

6. Импульсные ключи.

Ключом в электротехнике называется двухполюсник, имеющий два состояния – с нулевой проводимостью (разомкнут) и с бесконечной проводимостью (замкнут). В импульсной технике зачастую приходится коммутировать цепи с частотой, неприемлемой для механических контактов тумблеров, реле и т.п. Поэтому под импульсными ключами мы будем понимать электронные ключи – на транзисторах и тиристорах.

Основными параметрами любого ключа является его способность пропускать ток в замкнутом состоянии и удерживать напряжение в разомкнутом состоянии. Для электронных ключей к этим добавляется еще ряд важных параметров, таких как остаточное напряжение в замкнутом состоянии, ток утечки в разомкнутом состоянии, а также динамические характеристики – скорость включения и выключения.

6.1. Ключи на биполярных транзисторах

В импульсных схемах транзисторы, в том числе биполярные, работают, как правило, в ключевом режиме, то есть большую часть времени находятся либо в режиме отсечки, либо в режиме насыщения. Что касается мощных ключевых биполярных транзисторов (БТ), то на сегодняшний день – это отмирающий класс приборов. Они имеют сравнительно низкое быстродействие, требуют большую мощность в управление и на сегодняшний день не конкурируют с более «молодым» поколением силовых ключей – MOSFET и IGBT транзисторами.

Кроме коэффициента усиления по току β , в справочных данных на биполярный транзистор приводится стандартный набор предельных параметров, важных для ключевых схем – **максимальный ток коллектора и максимальное рабочее напряжение коллектор-эмиттер**, а также ряд вспомогательных параметров, таких, например, как **остаточное напряжение коллектор-эмиттер**. В отличие от диодов, транзисторы гораздо менее устойчивы к токовым перегрузкам. Импульсный ток, который способен выдержать транзистор, превышает максимально допустимый средний ток не более чем в 2-3 раза.

Все мощные современные транзисторы, работающие в ключевых схемах, изготавливаются по эпитаксиально-планарной технологии, при которой область коллектора имеет контакт с металлическим основанием для лучшего отвода тепла.

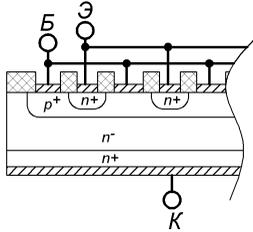


Рис.6.1.1

На рисунке 6.1.1 показана структура эпитаксиально-планарного биполярного *n-p-n* транзистора. Вначале на проводящее основание, служащее коллектором наносится слой высоколегированного *n* – полупроводника для более равномерного распределения тока коллектора по поверхности основания, а затем слой низколегированного *n*-полупроводника, который удерживает на себе все напряжение в закрытом состоянии. Толщина этого слоя определяет максимальное рабочее напряжение транзистора, а также остаточное падение напряжения в открытом состоянии.

Основная проблема биполярных транзисторов (БТ), работающих в ключевом режиме – большая задержка на запираение (переход из режима насыщения в режим отсечки). Она связана с медленной рекомбинацией неосновных носителей заряда в области базы, избыточная концентрация которых тем больше, чем больше коэффициент насыщения q , который определяется как отношение фактического тока базы к току базы на границе насыщения:

$$q = \frac{i_{\bar{\sigma}}}{i_{\bar{\sigma}.zp}}$$

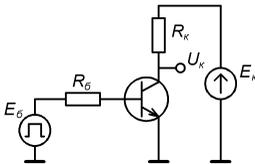


Рис.6.1.2

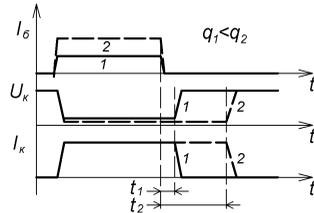


Рис.6.1.3

На рисунке 6.1.2 приведена типичная схема ключевого каскада на БТ, включенного по схеме с общим эмиттером, а на рисунке 6.1.3 показан

процесс запираания транзистора при разных коэффициентах насыщения. На рисунке видно, что более сильное насыщение транзистора приводит к снижению остаточного напряжения $U_{кэ}$, уменьшая *статические потери*, но существенно увеличивает задержку запираания.

