

ДАЛЬНЕЙШЕЕ РАЗВИТИЕ ПРИБОРОВ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ – ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ШИРОКОЗОННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Литвинова А.В.

*Белорусский национальный технический университет
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Ефименко С.А. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры ПИКС

Аннотация. В настоящее время кремний достиг своих пределов в качестве основного материала силовой электроники. В ряде применений постепенно его заменят широкозонные полупроводники. Использование мощных GaN- или SiC-транзисторов приводит к более простым и эффективным решениям для преобразования энергии. Показано преимущество использования широкозонных полупроводников в качестве материалов для полупроводниковых приборов силовой электроники.

Ключевые слова: силовая электроника, широкозонный полупроводник, нитрид галлия, карбид кремния

Введение. Основные полупроводниковые материалы для силовой электроники — Si, GaAs, SiC, GaN, в скором времени к ним присоединятся алмазы [1]. Отличительным признаком материалов является ширина запрещенной энергетической зоны, т. е. разница в энергиях частицы-носителя заряда, когда она находится в связанном энергетическом состоянии (валентная зона) и в свободном состоянии — как составляющая токодвижения (проводимости) в кристаллической решетке полупроводника.

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

- напряженность электрического поля у SiC и GaN (электрическая прочность) на порядок выше, чем у Si или GaAs;
- удельное сопротивление приборов в открытом состоянии на порядок меньше;
- радиационная стойкость очень высокая;
- теплопроводность, особенно у SiC, исключительно высокая;
- обратные токи — почти нулевые (из-за большой ширины запрещенной зоны);
- накопленные заряды — сверхмалые;
- быстродействие - высокое и др. [1].

Таблица 1 содержит количественные характеристики полупроводниковых материалов. Приведено наглядное сравнение возможных областей применения Si, SiC и GaN по параметрам: ширина запрещенной зоны, напряженность электрического поля пробоя, подвижность электронов, дрейфовая скорость, диэлектрическая постоянная, теплопроводность, плотность, температура плавления.

Указанные характеристики позволяют разрабатывать и изготавливать более мощные и более быстродействующие приборы на основе GaN и SiC по сравнению с приборами на основе Si.

Таблица 1. Сравнение свойств полупроводниковых материалов

Параметр	Si	GaAs	GaN	3C-SiC	4H-SiC	6H-SiC	Алмаз
Ширина запрещенной зоны, E_g , эВ	1,12	1,42	3,39	2,2	3,26	3,0	5,5
Напряженность поля пробоя, E_c , МВ/см	0,3	0,4	3,3	2,0	3,0	3,0	6,0
Подвижность электронов, μ , см ² /В с	1400	8500	900	800	1000	460	2200
Дрейфовая скорость электронов (насыщения), V_{sat} , см/с	10^7	$2 \cdot 10^7$	$2,5 \cdot 10^7$	$2,7 \cdot 10^7$	$2,7 \cdot 10^7$	$2,0 \cdot 10^7$	$2,7 \cdot 10^7$
Диэлектрическая постоянная, ϵ_r	11,8	11,1	9,0	9,7	9,7	9,7	5,5
Теплопроводность, λ , Вт/см К	1,5	0,5	1,3	3,6	3,7	4,9	20
Плотность, ρ , г/см ³	2,33	5,32	6,15	3,21	3,21	3,21	3,51
Температура плавления, $T_{пл}$, °С	1414,85	1238	2500	2730	2730	2730	3700

На рисунке 1 показаны области рекомендуемого применения Si, GaN, SiC и других видов мощных полупроводниковых приборов в осях «частота – мощность».

