

Использование транзисторов VIMOSFET™ в схемах с высоким рабочим напряжением

Наджим Хамзин (Москва)

Статья описывает транзисторы VIMOSFET™ и сравнивает их с транзисторами других типов. Приводится множество электрических характеристик, позволяющих оценить и сравнить работу транзистора в статическом и динамическом режимах. Даны примеры практической реализации высоковольтных применений транзисторов VIMOSFET™ с подробным описанием схем и рекомендациями по их использованию.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существует большое количество приложений, которые требуют использования надёжных и эффективных транзисторных ключей, работающих при высоких напряжениях. Функциональность и эксплуатационные характеристики этих устройств можно было бы повысить за счёт использования оптимального по характеристикам полупроводникового прибора – транзисторного ключа с более высоким рабочим напряжением и высокой рабочей частотой повторения в импульсном режиме. В приложениях силовой электроники доминируют два типа транзисторных ключей – MOSFET и IGBT. Примерами могут служить различные схемы строчной развёртки в телевизионном оборудовании, радарные импульсные модуляторы, цепи разряда с использованием конденсаторов, твердотельные реле, источники резервной мощности для тягового оборудования и другие высоковольтные импульсные источники электропитания. В редких случаях можно найти

подходящий MOSFET-транзистор с напряжением запирающего выше 1000 В и удовлетворительно низким значением сопротивления в открытом состоянии $R_{DS(on)}$. В перечисленных схемах иногда приходится соединять MOSFET-транзисторы в параллельные и последовательные цепи, чтобы выполнить требования по рабочему напряжению и току (при ограниченных значениях пробивного напряжения $V_{DS(br)}$ и сопротивления $R_{DS(on)}$).

Корпорация IXYS разработала новый IGBT-транзистор на гомогенной основе с прямым током 40 А и напряжением пробоя 1600 В, чтобы восполнить потребность в более высоковольтном полупроводниковом ключе. Однако высоковольтные IGBT-транзисторы, хотя и характеризуются наилучшими значениями напряжения сток-исток и сопротивления в открытом состоянии, оказываются слишком медленными для некоторых приложений. Новое семейство высоковольтных транзисторов VIMOSFET™ той же фирмы объединяет в себе преимущества MOSFET- и

IGBT-транзисторов, а также удовлетворяет растущим потребностям в высоковольтных полупроводниковых приборах [1].

Чтобы дать подробное описание семейства транзисторов VIMOSFET™, ниже рассматриваются их внутренняя структура и электрические характеристики, а также приводится сравнительный анализ с родственными структурами транзисторов MOSFET и IGBT. Кроме того, рассмотрена одна из распространённых схем обратного преобразователя в качестве внутреннего источника питания драйвера, управляющего затвором IGBT-транзистора в инверторе, и представлены некоторые разработки источников электропитания радарных передатчиков и импульсных модуляторов [2] с использованием транзисторов VIMOSFET™. Разумный выбор резонансного способа регулирования методом ZVS/ZCS, объединённый с контролем потребления тока, позволяет проектировать источники электропитания, обладающие преимуществами при работе с СВЧ-приборами: ЛБВ, клистроны и магнетронами. Те же самые подходы можно использовать и для того, чтобы строить высоковольтные источники электропитания для множества других применений.

ВНУТРЕННЯЯ СТРУКТУРА ТРАНЗИСТОРОВ VIMOSFET™

Обычную структуру MOSFET- и IGBT-транзисторов принято называть DMOS-структурой (МОП-структура, изготовленная методом двойной (двукратной) диффузии). Такая структура состоит из слоя эпитаксиального кремния, выращенного на поверхности толстого слоя кремниевой подложки с малым сопротивлением (рис. 1а). Однако при напряжениях более 1200 В толщина n-слоя кремния, требуемая для поддержания высокого напряжения запирающего, становится чрезмерной, что делает

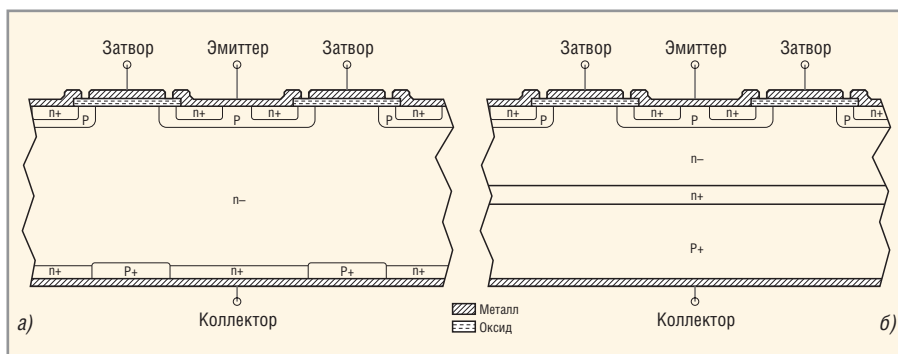


Рис. 1. Сравнение неэпитаксиальной структуры VIMOSFET™ (а) и эпитаксиальной структуры IGBT (б)

более привлекательным и менее дорогостоящим использование неэпитаксиальной структуры, приведённой на рис. 16. Этот тип структуры также известен как «однородная структура» (Homogeneous Base), или NPT (Non Punch Through – гомогенная структура).

Как было сказано выше, транзисторы BIMOSFET™ являются полупроводниковыми приборами, которые объединили в себе особенности транзисторов MOSFET и IGBT [1]. Согласно рис. 1а, транзистор BIMOSFET™ имеет типичную для IGBT р–n–р–n-структуру, но в то же время следует отметить, что в структуре сформировано соединение слоя n+ с коллектором для уменьшения усиления по току р–n–р-транзистора и, следовательно, для контроля за поведением транзистора при его выключении. Однако в такой структуре присутствует «свободный» паразитный диод между эмиттером и коллектором, ничем не отличающийся от аналогичного в MOSFET-транзисторе, благодаря которому и появилось название «транзистор серии BIMOSFET™». Поведение BIMOSFET™-транзистора при выключении определяется величиной контакта слоя n+ с коллектором. Для того чтобы внутренний диод мог быть использован при работе схемы и не создавал проблемы при переключении напряжения dV/dt , продолжительность жизни неосновных носителей должна быть уменьшена. В результате имеем силовой транзистор, который можно легко оптимизировать как для высоких, так и для низких частот переключения путём вариации величины соединения с коллектором наряду с установлением необходимого значения продолжительности жизни неосновных носителей.

Для многих схемных приложений электрические характеристики внутреннего паразитного диода не являются оптимальными, а именно, слишком велико прямое падение напряжения и заряд обратного восстановления или избыточна мощность рассеяния. Для устранения этих недостатков был разработан новый производственный процесс с целью исключения внутреннего паразитного диода без потери преимуществ, предоставляемых коллекторным контактом. Первым представителем семейства с заблокированным

паразитным диодом является транзистор BIMOSFET™ типа IXLH45N160 с напряжением запирания 1600 В, предназначенный для приложений с большим импульсным током. Этот полупроводниковый прибор имеет минимальное напряжение насыщения (3,5 В при $I_C = 30$ А). Скорость его переключения зависит от качества контакта с коллектором: увеличение сопротивления контакта приводит к повышению напряжения насыщения из-за потерь проводимости, но скорость переключения при этом растёт.

