

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	7
ГЛАВА 1	
Эволюция развития силовых полупроводниковых ключей	9
1.1. В круге первом	10
1.2. Воплощение идей в жизнь	13
1.3. Первое «обустройство» транзистора	15
1.4. В единстве всегда сила	18
1.5. Соты нужны не только пчелам	21
1.6. У каждой потайной двери есть свой ключ	28
1.7. Кто на новенького?	40
ГЛАВА 2	
Базовые структуры силовых полупроводниковых ключей	51
2.1. Введение	52
2.2. Транзисторы	54
2.2.1. Силовые биполярные транзисторы	54

СОДЕРЖАНИЕ

2.2.2. Мощные МДП-транзисторы	62
2.2.3. Биполярные транзисторы с изолированным затвором	71
2.2.4. Статические индукционные транзисторы.....	78
2.3. Тиристоры	83
2.3.1. Однооперационные тиристоры.....	84
2.3.2. Запираемые тиристоры.....	92
2.3.3. Индукционные тиристоры.....	99
2.3.4. Полевые тиристоры	102

ГЛАВА 3

Характеристики и параметры силовых ключей	111
3.1. Выбор ключевого элемента схемы.....	112
3.2. Основные группы справочных данных по силовым ключам	113
3.2.1. Характеристики ключей и режим работы схемы.....	123
3.2.2. Влияние температуры на параметры силовых ключей	143
3.3. Предельные характеристики полупроводниковых ключей.....	148
3.3.1. Области безопасных режимов	149
3.4. Тепловые характеристики полупроводниковых ключей	158
3.4.1. Потери в силовых ключах	160
3.4.2. Тепловые сопротивления	164
3.4.3. Допустимые режимы работы ключей	175

ГЛАВА 4

Управление полупроводниковыми ключами	179
4.1. Формирователи управляющих импульсов в структуре систем управления преобразователями	180
4.2. Основные типы формирователей импульсов управления	185
4.3. Формирователи импульсов управления с совместной передачей энергии и формы управляющего сигнала	188
4.3.1. Трансформаторные ФИУ биполярных транзисторов.....	188
4.3.2. Трансформаторные ФИУ для ключей с изолированным затвором	191
4.3.3. Трансформаторные ФИУ тиристоров.....	195
4.4. Формирователи импульсов управления с отдельной передачей энергии и информационного сигнала.....	199
4.4.1. Потенциальная развязка информационного сигнала	199
4.4.2. Драйверы силовых транзисторов.....	201
4.4.3. Подключение драйверов к входным цепям силовых транзисторов	208
4.4.4. Драйверы тиристоров.....	216
4.5. Источники питания драйверов	219

ГЛАВА 5

Методы и схемы защиты полупроводниковых ключей	223
5.1. Основные виды перегрузок по напряжению и току	224
5.2. Методы защиты от помех	227
5.3. Защитные цепи силовых ключей	233
5.3.1. Цепи формирования траектории рабочей точки транзисторов	233
5.3.2. Защитные цепи тиристорных ключей	238
5.3.3. Защитные цепи силовых модулей	241
5.4. Защита силовых ключей от режимов короткого замыкания	244
5.5. Силовые ключи с интегрированной системой защиты	251

ГЛАВА 6

Применение мощных полупроводниковых ключей в силовых схемах	259
6.1. Основные области применения ключевых приборов	260
6.2. Типовые схемы транзисторных ключей	265
6.2.1. Ключ на биполярном транзисторе	265
6.2.2. Ключ на мощном МДП-транзисторе	271
6.2.3. Ключ на биполярном транзисторе с изолированным затвором	274
6.2.4. Ключ на статическом индукционном транзисторе	276
6.3. Тиристорные ключи	282
6.3.1. Ключ на тиристоре с электростатическим управлением	282
6.3.2. Ключи на тиристорах с регенеративным включением	284
6.3.3. Особенности запираания тиристорных ключей	289
6.4. Применение ключевых транзисторов в схемах электронных балластов	299
6.5. Применение мощных МДП-транзисторов в импульсных источниках питания	304
6.5.1. МДП-транзисторы в отнотактных схемах импульсных преобразователей	305
6.5.2. МДП-транзисторы в двухтактных схемах импульсных преобразователей	309
6.5.3. МДП-транзисторы в схемах синхронных выпрямителей	313
6.6. Применение мощных ключей в схемах управления электродвигателями переменного тока	316
6.6.1. Основные режимы работы силовых ключей в ШИМ-инверторах для асинхронных электродвигателей	316
6.6.2. Особенности применения IGBT в схемах с индуктивной нагрузкой	322
6.6.3. Переключение полевых тиристоров МСТ в мостовых схемах	326
6.6.4. GTO- и GCT-ключи в силовых инверторах с двигательной нагрузкой	329

