

ТИРИСТОРЫ С ПОЛЕВЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Нестеров С. А., Тетюшкин В. С.

ГОУВПО «Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева», г. Саранск
Тел. +7(8342)290605; e-mail: nesterov@mrsu.ru

Аннотация. В статье, подготовленной по материалам зарубежных источников, описывается принцип действия, структура и характеристики тиристоры с полевым управлением, а также их сравнение с другими силовыми вентилями с полным и неполным управлением. В доступной отечественной литературе информация об этих приборах отсутствует. Статья предназначена для студентов, изучающих курс полупроводниковых приборов, и может быть интересна для специалистов в области полупроводниковой электроники и преобразовательной техники.

Ключевые слова: полностью управляемый вентиль, тиристор, полевое управление.

Коэффициент полезного действия, мощность преобразователя, частота преобразования и легкость управления зависят, главным образом, от используемых силовых приборов (вентилей, ключей).

Применяемые в современной преобразовательной технике силовые ключи по принципу действия можно отнести либо к биполярному типу на основе инжекции в $p-n$ -переходе, либо к полемому типу, каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки. Обычный тиристор относится к приборам первого типа. Благодаря ряду преимуществ он широко используется в преобразовательной технике вот уже несколько десятков лет. Тиристор имеет высокую плотность тока и низкое прямое падение напряжения, и оба эти достоинства делают его подходящим для применения в установках большой мощности. Невозможность выключения обычного тиристора по цепи управления и низкая скорость переключения являются главными факторами, ограничивающими его применение. В качестве альтернативы обычным тиристорам были предложены тиристоры, выключаемые по управляющему электроду - запираемые тиристоры. Однако необходимость обеспечения большого тока управляющего электрода для прерывания анодного тока ограничивало их применение.

Мощные полевые МОП-транзисторы имеют ряд преимуществ, таких как высокий входной импеданс, малая мощность управления и значительно более высокие скорости переключения. В то же время невысокая плотность тока и более высокое прямое падение напряжения по сравнению с тиристорами ограничивают применение этих приборов областями средних мощностей. Стремление объединить преимущества биполярных и полевых структур привело к созданию гибридных приборов, таких как биполярные транзисторы с изолированным затвором (БИТЗ) и тиристоры с полевым управлением (ТПУ). В то время как БИТЗ является усовершенствованием биполярного транзистора с $p-n$ -переходами, использующим МОП- транзистор для включения и выключения тока, тиристор с полевым управлением является усовершенствованием обычного тиристора, использующим для коммутации тока пару МОП-транзисторов. ТПУ позволили снять некоторые из ограничений, присущих существующим силовым приборам, и обещают стать лучшими ключами в будущем. В настоящее время в семействе ТПУ имеется несколько типов приборов с различными комбинациями структур каналов и затворов. В данной статье речь пойдет об одном из этих типов, называемом ТПУ с p -каналом. Поскольку затвор в этом приборе определяется по отношению к аноду, а не к катоду, его иногда называют комплементарным ТПУ (K -ТПУ). Изначально ТПУ производились компанией Harris Semiconductors (Intersil), но в дальнейшем подразделение ТПУ было продано корпорации Silicon Power Corporation (SPCO), которая продолжила разработку ТПУ.

Обычный тиристор является 4-слойным $p-n-p-n$ прибором с управляющим электродом. Подача положительного импульса на его управляющий электрод включает тиристор, если он находится под прямым напряжением. Регенеративный характер процессов в приборе помогает ускорить процесс включения и поддерживает прибор во включенном состоянии

даже после снятия управляющего импульса. ТПУ использует для включения вспомогательный p -МОП-транзистор, что упрощает управление по затвору. Характеристики включения полностью соответствуют мощному МОП-транзистору. Выключение производится с помощью другого n -МОП-транзистора, который эффективно отводит базовый ток одного из биполярных транзисторов и прерывает процесс регенерации.

Эквивалентная схема ТПУ с p -каналом и структура его единичной ячейки приведены на рис.1. и рис.2 соответственно. Эквивалентная схема тиристора состоит из биполярных транзисторов $T1$ и $T2$, объединенных с парой МОП-транзисторов. Один из двух МОП-транзисторов, p -МОП, расположенный между коллектором и эмиттером $T2$, включает тиристор, а другой транзистор, n -МОП, шунтирующий переход эмиттер-база $T2$, его выключает.

