

Новые электронные приборы на основе GaAs и их применение в различных видах приводов

Александр Гордеев (г. Ульяновск)

В статье рассматриваются вопросы применения ВЧ и СВЧ силовых i-GaAs компонентов для управления ионно-плазменными, индукционными и ДВС-двигателями.

ЭЛЕКТРОПРИВОД

Принцип действия любых типов электропривода основан на преобразовании электрической энергии в достаточно мощное магнитное поле, которое при взаимодействии с электрическим преобразуется в механическую энергию. Получаемая при этом мощность определяется в значительной мере достигаемой напряжённостью магнитного поля. В то же время напряжённость магнитного поля прямо пропорциональна скорости изменения тока в проводнике, это поле формирующем.

Для управления работой двигателя в настоящее время всё чаще применяют импульсные частотозадающие генераторы, позволяющие за счёт полупроводниковых коммутирующих элементов формировать в обмотках ток, изменяющийся по заданному закону с нужной скоростью. Для повышения КПД таких генераторов и достижения высоких частот вращения необходимо использование как можно более быстродействующих переключающих элементов, способных коммутировать значитель-

ные напряжения и токи (единицы киловольт при токах в сотни ампер). Следует отметить, что крайне желательно обеспечить работоспособность этих силовых элементов и управляющих схем при максимально возможных температурах, что позволит упростить задачу отвода тепла и повысит надёжность и долговечность систем в целом.

В последние годы достаточно активно ведутся работы по созданию высокочастотной силовой электроники на основе арсенид-галлиевых полупроводников методом кристаллизации из жидкой фазы (LPE i-GaAs). Последние достижения в этой области [1] дают уверенность в возможности серийного производства систем управления электроприводом (и другими двигателями, основанными на использовании электроэнергии) принципиально нового поколения.

Следует особо отметить, что арсенид-галлиевые приборы в рамках технологии выращивания из жидкой фазы могут быть любого известного типа, то есть возможно изготовление

биполярных и полевых транзисторов (в том числе с изолированным затвором и управляющим p-n-переходом), тиристоров (в том числе и оптотиристоров), IGBT-модулей, диодных ключей (в том числе диодных столбов для повышения рабочего напряжения) и т.д.

В таблице приведены предельные характеристики для i-GaAs приборов, рассчитанных на допустимые напряжения до 1200 В.

Радикальное повышение доступных скоростей изменения тока при использовании i-GaAs приборов даёт возможность значительно улучшить и конструкцию собственно электродвигателей, так как снижаются необходимые значения индуктивности обмоток, что ведёт к уменьшению их веса при той же мощности. Повышение удельной мощности на единицу веса является крайне важной характеристикой для множества приложений, особенно для аэрокосмической промышленности и других транспортных средств.

Например, в современном авиалайнере А-380 используется не менее 300 различных электродвигателей, питаемых относительно низковольтной бортовой сетью переменного тока. Повышение напряжения в такой сети до 220/380 В и увеличение рабочей частоты преобразователей, что становится возможным при использовании i-GaAs ключевых и управляющих компонентов, позволит снизить не только массу собственно электродвигателей, но и соединительных проводов.

Фактически можно сделать вывод, что силовые приборы нового поколения позволяют радикально улучшить все основные характеристики систем электропривода, что особенно важно для таких быстроразвивающихся сфер применения, как беспилотные летательные аппараты (в том числе с использованием солнечной энергии), гиперзвуковые ЛА и, наконец, электро-мобили, позволяя в последнем случае значительно упростить проектирование моторных колёс.

Дополнительные сведения об ожидаемых характеристиках LPE i-GaAs приборов можно почерпнуть из публикаций [1, 2].

Предельные характеристики i-GaAs полупроводниковых приборов различного типа

Классы приборов	Максимальное значение токов и напряжения (для кристалла)	Скорость нарастания di/dt, А/с	Время восстановления заряда при +250°С, нс	Предельная частота коммутации, МГц	Предельная рабочая температура, °С
UFRED	200 А, 1200 В	$(1-5) \times 10^9$	50	3,0	+250
COOL	800 А, 1200 В	до 10^{10}	120	2,0	
GTO	300 А, 1200 В	10^{10}	100	2,0	
МСТ/ЕТО	300 А, 1200 В	10^{10}	20	4,0	
Оптотиристор	300 А, 1200 В	5×10^{11}	100	5,0	
Биполярные п-р-п и р-п-р	100 А, 1200 В	5×10^{10}	30	10,0	
IGBT (п-канальные, р-канальные)	300 А, 1200 В	5×10^9	50	3,0	
MOSFET (п-канальные, р-канальные)	50 А, 1200 В	5×10^9	10	10,0	
JFET (с защитным входным диодом, п- и р-канальные) ¹	100 А, 1200 В	5×10^{11}	10	30,0	
Столбы	(10-100) А, 6500 В	2×10^9	50	2,0	