СОДЕРЖАНИЕ

ПРИЛОЖЕНИЯ	333
1. Биполярные транзисторы с интегрированной схемой ограничения насыщения	335
2. Мощные низковольтные МДП-транзисторы	336
3. Мощные высоковольтные МДП-транзисторы	338
4. Высокочастотные биполярные транзисторы с изолированным затвором	342
5. Мощные полупроводниковые ключи технологии Trench Gate	355
6. IGBT-модули с улучшенной конструкцией корпуса	357
7. Сверхмощные полупроводниковые ключи новых технологий	359
8. Интегральные оптроны для драйверов дискретных ключей	362
9. Интегральные драйверы транзисторов	365
10. Интегральные драйверы силовых модулей	367
Словарь терминов	370
Список литературы	374
Список фирм—изготовителей полупроводниковых приборов	380

ПРЕДИСЛОВИЕ

Бурный рост производства ключевых полупроводниковых приборов в последние годы сопровождался расширением не только их электрических и мощностных диапазонов, но и улучшением качественных показателей, уровня "интеллектуальности", многообразием новых типов. Все это потребовало от разработчиков силовых схем детального изучения новых классов полупроводниковых ключей, исследования их параметров и характеристик.

Выход на отечественный рынок большого количества зарубежных приборов вкуче с широкой номенклатурой интегральных драйверов управления, в том числе с прекрасно оформленными каталогами и сервисными дополнениями, породило ошибочное мнение о простоте технологии их применения. Однако практика показала, что даже самые современные типы силовых ключей только приближаются к понятию идеальности, скрывая тонкие моменты в режимах своей работы. Поэтому по-прежнему актуальной остается задача грамотного применения ключевых приборов в схемах силовой электроники с учетом их взаимного влияния и это до сих пор можно отнести к разряду искусства.

Настоящая книга и ставит своей целью ответить на большинство вопросов, которые могут возникнуть при использовании полупроводниковых ключей в схемотехнике. Первая глава начинается с истории создания и разработки основных типов полупроводниковых переключателей и показывает постоянное стремление фирм производителей решить эту проблему с точки зрения создания универсального ключа с характеристиками, близкими к идеальному. С этих же позиций представлена история развития различных семейств полупроводниковых ключей в последующих главах. Отдельно рассмотрены особенности применения ключей в силовых схемах. В приложениях к книге дана подробная справочная информация от большинства известных производителей силовых полупроводниковых приборов.

В книге был использован многолетний научно-методический опыт, накопленный на кафедре Промышленной электроники МЭИ в области разработки, исследования и применения различных классов силовых полупроводниковых ключей в устройствах промышленной электроники. Этот опыт позволил автору разработать и внедрить в учебный процесс современный курс лекций и построить практикум по разделу полупроводниковых ключей.

Книга может быть полезна как разработчикам новых схем на базе силовых ключей новейших технологий, так и тем, кто эксплуатирует уже готовые варианты преобразователей. Ее можно также рекомендовать студентам специальностей, связанных с энергетической электроникой и преобразовательной техникой.

Автор благодарит заведующего кафедры Промышленной электроники МЭИ д.т.н., профессора Д. И. Панфилова за значительную помощь при работе над рукописью и ее научно-методическое редактирование, весь коллектив кафедры Промышленной электроники за возможность использования многолетнего опыта в области применения силовых полупроводниковых ключей.

Выражаю большую признательность сотрудникам фирмы Infineon Technologies AG. Благодарю д-ра Л. Лоренца и д-ра И. Зверева за постоянную техническую поддержку в работе над книгой, а также д-ра М. Лизеца за большой материал по самым современным разработкам в области силовых ключевых приборов.

Автор признателен также Н.А. Гусевой за помощь при оформлении книги и своей жене И.Н. Ворониной за постоянную поддержку в работе.

