

05;06;12

## Высоковольтный быстрый диод с „мягким“ восстановлением

© И.В. Грехов,<sup>1</sup> А.В. Рожков,<sup>1</sup> Л.С. Костина,<sup>1</sup> А.В. Коновалов,<sup>2</sup> Ю.Л. Фоменко<sup>2</sup><sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

e-mail: konst@mail.ioffe.ru

<sup>2</sup> ЗАО „ВЗПП-Микрон“,  
394033 Воронеж, Россия

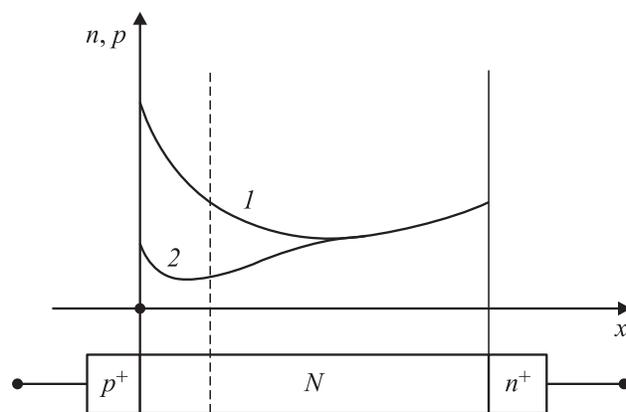
Высоковольтные быстродействующие кремниевые  $p^+Nn^+$ -диоды, используемые практически во всех современных преобразователях электроэнергии, должны иметь малое остаточное напряжение в проводящем состоянии и в то же время быстро переключаться с малыми коммутационными потерями в запертое состояние, не создавая при этом всплесков перенапряжения. Такое сочетание параметров обеспечивается обычно путем создания профильного распределения концентрации рекомбинационных центров в  $N$ -базе с максимумом у  $p^+N$ -перехода. Подобное распределение создается с помощью облучения в вакууме  $p^+Nn^+$ -диода со стороны  $p^+N$ -перехода протонами либо  $\alpha$ -частицами. Приведены результаты исследования диодов, в которых профильное распределение центров получено более простым и производительным методом облучения электронами в определенном диапазоне энергий на воздухе. На примере приборов разработанной авторами конструкции с блокируемым напряжением до 5 кВ показано, что все динамические характеристики диодов соответствуют мировому уровню, а остаточное напряжение в проводящем состоянии при рабочей плотности тока примерно на 30% меньше.

### Введение

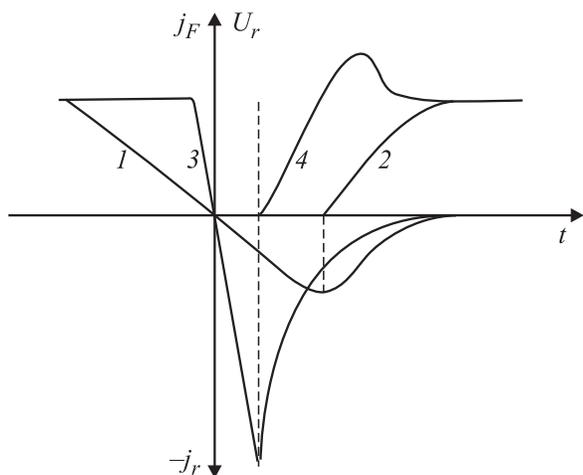
Во всех промышленно развитых странах примерно половина всей вырабатываемой электроэнергии потребляется в области электропривода. В современном электроприводе скорость вращения асинхронного двигателя обычно регулируется путем изменения частоты переменного тока с помощью полупроводникового преобразователя, основным активным элементом которого является полностью управляемый мощный переключатель (транзистор либо запираемый тиристор) со встречно-параллельно включенным быстродействующим мощным диодом. Синусоида рабочего тока в таком преобразователе формируется из большого числа импульсов тока переменной ширины и амплитуды, поэтому требования к частотным характеристикам как переключателя, так и диода являются очень жесткими. В то же время приборы должны иметь малое остаточное напряжение  $U_F$  в проводящем состоянии при большой плотности прямого тока. Одновременное удовлетворение этим требованиям является сложной технической задачей.

