Мощные высоковольтные тиристоры для импульсных применений, производства ЗАО «Протон-Электротекс».

Черников А.А., Гончаренко В. П., Мизинцев А. В., Сурма А. М., Титушкин Д. А.
АО «Протон – Электротекс», ООО НИИЭФА ЭНЕРГО

Разработка полупроводниковых ключей, способных коммутировать короткие импульсы тока амплитудой от десятков до сотен килоампер, актуальна для развития импульсных источников питания мощной электрофизической аппаратуры. Импульсные тиристоры широко применяются в качестве таких ключей [1].

Заказчики предъявляют к мощным импульсным тиристорам ряд специфических технических требований [2-5], которым не может удовлетворить обычный серийный тиристор. К таким требованиям, в частности, относятся:

1. Коммутация импульсов тока со скоростью нарастания свыше 1000 А/мкс. Типичные требования – 2000 -10000 А/мкс.
2. Коммутация коротких импульсов тока высокой амплитуды. Отношение амплитуды тока в коммутируемом импульсе к величине среднего тока тиристора может достигать числа 100 и более.
3. Синхронное включение тиристоров в составе последовательной сборки при коммутации импульсов тока с высокой скоростью нарастания.

При коммутации импульсов со скоростью нарастания тока (di/dt) свыше 1000 А/мкс, возникают существенные затруднения, связанные с неодновременным включением тиристорного элемента по всей площади.

Кардинальным решением этой проблемы является использование тиристоров с ячеистой «многоэмиттерной» топологией, применяемой для Gate Turn-Off thyristors (GTO) и Integrated Gate Commutated Thyristors (IGCT) [6], т.к. вследствие малого поперечного размера каждой эмиттерной ячейки такой тиристор включается практически одновременно по всей площади. Однако, для такого прибора, значительная часть площади (50% и более) используется для размещения области управления (gate) и не участвует в проведении тока, что сильно снижает допустимую амплитуду импульса тока.

Другим решением является применение специального импульсного прибора Реверсивно Включаемого Динистора (РВД) [7]. Включение такого прибора также происходит по всей площади, что позволяет достигать наибольших на сегодняшний день для полупроводниковых ключей амплитуд импульсного тока [8]. Недостатком является весьма сложная аппаратура, необходимая для запуска РВД, по своей стоимости сопоставимая со стоимостью основного ключа.

Таким образом актуален поиск конструктивно-технологических решений, позволяющих увеличить допустимый импульсный ток «традиционного» импульсного тиристора. Ниже рассмотрен комплекс технических решений, позволивший создать импульсный тиристор, способный коммутировать импульсы тока с экстремально высокой амплитудой в важном для практических применений диапазоне длительности 100-1000 мкс.

Особенности конструкции и технологии изготовления

Полупроводниковые слои.

Низколегированная p-база. В полупроводниковом элементе реализована относительно низколегированная p-база (слоевое сопротивление под n-эмиттером 500-1000 Ом/квадрат). При этом диффузионные процессы ее формирования оптимизированы таким образом, чтобы получить максимальное «встроенное тянущее электрическое поле» в пределах этого слоя. Это позволяет минимизировать время пролета p-базы электронами, инжектированными из n-эмиттера и получить минимальные значения времени задержки включения. Следовательно, при каскадном включении (вспомогательный тиристор – основной

тиристор), становится минимальным время, когда ток проводит только вспомогательный тиристор, что существенно увеличивает di/dt – стойкость.

Соответственно, имеется возможность кардинально снизить разброс задержек включения тиристоров в последовательной сборке.

На рис. 1 приведена типичная зависимость времени задержки включения для экспериментального тиристора от значения исходного блокирующего напряжения.

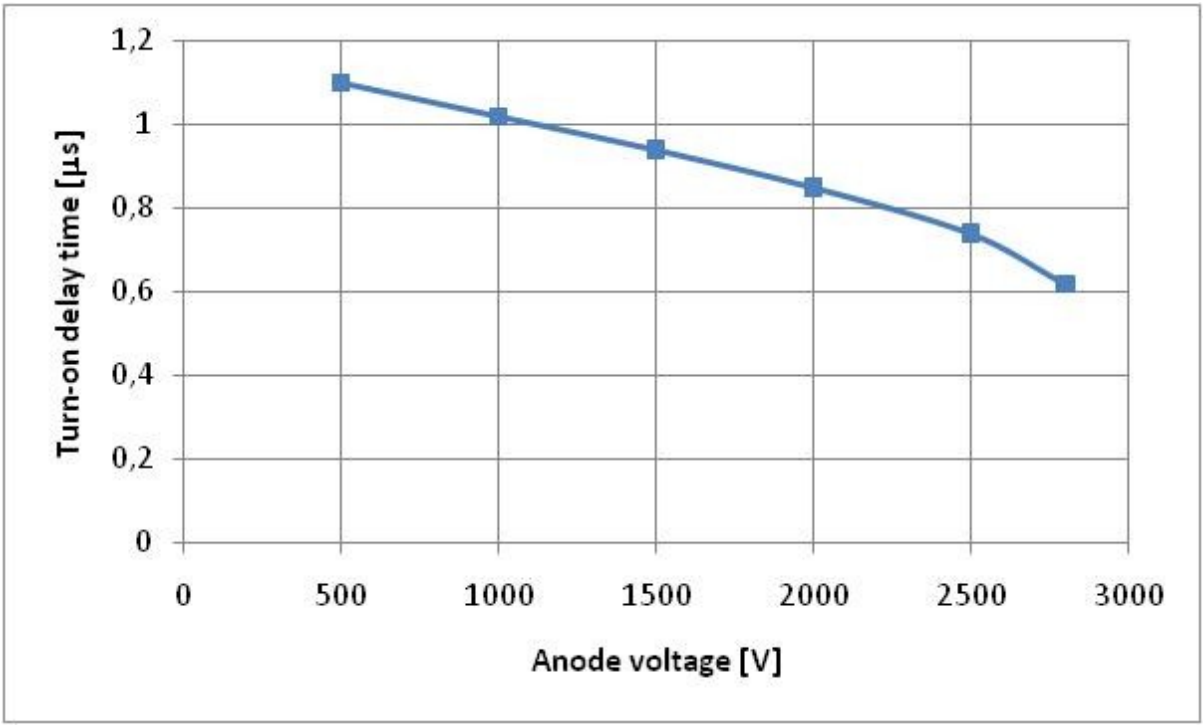


Рис. 1. Типичная зависимость времени задержки включения от анодного напряжения. Скорость нарастания тока управления 2А/мкс, скорость нарастания анодного тока 5000 А/мкс.

