ТБИ353-800	2200…3400	150	16	2000	800(85)	2,6	1000	1000	63; 80; 100	0,021
ТБИ153-800	800…1500	120	18	1600	800(83)	2,6	1000	150	8; 10; 12,5; 16	0,021
ТБИ153-1000	800…1500	120	19	1600	1000(78)	2,3	1000	250	10; 12,5; 16; 20	0,021
ТБИ173-2000	1000…1200	300	48,5	2500	2000(89)	2,15	1000	220	10; 12,5; 16; 20	0,010
ТБИ273-2000	2000	300	40	2500	2000(85)	2,2	1000	800	32; 40; 50	0,010
ТБИ373-1600	2000…2800	300	34,5	2500	1600(90)	2,26	1000	1250	50; 63	0,010
ТБИ473-1600	3800…4000	300	30	2500	1600(85)	2,4	1000	3000	125; 150	0,010

Таблица 1 Основные характеристики серии быстродействующих тиристоров, изготавливаемых с применением технологии протонного облучения

Силовые приборы со скрытыми h-induced слоями с уменьшенным удельным сопротивлением

Симметричные ограничители напряжения с улучшенной энергоемкостью

Симметричный лавинный ограничитель напряжения «традиционной» конструкции и новый прибор, содержащий скрытые n’ - слои с уменьшенным удельным сопротивлением схематично изображены на рис. 4.

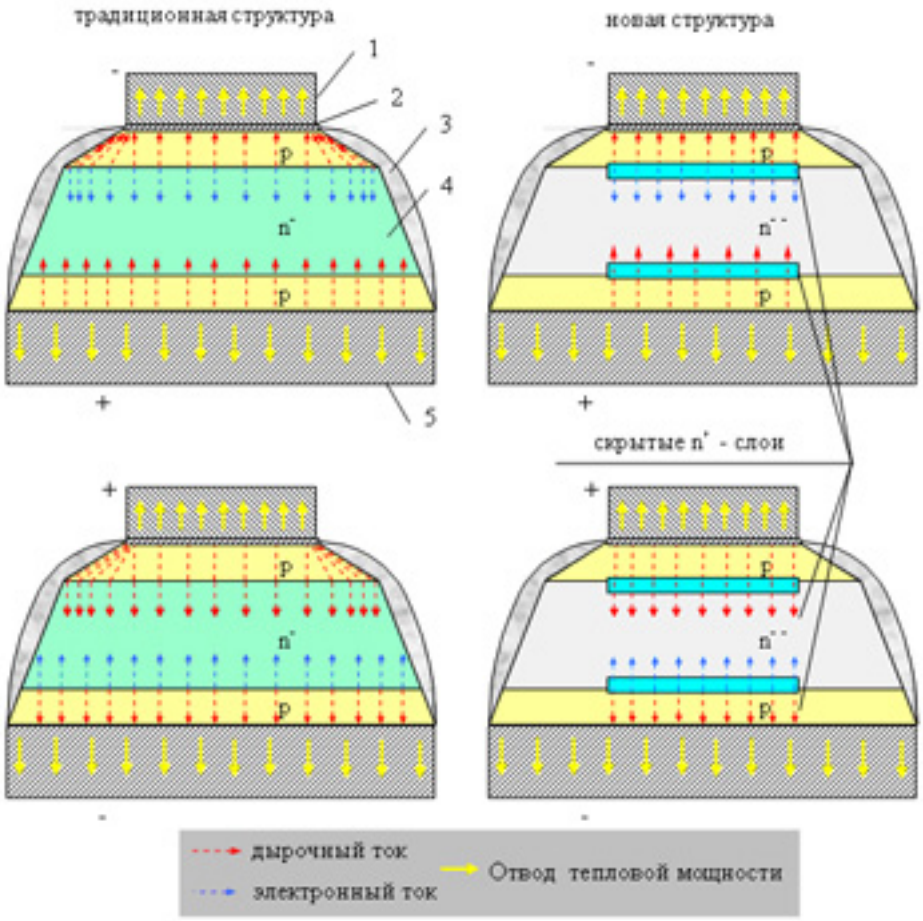


Рис. 4. Полупроводниковые элементы традиционного и нового симметричных ограничителей напряжения.