В настоящее время разработаны два типа транзисторов семейства BIMOSFET™: стандартный, управляемый как обычный IGBT-транзистор с уровнем напряжения на затворе $V_{GE} = 15$ В и тип G, управляемый как MOSFET-транзистор с теми же самыми уровнями напряжения на затворе. Статическое и динамическое поведение обоих типов транзисторов идентично.

Рассмотрим требования к схеме управления затвором для обоих типов транзисторов.

Для стандартного типа резистор в затворе и уровень напряжения на нём оказывают существенное влияние на общие потери в силовом ключе. Установлено, что, как правило, последовательно включённый с затвором резистор сопротивлением меньше 30 Ом имеет тенденцию увеличивать паразитные колебания, в то время как при установке резистора сопротивлением выше 50 Ом увеличиваются главным образом потери на включение. Поэтому транзистор BIMOSFET™ IXBH9N160 работает лучше всего при затворном напряжении 15 В и при использовании в нём резистора сопротивлением от 30 до

50 Ом. Для достижения полной проводимости в драйвере затвора необходим уровень 15 В, потому что пороговое напряжение открывания транзистора 6 В соотносится с аналогичным параметром МОП-транзистора.

Для транзисторов типа G пороговое напряжение открывания обычно составляет примерно 4 В и, таким образом, ниже, чем для транзисторов стандартного типа. Благодаря этому можно включить такой полупроводниковый прибор, используя уровень напряжения открывания драйвера затвора 10 В. Таким образом, данный транзистор семейства BIMOSFET™ может заменить, например, обычный MOSFET-транзистор на напряжение 1000 В в обратномходовом преобразователе. Благодаря высокому напряжению стока (1400...1600 В) ёмкость демпфирующего устройства (Snubber) может быть уменьшена или даже исключена вовсе. Обозначения полупроводниковых BIMOSFET™ приборов типа G оканчиваются литерой «G»: IXBF9N140G и IXBF9N160G.

Характеристики некоторых транзисторов BIMOSFET™ приведены в табл. 1.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАНЗИСТОРОВ В СТАТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

Предполагается, что транзисторы серии BIMOSFET™ должны найти применение как в высоковольтных ключевых схемах, так и схемах с повышенной рабочей частотой переключения (выше, чем у высоковольтного IGBT-транзистора). Таблица 2 позволяет сравнить электрические характеристики транзистора IXBH40N160 серии BIMOSFET™ с ха-

Таблица 1. Перечень транзисторов BIMOSFET™

Тип	BV_{CES} , мин., В	V_{CESat} при 25°C, макс., В	I_C , А, при 25°C	t_r , нс	t_f , нс	Уровень напряжения на затворе, В	Корпус
IXBH9N140 IXBH9N160	1400 1600	7	9	60	40	15	T0247
IXBH9N140G IXBH9N160G	1400 1600	7	9	200	70	10	T0247
IXBF9N140G IXBF9N160G	1400 1600	7	7	200	70	10	i4-Пак™
IXBH15N140 IXBH15N160	1400 1600	7	15	60	40	15	T0247
IXBH20N140 IXBH20N160	1400 1600	6,5	20	60	40	15	T0247
IXBH40N140 IXBH40N160	1400 1600	7,1	28	60	40	15	T0247
IXBF40N140 IXBF40N160	1400 1600	7,1	28	60	40	15	i4-Пак™

характеристиками MOSFET-транзистора на 1000 В (IXFH12N100) и IGBT-транзистора на 1200 В (IXSH35N120A). Более подробные технические характеристики транзисторов приведены в технической документации (Datasheet), которая может быть получена на сайте производителя рассматриваемых полупроводниковых транзисторов или на сайте <http://www.alldatasheet.com>. Все три полупроводниковых компонента построены с использованием кремниевого кристалла одного размера (7,11 × 8,64мм). Полученные в результате эксперимента сравнительные данные вполне корректны, потому что конкурирующие компоненты оценивались при достаточно низких значениях рабочих напряжений.

При рассмотрении табл. 2 можно заключить следующее:

- пороговое напряжение открывания V_{DSS} транзистора BIMOSFET™ является самым высоким из всех, но величина заряда затвора $Q_{g(on)}$ сопоставима с аналогичным параметром сравниваемых компонентов. Это достигается благодаря относительно низкому значению ёмкости затвора. Для определённых приложений высокое пороговое напряжение открывания транзистора можно рассматривать как преимущество (особенно в электрических схемах с большим уровнем помех);
- проводимость и импульсное значение тока в проводящем состоянии

транзистора BIMOSFET™ ниже, чем у IGBT, что заставляет делать выбор в пользу последнего при работе на низких частотах переключения. Чтобы выдержать испытание на короткое замыкание при более высоких напряжениях, требуется ограничение тока за счёт низкой проводимости. Таким образом, появляется возможность использования BIMOSFET™ в схемах, где требуется устойчивость к данному типу аварии. Для обеспечения более высоких импульсных значений тока необходимо иметь напряжение 15 В на затворе с целью достижения надлежащей проводимости. С точки зрения потерь в открытом состоянии присутствует существенная разница. При рабочем токе 2 А и уровне напряжения на затворе 15 В, MOSFET имеет величину падения напряжения сток-исток 18 В, а транзистор серии BIMOSFET™ только 4 В. Это приводит к уменьшению потерь проводимости в 4,5 раза. Из рассмотрения документации на транзисторы также можно сделать вывод о том, что более высокую допустимую нагрузку по току имеет BIMOSFET™, который может легко обеспечить протекание тока более 28 А, по сравнению с MOSFET, имеющим ограниченное значение тока на уровне 12 А;

- согласно типовым выходным характеристикам BIMOSFET™ при 125°C, его значение $V_{CE(sat)}$ выше, чем у IGBT, но падение напряжения

в открытом состоянии при токе 20 А составляет всего лишь 15% от аналогичной величины MOSFET-транзистора на 1000 В при равных размерах кремниевого кристалла. В действительности величина $V_{CE(sat)}$ для MOSFET-транзистора с напряжением 1500 В увеличилась бы ещё больше – в 2,4 раза;

- температурный коэффициент характеристик транзисторов BIMOSFET™ V_{CES} и $V_{CE(sat)}$ положительный. Характеристика прямого падения напряжения на внутреннем паразитном диоде V_F также имеет положительный температурный коэффициент. Изменение величин V_{CES} и $V_{GE(th)}$ с ростом температуры такое же, что и у IGBT-транзисторов. Однако следует отметить, что так как характеристики $V_{CE(sat)}$ и V_F имеют положительный температурный коэффициент, транзисторы BIMOSFET™ будет намного легче соединять параллельно, чем IGBT-транзисторы, которые требуют очень тщательного согласования, гарантирующего равное распределение тока в коллекторе при параллельном включении транзисторов.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАНЗИСТОРОВ В ДИНАМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

