

Особенности современных технологий

изготовления изделий полупроводниковой силовой электроники

Современный уровень развития технологий микроэлектроники не только позволяет создавать интегральные схемы, состоящие из нескольких миллионов транзисторов, но и обеспечивает возможность реализации на одном полупроводниковом кристалле ранее несовместимых элементов с различными электрическими характеристиками — низковольтные и высоковольтные, низкочастотные и высокочастотные. В частности, это позволило создать новый класс микросхем — интеллектуальные интегральные схемы силовой электроники.

**Анатолий Белоус
Александр Прибыльский**

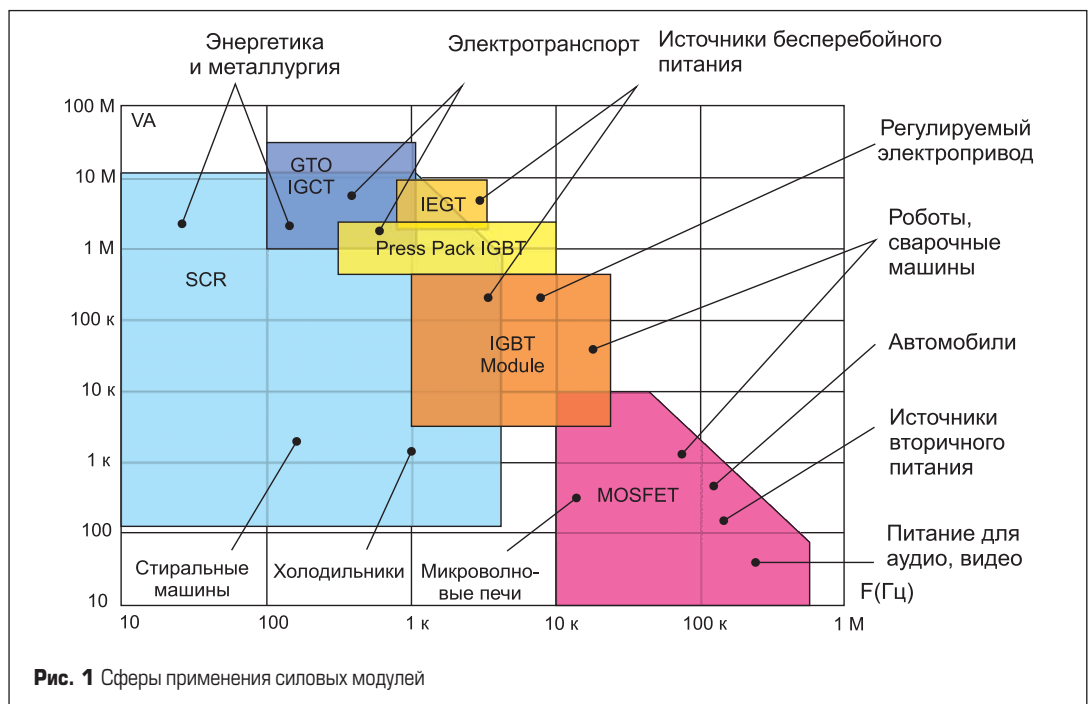
В настоящее время силовая полупроводниковая электроника является научной и практической базой деятельности человека в области создания высокоэффективных энергосберегающих устройств и систем для энергетики и металлургии, бытовой техники (холодильники, стиральные машины, СВЧ-печи, аудио-, видеоаппаратура), автомобильной промышленности (электротранспорт), станкостроения (регулируемый электропривод), осветительной аппаратуры (уличные и бытовые светильники) и др.

На рис. 1 [1] представлена диаграмма, иллюстрирующая вышесказанное только для одного из направлений силовой электроники — IGBT-модули

и MOSFET. Здесь по оси x показан частотный диапазон работы силовых полупроводниковых устройств (F), а по оси y — произведение величины напряжения питания (V) на величину тока потребления (A).

Так, например, типовые источники вторичного питания для аудио и видеотехники должны работать в диапазонах от 10 кГц до 1 МГц в диапазоне значений произведения $V \cdot A$ 10–1200.

Для изготовления современных микросхем и полупроводниковых приборов силовой электроники разработчики используют практически все известные типы технологий: биполярную, КМОП, БиКМОП, ДМОП, КДМОП, БиКДМОП, КНИ [2, 3]. Выбор того или иного конкретного типа технологии



определяется разработчиком исходя из совокупности технических требований, предъявляемых заказчиком к проектируемой схеме. Важной особенностью современных технологий проектирования силовых интегральных схем и полупроводниковых приборов является возможность сочетания на одном кристалле высоковольтных и низковольтных элементов интегральных схем. Понимание особенностей использования различных технологий создания таких изделий позволяет максимально использовать достоинства той или иной технологии, правильно выбрать конструкцию изделия с учетом обеспечения максимальной надежности его работы в проектируемом приборе или системе [4, 5]. Ниже приведено краткое описание типовых конструкций и особенностей технологического процесса их изготовления, достоинства и недостатки каждого из технологических решений.

Силовая электроника как научно-техническое направление сформировалась для эффективного управления преобразованием электрической энергии. В общем виде все известные системы преобразования электрической энергии можно представить как структуру, содержащую следующие блоки: блок реализации алгоритмов управления, блок сопряжения, выходной блок преобразования и управления исполнительным устройством. Микросхемы и дискретные приборы, выполняющие функции этих блоков систем преобразования электрической энергии, относятся к элементной базе силовой электроники. Описанию структур и особенностей их применения в реальных приборах и системах посвящен ряд работ отечественных авторов [6–8].

Согласно данным американской фирмы International Rectifier, одного из крупнейших изготовителей элементов силовой электроники, больше всего электрической энергии в мире потребляют электродвигатели (55%), на втором месте — осветительные приборы (21%). Мощные источники питания для всех типов электронного оборудования (средств связи, компьютерного оборудования и других потребителей) потребляют всего 6% электрической энергии, а на остальных потребителей приходится оставшиеся 18%.

Используя процесс преобразования электроэнергии, позволяющий перейти от устаревших ламп накаливания к электронным флуоресцентным, можно вдвое снизить потребление энергии. Флуоресцентные лампы потребляют на 75% энергии меньше, чем лампы накаливания, при одном и том же уровне освещенности. По другим источникам информации, замена традиционных ламп накаливания сверхъяркими светодиодами с питанием от специальных драйверов — преобразователей электроэнергии — позволит сберечь около 20% всей потребляемой мировой электроэнергии. Около 40% можно сэкономить за счет замены «старых» нерегулируемых двигателей на электрический привод с электронным регулированием.