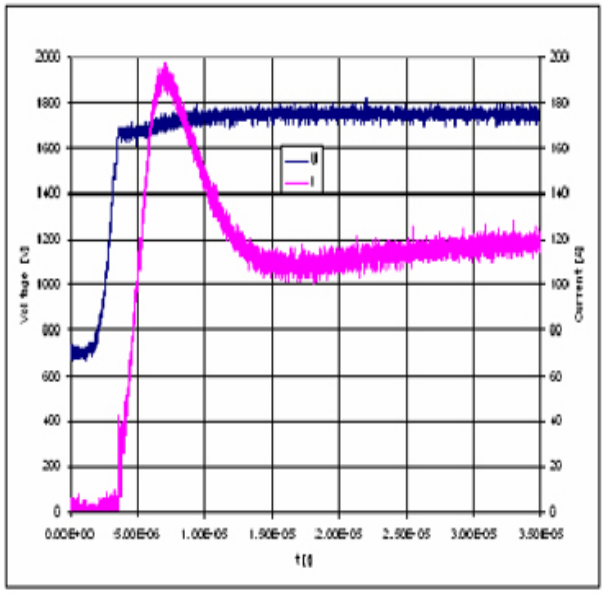
Цифрами обозначены: 1- медный контакт корпуса, 2 – контактная металлизация полупроводниковой структуры, 3 – компаунд, 4 – полупроводниковая структура, 5 – молибденовый термокомпенсатор.

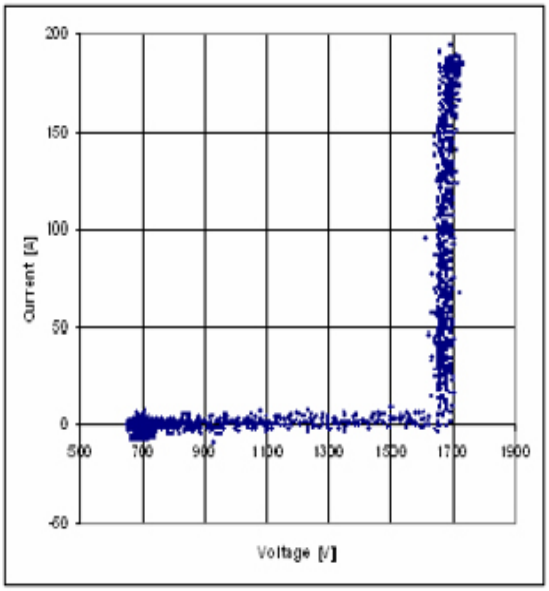
Для приборов традиционной конструкции проблемной зоной, ограничивающей максимальные импульсные значения рассеиваемой мощности и лавинного тока, а также максимально допустимую энергию потерь, является

краевая область, граничащая с фаской. В этой зоне при любой полярности приложенного напряжения происходит концентрация плотности тока, кроме того ухудшены условия отвода тепла, так как размер верхнего контакта корпуса меньше размера полупроводниковой структуры.

Прибор новой конструкции лишен этого недостатка: лавинный ток в краевой зоне не протекает. Это позволяет существенно увеличить допустимые амплитуду лавинного тока, пиковую рассеиваемую мощность и энергию потерь.

На рис. 5 показаны зависимости тока и напряжения для экспериментального лавинного симметричного ограничителя новой конструкции. Диаметр полупроводниковой структуры этого прибора составлял 32 мм, напряжение начала лавинного пробоя – 1650 В.





а) б)

Рис. 5. Типичные зависимости тока и напряжения для экспериментального лавинного симметричного ограничителя новой конструкции: а) зависимости тока и напряжения от времени, б) изотермическая динамическая вольт-амперная характеристика

Пиковая ударная мощность составляла около 300 кВт, энергия потерь – до 150 Дж при однократных импульсах.

Мощные высоковольтные импульсные динисторы

Мощные высоковольтные импульсные динисторы могут быть изготовлены на базе четырехслойных тиристорных структур с интегрированным транзисторным элементом - ограничителем перенапряжения, рис. 6.

Основная структура прибора – тиристорная, тиристор при этом играет роль управляемого коммутатора токов высокой амплитуды. Роль быстродействующего ограничителя напряжения играет интегрированный в структуру прибора трехслойный ограничитель, лавинный ток которого включает тири-

сторную структуру. Если структура тиристора имеет многоступенчатое регенеративное управление, этот элемент, в принципе может быть расположен в пределах любой из областей управления, или в каждой из них.

Такой прибор может быть использован как очень мощный и очень быстродействующий защитный элемент или коммутатор импульсов тока и напряжения с исключительно высокими скоростями нарастания. На рис. 7 приведены осциллограммы тока и напряжения при коммутации экспериментального динистора, полупроводниковый элемент которого показан на рис. 8.

