

# HEXFET III: НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ МОЩНЫХ МОП-ТРАНЗИСТОРОВ

**D. GRANT****AN-966A**

## Введение

Фирма International Rectifier выпустила новое, третье поколение мощных МОП-транзисторов - HEXFET III. МОП-транзисторы третьего поколения обладают новыми конструктивными особенностями, которые придают приборам повышенную стойкость, большие значения  $dv/dt$  и улучшенные характеристики переключения. Улучшенная конструкция ячейки, оптимизированная плотность ячеек и новая конструкция полевого кольца повысили характеристики этого семейства. Электрические характеристики приборов равны или превосходят характеристики их предшественников HEXFET I и HEXFET II, поэтому, успешно могут использоваться, как улучшенная замена. Для HEXFET III выпущены новые справочные данные, которые отличаются новым кодом маркировки корпусов (см. раздел «Маркировка названий HEXFET-III»). Мощные транзисторы семейства - HEXFET III предлагают пользователям улучшенные характеристики, полученные в результате изменений в конструкцию прибора и способов изготовления.

Ряд других производителей мощных МОП-транзисторов также внедрил те или иные конструктивные и технологические достижения. Что же делает HEXFET III уникальным:

\* Был оптимально спроектирован и запущен завод с полным циклом производства для выпуска этих новых приборов от кремния до корпусов при самой низкой себестоимости и с самыми высокими стандартами качества.

\* Была предпринята полная конструктивная переработка прибора, которая включила в себя все технологические улучшения, отмеченные выше, и оптимизировала их сочетание для соответствия требованиям по применению в 90-х годах.

\* Улучшенные характеристики и надежность конструктивно заложены в каждый прибор и не являются результатом отбора.

Новая идеология производства полупроводниковых приборов, культивируемая на новом производстве International Rectifier в Калифорнии, которое называется HEXFET America, представлена в приложении к статье, пункт 1. Производственная линия с неповторяющимся потоком продукции, снабженная компьютерным мониторингом производственного оборудования, дает продукцию, которая предлагает пользователям мощных МОП-транзисторов оптимальные цену, сроки поставки и качество.

Новые разработки кристаллов HEXFET III улучшили характеристики приборов и позволили добавить новые полезные параметры в справочные данные (спецификации) на приборы. Некоторые аспекты конструкции, обеспечивающие новые характеристики, описаны в пункте II приложения к статье. Нижеследующие разделы описывают главные преимущества в характеристиках HEXFET III и их полезность для пользователя.

## Улучшенные характеристики в области лавинного пробоя

Окончательным тестом для МОП ПТ всегда было испытание на индуктивную нагрузку без фиксирования уровня. Этот тест проверяет стойкость прибора и его способность поглощать энергию при лавинном пробое. HEXFET III тестировались при значительно больших уровнях энергии, чем их предшественники, и это отражено в параметрах лавинного пробоя. Этот улучшенный параметр дает разработчику еще большую степень безопасности от выхода прибора из строя при переходных процессах, превышающих уровень напряжения пробоя. Повышенная надежность, получаемая при применении HEXFET III, может снизить риск отказов.

Кроме того, устойчивость к лавинному пробоеу HEXFET III может использоваться многократно. Справочные данные указывают максимальную энергию на импульс и максимальный ток пробоя, разрешаемых при повторяющихся условиях возникновения лавинного процесса. Это означает, что при использовании HEXFET III можно удалить из схемы компоненты фиксации уровня напряжения, которые требовались ранее. Например, в импульсных источниках питания, как правило, каким-либо способом ограничивают напряжение, возникающее на переключающем приборе при выключении, когда быстрое изменение тока вместе с индуктивностью трансформатора создают в переключающем приборе условия лавинного пробоя. Если переключающим прибором является HEXFET III, то пропадает необходимость в использовании диода Зенера или схемы гашения, так как, если лавинный ток и лавинная энергия находятся в пределах допустимых значений, то приборы HEXFET III могут выдерживать лавинный пробой без повреждений. Упрощение схемы и уменьшение числа компонентов позволяют уменьшить себестоимость изделия [1].