В большинстве находящихся в эксплуатации типовых холодильников для управления работой основного энергопотребляющего агрегата — компрессора — используется не-

регулируемый электродвигатель. В настоящее время ведущие производители холодильников уже поставляют на мировой рынок компрессоры с изменяющейся скоростью работы электродвигателя. Для типовых бытовых холодильников с объемом 566 дм³ это означает снижение домашнего потребления энергии более чем на 70%.

Полупроводниковые устройства преобразования энергии позволяют также существенно уменьшить объемы и габаритные размеры радиоэлектронных бытовых и промышленных приборов, снизить требования к их охлаждению, исключить от 5 до 10% потерь энергии в мощных источниках питания для компьютеров, серверов, сетей и телекоммуникационного оборудования.

Таким образом, развитие силовой электроники является одним из несомненных достижений научно-технического прогресса, что заставляет разработчиков различных радиоэлектронных устройств активно изучать и использовать элементную базу силовой электроники в своих изделиях. В этой связи следует отметить, что требования, предъявляемые, например, к современной радиоэлектронной аппаратуре, которыми руководствовались разработчики 90-х годов прошлого века, подверглись весьма существенному пересмотру и изменениям. Теперь особое внимание уделяется не только их функциональным возможностям и характеристикам, но и массогабаритным показателям и оптимизации расхода электроэнергии, что крайне существенно при работе от аккумулятора-

ров. Подверглись существенному пересмотру и подходы к проектированию систем питания для аппаратуры радиоэлектронных комплексов нового поколения как гражданского, так и военного (сухопутно-наземного, морского, авиационного и космического) применений, как неперемещаемой (стационарной), так и подвижной (мобильной).

В общем случае все многообразие микроэлектронных устройств силовой электроники [6, 10] можно разделить на две группы: дискретные полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы (ИМС) для силовой электроники (рис. 2).

В свою очередь, силовые дискретные полупроводниковые приборы подразделяются на силовые диоды (диоды Шоттки, диоды Зенера, стабилитроны), силовые дискретные транзисторы (биполярные, Дарлингтона, MOSFET, IGBT, интеллектуальные MOSFET), многопереходные структуры (тиристоры, динисторы, симисторы) и мощные силовые модули на основе IGBT и тиристорно-диодных сборок.

Отметим их основные отличительные признаки.

Так, дискретные полевые транзисторы с изолированным затвором типа MOSFET и их интегрированные сборки предназначены, в основном, для использования в корректорах коэффициента мощности (ПЕС), в полумостовых или мостовых структурах высокочастотных (ВЧ) инверторов и преобразователей энергии. Их отличительной характеристикой является возможность реализации

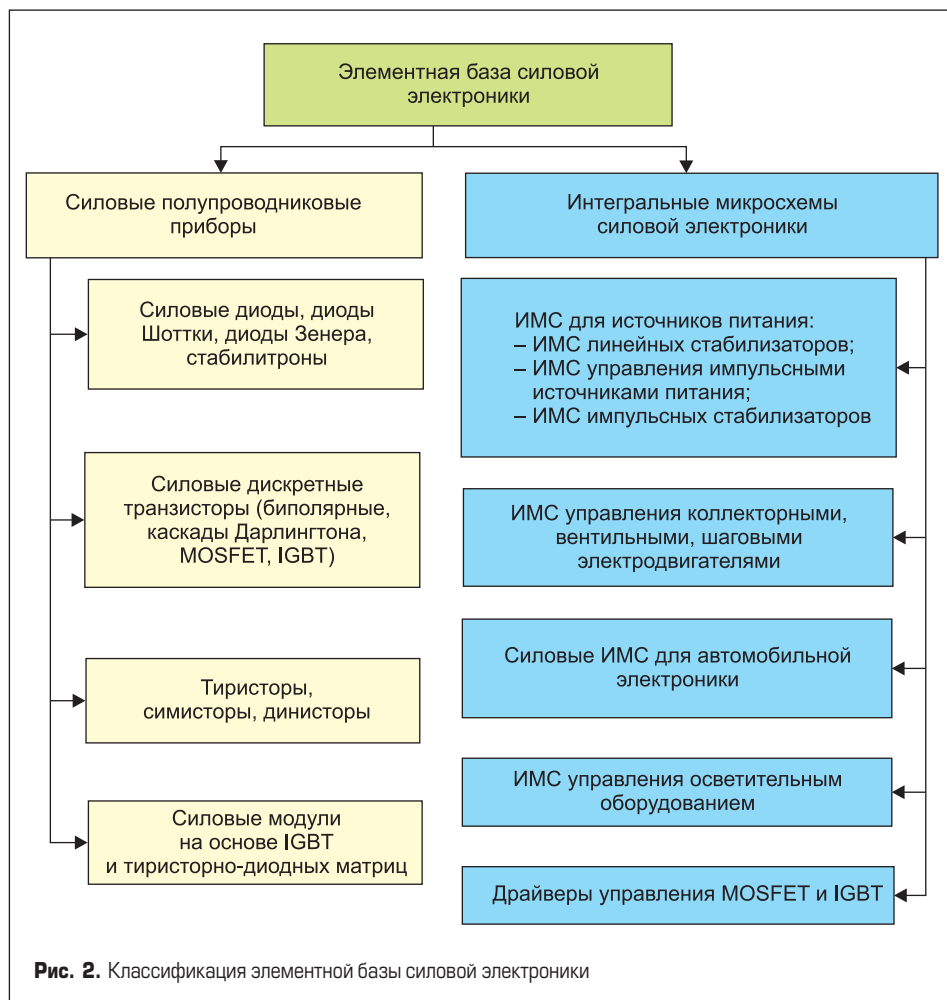


Рис. 2. Классификация элементной базы силовой электроники

на основе MOSFET законченных систем и источников питания большой и сверхбольшой мощности, которые могут работать на частотах преобразования 100–300 кГц и более, с удельной мощностью до 700–1000 Вт/дм³.

Силовые модули, в свою очередь, подразделяются на универсальные и специализированные. Среди универсальных следует выделить интегрированные силовые модули (ИСМ или IPM) на основе IGBT, которые широко используются в системах управления электроприводом в одно- или трехфазных электросетях. Они могут включать в себя: выпрямительные мосты, включенные по соответствующей схеме, содержащие от двух до семи модулей IGBT, прерыватели (чопперы) на IGBT и мощные пусковые терморезисторы.

На таких универсальных силовых модулях создаются различные модификации систем управления: однофазный выпрямитель/чоппер/инвертор, однофазный выпрямитель/инвертор, трехфазный выпрямитель/инвертор, трехфазный выпрямитель/чоппер/инвертор и др.

