

БЫСТРОВОССТАНАВЛИВАЮЩИЕСЯ МОЩНЫЕ ДИОДЫ ДЛЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ ИНВЕРТОРНЫХ СИСТЕМ

АЛЕКСАНДР ПИСАРЕВ, АЛЕКСЕЙ СУРМА, АНАТОЛИЙ ЧЕРНИКОВ, ЗАО «Протон-Электротекс,
a.pisarev@proton-electrotex.com

В статье рассматриваются быстровосстанавливающиеся диоды с мягким восстановлением, устойчивые к большим скоростям изменения тока обратного восстановления (di_{rev}/dt) при высоком обратном напряжении источника (U_R). Эти устройства, разработанные с помощью технологии протонного облучения, синтеринга и введения n' -буфера, предназначены для использования в качестве обратных диодов для высоковольтных ключей на базе IGBT и IGCT.

1. ВВЕДЕНИЕ

Сложные схемы автономных многоуровневых инверторов напряжения, построенные на базе мощных IGCT и IGBT, требуют также соответствующих комплементарных диодов. Традиционные быстровосстанавливающиеся диоды имеют динамические ограничения при работе в таких схемах и снижают эффективность инвертора и его надежность, повышают стоимость.

Для повышения эффективности инверторов за счет снижения энергии потерь IGBT при включении необходимо производить его коммутацию при высоких скоростях нарастания тока (di/dt), которая для современных IGBT достигает 10000 А/мкс. Однако это требует от комплементарных диодов аналогичной скорости изменения тока обратного восстановления (di_{rev}/dt), которая для традиционных быстровосстанавливающихся диодов равна примерно 500 А/мкс.

Следовательно, для получения всех преимуществ современных полностью управляемых ключей, обеспечивающих повышенную эффективность инверторов, необходимо, чтобы комплементарные диоды имели следующие характеристики:

- повышенная скорость изменения тока обратного восстановления (di_{rev}/dt);
- низкий ток обратного восстановления (I_{rev}), который позволяет уменьшить мощность потерь IGBT при включении;
- улучшенная мягкость обратного восстановления (s), сбалансированная с относительно малой мощностью потерь при обратном восстановлении;

- способность работать без снабберных RC-цепей;
- стойкость к эффекту «схлопывания» и динамическому лавинному пробую;
- высокая рабочая температура.

В процессе обратного восстановления диодов в таких режимах могут возникнуть следующие проблемы.

- «Схлопывание» (snappy-эффект) заряда избыточных электронов и дырок в n^- -базе диода в процессе обратного восстановления. На второй фазе обратного восстановления диод имеет высокую плотность обратного тока в n^- -базе, который поддерживается за счет рекомбинации остаточного заряда избыточных электронов и дырок, накопленных в n^- -базе ранее при протекании прямого тока. Поскольку напряжение источника велико, высоко и скорость нарастания обратного напряжения на второй фазе, а процесс выноса избыточных дырок сопровождается быстрым увеличением толщины области пространственного заряда (ОПЗ) p - n -перехода: граница ОПЗ смещается вглубь базы, дырки захватываются полем p - n -перехода и переносятся в p^+ -эмиттер. Для традиционных диодов, как правило, протекает также аналогичный процесс зарождения и расширения домена сильного поля, примыкающего к p^+ -слою. Эта «псевдоОПЗ», расширяясь, захватывает электроны из n^- -базы. Если эти две области встречаются, возникает эффект «схлопывания» заряда избыточных электронов и дырок в n^- -базе, сопровождаемый чрезвычайно резким

спадом тока обратного восстановления, что, в свою очередь, приводит к мощному всплеску напряжения, как правило, превышающему напряжение лавинного пробоя диода. Даже если диод обладает стойкостью к лавинному пробую и не выходит при этом из строя, такой режим приводит к возникновению чрезвычайно мощной высокочастотной электромагнитной помехи, что неприемлемо для большинства современной аппаратуры, т.к. создает условия для сбоя драйверов.