Автор

1

Глава

Эволюция развития силовых полупроводниковых ключей

1.1. В круге первом

Прогресс большинства областей современной техники неразрывно связан с успехами энергетической или силовой электроники. Ее значимость определяется все возрастающей потребностью в эффективных преобразователях и регуляторах электрической энергии. Свойства, характеристики и параметры силовых схем зависят, в свою очередь, от применяемых полупроводниковых приборов. Высокое качество полупроводниковых переключателей, их уникальные характеристики открывают долгосрочные перспективы совершенствования электронных устройств. С другой стороны, процесс полупроводникового производства является отражением передовых научно-технических достижений в области физики, электроники, автоматики, машиностроения. Получается некий циклический процесс, каждый виток которого является этапом непрерывного совершенствования и взаимовлияния.

Энергетическая электроника предназначена для преобразования мощности. Поэтому полупроводниковые приборы представляют здесь интерес с точки зрения ключевого режима работы. Роль полупроводникового ключа заключается в коммутации различных частей схемы. С точки зрения разработчика силовой схемы ключ должен обладать идеальными свойствами. Он должен мгновенно, при нулевой мощности управления, переключать бесконечно большие токи и блокировать бесконечно большие напряжения, иметь нулевое остаточное напряжение и токи утечки. Наверно, это достижимо только в виртуальных задачах, например при моделировании электронных схем на ЭВМ. Практические ключи могут лишь в той или иной степени приближаться к «идеальным».

Поскольку требования потребителей в отношении токов нагрузки, блокируемых напряжений, частоты и времени переключения весьма широки, не существует единого типа полупроводникового ключа универсального применения. Современное состояние силовых приборов достаточно подробно отражено в справочных каталогах и литературе по применению ведущих фирм-производителей, среди которых отметим Infineon Technologies, Mitsubishi Electric, Semikron, Motorola. Лидирующие мировые позиции, новейшие технологические разработки новых поколений, наконец, партнерство в научном и учебном плане заставляют обратить первоочередное внимание именно на достижения этих компаний. Конечно, мы будем обращать внимание и на уникальные разработки других фирм, дополняющие общую картину современного состояния полупроводниковых силовых ключей.

Прежде чем провести оценку достижений полупроводниковых изделий и наметить тенденции их развития, проведем обзор основных исторических этапов разработки силовых ключей (**Рис. 1.1**).