Для получения малого  $U_F$  широкая базовая  $N$ -область  $p^+Nn^+$ -структуры диода должна быть заполнена хорошо проводящей электронно-дырочной плазмой с высокой концентрацией носителей тока, распределение которой схематически показано на рис. 1, кривая 1. Простые оценки показывают, что для получения малого  $U_F$  диффузионная длина дырок в плазме  $L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$  должна быть  $\geq 0.35W_n$ , где  $W_n$  — толщина  $N$ -базы,  $\tau_p D_p$  — время жизни и коэффициент диффузии дырок в плазме соответственно. Например, для диода с напряжением пробоя  $U_B = 3.5$  кВ и толщиной базы  $\sim 330$  мкм для получения  $U_F \approx 1.5$ – $1.8$  В при плотности прямого тока  $j_F \approx 80$  А/см<sup>2</sup> необходимо  $\tau_p \approx 10$  мкс. Такие

параметры имеют обычные мощные выпрямительные диоды, к быстродействию которых при переключении из проводящего в блокирующее состояние не предъявляется жестких требований. Если при переключении скорость нарастания обратного тока  $dj_r/dt$  невелика, то за время спада концентрации у  $p^+N$ -перехода и начала формирования области объемного заряда (ООЗ) ток нарастает до небольшой величины, а значительная часть накопленного заряда выводится из диода при малом напряжении на нем, т.е. коммутационные потери относительно невелики (рис. 2, кривая 1). Однако при большой скорости нарастания обратного тока (кривая 2) ток до начала формирования ООЗ успевает нарасти до большой величины, в разы превышающей прямой ток, что приводит к резкому росту коммутационных



**Рис. 1.** Распределение электронно-дырочной плазмы в  $p^+Nn^+$ -структуре при протекании прямого тока. 1 — распределение плазмы в обычном диоде; 2 — распределение плазмы со сниженной концентрацией носителей заряда у  $p^+N$ -перехода.



**Рис. 2.** Кривая 1 — изменение прямого и обратного тока при малом  $dj_r/dt$ , кривые 2, 4 — форма нарастания обратного напряжения, кривая 3 — изменение прямого и обратного тока при большом  $dj_r/dt$ .

потерь. Кроме того, при достаточно большой плотности обратного тока  $j_r$ , когда концентрация свободных дырок  $p \approx j_r(qV_S)^{-1}$ , выносимых этим током из  $N$ -базы с насыщенной скоростью  $V_S$ , становится сравнимой с концентрацией легирующей примеси, резко возрастает напряженность поля у  $p^+N$ -перехода. Когда напряженность превысит порог ударной ионизации, начинается генерация электронно-дырочных пар, что затягивает процесс обрыва тока и в определенных условиях может привести к его шнурованию [1]. Поскольку встречно-параллельные диоды в современных преобразователях должны работать именно в условиях быстрой коммутации с большими скоростями нарастания обратного тока и в то же время с малыми коммутационными потерями, исследования и разработки, направленные на создание таких диодов, ведутся практически всеми исследовательскими центрами силовой электроники в мире. В принципе очевидно, что если снизить начальную концентрацию плазмы в области  $N$ -базы у  $p^+N$ -перехода (рис. 1, кривая 2), то это позволит резко ускорить начало процесса перехода в блокирующее состояние, и даже при очень большой скорости нарастания обратного тока амплитуда его будет небольшой. Поскольку при этом в остальной части  $N$ -базы концентрация плазмы остается высокой,  $U_F$  будет относительно небольшим. Существенным является и то, что после начального резкого спада обратного тока дальнейшее его уменьшение будет плавным, поскольку на правой границе образующейся ООЗ концентрация плазмы остается довольно высокой, и диффузионно-дрейфовый поток дырок из нее через ООЗ уменьшает скорость спада этого тока. Такой „мягкий“ характер восстановления блокирующей способности диода препятствует появлению резких всплесков напряженности на паразитной индуктивности силовой цепи преобразователя.

