**Оглавление**

[ГЛАВА 12. ЭВОЛЮЦИЯ СИЛОВЫХ ПОЛУПРВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ 1](#_Toc463483940)

# **ГЛАВА 12. ЭВОЛЮЦИЯ СИЛОВЫХ ПОЛУПРВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ**

Мощные полупроводниковые приборы являются теми компонентами, которые определяют эффективность, габариты и стоимость электронных систем для управления энергией. Быстро увеличивающаяся потребность контролируемых силовых электронных системах стимулирует исследования новых материалов новых материалов, структур и топологий для таких приборов. Современные мощные приборы неизменно изготавливаются с использованием кремния как основного материала. Среди перспективных полупроводниковых материалов наибольшее внимание привлекает карбид кремния, арсенид галлия и нитрид галлия.

Таблица 12.1 Сравнительные характеристики полупроводниковых материалов, и электрических параметров ультрабыстрых диодов на Si, GaAs, SiC и GaN.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Свойство | Si | GaAs  (p-i-n) | 4H-SiC | GaN |
| Ширина запрещенной зоны, эВ | 1,12 | 1,43 | 3,26 | 3,45 |
| Диэлектрическая проницаемость | 11,9 | 13,1 | 10,1 | 9 |
| Критическая напряженность электрического поля, кВ/см | 300 | 455 | 2200 | 2000 |
| Подвижность электронов,  см­­2/В·с | 1500 | 10000 | 900 | 1000 |
| Подвижность дырок, см­­2/В·с | 600 | 400 | 115 | 850 |
| Коэффициент теплопроводности, Вт/см·К | 1,5 | 0,46 | 4,9 | 1,3 |
| Скорость дрейфа электронов в режиме насыщения, 107см/c | 1 | 1,5 | 2 | 2,2 |
| Предельная рабочая температура p-n перехода | +175 | +260…+300 | +175…+200 | +200 |
| Отсечка прямого напряжения p-n-перехода, B | 0,6 | 1,05 | 2,8 | 2,9 |
| Прямое падение напряжения , B | 1,5 | 1,8 | 1,5 | 1,6 |
| Время восстановления обратного сопротивления, нс () | 40 | 22 | 10 (ДБШ) | 30 (GaN/Si) |

Во всех современных зарубежных и отечественных публикациях по силовой электронике предпочтение отдается SiC и GaN как материалам, значительно превосходящим по своим физическим параметрам Si и GaAs. На первый взгляд, это логично, а именно:

- удельное сопротивление приборов в открытом состоянии на порядок меньше;

- радиационная стойкость очень высокая;

- теплопроводность, особенно у SiC, исключительно высокая;

- обратные токи - почти нулевые (ширина запрещенной зоны);

- накопленные заряды - сверхмалые;

- быстродействие…

Необходимо отметить, что силовые приборы на Si, GaAs, SiC создаются либо на монокристаллах, либо на базовых гомоэпитаксиальных слоях, т. е. в качестве подложек используется «родной» кристалл, в то время как качественных коммерческих монокристаллических GaN-подложек пока нет. Выращивание эпитаксиальных GaN-структур на монокристаллических подложках SiC и Si осложняется кристаллографическими несоответствиями на границе раздела двух полупроводников, что приводит к механическим напряженностям и высокой дефектности структур, следовательно, и к их высокой стоимости.

При проектировании мощных приборов и технологических процессов их изготовления ученые ведут поиск новых разработок для совершенного полупроводникового переключателя, определяемого следующими отличительными знаками:

1. Очень низкие потери управления: переключатель имеет высокий входной импеданс, так что управляющий ток бесконечно мал. Кроме того, управляющая схема проста и дешева.
2. Незначительные потери в состоянии «включено» или прямой проводимости: падение прямого напряжения при рабочем токе равно нулю. Кроме того, плотность рабочего тока велика, что делает чип малым по размеру и рентабельным для данной токонесущей мощности.
3. Минимальные потери в состоянии «выключено» или обратного запирания: бесконечно большое обратное запирающее напряжение вместе с нулевым током утечки, даже когда прибор работает при повышенных температурах.
4. Чрезвычайно низкие потери переключения: длительности как включения, так и выключения почти равны нулю. Для систем постоянного тока (длительность периода = ∞) и низкочастотных применений (период значительный, но конечный) эти потери очень малы, поскольку времена переключения намного меньше, чем длительность соответствующего периода.

В настоящее время в применениях, где не требуется способность к управляемому запиранию, тиристоры и приборы с наиболее высокой плотностью мощности, являются основополагающими компонентами силовой электроники, имеющие высокие прямые токи величиной при прямом падении напряжения В, и выдерживающие В в обратном (запирающем) направлении. Тиристоры долго были единственными приборами, удовлетворяющими мегаваттному диапазону мощностей, пригодными в таких номиналах как 12 кВ/1,5 кА, 7,5 кВ/1,65 кА, 6,5 кВ/2,65 кА и т.д. В применениях, где ток нагрузки как включается, так и выключается входным сигналом, широко используются мощные биполярные транзисторы БПТ.