Видно, что время задержки включения не только мало по своей абсолютной величине, но, вдобавок, монотонно уменьшается при увеличении анодного напряжения, что объясняется уменьшением времени пролета носителей заряда через базовые слои тиристора при увеличении исходного анодного напряжения.

Такая зависимость времмени задержки включения приводит к «конвергенции» разброса времени включения при работе тиристоров в последовательном соединении. Разброс времен включения отдельных тиристоров в последовательной сборке приводит к перераспределению напряжений между тиристорами на начальном этапе включения: на тиристорах с меньшими значениями t_{don} анодное напряжение уменьшается, а на тиристорах с большими значениями t_{don} - увеличивается.

При этом, значения t_{don} при работе в последовательной сборке, в соответствии с зависимостью от напряжения (см. рис. 1) будут уменьшаться или увеличиваться, по сравнению со значением, измеренным на отдельных тиристорах. Таким образом, при работе тиристоров в последовательном соединении происходит некоторое сужение диапазона разброса значений задержек включения по сравнению с таковым, измеренным на отдельных тиристорах, составляющих сборку.

Исследования [9] показали, что, при типичной для импульсных тиристороров «Протон – Электротекс» «негативной» зависимости t_{don} от анодного напряжения, диапазон разброса значений t_{don} при работе в последовательном столбе сужается примерно в два раза.

P-эмиттер с контролируемой эффективностью.

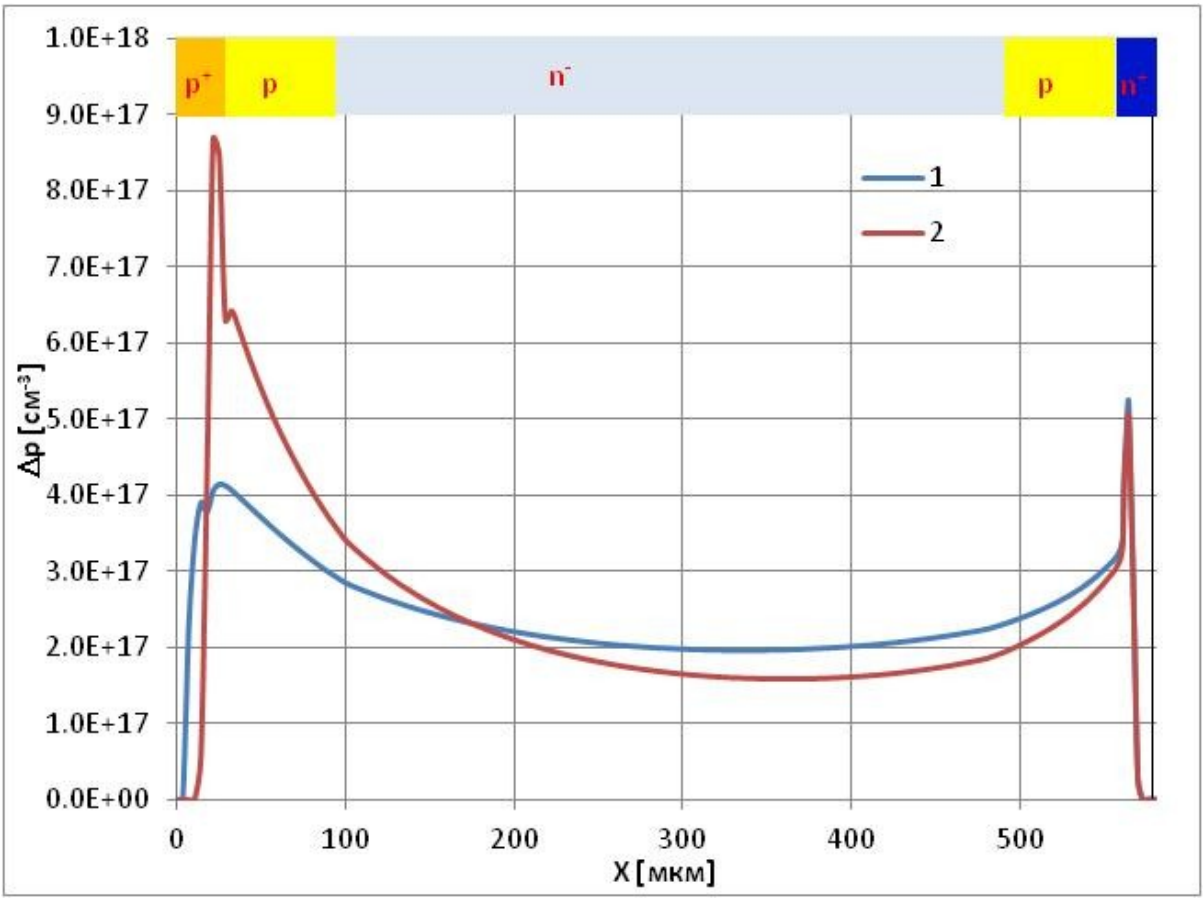
В полупроводниковом элементе «традиционного» силового тиристора обычно выдерживается отношение толщины n-базы (Wn) и значения амбиполярной

диффузионной длины электронно-дырочных пар в этом слое (L) не менее 3 (Wn/L>3). Это соотношение обусловлено необходимостью иметь вполне определенный (на уровне ~0.8 при высоком напряжении) коэффициент усиления по току p-n-p транзистора в составе четырехслойной тиристорной структуры для обеспечения требуемых значений блокирующих напряжений и du/dt – стойкости. При этом, однако, во включенном состоянии, распределение по толщине структуры концентрации избыточных электронно-дырочных пар существенно неоднородно, а, следовательно, неоднородно и распределение напряженности электрического поля (см. рис. 2).