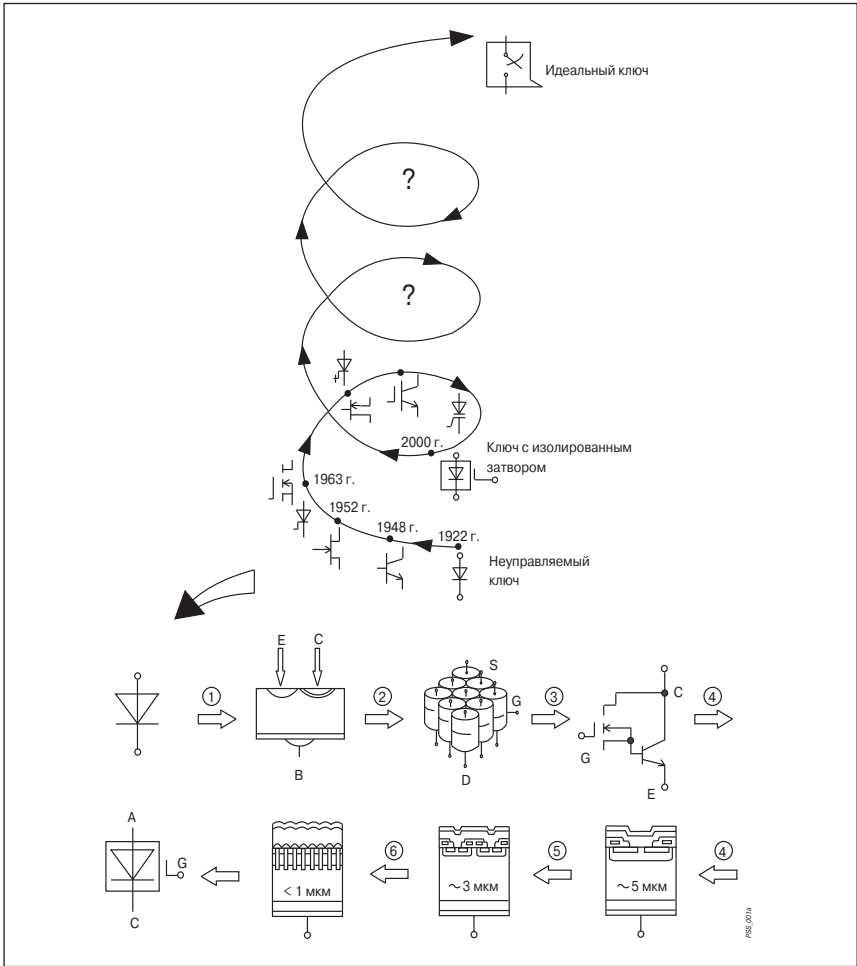


Рис. 1.1

Основные этапы развития силовых полупроводниковых ключей

Каждому из этапов развития, внесшему наиболее значимый вклад в совершенствование свойств полупроводниковых ключей, посвящен отдельный параграф. Чтобы помочь читателю в восприятии всего многообразия информации, перечислим данные этапы в хронологической последовательности с краткой оценкой полученных результатов:

1. Конец 40-х — начало 60-х годов. Разработка основных типов управляемых полупроводниковых ключей (биполярных и униполярных транзисторов и обыкновенных тиристоров) на базе известных теорий твердотельной электроники. Повышение мощности приборов достигается в этот период, как правило, за счет увеличения физических размеров структуры. Для тиристорных ключей подобный подход обеспечивает увеличение коммутируемых токов до 100 А и напряжений до 1000 В. Для транзисторов по-прежнему остается актуальной задача разработки прибора на большие токи с хорошими динамическими показателями.

2. Конец 50-х — начало 70-х годов. Разработка первых полупроводниковых ключей на базе вертикальных и многоканальных структур. Появление планарной и эпитаксиальной технологий, а также совершенствование методов диффузии в полупроводниковые структуры. Разрабатываются промышленные образцы мощных биполярных и полевых транзисторных ключей, способных рассеивать мощность в несколько ватт. Практическое применение первых мощных транзисторов позволило выявить сильные и слабые стороны биполярных и униполярных приборов и сформулировать задачу создания более совершенной комбинированной структуры.

3. 70-е годы. Разработка составных транзисторных и тиристорных ключей на дискретных элементах, сочетающих преимущества биполярных и полевых приборов. Этот период можно характеризовать как схемотехнический этап в преддверии нового технологического скачка.

4. Конец 70-х — начало 80-х годов. Применение усовершенствованных методов интегральной электроники в технологии силовых полупроводниковых ключей. Разработка мощных гибридных модулей. Создание первых поколений совмещенных биполярно-полевых монолитных структур. В этот отрезок времени удастся повысить мощность, переключаемую приборами, более чем в 100 раз. Для транзисторных ключей уровень коммутируемых токов и напряжений составляет сотни ампер и тысячи вольт. Тиристорные ключи становятся полностью управляемыми и захватывают мегаваттный диапазон мощностей.

5. 90-е годы. Совершенствование технологии полупроводниковых ключей в заданном диапазоне мощностей и предельных напряжений. Этот период характеризуется улучшением качественных показателей ключевых приборов по быстродействию и остаточным напряжениям.

6. Конец 90-х годов. Разработка новых поколений силовых ключей с применением субмикронных технологий. Внедрение управляющих структур с изолированным затвором в структуры мощных тиристорных ключей. Широкое применение «разумных» или «интеллектуальных» приборов. Конец XX века демонстрирует тенденцию к созданию универсального полупроводникового ключа, управляемого по изолированному затвору, с мощ-

ностью переключения, соответствующей «тиристорному» диапазону, и остаточным напряжением, близким к прямому напряжению обычного диода.

Итак, почти полувековой путь эволюции развития ключевых приборов представляет собой виток большой спирали, которая устремлена в будущее, к ключу с «идеальными» свойствами. Свое начало спираль берет от обычного диода, как первого (к сожалению, неуправляемого) полупроводникового ключа.

