

Управление частотными свойствами IGBT на напряжение 1200 В

с использованием электронного облучения

Представлены результаты экспериментальных исследований возможности управления частотными свойствами IGBT на напряжение 1200 В с инжекционным обогащением производства российских компаний ОАО «Ангстрем» и ОАО «Электровыпрямитель». Показано, что с помощью облучения кристаллов IGBT высокоэнергетичными электронами можно существенно улучшить динамические параметры отечественных IGBT-модулей, расширить области их применения.

Валентин Мартыненко

martin@moris.ru

Вячеслав Мускатиньев

sl_a167@rambler.ru

Павел Машевич, к. т. н.

masceovich@angstrem.ru

Татьяна Крицкая

kritskaya@angstrem.ru

Алексей Бормотов

Михаил Тогаев

support-nicpp@saransk-com.ru

Введение

В последние годы бурно развивается рынок преобразовательного оборудования, в котором в качестве силовых полупроводниковых ключей используются IGBT-транзисторы. В зависимости от назначения этого оборудования частота переключения транзисторов может находиться в диапазоне от единиц до сотен килогерц. И в каждом конкретном случае изготовителю полупроводниковых приборов приходится решать задачу, как свести к минимуму суммарную мощность потерь, выделяющейся в приборе, находя компромисс между статическими и динамическими параметрами транзистора.

Известным методом оптимизации потерь проводимости и выключения в технологии силовых полупроводниковых приборов, работающих на повышенных частотах, является радиационное легирование. Оно осуществляется путем контролируемого введения в полупроводник центров рекомбинации, например с помощью облучения электронами высокой энергии и последующей термической обработки. Варьируя дозу облучения электронами, можно прецизионно управлять концентрацией рекомбинационных центров и, соответственно, временем жизни неосновных носителей заряда τ в базовых областях полупроводниковых приборов [1]. Пример эффективного использования электронного облучения с равномерным распределением времени жизни для снижения суммарной мощности потерь и максимальной рабочей температуры кремниевой структуры силового диода при работе на повышенных частотах описан в работе [2].

В настоящей статье показана возможность управления частотными свойствами IGBT с помощью

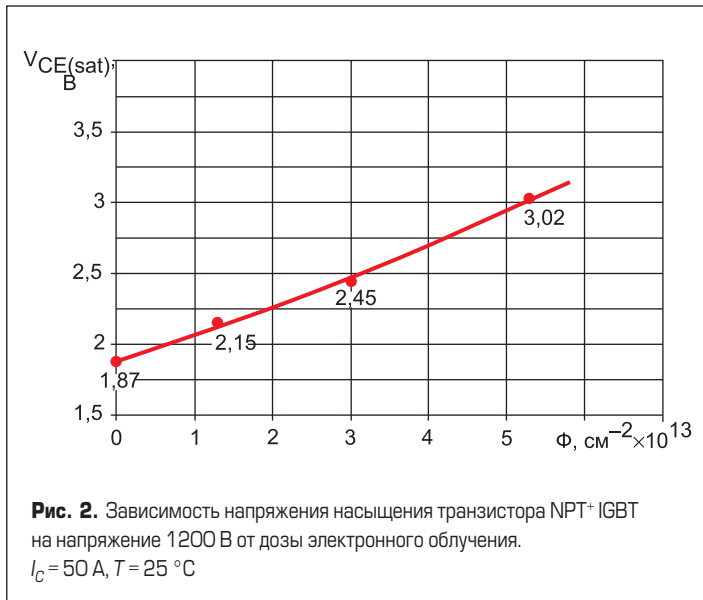
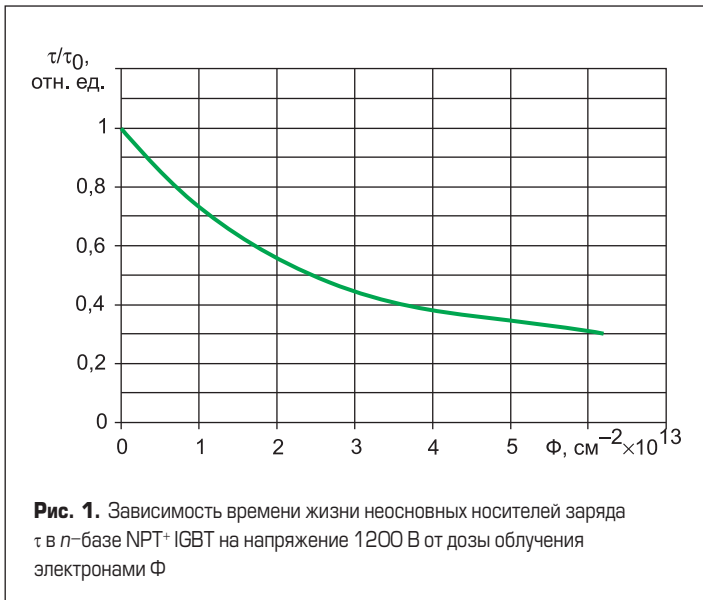
электронного облучения на последнем этапе технологического цикла изготовления кристаллов IGBT, предложены отечественные высокочастотные IGBT-модули на напряжение 1200 В, оптимизированные для работы на частотах 20–25 кГц и выше.