Мощные БТ имеют крайне низкий коэффициент передачи по току – 10 и менее. Это значит, что для насыщения транзистора, в базу требуется подавать ток по порядку величины равным току коллектора!

К недостаткам ключей на БТ можно отнести также отрицательный температурный коэффициент остаточного напряжения $U_{кэ}$, затрудняющий параллельное включение нескольких транзисторов.

Важным параметром транзисторов является *область безопасной работы* (ОБР). В справочных данных на транзистор указывается максимально допустимый ток коллектора и максимальное напряжение коллектор-эмиттер.

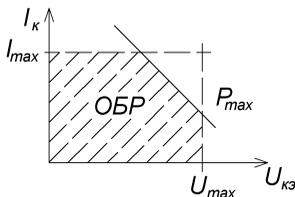


Рис.6.1.4

Однако, максимальная рассеиваемая транзистором мощность оказывается меньше, чем произведение максимальных тока и напряжения. Это ограничение и определяет область безопасной работы транзистора (Рис.6.1.4).

Отрицательный температурный коэффициент БТ еще сильнее снижает ОБР, так как при большой мощности рассеяния возникают локальные перегревы кристалла, приводящие к пробое транзистора.

Итак, перечислим еще раз преимущества и недостатки биполярных транзисторных ключей.

Недостатки:

- *низкий коэффициент передачи по току*, который может быть компенсирован применением составного транзистора (Дарлингтона).
- *медленный процесс запираания*. Проблема частично решается схемотехнически: а) существуют схемы с форсированным запираанием, то есть приложением к базе отрицательного «вытягивающего» напряжения, б) схемы с контролируемым насыщением. Схема управления имеет обратную связь по напряжению коллектор-эмиттер и «следит» за насыщением, ограничивая ток базы.
- *отрицательный температурный коэффициент сопротивления К-Э в открытом состоянии* не позволяет напрямую включать параллельно несколько транзисторов с целью

увеличения рабочего тока, так как даже небольшой разброс параметров транзисторов приводит к сильно неравномерному распределению токов между ними. Проблема решается введением в цепи эмиттеров разравнивающих резисторов, что приводит, правда, к дополнительным потерям.

Преимущества:

БТ имеют сравнительно низкое остаточное падение напряжения коллектор-эмиттер в насыщенном состоянии, которое, к тому же, слабо зависит от тока коллектора.

6.2. *Ключи на полевых транзисторах.*

Несмотря на многообразие вариантов полевых транзисторов, современные полевые транзисторы, предназначенные для работы в ключевом режиме, делаются по МОП-технологии с индуцированным каналом. Транзисторы с индуцированным каналом более удобны для применения в импульсных схемах, так как более логично иметь нормально разомкнутый ключ, а замыкать его подачей управляющего напряжения.

Современная технология изготовления полевых транзисторов позволяет получать приборы с уникальными параметрами, во многом превосходящими биполярные транзисторы. Мощные ПТ изготавливаются по той же планарной технологии, что и БТ. На рисунке 6.2.1 показана структура мощных полевых транзисторов, затворы которых выполнены по разной технологии. Вариант а – так называемый D-образный МОП транзистор. Вариант б – МОП транзистор с углубленным V-образным затвором. Приборы, изготовленные по D-технологии, имеют более высокое пробивное напряжение.

У полевого транзистора остаточное напряжение в открытом состоянии имеет более сильную, чем у БТ, линейную зависимость от тока стока. Поэтому для ПТ вводится параметр $R_{си}$ – сопротивление сток-исток в открытом состоянии. Уменьшить эту величину удастся с помощью V-образной формы затвора (Рис.6.2.1 б)

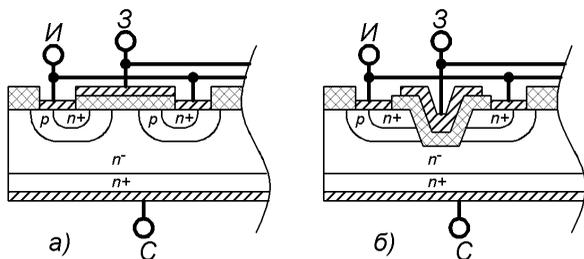


Рис.6.2.1

Рассмотрим основные преимущества и недостатки ПТ в сравнении с биполярными транзисторами.

