

# Мощные полевые транзисторы:

## история, развитие и перспективы. Аналитический обзор

**Владимир Дьяконов,  
д. т. н., профессор**

vpdyak@yandex.ru

**Р**азвитие мощных полевых транзисторов носит беспрецедентный характер. С 70-х годов, когда в СССР были созданы, детально изучены и запущены в серию первые в мире мощные полевые транзисторы, эти приборы превратились из мало-мощных «недоносков» с высоким входным сопротивлением, во всем остальном уступающих биполярным транзисторам, в мощные приборы с уникально малым (до 0,001 Ом) сопротивлением во включенном состоянии, рабочими токами до 400 А и выше и рабочими напряжениями от десятков до 1200 В. Приборы имеют высокие динамические показатели и по существу являются специализированными мощными СБИС. Ныне в мире выпускаются многие тысячи типов мощных полевых транзисторов и силовых интегральных схем на их основе. Данный аналитический обзор описывает развитие этих приборов и отражает взгляд автора, принимавшего прямое участие в исследованиях, разработках, внедрении и популяризации этих приборов.

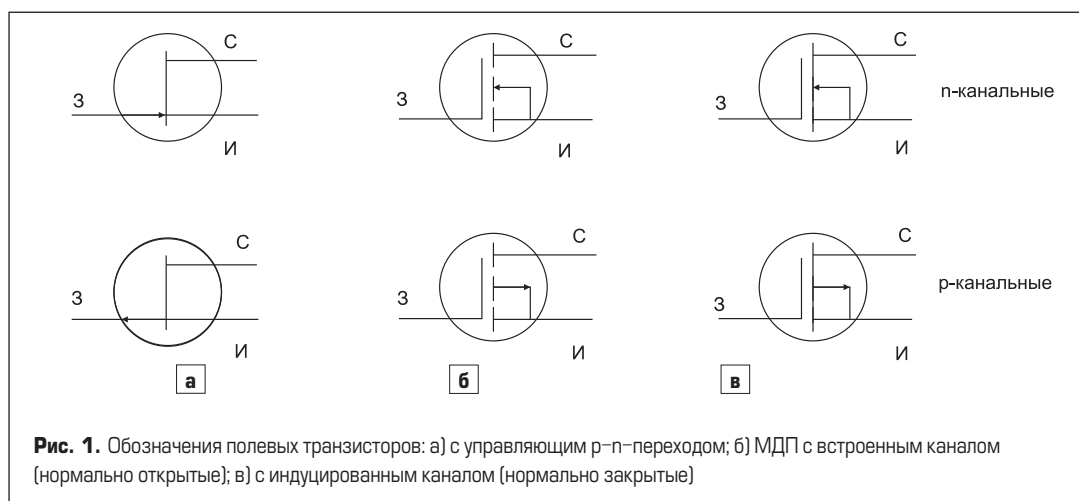
### «Доисторические» времена

Каждый современный полупроводниковый прибор наследует свойства своих предшественников, так что грамотный специалист должен учитывать при выборе приборов для построения электронных

устройств. В полной мере это относится к крупному классу полупроводниковых приборов — мощным силовым (ключевым) полевым транзисторам. Тем более что некоторые «старые» устройства в ряде применений (например, в сверхскоростных импульсных устройствах) могут превосходить современные.

В конце 20-х годов XX в. Дж. Е. Лилиенфельд подал в США и в Канаде заявку на патент, в котором было предложено управление электрическим током в образце путем воздействия на него поперечного электрического поля. Реализовано устройство не было. Лишь в 1948 г. Шокли и Пирсон, применив образец из полупроводника, экспериментально подтвердили принципиальную возможность этого способа, но создать прибор они также не смогли. Лишь в 1952 г. Шокли описал униполярный полевой транзистор с управляющим *p-n*-переходом. Он изменял толщину канала внутри образца из полупроводникового материала, что сняло проблемы, связанные с захватом носителей ловушками на поверхности канала.

В 1960 г. Канг и Аталла предложили использовать для построения полевого транзистора структуру металл-окисел-полупроводник. На ее основе были созданы MOS (или МОП) полевые транзисторы, у нас часто именуемые МДП-транзисторами (металл-диэлектрик-полупроводник). Изначально это были одиночные дискретные приборы с очень



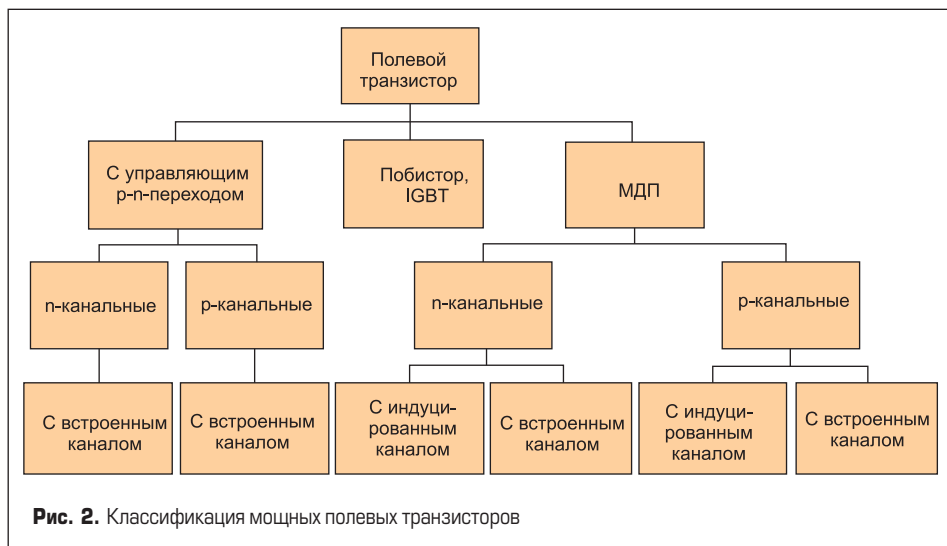


Рис. 2. Классификация мощных полевых транзисторов

высоким входным сопротивлением (сотни мегаом и выше). Они имели встроенный (нормально открытые приборы) или индуцированный (нормально закрытые приборы) канал *n*- или *p*-типа (рис. 1).

Первые полевые транзисторы были мало-мощными приборами — рассеиваемая мощность до 100–150 мВт [1]. Их рабочие токи не превышали 10–20 мА, максимальные напряжения на стоке 15–20 В, а времена переключения — доли микросекунды. Сопротивление включенного прибора составляло сотни Ом. Таким образом, на роль силовых приборов они явно не претендовали.

В 1964 г. Зулиг и Тешнер в своих статьях высказали идею о возможности повышения мощности полевых транзисторов путем увеличения числа каналов. Был ясен и другой путь — увеличение ширины канала. Оба варианта в дальнейшем были реализованы на основе микроэлектронных технологий.

### Успешное вчера

В 70-х годах XX в. различные типы мощных полевых транзисторов (рис. 2) получили бурное развитие. Окснер в своей книге, в переводе выпущенной в 1985 г. [2], утверждал, что первые промышленные образцы мощных полевых транзисторов появились в 1976 г. Но он не учитывал пионерские работы в СССР, вы-

полненные еще в начале 70-х и отраженные в крупных отраслевых обзорах [3–8], научных статьях [9–21 и др.] и книгах [22, 23].

Первые серийные мощные полевые транзисторы были созданы в НИИ «Пульсар» (лаборатория Бачурина В. В.) еще в самом начале 70-х годов прошлого века. В 1974 г. советские серийные мощные полевые транзисторы КП901 (с током стока до 2 А и максимальным напряжением до 65 В) вызвали сенсацию в мире и были удостоены золотой медали на всемирной выставке-ярмарке в Лейпциге.

Эти приборы были с одним горизонтальным каналом сложной структуры (затвор большой ширины в виде змейки) с высокоомным язычком в области стока (рис. 3), позволившим увеличить максимальные рабочие напряжения на стоке до 60–100 В и получить малые емкости (особенно входную). Вскоре появились самые мощные из этих приборов — транзисторы КП904 [12] с рассеиваемой мощностью 75 Вт, током стока до 7,5 А и отдаваемой на частоте 60 МГц мощностью до 50 Вт. Менее мощные транзисторы КП902 легко обеспечивали уникально малые времена переключения около 1 нс.

Появление именно этих транзисторов не случайно. Это было время, когда в мире вовсю разыгралась холодная война, тучи самолетов и полчища танков и бронемашин участвовали в многочисленных локальных войнах

и крупных военных учениях. Каждый танк или самолет имел радиостанцию. Уровень взаимных помех и наводок от них был столь высок, что радиостанции на биполярных транзисторах в условиях их скученности на местности и поле боя оказались почти неработоспособными. Полевые транзисторы с их малыми интермодуляционными искажениями обещали устранение этого недостатка.

В комплексном исследовании новых приборов (как отечественных, так и позже зарубежных) и в дальнейших их разработках приняли участие сотрудники кафедры промышленной электроники Смоленского филиала МЭИ под руководством автора данной статьи. Ранее кафедра детально изучала лавинный режим работы биполярных транзисторов и лавинные транзисторы и внесла известный вклад в создание сверхскоростных импульсных устройств на них [24–26]. Это положительно сказалось на результатах исследования полевых транзисторов и позволило нам обобщать перспективность импульсных и ключевых приборов этого типа [6–10].

Было показано, что многие сильноточные полупроводниковые приборы с инжекционным механизмом управления током (биполярные транзисторы и тиристоры) не могут похвастать хорошими динамическими параметрами из-за медленного механизма инжекции, явления накопления в структуре избыточных зарядов неосновных носителей, расширения базы и падения рабочих частот с ростом тока эмиттера (эффект Кирка) и влияния больших емкостей переходов. Все это ведет к большим временам включения таких приборов. А рассасывание избыточных зарядов приводит к появлению значительных задержек их выключения.