Облучение электронами

Облучение исследуемых IGBT-структур высокоэнергетичными электронами было выбрано как наиболее доступное и широко используемое в отечественной практике средство регулирования времени жизни носителей заряда в высокоомных базовых областях силовых полупроводниковых приборов.

Исследования взаимосвязи параметров IGBT с дозой облучения электронами проводились на кристаллах транзисторов с размерами 10×10 мм на напряжение $V_{CE} = 1200$ В, изготовленных компанией ОАО «Ангстрем» по технологии NPT⁺ (V1) [3]. Особенность данной технологии состоит в том, что под эмиттерные ячейки вводится дополнительный *n*-слой, повышающий концентрацию плазмы на эмиттерной стороне транзистора [4]. Это приводит к резкому снижению напряжения насыщения (на планарных NPT до 1 В) и повышению стойкости транзисторов к токам короткого замыкания.

Кристаллы IGBT облучались электронами с энергией 6–7 МэВ на ускорителе электронов «Электроника У-003» с различной дозой облучения. Измерения времени жизни носителей заряда в *n*-базе транзистора выполнялись разностным методом на установке ПКВ_т-20 при комнатной температуре. На рис. 1 представлена зависимость времени жизни неосновных носителей в *n*-базе IGBT от дозы электронного облучения. Времена жизни на данном



рисунке показаны в относительных единицах (τ/τ_0), где τ_0 — исходное время жизни в кремниевых структурах IGBT, τ — время жизни в тех же структурах после каждой дозы облучения, Φ — доза облучения.

Исследования облученных образцов IGBT показали, что с увеличением дозы облучения электронами наблюдается существенное уменьшение времени жизни носителей заряда. Причем облучение электронами с дозой 2×10^{13} см⁻² дает снижение τ в 2 раза по сравнению с исходным значением времени жизни. Дальнейшее трехкратное увеличение дозы облучения электронами приводит к снижению времени жизни на 60%.

Результаты измерений

Статические параметры

Кристаллы IGBT (облученные электронами и не облученные) собирались в беспотенциальные модули, выполненные по 2-ключевой схеме. Использовался унифицированный корпус М13 размером 94×34×30 мм, в котором размещались два кристалла NPT⁺ IGBT и два

кристалла FRD на 1200 В, собранные по схеме полумоста.

Были измерены статические и динамические параметры, энергия потерь при переключении транзисторов, устойчивость к выключению двойного тока (RBSOA), току короткого замыкания (SCSOA). Измерения и исследования параметров и характеристик NPT⁺ IGBT производились на внешних выводах силовых модулей. Измерения учитывали падения напряжения на кристаллах, металлизации керамических плат, алюминиевой проволоке, медных перемычках и силовых выводах. Исследования статических и динамических параметров кристаллов в IGBT-модулях проводились в предельных режимах при комнатной и повышенной температурах. На рис. 2 показана типичная зависимость напряжения насыщения $V_{CE(sat)}$ транзистора NPT⁺ IGBT на напряжение 1200 В от дозы электронного облучения. Измерения проведены при токе коллектора 50 А, температуре 25 °С. Из полученной кривой взаимосвязи $V_{CE(sat)} = f(\Phi)$ видно, что в исследуемом диапазоне доз (1–5)×10¹³ см⁻² пятикратное увели-