Другое снижение себестоимости, которое можно достичь благодаря устойчивости к лавинному пробоеу, связано с возможностью снижения запаса надежности по напряжению, так как лавинный пробой не является разрушающим явлением. HEXFET III может работать, как прибор, осуществляющий сам ограничения уровня от перенапряжения. Поэтому, разработчик может не завышать номиналы напряжения транзисторов, чтобы разрешить проблему случайных или повторяющихся выбросов напряжения на шине питания. Это особенно важно в отношении МОП-транзисторов, так как для заданного значения тока требуемая площадь кристалла резко возрастает с ростом номинала напряжения.

## Нормы $dv/dt$

Другим аспектом надежности мощного МОП ПТ является его способность выдерживать быстрое возрастание прямого напряжения в момент времени, когда его интегральный диод восстанавливается из состояния проводимости. Это условие описывается параметром  $dv/dt$  восстановления диода. Если  $dv/dt$  восстановления диода оказывается достаточно быстрой, то это приводит паразитный биполярный транзистор в мощный МОП-транзисторе, в состоянии проводимости, что вызывает резкое увеличение тока и пробой прибора. Это явление препятствует использованию интегрального диода во многих применениях, где он мог бы быть полезно задействован. Более того, там, где этот диод использовался, разработчику часто необходимо было опытным путем определить пределы  $dv/dt$  для конкретного прибора из-за отсутствия

	Non-Repetitive Avalanche Rating			Repetitive Avalanche Rating			Reverse Recovery Data ( $T_J = 25^\circ\text{C}$ )			Diode Recovery dv/dt Data			
	Single Pulse Surge $E_{AS}$ (mJ)	Test Current $I_{AS}$ (A)	Inductor Size L (mH)	Repetitive Rating $E_{AR}$ (mJ)	Test Current $I_{AR}$ (A)	Inductor Size L (mH)	$Q_{rr}$ ( $\mu\text{C}$ )	$t_{rr}$ (ns)	$I_D$ (A) $di/dt = 100\text{A}/\mu\text{s}$	Peak dv/dt V/ns	di/dt A/ $\mu\text{s}$	$I_{SD}$ A	$T_J$ $^\circ\text{C}$
IRF510	19	5.6	0.91	4.3	5.6	.21	0.38	96	5.6	5.5	75	5.6	175
IRF710	120	2.0	53.00	3.5	2.0	1.50	0.84	240	2.0	4.0	40	2.0	150
IRF520	36	9.2	0.64	6.0	9.2	.11	0.53	110	9.2	5.5	110	9.2	175
IRF720	190	3.3	31.00	5.0	3.3	.80	1.4	270	3.3	4.0	65	3.3	150
IRF820	210	2.5	60.00	5.0	2.5	1.40	1.2	270	2.5	3.5	50	2.5	150
IRF530	69	14.0	0.53	7.9	14.0	.061	0.58	120	14.0	5.5	140	14.0	175
IRF730	290	5.5	17.00	7.4	5.5	.13	2.0	310	5.3	4.0	90	5.5	150
IRF830	280	4.5	25.00	7.4	4.5	.66	2.0	370	4.3	3.5	75	4.5	150
IRF540	230	28.0	0.44	15.0	28.0	.029	0.91	150	28.0	5.5	170	28.0	175
IRF740	520	10.0	9.10	13.0	10.0	.23	3.8	370	10.0	4.0	120	10.0	150
IRF840	510	8.0	14.00	13.0	8.0	.37	4.2	460	8.0	3.5	100	8.0	150
IRF450	860	13.0	9.20	15.0	13.0	.16	6.7	580	13.0	3.5	130	13.0	150
IRF460	1,200	21.0	4.90	30.0	21.0	.12	8.1	580	21.0	3.5	100	21.0	150

Таблица 1. Параметры лавинного пробоя, обратного восстановления и dv/dt

справочных данных поведения МОП-транзисторов в этих условиях.

С появлением HEXFET III неопределенности в использовании интегрального диода в МОП-транзисторе пришел конец. Дело не только в том, что они имеют исключительные dv/dt характеристики, но и в том, что их поведение в этих условиях гарантируется нормой dv/dt восстановления диода, приведенной в справочных данных.