1.2. Воплощение идей в жизнь

Систематические исследования полупроводников были начаты в 30-х годах. В основу первых полупроводниковых ключей были положены теория выпрямления на границе p - n -перехода и открытие принципа полевого эффекта. Усиленное развитие электроники и радиолокационной техники после второй мировой войны поставило задачу создания малогабаритного твердотельного прибора, способного заменить электронную лампу. Исследования завершились созданием Бардиным (Bardeen J.) и Браттейном (Brattain W.) в 1948 году точечного биполярного транзистора (**Рис. 1.2**). В 1949—1950 г. г. Шокли (Shockley W.) на основе германия (Ge) разработал первый маломощный плоскостной биполярный транзистор — БТ (BJT — Bipolar Junction Transistor). Он же в начале 50-х годов сформулировал идею четырехслойной p - n - p -структуры. В 1948 году Шокли попытался изготовить маломощный полевой транзистор — ПТ (FET — Field Effect Transistor) путем напыления слоя германия на диэлектрик. Но потребовались дополнительные годы исследований поверхностных состояний и разработка специальной технологии, чтобы в 1952 году создать полевой транзистор с управляющим p - n -переходом — унитар (Unipolar Transistor) (**Рис. 1.3**). Конструкция первого маломощного транзистора со структурой металл-диэлектрик-полупроводник МДП (MOS — Metal Oxide Semiconductor Transistor) была предложена Хофстейном (Hofstein S.) и Хейманом (Heiman F.) только в 1963 году, когда первых успехов удалось добиться в области интегральной технологии (**Рис. 1.4**).

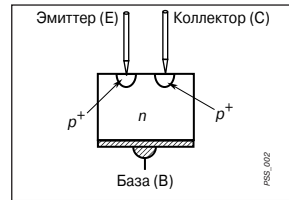


Рис. 1.2

Структура точечного транзистора

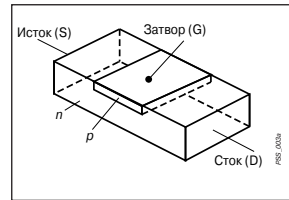


Рис. 1.3

Конструкция унитарного транзистора

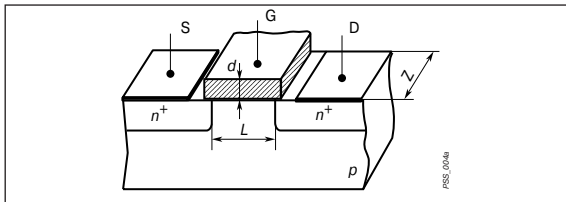


Рис. 1.4

Структура МДП-транзистора

Развитие силовой полупроводниковой электроники начинается в конце 50-х годов. Развитие преобразовательной техники поставило задачу разработки надежного и эффективного полупроводникового ключа, способного вытеснить применявшиеся ранее газоразрядные переключатели. Основой первых силовых приборов становится кремний (Si). Применение кремния позволило расширить температурный диапазон, существенно увеличить пробивное напряжение и мощность приборов. В 1955 году под руководством Молла (Moll J.) исследуются первые кремниевые приборы с тиратронной характеристикой, получившие название тиристоры (Thyristor). А в 1956 году Йорк (York R.) стал инициатором успешного проекта изготовления кремниевого управляемого *p-n-p-n*-переключателя SCR (Silicon Controlled Rectifier) на большие токи. В 1958 году Тешнер (Teszner S.) предпринимает попытку повысить мощность униполярного транзистора за счет использования цилиндрической геометрии. По имени изобретателя этот прибор был назван текнетроном (Tecnatron) (**Рис. 1.5**). Однако простое увеличение физических размеров приборов для повышения коэффициента усиления и амплитуды тока приводило к заметному ухудшению частотных свойств ключа. Увеличение площадей переходов и повышение допустимых напряжений увеличивали паразитные емкости и сопротивления каналов. Для тиристоров в их первоначальных вариантах применения (контакты, коммутаторы тока, регуляторы напряжения в выпрямителях) это не представляло особой проблемы. Основная задача при разработке их первых промышленных образцов состояла в повышении ра-

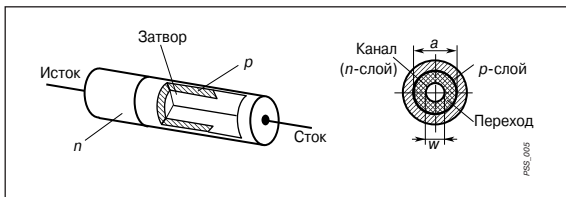


Рис. 1.5

Конструкция текнетрона

бочих токов и напряжений в целях полной замены газоразрядных приборов. К началу 60-х годов были изготовлены управляемые полупроводниковые вентили на токи до сотен ампер и напряжения запираения

до 1000 В. Наоборот, для транзисторных ключей на первый план выходит решение проблемы создания высокочастотного прибора на относительно большие рабочие токи.