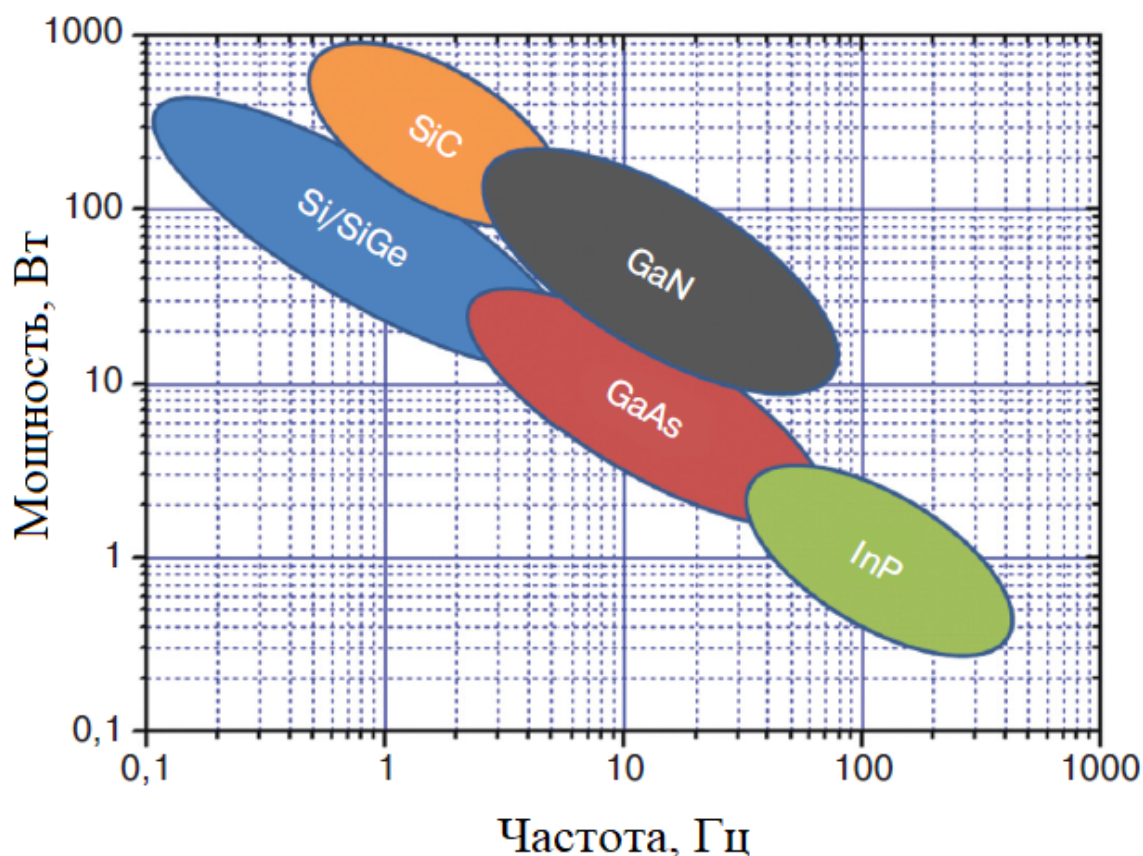


Рисунок 1 - Области рекомендуемого применения Si, GaN, SiC и других видов мощных полупроводниковых приборов

Карбид кремния используется в сверхбыстрых высоковольтных диодах Шоттки, n-МОП-транзисторах и в высокотемпературных тиристорах. По сравнению с приборами на основе кремния и арсенида галлия приборы из карбида кремния имеют следующие преимущества:

- в несколько раз большая ширина запрещенной зоны;
- в десять раз большая электрическая прочность;
- высокие допустимые рабочие температуры (до 600 °С);
- теплопроводность в три раза больше, чем у кремния, и почти в десять раз больше, чем у арсенида галлия;
- устойчивость к воздействию радиации;
- стабильность электрических характеристик при изменении температуры и отсутствие дрейфа параметров во времени.

Нитрид галлия широко используется для создания светодиодов, полупроводниковых лазеров, сверхвысокочастотных транзисторов.

Перспективным направлением использования нитрида галлия является военная электроника, в частности твердотельные приемопередающие модули на основе GaN активной фазированной антенной решетки (АФАР). В Европе лидером в разработке и применении в АФАР технологии приемопередающих модулей (ППМ) на основе GaN является компания Airbus Defence and Space [2].

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. В принципе эти же проблемы проявляются и при использовании технологии выращивания на полуизолирующем AlN. Поэтому практически все технологические исполнения GaN-приборов являются горизонтальными, в то время как приборы на Si, GaAs, SiC имеют вертикальную технологическую структуру диодов, транзисторов, тиристоров. В этом пока заключается их огромное технологическое и коммерческое преимущество над мощными GaN-приборами [1]. Наибольшее распространение в настоящее время в качестве материала подложек нитридной эпитаксии получили сапфир (Al_2O_3), карбид кремния (SiC) и кремний (Si).