Исследование уже первых советских мощных МДП-транзисторов выявило их уникальные возможности в импульсном (ключевом) режиме [4–9]. Были реально получены времена переключения порядка 1 нс (порою и меньше), причем, как при их включении, так и при выключении. Эти показатели являются рекордными по сей день и перекрыты лишь мощными арсенид-галлиевыми полевыми транзисторами. Отсутствие явлений накопления избыточных зарядов неосновных носителей при включении приборов исключало большую задержку выключения.

Мощные МДП-транзисторы были предложены нами как перспективный тип силовых полупроводниковых приборов, хотя их разработки шли вразрез с линией тогдашнего ВПК на развитие приборов для радиопередатчиков. В 1978 г. мы получили авторское свидетельство СССР на побистор (биполярный транзистор, управляемый от V-МДП-транзистора) [20]. По сути дела, это был первый IGBT. Стоит отметить, что указанные исследования проводились задолго до появления серийных мощных силовых полевых транзисторов и были экспериментально подтверждены многими уникальными разработками в области схемотехники этих приборов.

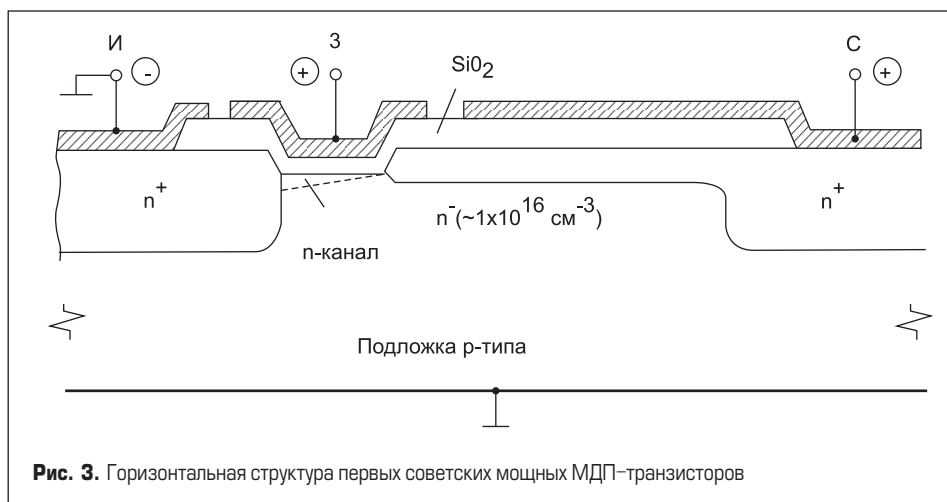


Рис. 3. Горизонтальная структура первых советских мощных МДП-транзисторов

**Приборы с двойной диффузией и вертикальным каналом**

В те далекие времена получение полевых транзисторов с длиной затвора  $L$  менее 5 мкм было трудно решаемой технологической проблемой. В то же время уже тогда существующая диффузионная технология позволяла получать тонкие (1 мкм и меньше) слои полупроводника. Применяя метод двойной диффузии, удалось создать мощные МДП-транзисторы с коротким каналом и слоями металлизации по обе стороны полупроводниковой пластины (рис. 4). Это улучшило теплоотвод и позволило уменьшить сопротивление сток-исток  $R_{си}$  включенного прибора. Во второй половине 70-х годов появились первые приборы с токами в десятки ампер и  $R_{си} < 1$  Ом.

Однако приборы этого класса имели и серьезные недостатки. В них паразитный биполярный транзистор был включен параллельно структуре полевого транзистора (рис. 4а). Приборы имели значительные внешние емкости структуры, а нормально закрытый биполярный транзистор может включаться как при лавинном пробое его, так и при быстром выключении полевого транзистора. Это неприятное явление известно как эффект  $dU_{си}/dt$ .

Для силовых устройств важно иметь малое остаточное напряжение не только при очень малых, но и при больших токах стока включенного транзистора. Словом, нужны приборы с очень малым сопротивлением  $R_{си}$  между стоком и истоком включенного силовоточного транзистора. И тут оказывается, что по ключевым свойствам первые маломощные (и даже первые мощные) полевые транзисторы заметно уступали биполярным транзисторам. Понадобились десятилетия развития, прежде чем мощные полевые транзисторы стали заметно превосходить биполярные по этому важному параметру.

Между тем в среде разработчиков приборов витала идея перехода от полевых транзисторов с горизонтальным каналом к транзисторам с вертикальным каналом. Его длина определялась не разрешением по горизонтали, а толщиной канальной области транзистора. Почти одновременно в середине 70-х годов эта идея была реализована как в СССР, так и за рубежом в виде МДП-транзисторов с V-образной структурой. Правда, первые образцы таких транзисторов были экспериментальными, и лишь к концу 70-х годов появились серийные типы таких мощных полевых транзисторов [7, 27]. К мощным полевым СВЧ-транзисторам с V-образной структурой относились серии советских приборов КП905/907/908/909/913 и др. (рис. 5), пришедшие на смену КП901, КП902 и КП904 (КП903 был мощным транзистором с управляющим p-n-переходом).

V-образная канавка создавалась методом анизотропного травления [7]. Ее острое дно вело к локализации электрического поля под канавкой и вызывало снижение максимальных рабочих напряжений. Вскоре были созданы приборы с U-образной (рис. 6) и даже с прямоугольной канавкой. Последние по-

зволяли создавать уже не наклонные, а вертикальные каналы с плоским дном канавки.

Структура, показанная на рис. 6, позволяет получать высоковольтные транзисторы с довольно малым  $R_{си}$ . Это связано с тем, что

прибор состоит из тонких полупроводниковых и металлических слоев. Уплотненное дно U-образной канавки снижает локализацию электрического поля, а металлические слои снизу и сверху структуры улучшают отвод

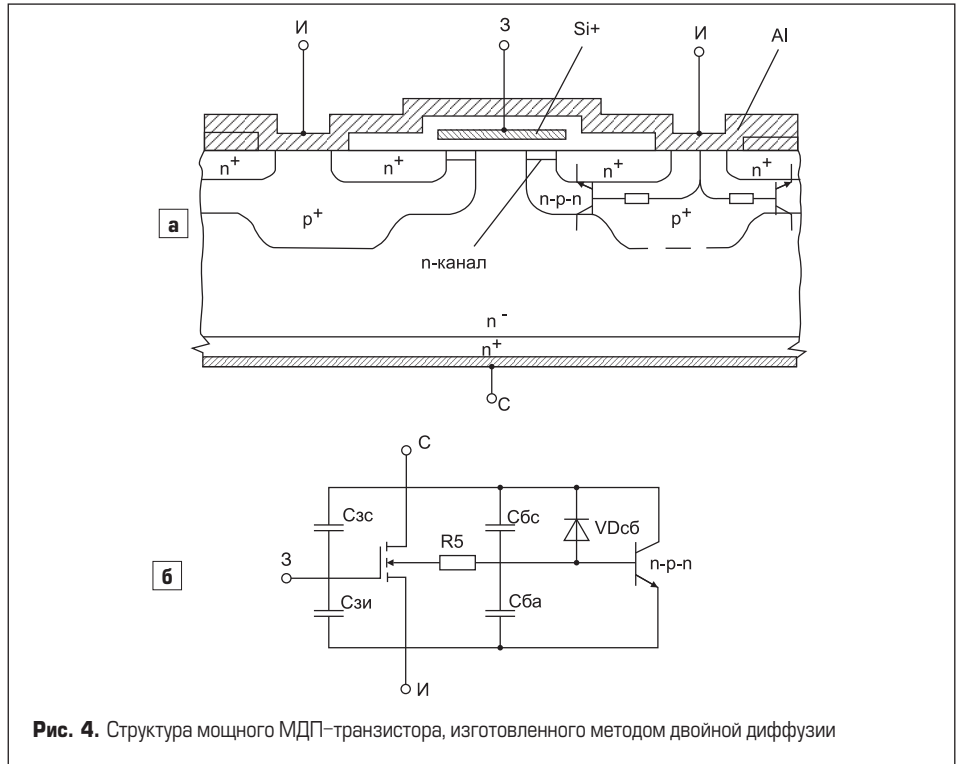


Рис. 4. Структура мощного МДП-транзистора, изготовленного методом двойной диффузии