1.3. Первое «обустройство» транзистора

Используя как основной параметр для оценки качества транзисторного ключа добротность, исследователи установили, что ее повышение возможно только за счет уменьшения длины канала протекания тока. Добротность (или, другими словами, показатель качества) усилительного прибора в общем случае равна произведению коэффициента усиления на полосу рабочих частот. Применительно к полевым транзисторам этот параметр прямо пропорционален передаточной крутизне и обратно пропорционален величине входной емкости затвора. Для биполярного транзистора добротность тем выше, чем меньше время пролета носителей. Общим влияющим фактором на перечисленные составляющие показателя качества является длина канала протекания рабочего тока. Уменьшая его геометрические размеры, можно добиться увеличения добротности. Вертикальная структура позволила получить этот параметр на порядок больше по сравнению с планарными приборами. С другой стороны, одноканальная вертикальная структура уступала планарному аналогу по тепловым свойствам. Чтобы добиться хороших тепловых характеристик, было предложено применить вертикальные структуры приборов с множеством параллельных каналов (**Рис. 1.6**). Первыми высокочастотными приборами, способными отдавать мощность порядка нескольких ватт на частоте до 100 МГц, были униполярные транзисторы вертикального типа. В опубликованных в 1964 году работах Тешнера и Зулига (Zuleeg R.) представлены структуры гридистора (Gridistor) и многоканального полевого транзистора (Multi-Channel Field Effect Transistor) (**Рис. 1.7, 1.8**). В это же время японский специалист

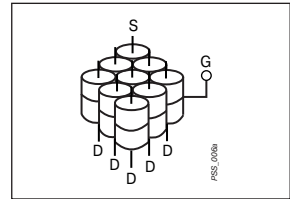


Рис. 1.6

Многоканальная структура транзистора

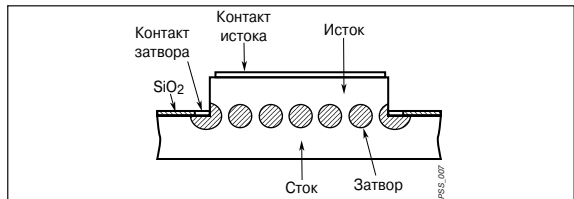


Рис. 1.7

Поперечное сечение структуры гридистора

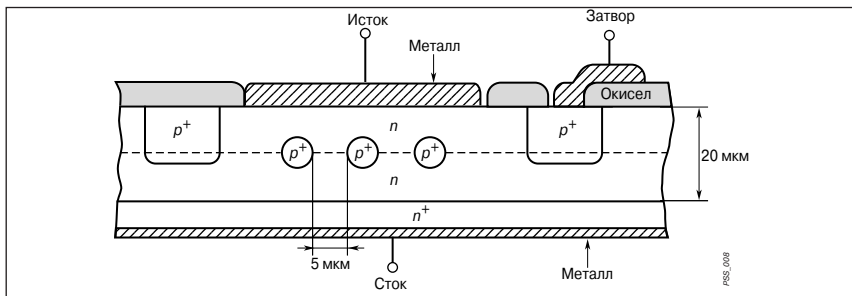


Рис. 1.8

Поперечное сечение структуры многоканального полевого транзистора

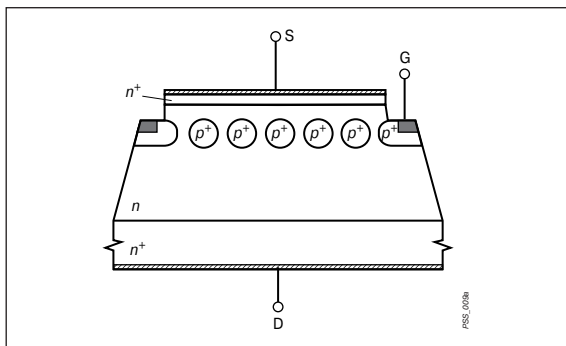


Рис. 1.9

Структура транзистора со статической индукцией (СИТ)