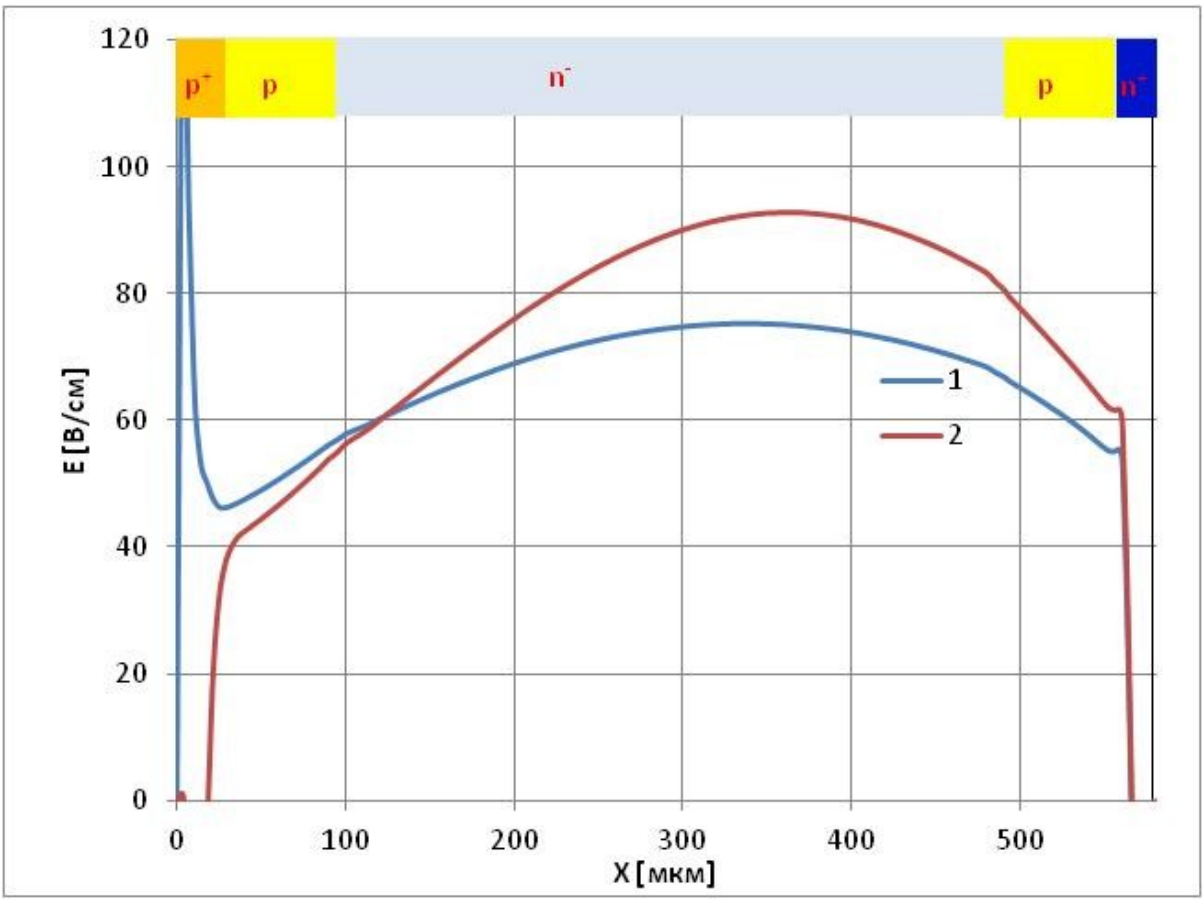
В импульсных тиристорах производства «Протон-Электротекс» для поддержания требуемого значения коэффициента усиления по току p-n-p транзистора применяется p-эмиттер специальной конструкции – так называемый полупрозрачный эмиттер (transparent emitter). Используемые диффузионные технологии его формирования вместе с низкотемпературной технологией формирования анодного омического контакта (синтеринг) позволяют с высокой степенью воспроизводимости регулировать его коэффициент инжекции и добиться его малого разброса по площади силовой полупроводниковой структуры. Применение p-эмиттера с контролируемой эффективностью позволяет уменьшить соотношение Wn/L до 1 и менее. В результате получаем более равномерное распределение напряженности электрического поля по толщине структуры (см. рис. 2).

Т.к. объемная плотность мощности потерь является произведением напряженности электрического поля на плотность тока, то для структуры с p-эмиттером контролируемой эффективности имеем меньшую локальную плотность мощности потерь (и плотность энергии потерь), чем для структуры традиционного тиристора при идентичном падении напряжения. Для коротких импульсов тока, когда процессы тепловыделения можно считать адиабатическими, это приводит к примерно на 20% меньшему локальному перегреву для структуры с p-эмиттером контролируемой эффективности.

Таким образом энергия, применение этого конструктивно-технологического решения позволяет в сравнении с «традиционным» тиристором, обладающим идентичной ВАХ во включенном состоянии, получить до 20% преимущества по допустимой энергии потерь при коммутации коротких импульсов тока с высокой амплитудой.



а).



б).

Рис. 2. Распределения концентрации избыточных электронно-дырочных пар (а) и напряженности электрического поля (б) по толщине кремниевой тиристорной структуры с эмиттером контролируемой эффективности (1) и структуре «традиционного тиристора» (2). Тиристорные структуры во включенном состоянии, проводят ток плотностью 2000 А/см^2, имеют при этом идентичное падение напряжения 5.0 В.

Топология

Управляющий электрод с высокой степенью разветвления, позволяет безопасно коммутировать импульсы тока с высокой скоростью нарастания и осуществлять быстрое включение тиристорной структуры по всей активной площади.

Применяемые топологии и достижимые импульсные характеристики приведены в Табл 1. Для тиристорных элементов каждого диаметра разработаны и применяются по два варианта топологии: с «максимальным» и с «оптимальным» разветвлением. Вариант с максимальным разветвлением предназначен для коммутации импульсов тока с наибольшей скоростью нарастания, однако из-за больших потерь площади на размещение управляющего электрода уступает второму варианту по допустимой амплитуте импульсов тока при длительности этих импульсов более 200…300 мкс. Вариант с «оптимальным» разветвлением оптимизирован для коммутации импульсов тока максимальной амплитуды при длительностях свыше 300 мкс. Эта топология рассчитана таким образом, чтобы при коммутации импульсов тока со скоростью нарастания 3-8 кА/мкс разброс плотности энергии потерь и температуры перегрева по площади полупроводниковой структуры был незначительным.

В качестве примера на рис. 3 приведены расчетные зависимости плотности тока от времени для точек тиристорной структуры, расположенных на разном удалении от границы разветвленного управляющего электрода, при коммутации импульса тока со скоростью нарастания 4,5 кА/мкс и амплитудой 250 кА. Зависимости приведены для тиристора 28 класса с диаметром элемента 100 мм.

