

# Причины отказов силовых тиристоров в режимах включения

## С ВЫСОКИМИ ЗНАЧЕНИЯМИ скорости нарастания тока в ОТКРЫТОМ СОСТОЯНИИ

**Надежность силовых тиристоров (СТ), используемых в режимах включения с повышенными значениями скорости нарастания тока в открытом состоянии  $di_T/dt$ , во многом определяется электрическими и термическими процессами, происходящими в области первоначального включения (ОПВ). Статистика показывает, что около 50% всех отказов СТ в электрических преобразователях вызваны термически активируемыми эрозионными процессами в области управляющего электрода (УЭ). Знание этих процессов и причин их возникновения позволяет выявить потенциально ненадежные приборы и определить предельно допустимые режимы эксплуатации СТ, при которых достигаются требуемые значения показателей надежности.**

**Николай Беспалов,  
к. т. н.**

oxbos@yandex.ru

### Особенности процесса включения СТ

Включение СТ импульсом тока управления осуществляется в ОПВ, которая формируется вдоль границы раздела управляющего  $p$ - $n$  перехода полупроводниковой структуры (ПС) СТ. Площадь ОПВ много меньше активной площади ПС, а радиальная скорость распространения включенного состояния не превышает величину 0,1 мм/мкс, поэтому на этапе включения при протекании тока в открытом состоянии  $i_T$  с высокой скоростью нарастания  $di_T/dt$  в ОПВ возникают повышенные электрические потери. Этот эффект обуславливает возникновение в ОПВ ПС различных термически активируемых деградационных процессов, развитие которых при определенных условиях приводит к существенному изменению параметров СТ при эксплуатации и обуславливает возможность их отказов.

Основным путем снижения перегрева ПС СТ при включении является увеличение площади первоначального включения (ППВ) СТ. Конструктивные размеры периметра управляющего  $p$ - $n$  перехода  $P_{pn}$  определяют величину ППВ ( $S_0$ ), которую можно приближенно оценить по формуле  $S_0 = P_{pn} X_0$ , где  $X_0$  — ширина ОПВ. При соответствующем выборе оптимальных значений параметров импульсов тока управления возможно достижение максимальной ППВ. Однако в ходе изготовления ПС в области УЭ возникают различного рода неконтролируемые технологические дефекты ПС и металлизации УЭ и катода, которые усугубляют неоднородность процесса включения. Это приводит к существенному уменьшению и разбросу величин ППВ СТ одного типа относительно теоретической максимально возможной величины, которая устанавливается на этапе проектирования прибора и, соответственно, к увеличению электрических потерь в ОПВ, при прочих равных внешних условиях включения СТ. Так, на-

пример, экспериментальные оценки величин ППВ для широко применяемых силовых тиристоров T454-800 показывают их возможный разброс от 1 мм<sup>2</sup> до 8 мм<sup>2</sup>. Это обуславливает вариацию предельных величин параметров внешнего электрического режима включения, например критической скорости нарастания тока в открытом состоянии  $(di_T/dt)_{crit}$  УЭ СТ одного типа.

Отсутствие объективной информации о параметрах ОПВ серийных СТ не позволяет оценить и предельный параметр  $(di_T/dt)_{crit}$  СТ одного типа с учетом вариации дефектности приборов в области УЭ. Это обстоятельство обуславливает различный ресурс СТ одного типа при эксплуатации в режимах с повышенными значениями  $di_T/dt$ .

Размеры ОПВ конкретных СТ одного типа зависят также и от величин параметров импульсов тока управления: амплитуды  $I_{GM}$ , скорости  $di_C/dt$  нарастания и длительности  $\tau_u$ , а также от напряжения на СТ в закрытом состоянии  $U_{DM}$  перед включением. Необходимо особо отметить, что технологические нарушения и дефекты ПС и металлизации в области УЭ определяют и величины параметров вольтамперной характеристики (ВАХ) УЭ СТ. Это существенно влияет на процесс формирования тока в цепи УЭ при подаче импульсов с выходных каскадов систем управления преобразователей, выполняемых обычно по схеме источника напряжения.

Поскольку величина критической скорости нарастания тока  $(di_T/dt)_{crit}$  в открытом состоянии является важнейшим предельным параметром СТ, представляет интерес рассмотрение причин, приводящих к разрушению СТ при повышенной скорости нарастания тока  $di_T/dt$ .

На рис. 1 в разрезе показана упрощенная конструкция  $p$ - $n$ - $p$ - $n$  структуры СТ в области УЭ и распределение токов по структуре при включении на этапе нарастания тока. Обычно длина  $L_n$  свободного но-