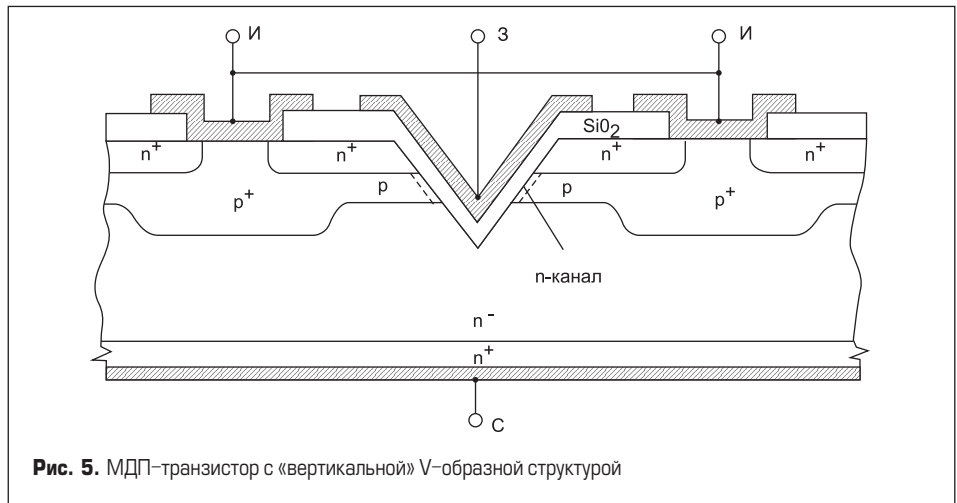


Рис. 5. МДП-транзистор с «вертикальной» V-образной структурой

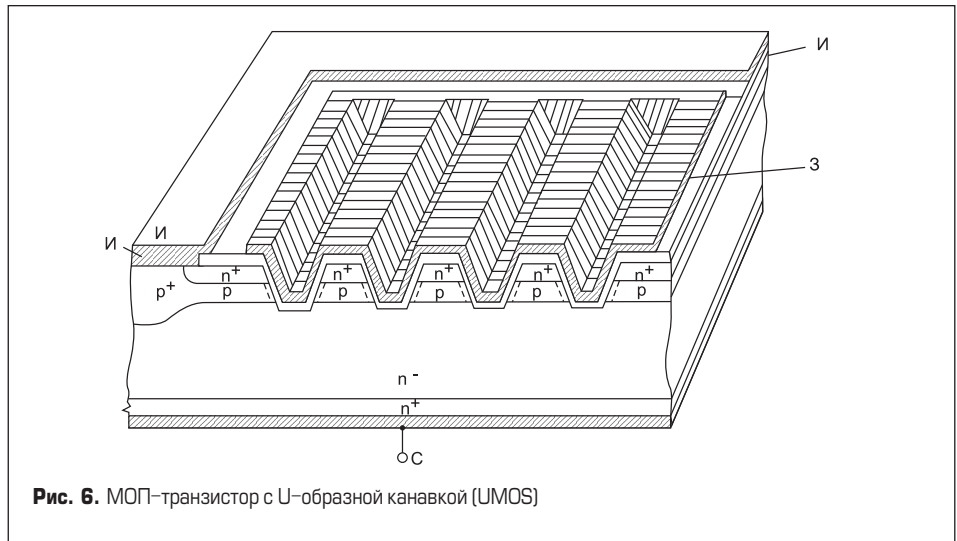


Рис. 6. МДП-транзистор с U-образной канавкой (UMOS)

тепла и снижают сопротивления стока и затвора. Были созданы и другие методы повышения рабочих напряжений приборов, например, охранные кольца вокруг области стока.

Однако почти сплошная металлизация затвора ведет к увеличению входной емкости (у приборов с токами до 50 А она достигает нескольких нанофард, а иногда и выше) и увеличивает времена переключения таких приборов. Для быстрого управления ими были созданы специальные микросхемы —

драйверы. Стали появляться приборы и с уже встроенными драйверами.

**Вклад фирм Siemens и International Rectifier**

Существенный вклад в создание мощных МДП-транзисторов с малым сопротивлением канала при включении внесли зарубежные фирмы Siemens, International Rectifier (IR) и др. Структура SIMPOS-транзисторов

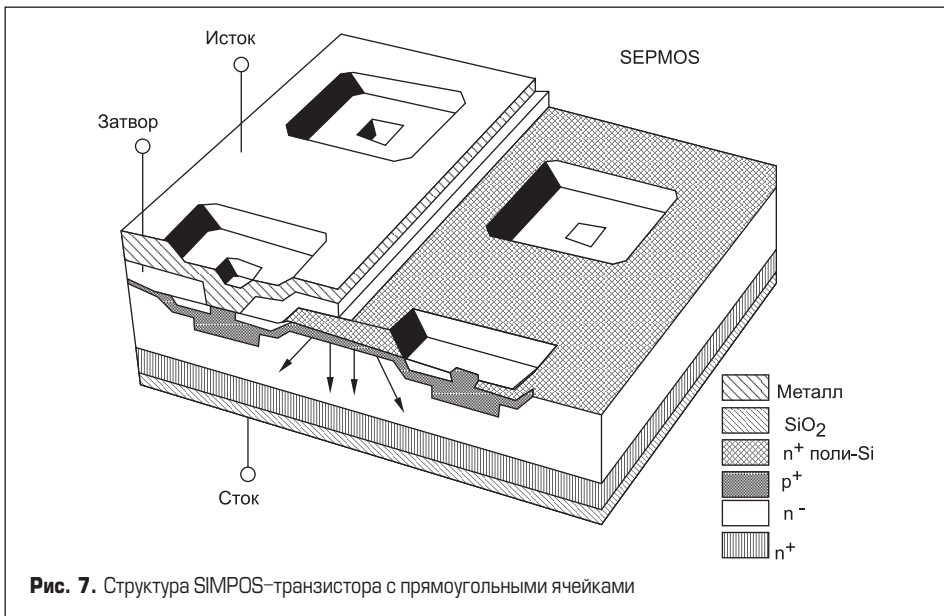


Рис. 7. Структура SIMPOS-транзистора с прямоугольными ячейками

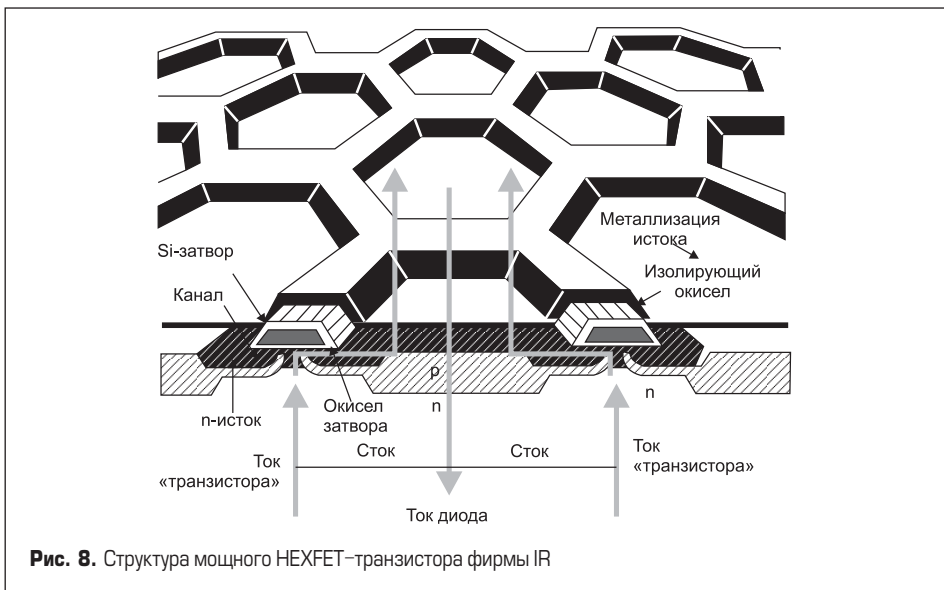


Рис. 8. Структура мощного HEXFET-транзистора фирмы IR

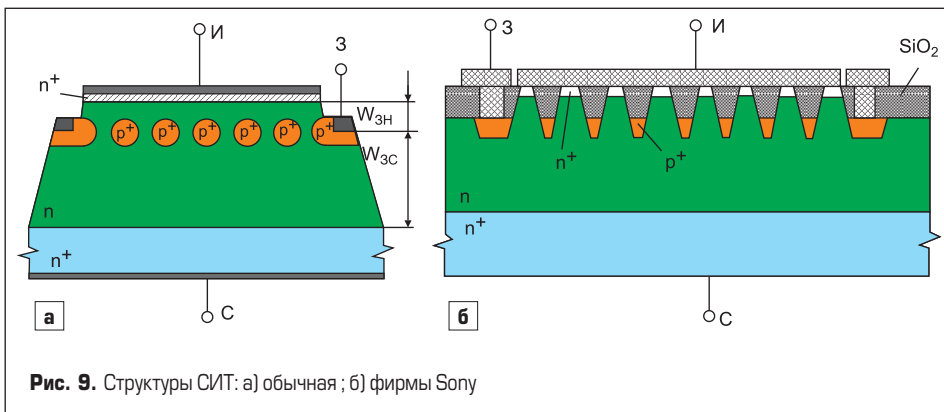


Рис. 9. Структуры СИТ: а) обычная ; б) фирмы Sony

фирмы Siemens имеет прямоугольные ячейки и изготовлена с применением двойной диффузии (рис. 7).

В 1978 г. американская фирма International Rectifier (IR) разработала ставшую затем самой массовой технологию производства МОП-транзисторов с гексагональной (шестиугольной) формой ячейки — HEXFET (рис. 8). Такая форма ячеек обеспечивала высокую плотность упаковки их на площади кристалла приборов. Уже в 1979 г. приборы с такими ячейками стали выпускаться крупносерийно.

Сплошная металлизация приборов с двух сторон повышала их емкости и заметно увеличивала времена их переключения. Но она же позволяла уменьшить сопротивление сток-исток и способствовала получению больших токов стока. Поэтому структуры этого класса оказались очень перспективными для создания силовых полевых транзисторов. Большим достижением стала разработка приборов с малым пороговым напряжением включения по затвору и управляемостью от логических сигналов ТТЛ-микросхем.

**Полевые транзисторы со статической индукцией**

В разработке мощных полевых транзисторов с управляющим переходом преуспели японские фирмы Sony, Tokin и др. Основой этих приборов (транзисторов со статической индукцией — СИТ) стали многоканальные структуры (рис. 9).

