

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ОБЛАСТИ ПЕРВОНАЧАЛЬНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ СИЛОВЫХ ТИРИСТОРОВ

Беспалов Николай Николаевич, Зинин Сергей Алексеевич
ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева»
Российская Федерация, г. Саранск,
E-mail: ka-mgu@mail.ru, тел. +7(834-2) 24-37-05,
430005, г. Саранск, ул. Богдана Хмельницкого, д. 39, каб. 526

Аннотация. В данной статье рассматриваются результаты исследования тепловых процессов в области первоначального включения силовых тиристорov в режимах с высокой скоростью нарастания тока в открытом состоянии.

Ключевые понятия: электрический преобразователь; силовой тиристор; область первоначального включения; скорость нарастания тока; эрозионные процессы; потенциально ненадежные приборы; надежность.

I. ВВЕДЕНИЕ

Надежность силовых тиристорov (СТ), использующихся 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.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

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 деградиационных процессов, развитие которых при определенных условиях приводит к существенному изменению параметров СТ при эксплуатации и обуславливает возможность их отказов.

III. ТЕОРИЯ

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 от металлизации 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 металлизации участка L_n n -эмиттера.

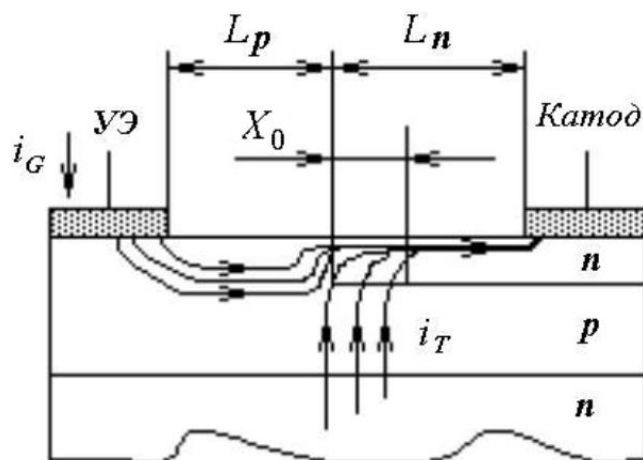


Рис. 1. Разрез структуры СТ в области УЭ.

Технологические дефекты структуры СТ приводят к неравномерности распределения плотности поверхностного тангенциального тока i_T , что существенно усугубляет локальность тепловыделения в приповерхностных участках n -эмиттера СТ при включении. При высоких значениях скорости нарастания тока di_T/dt на этапе включения СТ это вызывает мгновенный перегрев этого участка n -эмиттера до температуры, достигающей или превышающей температуру плавления кремния или эвтектики кремния с материалом катодного контакта, что обуславливает протекание процесса эрозии кремния – плавления и выброса расплава кремния на свободном от металлизации участке n -эмиттера СТ, вызванные концентрированным выделением энергии потерь в приповерхностном объеме n -эмиттера свободного от металлизации при протекании вдоль него тангенциального тока i_T до момента времени, когда включенное состояние ОПВ достигает границы катодной металлизации.

Причиной эрозии кремния является тангенциальный ток i_T , протекающий через свободный от металлизации участок n -эмиттера, 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 металлизации 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 металлизации участков n -эмиттеров.

Глубина протекания тангенциального тока i_T по поверхности n -эмиттера невелика, поэтому его протекание при определённых условиях вызывает расплавление и разрушение кремния на поверхностных участках на начальном этапе эксплуатации (интервал времени, обозначенный условно t_1) При этом образуются характерные эрозионные каналы, образующиеся вдоль свободных от металлизации участков n -эмиттеров (рис. 2).

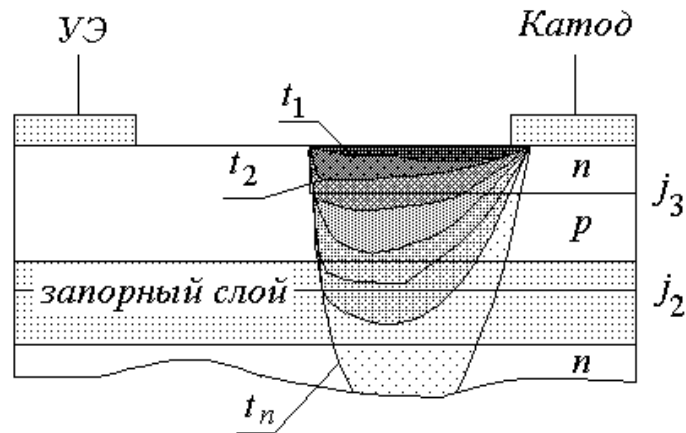


Рис. 2. Динамика углубления эрозионного канала в ОПВ СТ во времени.