Этот параметр особенно полезен для разработчиков приводов двигателей, содержащих мостовые схемы. Интегральный диод может быть использован как диод обратной связи для циркуляции реактивной составляющей тока нагрузки. Когда ток коммутируется из диода обратной связи одного из переключающихся приборов путем включения другого прибора, высокая dv/dt появляется у прибора, чей диод был в проводящем состоянии. Это повторяется регулярно в приводах двигателей, использующих широтно-импульсную модуляцию. HEXFET III способны выдерживать уровни dv/dt, обычно встречающиеся в таких применениях. Следовательно, становится возможным во многих случаях избавиться от диодов обратной связи, а также от последовательно подключенных диодов, требуемых для предотвращения вхождения в состояние проводимости интегральных диодов, этим самым значительно снижается стоимость привода двигателя.

### Улучшенное время восстановления диода

Ряд HEXFET III МОП ПТ 111 имеют время восстановления диода существенно меньшее, чем подобные им HEXFET III МОП ПТ I и HEXFET III МОП ПТ II. Одним из факторов, позволившим достичь этого, оказалась возможность уменьшить размер кристалла для улучшения его конструкции и экономии кремния.

В схемах применения, где используется интегральный диод, более короткие времена восстановления означают более низкие потери переключения и меньшие переходные процессы восстановления, что позволяет работать на более высоких частотах и использовать меньшие теплоотводы. Кроме того, максимальное время восстановления диода приводится в справочных данных, что позволяет включать диод в разрабатываемую схему.

### Размер ячейки, оптимизированный под номинал напряжения

Плотность ячеек, используемая в III поколении МОП ПТ, была выбрана так, чтобы уменьшить стоимость прибора. Выбор плотности ячеек для конкретного номинала напряжения основан не только на уменьшении  $R_{ds(on)}$ , но также на проценте выхода, себестоимости и надежности. Технология HEXFET III разработана так, чтобы предложить пользователю лучшие значения параметров не ухудшая надежность прибора. Опираясь на схему производства, характеризующую высоким процентом выхода, воспроизводимостью результатов и высокой автоматизацией, зависимость оптимальных теоретических значений плотности ячейки от номинального напряжения представлена на рис. 1.

Кроме  $R_{ds(on)}$ , такие характеристики, как величина зарядов затвора и емкости Миллера связаны с конструкцией ячейки и плотностью их упаковки. Появление HEXFET III, во многих случаях, позволило уменьшить оба эти параметра, что обеспечило более быстрое переключение, снижение потерь переключения и повышения КПД.

OPTIMUM CELL DENSITY VS. BREAKDOWN VOLTAGE

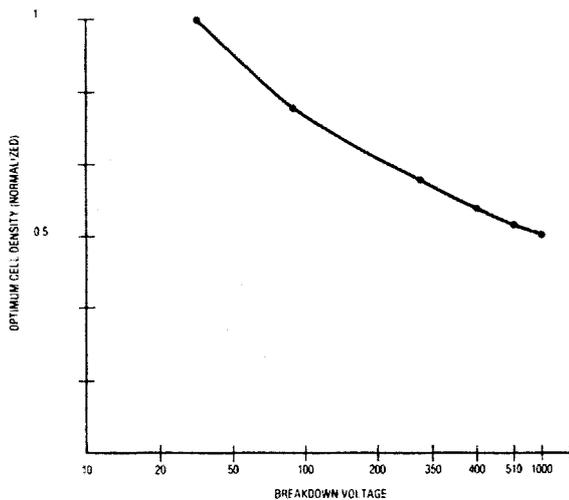


Рис. 1. Зависимость оптимальной плотности упаковки ячеек от напряжения

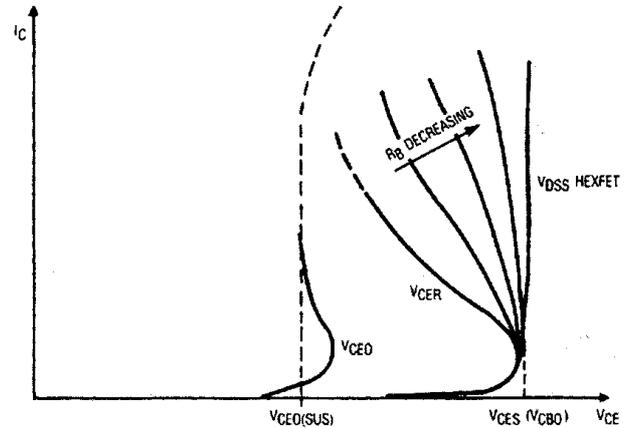


Рис. 2. Характеристики биполярного транзистора

### Максимальная рабочая температура 175°C

Максимально допустимая рабочая температура для всех HEXFET III с диапазоном напряжений 100В и ниже была поднята до 175°C. Этого удалось достичь благодаря переработке полевого кольца, улучшению технологического процесса и расширению испытаний на надежность при 175°C.