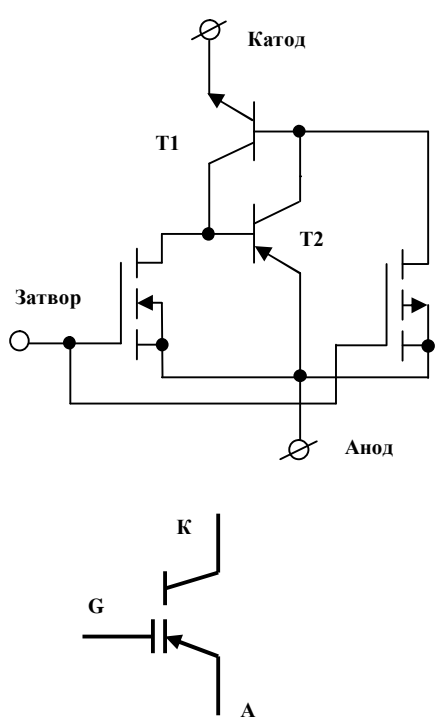


Рис. 1. Эквивалентная схема и условное обозначение ТПУ

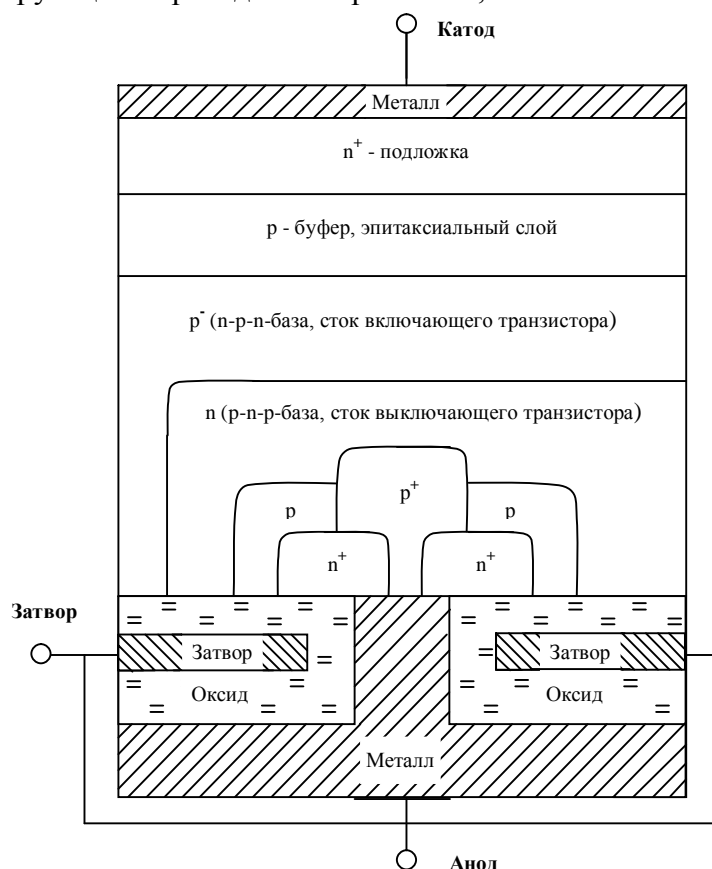


Рис. 2. Структура единичной ячейки ТПУ

В реальном производстве каждый ТПУ выполняется из большого числа ($\sim 100\ 000$) ячеек, каждая из которых содержит n - p - n транзистор с широкой базой и p - n - p транзистор с узкой базой. В то время как каждый p - n - p транзистор в ячейке снабжается n -канальным МОП-транзистором, включенным между его эмиттером и базой, лишь небольшой процент ($\sim 4\%$) p - n - p -транзисторов снабжен p -канальными МОП-транзисторами, включенными между их эмиттерами и коллекторами. Небольшой процент p -МОП-ячеек в ТПУ обеспечивает вполне достаточный ток для включения, а большое число n -МОП-ячеек обеспечивает довольно большой ток для выключения.

Когда выключенный ТПУ находится под прямым напряжением, его можно включить, подав на его затвор отрицательный импульс по отношению к аноду. Отрицательный импульс включает p -МОП-транзистор (включающий транзистор), ток стока которого, протекая через переход база-эмиттер $T1$ (n - p - n), включает его. Регенеративные процессы в паре $T1$ - $T2$ переводят ТПУ в полностью проводящее состояние за очень короткое время и поддерживают это состояние даже после снятия напряжения с затвора. ТПУ включается без фазы распространения области начального включения, что обеспечивает высокое допустимое значение di/dt и

простоту защиты от сверхтоков. Кроме того, номинальный импульсный ток ТПУ намного больше его среднего или действующего номинального тока.