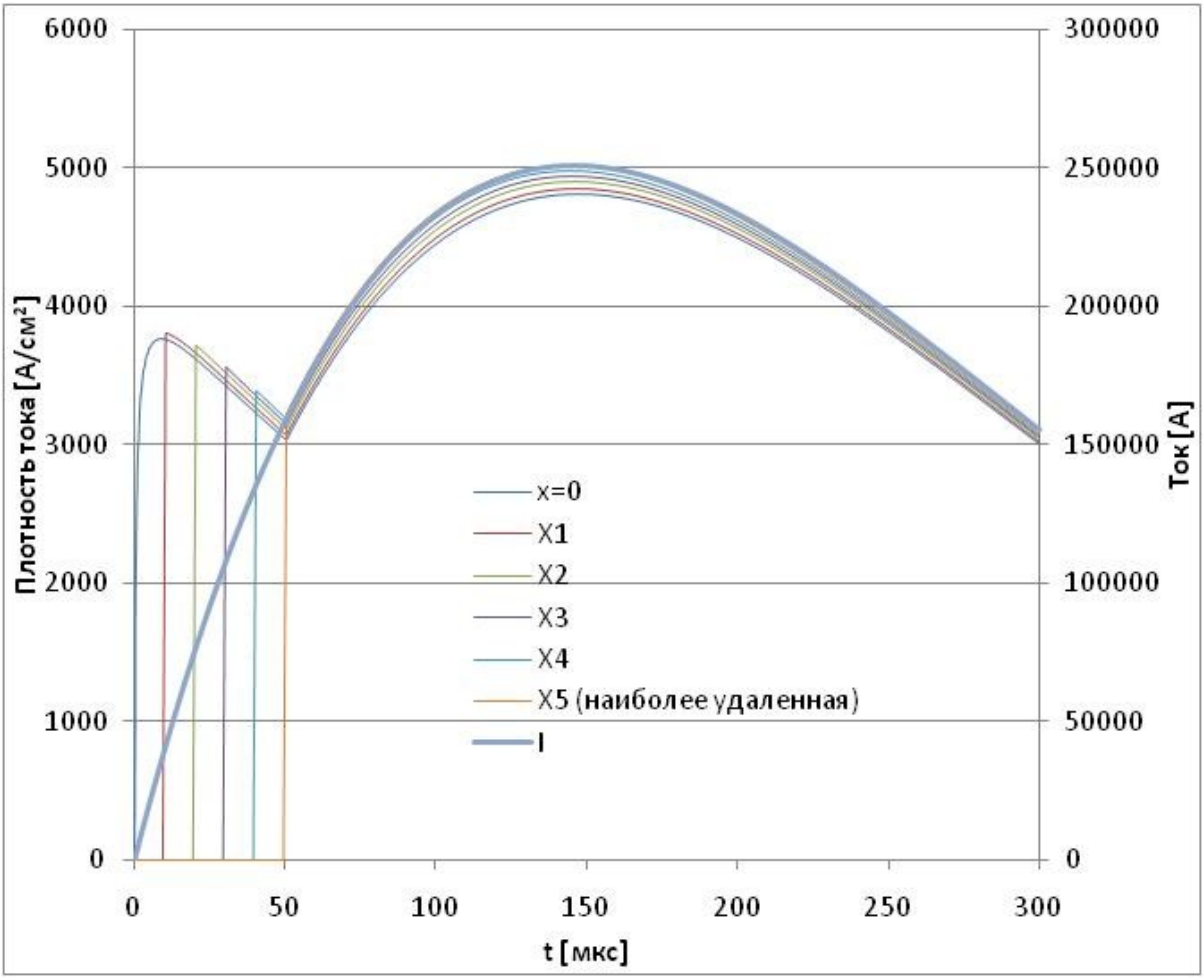


Рис. 3. Расчетные зависимости плотности тока от времени для точек тиристорной структуры, расположенных на разном удалении от границы разветвленного управляющего электрода, при коммутации импульса тока со скоростью нарастания 4.5 кА/мкс и амплитудой 250 кА. Тип тиристора: диаметр элемента 100 мм, U_{DRM}=U_{RRM}=2800В.

Из рисунка видно, что плотность тока в процессе распространения включенного состояния не превышает максимума, который соответствует максимальному значению анодного тока.

Зависимость от времени разности температур между наиболее нагретой (x=0) и наиболее холодной (удаленной от управляющего электрода X5) точками приведена на рис. 4. Видно, что максимальная разница температуры между горячей и холодной точками не превышает 18°С. Она достигается в момент времени полного включения всей площади полупроводниковой структуры и далее уменьшается с тесением времени. В момент достижения абсолютного максимума температуры (400 мкс) разница температуры снижается примерно до 10°С. При этом следует иметь в виду, что температура абсолютного максимума эквивалентной структуры, включающейся одновременно по всей площади (например РВД) будет лежать между температурами горячей и холодной точек тиристора.

Следовательно локальный перегрев тиристорной структуры относительно РВД в приведенном режиме не превысит 5-7°С.