Нишидзава (Nishizawa J.) разработал аналоговый транзистор (Analog Transistor), названный позднее статическим индукционным транзистором — СИТ (SIT — Static Induction Transistor), способный управлять относительно высокой мощностью в диапазоне частот до 5 МГц (Рис. 1.9). Для изготовления мощных би-

полярных транзисторов была применена эпитаксиальная технология с методом двойной диффузии. Эта же технология была использована фирмой Japanese Electrotechnical Laboratory для создания в 1969 году первого мощного V-образного вертикального МДП-транзистора (VMДП) (Рис. 1.10). Несмотря на большое обилие названий первых мощных транзисторов, разработанных к началу 70-х годов, среди них выделялись три основных типа: биполярные транзисторы, транзисторы с управляющим p - n -переходом и МДП-транзисторы. К этому времени уже накопился некоторый опыт их промышленного применения, что позволило проанализировать и выделить сильные и слабые стороны транзисторных ключей.

Движение тока в биполярных транзисторах основано на явлениях инжекции, переноса и собирания носителей. При этом в качестве рабочих носителей могут использоваться как электроны, так и дырки: инжекция

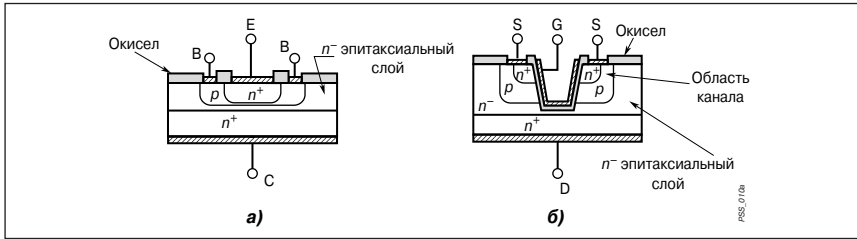


Рис. 1.10

Структура вертикального биполярного транзистора (а) и V-образного МДП-транзистора (б)

неосновных носителей одного знака сопровождается компенсацией образующегося заряда основными носителями другого знака. Отсюда и происходит название приборов. Биполярные — то есть использующие носители разных полярностей. Тиристоры тоже относятся к биполярным ключам. Принципы их работы хорошо иллюстрирует разработанная еще в начале 50-х годов двухтранзисторная модель Эберса (Ebers J.). В противоположность этому униполярные транзисторы и с управляющим p - n -переходом, и со структурой МДП используют только основные носители заряда, движение которых управляется напряжением на затворе, т.е. электрическим полем. Это дало второе общеупотребительное название униполярным приборам — полевые. Отсутствие явления инжекции и необходимости рассасывания заряда неосновных носителей при выключении определило целый ряд преимуществ полевых транзисторов перед биполярными:

1. Коэффициент усиления биполярных транзисторов из-за снижения коэффициента инжекции резко уменьшается в области больших токов. С ростом предельно допустимого запираемого напряжения эта проблема еще более усугубляется. Крутизна полевых транзисторов с коротким каналом из-за ограничения скорости движения носителей практически неизменна в области рабочих токов. Это обеспечивает большую устойчивость полевых транзисторов к токовым перегрузкам по сравнению с биполярными.

2. Большие токи управления с учетом снижения коэффициента усиления резко повышают мощность потерь в цепях управления биполярными приборами. Наоборот, высокое входное сопротивление полевых транзисторов и малый динамический заряд управления позволяют эту мощность значительно снизить, особенно в статических режимах.

3. Отсутствие накопленного заряда неосновных носителей обеспечивает высокую скорость переключения полевых транзисторов и лучшие динамические характеристики по сравнению с биполярными аналогами.

Еще одно преимущество полевых транзисторов связано с однородностью их полупроводниковой структуры. Однородный полупроводник об-

ладает положительным температурным коэффициентом сопротивления. Таким образом, полевой транзистор обладает теплоустойчивостью и способностью к самовыравниванию плотностей протекающего тока. В биполярных структурах в противоположность этому присутствует эффект локального перегрева. Таким образом, полевые транзисторы менее подвержены резким изменениям токовой нагрузки, что особенно ценно в многоканальных структурах.