## 1. Создание профильного распределения плазмы в $N$ -базе

Одним из возможных методов снижения концентрации плазмы у  $p^+N$ -перехода при прохождении прямого тока является уменьшение коэффициента инжекции этого перехода путем уменьшения толщины  $p^+$ -слоя и концентрации легирующей примеси в нем. В этом направлении было выполнено много экспериментальных и расчетных работ, например [2–5], однако в конечном счете оказалось, что более воспроизводимым и технологически удобным методом является создание в  $N$ -базе сразу за  $p^+N$ -переходом узкой области с повышенной концентрацией рекомбинационных центров, снижающих  $\tau_p$ . Эти центры создаются путем облучения протонами либо  $\alpha$ -частицами с энергией, обеспечивающей максимум концентрации дефектов сразу за  $p^+N$ -переходом [6–8] и др. В остальной части  $N$ -базы  $\tau_p$  обычно регулируется путем облучения электронами с энергией 5–7 MeV, создающим однородное распределение рекомбинационных А-центров (комплекс вакансия–кислород) по всей толщине  $N$ -базы. Вместо электронного облучения иногда применяют облучение протонами либо  $\alpha$ -частицами на большую глубину в  $N$ -базу со стороны  $n^+N$ -перехода [9]. Технология создания профильного распределения концентрации рекомбинационных центров вдоль оси прибора с помощью облучения протонами (либо  $\alpha$ -частицами) и затем электронами является в настоящее время основной в производстве встречно-параллельных диодов для мощных преобразователей электроэнергии.

Однако процесс облучения протонами либо  $\alpha$ -частицами сам по себе довольно сложен и малопроизводителен, поскольку он осуществляется в вакуумной камере. Недавно было показано [10], что простой и производительный процесс облучения кремниевых пластин сканирующим электронным пучком, выведенным в атмосферу через металлическую фольгу, в определенных условиях может быть использован для создания профильного распределения рекомбинационных центров в кремниевых приборах.

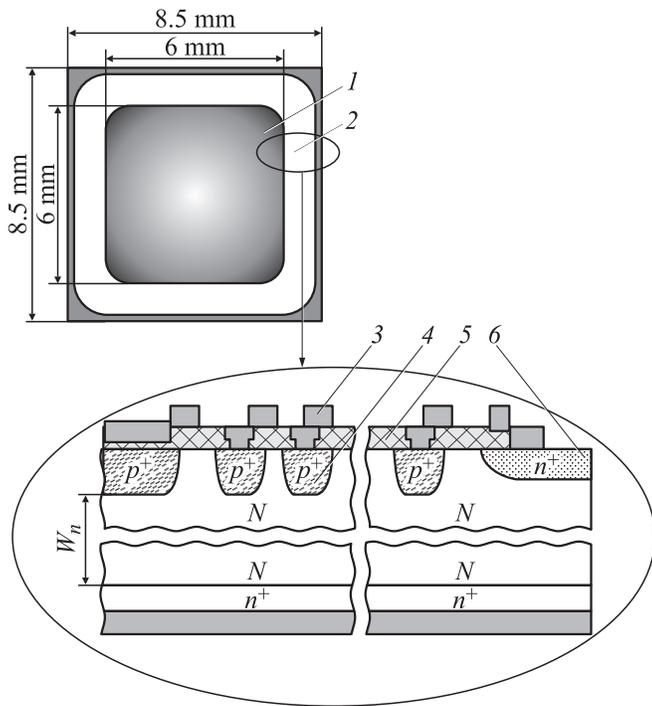
Как было показано ранее [11], скорость генерации А-центров электронами с энергией  $E \geq 600$  keV практически не зависит от энергии, а при  $E \leq 600$  keV быстро уменьшается и при  $E < 300$  keV становится пренебрежимо малой. Поскольку потеря средней энергии электроном в кремнии составляет  $\sim 0.4$  keV/ $\mu\text{m}$  [12], при облучении электронами с энергией с несколько MeV концентрация вводимых А-центров является однородной в пластинах практически любой используемой в производстве приборов толщины. Однако при облучении достаточно толстых пластин электронами с энергией менее 600 keV становится возможным создание профильного распределения концентрации А-центров с максимумом у облучаемой поверхности.