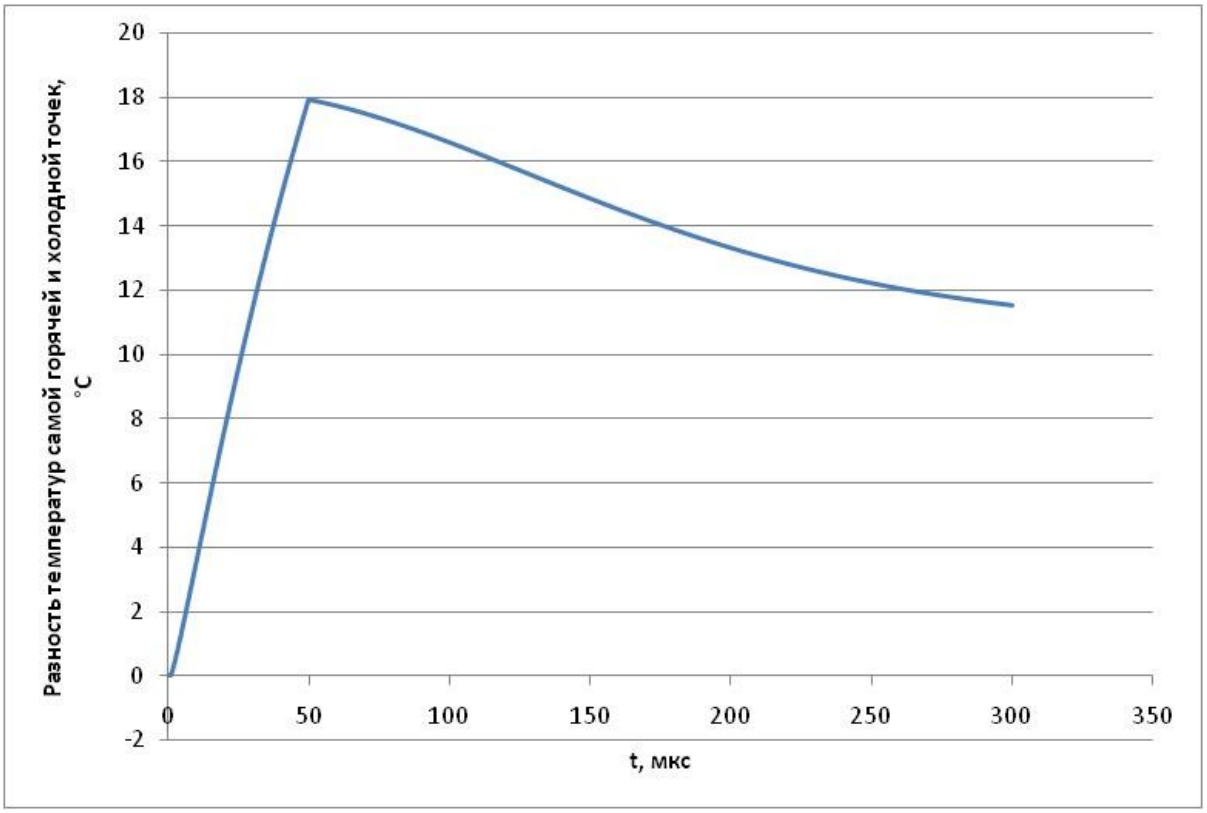


Рис.4. Зависимость от времени разности температур между наиболее нагретой (x=0) и наиболее холодной (удаленной от управляющего электрода X5) точками тиристорной структуры.

«Распределенный» вспомогательный тиристор. Конструкция современного тиристора с большой площадью кремниевого элемента как правило содержит разветвленный управляющий электрод (РУЭ) и вспомогательный (усилительный) тиристор (ВТ), катод которого соединен с РУЭ, а анод – общий с основной тиристорной структурой. Назначение ВТ – сформировать «усиленный» импульс тока управления, подающийся на РУЭ, который имеет значительную длину периметра. Обычно структура ВТ формируется в виде достаточно узкого кольца, шириной около 1 мм, окружающего основной управляющий электрод тиристора. Для функционирования тиристора в обычных режимах этого достаточно, т.к. после включения основного тиристора по периметру РУЭ происходит быстрый «перехват» анодного тока и ВТ либо отключается, либо плотность тока в нем снижается до «безопасных» пределов.

Однако, при коммутации импульсов тока со скоростью нарастания свыше 1000 А/мкс, как показали исследования, снижение плотности тока, протекающего через ВТ происходит достаточно медленно, а амлитуда тока может достигать значительных величин.

Чтобы «разгрузить» структуру ВТ, т.е уменьшить плотность протекающего через него тока, на импульсных тиристорах «Протон-Электротекс» применяется т.н. распределенный ВТ, представляющий из себя «полноценную тиристорную структуру, площадью около 0,5 кв.см для элементов диаметром 56 мм и около 1-2 кв. см. для элементов диаметром 80-100 мм (рис. 5). Исследования показали, что применение подобной структуры ВТ позволяет снизить локальный перегрев этой структуры до величины, меньшей, чем максимальный перегрев основной структуры.

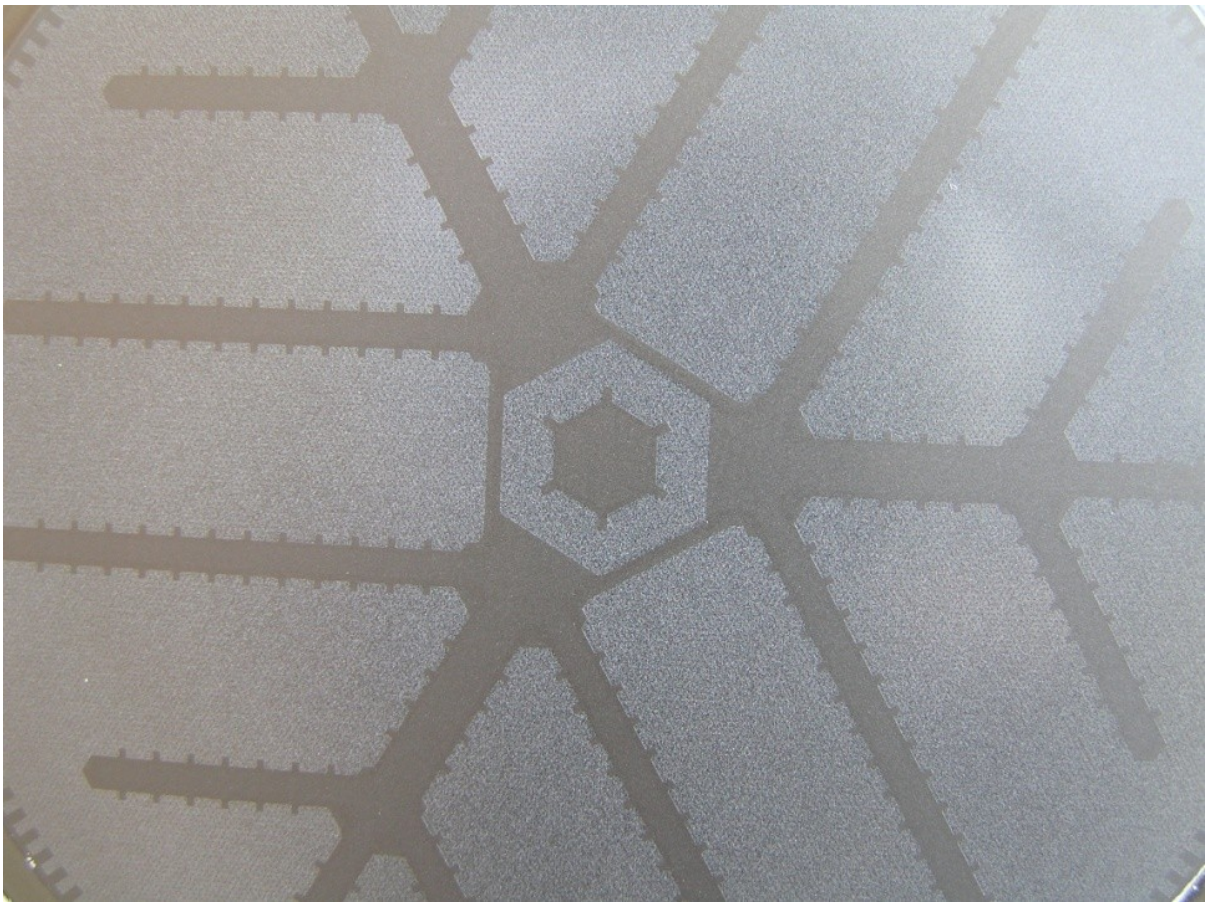


Рис.5. Кремниевый элемент импульсного тиристора с «распределенным» ВТ и «мелкой» катодной шунтировкой.