Транзистор IXBH40N160 (как и все транзисторы BIMOSFET™) действительно обладает исключительными динамическими характеристиками для полупроводниковых приборов, рассчитанных на рабочие напряжения до 1600 В. Его полное время включения при работе на резистивную нагрузку с установленным в затворе сопротивлением 5 Ом составляет обычно 245 нс. При рассмотрении работы транзистора BIMOSFET™ на индуктивную нагрузку с коммутацией тока 20 А при фиксированном уровне напряжения запириания 1000 В в условиях повышенной температуры 125°C можно заключить следующее. Присутствует относительно небольшой «хвостовой» ток, приводящий к энергии потерь $E_{(off)} = 2,4$ мДж, которая у IGBT на 50% больше. Сопротивление последовательного резистора затвора R_G прежде всего определяет скорость нарастания напряжения в коллекторе, которая увеличивается при уменьше-

Таблица 2. Сравнительные электрические характеристики транзисторов

Параметры	IXBH40N160 BIMOSFET™	IXSH35N120A IGBT	IXFH12N100 MOSFET
Статические			
V_{DSS} при 3 мА, В	1600	1200	1000
$V_{GE(th)}$ при 4 мА, В	5...9	4...8	2...4,5
$V_{CE(sat)}$ В (при токе, А)*	7 (25)	4 (35)	13,9 (6)
g_{FS} , С (при токе, А)	20 (25)	26 (35)	10 (6)
C_{ISS} (25 В), пФ	3275	3750	4000
C_{OES} (25 В), пФ	210	235	310
C_{RES} (25 В), пФ	28	60	70
$Q_{g(on)}$, нК	121	150	122
$I_c(on)$, А	110	170	48
Динамические (Tj = 125°C)			
$t_{d(on)}$ ($R_g = 5$ Ом), нс	50	80	21
t_{ri} , нс	195	150	33
t_{fi} ($R_g = 22$ Ом), нс	240	1100	32
E_{off} / A (960 В), мДж/А	0,12	0,26	0,04

* Температура 125°C

нии сопротивления и соответственно при этом уменьшается энергия потерь на выключение $E_{(off)}$.

Теперь следует отметить единственный недостаток транзисторов BIMOSFET™, который заключается в том, что не гарантируется работа без «защёлкивания», особенно при повышенных рабочих температурах. При температуре кристалла $T_J = 125^\circ\text{C}$ максимальное значение скорости нарастания напряжения dV/dt должно быть ограничено на уровне менее 10 В/нс с помощью резистора R_G или простой демпферной цепи. Безопасное выключение транзистора без применения такой цепи при импульсном значении тока выше 40 А требует установки резистора R_G с рекомендованным минимальным значением сопротивления 47 Ом. Однако следует помнить, что транзистор IXBH40N160 является только первым представителем семейства транзисторов BIMOSFET™ и ожидается дальнейшее улучшение их параметров, как это произошло с IGBT-транзисторами.

Зависимости, приведённые на рис. 2, демонстрируют частотный диапазон, в котором транзисторы BIMOSFET™ обладают преимуществом перед IGBT и MOSFET. До рабочих частот 8 кГц IGBT-транзисторы могут проводить большие значения тока. Выше этой границы инициативу перехватывают транзисторы серии BIMOSFET™, пока их потери на переключение не вынуждают передать эстафету на пределе 50 кГц транзисторам MOSFET. Однако исследования по улучшению характеристик продолжаются для всех транзисторов с полевым управлением, и в ближайшее время ожидается появление новых усовершенствованных полупроводниковых приборов. IGBT-транзисторы с гомогенной структурой действительно обладают врождёнными преимуществами, которые будут использованы для оптимизации работы с высоким рабочим напряжением и повышенной рабочей частотой переключения.

СТАНДАРТНЫЕ СХЕМЫ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Многие из предлагаемых ниже схем достаточно хорошо известны и успешно используются в приложениях силовой электроники, но следует пересмотреть некоторые из них с целью продемонстрировать достиже-

ние преимуществ за счёт использования высоковольтных транзисторных ключей. Одна из схем, которая находит всё большее распространение среди импульсных схем, – схема с разрядкой ёмкости, используемая в источниках питания лазеров, дефибрилляторов, точечных сварочных машинах и других подобных схемах. Для перечисленных приложений использование высокого напряжения является существенным преимуществом, так как энергия, запасённая в ёмкости, пропорциональна квадрату напряжения и получить быстрое время нарастания импульса тока в данном случае легче.

На рис. 3 показана типичная схема последовательного соединения двух IGBT-транзисторов, которая может быть использована для коммутации высоковольтного напряжения. Здесь необходимы следующие компоненты:

- выравнивающие резисторы по постоянному току R_s , необходимые в связи с разбросом токов утечки двух транзисторов;
- импульсный трансформатор управления затворами транзисторов;
- демпферные цепи R_c, C_s , подавляющие высокочастотные колебания напряжений, которые возникают при коммутации высоковольтного напряжения транзистором, а также уменьшающие импульсные токи при открывании высоковольтных транзисторов;
- стабилитроны $Z1, Z2$, исключающие перенапряжения при переходных процессах в высоковольтных транзисторах;
- резисторы R_g, R_e в цепи управления затвором высоковольтного транзистора, необходимые для согласования импульса на выходе трансформатора со входом транзистора.

Восемь из перечисленных компонентов могут быть исключены при использовании только одного высоковольтного транзисторного ключа. К тому же изготовить импульсный трансформатор будет гораздо проще, так как вторичная обмотка в данном случае будет только одна. Для некоторых приложений импульсный трансформатор можно и вовсе исключить.

В некоторых случаях, когда транзисторный ключ не обеспечивает работу с требуемым значением тока, используется параллельное соединение транзисторов. При параллельном соединении как MOSFET, так и IGBT для

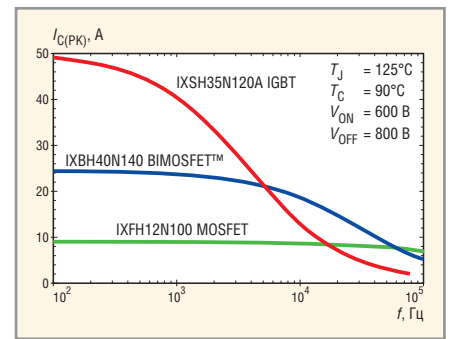


Рис. 2. Сравнение характеристик допустимой нагрузки по току BIMOSFET™ с IGBT на 1200 В и MOSFET на 1000 В

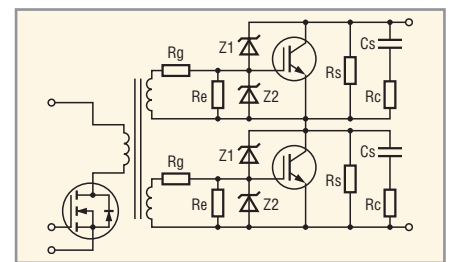


Рис. 3. Пример последовательного соединения транзисторов

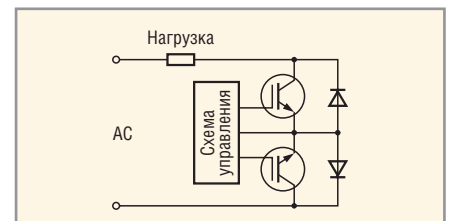


Рис. 4. Двунаправленный транзисторный ключ переменного тока

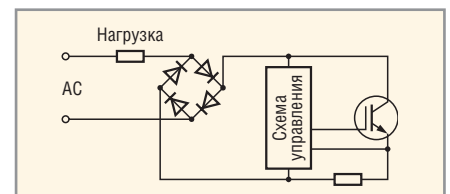


Рис. 5. Управление переменным током с использованием диодного моста

их удовлетворительной работы требуется выравнивание токов с помощью резисторов. Организовать параллельную работу транзисторов семейства BIMOSFET™ легче благодаря положительным значениям температурного коэффициента по напряжению как прямого падения напряжения на внутреннем паразитном диоде, так и напряжения насыщения транзистора.