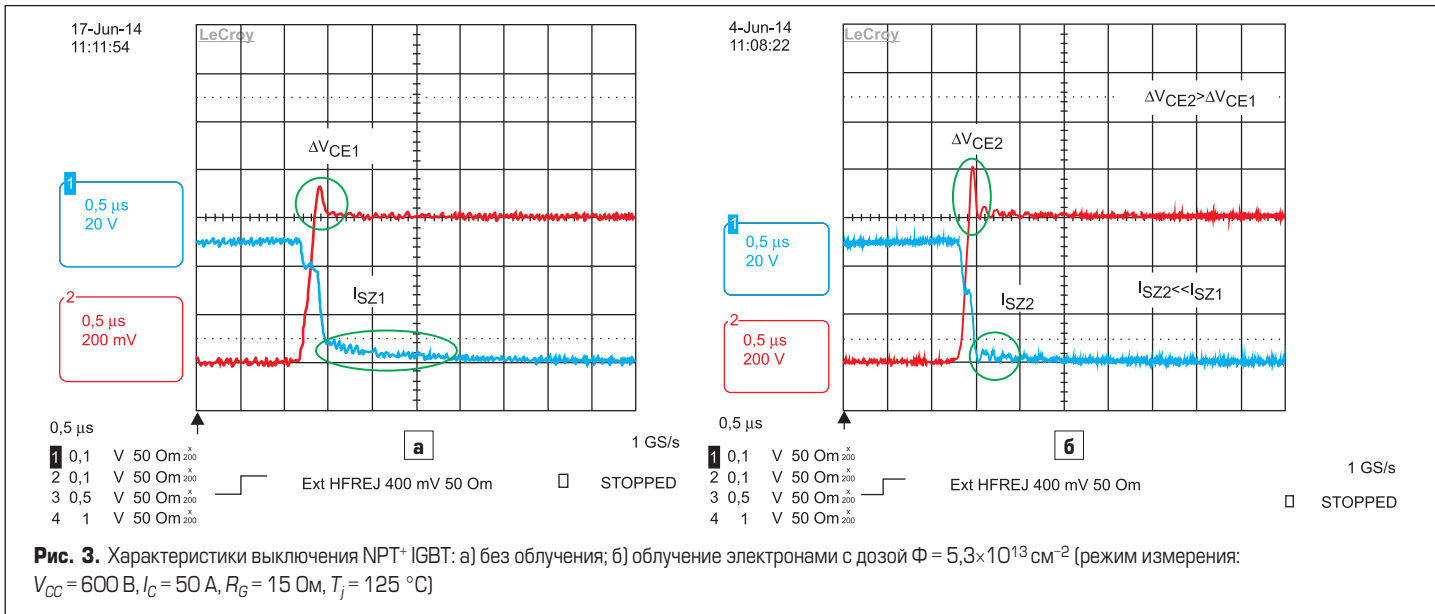
чение дозы облучения электронами приводит к росту напряжения насыщения не более чем на 35%.