Эти очевидные преимущества первых промышленных образцов мощных полевых транзисторов вызвали к середине 70-х годов настоящую эйфорию, позволившую говорить о вытеснении и полной замене широко распространенных биполярных транзисторов во многих областях применения. Однако на практике все оказалось не так просто. Напряжение насыщения высоковольтных биполярных транзисторов оставалось много меньше, чем у аналогичных по параметрам полевых приборов. Это следствие высокого сопротивления канала протекания тока, увеличивающегося с ростом пробивных напряжений, плюс высокая стоимость технологических операций ограничили область использования полевых транзисторов устройствами высокочастотного применения и низковольтными (менее 100 В) схемами. Другим ограничивающим фактором оказалось вроде бы положительный эффект увеличения сопротивления кремниевого полупроводника. Оказалось, что из-за высокого температурного коэффициента сопротивления открытого канала практически удваивается при температуре кристалла близкой к 150°C. Эта температура и оказалась критической для применения полевых транзисторов, тогда как биполярные приборы имели аналогичную температуру равную 200°C. Разность в 50°C, плюс снижение порогового напряжения с повышением температуры ограничили применение мощных полевых транзисторов во многих областях применения с температурой окружающей среды близкой к 100°C.

Проведенный анализ и полученные результаты сравнения не могли не подвигнуть разработчиков электронных схем к попыткам скомбинировать полезные свойства полевых и биполярных структур. Отсутствие монолитной и гибридной технологии изготовления комбинированных приборов в начале 70-х годов не остановило исследователей в попытках получения универсального прибора на основе дискретных составляющих.

1.4. В единстве всегда сила

Задача заключалась в получении высоковольтного прибора с высоким входным сопротивлением и низким остаточным напряжением при сохранении высоких динамических показателей. Первые разработки

были связаны с попытками приблизить характеристики биполярного ключа к полевому по схеме сдвоенного эмиттерного повторителя Дарлингтона (**Рис. 1.11**).

В этой схеме обеспечивался высокий коэффициент усиления, приблизительно равный произведению коэффициентов передачи составных транзисторов, и относительно большое входное сопротивление. Была даже разработана технология изготовления двух транзисторов на одном кристалле для схем быстрого переключения. Однако время выключения, составлявшее несколько мкс, на порядок и более уступало полевым транзисторам. А если учесть, что напряжение насыщения транзисторной сборки значительно увеличивалось с одновременным ростом потребляемой мощности, то неудивителен ограниченный круг применения этой схемы для температурного диапазона, не превышающего 140°C. В 1978 году была разработана схема составного транзистора (**Рис. 1.12**), где в качестве управляющего ключа использовался МДП-транзистор, изготовленный по технологии V-МДП.

Прибор, названный побистором, т.е. сочетающий свойства полевого и биполярного ключа, при незначительной мощности в цепи управления обеспечивал переключение тока в несколько десятков ампер при скорости переключения 200...400 нс. Позднее аналогичные ключи, изготовленные по гибридной технологии, были использованы для управления приводом электродвигателей. Недостатки схемы связаны с низким коэффициентом усиления биполярного транзистора (для высоковольтных структур не более 10), применением МДП-транзистора того же класса напряжения, что увеличивало размер ключа, и необходимостью использования специальной схемы смещения, усложняющей управление. Для увеличения скорости записи была использована комбинированная схема с двумя разнополярными МДП-транзисторами (**Рис. 1.13**), получившая название MGT (MOS Gate Bipolar Transistor). Однако это увеличивало стоимость ключа.

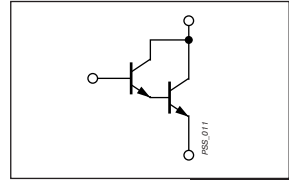


Рис. 1.11

Схема Дарлингтона

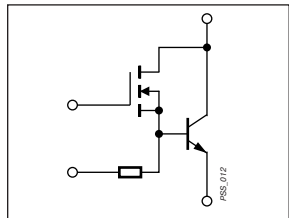


Рис. 1.12

Схема составного транзистора-побистора

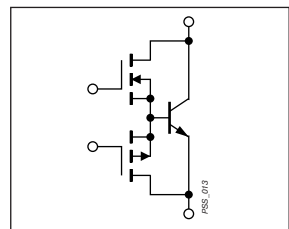


Рис. 1.13

MGT-транзистор