ТПУ будет оставаться во включенном состоянии до тех пор, пока ток анода не станет меньше тока удержания, или пока к затвору не будет приложен выключающий импульс. Выключение ТПУ осуществляется подачей положительного напряжения на затвор. Положительный импульс включает *n*-МОП-транзистор (выключающий транзистор), отводя, таким образом, базовый ток *T2* (*p-n-p*) на анод ТПУ и прерывая защелкивающий процесс в тиристор. Это обрывает положительную обратную связь в тиристоре и ТПУ выключается. Все ячейки в приборе должны выключаться в одно и то же время во избежание внезапного локального увеличения плотности тока. Когда выключающий транзистор включается, секция тиристора резко закорачивается и это приводит к высоким для ТПУ значениям dv/dt . Максимальный ток, который может быть выключен подачей импульса на затвор, называется «максимальным управляемым током». ТПУ может быть выключен по затвору, если ток прибора меньше максимального управляемого тока. Причем, при больших прямых токах длительность выключающих импульсов должна быть не короче времени выключения ТПУ. Для малых токов ширина выключающих импульсов не критична.

Впервые ТПУ были коммерчески представлены фирмой Harris Semiconductors в 1992 г. (ТПУ первого поколения). Позднее появились ТПУ второго поколения, совершенствование которых продолжается. В ТПУ второго поколения каждая ячейка имеет свой включающий полевой транзистор. ТПУ второго поколения имеют меньшее прямое падение по сравнению с ТПУ первого поколения. Они имеют также более высокий показатель di/dt для заданного значения емкости разрядного конденсатора. У ТПУ второго поколения во время жесткого переключения время спада и коммутационные потери ниже. ТПУ второго поколения имеют те же самые характеристики потерь проводящего состояния, что и приборы первого поколения при существенно меньших временах и потерях коммутации.

В условиях переключения с нулевым током ТПУ второго поколения имеют пренебрежимо малые коммутационные потери. При переключении с нулевым напряжением потери выключения в ТПУ второго поколения составляют от половины до одной четверти (в зависимости от температуры и уровня тока) потерь выключения приборов первого поколения. В областях применения с мягким переключением основные потери, а именно, потери проводящего состояния, резко снижаются, позволяя использовать меньшее число ключей в модуле.

ТПУ можно сравнивать с мощными МОП-транзисторами, мощными биполярными транзисторами и БТИЗ с аналогичными номинальными напряжениями и токами. Работа приборов сравнивается во включенном состоянии, в выключенном состоянии и при переходных условиях. Сравнение является простым и дает весьма полную информацию.

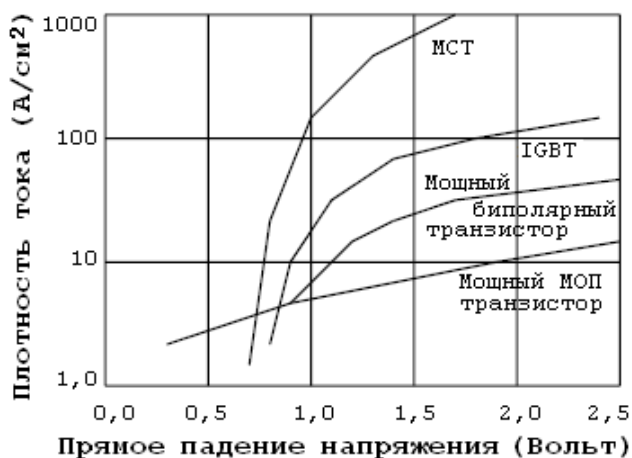


Рис. 3. Сравнение прямого падения напряжения

Плотность тока в ТПУ приблизительно на 70% выше, чем в БТИЗ на тот же полный ток. Во включенном состоянии ТПУ имеет меньшее прямое падение по сравнению с другими приборами. ТПУ имеет также умеренный отрицательный температурный коэффициент при небольших токах, который становится положительным при больших токах. На рис. 3 показано прямое падение напряжения в функции плотности тока. Прямое падение для ТПУ на ток 50 А при 25°C составляет около 1,1В, в то время как для сравнимого БТИЗ оно составляет более 2,5В. Эквивалентное падение напряжения, вычисляемое из значения параметра $r_{DS(ON)}$ для мощно-