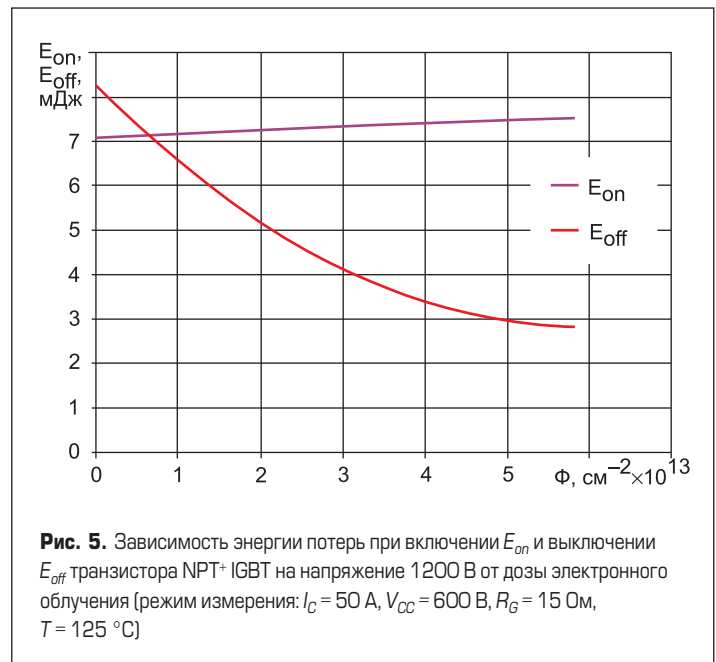
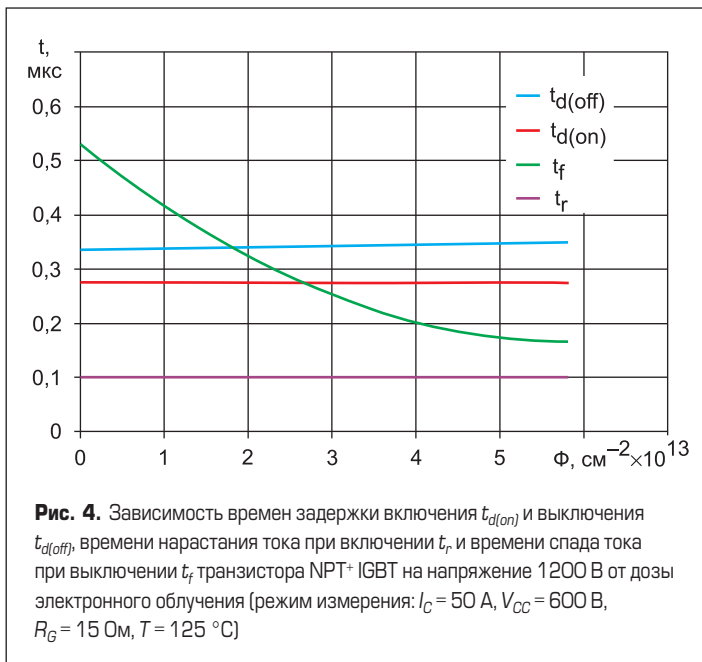
Динамические параметры

Поведение транзисторов при переключении изучалось в испытательной полумостовой схеме с индуктивной нагрузкой [3], в которой в качестве ключей использовались исследуемые IGBT, а оппозитные диоды FRD оставались неизменными, независимо от доз облучения IGBT.

Как и ожидалось, облучение кристаллов IGBT электронами оказало незначительное влияние на процесс включения транзисторов и, соответственно, на все временные параметры и энергию потерь при включении. В то же время характеристики выключения транзисторов после облучения электронами претерпели радикальные изменения.

На рис. 3 представлены осциллограммы токов и напряжений при выключении необлученных транзисторов (рис. 3а) и транзисторов, облученных электронами с дозой $5,3 \times 10^{13}$ см⁻² (рис. 3б).





Из рис. 3 видно, что после облучения транзисторов время спада и величина хвостового тока коллектора I_{SZ} при выключении IGBT резко уменьшились, а на кривых тока и напряжения (рис. 3б) появились осцилляции, характерные для высокочастотных транзисторов с быстрыми переходными процессами тока. Кроме того, вследствие увеличения скорости спада коллекторного тока di_C/dt после облучения, пик пере-напряжения ΔV_{CE} , вызванный паразитной рассеянной индуктивностью контура коммутации L_G , увеличился с 120 В (рис. 3а) до 200 В (рис. 3б). При этом результирующее напряжение при выключении IGBT имеет максимум:

$$V_{CEmax} = V_{DC} + \Delta V_{CE} = V_{DC} + L_G \cdot$$

На рис. 4 показаны кривые зависимости динамических параметров транзисторов NPT⁺ IGBT на напряжение 1200 В от дозы облучения электронами. Из полученных кривых следует, что время задержки включения $t_{d(on)}$ и время нарастания тока коллектора t_r при включении IGBT, а также время задержки при выключении