«Динамический» лавинный пробой. На второй фазе восстановления через ОПЗ p - n -перехода протекает большой дырочный ток. Поскольку скорость переноса дырок небесконечна, а составляет около $0,8 \cdot 10^7$ см/с, протекание тока дырок сопровождается появлением в ОПЗ дополнительного положительного заряда (подвижных дырок). Например, при плотности тока около 30 А/см² (т.е. при токе около 600 А для диода с диаметром полупроводникового элемента 56 мм и около 1200 А для диода с диаметром полупроводникового элемента 80 мм) дополнительная концентрация составляет $2,34 \cdot 10^{13}$ см⁻³, т.е. сравнима с концентрацией ионизированных доноров для диода на кремниевой пластине с удельным электрическим сопротивлением 200 Ом·см. Наличие этого подвижного дополнительного заряда в ОПЗ p - n -перехода приводит к уменьшению напряжения лавинного пробоя. Ситуация при этом плоха не тем, что происходит физический процесс лавинного умножения в p - n -переходе, а тем, что в таком режиме диод большой площади становится

склонным к шнурованию тока обратного восстановления, что приводит к его отказу.

Следовательно, актуальной задачей является разработка высоковольтных быстро восстанавливающихся диодов с расширенной областью безопасной работы при обратном восстановлении, адаптированных для работы с мощными IGBT и IGBT.

Известно, что эффективным конструктивно-технологическим решением, которое позволяет получить мягкие быстро восстанавливающиеся диоды, устойчивые к sparrу-эффекту, пригодные для эксплуатации в широком диапазоне значений обратного напряжения (UR) и скорости изменения тока обратного восстановления (di_{rrm}/dt), является формирование аксиально неоднородного распределения времени жизни носителей заряда (τ) в полупроводниковом элементе. Для традиционного диода со структурой p-n⁺-n⁺ необходимо уменьшать значения времени жизни носителей заряда в слаболегированных слоях вблизи p-n-перехода и увеличивать в части n⁻-слоя, примыкающей к n⁺-слою.

Несмотря на большое количество успешных применений такого подхода для создания мягких силовых высоковольтных диодов, вопрос о «детальном» виде оптимального аксиального распределения времени жизни носителей заряда остается открытым. На то имеются две основные причины.

1. Технический уровень силового быстро восстанавливающегося диода определяется сочетанием таких характеристик как импульсное обратное напряжение (U_{RRM}), прямое падение напряжения (U_{FM}), заряд обратного восстановления (Q_{rr}) и энергия потерь обратного восстановления (E_{RQ}), ток обратного восстановления (I_{rrm}), мягкость обратного восстановления (s). Если

установить значения U_{RRM} и U_{FM} как некоторые постоянные величины, то технический уровень быстро восстанавливающегося диода окажется тем выше, чем меньше Q_{rr} , E_{RQ} , I_{rrm} и чем больше s . Практика показывает, что вид аксиального распределения времени жизни носителей заряда (τ), оптимального с точки зрения минимизации Q_{rr} , E_{RQ} , отличается от аксиального распределения τ , оптимального с точки зрения минимального I_{rrm} и максимального s . Например, формирование аксиального распределения времени жизни носителей заряда «ступенчатого» вида с очень малым значением τ в окрестностях p-n-перехода и очень большим значением в остальной части n⁻-слоя позволяет получить исключительно большую мягкость (s) и малые значения тока обратного восстановления (I_{rrm}). Однако значения Q_{rr} , E_{RQ} получаются весьма далекими от оптимальных за счет длинного «хвоста» тока при обратном восстановлении такого диода. Таким образом, форма оптимального распределения τ во многом определяется конкретными требованиями, предъявленными к сочетанию Q_{rr} , E_{RQ} , I_{rrm} и s силового диода.

2. Ограничения на использование той или иной технологии формирования аксиально неоднородного распределения τ , в основном, применяется либо диффузия атомов благородных металлов (золото, платина), либо облучение легкими высокоэнергетическими ионами (водород, гелий и т.д.) В случае легирования атомами благородных металлов возможности изменять форму распределения τ весьма ограничены. Облучение легкими ионами дает большую свободу изменения этого распределения. Известно, что в конце пробега

легкого иона в полупроводнике возникает локальная область с заметно меньшим τ . Таким образом, варьируя энергетический спектр ионов при облучении, казалось бы, можно было получить в полупроводнике распределение τ любой формы. Однако, как показывают более детальные исследования, пространственное распределение τ , формируемое при облучении моноэнергетическими ионами, существенно отличается от δ -функции или «узкого» распределения Гаусса из-за радиационного повреждения более мелких слоев полупроводника, чем глубина пробега иона, а также за счет «размывания» энергетического спектра ионов при прохождении через слои полупроводника. Таким образом, эти эффекты накладывают существенные ограничения на возможности формирования необходимых распределений τ .

Ниже изложены результаты исследования возможности оптимизации путем сочетания характеристик U_{FM} , Q_{rr} , E_{RQ} , I_{rrm} , S мощных быстро восстанавливающихся высоковольтных диодов за счет технологии формирования неоднородного распределения τ с помощью протонного облучения.

2. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ МОЩНЫХ БЫСТРО ВОССТАНАВЛИВАЮЩИХСЯ ДИОДОВ

Мощные быстро восстанавливающиеся диоды ЗАО «Протон-Электротекс» предназначены для коммутации токов величиной от нескольких сотен до нескольких тысяч ампер и напряжений 1000–4500 В. Полупроводниковый элемент имеет круглую форму диаметром 24–100 мм для разных типов диодов.

Чтобы обеспечить электротермоцикlostойкость диодов с большой площадью полупроводникового элемента, используются следующие решения:

- полупроводниковый элемент соединен с молибденовым диском;
- полупроводниковый элемент, соединенный с молибденовым диском, собирается в металлокерамический корпус таблеточного типа.

Описанная конструкция позволяет одновременно обеспечить высокую электротермоцикlostойкость, малое тепловое сопротивление, высокую энергоемкость для аккумуляции энергии потерь в импульсных и аварийных режимах.

Регулирование характеристик Q_{rr} , E_{RQ} , I_{rrm} , S осуществляется с помощью протонного облучения. Использовался пучок протонов с первоначальной энергией 24 МэВ. Пучок выводился на воздух и при помощи системы специальных экранов частично рассеивался

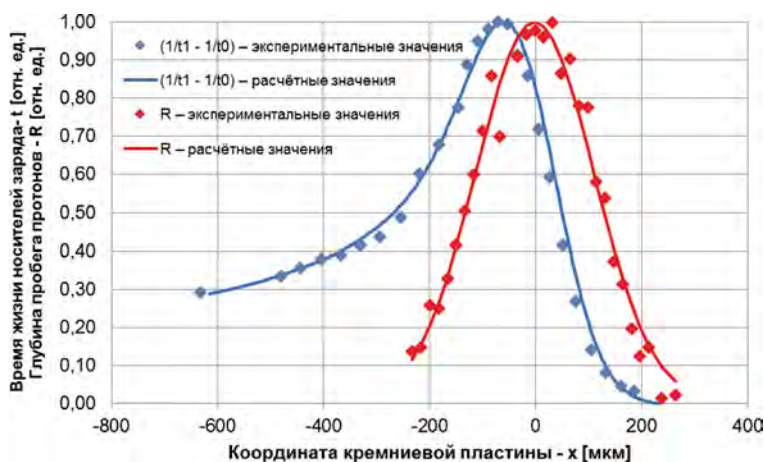


Рис. 1. Типичные распределения относительных значений времени жизни носителей заряда ($1/\tau_1 - 1/\tau_0$) и глубины пробега протонов R , в кремниевой пластине при протонном облучении с исходной энергией 24 МэВ, где τ_1 и τ_0 — значения времени жизни носителей заряда после и до облучения, соответственно