Традиционно транзисторы используются как твердотельные переключатели переменного тока. Два возможных схемотехнических решения с использованием транзисторов показаны на рис 4 и 5. На первом из них

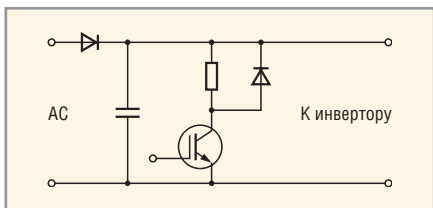


Рис. 6. Схема управления с динамическим торможением

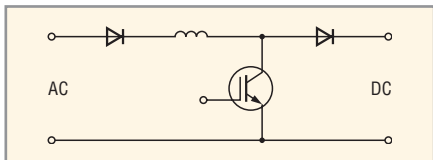


Рис. 7. Конфигурация повышающего инвертора

показано соединение двух транзисторов IXLH45N160 серии BIMOSFET™ с двумя высоковольтными диодами, в то время как во второй схеме используется один BIMOSFET™ совместно с диодным мостом. Обе схемы могут успешно использоваться при питающей сети переменного тока со среднеквадратическим значением напряжения 600 В и обеспечивают дополнительные функции точной регулировки и защиты по току. Нагрузочная способность по току схемы, приведённой на рис. 5, выше, так как ток делится между двумя транзисторами. Она также является более эффективной, так как ток протекает только через один из диодов. Преимуществом второй схемы является относительно невысокая стоимость из-за использования только одного транзистора.

Далее рассмотрим схемы с использованием тех же транзисторов, приведённые на рис. 6 и 7. Здесь показаны два варианта приложений, кото-

рые всё чаще используются в последнее время при построении силовых цепей, а именно: схема управления двигателем переменного тока с динамическим торможением и повышающие инверторы. Благодаря высокому быстродействию и возможности BIMOSFET™ работать при высоких рабочих напряжениях любой разработчик может без особых усилий спроектировать эти схемы на рабочее напряжение со среднеквадратическим значением 600 В или получить на выходе второй схемы выпрямленное напряжение 1200 В.

ОБРАТНОХОДОВОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ В СХЕМЕ ВНУТРЕННЕГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ ДРАЙВЕРОВ ЗАТВОРОВ IGBT

Одним из распространённых применений обратного преобразователя является внутренний источник питания драйвера, управляющего затвором IGBT-транзистора в инверторе [3]. Существенным требованием к транзисторному ключу обратного преобразователя, используемого в инверторе для управления двигателями, является высокое напряжение пробоя наряду с высокой скоростью переключения. Для уменьшения доминирующих динамических потерь следует иметь минимальные значения энергии потерь на включение и выключение. Основными преимуществами BIMOSFET™ являются минимальное значение потерь при включении и наименьшие потери проводимости. При проведении сравнительного анализа полной энергии потерь MOSFET и BIMOSFET™ легко

выяснить, что последние имеют полные потери на 35% меньше.

Обратного преобразователя относится к одному из простейших типов преобразователей напряжения. В него входит минимальное количество компонентов: транзисторный ключ, трансформатор, диод и два конденсатора. Энергия в данном типе преобразователя запасается в индуктивном компоненте или, как частный случай, в зазоре магнитного сердечника. В период времени, когда транзисторный ключ находится в открытом состоянии, ток первичной обмотки линейно нарастает и происходит запасание магнитной энергии в сердечнике. Далее транзисторный ключ закрывается, и начинается цикл передачи энергии в нагрузку через диод. Диапазон выходной мощности для данного типа преобразователя ограничен величиной 300 Вт. К преимуществам данной схемы относятся возможность варьирования коэффициента передачи по напряжению в широких пределах, а также возможность подключения нескольких вторичных обмоток для организации многоканального питания. Помимо этих преимуществ, здесь присутствует гальваническая развязка между входом и выходом преобразователя. Недостатками данной схемы являются необходимость выбора транзисторного ключа с высоким напряжением запирающего и наличие электромагнитных помех, возникающих при использовании трансформатора с воздушным зазором. Также следует отметить, что обратного преобразователя не будет функционировать должным образом без нагрузки или петли обратной связи, так как в противном случае выходное напряжение превысит допустимые значения и это может привести к выходу из строя транзистора.

Как было сказано выше, одним из стандартных применений обратного преобразователя является внутренний источник питания драйвера затвора IGBT-транзистора в инверторной схеме. Использование данного схемного приложения налагает строгие требования, которые могут быть удовлетворены за счёт использования топологии обратного преобразователя. Затенённая часть рис. 8 включает преобразователь и схему мягкого старта, интегрированную в схему управления затво-

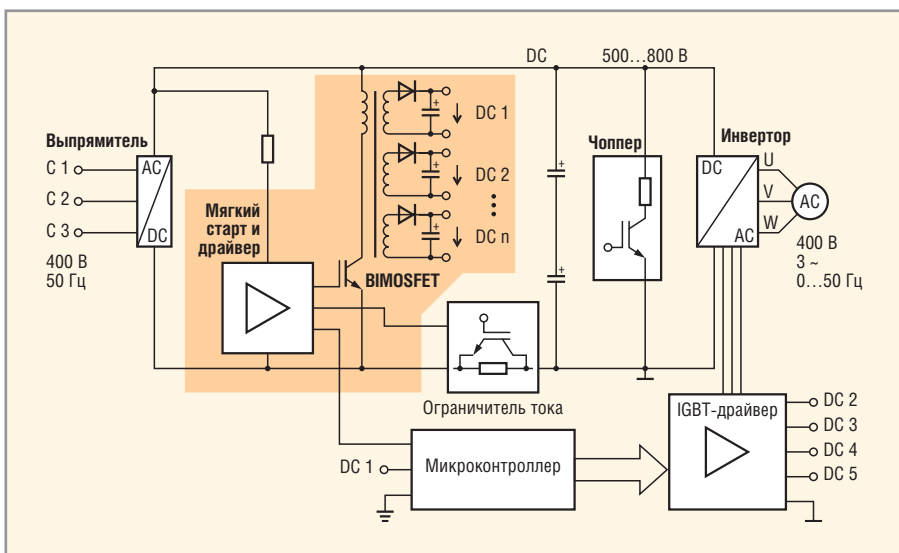


Рис. 8. Инвертор

ром транзистора BIMOSFET™. Внутренний источник питания может быть построен очень экономично, всего из нескольких компонентов. В данной схеме выпрямленное напряжение питания конвертера не стабилизировано и изменяется в достаточно больших пределах. Во время зарядки фильтрующих конденсаторов питания внутренний источник питания должен работать надлежащим образом при пониженном значении питающего напряжения. При торможении двигателя возникает обратная ситуация – напряжение питания может достигать 750 В. Выходное напряжение обратноходового преобразователя может легко регулироваться путём изменения рабочего цикла управляющих импульсов в затворе транзистора BIMOSFET™. Все необходимые изолированные выходные напряжения могут быть обеспечены требуемым количеством отдельных вторичных обмоток, например, напряжение 5 В – для питания микроконтроллера, ±15 В – для датчиков тока, общее питание +15 В – для драйверов управления нижними IGBT-транзисторами и три отдельных напряжения +15 В – для питания драйверов верхних IGBT.