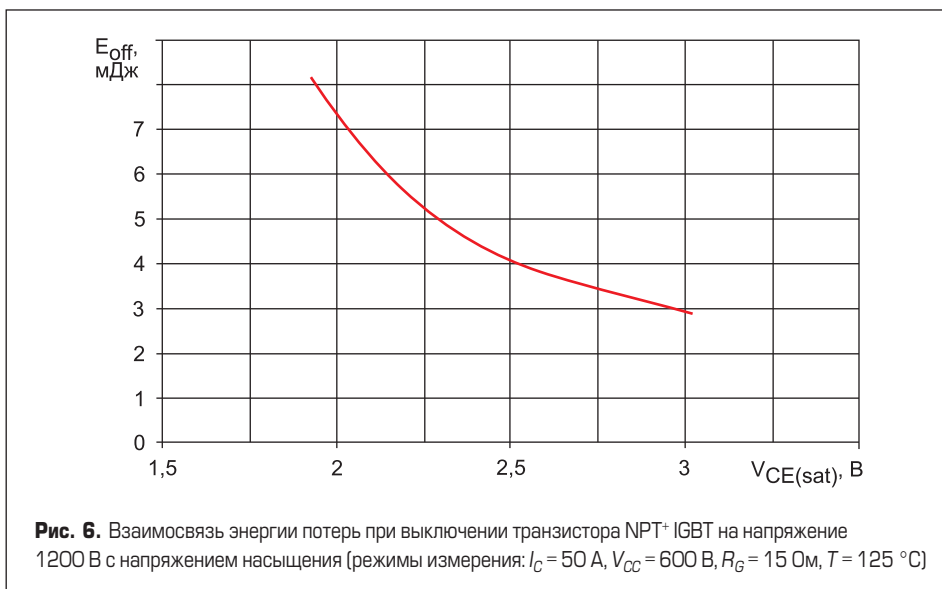
транзисторов $t_{d(off)}$ практически не изменяются после облучения электронами в исследуемом диапазоне доз облучения. Совершенно иначе ведет себя время спада тока коллектора t_f при выключении транзистора. Оно резко (почти в 3 раза) уменьшается с увеличением дозы облучения электронами с нуля до $5,3 \times 10^{13}$ см⁻².

Энергия потерь при переключении

Наибольший практический интерес представляет зависимость энергии потерь при переключении транзисторов от дозы облучения электронами. Энергия динамических потерь за один импульс рассчитывается как интеграл мгновенной мощности, определяемой из характеристик переключения транзистора путем перемножения кривых $i_C = f(t)$ и $v_{CE} = f(t)$:

$$E_{on} = \int_0^{t_{E_{on}}} v_{CE}(t) \times i_C(t) dt,$$

$$E_{off} = \int_0^{t_{E_{off}}} v_{CE}(t) \times i_C(t) dt,$$



где E_{on} , E_{off} — энергии потерь в IGBT соответственно при включении и выключении IGBT. Следовательно, полная энергия потерь при переключении транзистора:

$$E_{sw} = E_{on} + E_{off}$$

На рис. 5 представлены зависимости энергии потерь в одном кристалле транзистора NPT⁺ IGBT при коммутации тока коллектора 50 А от дозы электронного облучения.

На рис. 5 видно, что, как и временные параметры, энергия потерь при включении слабо зависит от дозы облучения электронами. При облучении IGBT электронами с максимальной дозой ($5,3 \times 10^{13}$ см⁻²) наблюдается небольшой рост E_{on} по сравнению с необлученными структурами (от 7 до 7,5 мДж). Энергия потерь выключения при той же максимальной дозе облучения электронами снижается почти в 3 раза, ставя транзистор NPT⁺ IGBT в ряд полупроводниковых приборов для высокочастотных применений.

По результатам измерений статических и динамических параметров до и после каждого этапа облучения электронами была построена кривая взаимосвязи (trade-off) между энергией потерь выключения и напряжением насыщения транзисторов NPT⁺ IGBT на напряжение 1200 В (рис. 6). Данная кривая полезна для оценки уровня технологии полупроводникового прибора и может быть использована для расчета суммарной мощности потерь в транзисторах при различных частотах коммутации.

Двойной ток, ток короткого замыкания

Испытания устойчивости к выключению двойного тока (RBSOA) и току короткого замыкания (SCSOA) были проведены в следующих режимах:

– RBSOA: $V_{CC} = 600$ В, $I_{C1} = 50$ А, $I_{C2} = 100$ А, $V_{GE ON} = +15$ В, $V_{GE OFF} = -15$ В, $R_G = 15$ Ом, $T = 125$ °С;

-SCSOA: $V_{CC} = 900 \text{ В}$, $V_{GEON} = +15 \text{ В}$,
 $V_{GEOFF} = -15 \text{ В}$, $R_G = 15 \text{ Ом}$, $t_p = 10 \text{ мкс}$,
 $T = 125 \text{ °С}$.