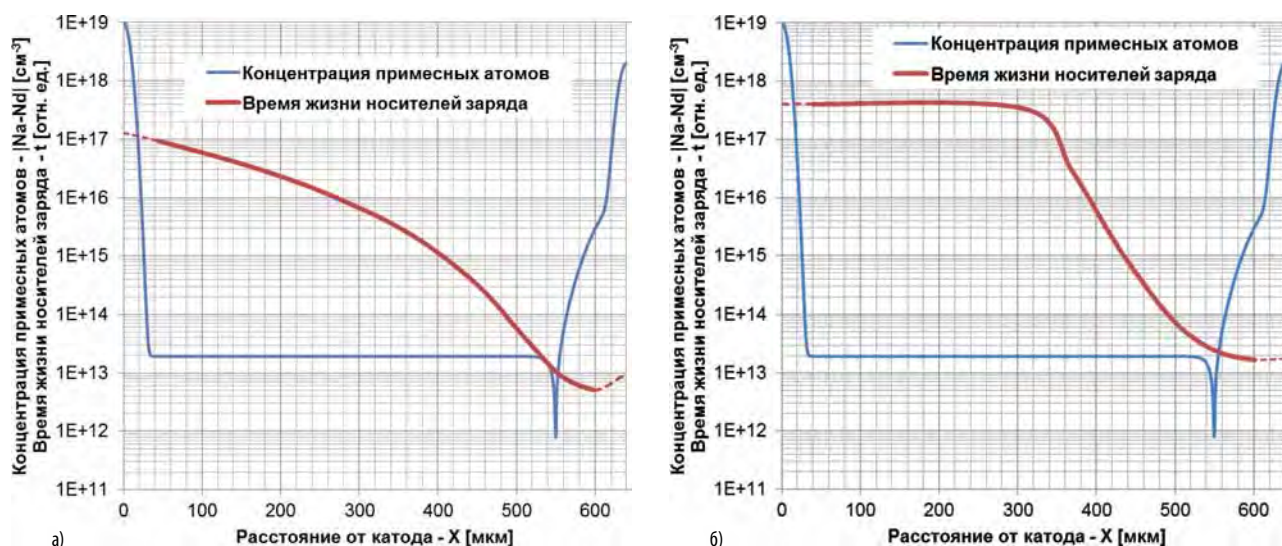


Рис. 2. Типичные распределения времени жизни носителей заряда при протонном облучении через: а) катодную поверхность полупроводникового элемента; б) анодную поверхность полупроводникового элемента

ся для формирования рабочей зоны, достаточной для облучения полупроводниковых элементов с большой площадью. Окончательная регулировка глубины пробега протонов в полупроводниковом элементе производилась при помощи системы сменных алюминиевых экранов определенной толщины. Описанная технология позволяет облучать полупроводниковые элементы диаметром до 125 мм на глубину до 1000 мкм с шагом регулировки глубины пробега протонов 15 мкм. Распределение времени жизни носителей заряда по глубине полупроводникового элемента получается, однако, довольно плавным благодаря высокой начальной энергии протонов. На рисунке 1 представлено типичное распределение времени жизни носителей заряда τ при протонном облучении.

«Традиционная» технология изготовления предусматривает соединение полупроводникового элемента и молибденового диска с помощью высокотемпературной вакуумной пайки с использованием Al-Si-дисков. Для надежного омического контакта необходимо проводить соединение молибденового диска с поверхностью р-типа проводимости (анодная поверхность), т.к. при этом соединении происходит частичное растворение поверхностного слоя кремния с последующим образованием при остывании рекристаллизованного поверхностного слоя р⁺-типа проводимости.

После соединения высокая толщина молибденового диска не позволяет проводить облучение полупроводникового элемента со стороны анодной поверхности. Протонное облучение полупроводникового элемента до соединения с молибденовым диском также невозможно из-за того, что оно проис-

ходит при высокой температуре около 700°C.

Таким образом, диоды с традиционной конструкцией можно облучать протонами только со стороны катодной поверхности, что является достаточно серьезным ограничением с точки зрения возможности оптимизировать форму распределения τ . Для того чтобы сформировать слой с пониженным значением времени τ вблизи р-п-перехода, протоны должны предварительно пролететь через все слои n-типа проводимости, т.е. через большую часть полупроводникового элемента. При этом получается достаточно плавное распределение τ , и его значения вблизи р-п-перехода нельзя уменьшить более чем до 0,2–0,3 от значения вблизи границы n⁺-слоя. На рисунке 2а представлено типичное распределение τ при протонном облучении через катодную поверхность полупроводникового элемента.

Для того чтобы расширить возможность изменять форму распределения τ , использовалась технология соединения полупроводникового элемента и молибденового диска с помощью мелкодисперсной серебряной пасты [X]. Процесс соединения при использовании этой технологии происходит при температуре около 250°C, что позволяет проводить протонное облучение до соединения с молибденовым диском, в т.ч. со стороны анода поверхности полупроводникового элемента. Поскольку при этом протоны не проникают в слои полупроводникового элемента, близкие к катодной поверхности, становится возможным сформировать распределения τ со значительно большей асимметрией по сравнению со случаем использования «традиционных» полупроводниковых

элементов. На рисунке 2б представлено типичное распределение τ при протонном облучении через анодную поверхность полупроводникового элемента.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОБРАЗЦЫ

Для оценки предложенных конструктивно-технологических решений, которые планируется использовать для серийного производства приборов, были изготовлены экспериментальные образцы диодов с полупроводниковым элементом диаметром 56 мм, рассчитанные на повторяющееся обратное напряжение 4500 В и средний ток 800 А. Диоды были изготовлены на пластинах нейтронно-легированного кремния с удельным электрическим сопротивлением 250 Ом·см и толщиной 640 мкм.

1. Диоды с «традиционной» конструкцией были изготовлены с помощью технологии сплавления кремниевой пластины с молибденовым диском. Протонное облучение проводилось со стороны катодной поверхности после сплавления. Протонное облучение проводилось двумя различными дозами, чтобы обеспечить наиболее полную базу сравнения с экспериментальными диодами. Форма распределения τ в полупроводниковом элементе соответствовала рисунку 2а.
2. Диоды экспериментальной партии были изготовлены с использованием облучения протонами со стороны анодной поверхности, после чего проводилась операция соединения кремниевой пластины с молибденовым диском путем синтеринга с помощью серебросодержащей пасты. Форма распределения τ в полупроводниковом элементе соответствовала рисунку 2б.