Способность функционировать при температуре 175°C особенно полезна в устройствах, работающих при высокой температуре окружающей среды, например, в двигательном отсеке автомобиля. Когда применяется воздушное охлаждение, способность транзистора выдерживать определенную мощность является функцией разности между максимальной разрешаемой температурой кристалла и температурой воздуха. Следовательно, способность HEXFET III работать при более высоких температурах перехода позволяет им выдерживать значительно более высокую мощность при высоких температурах окружающей среды.

### СПОСОБНОСТЬ ВЫДЕРЖИВАТЬ ЛАВИННЫЙ ПРОБОЙ

#### Параметры лавинного процесса HEXFET III

Ключевым вопросом, определяющим отличие надежного мощного МОП ПТ от ненадежного, является его способность выдерживать лавинный пробой. HEXFET III способны поглощать большое количество лавинной энергии без выхода из строя. Фирма International Rectifier всегда подвергала каждый МОП ПТ испытаниям на лавинный пробой. Хотя параметры лавинного процесса до последнего времени не включались в справочные данные МОП ПТ, они всегда были обязаны соответствовать спецификациям. Убеждение в важности параметров лавинного процесса непрерывно росло среди пользователей мощных МОП ПТ и все новые справочные данные, выпущенные после 1985 года, содержат эти параметры. Для семейств приборов HEXFET III и HEXFET III уровень лавинного тока при испытаниях устанавливался произвольно на уровне, достаточном, чтобы гарантировать выявление каждого слабого прибора. Однако HEXFET III разработаны так, чтобы гарантировать высокую устойчивость к лавинному пробую, и это отражается уровнями лавинных токов при тестировании и нормами на параметры в справочных данных. Как и их предшественники, HEXFET III проходят 100% испытания на способность выдерживать лавинный процесс.

#### Требования по надежности

Существенным требованием надежности в мощных МОП-транзисторах является то, что внутренний паразитный биполярный транзистор (см. пункт II приложения) никогда не должен оказываться в проводящем состоянии или даже приближаться к нему. Для проверки надежности все МОП-транзисторы подвергаются 100% тестированию на устойчивость к лавинному пробую. Этот тест является простым и эффективным способом отбраковки приборов, в которых паразитный биполярный транзистор склонен к включению.

Лавинный пробой и высокая  $dv/dt$  при восстановлении интегрального диода являются двумя условиями, которые способствуют включению паразитного биполярного транзистора. HEXFET III обязаны своей повышенной надежности главным образом за счет улучшенного подавления интегрального паразитного биполярного транзистора, который содержится в каждой ячейке мощного МОП-транзистора и за счет других мер, которые обеспечивают равномерное распределение лавинного тока и тока восстановления диода между всеми ячейками.

#### Подавление паразитного биполярного транзистора

Последствия прямого смещения паразитного биполярного транзистора в МОП-транзисторе можно увидеть из рис. 2, который показывает, как ведет себя биполярный транзистор при различных смещениях база-эмиттер.  $V_{CBO}$  представляет запирающую способность перехода между областью стока N-типа и областью P-типа, которая будет достигнута, если область истока будет полностью изолирована.  $V_{CER}$  представляет запирающее напряжение, достигаемое, когда база

транзистора соединена с эмиттером через резистор. В случае мощного МОП-транзистора резистором принципиально является сопротивление области подложки. Фактически,  $V_c$  представляет нормальную запирающую способность ячейки мощного МОП ПТ,  $V_{CER}$  является запирающей способностью, которую прибор имел бы, если бы подложка не была закорочена с областью истока, а оставалась плавающей.  $V_{CEO(SUS)}$  - это максимальное напряжение, которое биполярный транзистор может поддерживать, как только начинает проводить.