Преимущества:

- Крутизна g у полевого транзистора является постоянной величиной, в отличие от β у биполярных транзисторов.
- Полевые транзисторы имеют существенно меньшие токи утечки в закрытом состоянии.
- Затвор ПТ не потребляет тока, а значит, требует существенно меньшей мощности в управление, особенно в статическом режиме.
- у ПТ отсутствует эффект накопления заряда, что значительно повышает его быстродействие по сравнению с БТ.
- Полевой транзистор имеет положительный температурный коэффициент, а значит лучшую устойчивость к локальным перегревам и вторичным пробоям. За счет этого несколько расширяется область безопасной работы. Положительный ТКС дает также возможность параллельного соединения нескольких приборов.

Наряду с неоспоримыми преимуществами у ПТ есть и недостатки.

- Из-за линейной зависимости остаточного напряжения $U_{СИ}$ от тока стока, ПТ имеют более высокое остаточное напряжение, чем БТ. Наличие линейного сопротивления канала $R_{СИ}$ не позволяет делать транзисторы на напряжение более нескольких сотен вольт, так как сильно возрастает $R_{СИ}$ и связанные с ним тепловые потери.
- Несмотря на практически бесконечное входное сопротивление, ПТ имеют довольно большую емкость затвор-исток. Это требует применения мощных драйверов для управления транзистором на высоких частотах.
- Полевые транзисторы имеют одну интересную особенность, связанную с технологией его изготовления. Дело в том, что внутри

полевого транзистора «прячется» паразитный биполярный p-p-n транзистор. Это видно на рисунке 6.2.1.

Однако на этапе изготовления этот транзистор превращают в диод путем закорачивания базы и эмиттера (обратите внимание на перемычку между p и p⁺ областью, связанную с выводом истока на рис.6.2.1). Из паразитного получают полезный элемент – антипараллельный диод, защищающий транзистор от отрицательных напряжений U_{СИ} (Рис.6.2.2). Правда, параметры быстродействия у этого диода хуже, чем у подобных дискретных

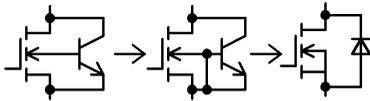


Рис.6.2.2

сверхбыстрых диодов. Решить проблему обратного восстановления этого диода можно, зашунтировав его диодом с меньшим прямым падением напряжения, например диодом Шоттки (Рис.6.2.3). В такой схеме «транзисторный» диод не открывается вообще, а значит и не требует времени на восстановление.

- И наконец, недостатком ПТ является довольно низкое максимально допустимое напряжение затвора (около 20 В) и чувствительность его к статическим зарядам, особенно у маломощных транзисторов. Транспортировка и хранение ПТ требует специальных мер – закорачивания затвора с истоком, помещения в антистатическую тару и т.п., а в схемах на ПТ требуются защитные элементы в цепи затвора, предотвращающие выбросы напряжения.

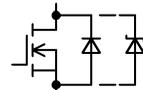


Рис.6.2.3

6.3. Биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT)

Идея использовать преимущества разных типов мощных транзисторов, работающих в ключевом режиме, привела к созданию комбинированных приборов. Одним из таких приборов является IGBT (Insulated gate bipolar transistor). Первые IGBT были разработаны в 80-х годах 20 века независимо в двух американских лабораториях, но не получили широкого распространения из-за низкого быстродействия (10-20 мкс) и ряда других недостатков. Однако технология их производства непрерывно совершенствуется, и на сегодняшний день выпускается уже четвертое поколение транзисторов. Благодаря своим уникальным параметрам, IGBT нашли широкое применение во всех областях силовой электроники. Современные IGBT имеют времена коммутации от 100 до 500 нс, рабочие напряжения до нескольких киловольт и рабочие токи порядка 100 ампер (выпускаются IGBT модули и на большие токи, но они