Визуально этот процесс сопровождается образованием искр и углублением каналов в области УЭ с течением времени ($t > t_1$). При этом наблюдается увеличение одного из параметров критерия годности СТ – отпирающего тока управления I_{GT} . При достижении глубины эрозионных каналов зоны запирающего слоя второго $p-n$ перехода (j_2) тиристорной структуры (t_2) начинает увеличиваться ток в закрытом состоянии I_{DR} и снижаться напряжение переключения U_{BR} и, соответственно, повторяющееся импульсное напряжение в закрытом состоянии U_{DRM} , величина которого определяет класс прибора по напряжению. При достижении напряжения переключения U_{BR} напряжения, прикладываемого к СТ в закрытом состоянии в преобразователе, (t_n) возникает пробой структуры в области УЭ, вызывающий катастрофический отказ СТ. На рис. 3 представлена фотография области УЭ СТ типа Т143–630 с характерными эрозионными каналами.



Рис. 3. Фотографии отказавших СТ типа Т143–630 с характерными проплавлениями ПС в области УЭ.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

С целью оценки распределения температуры по структуре тиристора в режимах включения, характеризующихся высокими значениями скорости нарастания тока в открытом состоянии (di_T/dt), было проведено моделирование тепловых процессов при включении СТ в режиме емкостной коммутации в системе автоматического проектирования (САПР) T-CAD 7. Для этого средствами программы были созданы физико-топологическая модель полупроводниковой структуры СТ и электрическая модель процесса включения СТ.

На рис. 4 представлена электрическая модель процесса включения СТ Т453-800 при воздействии демпфирующей RC -цепи:

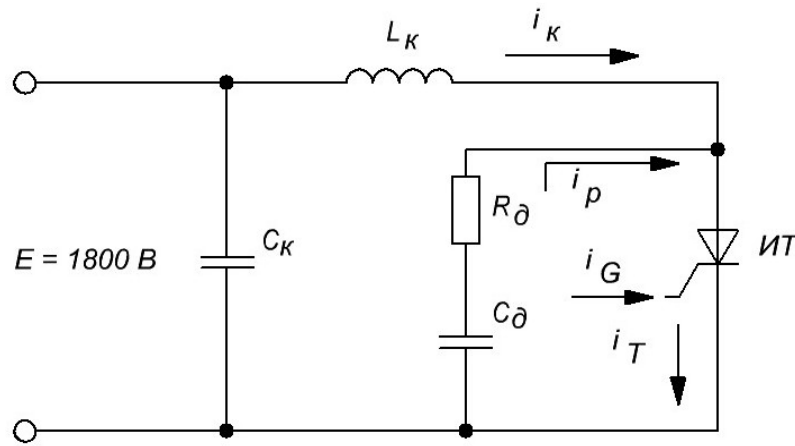


Рис. 4. Электрическая модель процесса включения СТ Т453-800.

Моделирование проводилось при следующих значениях параметров электрического режима включения: $U_{DM} = 1800$ В; $di_T/dt \approx 30$ А/мкс; $I_{GM} = 1$ А; $di_G/dt = 1$ А/мкс. Моделирование осуществлялось при подключенном демпфирующем RC -контуре. Величина демпфирующего конденсатора выбрано равным $C_d = 0,25$ мкф, а сопротивление демпфирующего резистора – $R_d = 10$ Ом. Моделирование осуществлялось при однократном включении СТ в указанном режиме.

В результате термодинамического моделирования в САПР T-CAD 7 получено двумерное распределение температуры внутри ПС СТ типа Т453-800 при заданном режиме включения, которое представлено на рис. 5.