¹ Во входную цепь затвора JFET (в цепь управления р-п-затвора) включается GaAs диод с нулевым начальным прямым смещением U_{F0} и со значениями $U_{F \max} \leq 0,3$ В; $U_{F \text{рпм}} \gg U_{GS}$ (обратное напряжение), ёмкость входного диода на порядок (и более) меньше ёмкости затвора. Данное схемотехническое решение предотвращает несанкционированное включение управляющего (затворного) р-п-перехода в прямом направлении.

Очевидно, что указанные в таблице i-GaAs полупроводниковые приборы можно применить в любой широко известной схеме ШИМ-контроллера электродвигателя. Однако особый интерес представляют те конструкции, в которых характерные особенности данного полупроводникового материала могут проявиться наиболее полно.

Одним из ключевых факторов является лёгкость и относительная простота обеспечения оптоэлектронного управления силовыми компонентами на основе i-GaAs, а другим таким фактором – возможность получения полупроводниковых приборов с комбинированными типами проводимости и очень близкими параметрами быстродействия.

Оба упомянутых фактора позволяют с лёгкостью конструировать многофазные и многоуровневые частотные преобразователи с биполярным питанием.

Схемотехнически такие преобразователи почти не отличаются от устройств с однополярным питанием, однако биполярные схемы существенно облегчают формирование высокочастотных синусоидальных сигналов с минимальным уровнем гармоник, что является следствием значительно лучших частотных свойств GaAs приборов по сравнению с силовыми компонентами на основе кремния и простоты обеспечения быстродействующей гальванической развязки цепей управления при меньших динамических потерях.

Особо следует отметить возможность непосредственного оптического управления силовыми приборами, так как генерируемый встраиваемым лазером или светодиодом свет имеет длину волны 810 нм, соответствующую области максимальной чувствительности GaAs.

На рисунке 1 показана упрощённая блок-схема фазоинвертора с нулевой точкой для получения двух находящихся в противофазе комплектов сигналов с широтно-импульсной или амплитудно-частотной модуляцией. Сдвиг фаз составляет 180°. В таком исполнении можно получить более высокую выходную мощность, удвоить размах напряжения, получить более высокий КПД и свести к минимуму искажения по стробоскопированию выходных синусоид напряжения.

На рисунке 2 показан многоуровневый повышающий фазоинвертор с минимизацией искажений выходного пакета импульсных сигналов. Данный