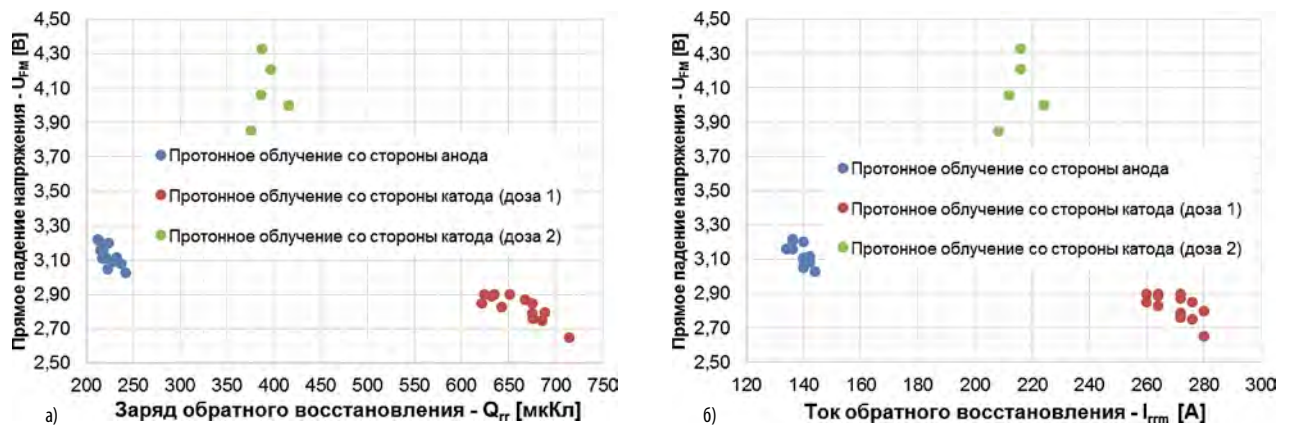


Рис. 3. Соотношения: а) U_{FM}/Q_{rr} ; б) U_{FM}/I_{rrm} для экспериментальных диодов (протонное облучение со стороны анода) в сравнении с диодами, изготовленными по традиционной технологии (протонное облучение со стороны катода)

4. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные электрические характеристики диодов представлены в таблице 1. Анализируя их, следует, прежде всего, заметить, что экспериментальные диоды имеют значи-

тельно меньшие значения I_{rrm} и Q_{rr} (вторая фаза обратного восстановления — спад обратного тока — аппроксимация хордой через точки $0,9I_{rrm}$ и $0,25I_{rrm}$). На рисунках 3а–б показаны соотношения U_{FM}/I_{rrm} и U_{FM}/Q_{rr} для экспериментальных диодов

в сравнении с диодами, изготовленными по традиционной технологии. При этом, однако, соотношение U_{FM} и интегрального заряда обратного восстановления Q_{rr} для двух групп диодов практически одинаково (см. рис. 4).