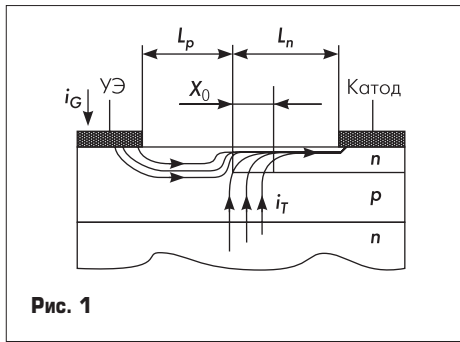


Рис. 1

от метализации участка  $n$ -эмиттера больше ширины  $X_0$  ОПВ, поэтому ток в открытом состоянии  $i_T$  и управляющий ток  $i_G$  на этапе включения протекают через включенный участок в виде тангенциального поверхностного тока вдоль свободного от метализации участка  $L_n$   $n$ -эмиттера. Это обусловлено и характером распределения концентраций легирующих примесей в  $n$ -эмиттере, которое описывается функцией Гаусса. Ввиду того, что исходная концентрация примеси на поверхности полупроводника в области участка  $L_n$   $n$ -эмиттера выше, чем вблизи  $p$ - $n$  управляющего перехода, протекание тангенциального тока дополнительно локализуется в приповерхностном слое участка  $L_n$   $n$ -эмиттера. Дополнительным фактором локализации токов на этапе нарастания является протекание высокочастотных гармонических составляющих этих токов по поверхности свободного от метализации участка  $n$ -эмиттера. Эти факторы приводят к концентрированию выделения энергии потерь в приповерхностном объеме свободного от метализации  $n$ -эмиттера.

При отсутствии технологических нарушений («идеальное» исполнение) в конструкции  $p$ - $n$ - $p$ - $n$  структуры СТ в области УЭ должно наблюдаться равномерное распределение плотности поверхностного тангенциального тока на этапе включения (рис. 2а), что обеспечивает равномерность ширины  $X_0$  ОПВ вдоль периметра управляющего  $p$ - $n$  перехода. На практике же одним из часто встречающихся технологических нарушений конструкции УЭ является сдвиг  $R_0$  метализации УЭ и катода относительно управляющего  $p$ - $n$  перехода (рис. 2б). Другим нарушением является неравномерность формирования управляющего  $p$ - $n$  перехода вдоль УЭ и метализации. Эти технологические нарушения приводят к неравномерности распределения плотности поверхностного тангенциального тока  $i_T$ , что существенно усугубляет локальность тепловыделения в приповерхностных участках  $n$ -эмиттера СТ при включении.

### Процесс эрозии кремния и причины разрушения тиристорной структуры

Под процессом эрозии кремния понимается плавление и выброс расплава кремния на свободном от метализации участке  $n$ -эмиттера СТ, вызванные концентрированным выделением энергии потерь в приповерхностном объеме  $n$ -эмиттера, свободного от метализации при протекании вдоль него тангенциального тока  $i_T$  до момента времени достижения

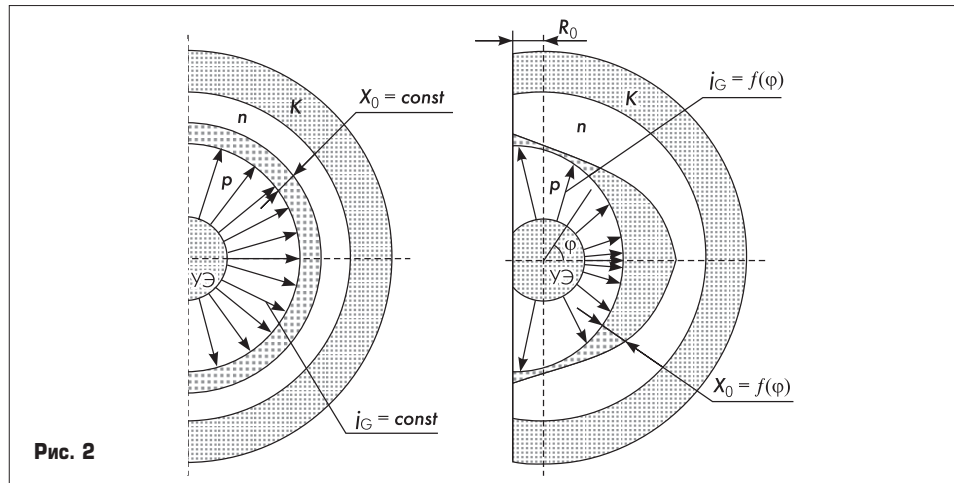


Рис. 2

включенного состояния границы катодной метализации.

Понятно, что причиной эрозии является ток  $i_T$ , возрастающий при включении с определенной скоростью. Обычно разработчики преобразователей на основе СТ, зная об «эффекте  $di/dt$ », специальными реакторами ограничивают скорость нарастания составляющей тока, протекающей в нагрузке. Для устранения возможности включения СТ от другого эффекта — « $du/dt$ », СТ традиционно шунтируются демпфирующими RC-цепями. При включении СТ емкости этих цепей через токоограничивающие резисторы разряжаются в их ОПВ. В результате этого при работе в преобразователе через СТ на этапе включения протекает два тока — ток нагрузки, скорость нарастания которого ограничена реактором, и разрядный ток емкости демпфирующей цепи, скорость нарастания которого ограничена только паразитной индуктивностью разрядной цепи. Таким образом, скорость нарастания общего тока через СТ может существенно превышать предельно допустимую величину  $(di_T/dt)_{crit}$ . Кратковременное протекание этого общего тока на этапе включения СТ вызывает выделение в приповерхностном слое свободного от метализации  $n$ -эмиттера энергию потерь и при определенных условиях эрозию кремния в ОПВ.