«Мелкая» катодная шунтировка. Применена распределенная катодная шунтировка n-эмиттера с размером элементарного шунта около 100 мкм. Типичная величина амбиполярной диффузионной длины электронно-дырочных пар в n-базе составляет около 400 мкм. Таким образом, применив такую шунтировку, удается получить равномерное распределение концентрации избыточных-электронно-дырочных пар без локальных «провалов» под местами расположения катодных шунтов и, следовательно, использовать всю активную площадь тиристорной структуры для проведения тока.

Контакты

Контакт анода полупроводниковой структуры с молибденовым диском-термокомпенсатором осуществляется с помощью технологии низкотемпературного спекания на слой мелкодисперсной серебряной пасты (синтеринг) [10]. Эта технология представляет собой процесс низкотемпературного (около 250С) спекания серебряной пасты практически в

монолитное серебро. В применении к импульсным тиристорам дает следующие преимущества.

- Процесс идет при 250С, а традиционно применяемый для соединения с молибденовым диском процесс сплавления (вакуумной пайки на силумин) – при около 700°С. Поэтому после синтеринга получаем в «пакете» кремний-молибден значительно меньшие остаточные деформации и внутренние механические напряжения. В результате – повышение ресурса по циклостойкости [11-12] (а для режимов коммутации токов с требуемой амплитудой это архиважно, т.к. пропускание каждого импульса тока сопровождается очень жестким термоциклом как раз для соединения кремний-молибден, т.к. кремний разогревается более, чем до 200°С, а молибденовый диск за исключением неглубокого слоя, прилегающего к кремнию, остается холодным.

- При традиционном процессе сплавления поверхностные слои кремниевой структуры растворяются силумином. При этом становится невозможным гарантировать идентичность свойств анодного эмиттера на площади структуры (даже в случае, если это традиционный не «полупрозрачный» р-эмиттер). В результате для традиционной технологии имеем повышенный разброс плотности тока по площади структуры. Технология синтеринга этот недостаток исключает [13].

- В традиционном процессе сплавления чрезвычайно сложно добиться равномерного остывания по всей площади структуры (особенно, если эта площадь большая). В результате, процесс кристаллизации силумина в соединительном шве начинается, обычно, с периферии и, затем распростаняется в направлении центра дискообразного пакета кремний-молибден. Это приводит к неравномерности толщины шва по диаметру, см. рис. 6.

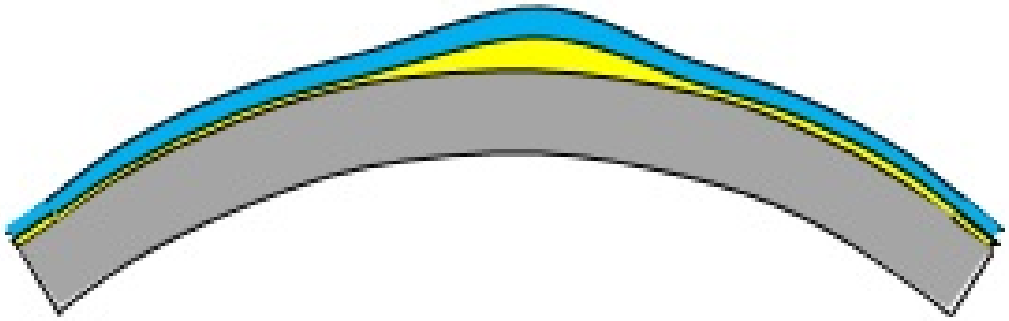


Рис. 6. Неравномерность толщины «сплавного» шва по диаметру, возникающая из-за неравномерного остывания при кристаллизации силумина

Наличие такой неоднородности толщины шва мало влияет на свойства анодного контакта, однако может серъезно ухудшить катодный (прижимной) контакт.

В технологии синтеринга высокая равномерность толщины шва гарантирована.

Прижимной катодный контакт.

Для обеспечения надежного прижимного катодного контакта применяется катодная прокладка из молибдена со специальным покрытием. Выбор сделан в результате длительных и объемных исследований разных вариантов материалов и покрытий. Применяемая прокладка обеспечивает высокую циклостойкость контакта, малое электрическое и тепловое сопротивление, отсутствие деградации при длительной эксплуатации, в том числе при коммутации большого числа (свыше 100000) импульсов тока высокой амплитуды. Рассмотренные выше конструктивно-технологические решения известны и, по отдельности, применяются для улучшения импульсных свойств тиристоров рядом фирм – производителей. Однако, только совокупность этих технических решений,

примененная с учетом современных технологических возможностей, позволила «Протон-Электротекс» организовать серийное производство импульсных тиристоров с уникальным набором характеристик. В качестве примера ниже приведены результаты испытаний экспериментального импульсного ключа на базе последовательной сборки тиристоров 28 класса с диаметром полупроводникового элемента 100 мм [14].

Экспериментальный ключ на импульсных тиристоразх.

Экспериментальные импульсные тиристоры, с повторяющимся импульсным блокирующим напряжением 2800В были изготовлены с применением описанных выше технических решений.

Тиристоры имели кремниевый элемент диаметром 100 мм, который изготавливался на пластинах нейтроннолегированного кремния с удельным сопротивлением 120 Ом*см, толщиной 580 мкм. Топология управляющего электрода показана в табл. 1 (п.5). Эта топология обеспечивает оптимальное время включения тиристора по всей площади при коммутации импульсов, близких по форме к полуволне синусоиды, длительностью 300-1000 мкс. При этом потери площади на размещение области управления минимизированы и составляют всего около 14%, активная площадь тиристорного элемента составляет около 55 $см^2$. Тиристоры имели таблеточную конструкцию корпуса.

Экспериментальный тиристорный ключ состоял из 10 тиристоров в последовательной сборке, рис 7., и вспомогательной сборке из встречнопараллельных диодов.