Эти нормально открытые приборы имеют ВАХ, подобные ВАХ ламповых триодов, но они намного более сильноточные (рис. 10). Например, мощные СИТ фирмы Tokin TS300V имеют ток до 180 А при максимальном напряжении на стоке 1500 В и сопротивлении 0,5 Ом. Менее мощные СИТ применяются в высококачественных усилителях мощности звуковых частот класса Hi-Fi и Hi-End взамен все еще почитаемых любителями музыки ламп.

В СССР выпуск СИТ был ограничен. Типичные параметры трех первых советских СИТ представлены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры первых советских СИТ

Тип	$U_{\text{СМАКС}}$ , В	$I_{\text{СМАКС}}$ , А	$R_{\text{СИВКЛ}}$ , Ом	$P_{\text{МАКС}}$ , Вт
КП801А	65	5	2,2	60
КП802	500	2,5	1,5	40
КП926А	400	16	0,025	0

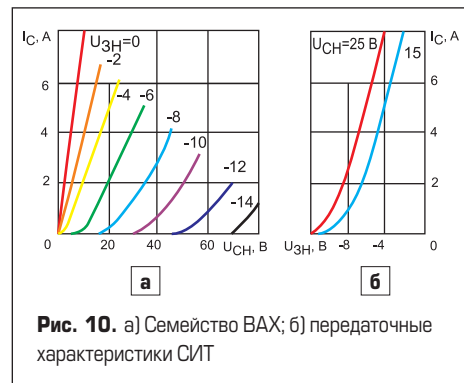


Рис. 10. а) Семейство ВАХ; б) передаточные характеристики СИТ



## Разработки силовых МДП-транзисторов в СССР

К концу 80-х годов номенклатура выпускаемых в СССР мощных МДП-транзисторов существенно расширилась. Появились мощные МДП-транзисторы с малым сопротивлением канала включенного прибора (табл. 2). В основном это были мощные МДП-транзисторы с *n*-каналом, но выпускались и *p*-канальные приборы, и полевые транзисторы с управляющим *p-n*-переходом, и СИТ с напряжением выше 1 кВ.

**Таблица 2.** Параметры некоторых отечественных мощных полевых транзисторов с малым сопротивлением канала

Тип	$U_{\text{силикс}} \text{ В}$	$R_{\text{силикс}} \text{ Ом}$	$I_{\text{с макс}} \text{ А}$	Корпус
КП812А1	60	0,028	50	ТО-220
КП812Б1		0,035	35	ТО-220
КП812В1		0,05	30	ТО-220
КП813А1	200	0,12	22	ТО-218
КП813Б1		0,18		ТО-218
КП813А		0,12		ТО-204
КП813Б		0,18		ТО-204
КП922	100	0,17	10	

Появились первые советские высоковольтные мощные МДП-транзисторы 2П701 и 2П702 [14, 15]. О параметрах советских мощных высоковольтных полевых МДП-транзисторов дает представление таблица 3. Интересно, что эти транзисторы и сейчас имеют меньшие времена переключения, чем подобные зарубежные приборы, но уступают им по сопротивлению канала включенного транзистора и уровням токов стока.

Между тем в СССР уже к концу 70-х годов наметилась тенденция к отставанию в области мощных ключевых полевых транзисторов. НИИ «Пульсар» продолжал разработку плановых мощных ВЧ- и СВЧ-МДП-транзисторов, перейдя на технологию изготовления приборов с вертикальным каналом. Приборы продолжали удивлять мир рекордными частотными параметрами и мощ-

**Таблица 3.** Параметры некоторых советских высоковольтных полевых транзисторов

Тип	$U_{\text{силикс}} \text{ В}$	$R_{\text{силикс}} \text{ Ом}$	$I_{\text{с}} \text{ А}$	$P_{\text{расмикс}} \text{ Вт}$	Корпус
2П701А	500	1,5	9	40	ТО-220
2П701Б	400	1,2	9		
2П702	300	0,7	14	50	КТ-9
КП705	1000	3,7	6	125	
КП705В	800	2,5	7		
КП707В1	750	3,0	3	50	ТО-220
КП707Г			100		
КП707В2	650	2,3	3,5	50	
КП733А	400	3,6	1,5		
КП733Б					
КП733В	550	10	0,5	ТО-92	
2П803А	1000	4,5	3	60	ТО-220
2П803Б	800	4	3,5		ТО-218
КП809А1	400	0,3	9,6	60	ТО-218
КП809Б1	500	0,6			
КП809А	400	0,3			ТО-204
КП809Б	500	0,6			

ностью на частотах в сотни мегагерц и даже 1–2 ГГц. К примеру, транзисторы КП908 [13] на частоте 1,8 ГГц отдавали мощность более 1 Вт и обеспечивали в импульсном режиме субнаносекундные времена переключения. Серия СВЧ-транзисторов с вертикальным каналом КП907/909/911/913/918 и КП920–КП923 имела рассеиваемую мощность 11,5–130 Вт [34]. Многие выпускались с приемкой заказчиком (серии 2П). Но противостоять всему миру по всему фронту разработок полевых транзисторов наши разработчики уже не могли. В чем-то приходилось уступать. К сожалению, этим «чем-то» стали мощные силовые полевые транзисторы, в основном гражданского применения.

## Сегодня без СССР

Тем временем возник новый геополитический фактор, резко снизивший объем разработок мощных полевых транзисторов на всем пространстве Советского Союза — распад СССР в 1990 г. С этого времени можно отсчитывать сегодняшний этап развития мощных полевых транзисторов.

Это было время, когда разработки мощных полевых транзисторов во всем мире, кроме стран — республик бывшего СССР, получили интенсивное развитие, особенно в гражданской сфере. Но для России крайне нежелательную роль сыграло разрушение интеграции между научными и производственными субъектами различных республик бывшего СССР. Многие предприятия электронной промышленности по существу оказались в новых государствах, не имеющих достаточных средств на их развитие.

Совсем иная ситуация сложилась в ведущих капиталистических странах. Заметно упала потребность в мощных полевых ВЧ- и СВЧ-транзисторах для военных радиопередающих и иных устройств. Но более гибкая экономика позволила быстро перебросить ресурсы научных и производственных предприятий на разработку мощных ключевых и силовых полевых транзисторов, потребность в которых быстро росла. Даже умеренно быстродействующие силовые приборы оказались очень востребованными для развивающейся электроэнергетики и промышленной электроники. Силовые ключевые приборы, позволяющие строить инверторы и источники электропитания с высоким КПД, оказались очень востребованными и получили мощный стимул к дальнейшему развитию. Тем более что их производство не требовало резкого уменьшения геометрических размеров приборов и перехода к нанотехнологиям с высоким геометрическим разрешением фотолитографии.

Особенно резко возросла необходимость в полевых транзисторах умеренной мощности и напряжения. Источники электропитания массовых настольных компьютеров, телевизоров, DVD-проигрывателей и прочих аппаратов бытовой электроники стали переходить на применение экономичных импульсных инверторов и преобразователей на мощных

полевых транзисторах. Такие источники питания были остро необходимы для переносных радиостанций, мобильных и карманных компьютеров, коммуникаторов и ставших массовыми сотовых телефонов. Автомобильная электроника также стала потребителем массы мощных полевых транзисторов, в том числе работающих в особо тяжелых условиях.

Число создаваемых и серийно выпускаемых в мире типов мощных полевых транзисторов резко возросло, как возросла и конкуренция между их разработчиками и производителями. Многие зарубежные фирмы увеличивали их выпуск ежегодно в два и более раз. В этом явно преуспела фирма IR. Она добилась того, что около 75% мирового производства всех силовых МОП-транзисторов пришлось на мощные полевые транзисторы, изготовленные по технологиям этой компании. Было создано несколько поколений таких транзисторов. В 1995 г. IR приступила к серийному производству транзисторов пятого поколения. Их отличали улучшенные электрические и тепловые характеристики и умеренная цена — за счет минимального числа фотолитографий (их всего четыре) и использования автоматического совмещения масок.

В 1997 г. IR выпустила серийные полевые транзисторы седьмого поколения с полосковой структурой ячеек (StripFET). Их отличала особая надежность при работе в предельных режимах. У StripFET отсутствует паразитный биполярный транзистор и исключен выход из строя по причине его «захлопывания». StripFET имеют более компактную ячейку и сниженные потери на проводимость и переключение, чем HEXFET, в диапазоне напряжений до 200 В. Седьмое поколение HEXFET в течение нескольких лет было основой номенклатуры транзисторов IR для автомобильной электроники и по настоящее время является основой создания высоконадежных транзисторов в герметичных корпусах для наиболее ответственных (в том числе военных) применений.

Усилия компании IR были сосредоточены на совершенствовании новых поколений Trench MOSFET как весьма эффективных по всем видам потерь, габаритам и цене. Благодаря вертикальному расположению затвора транзисторы этого типа имеют минимальную площадь ячейки и самое низкое сопротивление открытого канала. Разработав уникальную технологию независимого программирования толщины окисла на стенках и дне канавки, IR устранила главный недостаток TrenchMOSFET — противоречие между плотностью структуры (размером ячейки) и динамическими потерями в транзисторе.

## Новые корпуса — новые транзисторы

Большое внимание компания International Rectifier и другие разработчики MOSFET уделяют совершенствованию технологий размещения кристаллов транзисторов в новых корпусах, поскольку только оптимальное сочетание кристалла транзистора и корпуса



Рис. 11. Корпуса дискретных мощных полевых транзисторов фирмы IR, ставшие стандартными

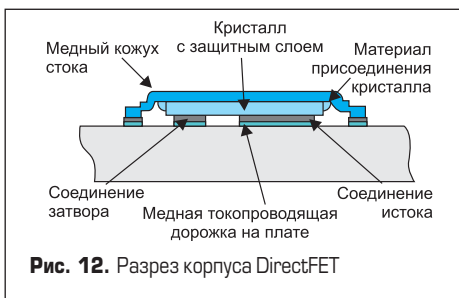


Рис. 12. Разрез корпуса DirectFET



Рис. 13. Эффективность современных корпусов фирмы IR

обеспечивает создание по-настоящему эффективного устройства. IR является разработчиком многих типов корпусов (рис. 11), ставших стандартными в отрасли, в том числе суперкорпусов TO-220 и TO-247. Стоит отметить также ряд пластмассовых корпусов, позволивших создать дешевые транзисторы и модули.