Так как глубина протекания тангенциального тока  $i_T$  по поверхности  $n$ -эмиттера невелика, то расплавляются и разрушаются вначале только поверхностные участки. При этом образуются характерные эрозионные каналы, образующиеся вдоль свободных от метализации участков  $n$ -эмиттеров. На рис. 3 представлена фотография области УЭ СТ типа Т453-800 с характерными эрозионными каналами. Визуально этот процесс сопровождается образованием искр и углублением каналов в области УЭ с течением времени. При этом наблюдается увеличение одного из параметров критерия годности СТ — отпирающего тока управления  $I_{CT}$ . При достижении эрозионными каналами глубины зоны запирающего слоя второго  $p$ - $n$  перехода тиристорной структуры начинает увеличиваться ток в закрытом состоянии  $I_{DR}$  и снижаться напряжение переключения  $U_{BR}$ , что уменьшает повторяющееся импульсное напряжение в закрытом состоянии  $U_{DRM}$ , величина которого определяет класс прибора по напряжению. Пробой структуры в области УЭ, вызывающий ката-

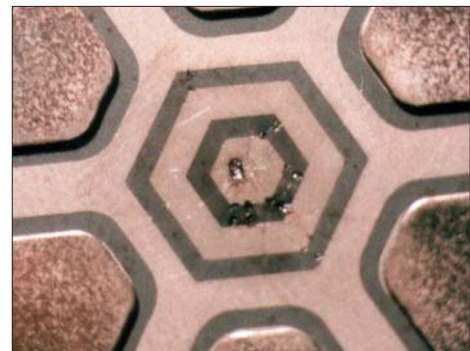


Рис. 3



Рис. 4

строфический отказ СТ, возникает при снижении  $U_{BR}$  до максимальной величины напряжения, прикладываемого к СТ в закрытом состоянии при работе в преобразователе. Этот процесс, в зависимости от условий включения, может длиться от нескольких минут до нескольких месяцев и даже лет, эксплуатации СТ. На рис. 4 представлены фотографии СТ серии Т143-630, отказавших в результате описанного выше эффекта.

### Заключение

Для снижения вероятности возникновения такого рода отказов СТ в преобразователях требуется решение следующего комплекса задач.

#### Этапы проектирования и модернизации преобразователей

На этих этапах работ необходимо применить в системах управления выходные каскады, которые способны формировать импульсы тока управления с амплитудой не менее 1 А и скоростью нарастания не менее 1 А/мкс вне зависимости от изменения параметров соединительных линий и ВАХ УЭ. Это обеспечивает формирование максимально возможных величин ППВ всех современных СТ, что снижает потери электрической энергии в их структурах при включении. Для решения этой задачи, например, Научно-инженерный центр

«Электронное приборостроение» Мордовского государственного университета разработал выходные трансформаторные каскады на основе управляемых однотактных или двухтактных импульсных источников тока, которые обеспечивают требуемые значения параметров тока управления любых современных СТ для их надежного включения.

Для ограничения энергии потерь в ОПВ СТ следует принять дополнительные меры, которые предусматривают ограничение скорости нарастания разрядных токов емкостей демпфирующих RC-цепей. Например, в эти цепи нами предлагается включать последовательно реакторы с необходимыми значениями индуктивности.

#### **Этап входного контроля СТ**

На этом этапе работ требуется проведение отбраковки потенциально ненадежных СТ с аномально низкими значениями ППВ. Для решения этой задачи нами предлагается методика и аппаратура для определения ППВ по параметрам переходного процесса включения, определяемым в специальном тестовом режиме.

Реализация этих мер может существенно повысить вероятность безотказной работы СТ в преобразователях.

#### **Литература**

1. Бардин В. М. Надежность силовых полупроводниковых приборов. М.: Энергия, 1978. 96 с.
2. Грехов И. В. Физические процессы в мощных кремниевых приборах с р-п переходами: Автореф. дис. ... докт. физ.-мат. наук. — Л.: ЛФТИ. 1972. 36 с.
3. Плоткина Н. З., Цзин Ю. Д. Испытания силовых тиристорных на  $di/dt$ -стойкость // Труды НИИПТ. Л.: Энергоиздат. 1981. С. 68–74.
4. Дерменжи П. Г., Кузьмин В. А., Крюкова Н. Н., Мамонов В. И., Павлик В. Я. Расчет силовых полупроводниковых приборов. / Под ред. В. А. Кузьмина М.: Энергия. 1980. 184 с.
5. Беспалов Н. Н., Гейфман Е. М. Экспериментальное исследование площади начального включения и потерь в тиристорах при включении по цепи управления // Электротехника. 1995. № 1. С. 48–51.
6. Беспалов Н. Н., Гейфман Е. М. Метод и аппаратура для неразрушающего определения  $di/dt$ -стойкости силовых тиристорных // Актуальные проблемы электронного приборостроения: Труды IV Межд. конф. Новосибирск: Изд-во НГТУ. 1998. Т. 7. С. 39–40.