Для заданной толщины кремниевой пластины можно, варьируя энергию и дозу облучения, получать различ-

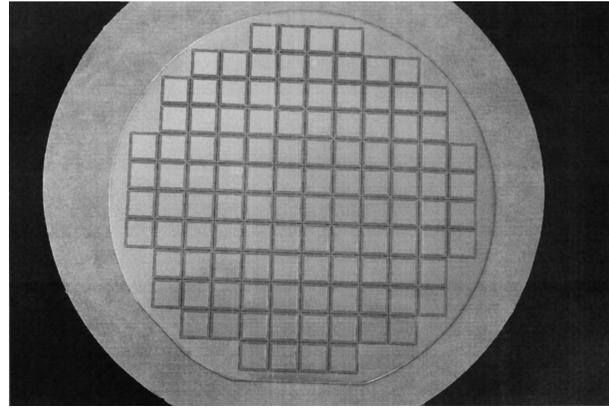
ные профили распределения концентрации А-центров и, следовательно, величины  $\tau_p$ . Реальные перспективы этот метод имеет, конечно, для высоковольтных приборов с толщиной  $N$ -базы в сотни микрон, когда есть возможность работать с достаточно большой энергией, создавая высокую концентрацию А-центров у  $p^+N$ -перехода при не слишком большом времени работы ускорителя.

## 2. Конструкция и технология изготовления $p^+Nn^+$ -диода

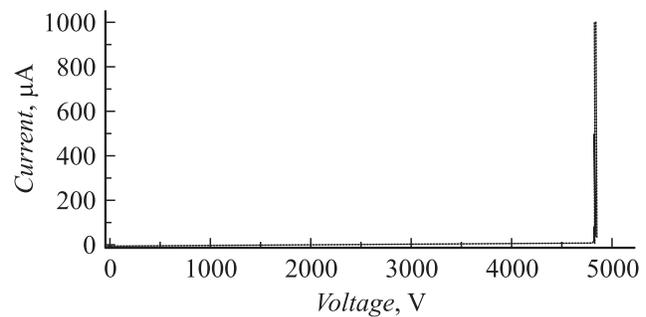
На основе использования метода электронного облучения для снижения  $\tau_p$  и получения его профильного распределения вдоль оси прибора были разработаны конструкция и технология производства высоковольтных быстрых диодов с „мягким“ восстановлением. Конструкция диодного чипа с блокируемым напряжением около 5 kV показана на рис. 3;  $p^+Nn^+$ -структура диода изготавливается по обычной планарной технологии диффузией бора и фосфора в кремниевую пластину с  $\rho \approx 250 \Omega \cdot \text{см}$ . Краевой контур диода защищается от пробоя по поверхности системой охранных колец, конструкция которых показана на рис. 3. Толщина пластины 580  $\mu\text{m}$ , глубина  $p^+$ -слоя диода и охранных колец 6  $\mu\text{m}$ ,  $n^+$ -слоя 10  $\mu\text{m}$ . Толщина базы  $W_n$  при такой геометрии примерно равна ширине ООЗ при лавинном пробое  $p^+N$ -перехода. Уровень чистоты всех технологических процессов, связанных с термообработ-



**Рис. 3.** Конструкция высоковольтного диода: 1 — рабочая площадь диода, 2 — система охранных колец, 3 — металлизация кольца, 4 — диффузионное  $p^+$ -кольцо, 5 — пассивация, 6 —  $n^+$ -стоп-слой.