С точки зрения создания мощных приборов самое перспективное свойство нитрида галлия для силовой электроники – возможность формирования AlGaN/GaN гетероструктурных полевых транзисторов с малым сопротивлением в открытом состоянии (R_{dsON}). Благодаря высоким значениям подвижности и концентрации носителей заряда двухмерного электронного газа, формируемого у границы раздела гетероструктуры, ток насыщения такой структуры велик, а благодаря большой ширине запрещенной зоны материала велика и выходная мощность устройств на основе AlGaN/GaN-приборов. При этом общий заряд затвора и заряд затвора относительно стока (Q_g и Q_{gd} соответственно), требуемые для переключения транзистора, меньше, чем у кремниевых приборов такой же мощности. А чем меньше Q_{gd} , тем выше скорость переключения и тем меньше потери транзистора.

Кроме того, благодаря большой ширине запрещенной зоны транзисторы на основе нитрида галлия имеют более высокую рабочую температуру по сравнению с приборами на основе кремния. Так, в настоящее время продемонстрирована работа GaN полевых транзисторов при температуре 300 °С, а также при 1000 °С в вакууме (максимальная рабочая температура кремниевых транзисторов – 140–150 °С).

Следует отметить ряд технологических сложностей при изготовлении приборов на основе широкозонных полупроводников. Так главной проблемой при получении кристаллов SiC является отсутствие у него при реально технически достижимых давлениях жидкой фазы, а также высокие температуры синтеза этого алмазоподобного материала [2]. При производстве приборов на основе нитрида галлия невозможно использовать такие базовые для

кремниевой технологии операции как диффузия примесей и окисление. Основным способом формирования легированных GaN – структур является послойное эпитаксиальное наращивание [3, 4].

Заключение. Таким образом, приборы на основе GaN, SiC имеют более высокие рабочие и пробивные напряжения, большую плотность рассеиваемой мощности, меньшие значения сопротивления R_{dsON} , лучшие частотные характеристики, более высокую радиационную стойкость и рабочую температуру, чем приборы на основе кремния.

Список литературы

1. Войтович В. Si, GaAs, SiC, GaN — силовая электроника. Сравнение, новые возможности / В. Войтович, А. Гордеев, А. Думаневич // Силовая электроника. – 2010. – №5. – с. 4-10.
2. Белоус, А. И. Основы силовой электроники / А.И. Белоус, С.А. Ефименко, В.А. Солодуха, В.А. Пилипенко.- Москва: «Техносфера», 2019.- 424с.
3. Ржеутский, Н.В. Аммиачная молекулярно-пучковая эпитаксия гетероструктур AlGaIn на подложках сапфира / Н.В. Ржеутский, Я.А. Соловьёв, А.Г. Войнилович, И.Е. Свитенков, А.Н. Петлицкий, Д.В. Жигулин, Е.В. Луценко // Доклады БГУИР.- Минск, 2019, №7.- с. 144 – 151.
4. Юник, А.Д. Формирование AlGaIn/AlGa гетероструктур для силовой и СВЧ электроники с помощью аммиачной молекулярно-пучковой эпитаксии / А.Д. Юник, научный руководитель Я.А. Соловьёв // Материалы 57-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов, БГУИР. – Минск, 19–23 апреля 2021г.- с. 289-291.

UDC 621.382

FURTHER DEVELOPMENT OF POWER ELECTRONICS DEVICES – THE USE OF WIDE BAND GAP SEMICONDUCTORS

Litvinova A.V.

Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

Efimenko S.A. – PhD, associate professor, associate professor of the Department of ICSD

Annotation. Currently, silicon has reached its limits as the main material of power electronics. In a number of applications, it will gradually be replaced by wide band gap semiconductors. The use of high-power GaN or SiC transistors leads to simpler and more efficient solutions for energy conversion. The advantage of using wide band gap semiconductors as materials for semiconductor devices of power electronics is shown.

Keywords: power electronics, wide band gap semiconductor, gallium nitride, silicon carbide.