Специализированные силовые модули проектируются обычно на очень большую мощность и имеют достаточно сложную внутреннюю организацию. Например, стандартный трехфазный инвертор типа SK/POWER фирмы SEMIKRON мощностью до 250 кВт широко используется в электрическом или гибридном автотранспорте мировых фирм — производителей автомобильной техники и содержит в своем составе следующие блоки: силовую IGBT-секцию; датчики напряжения, тока и температуры; устройства управления и защиты; перепрограммируемый цифровой сигнальный микропроцессор; фильтр электромагнитных помех; радиатор жидкостного охлаждения и др.

Одной из разновидностей этого направления также являются силовые модули, конструктивно выполненные в виде последовательного соединения из двух IGBT и предназначенные для применения в системах управления электроприводом, сверхмощных импульсных источниках вторичного электропитания и т. п.

Запираемые тиристоры (GTO) в основном используются в тяговых электроприводах

большой мощности [1, 3, 7]. Наибольшее применение они находят в случае совместного использования со встроенными микросхемами управления (IGBT) на напряжениях 4500–6000 В и токе 400–2700 А.

Для работы в условиях высокого уровня электромагнитных помех, возникающих в процессе коммутации (это энергосберегающие преобразователи для линий передачи постоянного тока высокого напряжения типа HVDC, компенсаторы реактивной мощности типа SVC), используются мощные высоковольтные тиристоры с прямым управлением светом по оптическому кабелю (так называемые Light Triggered Thyristors, LTT).

Самостоятельное направление развития ветви «силовые тиристоры» — диодные модули на напряжения 800–1600 В и токи до 90 А. Обычно в их состав включают последовательно соединенные как минимум два мощных тиристора, которые в соответствии с алгоритмом управления встроенного контроллера можно объединять для организации схемы встречно-параллельного включения.

Кремниевые диоды Шоттки используются как индивидуально, так и в составе силовых сборок на напряжение 35–50 В, причем в составе такого силового модуля обычно используются как минимум два диода Шоттки, которые также могут быть использованы в различных комбинациях их соединений.

Наиболее широко в энергосберегающей аппаратуре используются стандартные выпрямительные кремниевые силовые диоды и силовые модули на их основе.

Применяя эти модули в сетевых выпрямителях для сверхмощных блоков питания, можно существенно снизить потери мощности в самом выпрямительном узле, а также повысить КПД всего блока питания.

В свою очередь все интегральные микросхемы для силовой электроники в зависимости от их назначения и особенностей применения можно разделить на пять основных групп:

- ИМС для источников питания (наиболее значимая по составу номенклатуры серия ИМС);

- ИМС для управления различными электродвигателями (коллекторными, шаговыми, вентильными);
- силовые ИМС для автомобильной электроники (их также используют в электронных системах управления сельскохозяйственной техникой — в тракторах, зерно- и кормоуборочных комбайнах, грузовых и карьерных автомобилях, автопогрузчиках, мотоциклах и пр.);
- ИМС для управления осветительным оборудованием (бытовыми и промышленными лампами дневного света, мощными промышленными светильниками, светильниками для освещения улиц и т. п.);
- ИМС управления мощными силовыми дискретными полупроводниковыми приборами (MOSFET, IGBT и модули на их основе).

Биполярные технологии изготовления интегральных схем

Исторически первой технологией для производства микросхем силовой электроники была биполярная технология с изоляцией *p-n*-переходом, которая обеспечила пробивное напряжение $U_{кз}$ транзистора не менее 40 В. На рис. 3 представлен вертикальный срез типовой полупроводниковой структуры биполярной силовой интегральной схемы. Показаны в обобщенном виде [3, 8, 12] активные структуры наиболее широко используемых в микросхемах элементов — вертикальных *n-p-n*-транзисторов, вертикального и горизонтального *p-n-p*-транзисторов, резисторов, а также конструкции изолирующих и «скрытых» слоев n^+ - и p^+ -типа проводимости. Наличие в структуре двух типов конструктивной реализации транзисторов *p-n-p* (вертикальной и горизонтальной) обуславливает возможность реализации широкого диапазона их усилительных свойств.

Рассмотрим последовательность выполнения технологических операций для структуры, представленной на рис. 3, без детализации режимов проведения этих операций. В высокоомной подложке *p*-типа проводимости 1 методом диффузии (сурьмы или мышьяка) формируют n^+ -скрытый слой 2, который предназначен для уменьшения сопротивления коллекторных областей вертикальных *n-p-n*-транзисторов 3 и базовых областей горизонтальных *p-n-p*-транзисторов 4. Необходимо отметить, что наличие высоколегированного n^+ -слоя позволяет уменьшить коэффициент усиления неизбежно возникающих в этой структуре «паразитных» *p-n-p*-транзисторов (на подложку). Удельное сопротивление n^+ скрытого слоя лежит в диапазоне 10–30 Ом/кВ. Вместо объемного удельного сопротивления ρ_v , удобнее пользоваться поверхностным удельным сопротивлением ρ_s . Связь между ними будет понятна из рассмотрения следующего соотношения, которое определяет сопротивление какого-либо слоя:

$$R = \rho_v l / S = \rho_v l / bh = \rho_s l / b = \rho_s n, \quad (1)$$

где: l — длина проводящей области; S — поперечное сечение проводящей области;

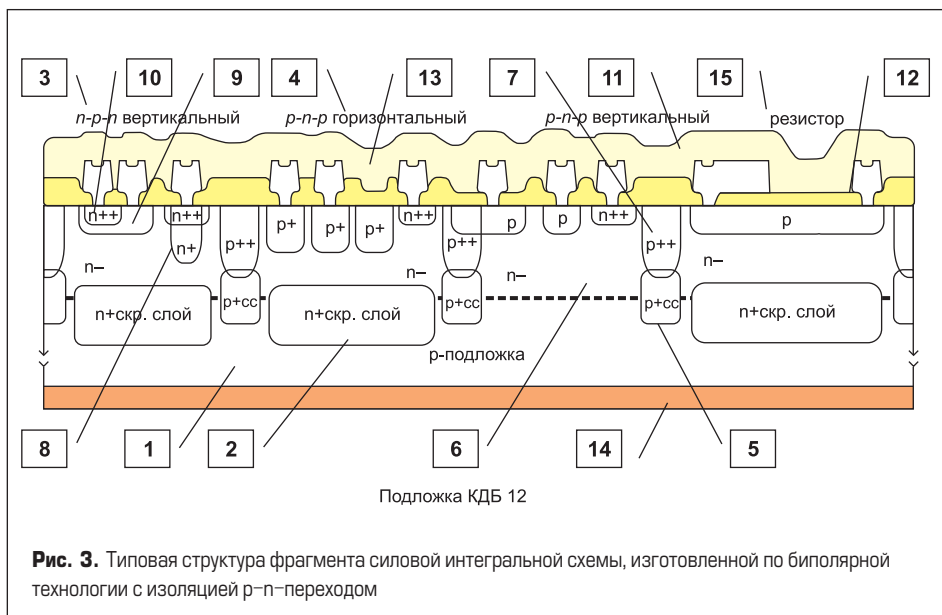


Рис. 3. Типовая структура фрагмента силовой интегральной схемы, изготовленной по биполярной технологии с изоляцией *p-n*-переходом

b — ширина проводящей области; h — глубина проводящей области; n — число квадратов.