**Рис. 4.** Кремниевая пластина диаметром 100 mm с диодными чипами.



**Рис. 5.** Обратная вольт-амперная характеристика диодного чипа при  $t = 20^\circ\text{C}$ .

кой, достаточно высок, время жизни дырок  $\tau_p$  в  $N$ -базе  $p^+Nn^+$ -структур обычно составляет 50–60  $\mu\text{s}$ . Электронное облучение для снижения  $\tau_p$  и получения его профильного распределения вдоль оси прибора проводится после изготовления контактов, но до разделения исходной пластины на отдельные чипы. Фотография облучаемой пластины диаметром 100 mm с диодными чипами показана на рис. 4. Облучение проводится со стороны  $p^+N$ -перехода. Перед облучением пластины проводится облучение контрольных чипов, позволяющее измерить  $\tau_p$ , получаемое у  $p^+N$ - и  $n^+N$ -переходов. Приводимые ниже характеристики измерены на диодах, которые облучались в режиме, обеспечивающем  $\tau_p \approx 1\text{--}1.5 \mu\text{s}$  у  $p^+N$ -перехода и 8–10  $\mu\text{s}$  у  $n^+N$ -перехода при комнатной температуре.

## 3. Исследование основных характеристик диодов

Типичная вольт-амперная характеристика (ВАХ) в блокирующем направлении диодов разработанной конструкции приведена на рис. 5. Ток утечки при комнатной температуре непосредственно перед резким загипом ВАХ при 4.8 kV не превышает 20  $\mu\text{A}$  при  $t = 20^\circ\text{C}$ .

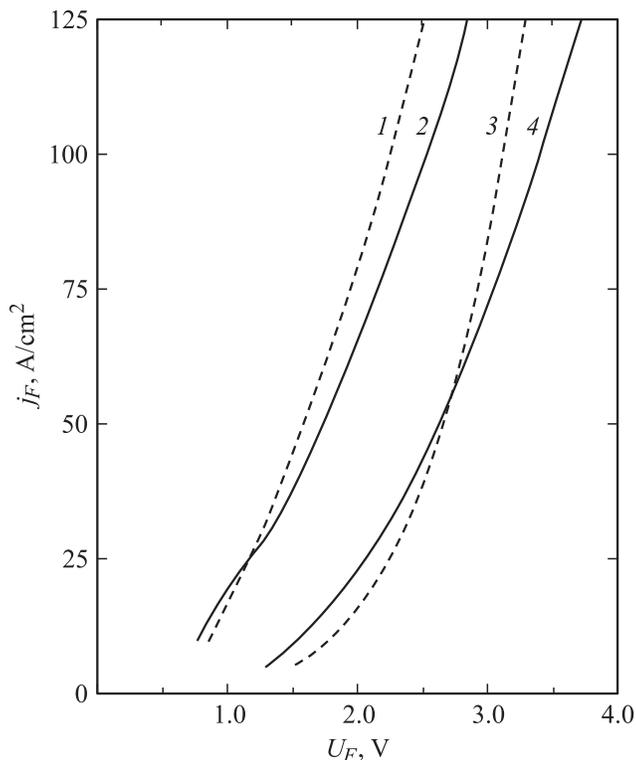


Рис. 6. Прямая ВАХ исследуемого диода: 1 — при 20°C, 2 — при 125°C. Прямая ВАХ аналогичного диода фирмы АВВ: 3 — при 20°C, 4 — при 125°C.