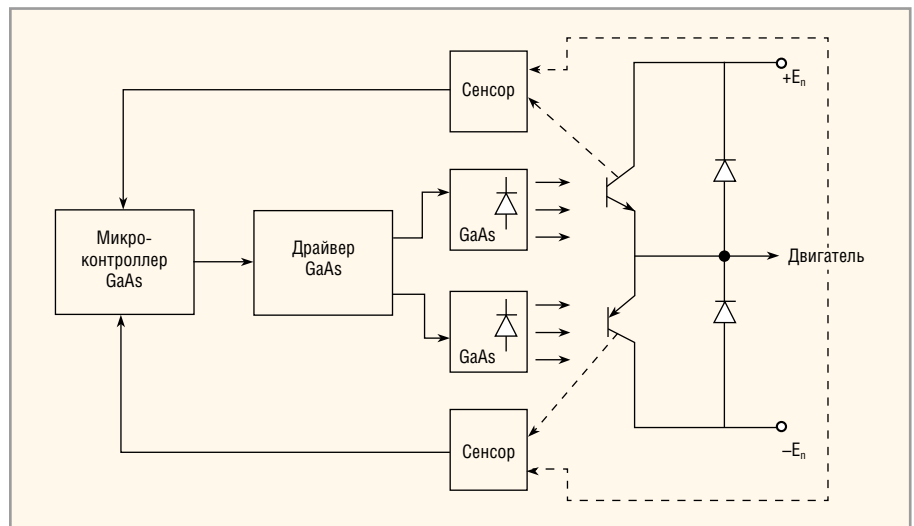


Рис. 1. Фазоинвертор с нулевой точкой

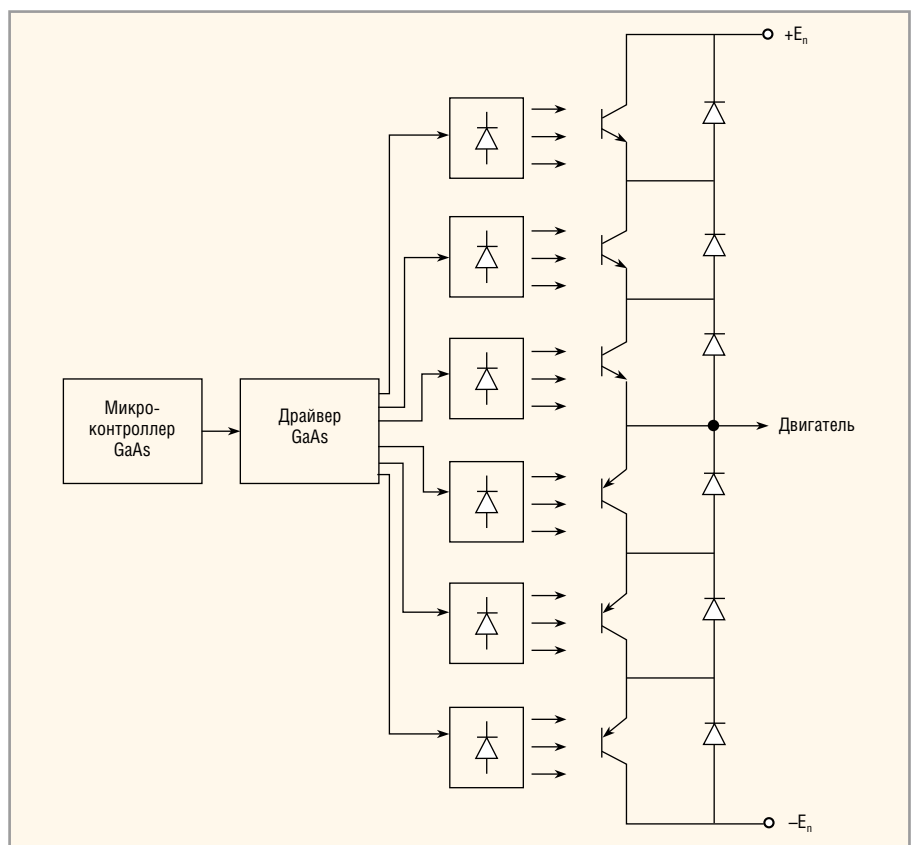


Рис. 2. Схема многоуровневого фазоинвертора с нулевой точкой

многоуровневый инвертор будет удобен для построения схем инвертирования сигнала на несколько киловольт. В связи с тем, что здесь применяется фактически каскадное включение силовых ключей с оптолазерным запуском, быстродействие запуска верхнего и нижнего многоуровневого ключа будет не хуже одноключевого исполнения в каждой фазе. В принципе, такие схемы можно упростить путём замены транзисторно-диодного силового ключа на фотосиловой GaAs диод с высоким квантовым выходом, близким к 100% (т.е. способность поглощать и преобразовывать

входящий оптический, точнее, инфракрасный сигнал с лазерного диода). В качестве силовых фотоключей могут использоваться все типы GaAs высоковольтных приборов: IGBT, MOSFET, JFET, HBT, динисторы, GTO, ЛПД, ЛПТ (лавинные транзисторы) и др.

Сенсорика для отслеживания режимов работы преобразователя, в принципе, аналогична используемой в кремниевых силовых преобразователях (температура, ток, напряжение), но с дополнительной особенностью, а именно: отслеживание состояния силовых GaAs приборов будет дополнительно осуществляться по

интенсивности их оптического (теплого) излучения, что намного эффективнее стандартных датчиков контроля силового ключа.