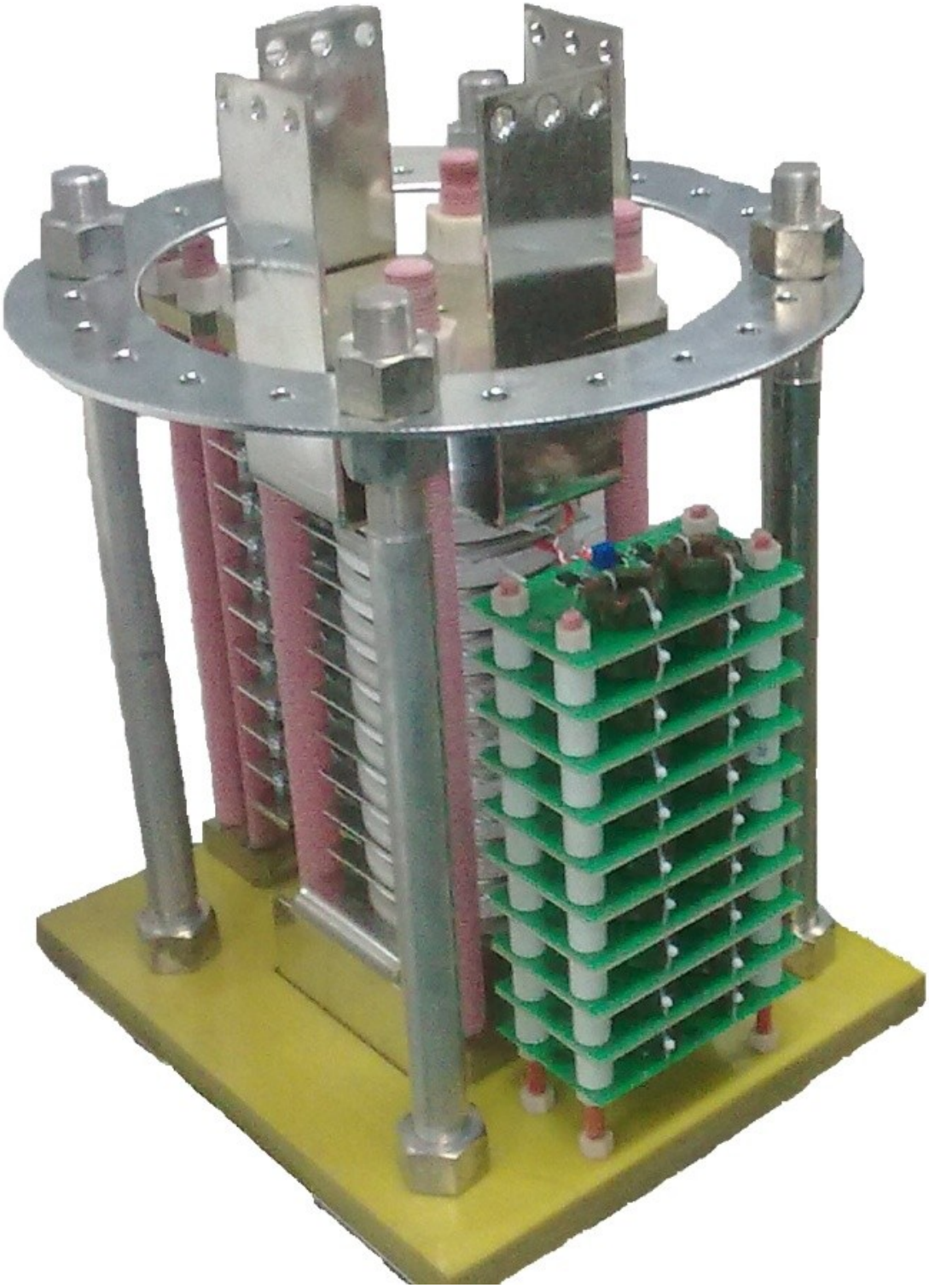


Рис. 7. Экспериментальный тиристорный ключ.

Испытания проводились в разрядном R-L-C контуре, рис. 8 при начальном напряжении на конденсаторах 24 кВ. Форма импульсов тока и напряжения при разряде показана на рис. 9. При испытаниях ключ устойчиво коммутирует импульсы тока с амплитудой до 250 кА и скоростью нарастания около 4.5 кА/мкс.

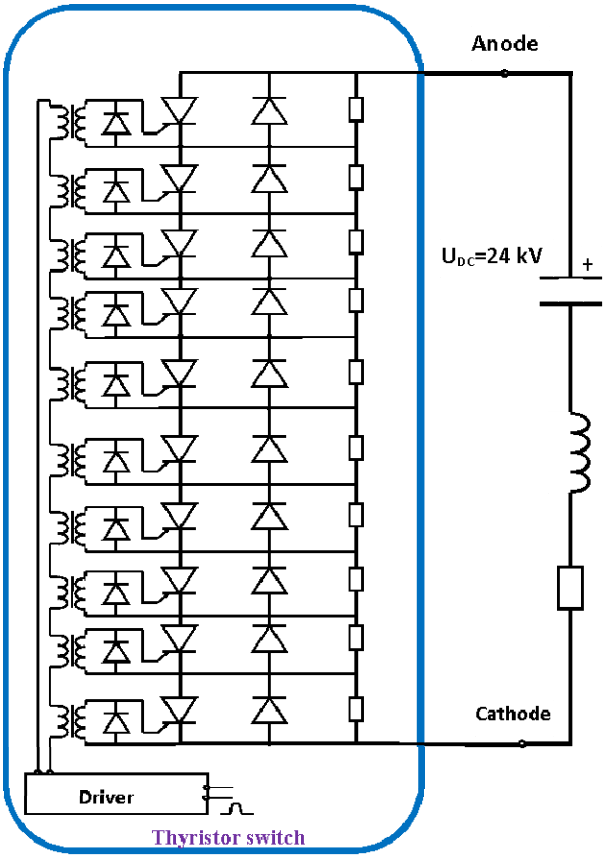


Рис. 8. Испытательный стенд с разрядным контуром.