Рассмотрим основные требования, предъявляемые к транзисторному ключу. Существенным требованием к транзисторному ключу обратноходового преобразователя в инверторах управления двигателями является высокое напряжение запирающего. В обратноходовом преобразователе максимальное значение напряжения на транзисторном ключе примерно равно удвоенному значению напряжения питания. Следовательно, минимальная величина напряжения пробоя транзистора должна быть выше этого напряжения. Для стандартных инверторов, управляющих двигателями при питающем напряжении сети 400 В, выпрямленное напряжение шины может достигать значений 750 В в режиме торможения двигателя. В данной ситуации следует определить требуемую величину напряжения запирающего транзистора как минимум в 1600 В.

Обратноходовые преобразователи работают при номинальных частотах преобразования в пределах 50...100 кГц. Для минимизации доминирующих динамических потерь следует стремиться к снижению

энергии потерь на включение и выключение ключевых элементов. Одним из очевидных способов снижения потерь на переключение является сокращение времени перехода транзистора в выключенное или включенное состояния. Другим хитрым способом снижения или даже исключения потерь на включение в обратноходовых схемах является совмещение моментов включения транзисторного ключа и спада тока в выходном диоде (прерывистый режим работы). В данном случае необходим защитный интервал времени (Dead time) перед началом следующего рабочего цикла. Неоспоримым преимуществом данного способа построения обратноходового преобразователя является возможность использования транзистора меньших габаритов, экономия мощности, потребляемой от источника питания, снижение потерь коммутации, в том числе на выходном диоде. Перечисленные преимущества также позволяют повысить частоту коммутации с целью уменьшения габаритов индуктивных компонентов.

Используя исключительные свойства транзисторов серии BIMOSFET™, можно построить эффективные источники электропитания, рассчитанные на большие токи и напряжения, с превосходной регулировочной характеристикой и низкими пульсациями, которые идеально подходят для передающих устройств радиолокационных станций [2]. Также могут быть реализованы жёсткие конструктивные и электрические требования к импульсным модуляторам для радаров.

ПЕРЕДАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ

Основными узлами мощных передающих устройств радиолокационных станций (РЛС) являются: высоковольтный источник электропитания, импульсный модулятор и СВЧ-прибор (ЛБВ, магнетрон и т.п.). Знания и опыт в области создания мощных высоковольтных модуляторов и источников питания, к сожалению, сокращаются, как сокращается и число поставщиков передающих устройств. Данная ситуация во многом связана с достаточно серьёзными проблемами, которые приходится решать при создании радиопередающего устройства. Концентрация

огромных мощностей (до 10 кВт для бортовой радиопередающей системы летательных аппаратов) в ограниченном объёме при жёстких требованиях к массе и габаритам многократно усложняет работу по созданию схемно-конструктивных решений и обязывает принимать дополнительные меры по обеспечению электрической прочности, установке дополнительных схем защиты и резервирования, а также по эффективному отводу тепла. При этом некоторые требования, как правило, противостоят друг другу (например, требования к габаритам и системе охлаждения), что также повышает сложность решаемых задач. Невыполнение перечисленных требований и мероприятий ведёт к существенному ухудшению рабочих характеристик аппаратуры, КПД, показателей надёжности и, как следствие, уменьшению срока службы.

В каждой импульсной РЛС присутствует передатчик с импульсным модулятором, в котором используются СВЧ-приборы, для каждого из которых требуется источник электропитания, формирующий стабильное высоковольтное напряжение с минимальными пульсациями и большим значением импульсного тока. Для импульсных модуляторов и источников сверхвысокого напряжения использование транзисторов BIMOSFET™ даёт определённые преимущества.

Существует два основных требования к конструкции РЛС:

- наличие высоковольтного источника электропитания с большим значением импульсного тока, требуемым значением регулировки и низкой величиной пульсаций, обеспечивающего защиту по току и напряжению;
- наличие импульсного модулятора.

Ниже описаны новые схемотехнические решения высоковольтного источника электропитания с большим импульсным током, которые позволяют конструировать эффективное, помехоустойчивое, лёгкое оборудование с применением современных силовых полупроводников и магнитных компонентов и использующее резонансные способы переключения при нулевом напряжении (ZVS).

Использование метода ZVS имеет следующие преимущества [4]:

- гарантируется переключение без потерь;

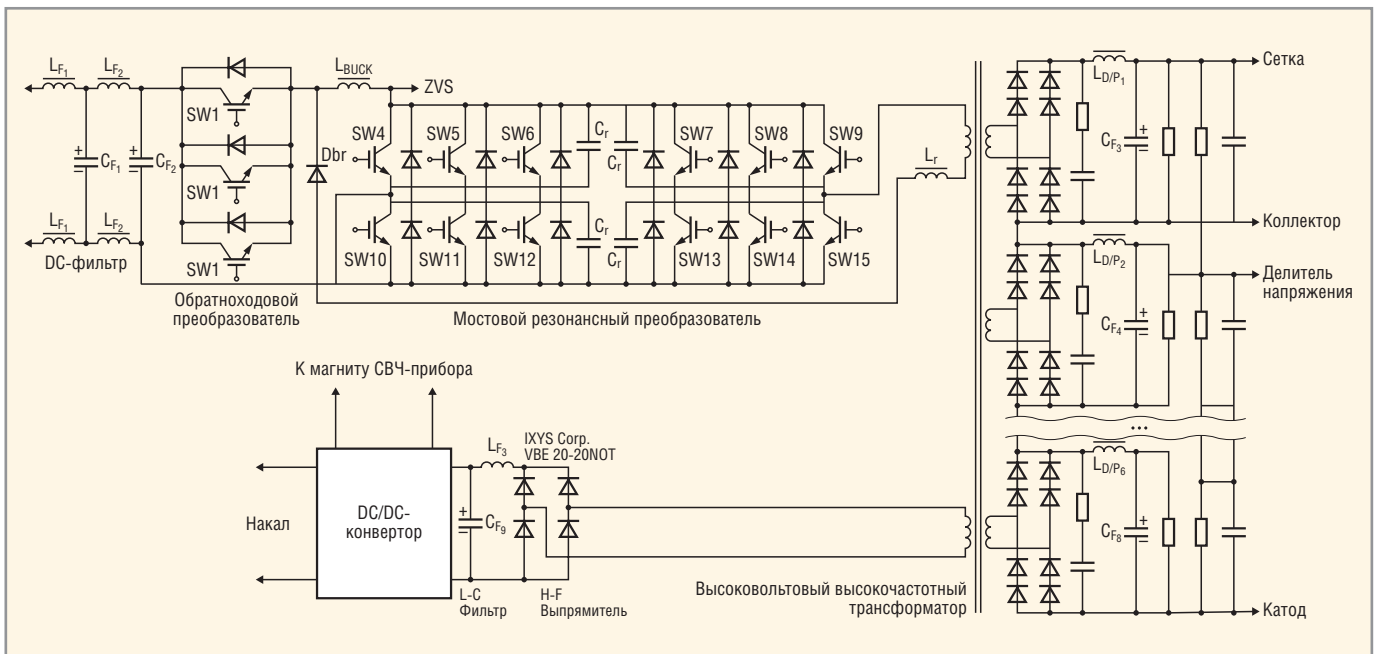


Рис. 9. Схема эффективного высоковольтного источника электропитания СВЧ-приборов мощных радиолокационных передатчиков

- обеспечивается отсутствие больших импульсных токов;
- большая эффективность для высоких значений постоянного входного напряжения сети;
- снижение требований к драйверу затвора из-за отсутствия эффекта Миллера;
- защита от коротких замыканий.