Почему драйвер и микроконтроллер должны быть также выполнены на LPE i-GaAs? Данное требование вытекает из общей высокоскоростной и температурной платформы: максимальная температура эксплуатации преобразователя должна быть не менее +250°C. Где взять корпуса на +300°C? По личному опыту (автора) создания (ОКР с приёмкой заказчика) силового корпуса (аналога ТО-259) с рабочей температурой +300°C (у аналога – гораздо меньше) можно отметить, что эта проблема может быть решена, как и в корпусах для поверхностного монтажа типа SMD или ThinKey (корпусов безиндуктивного или малоиндуктивного типа), в т.ч. с применением беспроводной сборки (минимизация наведённой индуктивности корпуса).

Двухроторные двигатели

Возможность высокоскоростной коммутации токов, вероятно, позволит создать высокоэффективные высокооборотные двухроторные двигатели с магнитной левитацией ротора (электродвигатели с двухтактным преобразованием магнитного поля).

Принцип их действия основан на введении дополнительной внутренней обмотки ротора. Обмотка статора возбуждается током с очень высокой частотой, что приводит к возникновению мощного магнитного поля, возбуждающего в свою очередь сильный ток в короткозамкнутой первой обмотке ротора. При резком размыкании этой обмотки магнитное поле, создаваемое ею, возбуждает вторичную, внутреннюю обмотку ротора. Учитывая намного меньшие размеры «вторичного» ротора, напряжённость возникающего магнитного поля может быть очень большой, что позволит реализовать магнитолевитирующий подвес ротора и исключить трение в этом подвесе. Такого типа электродвигатели уже существуют, однако существующие силовые ключи позволяют коммутировать токи возбуждения с относительно низкой частотой. Использование же сверхскоростных коммутирующих элементов на основе LPE i-GaAs позволит значительно повысить частоту коммутации при малых потерях в цепях управления и за счёт этого существенно уменьшить размеры высокоскоростных электродвигателей.

Реактивные ионно-плазменные двигатели

Существующие ионно-плазменные реактивные двигатели с безэлектродной ионизацией рабочего тела (водорода, гелия, ксенона и др.), имеют очень малую силу тяги в пределах от 1,0 до 20 ньютонов. Такие двигатели возможно использовать только в космических аппаратах в условиях слабой гравитации, в противном случае масса требуемого для получения большей тяги рабочего тела или размеры ускорителя принимают неприемлемые размеры. Выход может заключаться в переходе к многоступенчатым высокочастотным системам ионизации, позволяющим значительно повысить скорость истечения ионизированной плазмы, и следовательно, рабочую тягу двигателя при сохранении высокого КПД. Смысл такого изменения состоит в том, что скорость истечения ионов определяется частотой изменения тока в устройстве подогрева плазмы, повышение которой обеспечивает увеличение скорости движения ионов.

Один из вариантов такого двигателя мог бы иметь, как минимум, три каскада ионизации: камеру предварительной ионизации (подогрева) с частотой 10–12 МГц, вторую камеру с частотой тока 1,5...20,0 ГГц (в зависимости от типа газа) и третью камеру, где нагрев плазмы осуществляется рентгеновским излучением.

Какое применение в такой системе может найти технология LPE i-GaAs? Здесь следует обратить внимание на следующие обстоятельства.

1. Описанный в статье [1] силовой оптодиод позволяет создавать мощные индукционные преобразователи с мощностью в десятки и сотни киловатт с частотами вплоть до 10...12 МГц, что обеспечивает первичную ионизацию газообразного рабочего тела большой массы. Правда, современные бортовые солнечные батареи имеют мощность в пределах 30–50 кВт, однако существуют реальные (и реализуемые на данном уровне развития техники) бортовые ядерные энергетические установки необходимой мощности, способные помимо генерации электроэнергии осуществлять и предварительный подогрев плазмы. Таким образом, уже созданные силовые компоненты позволяют создать первый каскад ионно-плазменного реактивного двигателя.

2. Проведённые предварительные эксперименты по созданию высоковольтного СВЧ HBT GaAs транзистора [3] и начатые исследования по созданию высоковольтного СВЧ i-GaAs HBT в L-, S- и C-диапазонах, а также работы российских и финских учёных [4] по созданию лавинно-доменных транзисторов с неклассической скоростью полёта лавинных носителей заряда (удвоением/утроением частотных свойств высоковольтного транзистора) и авторские расчётные данные позволяют сделать вывод о возможности создания мощных индукционных СВЧ-генераторов для X-диапазона и даже начального K-диапазона. Следовательно, в обозримом будущем реальным становится и конструирование второго каскада нагрева плазмы, а также (что, вероятно, вызовет ещё больший интерес) проектирование мощных радиолокаторов на основе АФАР.