Новым прорывом стала революционная технология DirectFET, обеспечившая эффективный двусторонний отвод тепла с корпуса (рис. 12). Благодаря прямому контакту выводов кристалла с платой и металлическим полукорпусом (вывод стока) DirectFET обеспечивают ультранизкое тепловое и электрическое сопротивление корпуса, компактные размеры, малые значения паразитных индуктивностей выводов, высокую рассеиваемую корпусом мощность, эффективный двусторонний от-

вод тепла, простую топологию платы при параллельном соединении транзисторов.

Сравнение эффективности наиболее распространенных корпусов фирмы IR наглядно показано на рис. 13.

Наивысшую эффективность дает корпус DirectFET, плотно укладываемый на радиатор или печатную плату с теплоотводом и обеспечивающий отвод тепла с обеих сторон кристалла. Эффективность восьмивыводного корпуса SO-8 заметно ниже, но он допускает размещение до двух мощных транзисторов и диодов (рис. 14). Для уменьшения теплового сопротивления сток и исток подключаются одновременно тремя выводами.

Ряд мощных MOSFET выпускается в корпусах для плотного монтажа PQFN (рис. 15). Такие корпуса за счет применения медной клипсы имеют меньшее тепловое сопротивление, чем SO-8, но уступают корпусу DirectFET (рис. 16) [31]. Выпускаются и транзисторы средней мощности в миниатюрных корпусах размером со спичечную головку.

Номенклатура приборов IR и ряда других компаний насчитывает сотни наименований (типов) транзисторов у каждой фирмы. Наряду с дискретными мощными полевыми транзисторами выпускаются приборы с шунтирующим их диодом, защитными стабилитронами в цепи затвора, драйверами для запуска (в том числе уровнями напряжений обычных логических схем), интеллектуальные приборы с защитой транзисторов по току и напряжению и многие другие. Словом, речь идет о выпуске различных специализированных силовых микросхем, как правило, имеющих специальные корпуса (рис. 17).

Биполярные транзисторы извечно страдали неравномерностью нагрева транзисторной структуры, нередко приводящей к тепловому

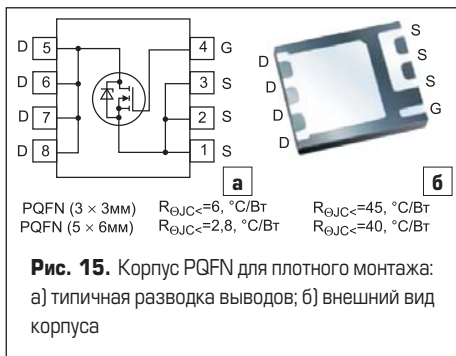


Рис. 15. Корпус PQFN для плотного монтажа: а) типичная разводка выводов; б) внешний вид корпуса



Рис. 16. Корпус DirectFET с минимальным тепловым сопротивлением

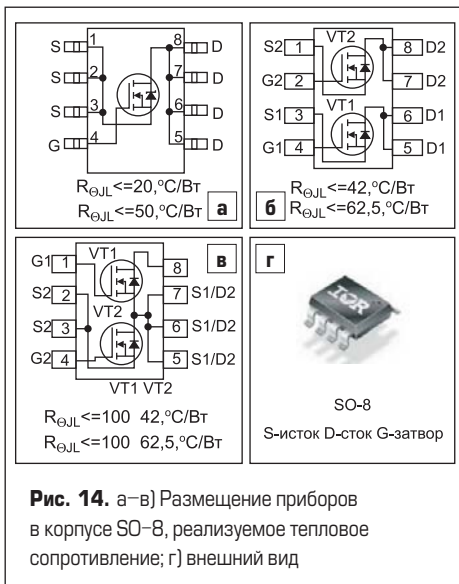
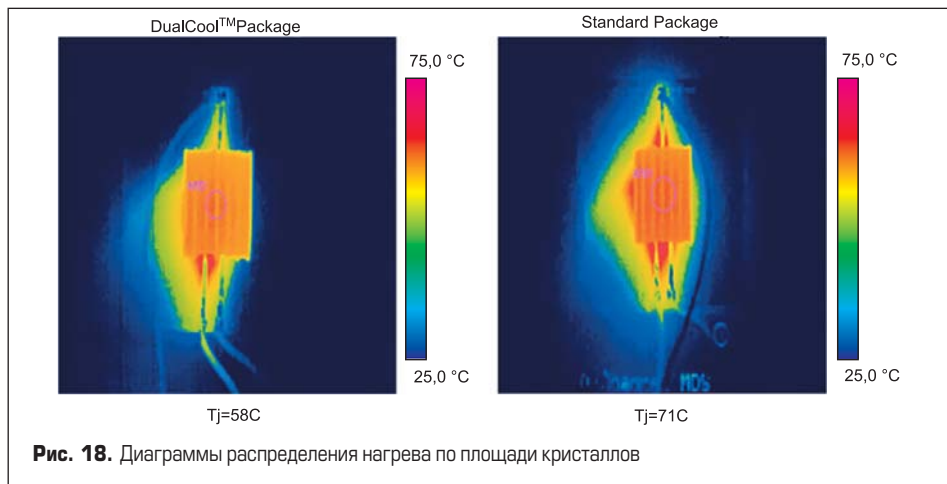


Рис. 14. а-в) Размещение приборов в корпусе SO-8, реализуемое тепловое сопротивление; г) внешний вид



Рис. 17. Корпуса специализированных силовых интегральных схем



Довольно быстро число выпускаемых серийно и предлагаемых на рынок мощных полевых транзисторов в России возросло. Так, в приложении к книге [23] отмечено около 300 типов выпускаемых серийно в России к 2001 г. мощных полевых транзисторов. Отказавшись от собственных, порою уникальных разработок и используя давно существовавшие в СССР методы повторения зарубежных приборов, наши предприятия преуспели в копировании лучших зарубежных образцов мощных полевых транзисторов. Например, крупное объединение «Интеграл» с мощным заводом «Транзистор» (Минск) освоило выпуск широкой (сотни типов) номенклатуры приборов — аналогов транзисторов фирмы IR (табл. 4).

пробую и выгоранию структуры. Современные мощные полевые транзисторы имеют гораздо более равномерный нагрев (рис. 18) и более широкую область безопасной работы.

**А что в новой России?**

А как обстоят ныне дела с разработкой и выпуском мощных полевых транзисторов в новой России? Как у нас говорят, «нет худа без добра». Общедоступными стали многие типы зарубежных мощных полевых транзисторов. Потерявшие военные заказы российские предприятия полупроводникового профиля, оправившись от потрясений в период развала СССР, стали интенсивно искать сферы прило-

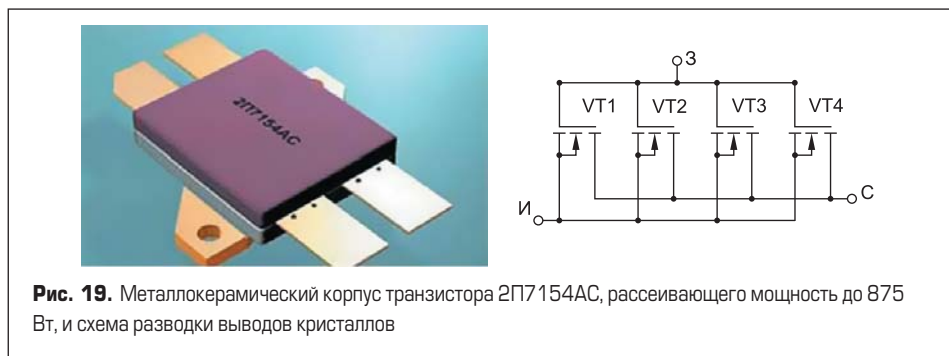
жения своих возможностей. Как ни странно, но отставание в технологии микроэлектронного производства сыграло на руку многим нашим предприятиям. Дело в том, что для производства мощных полупроводниковых приборов технология со сверхвысоким разрешением особо не нужна — мощные полупроводниковые приборы (как правило, высоковольтные и сильноточные) имеют достаточно большие размеры структур, и их резкое уменьшение ведет лишь к снижению энергетических показателей. Оказался полезным былой задел в разработках мощных полевых транзисторов.

Преуспело и российское ОКБ «Искра». При участии завода «Ангстрем» оно создало обширный ряд мощных полевых транзисторов с высокими техническими характеристиками (выборочные примеры в таблице 5).

Рассеиваемая мощность некоторых приборов, например 2П7154АС, достигает 875 Вт, максимальное напряжение на стоке 1200 В. Приборы имеют малые для столь мощных приборов времена переключения — менее 70 нс. Они выполнены в металлокерамическом корпусе с изолированным фланцем и с полосковыми выводами, в котором размещено четыре кристалла (рис. 19). Исток подключается к двум полоскам, сток и затвор — к одной.