В предложенном уникальном преобразователе метод ZVS объединён с режимом управления по току, обеспечивая тем самым дополнительные преимущества. На рис. 9 показана схема с управлением по току с использованием ZVS-резонансного способа переключения преобразователя на фиксированной частоте. При этом в первичной обмотке высоковольтного высокочастотного трансформатора сформирован чистый синусоидальный сигнал. Для обеспечения высокой выходной мощности использована мостовая схема. Транзисторы BIMOSFET™ соединены параллельно, поскольку достаточно легко равномерно распределить токи между ними благодаря положительному температурному коэффициенту напряжений V_{CE} и V_F в самих транзисторах и в антипараллельных диодах. Синусоидальная форма сигнала фиксированной частоты на выходе преобразователя позволяет проектировать оптимальный трансформатор для работы с высокими рабочими частотами и высокими напряжениями. Также можно построить полную конфигурацию мостового преобразователя,

который питается от мостовой схемы выпрямления на тиристорах. На выходе такого преобразователя стоит LC-фильтр и один дополнительный дроссель. В результате образуется источник постоянного тока.

Благодаря чистому синусоидальному сигналу фиксированной частоты, в данных преобразователях EMI/RFI-излучение минимально и минимально же воздействие на активные и пассивные компоненты. Математический анализ становится более простым и предсказуемым. Преимуществом данного подхода является возможность работы силовой части в режиме источника тока, управляемого напряжением. Результаты преимуществ данного подхода с точки зрения работы с СВЧ-приборами объясняются ниже.

Высокочастотный источник тока для питания анодов имеет очень низкое значение запасённой энергии и обеспечивает автоматическое ограничение тока даже при замкнутой нагрузке. Таким образом, подведение мощности к СВЧ-прибору может быть приостановлено в течение нескольких микросекунд после обнаружения неисправности путём выключения сигнала управления затворами транзисторов BIMOSFET™.

Хотя СВЧ-приборы способны поставить киловатты микроволновой мощности к антенне, сами они не могут поглотить (рассеять) даже малую часть от этой величины. Следовательно, в нашем случае имеется потребность в

специально разработанном источнике электропитания с низким уровнем запасённой энергии, которая не сможет повредить сам СВЧ-прибор даже при возникновении неисправности.

В обычных схемах контроль мощности осуществляется за счёт регулирования тока через индуктивный компонент, вследствие чего время отклика увеличивается до нескольких секунд по сравнению с миллисекундами в представленных к рассмотрению схемах.

При использовании данного подхода даже в момент образования пробоя СВЧ-прибора выходное напряжение не может увеличиться, и значение тока может быть снижено до приемлемого уровня без потребности активизировать другие механизмы отключения.

Чтобы должным образом управлять источником напряжения накала, установлен дополнительный DC/DC-преобразователь с необычным управлением, которое позволяет задавать ток накала в зависимости от тока анода. Если этого не делать, то любой источник напряжения накала с примитивным управлением может привести к отказу СВЧ-прибора вследствие сдвига частоты или температурного перегрева или может вызвать неправильную эмиссию нити накала. Также следует отметить, что даже при питании нити накала от того же самого мощного высоковольтного источника через дополнительный DC/DC-преобразователь постоянного тока,

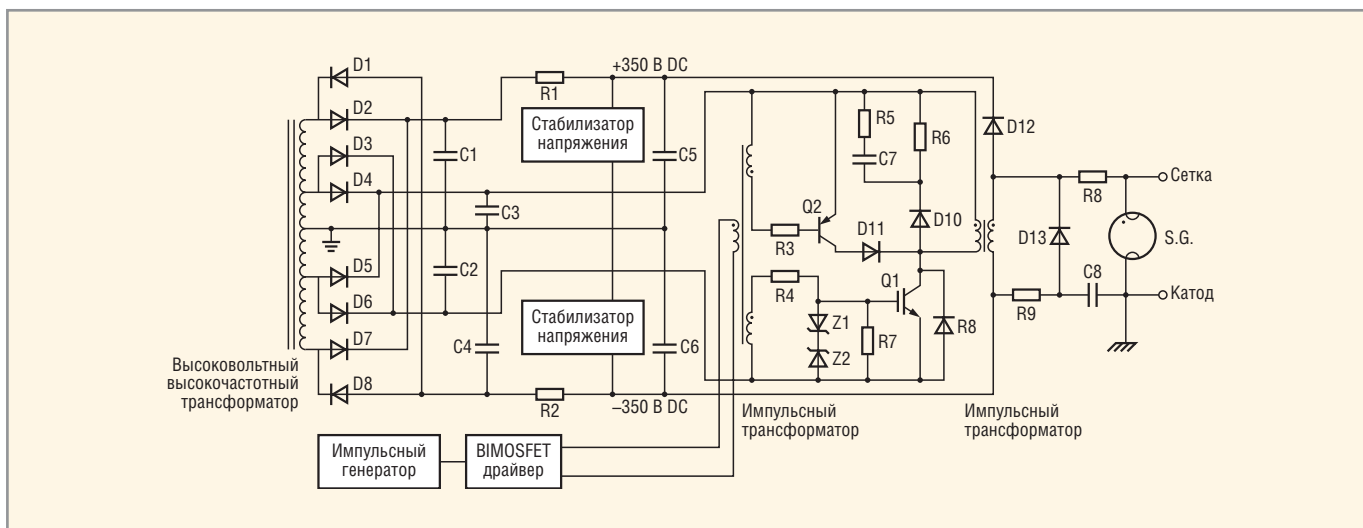


Рис. 10. Импульсный модулятор

им можно управлять с целью достижения гибкой регулировки тока нити накала. При оптимальном токе нити накала спектр выходного RF-сигнала СВЧ-прибора чистый с минимальными внеполосными спектральными составляющими.