В дальнейшем методом диффузии бора создают p^+ -скрытый слой 5, который используется для лучшей электрической изоляции элементов друг от друга. Далее наращивают эпитаксиальную пленку 6 n -типа проводимости толщиной ($15 \pm 1,5$) мкм (для обеспечения $U_{кз} \geq 40$ В процесса) и $\rho_v = (4,5 \pm 0,45)$ Ом·см. Для легирования эпитаксиальной пленки используются сурьма или мышьяк из-за их низкой диффузионной способности. Затем методом диффузии бора формируют слой разделения 7. Хорошая изоляция элементов достигается при наличии контакта с p^+ -скрытым слоем.

Область глубокого коллектора 8 транзисторов n - p - n -типа создается методом диффузии фосфора. Эта область должна достичь области n^+ -скрытого слоя для уменьшения величины последовательных сопротивлений тела коллектора n - p - n -транзистора и базы p - n - p -транзистора.

Область базы 9 формируется методом диффузии или ионного легирования бора. Область эмиттера 10 формируется методом диффузии или ионного легирования фосфора.

На получившейся полупроводниковой структуре вскрываются контакты к областям в окисле 11. Затем методом напыления формируется металлизированная разводка 12 AlSi (1%) толщиной 1–3 мкм. Большая толщина необходима для более мощных приборов с целью уменьшения плотности тока в дорожках металлизации. Допустимая плотность тока — 2×10^5 А/см² (для низковольтных интегральных схем) или 5×10^5 А/см² (для приборов, имеющих неорганическое покрытие).

Завершается процесс изготовления созданием пассивирующего покрытия (окисла) 13 — НТФСС (низкотемпературное фосфоросиликатное стекло).

Для снижения величины теплового сопротивления $R_{Ткр-кор}$ мощных силовых приборов проводится утонение пластины с 460 до 350 мкм (для пластин диаметром 100 мм) механической шлифовкой обратной стороны пластины. Кроме того, если при сборке в корпус используется посадка кристалла на пайку, то на обратную (непланарную) сторону пластины наносят металлизацию 14 (Ti/W/Ag).

Рассмотренный процесс ориентирован на создание n - p - n -транзисторов. Транзисторы p - n - p -типа и другие элементы формируются из областей n - p - n -транзисторов 3. Горизонтальный p - n - p -транзистор 4 формируется на основе слоя p -базы n - p - n -транзистора. Резисторы 15 могут формироваться на основе слоя p -базы n - p - n -транзистора или отдельным слоем.

КМОП-технология изготовления интегральных схем силовой электроники

КМОП-технология, обеспечивающая возможность использования напряжения питания схем 12 В, широко применяется для

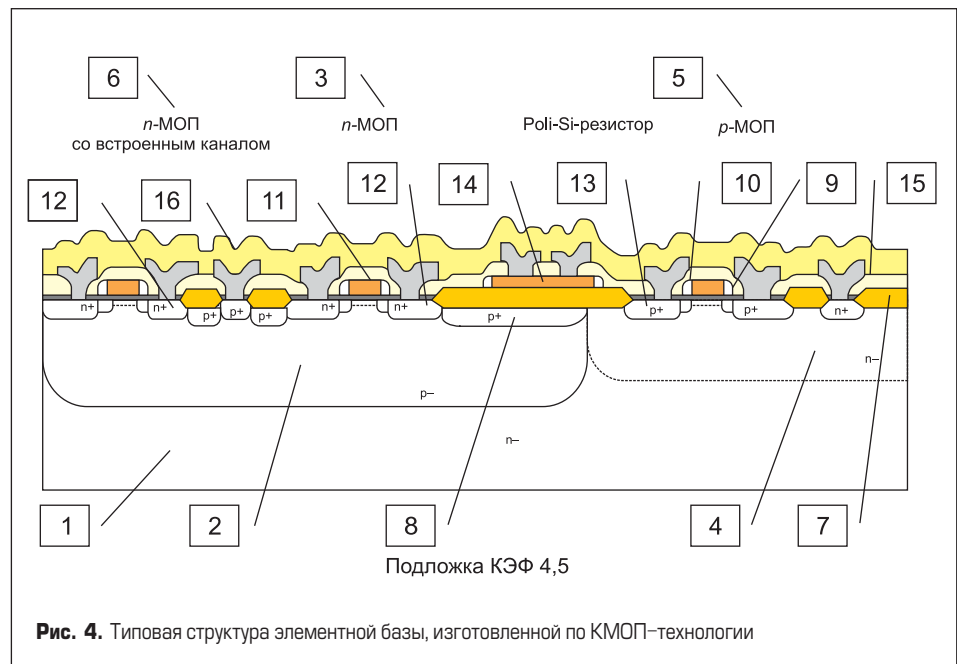


Рис. 4. Типовая структура элементной базы, изготовленной по КМОП-технологии

проектирования таких массовых схем, как стабилизаторы напряжения. В дополнение к обычной КМОП-технологии для создания интегральных схем силовой электроники необходимо создать n -МОП-транзистор со встроенным каналом для получения температурно независимого источника опорного напряжения. Кроме того, чтобы обеспечить преимущество КМОП-технологии, например по сравнению с биполярной, необходимо создать высокоомные резисторы с удельным сопротивлением порядка 10 кОм/кВ.

Структура и последовательность технологических операций КМОП показаны на рис. 4. В подложке 1 n -типа проводимости КЭФ 4,5 методом диффузии формируют карманы p -типа 2 для n -МОП-транзисторов 3 и n -типа 4 для p -МОП-транзисторов 5. Глубина карманов 5–6 мкм. Наносится маска нитрида кремния Si_3N_4 , проводится легирование бора (p -тип), затем локальное окисление, удаляется Si_3N_4 , проводится легирование фосфора (n -тип). Слой нитрида кремния Si_3N_4 защищает поверхность кремния от окисления. В p -кармане в месте будущего LOCOS (локальное окисление) методом ионного легирования бора создают p^+ -охранное кольцо 6. Формируют разделение LOCOS: наносят слой нитрида кремния Si_3N_4 , проводят фотолитографию, окисляют кремний. Там, где нет нитрида, растет изолирующий окисел.