**Таблица 4.** Параметры некоторых мощных полевых транзисторов завода «Транзистор» — аналогов приборов фирмы IR

Тип	Аналог	$U_{\text{смакс}}$ В	$R_{\text{свкл}}/\text{Ом}$	$I_{\text{смакс}}$ А	Корпус
КП150	IRF150	100	0,055	38	ТО-204
КП240	IRF240	200	0,18	18	
КП250	IRF250		0,085	30	
КП340	IRF340	400	0,55	10	
КП350	IRF350		0,30	14	
КП440	IRF440	500	0,85	8,0	ТО-204
КП450	IRF450		0,4	12	
КП510	IRF510	100	0,54	5,6	
КП520	IRF520		0,27	9,2	
КП530	IRF530		0,16	14	
КП540	IRF540		0,077	28	
КП610	IRF610	200	1,5	3,3	
КП620	IRF620		0,8	5,2	
КП630	IRF630		0,4	9,0	
КП640	IRF640		0,18	18	
КП710	IRF710	400	3,6	2,0	ТО-220
КП720	IRF720		1,8	3,3	
КП730	IRF730		1,0	5,5	
КП740	IRF740		0,55	10	
КП820	IRF820	500	3,0	2,5	
КП830	IRF830		1,5	4,5	
КП840	IRF840		0,85	8,0	



**Рис. 19.** Металлокерамический корпус транзистора 2П7154АС, рассеивающего мощность до 875 Вт, и схема разводки выводов кристаллов

**Таблица 5.** Мощные полевые транзисторы ОКБ «Искра»

Тип	$U_{\text{смакс}}$ В	$I_{\text{смакс}}$ А	$I_{\text{смп}}$ А	$U_{\text{зипорт}}$ В	$R_{\text{свкл}}/\text{Ом}$	$P_{\text{макс}}$ Вт
2П7154АС	1200	50	100	4,0	0,35	875
2П7154БС	800	60	120		0,2	
2П7154ВС	600	75	150		0,15	
2П829А	1200	10	30		1,0	200
2П829А9	1200	10	30		1,0	
2П829Б	800	15	45		0,5	
2П829Б9	800	15	45		0,5	
2П829В	600	20	60		0,15	
2П829В9	600	20	60		0,15	
2П829Г	200	40	120		0,05	125
2П829Г9	200	40	120	0,05		
2П829Д	100	50	150	0,01		
2П829Д9	100	50	150	0,01		
2П829Е	60	60	180	0,005		
2П829Е9	60	60	180	0,005		
2П829Ж	30	80	240	0,03		
2П829Ж9	30	80	240	0,03		
2П829И9	200	40	120	0,05		



Таблица 6. Мощные полевые транзисторы фирмы IR повышенной надежности

Тип	$U_{СМ\max}$ , В	$R_{СВ\kappa\lambda}$ , МОм	$I_{СМ\max}$ , А	$Q_{зr}$ , нКл	Корпус
IRFP3206PBF	60	3,0	200	120	TO-247
IRFP3306PBF	60	4,2	160	85	
IRFP3077PBF	75	3,3	200	160	
IRFP4110PBF	100	4,5	180	150	
IRFP4310ZPBF	100	6,0	134	120	
IRFP4410ZPBF	100	9,0	97	83	

Таблица 7. Мощные МДП-транзисторы фирмы IR с максимальным током стока

Тип	Корпус	$U_{СВ\kappa\lambda}$ , В	$R_{СВ\kappa\lambda}$ , МОм	$Q_{зr}$ , нКл	$I_c (T_c = +25^\circ C)$ , А
AUIRF1324S-7P	D2Pak-7P	24	1	180	429
AUIRF1324S	D2Pak	24	1,65	160	340
AUIRF1324	TO-220	24	1,5	160	353
AUIRF2804S-7P	D2Pak-7P	40	1,6	170	320
AUIRF2804S	D2Pak	40	2	160	270
AUIRF2804L	TO-262	40	2	160	270
AUIRF2804	TO-220	40	2	160	270
AUIRF1404ZS	D2Pak	40	3,7	100	180
AUIRF1404ZL	TO-262	40	3,7	100	180
AUIRF1404Z	TO-220	40	3,7	100	180
AUIRF4104S	D2Pak	40	5,5	68	120
AUIRF4104	DPak	40	5,5	59	119
AUIRF4104	I-Pak	40	5,5	59	119
AUIRF4104	TO-220	40	5,5	68	120

К сожалению, остаточное напряжение при близких к максимальным токах стока довольно велико — до 10–15 В.

International Rectifier тем временем дополнила номенклатуру силовых MOSFET в корпусе TO-247 новым семейством приборов

на диапазон напряжений 60–100 В (табл. 6). Новые транзисторы предназначены для таких приложений с повышенной надежностью работы, как промышленные импульсные источники питания, источники бесперебойного питания, привод с батарейным питанием для

профессионального электроинструмента, вилочных подъемников, электрокаров.

Недавно IR объявила о выпуске новых MOSFET для применения в устройствах автомобильной электроники (электронных переключателях, DC/DC-преобразователях, элементов управления двигателями и т. д.). Эти приборы отличаются высокой надежностью, малым сопротивлением канала во включенном состоянии (табл. 7) и работой в тяжелых условиях. Они сертифицированы по автомобильному стандарту AEQ-101. Он требует, чтобы сопротивление канала транзистора изменялось не более чем на 20% после 1000 температурных циклов тестирования. Однако при расширенном тестировании приборы серии AU имели максимальное изменение сопротивления менее 10% после 5000 температурных циклов. Эта серия транзисторов имеет диапазон максимальных напряжений стока 24–100 В. Минимальное сопротивление открытого канала у транзистора AUIRF1324S-7P составляет всего 1 МОм.

Особо следует выделить новые автомобильные MOSFET AUIRF7739L2 и AUIRF7665S2 в корпусе DirectFET2. Прибор AUIRF7739L2, выполненный в корпусе DirectFET2 большого размера (Large Can), имеет сопротивление канала всего 0,7 МОм и демонстрирует исключительно большую плотность мощности и высокий КПД. Заряд затвора транзистора AUIRF7665S2 (в малом корпусе Small Can) составляет всего 8,3 нКл, что позволяет ему обеспечивать высокие динамические характеристики.

Недавно компания объявила о выпуске двух новых 25-В DirectFET MOSFET IRF6706S2PBF и IRF6798MPBF с максимальным для высокочастотных DC/DC-преобразователей КПД. Эти транзисторы сочетают в себе ультранизкие значения заряда затвора и сопротивления открытого канала одновременно, что приводит к значительному уменьшению потерь на проводимость и переключение. Транзистор IRF6798MPBF в корпусе DirectFET среднего размера (Medium Can) с сопротивлением канала в открытом состоянии 0,95 МОм позволяет получить высокий КПД во всем диапазоне сопротивления нагрузки. Он имеет встроенный диод Шоттки, что приводит к уменьшению потерь, связанных с проводимостью диода «сток–база», и потерь на обратное восстановление.

Приборы используют уникальную технологию корпуса с медной клипсой. Она обеспечивает очень плотное прилегание к кристаллу и позволяет получить сопротивление перехода «кристалл–медная клипса» менее 1 МОм. Эффективность этих транзисторов больше, чем у транзисторов в других корпусах, за исключением DirectFET. Помимо более низкого активного сопротивления выводов, данный корпус обладает улучшенными тепловыми характеристиками.

Огромное число мощных полевых транзисторов выпускает известная фирма ON Semiconductor. На ее сайте представлено 459 типов мощных MOSFET и микросхем на их основе. Их характеристики близки к таковым для приборов IR и других ведущих компаний. Подобные приборы выпускает и множество

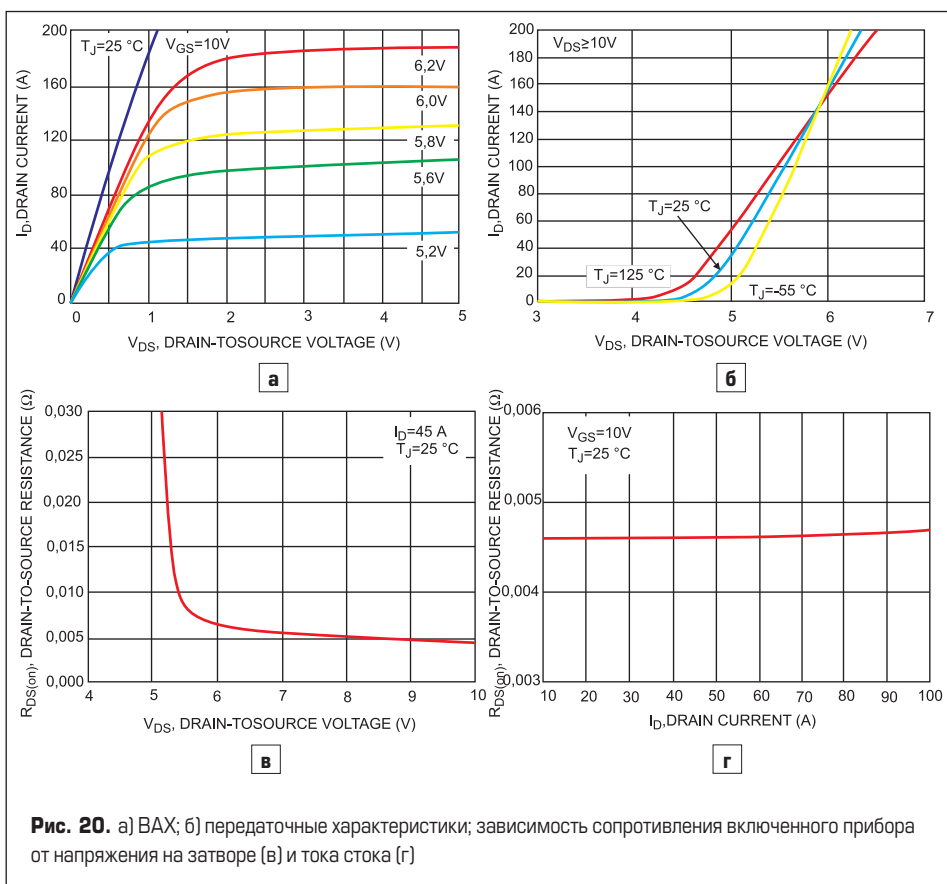


Рис. 20. а) ВАХ; б) передаточные характеристики; зависимость сопротивления включенного прибора от напряжения на затворе (в) и тока стока (г)



других зарубежных производителей, порою со своими фирменными технологиями.