Ещё одно эксплуатационное удобство, предлагаемое этим вариантом источника электропитания с режимом стабилизации по току, состоит в

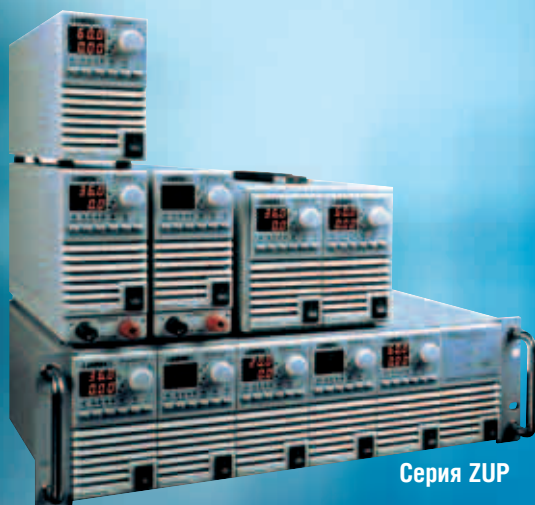
том, что он позволяет пользователю исследовать различные рабочие характеристики магнетронов. Подразумевается, что напряжение анода, ток анода и ток индуктивного компонента могут быть независимо отрегулированы таким образом, что будет достигнута желаемая рабочая точка. Схема источника тока может также допустить использование постоянного магнита вместо электромагни-

та, что позволяет уменьшить его массу и габариты.

На рис. 10 показана схема радиолокационного импульсного модулятора, демонстрирующая ещё одно применение транзистора IXBH9N140 серии BIPOLAR™ в качестве быстродействующего ключа. Время нарастания управляющего импульса ограничено только ключом Q1, который является транзистором BIPOLAR™ с

LAMBDA

Программируемые источники питания – МОЩЬ и ИНТЕЛЛЕКТ



Серия ZUP

Серия Genesis™



Серия ZUP (Zero-Up)

- Выходная мощность 200/400/800 Вт
- Встроенный интерфейс RS-232/485 (GPIB по заказу)
- Универсальный вход 85-265 В переменного тока
- Выходные напряжения до 120 В, ток нагрузки до 132 А
- Программная калибровка

Серия Genesis™

- Выходная мощность 750/1500/3300 Вт
- Встроенный интерфейс RS-232/485 (GPIB IEEE488/488.2 SCPI по заказу)
- Выходные напряжения до 600 В, ток нагрузки 400 А
- Конфигурирование посредством внешнего напряжения/тока и ПО
- Драйверы LabView и LabWindows
- Высота 1U и 2U

Применения ZUP и Genesis™

- Автоматическое испытательное оборудование
- Управление технологическими процессами
- Электротермотренировка полупроводниковых изделий
- Лазеры

PROSOFT®

Тел.: (495) 234-0636 • Факс: (495) 234-0640
E-mail: info@prosoft.ru • Web: www.prosoft.ru

Реклама

превосходными характеристиками переключения, и импульсным трансформатором на ферритовом сердечнике, который должен быть разработан с минимальными значениями индуктивности рассеяния и паразитной ёмкости. Диоды D1 – D8 образуют два двухполупериодных выпрямителя, формируя выпрямленные напряжения $+V_e$ и $-V_e$ относительно центральной точки. Так как ЛБВ имеют значительную чувствительность фазы управляющего электрода (почти 4,5 град/В), пульсации плохо отфильтрованного питающего напряжения постоянного тока в схеме импульсного модулятора могут вызвать изменения фазы, которые нарушают работу РЛС в режиме селекции движущихся целей. Уровень напряжения питания требуется поддерживать стабильным от импульса к импульсу, и по этой причине в модуляторе использованы линейные параллельные стабилизаторы. Генератор формирует импульсы с очень короткими фронтами и срезами, его длительность зависит от конкретного приложения и может варьироваться, скажем, от 200 нс до 10 мкс. Частота повторения импульсов может быть в пределах 5...20 кГц. Длительности фронтов и срезов выходных импульсов на управляющем электроде ЛБВ могут приблизительно составлять 100 нс.

Схема драйвера транзистора BIMOSFET™ обеспечивает необходимое значение амплитуды напряжения перед подачей импульса на трансформатор, выполненный на ферритовом сердечнике. Импульсный трансформатор должен быть разработан тщательным образом, так как его паразитные параметры будут участвовать в формировании выходных импульсов. Выход трансформатора соединён с затвором транзистора Q1 серии BIMOSFET™ через резистор R4, величина которого определяется требуемым временем нарастания импульса. Сопротивление резистора R7 может приблизительно составлять 10 кОм. В конце управляющего импульса третичная обмотка импульсного трансформатора включает р–п–р-биполярный высоковольтный быстродействующий транзистор Q2, который заряжает паразитную ёмкость следующего импульсного трансформатора. После этого индуктивность рассеяния следующего импульсного трансформатора

разряжается через диод D10, резисторы R6 и R5 и конденсатор C7. С выхода второго импульсного трансформатора импульс поступает на управляющий электрод СВЧ-прибора. Присутствие полупроводникового ключа Q2 помогает поддерживать время спада импульса не хуже времени нарастания. Защитные стабилизаторы Z1 и Z2 имеют уровень напряжения стабилизации 18 В и мощность рассеяния 1 Вт. Они служат для защиты затворов полупроводниковых ключей от возникающих перепадов напряжений в ходе работы второго импульсного трансформатора.

Транзистор IXBH9N140 серии BIMOSFET™ имеет время нарастания 60 нс и время спада 40 нс при индуктивной нагрузке $L = 100$ мкГн, температуре кристалла $T_j = 125^\circ\text{C}$, уровне напряжения в затворе $V_{GE} = 15$ В и при сопротивлении последовательно включенного с затвором резистора 10 Ом. Схема, состоящая из элементов R9, C8 и D13, позволяет полностью устранить всплеск напряжения на управляющем электроде ЛБВ при обратном восстановлении сердечника в трансформаторе. Газовый разрядник SG служит для защиты управляющего электрода от возникающих в ходе работы модулятора превышений напряжения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные преимущества транзисторов BIMOSFET™ заключаются, прежде всего, в низких потерях на включение и, во вторую очередь, в более низких потерях проводимости. Транзисторы имеют превосходные динамические характеристики, особенно в наиболее востребованных задачах переключения высоковольтной индуктивной и емкостной нагрузки. Они являются предпочтительными при разработке эффективных высоковольтных источников электропитания, рассчитанных на большие токи в нагрузке.

С тем же успехом BIMOSFET™ могут быть использованы при проектировании высоковольтных источников электропитания и импульсных модуляторов для радиолокационных передатчиков, где свойственные им супербыстродействующие динамические характеристики делают их идеальным выбором. В описанном выше высоковольтном высокочастотном источнике электропитания сделан ак-

цент на специфическом резонансном способе переключения при нулевом напряжении, что приводит в результате к самым низким потерям в полупроводниковых ключах. Следует отметить огромную разницу между потерями на переключение при жёстком и резонансном способах переключения транзисторного ключа, особенно в высоковольтных приложениях.

Подробно рассмотренные транзисторы BIMOSFET™ способствуют достижению преимуществ описанного в статье метода управления по току с резонансным способом переключения ZVS, включая специфические рекомендации по эксплуатации СВЧ-приборов. Легко оценить результирующее сокращение массы и габаритов от применения предложенных рекомендаций. К другим преимуществам использования топологии ZVS можно отнести незначительный уровень радио- и электромагнитных помех. Энергия, запасаемая в таких преобразователях, работающих на частотах порядка 50 кГц, в резонансном режиме является настолько малой, что даже в случае отказа радиоэлектронного устройства (высоковольтный пробой с образованием дуги или сдвиг частоты в СВЧ-приборе) повреждения системы не происходит, так как есть возможность принятия своевременных корректирующих мер. Можно даже использовать для этих целей микроконтроллер с программой управления и контроля параметров. Поскольку ожидается, что схемные применения BIMOSFET™ будут расширяться, IXYS Corporation продолжит расширенный выпуск транзисторов этого типа на большие и малые значения токов с широким диапазоном динамических характеристик с целью выполнения требований, предъявляемых к полупроводниковым компонентам на рынке силовой электроники.