Прямые ВАХ диодов приведены на рис. 6. Обращает на себя внимание, что при плотности тока выше 25 А/см<sup>2</sup> остаточное напряжение увеличивается с ростом температуры, что очень важно для устойчивой работы силовых модулей, в которых большое количество диодных чипов соединяется параллельно. На этом же рисунке для сравнения приведены (перестроенные в плотность тока по оси ординат) аналогичные ВАХ самых современных диодов фирмы АВВ [9] с блокируемым напряжением 4.5 кV, в которых профиль распределения  $\tau_p$  в *N*-базе создавался двумя последовательными облучениями протонами со стороны *p*<sup>+</sup>*N*- и *n*<sup>+</sup>*N*-переходов. Как видно из приведенных характеристик, диоды описанной в работе конструкции имеют остаточное напряжение примерно на 30% меньше, а температурная зависимость его становится положительной при вдвое меньшей плотности тока. На рис. 7, *a* приведены осциллограммы переключения этих диодов из проводящего в блокирующее состояние при скорости нарастания обратного тока  $dj_r/dt \approx 350$  (А/μс · см<sup>2</sup>), а на *b* — диодов фирмы АВВ в аналогичном режиме. Видно, что соотношение между амплитудой прямого и обратного токов у обоих диодов примерно одинаково, но у исследуемых диодов время резкого спада обратного тока существенно меньше, а процесс восстановления в области малых токов протекает более плавно, что связано, скорее всего, с более плавным изменением концентрации плазмы в направлении от *p*<sup>+</sup>*N*- к *n*<sup>+</sup>*N*-переходу вследствие более

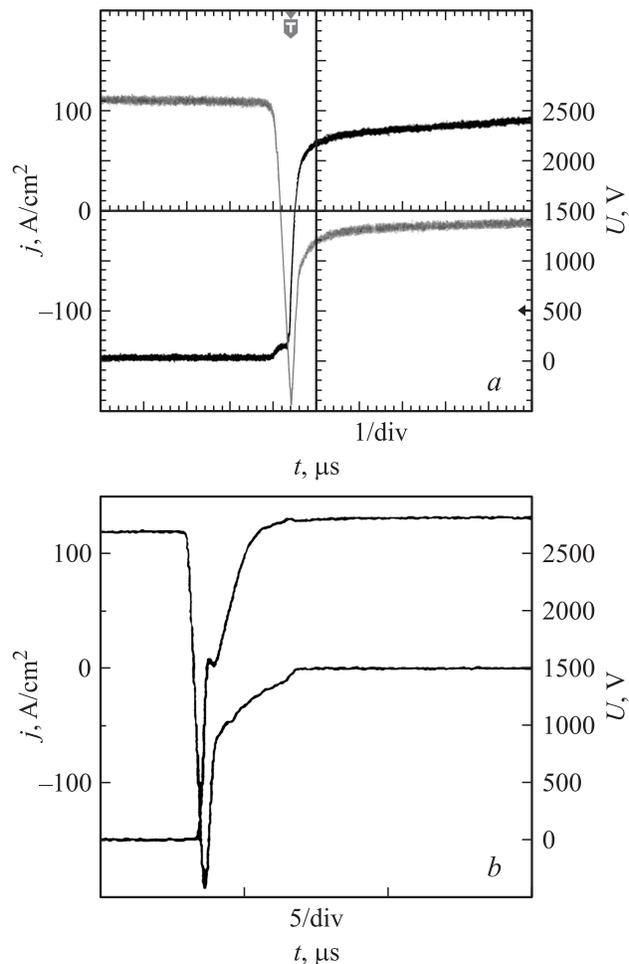


Рис. 7. Осциллограммы процесса переключения диода из проводящего в блокирующее состояние при скорости нарастания обратного тока  $dj_r/dt = 350$  (А/μс · см<sup>2</sup>): *a* — исследуемого диода, *b* — аналогичного диода фирмы АВВ (взята из работы [9] и перестроена в плотность тока по оси ординат).