Методом ионного легирования фосфора формируют встроенный канал для n -МОП-транзистора со встроенным каналом 8. Проводят окисление толщиной 0,025 мкм подзатворного диэлектрика 9. Осаждают поликристаллический кремний и проводят травление поликремния и подзатворного диэлектрика. Ионным легированием фосфора получают n -истоки, а ионным легированием бора — p -истоки. Слаболегированные истоки позволяют устранить эффект «горячих» носителей. Активация легированных фосфором n -истоков и легированных бором p -истоков проводится после плазмохимического трав-

ления «спейсеров» 10. «Спейсеры» — окисные боковые стенки затвора, позволяющие разделить n^+ - от n - и p^+ - от p -истоков МОП-транзисторов. Причем слой «затвор» 11 является односторонней маской для n^+ - и p^+ -истоков, а слой «затвор» со «спейсерами» — для n - и p -истоков.

Ионным легированием фосфора формируют n^+ -истоки 12. Ионным легированием бора формируют p^+ -истоки 13. Легированием бора получают высокоомные поликремневые резисторы 14 (10 кОм/кВ).

Затем осаждают окисел 15, вскрывают контакты к областям и формируют слой металлизации толщиной 1,1 мкм.

Завершается процесс формированием пассивирующего покрытия 16 ПХО (плазмохимическое осаждение кремния) толщиной 0,4 мкм и нанесением нитрида кремния Si_3N_4 толщиной 0,7 мкм.

БиКМОП-технология изготовления интегральных схем силовой электроники

БиКМОП-технология характеризуется изготовлением на одном кристалле всех вышеуказанных транзисторов — n -МОП- (1), p -МОП- (2), n - p - n - (3), p - n - p - (4) транзисторов, а также целого ряда пассивных элементов (рис. 5).

На подложке p -типа проводимости методом диффузии или ионным легированием сурьмы (или мышьяка) формируют n^+ -скрытый слой 5. Методом диффузии или ионным легированием бора формируют p^+ -скрытый слой 6. Выращивается эпитаксиальный слой n -типа проводимости 7 толщиной 2,4 мкм с удельным сопротивлением 4,5 Ом·см.

Методом диффузии или ионного легирования формируют слой «разделение» p -типа 8.

Формируют карманы n -типа 9 и p -типа проводимости 10. Наносится маска Si_3N_4 , проводится легирование бора (p -тип), делается локальное окисление, удаляется Si_3N_4 , проводится легирование фосфора (n -тип).

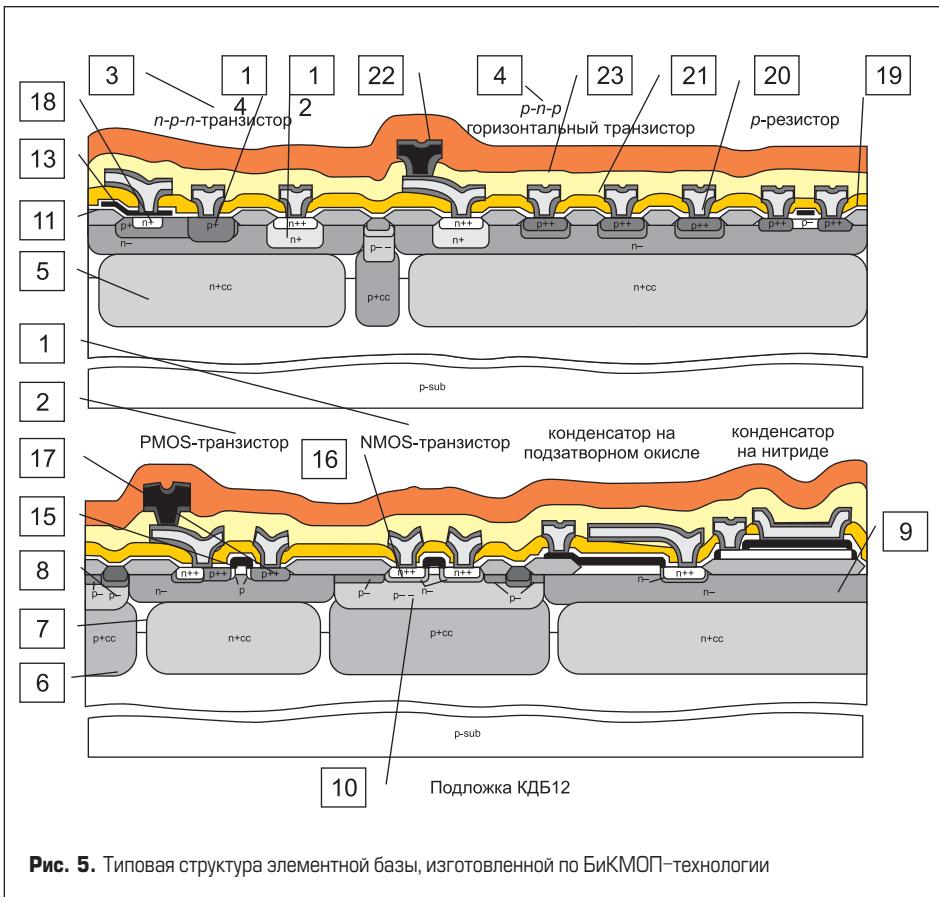


Рис. 5. Типовая структура элементной базы, изготовленной по БиКМОП-технологии

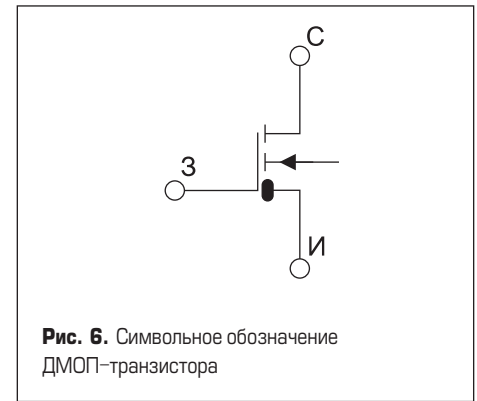


Рис. 6. Символьное обозначение ДМОП-транзистора

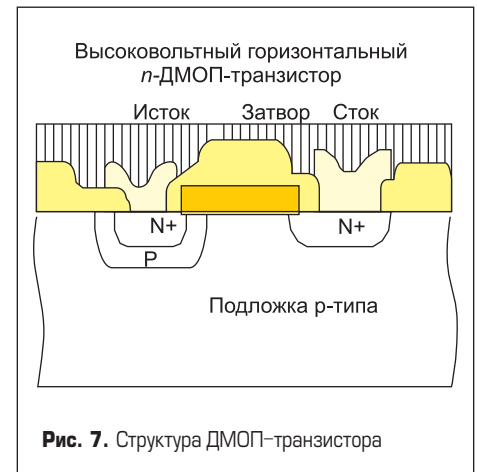


Рис. 7. Структура ДМОП-транзистора

Формируют LOCOS-изоляцию 11 толщиной 0,52 мкм.