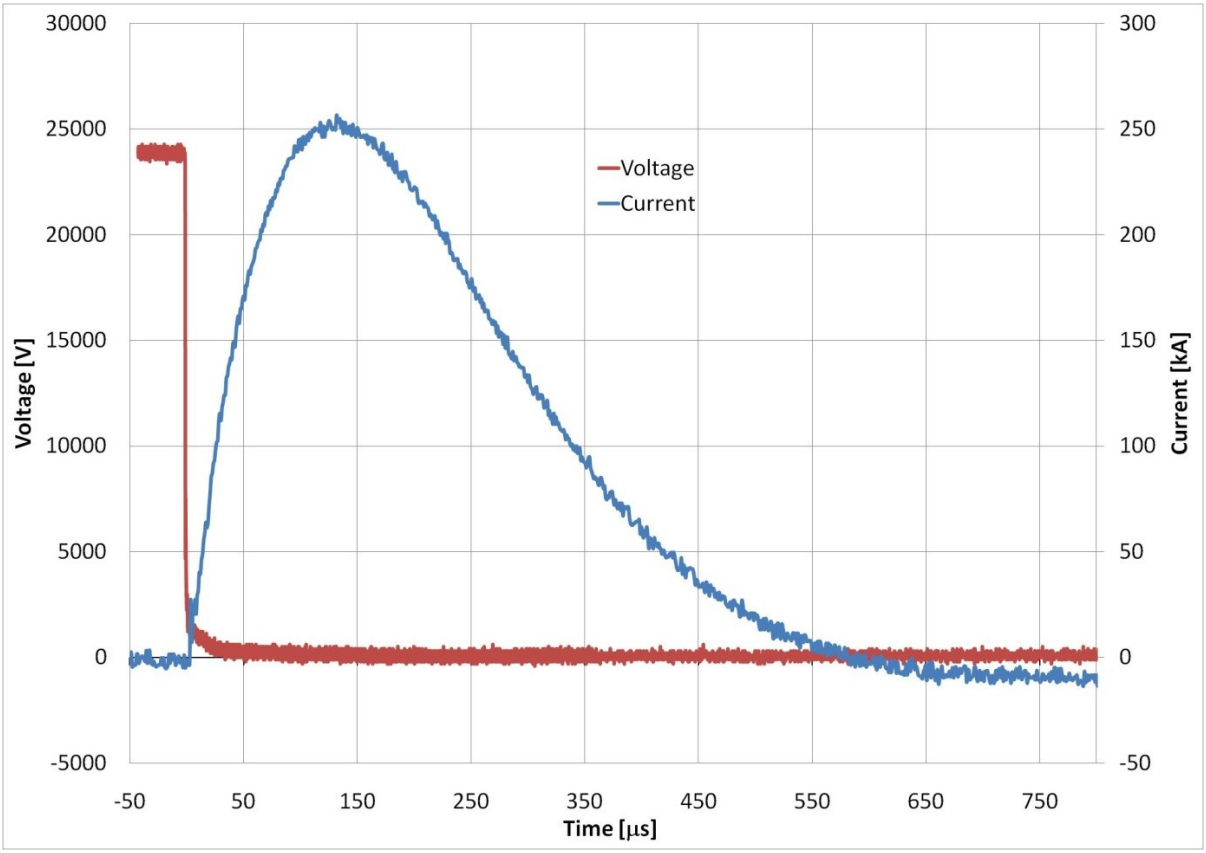


Рис. 9. Анодный ток и напряжение на тиристорном ключе.

Таблица 1

Топологии разветвленного управляющего электрода

№	Диам. эл-та, мм	Вид топологии	Допустимая di/dt, А/мкс	Тип. время полного включения, мкс	I^2t, A^2c
1	56		4000 (Трапециедальный импульс длительностью 100мкс по основанию, амплитуда 10 кА)	40…60	3,0E6 (UDRM=2800 В) 1,8E6 (UDRM=4400 В) Tj=25C, 10мс, полуволна синусоиды
2	56		6000 (Трапециедальный импульс длительностью 100мкс по основанию, амплитуда 10 кА)	20…30	2,3E6 (UDRM=2800 В) 1,4E6 (UDRM=4400 В) Tj=25C, 10мс, полуволна синусоиды
3	80		6000 (Трапециедальный импульс длительностью 100мкс по основанию, амплитуда 20 кА)	40…60	17,0E6 (UDRM=2800 В) 10,0E6 (UDRM=4400 В) Tj=25C, 10мс, полуволна синусоиды
4	80		10000 (Трапециедальный импульс длительностью 100мкс по основанию, амплитуда 20 кА)	20…30	10,0E6 (UDRM=2800 В) 6,0E6 (UDRM=4400 В) Tj=25C, 10мс, полуволна синусоиды

5	100		10000 (Трапециедальный импульс длительностью 100мкс по основанию, амплитуда 20 кА)	40…60	37,0E6 (UDRM=2800 В) 24,0E6 (UDRM=4400 В) Tj=25C, 10мс, полуволна синусоиды
6	100		15000 (Трапециедальный импульс длительностью 100мкс по основанию, амплитуда 20 кА)	20…30	26,0E6 (UDRM=2800 В) 16,0E6 (UDRM=4400 В) Tj=25C, 10мс, полуволна синусоиды

ЛИТЕРАТУРА

[1] M.E.Savage "Final Results From the High-Current, High-Action Closing Switch Test Program at Sandia National Laboratories", *IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 28, no. 5, pp. 1451-1455, Oct. 2000.*

[2] H. Singh and C. R. Hummer “High action thyristors for pulse power applications”, in *12th IEEE Pulse Power Conference*, June 1999.

[3] S. Ikeda and T. Araki, “ The di/dt capability of thyristors”, *Proc. IEEE, no. 8, pp. 1301-1305, 1967*.

[4] S.S. Asina, A.M. Surma, “A new design-technology technique for optimization of high power pulse thuristor characteristics”, in *ELECTRIMACS Conference*, Saint-Nazaire, Sept. 1996, pp. 485-490.

[5] W.H. Tobin, “Effect of gate configuration on thyristor plasma properties”, *in IEE IAS Conference Record, IEE IAS Annual Meeting, 1978.*

[6] Linder S., Klaka S. et al., "A New Range of Reverse Conducting Gate-Commutated Thyristors for High Voltage, Medium Power Applications", *in EPE'97 Conference, pp. 1.117 - 1.124. 1997*.

[7] A. V. Gorbatyuk, I. V. Grekhov, and A. V. Nalivkin, "Theory of quasidiode operation of reversely switched dinistors", *Solid-State Electron.*, vol. 31 , pp. 1483-1491, 1988.

[8] S A. Belyaev, V.G. Bezuglov et al., “New Generation of High – Power Semiconductor Closing Switches for Pulsed Power Applications” *in ICPIG Conference,* Prague, July 2007.

[9] Chernikov A. A., Goncharenko V. P., Mizintsev A. V., Surma A. M., Titushkin D. A., “Pulse thyristors adapted for synchronous switching-on in series connection during the commutation of current with high rate of rise” *in EPE ECCE Conference*, Warsaw, September 2017.

[10] H. Schwarzbauer, “Novel Large Area Joining Technique for Improved Power Device Performance”, *IEEE Transactions on Industrial Applications*, 27 (1), 1991, p. 93- 95.

[11] Amro R.; Lutz J. et al. “Power Cycling at High Temperature Swings of Modules with Low Temperature Joining Technique*”, in ISPSD Conference,*Naples, 2006.

[12] C. Göbl, P. Beckedahl, H. Braml, “Low temperature sinter technology Die attachment for automotive power electronic applications” in *Automotive Power Electronics Conference*, Paris, June 2006, pp. 2-5.

[13] D. Titushkin, A. Surma, “New ways to produce fast power thyristors”, *Bodo’s Power Systems* 08, 2015, p. 28- 29.
[14] Chernikov A. A., Goncharenko V. P., Mizintsev A. V., Surma A. M., Titushkin D. A., “Thyristors for commutation of current impulse with extremely high amplitude” *in APEC Conference*, Tampa, March 2017.