Таблица 1. Электрические характеристики диодов

Параметр	U_{BR} В	I_{RRM} мА	U_{FM} В	I_{rrm} А	Q_{rr-i} мкКл	Q_{rr} мкКл	Примечание	
	Режимы измерений	$T_j = 25^\circ\text{C}$	$U_{RRM} = 4500 \text{ В}, T_j = 140^\circ\text{C}$	$I_{FM} = 2500 \text{ А}, T_j = 140^\circ\text{C}$	$T_j = 140^\circ\text{C}, I_{FM} = 1000 \text{ А}, dI_{rrm}/dt = -100 \text{ А/мкс}, U_{RDC} = 100 \text{ В}$			
Номер ППЭ	9Ag/12672	5700	56	3,12	142	1032	233	Экспериментальные диоды
	10Ag/12672	5800	53	3,21	136	941	214	
	11Ag/12672	5600	61	3,16	136	950	218	
	12Ag/12672	5700	56	3,16	134	948	215	
	13Ag/12672	5700	56	3,03	144	1019	242	
	14Ag/12672	5700	60	3,11	140	982	222	
	15Ag/12672	5700	65	3,09	140	999	229	
	16Ag/12672	5700	75	3,08	142	1019	237	
	17Ag/12672	5700	57	3,05	140	1009	223	
	18Ag/12672	5700	70	3,11	140	990	217	
	19Ag/12672	5600	71	3,22	136	931	212	
	20Ag/12672	5700	63	3,20	140	365	224	
	1/12674	5900	28	2,76	272	1077	676	Диоды с традиционной технологией (доза 1)
	2/12674	5850	27	2,65	280	1136	714	
	3/12674	5840	32	3,54	236	758	481	
	6/12674	5890	30	2,87	272	1068	667	
	7/12674	5980	29	2,85	276	1081	675	
	8/12674	5900	32	2,85	260	1003	621	
	9/12674	5890	30	2,76	272	1066	676	
	10/12674	5900	32	2,89	264	997	632	
11/12674	5780	33	2,90	264	1015	635		
12/12674	5980	29	2,90	272	1028	651		
13/12674	5900	29	2,80	280	1104	689		
14/12674	5900	29	2,79	272	1068	675		
15/12674	5950	30	2,83	264	1040	642		
16/12674	5900	31	2,90	260	998	624		
19/12674	5780	28	2,75	276	1095	686		
17/12674	5780	37	4,06	212	608	386	Диоды с традиционной технологией (доза 2)	
18/12674	5400	49	3,85	208	599	376		
20/12674	5620	43	4,00	224	664	416		
21/12674	5800	54	4,33	216	627	387		
22/12674	5900	51	4,21	216	631	397		

