

ГЛАВА 11. ЭВОЛЮЦИЯ СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ 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, 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 11.1 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, $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	1500	10000	900	1000
Подвижность дырок, $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	600	400	115	850
Коэффициент теплопроводности, Вт/см·К	1,5	0,46	4,9	1,3
Скорость дрейфа электронов в режиме насыщения, 10^{11} см/с	1	1,5	2	2,2
Предельная рабочая температура р-п перехода $T_n, ^\circ\text{C}$	+1115	+260...+300	+1115...+200	+200
Отсечка прямого напряжения р-п-перехода, В	$\approx 0,6$	1,05	2,8	2,9
Прямое падение напряжения $U_{\text{пр}}, \text{В}$	1,5	1,8	1,5	1,6
Время восстановления обратного сопротивления $\tau_{\text{восст}}, \text{нс}$ ($I_{\text{пр}} = 8\text{А}, U_{\text{обр}} = 600\text{В}$)	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;
- быстроедействие...

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 напряжениям 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 запирающего: 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 $\sim 3500\text{А}$ при прямом падении напряжения $< 2\text{ В}$, и выдерживающие $\geq 6000\text{ В}$ в обратном (запирающем) направлении. Тиристоры долго были единственными приборами, удовлетворяющими мегаваттному диапазону мощностей, пригодными в таких номиналах как $12\text{ кВ}/1,5\text{ кА}$, $11,5\text{ кВ}/1,65\text{ кА}$, $6,5\text{ кВ}/2,65\text{ кА}$ 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 типонаминов 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 — $0,12\text{ мкс}$, до 1500 В — $0,2\text{ мкс}$. Но большие времена рассасывания неосновных носителей ($\sim 1,2\text{--}1,5\text{ мкс}$) 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 $< 1\text{ мкс}$, 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 $200\text{...}1500\text{В}$. Приборы имеют частоты переключения $\sim 100\text{ кГц}$ с временами включения и выключения менее 100 нс . Высокая скорость переключения, легкость управления, широкая область устойчивой работы и способность выдерживать высокие скорости нарастания прямого напряжения (dV/dt) 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 МОП-управлением.

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

Особенности, преимущество и недостатки мощных биполярных и МОПТ структур приведены в Таблице 11.2.

Таблица 11.2 Особенности, за и против МОП и биполярных транзисторов

	МОП-транзисторы	Биполярные транзисторы
№.	Особенности:	Особенности:
1	Однозарядный прибор	Двухзарядный 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
11	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 $Z \sim 10^9 - 10^{11} \Omega$	Низкий входной импеданс $Z \sim 10^3 - 10^5 \Omega$
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	Больше интермодуляционных и

	функционирование и меньше гармоник	перекрёстных составляющих
5	Приборы легко могут быть соединены параллельно	Приборы не могут быть легко соединены параллельно
6	Нет теплового убегания	Склонны к тепловому убеганию
11	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.