Ионным легированием фосфора формируют глубокий коллектор 12. Ионным легированием бора формируют слои «база» 13 и «p⁺-база» 14. Общим подлегированием бора обеспечивают требуемый порог p-МОП-транзистора. Для n-МОП-транзистора регулирование порога проводится подлегированием в канал.

Далее выращивают подзатворный окисел толщиной 0,013 мкм. Наносят поликристал-

лический кремний 15 толщиной 0,35 мкм. Легируют его диффузией фосфором (удельное сопротивление 90 Ом/кВ.), проводят травление. Проводят легирование n-истоков (фосфор) и n⁺-истоков (мышьяк) 16.

Так же, как и в КМОП-технологии, активация легированных фосфором n-истоков и легированных бором p-истоков проводится после плазмохимического травления «спейсеров». Причем слой «затвор» 15 является односторонней маской для n⁺- и p⁺-истоков,

а слой «затвор» со «спейсерами» — для n- и p-истоков.

Затем проводят легирование p⁺-истоков 17. Формируют n⁺-эмиттер n-p-n-транзистора 18. Для этой цели используют поликристаллический кремний, легированный фосфором для уменьшения глубины p-n-перехода.

Наносят первый междууровневый диэлектрик 19 СТО (среднетемпературный окисел) толщиной 0,12 мкм и БФСС (борофосфоросиликатное стекло) толщиной 0,65 мкм. Затем

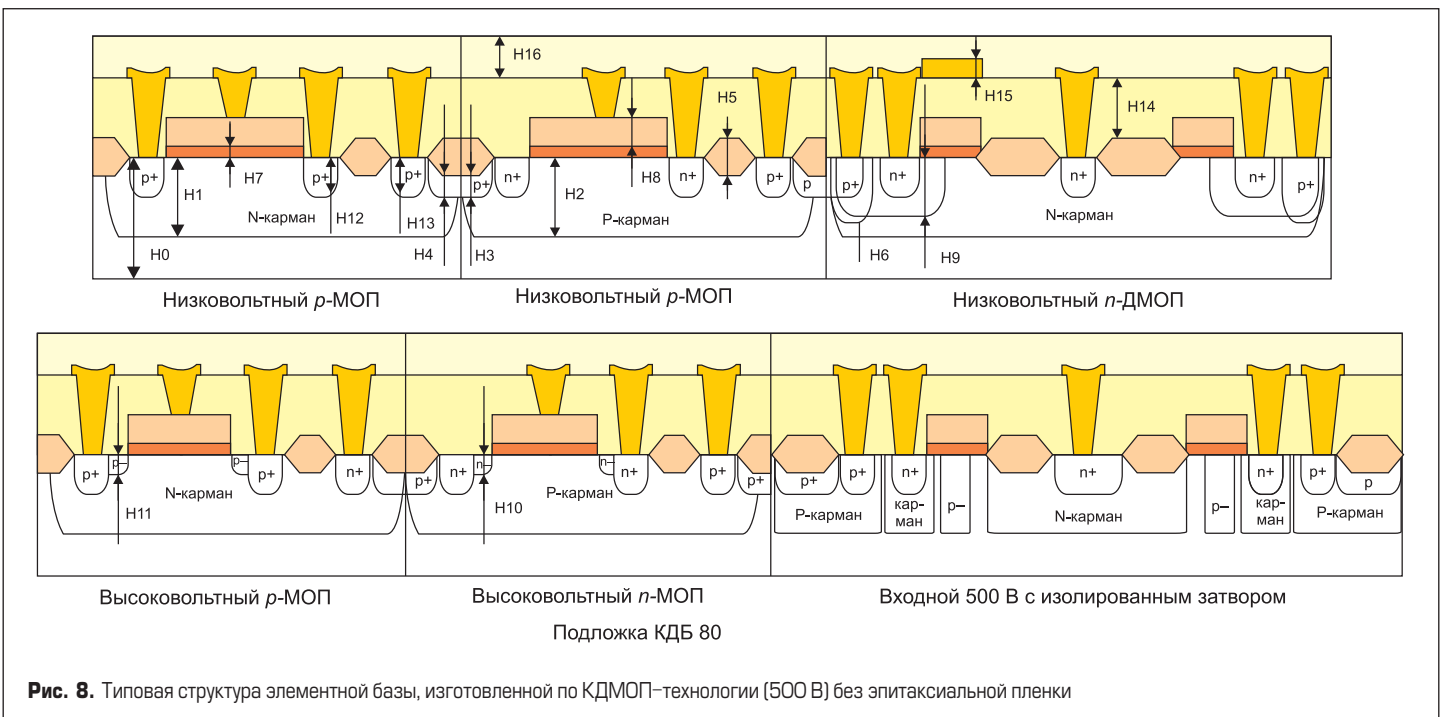


Рис. 8. Типовая структура элементной базы, изготовленной по КДМОП-технологии (500 В) без эпитаксиальной пленки

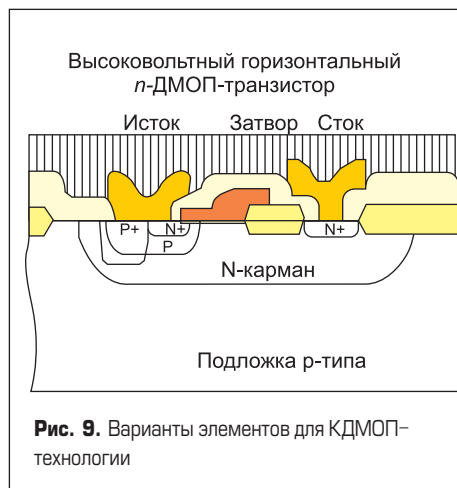
наносит первый слой металла 20 толщиной 0,5 мкм.

Наносят второй слой диэлектрика 21 (ПХО). Вскрывают вторые междууровневые контакты. Наносят второй слой металла 22 толщиной 0,9 мкм. Наносят пассивирующее покрытие 23 — 0,4 мкм ПХО и 0,7 мкм Si₃N₄.

ДМОП-, КДМОП- и БиКДМОП-технология изготовления интегральных схем силовой электроники

Указанные выше типы технологий характеризуются тем, что МОП-транзистор с малой длиной канала (меньше 1 мкм) может быть сформирован следующим образом: сначала сквозь вскрытое окно проводят легирование *p*-типа, а затем через то же окно проводят легирование *n*⁺-истоков. Поскольку из-за поликремниевое затвор получается самосовмещением *n*⁺- и *p*-областей, эффективная длина канала определяется как расстояние между двумя горизонтальными областями *n*⁺- и *p*-типа проводимости. Длина канала, следовательно, определяется профилями *p*- и *n*⁺-областей и автоматически совмещается с областью истока. Таким способом можно получать точно расположенные каналы, не зависящие от точности изготовления и наложения фотошаблонов, травления и фотолитографии [1].