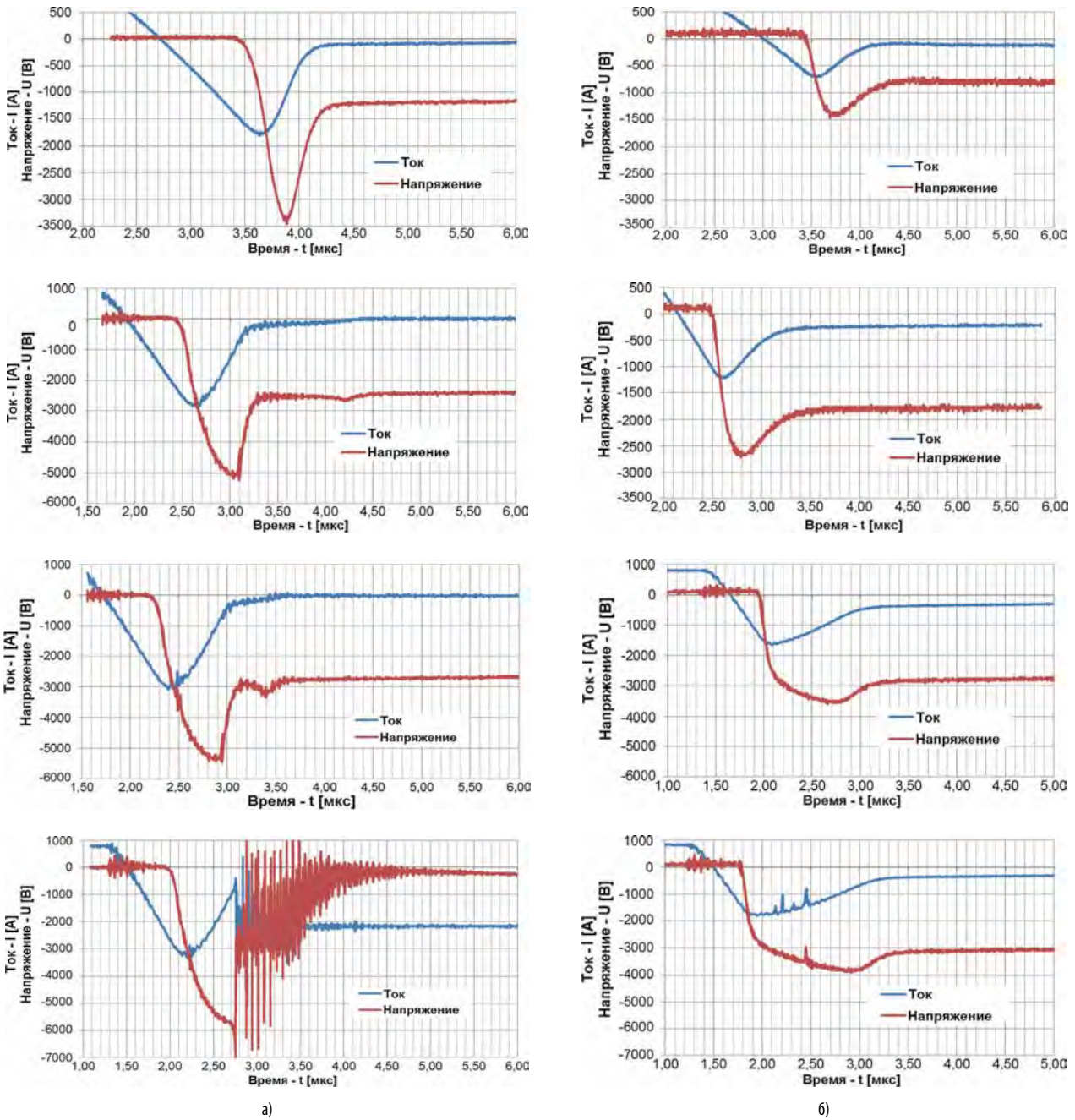


Рис. 6. Осциллограммы анодного тока и напряжения при обратном восстановлении диодов, изготовленных по: а) «традиционной» технологии; б) экспериментальных диодов при различных значениях обратного напряжения источника (U_{RD})

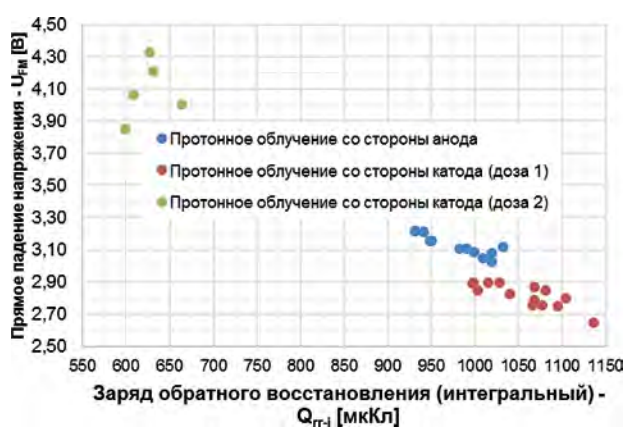


Рис. 4. Соотношения U_{FM}/Q_{rr-1} для экспериментальных диодов (протонное облучение со стороны анода) в сравнении с диодами, изготовленными по традиционной технологии (протонное облучение со стороны катода)

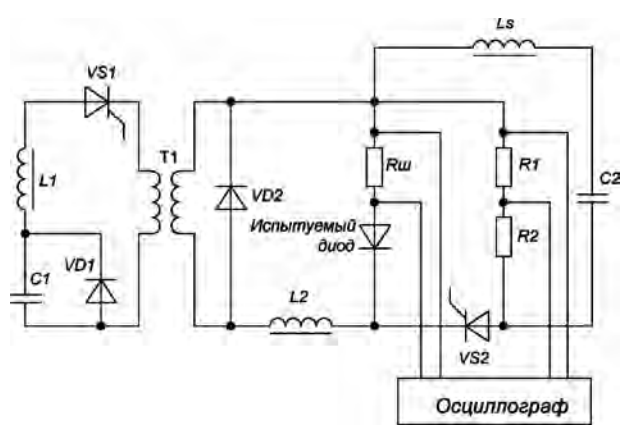


Рис. 5. Принципиальная схема установки для исследования характеристик обратного восстановления при высоких скоростях изменения тока обратного восстановления (di_{fm}/dt) и обратного напряжения источника (U_b)