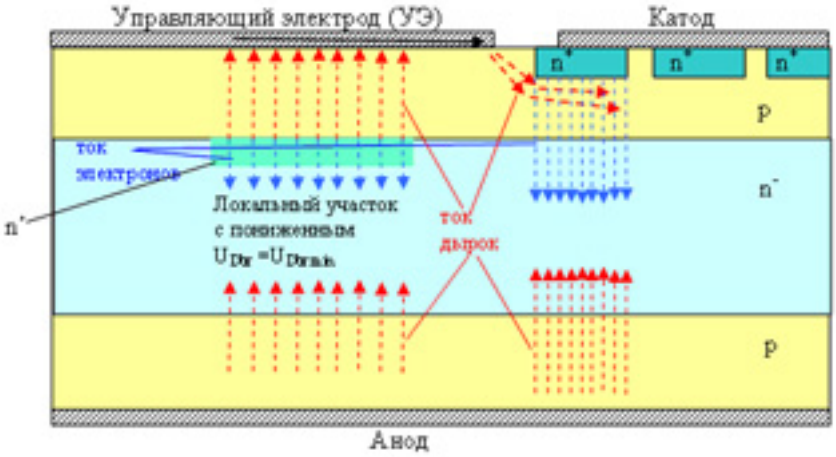
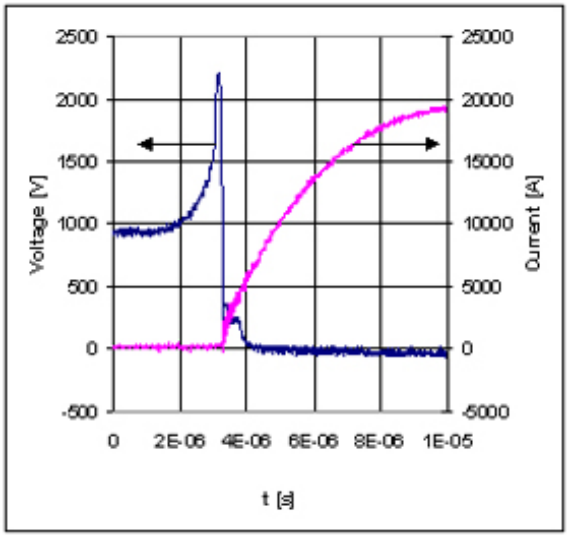
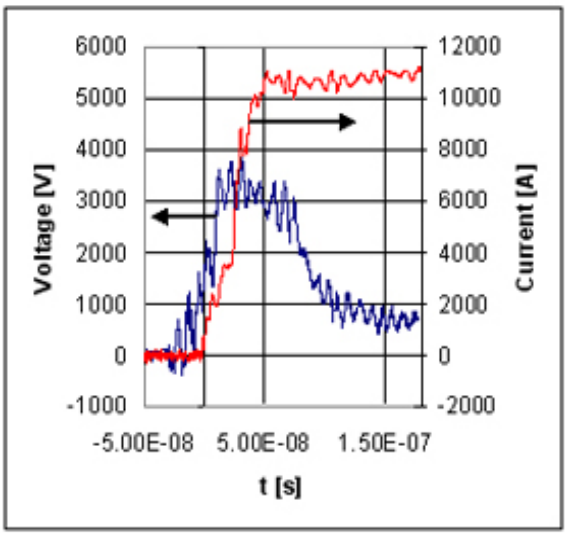


Рис. 6. Полупроводниковая структура мощного высоковольтного импульсного динистора.





а) б)

Рис. 7. Осциллограммы тока и напряжения при коммутации экспериментального динистора. Коммутация импульсов тока со скоростью нарастания около 5кА.мкс (а) и около 200 кА/мкс (б)

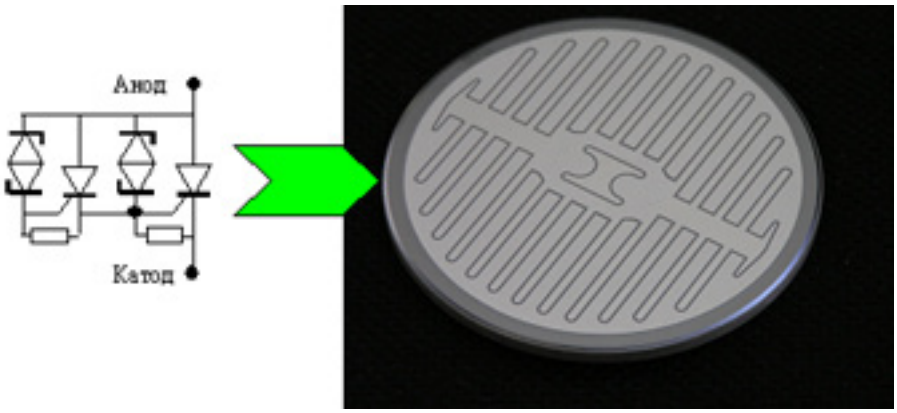


Рис. 8. Внешний вид и эквивалентная схема полупроводникового элемента мощного высоковольтного динистора