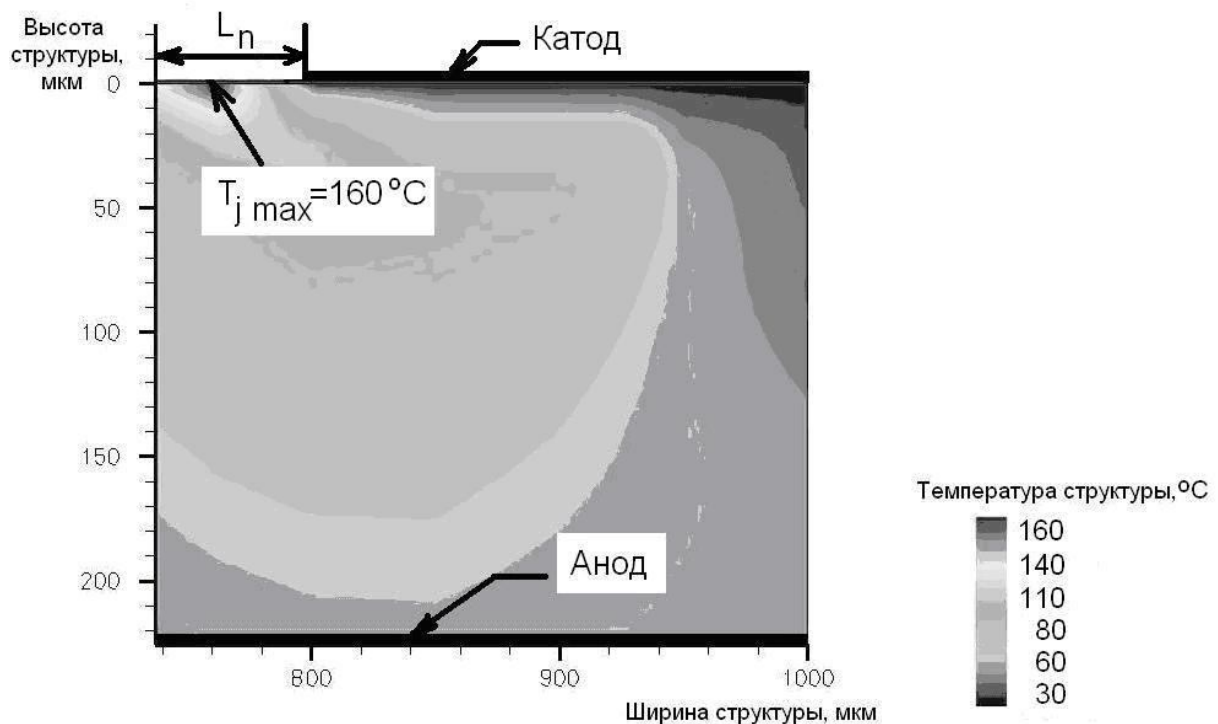


Рис. 5. Распределение температуры по структуре СТ Т453-800.

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из рис. 5 видно, что наибольший перегрев ПС в ОПВ СТ при его однократном включении в заданном режиме с учётом влияния снабберной RC -цепи при заданном электрическом режиме включения СТ с максимальной температурой $T_{j\max} = 160$ °С наблюдается в поверхностном слое свободного от катодной металлизации участка n -эмиттера. При этом во всём остальном объеме ПС СТ температура T_j существенно меньше.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, результаты моделирования подтверждают наше предположение о том, что наиболее вероятной причиной возникновения эрозионных процессов в ПС СТ при включении является возникновение локальных перегревов ОПВ вблизи УЭ на свободных от катодной металлизации участках n -эмиттера за счет локализации тока в открытом состоянии i_T в поверхностном слое n -эмиттера.

Список литературы

1. Беспалов, Н. Н. Путь повышения надежности силовых тиристорov, использующихся при высокой скорости нарастания тока в открытом состоянии / Н. Н. Беспалов, Ю. М. Голембиовский, М. Н. Байбиков // Саратов : Вестник СГТУ, 2006, № 6. – С. 74-79.

MODELING OF HEAT PROCESSES IN THE FIELD OF THE INITIAL INCLUSION POWER THYRISTORS

Bespalov Nikolay Nikolaevich, Zinin Sergey Alekseevich
Mordovian N. P. Ogarev state university,
Russian Federation, Saransk city

E-mail: ka-mgu@mail.ru, tel.: +7(834-2) 24-37-05,
39, Bohdan Khmelnytsky street, room 526, 433005, Saransk, Mordovia, Russia

Annotation. This article discusses the results of investigation thermal processes in the initial engagement of power thyristors in regimes with high-rate of rise on-state current.

Key words: electric converter; a power thyristor; area of the initial inclusion; the rate of current rise; erosion; potentially unreliable devices; reliability.



Беспалов Николай Николаевич
Россия, РМ, г. Саранск
Мордовский государственный университет им. Н. П.
Огарёва
E-mail: ka-mgu@mail.ru
Тел. +7(834-2) 24-37-05

Окончил радиотехнический факультет Новосибирского электротехнического института (1974). Кандидат технических наук (2000). Заведующий кафедрой автоматики (с 2003 г. по настоящее время).

Область научных интересов: разработка методов и аппаратуры для испытания силовых полупроводниковых приборов и определения их параметров и характеристик; разработка методов и аппаратуры для ионизации воздушной среды.



Зинин Сергей Алексеевич
Россия, РМ, г. Саранск
Мордовский государственный университет им. Н. П.
Огарёва
E-mail: fetovetz@rambler.ru.
Тел. +7(834-2) 24-37-05

Окончил факультет электронной техники Мордовского государственного университета имени Н. П. Огарёва (2008). Инженер кафедры автоматики факультета электронной техники Мордовского государственного университета имени Н. П. Огарёва.

Область научных интересов: разработка методов и аппаратуры для испытания силовых полупроводниковых приборов и определения их параметров и характеристик.