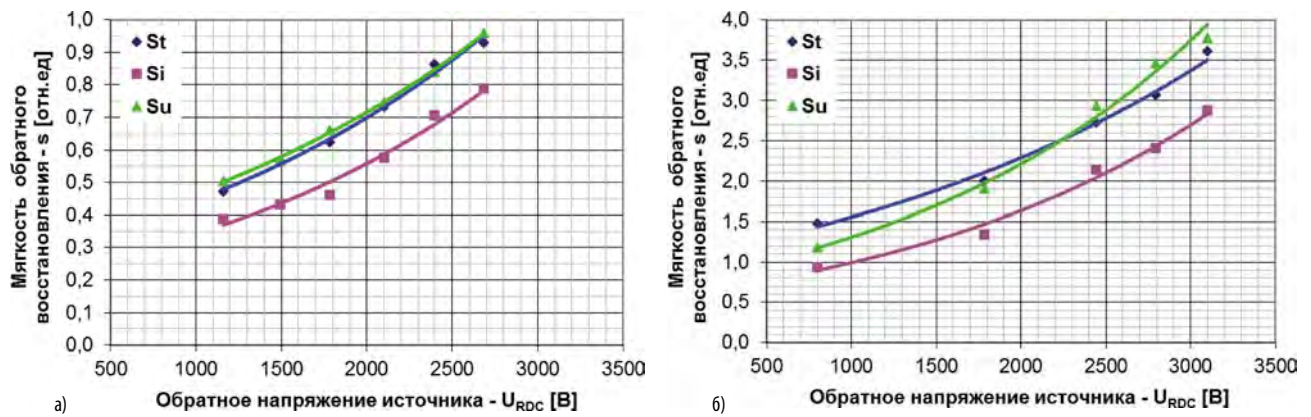


Рис. 7. Типичные зависимости мягкости обратного восстановления s от обратного напряжения источника U_{RDC} для диодов, изготовленных по традиционной технологии: а) облучение протонами со стороны катодной поверхности; б) для экспериментальных диодов — облучение протонами со стороны анодной поверхности

Исследование характеристик обратного восстановления при высокой скорости изменения тока обратного восстановления (di_{rrm}/dt) и обратного напряжения источника (U_R) проводилось на экспериментальной установке, принципиальная схема которой приведена на рисунке 5. Импульс прямого тока формировался при разряде колебательного контура L1C1, коммутируемого тиристором VS1. Через импульсный понижающий трансформатор импульс тока регулируемой амплитуды (0–2000 А) и длительностью около 1 мс подается на испытуемый диод. В момент достижения максимума прямого тока тиристор VS2 коммутирует разряд в малоиндуктивном контуре C2Ls ($L_s \sim 0,5$ мкГн), что обеспечивает обратное восстановление испытуемого диода. Это восстановление осуществляется в бесснабберном режиме. Обратное напряжение (U_{RDC}) регулировалось в диапазоне 500–3000 В. Соответственно, при изменении U_{RDC} скорость изменения тока обратного восстановления регулировалась в пределах 1000–5000 А/мкс.

Типовые осциллограммы анодного тока и напряжения при обратном восстановлении диодов, изготовленных по «традиционной» технологии, для различных значений обратного напряжения U_{RDC} представлены на рисунке 6а.

В диапазоне значений обратного напряжения $U_{RDC} = 2600$ – 2800 В происходил пробой диодов, изготовленных по традиционной технологии, который сопровождался разрушением полупроводникового элемента. Типичные осциллограммы анодного тока и напряжения при пробое приведены на рисунке 6а (внизу).

Типичные осциллограммы анодного тока и напряжения при обратном восстановлении экспериментальных диодов для различных значений обратного напряжения (U_{RDC}) представлены на рисунке 6б.

Следует заметить, что экспериментальные диоды устойчиво и безотказно работали вплоть до значений обратного напряжения $U_{RDC} \sim 3200$ В. При этом мягкость обратного восстановления s превышала 1 (см. рис. 7б).

Кроме того, значения общего обратного напряжения (U_{RRM}) во всех режимах обратного восстановления по своей абсолютной величине не превышали 4000 В (см. рис. 8), т.е. экспериментальные диоды пригодны для работы в бесснабберных цепях в коммутационной паре с IGCT и IGBT, рассчитанными на повторяющееся импульсное напряжение 4500 В.

Ниже представлены формулы для расчета мягкости обратного восстановления:

$$s_t = t_s/t_r \quad (1)$$

$$s_i = |(di/dt)_f^{\max}/(di/dt)_s|_t \quad (2)$$

$$s_u = U_{RDC}/(U_{RRM} - U_{RDC}) \quad (3)$$

5. ВЫВОДЫ

На основе представленных выше конструктивно-технологических реше-

ний и проведенных исследований разработана линейка мощных мягких быстровосстанавливающихся диодов, адаптированных для работы в коммутационной паре с коммерческими IGBT и IGCT. Основные электрические и тепловые параметры таких диодов представлены в таблице 2.

Такие диоды позволят получить новые преимущества при проектировании инверторов в системах индукционного нагрева и регулирования скорости вращения электродвигателей за счет того, что отвечают всем необходимым требованиям для надежной работы с современными мощными таблеточными IGCT и IGBT. У этих диодов:

- повышенная скорость изменения тока обратного восстановления (di_{rrm}/dt);
- низкий ток обратного восстановления (I_{rrm});
- лучше мягкость обратного восстановления (более 1);
- имеется способность работать без снабберных RC-цепей;
- стойкость к эффекту «схлопывания» и динамическому лавинному пробою.



Рис. 8. Зависимости общего обратного напряжения (U_{RRM}) от обратного напряжения источника (U_{RDC}) для диодов, изготовленных по традиционной технологии, и для экспериментальных диодов