составляются из нескольких кристаллов одиночных IGBT, соединенных параллельно). Итак, что же такое IGBT? Эквивалентная схема IGBT приведена на рисунке 6.3.1. По управлению IGBT аналогичен МОП-транзистору и имеет такое же низкое энергопотребление, а «силовая» проводимость обеспечивается, в основном, биполярной структурой, имеющей более низкое остаточное напряжение, слабо зависящее от тока. Планарная структура IGBT показана на рисунке 6.3.2. Отличие от структуры МОП-транзистора заключается в том, что приколлекторный слой n^+ заменен на p^+ , образуя дополнительный р-п переход.

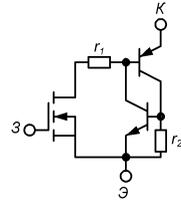


Рис.6.3.1

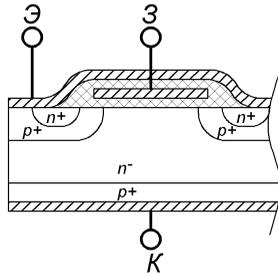


Рис.6.3.2

В результате получается биполярный р-п-р транзистор, который в связке с паразитным н-р-п транзистором образует схему с положительной обратной связью (ПОС), способную очень быстро переходить из закрытого в открытое состояние. Коэффициент ПОС определяется коэффициентами передачи транзисторов и очень точно регулируется на этапе изготовления путем подбора r_1 и r_2 . Общая крутизна IGBT зависит от совокупности усилительных свойств каждого транзистора и определяется как

$$s_{tot} = \frac{s}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)},$$

где s – крутизна полевого транзистора, α_1 и α_2 – коэффициенты передачи тока эмиттера биполярных транзисторов. Их подбирают таким образом, чтобы $\alpha_1 + \alpha_2$ было чуть меньше единицы для высокого коэффициента усиления и в то же время отсутствия склонности к «защелкиванию».

Температурный коэффициент $U_{КЭ}$ складывается из положительного «полевого» и отрицательного «биполярного». К счастью, изготовитель заботится о том, чтобы преобладал положительный коэффициент, так чтобы можно было без проблем использовать параллельное включение нескольких IGBT.

Главная проблема IGBT состоит в уже известном нам эффекте рассасывания неосновных носителей из базы р-п-р транзистора при запираании управляющего полевого транзистора. Это приводит к образованию так называемого «хвоста» тока после того как IGBT уже практически закрылся (Рис.6.3.3). Особенно этим страдали первые поколения IGBT. В современных IGBT эта проблема технологически более-менее решена.

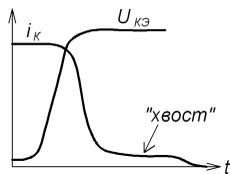


Рис.6.3.3

6.4. Тиристорный ключ

Тиристор имеет четырехслойную р-п-п-п структуру, эквивалентная схема которой может быть представлена двумя биполярными транзисторами разной проводимости, соединенными, как показано на рисунке 6.4.1б (сравните со структурой IGBT). Такая «связка» транзисторов имеет свойство лавинообразно открываться, поскольку транзисторы охвачены сильной положительной обратной связью. Переход тиристора в открытое (замкнутое) состояние осуществляется внешним управляющим воздействием – положительным импульсом тока, поданным на управляющий электрод $УЭ$ относительно катода $К$ (либо световым импульсом для оптотиристоров). Тиристор лавинообразно открывается и остается в таком состоянии даже после