го МОП транзистора, будет намного выше. Однако мощный МОП-транзистор имеет намного меньшее время задержки (30нс) в сравнении с таковым у ТПУ (300нс). Время задержки включения и время спада для ТПУ намного выше по сравнению с мощными МОП-транзисторами, причем с увеличением температуры они увеличиваются. Поэтому ТПУ не могут конкурировать с МОП-транзисторами по динамическим параметрам, однако новые приборы второго поколения имеют сравнимые времена выключения с БТИЗ. Область безопасной работы при выключении у БТИЗ лучше, чем у ТПУ. Для ТПУ надежно выключаемый ток устойчив при напряжениях $\approx 50\text{--}60\%$ от номинального напряжения пробоя, в то время как для БТИЗ это значение составляет около 80%. Для формирования безопасной траектории движения рабочей точки при выключении ТПУ необходимы емкостные демпфирующие устройства. Добавление даже небольшого конденсатора существенно улучшает безопасную рабочую область выключения.

ТПУ имеет МОП-затвор аналогичный затвору мощного МОП-транзистора или БТИЗ, и, следовательно, им легко управлять. В ТПУ с *p*-каналом напряжение затвора должно прикладываться по отношению к его аноду. Для включения ТПУ необходимо подать на затвор отрицательное напряжение ниже напряжения отсечки включающего МОП-транзистора. Подобно тиристорам с выключением по управляющему электроду время нарастания напряжения затвора должно быть ограничено во избежание появления горячих точек (участков с высокой плотностью тока) в ячейках ТПУ. Для надежной работы ТПУ необходимо обеспечить на затворе напряжение ниже -5В для включения и выше 10В для выключения. Особенности процесса защелкивания ТПУ требуют для поддержания его в выключенном состоянии, чтобы напряжение затвора поддерживалось на положительном уровне.

Поскольку размах уровней напряжения, необходимых для управления ТПУ, превышает таковые для других приборов, управляемых по затвору, использование серийных драйверов для управления ТПУ ограничено. ТПУ могут коммутироваться с помощью комплементарной пары дискретных *n*-МОП- и *p*-МОП-транзисторов, которые, в свою очередь, управляются серийной интегральной микросхемой.

Подобно мощным МОП-транзисторам ТПУ могут работать в параллель. Несколько ТПУ могут включаться в параллель для формирования больших модулей всего лишь с очень небольшим снижением номинальных параметров индивидуальных приборов при условии, что приборы подобраны по прямому падению напряжения для равномерного распределения тока между ними.

В качестве примера ниже приводятся паспортные данные *p*-ТПУ на 600В , 150А производства Silicon Power Corporation:

Максимальное напряжение в выключенном состоянии, V_{DRM}	-600В
Максимальное обратное напряжение, V_{RRM}	$+40\text{В}$
Длительный ток катода ($T = +90^\circ\text{C}$), I_{K90}	150А
Максимальный неповторяющийся ток катода, I_{KSM}	5000А
Максимальный управляемый ток, I_{KC}	300А
Напряжение затвор-анод (длительное), V_{GA}	$\pm 15\text{В}$
Напряжение затвор-анод (максимальное), V_{GAM}	$\pm 20\text{В}$
Скорость изменения напряжения ($V_{\text{GA}} = 15\text{В}$), dv/dt	10кВ/мкс
Скорость изменения тока, di/dt	80кА/мкс
Максимальный ток утечки в выключенном состоянии, I_{DRM} ($V_{\text{KA}} = -600\text{В}$, $V_{\text{GA}} = +15\text{В}$, $T_c = +25^\circ\text{C}$)	200мкА
Напряжение во включенном состоянии, V_{TM} ($I_{\text{K}} = 100\text{А}$, $V_{\text{GA}} = -10\text{В}$, $T_c = +25^\circ\text{C}$)	$1,3\text{В}$

Литература

1. Rashid, M. H. (Editor) Power electronics handbook, San Diego: Academic Press, 2001. — 895 p.

2. V. A. K. Temple, "MOS-Controlled Thyristors—A new class of power devices," *IEEE Trans. on Electron Devices* **33**: 1609–1618 (1986).
3. Q. Huang et al., "Analysis of n-channel MOS-Controlled Thyristors," *IEEE Trans. Electron Devices* **38**:7, 1612–1618 (1991).