МОП-транзисторы с двойной диффузией называют ДМОП-приборами (рис. 6). Из-за поверхностного заряда и низкого уровня ле-



гирования подложки участок под затвором возле диффузионного канала *p*-типа будет сильно инвертирован. То есть в этом месте будет присутствовать встроенный канал. ДМОП-приборы не симметричны (рис. 7). Из-за того, что канал короткий, можно получать очень высокие значения крутизны характеристики, проводимости канала, а также высокое быстродействие. В настоящее время ДМОП-транзисторы используются для повышения рабочих напряжений питания интегральных схем [9, 11]. Это позволяет в интегральных схемах управления импульсными источниками питания непосредственно на шину «питание» подавать напряжение 220 В или располагать мощный MOSFET на одном кристалле

со схемой управления. Сочетание на одном кристалле высоковольтных элементов в виде ДМОП-транзисторов с низковольтными элементами широко используется в интегральных схемах силовой электроники.

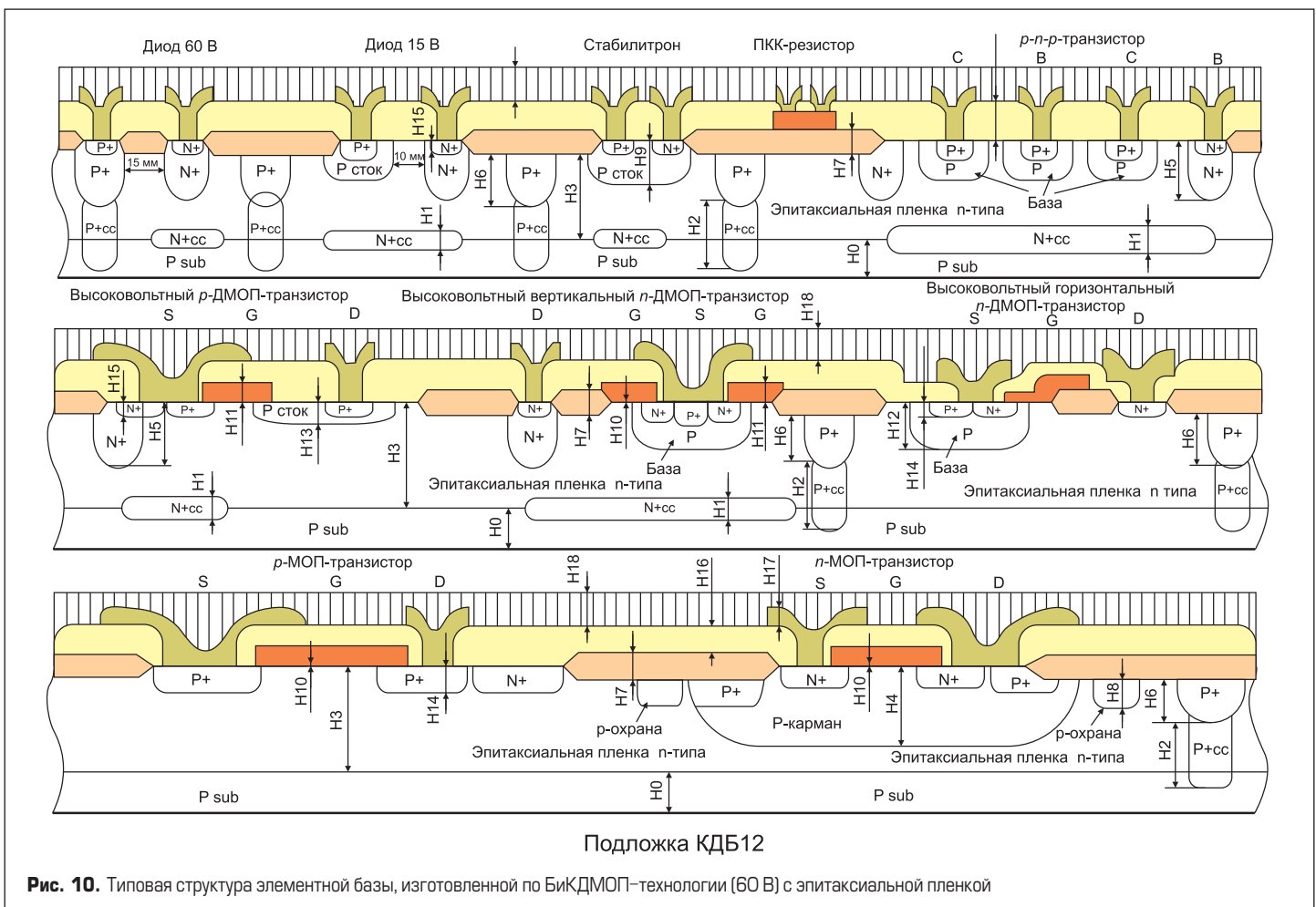
На одном кристалле БИС обычно располагают МОП- и ДМОП-транзисторы (КДМОП-технология) или МОП-, ДМОП- и биполярные транзисторы (БиКДМОП-технология).

КДМОП-технологии изготовления интегральных схем силовой электроники (БиКДМОП без эпитаксиальной пленки)

На рис. 8, 9 приведена типовая структура элементной базы, изготовленной по КДМОП-технологии (500 В). КДМОП-технология характеризуется отсутствием операции выращивания эпитаксиальной пленки и изготовлением на одном кристалле интегральных *n*-МОП-, *p*-МОП-, ДМОП-транзисторов, а также пассивных элементов. Транзисторы *n-p-n*-, *p-n-p*-типа также могут быть получены при данной технологии из областей МОП- и ДМОП-транзисторов.

БиКДМОП-технологии изготовления ИМС силовой электроники

На рис. 10, 11 приведена типовая структура элементной базы, изготовленной по БиКДМОП-технологии (≥60 В).