На мировом рынке представлены тысячи типономиналов высоковольтных биполярных кремниевых транзисторов, от единиц ампер до килоампер, с напряжениями до 2 кВ и выше. В стандартных диапазонах до 200 В кремниевые БПТ демонстрируют время спада до 50 нс, до 1200 В — 0,12 мкс, до 1500 В —0,2 мкс. Но большие времена рассасывания неосновных носителей (~1,2–1,5 мкс) допускают реализацию эффективных преобразователей на частоты не более 50 кГц.

Модульные двойные или тройные пары Дарлингтона (пара Дарлингтона – составной транзистор с объединенными коллекторами, включенный по схеме база - эмиттер) (1200В, 800А) используются в конвертерах с частотой переключения до нескольких килогерц. Хотя биполярные транзисторы имеют время выключения мкс, они требуют очень высокого управляющего базового тока как во включенном состоянии, так и во время выключения.

Другими приборами, подходящими для систем с управляющим электродом являются мощные кремниевые МОПТ: с V-образной канавкой (VМОП), горизонтальные с двойной диффузией ГДМОП и, особенно, вертикальные с двойной диффузией ВДМОП и COOL-MOS, которые закрывают диапазон 200…1500В. Приборы имеют частоты переключения 100кГц с временами включения и выключения менее 100нс. Высокая скорость переключения, легкость управления, широкая область устойчивой работы и способность выдерживать высокие скорости нарастания прямого напряжения делают их логическим выбором силовой схемотехники. Однако, они работают с униполярной проводимостью, поэтому их сопротивление в открытом (включенном) состоянии сильно возрастает при увеличении напряжения исток-сток.

Тем не менее на пороге SiC-МОПТ — совсем другой класс приборов, со значениями сопротивления сток-исток открытого транзистора на порядок ниже, чем у кремниевых МОПТ. Это уже революция в области мощных приборов с MOП-управлением.

В настоящее время показана возможность работы 1200-В SiC-МОПТ на частотах вплоть до 1 МГц при мощности 1,2 кВт.

Особенности, преимущество и недостатки мощных биполярных и МОПТ структур приведены в Таблице 12.2.

Таблица 12.2 Особенности, за и против МОП и биполярных транзисторов

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | **МОП-транзисторы** | **Биполярные транзисторы** |
| No. | **Особенности**: | **Особенности**: |
| 1 | Однозарядный прибор | Двузарядный прибор |
| 2 | Работает дрейфом основных носителей | Работает диффузией неосновных носителей |
| 3 | Управляется напряжением | Управляется током |
| 4 | Ток стока определяется шириной канала и концентрацией носителей | Ток коллектора определяется длиной и площадью эмиттера |
| 5 | Более высокое пробивное напряжение достигается использованием слаболегированной области стока | Более высокое пробивное напряжение требует слаболегированной области коллектора |
| 6 | Плотность тока для данного падения напряжения высокая при низких напряжениях и низкая при высоких напряжениях | Плотность тока для данного падения напряжения средняя, и существует трудность со скоростью переключения |
| 7 | Квадратичные вольтамперные характеристики при низких токах и линейные I-V при высоких токах | Экспоненциальные I-V характеристики |
| 8 | Отрицательный температурный коэффициент тока стока | Положительный температурный коэффициент тока коллектора |
| 9 | Слабое накопление заряда на емкости затвор-канал | Накопление заряда в базе и коллекторе |
|  | **За:** | **Против**: |
| 1 | Высокий входной импеданс Z ~ 109-1011Ω | Низкий входной импеданс *Z*~ 103-105Ω |
| 2 | Минимальная управляющая мощность. На затворе не требуется никакого постоянного тока. | Высокая управляющая мощность. На базе постоянно требуется постоянный ток. |
| 3 | Простая управляющая схема | Сложная управляющая схема, т.к. требуются большие положительные и отрицательные токи. |
| 4 | Более линейное функционирование и меньше гармоник | Больше интермодуляционных и перекрёстных составляющих |
| 5 | Приборы легко могут быть соединены параллельно | Приборы не могут быть легко соединены параллельно |
| 6 | Нет теплового убегания | Склонны к тепловому убеганию |
| 7 | Менее восприимчивы к вторичным пробоям | Уязвимы к вторичным пробоям |
| 8 | Максимальная рабочая температура 200С | Максимальная рабочая температура до 150С |
| 9 | Очень низкие потери переключения | Потери переключения от средних до высоких в зависимости от компромисса с потерями проводимости |
| 10 | Высокая скорость переключения, которая меньше чувствительна к температуре | Более низкая скорость переключения, которая больше чувствительна к температуре |
|  | **Против**: | **За**: |
| 1 | Высокое сопротивление включения | Низкое сопротивление включения |
| 2 | Высокая активная межэлектродная проводимость | Низкая активная межэлектродная проводимость |

В отдельную группу нужно выделить биполярные транзисторы с изолированным затвором БТИЗ (IGBT), которые сочетают в себе как достоинства МОПТ - малые мощности управления, так и достоинства БПТ – малое сопротивление открытого прибора.