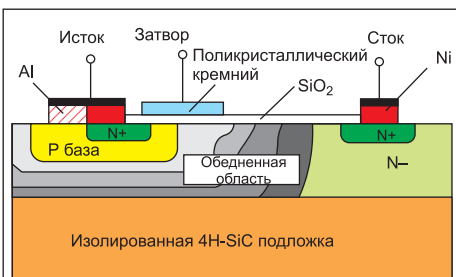
На рис. 20 показаны характеристики приборов NDF11N50Z и NDP11N50Z (60 В, 90 А, 5,7 мОм). Особенно впечатляет семейство выходных ВАХ — из них видно, что остаточное напряжение включенных приборов меньше 1 В даже при токе стока около 180 А. И это значение уже не является рекордным!

**Прогноз на завтра**

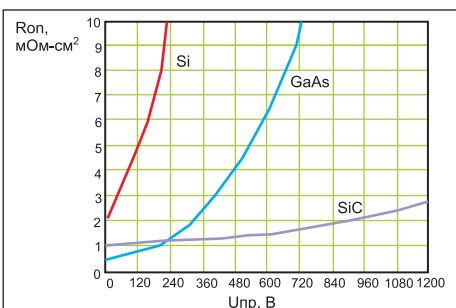
Журналисты часто преувеличивают перспективы развития транзисторов, ссылаясь на последние успехи нанотехнологий. С восторгом описываются микромощные транзисторы с нанотрубками вместо металлических выводов, приборы на основе графена с толщиной слоев в 1 атом и прочие, пока явно экзотические, приборы. Конечно, в цифровых микросхемах они найдут определенное применение, но это не относится к силовым приборам. Последние должны быть «дубовыми» в лучшем (и, конечно, переносном) смысле этого слова.

Кремниевые мощные полевые транзисторы почти достигли своих потенциальных возможностей. Их развитие пошло по пути создания более надежных корпусов и интеллектуальных модулей. Основной путь развития мощных полевых транзисторов связан с применением новых полупроводниковых материалов с более широкой, чем у кремния, шириной запрещенной зоны и большей подвижностью носителей тока.

Значительные успехи в последние годы получены на пути внедрения высокотемпературных полевых транзисторов на карбиде кремния (SiC). Опытные образцы высоковольтных транзисторов уже появились (рис. 21). Это



**Рис. 21.** Структура полевого транзистора LDMOS на основе SiC



**Рис. 22.** Сопротивление сток–исток полевых транзисторов, построенных на разных полупроводниковых материалах

приборы с горизонтальной структурой канала, именуемые LDMOS (Lateral DMOSFET).

Напряженность поля пробоя у SiC почти на порядок выше, чем у кремния, а удельное сопротивление примерно в 400 раз меньше. Это позволяет получать транзисторы с малым сопротивлением сток–исток в открытом состоянии (рис. 22). Опытные приборы с двойной диффузией и толщиной эпитаксиального слоя в 10 мкм позволяют получать максимальное напряжение на стоке до 1600 В, а приборы LDMOS — до 10 кВ. Появление таких серийных транзисторов — дело ближайшего будущего. При этом могут использоваться описанные ранее структуры кремниевых приборов, в том числе с вертикальным каналом.

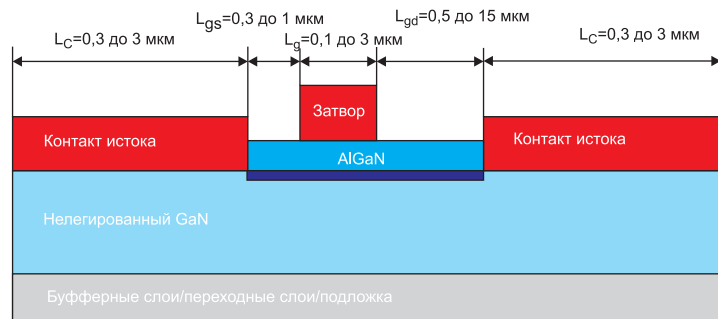
Прорыв в области разработки приборов будущего на основе нитрида галлия (GaN) совершила компания IR, создав новую технологию GaNpowIR™ [33]. Первым выпущенным продуктом на основе GaN стал силовой модуль

(IP210 и IP211) для понижающих синхронных DC/DC-преобразователей, который включает в себя 30-В транзисторы на арсениде галлия и рассчитан на напряжение на входе 12 В и выходное напряжение 1 В или ниже. Приборы, работающие с более высокими напряжениями, будут выпущены в ближайшие годы.

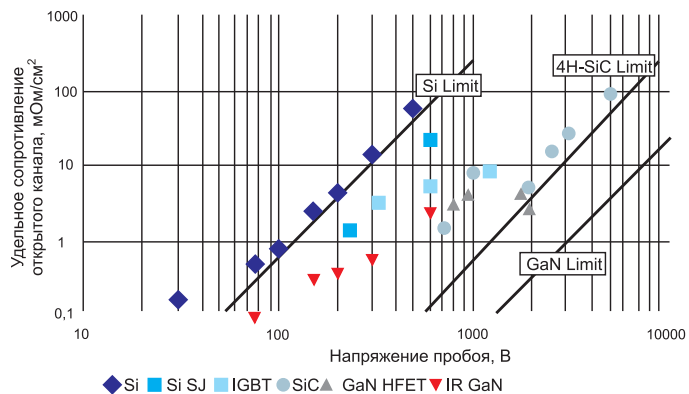
Структура и размеры транзистора GaN-on-Si, реализованного по этой технологии, показаны на рис. 23. Основой структуры прибора является транзистор с высокой подвижностью электронов (HEMT), у которого между тонким слоем AlGaN и слоем GaN формируется область двумерного электронного газа.

Полевые GaN-транзисторы, полученные на базе платформы GaNpowIR от IR, уже на данный момент времени по характеристикам значительно превосходят свои аналоги (рис. 24).

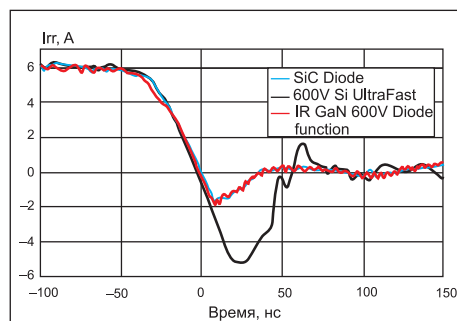
Платформа GaNpowIR™ была разработана специально для запуска в серийное производство приборов на арсениде галлия (GaAs),



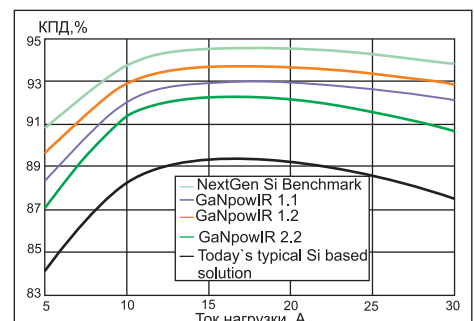
**Рис. 23.** Упрощенная структура мощного полевого транзистора на основе GaN



**Рис. 24.** Сравнение удельного сопротивления включенных транзисторов, созданных на разных полупроводниковых материалах



**Рис. 25.** Сравнение временных зависимостей тока при выключении диодов на материалах разного типа



**Рис. 26.** Зависимость КПД от тока нагрузки для преобразователей на основе различных технологий

которые превосходят существующие сегодня по показателям качества, надежности, КПД и др. Были разработаны прототипы устройств на базе первых приборов на основе GaAs и показаны их преимущества. Первым выпущенным на рынок устройством на базе GaN стал силовой модуль (IP2010 и IP2011) от IR, предназначенный для понижающих DC/DC-преобразователей.

Совместно с мощными полевыми транзисторами часто применяются шунтирующие их диоды. IR продемонстрировала высоковольтные диоды на базе GaAs, которые соперничают с карбид-кремниевыми диодами. Рис. 25 показывает, что характеристики тока в режиме обратного восстановления для GaN- и SiC-диодов одинаковы и гораздо лучше, чем у кремниевых 600-В диодов с накоплением заряда.

О влиянии вариантов технологий GaN на такую важную характеристику, как зависимость КПД от тока нагрузки, наглядно свидетельствует рис. 26.

International Rectifier рассматривает технологию GaNpowIR как новый этап развития силовых полупроводниковых приборов (рис. 27) [33]. За основу сравнения взят введенный фирмой комплексный показатель качества (FOM).