Испытания показали, что транзисторы NPT+ IGBT на напряжение 1200 В до и после облучения электронами с максимальной дозой успешно выдержали двойные токи и токи короткого замыкания с многократным повторением.

Расчет мощности потерь на высоких частотах

По результатам измерений статических и динамических параметров рассчитаны суммарные мощности потерь P_{TOT} при работе транзисторов на различных частотах вплоть до 40 кГц:

$$P_{TOT} = P_{DC} + P_{on} + P_{off}$$

$$P_{DC} = V_{CE(sat)} \times I_C \times D,$$

$$P_{on} = E_{on} \times f,$$

$$P_{off} = E_{off} \times f,$$

где: P_{DC} — мощность потерь в IGBT во включенном состоянии; P_{on} — мощность потерь при включении IGBT; P_{off} — мощность потерь при выключении IGBT; $D = 0,5$.

На рис. 7 приведено сравнение суммарных потерь в NPT+ IGBT на напряжение 1200 В в полумостовой схеме модуля при частоте переключения 25 кГц без облучения и после облучения транзисторов электронами. Как видно из рис. 7, полные потери на облученных высокочастотных транзисторах снижены на 28%, а динамические потери — на 40% по сравнению со стандартными IGBT (не облученными электронами).

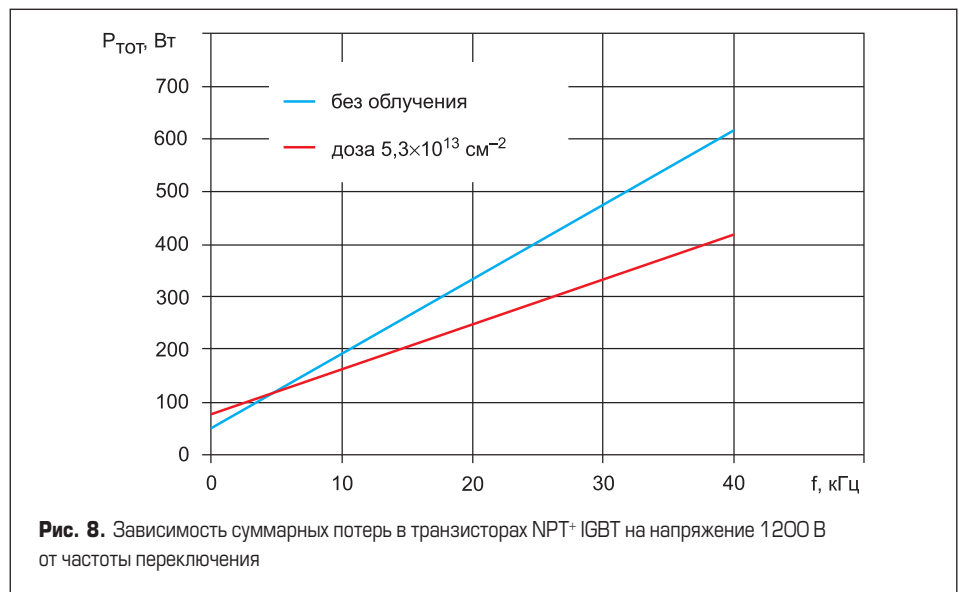
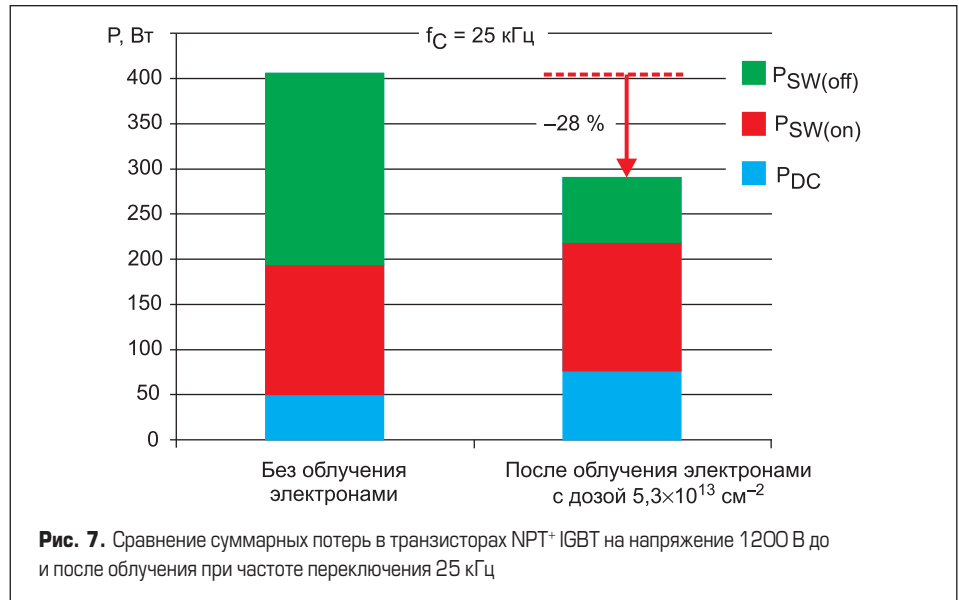
Зависимость суммарных потерь в транзисторах NPT+ IGBT на напряжение 1200 В от частоты переключения показана на рис. 8.