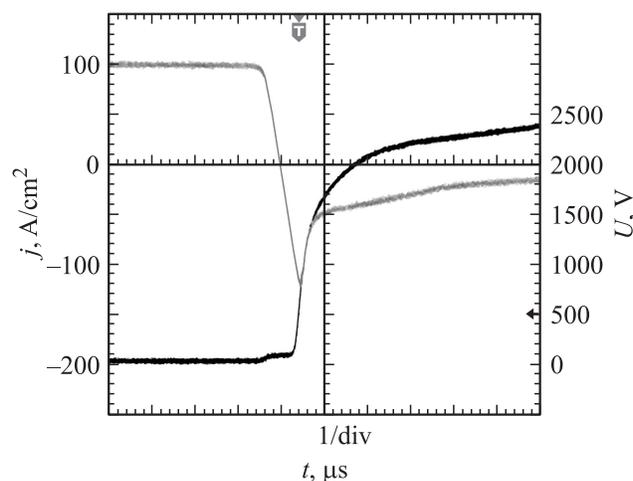


Рис. 8. Осциллограмма процесса переключения исследуемого диода при  $dj_r/dt = 100$  (А/μс · см<sup>2</sup>).

плавного профиля распределения концентрации рекомбинационных центров.

На рис. 8 приведена осциллограмма процесса переключения  $dj_r/dt = 100 \text{ (A/\mu s} \cdot \text{cm}^2\text{)}$ . Уменьшение  $dj_r/dt$  приводит, естественно, к резкому уменьшению амплитуды обратного тока.

## Заключение

Приведенные в работе результаты показывают, что простой метод создания профильного распределения рекомбинационных центров в  $N$ -базе  $p^+Nn^+$ -диода путем облучения его со стороны  $p^+N$ -перехода электронным пучком с энергией менее 600 keV позволяет получить лучшее соотношение между быстродействием диода и остаточным напряжением, чем у аналогичных диодов ведущих мировых фирм. Конструкция и технология полупроводниковых чипов таких диодов адаптированы для их производства на технологических линиях ЗАО „ВЗПП-Микрон“.

Авторы выражают благодарность В.В. Козловскому и В.Н. Ломасову за полезные обсуждения и проведение облучения диодных структур.

Работа выполнена при поддержке ФЦП „Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2012 гг.“ и программы фундаментальных исследований ОЭММПУ РАН „Физико-технические проблемы полупроводниковой электроники больших мощностей“.

## Список литературы

- [1] Ogura T., Nonomiga H., Sugiyama K., Inoue T. // IEEE Trans. El. Dev. 2004. Vol. 5. N 4. P. 629–635.
- [2] Schlangenotto H., Serafin J., Sawitzki F., Maeder H. // IEEE Trans. El. Dev. 1989. Vol. 10. N 7. P. 322–324.
- [3] Porst A. et al. ISPSD Proc. 1997. Weimar, P. 213–216.
- [4] Rahimo M., Shammam N. EPE'97 Proc. Trondheim, Vol. 2. P. 99–100.
- [5] Горбатюк А.В., Грехов И.В., Гусин Д.В. // Электротехника. 2010. № 11. С. 53–61.
- [6] Vobesky J., Hazdra P., Galster N., Carrol E. // Proc. 8<sup>th</sup> PEMC. Sept. 1998. Prague.
- [7] Hazdra P., Vobesky J., Galster N., Humbel O., Dalibor T. // Proc. ISPSD. May 2000. Toulouse, France.
- [8] Siemieni c R., Lutz J. // Microelectronics Journal. 2004. N 35. P. 259–269.
- [9] Цыплаков Е.А., Стораста Л., Рахимо М. // Тр. 2-й Международной специализированной конф. „Силовая электроника — ключевая технология Российской промышленности XXI в.“ 2010. М. С. 54–61.
- [10] Грехов И.В., Костина Л.С., Козловский В.В., Ломасов В.Н., Рожков А.В. // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. Вып. 9. С. 105–111.
- [11] Берман Л.С., Витовский Н.А., Ломасов В.Н., Ткаченко В.Н. // ФТП. Т. 24. Вып. 12. 1990. С. 2186–2190.
- [12] „Физические величины“. Справочник под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова М.: Энергоатомиздат, 1991. С. 1170.