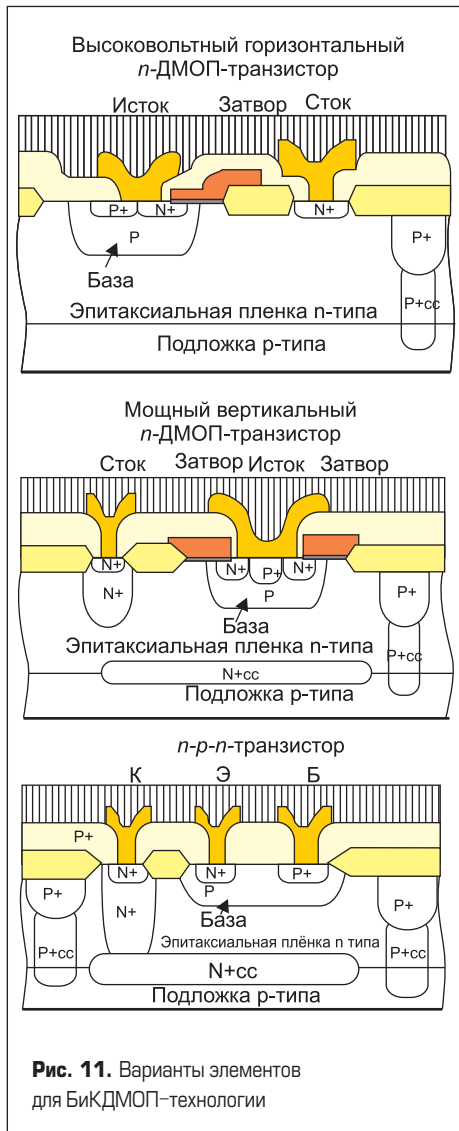


Рис. 11. Варианты элементов для БиКДМОП-технологии

БиКДМОП-технология характеризуется наличием n^+ -скрытого слоя и операции выращивания эпитаксиальной пленки. В данном технологическом процессе на одном кристалле интегральной схемы изготавливаются n -МОП-, p -МОП-, ДМОП-транзисторы, а также биполярные транзисторы n - p - n -, p - n - p -типа и пассивные элементы. Эпитаксиальная пленка и n^+ -скрытый слой значительно улучшают характеристики биполярных транзисторов.

Достоинства и недостатки интегральных схем силовой электроники, реализованных по разным технологиям

Основные достоинства и недостатки интегральных схем силовой электроники, изготовленных по разным технологиям (биполярным, КМОП, ДМОП, КДМОП, БиКМОП, БиКДМОП), в обобщенном виде представлены в сводной таблице.

Поскольку процесс разработки новых силовых интегральных схем начинается с этапа составления технического задания, при выборе технологического базиса реализации конструкции необходимо принимать во внимание данные, приведенные в таблице, наряду с анализом требований, предъявляемых заказчиком к функциональным возможностям, электрическим и динамическим параметрам, конструкции корпуса проектируемого силового устройства. Главным достоинством рассмотренных технологий является возможность сочетания на одном кристалле высоковольтных и низковольтных элементов схем, что, вкуче с возможностью использования методов программного управления, позволяет проектировать новые поколения интеллектуальных интегральных схем силовой электроники.

Заключение

ИС силовой электроники являются основой для создания новых типов интеллектуальных энергосберегающих систем и устройств, сочетающих высокие технические характеристики с одновременным уменьшением потребляемой мощности. Развитию этого направления способствует разработка новых технологий, которые позволяют реализовать на одном кристалле полупроводниковые элементы с существенно отличающимися электрическими параметрами, например низковольтных схем управления и высоковольтных управляемых элементов, что позволяет отнести направление создания ИС силовой электроники к самым быстроразвивающимся направлениям микроэлектроники.

Литература

1. Бандура Г., Пастухов В. Российские IGBT-модули // Силовая электроника. 2007. № 1.
2. Тилл У., Лаксон Дж. Интегральные схемы: материалы, приборы, изготовление/ Пер. с англ. М.: Мир. 1985.
3. Белоус А., Ефименко С., Турцевич А. Полупроводниковая силовая электроника. М.: Техносфера. 2013.
4. Ланцов В., Эраносян С. Надежность силовых устройств в России: мифы и реалии, проблемы и пути решения. Часть 3 // Силовая электроника. 2009. № 1.
5. Особенности изделий силовой полупроводниковой электроники / В. В. Баранов, А. И. Дудкин, А. Я. Соловьев, А. С. Турцевич, И. И. Рубцевич // Труды 12-й Межд. науч.-практич. конф. «Современные информационные и электронные технологии». Одесса. 23–27 мая 2011.
6. Эраносян С., Ланцов В. Электронные компоненты для мощных импульсных источников питания // Силовая электроника. 2006. № 2.
7. Ланцов В., Эраносян С. Электронная компонентная база силовых устройств. Часть 1 // Силовая электроника. 2009. № 5.
8. Прянишников В. Электроника: курс лекций. СПб: Корона-Принт. 1998.
9. Турцевич А. С. Получение полуизолирующего кремния для высоковольтных приборов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2008. № 1.
10. Белоус А. И. Проектирование микросхем с пониженным энергопотреблением. Минск: Интегралполиграф. 2008.
11. Моделирование и оптимизация параметров мощных ДМОП канавочных полевых транзисторов / В. В. Баранов, С. К. Дик, А. С. Турцевич, И. И. Рубцевич // Труды 12-й Межд. науч.-практич. конф. «Современные информационные и электронные технологии». Одесса. 23–27 мая 2011.
12. Формирование биполярных микросхем со щелевой изоляцией на основе глубокого анизотропного травления кремния / А. С. Турцевич, И. И. Амиров, В. А. Солoduха, В. В. Глухманчук, Г. Ф. Родин, А. Я. Соловьев // Труды 8-й Межд. науч.-практич. конф. «Современные информационные и электронные технологии». Одесса. 21–25 мая 2007.

Таблица. Основные достоинства и недостатки ИС силовой электроники

Технология	Достоинства	Недостатки
Биполярная	Легко реализуются элементы ИС силовой электроники со всеми необходимыми защитами: от превышения температуры кристалла; от короткого замыкания; от превышения входного напряжения. Малый технологический разброс электрических параметров схем.	Достаточно высокий собственный ток потребления (биполярный транзистор управляется током). Большие значения проходных напряжений U_{ds} (для интегральных схем стабилизаторов напряжения). Низкая плотность упаковки.
КМОП	Низкий собственный ток потребления. Низкие значения проходных напряжений U_{ds} . Высокая плотность упаковки.	Большой технологический разброс электрических параметров схем. На КМОП-технологии не реализуется защита от превышения температуры кристалла (необходимо дополнительно использовать биполярный транзистор).
ДМОП	Повышенные пробивные напряжения.	Необходимость использовать дополнительные типы транзисторов (только совместно с КМОП, биполярные).
БиКМОП	Сочетает преимущества биполярной и КМОП-технологий.	Большая стоимость кристаллов.
КДМОП	Сочетает преимущества биполярной, КМОП- и ДМОП-технологий.	Недостатки КМОП.
БиКДМОП	Сочетает преимущества биполярной, КМОП- и ДМОП-технологий.	Большая стоимость кристалла.