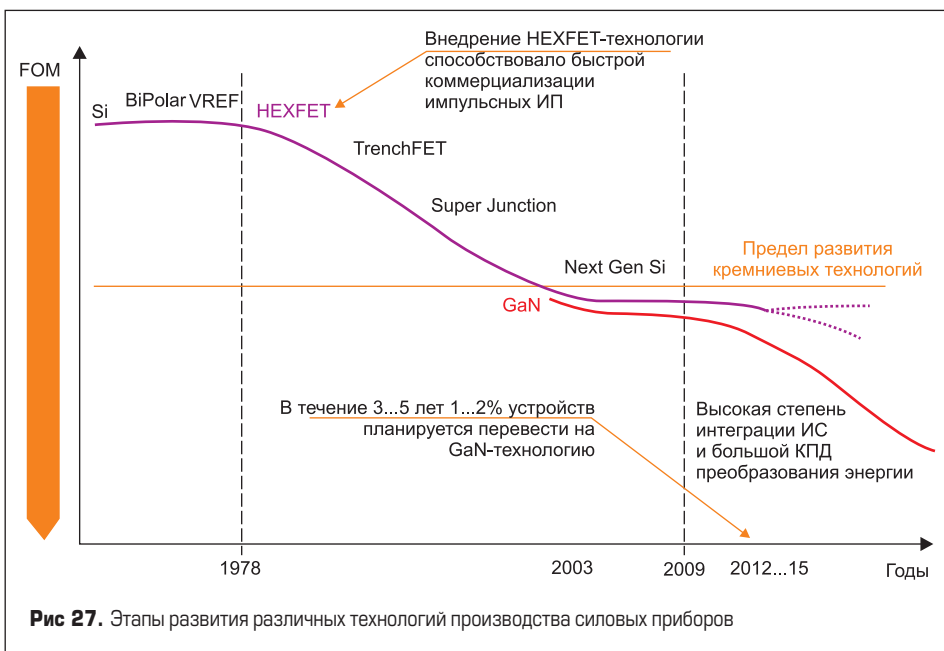


Рис 27. Этапы развития различных технологий производства силовых приборов

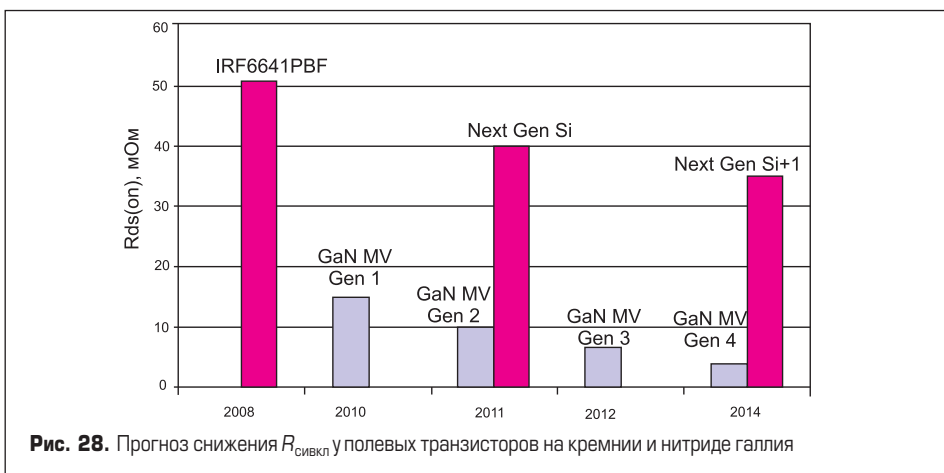


Рис. 28. Прогноз снижения  $R_{ds(on)}$  у полевых транзисторов на кремнии и нитриде галлия

Интересен прогноз IR по снижению сопротивления  $R_{сивкл}$  мощных полевых транзисторов на основе Si и GaN (рис. 28). Согласно этому рисунку, снижение  $R_{сивкл}$  у кремниевых транзисторов намного меньше того же показателя у приборов на основе GaN. Это говорит о большой перспективности последних.

Список литературы

1. Кобболд Р. Теория и применение полевых транзисторов. Л.: Энергия. 1975.
2. Окснер Э. С. Мощные полевые транзисторы и их применение / Пер. с англ. М.: Радио и связь. 1985.
3. Бачурин В. В., Сопов О. В. Мощные полевые транзисторы // Обзоры по электронной технике. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. М.: ЦНИИ «Электроника». 1971. Вып. 3.
4. Сопов О. В., Бачурин В. В., Дьяконов В. П. и др. Мощные ВЧ и СВЧ МДП-транзисторы — импульсные приборы наносекундного диапазона // Обзоры по электронной технике. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. М.: ЦНИИ «Электроника». 1978. Вып. 5.
5. Бачурин В. В., Бельков А. К., Пыхтунова А. И. Мощные МДП-транзисторы и их применение в радиоэлектронных схемах // Обзоры по электронной технике. Сер. 2.

- Полупроводниковые приборы. М.: ЦНИИ «Электроника». 1980. Вып. 1.
6. Бачурин В. В., Бельков А. К., Дьяконов В. П. Мощные МДП-транзисторы и их применение в радиоэлектронных схемах // Обзоры по электронной технике. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. М.: ЦНИИ «Электроника». 1981. Вып. 7.
7. Бачурин В. В., Дьяконов В. А., Ежов В. С., Ремнев А. М. Мощные переключающие МДП-транзисторы и их применение. Ч. 1. Проблемы конструирования // Обзоры по электронной технике. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. М.: ЦНИИ «Электроника». 1983. Вып. 10.
8. Бачурин В. В., Дьяконов В. А., Ежов В. С., Ремнев А. М. Мощные переключающие МДП-транзисторы и их применение. Ч. 2. Области применения // Обзоры по электронной технике. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. М.: ЦНИИ «Электроника». 1981. вып. 1.
9. Бачурин В. В., Дьяконов В. П. Наносекундные сильноточные и высокочастотные ключи на мощных МДП-транзисторах // ПТЭ. 1979. № 5.
10. Бачурин В. В., Дьяконов В. П., Сопов О. В. Мощные высокочастотные и сверхвысокочастотные МДП-транзисторы // Электронная промышленность. 1979. № 5.
11. Бачурин В. В., Никонов А. С., Садовская Е. А., Сопов О. В. Мощный ВЧ полевой транзистор с изолированным затвором КП902 // Электронная промышленность. 1975. № 4.
12. Бачурин В. В., Дьяконов В. П., Сопов О. В. Мощный высокочастотный МДП-транзистор КП904 // Электронная промышленность. 1979. № 5.
13. Бачурин В. В., Бычков С. С., Дьяконов В. П., Прушинский А. К. Мощный кремниевый сверхвысокочастотный МДП-транзистор КП908 // Электронная промышленность. 1980. № 1.
14. Бачурин В. В., Бычков С. С., Дьяконов В. П. и др. Мощный кремниевый высоковольтный МДП-транзистор КП701 // Электронная промышленность. 1985. № 9.
15. Бачурин В. В., Бычков С. С., Дьяконов В. П. и др. Высоковольтный мощный МДП-транзистор КП702 // Электронная промышленность. 1986. № 2.
16. Бачурин В. В., Бельков А. К., Левин А. Б., Садовская Е. А. Кремниевый мощный высокочастотный МДП-транзистор КП909 // Электронная промышленность. 1982. № 1.
17. Бачурин В. В., Дьяконов В. П., Новожилов А. М. Мощные полевые транзисторы во вторичных источниках питания // Электронная промышленность. 1982. № 1.
18. Бачурин В. В., Дьяконов В. П., Левин А. Б., Смердов В. Ю. Мощные высоковольтные ключевые МДП-транзисторы для бестрансформаторных источников питания // Электричество. 1986. № 3.
19. Конев Ю. И., Машуков Е. В. Силовые ключи на МДП-транзисторах // Электронная техника в автоматике. Сб. статей. 1983. Вып. 14.
20. А. с. № 757061 (СССР). Полупроводниковый прибор / В. В. Бачурин, В. П. Дьяконов,

- А. И. Гордеев, А. М. Ремнев // Заявка 2725221, приоритет от 15.02.1979.
21. Дьяконов В. П. Силовые полевые транзисторы в энергетических устройствах // Электричество. 1984. № 4.
22. Бачурин В. В., Ваксемберг В. Я., Дьяконов В. П., Максимчук А. А., Ремнев А. М., Смердов В. Ю. Схемотехника устройств на мощных полевых транзисторах. Справочник. М.: Радио и связь. 1994.
23. Дьяконов В. П., Максимчук А. А., Ремнев А. М., Смердов В. Ю. Энциклопедия устройств на полевых транзисторах. М.: СОЛОН-Р. 2002.
24. Дьяконов В. П. Лавинные транзисторы и их применение в импульсных устройствах. М.: Радио и связь. 1973.
25. Дьяконов В. П. Лавинные транзисторы и тиристоры. Теория и применение. М.: СОЛОН-Пресс. 2008.
26. Дьяконов В. П. Лавинные транзисторы вчера, сегодня и завтра // Компоненты и технологии. 2010. № 8.
27. Эванс, Хоффман, Окснер и др. Мощные полевые транзисторы с V-МОП-структурой — перспективные конкуренты мощных биполярных приборов // Электроника. 1978. № 13.
28. Полищук А. Проблемы выбора ключевых транзисторов для преобразователей с жестким переключением // Силовая электроника. 2004. № 2.
29. Гордеев А. Новая серия отечественных DMOSFET-транзисторов // Силовая электроника. 2009. № 3.
30. СкорOVEROV К. Новое поколение низковольтных MOSFET в корпусах SO-8, PQFN и DirectFET // Новости электроники. 2009. № 12.
31. Соломатин М. Новинки MOSFET в стандартных корпусах // Новости электроники. 2010. № 7.
32. Никитин А. Преимущества транзисторов в корпусах DirectFEI // Новости электроники. 2010. № 7.
33. Макдональд Т. Преимущества силовых приборов на базе GaN от International Rectifier // Новости электроники. 2010. № 7.
34. Полупроводниковые приборы. Транзисторы средней и большой мощности. Справочник. М.: Радио и связь. 1989.