3. Наконец, третий каскад нагрева плазмы вполне можно представить выполненным на базе использования предполагаемых к разработке LPE i-GaAs транзисторов, способных генерировать излучение с длиной волны $\approx 0,001 \mu\text{м}$ (частота $> 10^{18}$ Гц), относящейся к рентгеновскому диапазону. Теоретических препятствий для создания таких транзисторов на основе представляемого LPE i-GaAs изолятора не предвидится, однако таковыми являются проблемы формирования отдельных структур с размерами в единицы и доли нанометров, на решение которых потребуются огромные финансовые ресурсы.

При условии решения обозначенных проблем вполне реальным становится проектирование плазменных реактивных двигателей, пригодных для построения действительно межзвёздных космических кораблей (наподобие проекта VASIMR) и обеспечивающих удельный импульс $\gg 50$ км/с при высоком КПД $\rightarrow 80\%$ и очень высокой тяге.

Ещё одним перспективным направлением для применения в ракетостроении представляется снижение силы трения гиперзвуковых ракет в ионосфере, например, за счёт генерации электронной плазмы по поверхности носовой части ракеты с помощью холодного катода на основе GaAs.

Все вышеизложенные принципы, конечно, давно известны отечественным разработчикам ионно-плазменных двигателей и упоминаются здесь

только в плане возможных направлений применения электронных GaAs компонентов, созданных на базе i-GaAs технологии.

Ещё одним потенциально привлекательным направлением представляется совершенствование автомобильных двигателей внутреннего сгорания за счёт использования индукционного принципа поджига бензино-кислородной смеси. Использование вместо металла кремний-карбидных или аналогичных керамических материалов позволяет сформировать внутри стенок рабочих цилиндров обмотки с малой индуктивностью, что при высокой частоте тока возбуждения обеспечит надёжный и эффективный способ поджига и оптимальный режим горения смеси. Керамический же материал цилиндра имеет (как это показывают исследования, проведённые в Санкт-Петербурге) теплопроводность на уровне меди при высокой температурной стойкости, что обеспечивает значительное повышение КПД. У такого двигателя мощностью около 100 л.с. вполне можно добиться расхода топлива в пределах 1–3 литра/100 км пробега.

В настоящее время теория плазменных двигателей разработана достаточно хорошо, силовые компоненты для нагрева плазмы на основе разработок по i-GaAs технологии вполне реальны, как и двухтрансформаторная керамическая камера сгорания. Следовательно, реален и плазменный ДВС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Перспективные LPE i-GaAs силовые высокоскоростные, высокотемпературные приборы резко расширяют возможности создания высококачественного электропривода различного назначения – от бытовых устройств (кондиционеры) до тяговых электродвигателей для автомобильного, железнодорожного, авиационного и речного транспорта.

2. Вполне возможно, что высокотемпературный ВЧ GaAs электропривод найдёт применение в высокоскоростных летательных аппаратах, начиная от БПЛА и заканчивая гиперзвуковыми ракетами.

3. Высоковольтные многоуровневые преобразователи на основе компонентов с оптическим управлением могут

найти широкое применение для преобразования высоковольтной силовой сети в 380/220/110/50 В, например в пассажирском вагоностроении.

4. Новая ВЧ и СВЧ силовая GaAs электроника, скорее всего, будет полезна для построения ионно-плазменных реактивных двигателей и повышения КПД в ДВС с индукционной ионизацией топливной смеси в рабочей камере.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Войтович В.Е., Гордеев А.И., Думаневич А.Н.* Новые возможности GaAs силовой электроники. Силовая электроника. № 2. 2014.
2. *Войтович В.Е., Гордеев А.И., Думаневич А.Н.* GaAs-диоды для PFC, SMPS, UPS, IPM, Solar Invertors и замены синхронных выпрямителей. Силовая электроника. № 6. 2012.
3. GaAs Power Devices. G. Ashkinazi. Israel.
4. Significant Effect of Emitter Area on the Efficiency, Stability and Reliability of Picosecond Switching in a GaAs Bipolar Transistor Structure. S.N. Vainshtein, V.S. Yuferev, J.T. Kostamovaara, M.M. Kulagina, H.T. Moilanen; Dept. of Electr. & Inf. Eng., Univ. of Oulu, Oulu, Finland; IEEE Transactions on Electron Devices 05/2010.