На рис. 8 видно, что суммарные потери частотных транзисторов (облученных электронами) меньше стандартных, если частота переключения выше 5 кГц. Таким образом, полученные с помощью электронного облучения частотные транзисторы NPT+ IGBT на напряжение 1200 В выгодно применять по сравнению со стандартными на частотах коммутации свыше 10 кГц, вплоть до 40 кГц. Подобные частоты имеют место в сварочном оборудовании, индукционном нагреве, источниках питания для медицинской аппаратуры, в преобразователях фотоэлектрической энергии и других применениях.

В результате проведенных исследований взаимосвязи электрических параметров и характеристик NPT+ IGBT и режимов электронного облучения ОАО «Электровыпрямитель» включило в свою производственную линейку

Таблица. Типы, номиналы напряжения и тока новых модулей

Тип	Напряжение, В	Ток, А	Схема	Размер основания, мм	
М2ТКИ-50-12АЧ	1200	50	полумост	34×94	
МДТКИ-50-12АЧ			чоппер		
МТКИД-50-12АЧ			чоппер		
М2ТКИ-100-12АЧ		100	полумост		62×106
МДТКИ-100-12АЧ			чоппер		
МТКИД-100-12АЧ			чоппер		



высокочастотные IGBT-модули с частотой переключения до 25 кГц и выше с использованием отечественных кристаллов NPT+ IGBT компании ОАО «Ангстрем». Типы, номиналы напряжения и тока новых модулей представлены в таблице.

Заключение

Разработаны отечественные IGBT-модули с пониженными динамическими потерями, пригодные для высокочастотных применений. Показано, что электронное облучение кристаллов NPT+ IGBT снижает динамические потери в модулях при переключении транзисторов с частотой 25 кГц на 40%, а суммарные потери на 28% по сравнению с обычными

транзисторами. Это позволяет создавать преобразовательное оборудование, работающее на высоких частотах, с меньшими размерами и высоким КПД.

Литература

- Siemieniec R. and Lutz J. Axial Lifetime Control by Radiation Induced Centers in Fast Recovery Diodes. ISPS/September 2002/Prague.
- Меркулова О. А., Мартыненко В. А., Чумаков Г. Д., Гришанин А. В. Оптимизация параметров мощного лавинного диода для работы в многофазных выпрямителях на средних частотах // Силовая электроника. 2012. № 4.
- Машевич П. Р., Мартыненко В. А., Мускатиньев В. Г., Бормотов А. Т., Тогаев М., Крицкая Т. Б., Ищенко Л. А. Исследование параметров и характеристик обогащено-планарных IGBT с малыми потерями на напряжение 1200 В // Силовая электроника. 2013. № 4.
- Rahimo M., Kopta A., Linder S. Novel Enhanced-Planar IGBT Technology Rated up to 6,5 kV for Power Losses and Higher SOA Capability. Proc. ISPSD, 2006, Naples, Italy, 33–36. 2006.