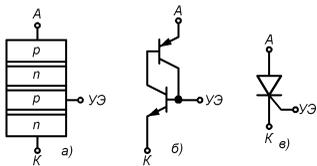


Рис.6.4.1

снятия управляющего импульса, если протекающий от анода к катоду ток больше некоторого критического уровня, называемого *током удержания*. В противном случае тиристор вновь переходит в закрытое состояние. Вольтамперная характеристика тиристора показана на рисунке 6.4.2. Она имеет особенность – участок с отрицательным сопротивлением, соответствующим его лавинообразному отпираанию. Пока напряжение U_{AK} меньше максимального, тиристор блокирует это напряжение и может быть открыт управляющим импульсом. Если анодное напряжение

достигает $U_{AK \text{ макс}}$ происходит самопроизвольный обратимый переход в открытое состояние. На этом принципе работают неуправляемые двухэлектродные тиристоры – динисторы.

Достоинство тиристорного ключа в том, что он способен коммутировать импульсные токи, на порядок превышающие его максимальный средний ток (до нескольких килоампер), при условии, что температура кристалла находится в допустимых пределах (подобно диодам). Максимальные рабочие напряжения для мощных тиристоров достигают нескольких киловольт. Таким образом, коммутируемая тиристорами мощность значительно превышает мощность, доступную для транзисторных ключей.

Тиристоры имеют довольно низкое быстродействие – времена отпирания и запираения даже для «быстрых» тиристоров исчисляются десятками микросекунд. Это ограничивает их применение в преобразовательной технике. Наибольшее распространение тиристоры получили в схемах фазовых регуляторов сетевых источников напряжения и электроприводов, где не требуется высокое быстродействие.

Еще одно из ограничений тиристоров – допустимая скорость нарастания анодного тока. Это связано с конечной скоростью распространения объемного заряда, создающего область проводимости, от управляющего электрода по всей площади кристалла. Время распространения объемного заряда для мощных тиристоров составляет около 20 мкс. Если время нарастания тока будет меньше этого времени, плотность тока на локальном участке кристалла превысит допустимый предел и тиристор выйдет из строя. Нетрудно подсчитать максимальную скорость нарастания тока для тиристорного ключа с рабочим током, скажем, 1 кА.

$$\frac{dI}{dt} = \frac{1000A}{20\text{мкс}} = 50A/\text{мкс}$$

Прямое падение напряжения на открытом тиристоре складывается из падений напряжения двух прямосмещенных **p-n** переходов и составляет около 2-3 вольт.

Одно из неудобств работы с тиристорами - невозможность их принудительного выключения при протекании через тиристор прямого тока. Чтобы запереть тиристор, необходимо создать схему перехвата основного тока до уровня тока удержания, что значительно усложняет схему управления. Одновременно с появлением тиристоров велись

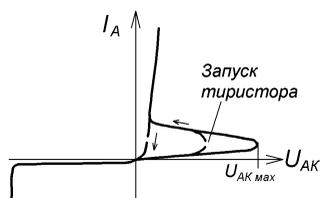


Рис.6.4.2

разработки по созданию запираемых по управляющему электроду тиристоров. Основная задача запираения – вывести из насыщения транзисторы путем быстрой рекомбинации носителей в базовых областях. Это возможно при условии высокой однородности полупроводниковой структуры тиристора по всей площади кристалла. В настоящее время такие тиристоры существуют, они получили название GTO (gate turn off). Запираются они подачей на управляющий электрод импульса отрицательной полярности. Отличие в структуре обычного и GTO тиристора показано на рисунке 6.4.4.

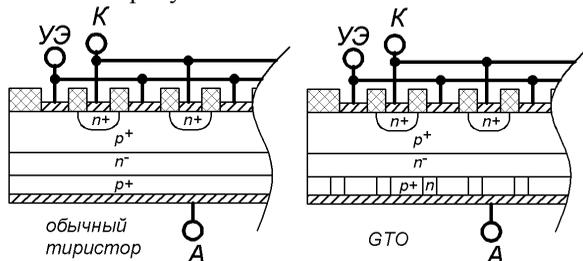


Рис.6.4.4

Оно заключается в наличии в прианодной p-области GTO тиристора чередующихся вертикальных n-областей, служащих для более равномерного разравнивания тока при запираении.