ЛИТЕРАТУРА

1. Locher R.E. New 1600V BIMOSFET Transistors Open Up New Applications.
2. Locher R.E., Pathak A.D. Use of BIMOSFETs in Modern Radar Transmitters. Member, IEEE.
3. Comparative Performance of BIMOSFETs in Fly-Back Converter Circuits. Technical Application. IXYS Corporation.
4. Dierberger K., Redl R., Saro L. High-Voltage MOSFET Behavior in Soft-Switching Converters: Analysis and Reliability Improvements.



Agilent присоединяет PXIT

За неназванную сумму фирма Agilent покупает у фирмы PXIT подразделение тест-систем для оптических трансиверов. PXIT является фирмой, имеющей офисы в Ирландии и Лексингтоне, штат Массачусетс, и предлагает решения для тестирования целостности сигналов. Она была образована в результате слияния Tsunami Photonics с PX Instrument Technology. В апреле 2004 г. произошло объединение с фирмой FiberGrade, а всего две недели назад Agilent объявил о покупке швейцарского предприятия Acqiris.

www.agilent.com

Fujifilm расширяет инвестиции в производство материалов для ЖК-дисплеев

Японская корпорация Fujifilm Holdings сегодня сообщила о планах инвестировать 24 млрд. иен (206 млн. долл.) в новую фабрику по выпуску плёнок для ЖК-дисплеев. Фабрика вступит в строй в апреле 2008 г., обеспечив в условиях растущего спроса на LCD-TV устойчивые поставки серии продуктов, используемых для защиты поляризационных пластин ЖК-панелей.

В настоящее время для Fujifilm выпуск материалов для дисплеев является одним из самых доходных видов бизнеса, прибыль от которого превышает 10%. Компания контролирует 80% рынка плёнок из триацетатной целлюлозы TAC (TriAcetate Cellulose), применяемых в качестве поляризационного покрытия (остальные 20% принадлежат Konica Minolta).

Новое предприятие, расположенное в префектуре Канагава к югу от Токио, станет также поставщиком усовершенствованных покрытий, расширяющих углы обзора ЖК-дисплеев, и противобликовых плёнок. Начальная мощность предприятия составит 50 млн. м² триацетатной плёнки в год, а в сочетании с расширенными производственными линиями на острове Кюсю Fujifilm сможет к августу 2008 г. практически удвоить годовой объём выпуска TAC, доведя его до 630 млн. м².

www.itc.ua

В мире используется миллиард Bluetooth-совместимых продуктов

По заявлению группы Bluetooth SIG (Special Interest Group), ответственной за развитие популярной беспроводной тех-

нологии близкого радиуса действия, общее количество проданных Bluetooth-совместимых устройств достигло 1 млрд.

Комментируя статистические данные, предоставленные ABI Research, исполнительный директор Bluetooth SIG Майкл Фоли (Michael Foley) отмечает, что это число превышает количество пользователей ПК во всём мире и примерно соответствует объёму поставок мобильных телефонов за 2006 г.

По его оценкам, с 2010 г. ежегодно будет продаваться по два миллиарда продуктов с функциями Bluetooth. В настоящее время каждую неделю реализуется 12 млн. таких устройств, львиную долю которых составляют мобильные телефоны и беспроводные гарнитуры для них.

www.itc.ua

Mitsui приобретает американского поставщика солнечных энергосистем

Японская фирма Mitsui сообщила о приобретении SunWize Technologies – одной из крупнейших в Северной Америке компаний, работающих в области гелиоэнергетики. SunWize имеет 15 представительств и 1700 заказчиков в Америке и на протяжении 15 лет является крупным поставщиком разнообразных фотоэлектрических станций (как соединённых с электросетью, так и автономных). С 2002 г. при их производстве используются фотоэлектрические модули, поставляемые компанией Mitsui.

После поглощения, которое планируют завершить к декабрю, SunWize продолжит функционировать уже как дочернее предприятие Mitsui. Служащие и управленцы SunWize сохраняют рабочие места, а отдельные направления деятельности (финансы, разработка новых технологий, развитие новых областей применения солнечной энергии, расширение продаж за пределами Северной Америки) будут усилены специалистами из Mitsui.

По мнению представителей компании, данное приобретение позволит существенно расширить участие Mitsui в сегменте гелиоэнергетики в Северной Америке и позволит обеспечить ежегодный рост на 30% (до 400 млн. долл.) за следующие 3 – 5 лет. Стабильный рост прогнозируется, в частности, в связи с присутствием SunWize на крупнейших рынках гелиоэнергетики в США (в т.ч. в штатах Нью-Джерси, Нью-Йорке и Калифорнии) и планами активной экспансии этого бизнеса.

www.itc.ua

Nokia считает, что рынок мобильных телефонов замедлит рост

Nokia, крупнейший поставщик мобильных телефонов, прогнозирует замедление роста рынка таких устройств в ближайшие два года, присоединившись тем самым к аналитикам, ранее обнародовавшим свои предположения касательно мирового рынка мобильных телефонов в 2007 г.

Nokia заявила о том, что рост поставок мобильных телефонов в мире в будущем году вырастет всего 10%.

Кроме того, Nokia сообщила, что она продолжит стремиться к увеличению своей доли на мировом рынке сотовых аппаратов. Напомним, что по итогам III кв. компания контролировала примерно 35% рынка.

www.itware.com.ua

Рынок полупроводников замедляет рост

Аналитики одной из инвестиционных банковских групп недавно снизили ранее прогнозируемые показатели роста полупроводниковой промышленности на 2006 г. Они предупредили, что SOX-индекс полупроводников на Фондовой бирже Филадельфии в декабре может понизиться, что вызовет цепную реакцию в долгосрочном уменьшении запасов по всей цепочке поставщиков. Тенденция усилится сезонным снижением спроса в I кв. 2007 г. и негативно отразится на показателях дохода компаний по итогам года. Основой для уменьшения прогнозного значения роста отрасли за 2006 г. с 9 до 8% стали продажи полупроводниковой продукции в октябре, которые в реальности оказались меньше ожидаемых объёмов продаж. В 2006 г. компании начали формирование запасов компьютерных продуктов нетипично рано, задолго до традиционного всплеска продаж. В итоге IV квартал рискует запомниться всем относительно слабыми продажами. Зато третий квартал 2006 г. характеризовался высоким уровнем продаж.

В течение 2006 г. прогноз роста полупроводниковой отрасли корректируется уже не первый раз. Изначально указанные аналитики предполагали 11-% увеличение продаж в текущем году. Этот уровень был достигнут однажды – в июле. Далее, в октябре, показатель снизился до 9,2%. В целом по итогам года средняя цена микрочипов понизилась всего на 3,7%, из которых 1,2% пришлось на октябрь, против обычного снижения цен за год на 10% и более. Больше всего подешевели NOR-флэш-память и DSP-чипы.

www.3dnews.ru