Как только потенциал между областями базы и эмиттера паразитного биполярного транзистора приблизится к величине, необходимой для прямого смещения перехода, запирающая способность транзистора упадет до величины  $V_{CEO(SUS)}$  при появлении проводимости. Как показано на рис. 2, это значение намного ниже  $V_c$  - нормального запирающего (блокирующего) напряжения МОП ПТ. Если МОП ПТ будет вынужден блокировать напряжение большее, чем  $V_{CEO(SUS)}$ , то это по всей видимости окажется угрожающим для прибора из-за снижения запирающего напряжения. Ток будет протекать через ячейку лавинообразно, что приведет к ее разрушению. Так как МОП ПТ может выдерживать большой лавинный ток без включения биполярного транзистора, то его характеристики, когда более точно представляются линейным  $V_{CES}$ , блокирующим напряжением, когда база и эмиттер закорочены.

Существуют два принципиальных механизма, которые могут создавать поток латерального тока в подложке МОП-транзистора. Это лавинный процесс и повторное приложение прямого напряжения к стоку в момент восстановления интегрального диода. Мощный МОП-транзистор должен выдерживать оба этих условия, чтобы быть классифицированным, как надежный.

### Необходимость в нормировании устойчивости к лавинному пробую

В электронном оборудовании трудно полностью исключить возможность появления переходных процессов, превышающих допустимый уровень напряжения. Это особенно справедливо для силовых электронных схем, где переключаются большие токи с соответственно большими значениями  $di/dt$ . Мощные МОП ПТ могут легко создавать скорости изменения тока порядка сотен ампер в микросекунду. Таким образом, даже небольшая величина индуктивности при отсутствии фиксации уровня напряжения может создавать существенные выбросы напряжения. Другие явления, такие как отключение и подключение нагрузки, помехи на шине питания, подключение соседних электронных устройств, типа схем прерывателей, могут создавать переходные процессы с превышением напряжения, способные привести к лавинному пробую МОП ПТ. Поэтому, для долгосрочной надежности оборудования важно, чтобы МОП-транзисторы имели устойчивость к лавинным процессам. Потеря способности блокировать напряжение из-за включения паразитного биполярного транзистора в условиях лавинного процесса даже на доли микросекунды может оказаться фатальной для мощного МОП-транзистора. Ток будет резко возрастать в ограниченной области прибора, возможно, в единичной ячейке, создавая недопустимые плотности тока. Поэтому, надежный мощный МОП ПТ уцелеет при появлении выбросов напряжения, которые могут быть столь короткой длительности, что могут остаться незамеченными, в то время как ненадежный МОП ПТ выйдет из строя по казалося бы непонятной причине.

### Испытание на индуктивную нагрузку без ограничения уровня напряжения

Так как паразитный биполярный транзистор, имеющийся внутри каждого МОП-транзистора, наиболее легко включается, когда прибор разогрет, испытания на лавинный пробой должны проводиться на разогретом приборе. Однако, нагрев кристалла при лавинном процессе может быть не таким равномерным, как это будет при прямой проводимости транзистора или когда прибор нагревается внешним источником. Поэтому при испытаниях на лавинный процесс кристалл должен разогреваться лавинным током. Таким образом ток испытания и становится разогревающим током, как это и происходит в реальных схемах.

Одним из методов выполнения испытания является подача постоянного лавинного тока. Метод будет эффективно испытывать способность прибора выдерживать величину тока какая бы пиковая температура кристалла не была достигнута в конце лавинного периода. Другим методом испытания, который используется фирмой International Rectifier, является испытание на индуктивную нагрузку без фиксирования уровня напряжения. Схема испытаний и формы сигналов показаны на рис. 3.

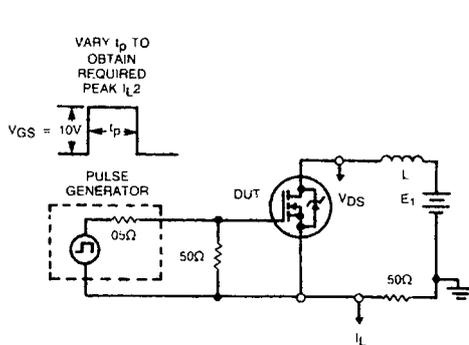


Рис. 3. Схема испытания на индуктивную нагрузку

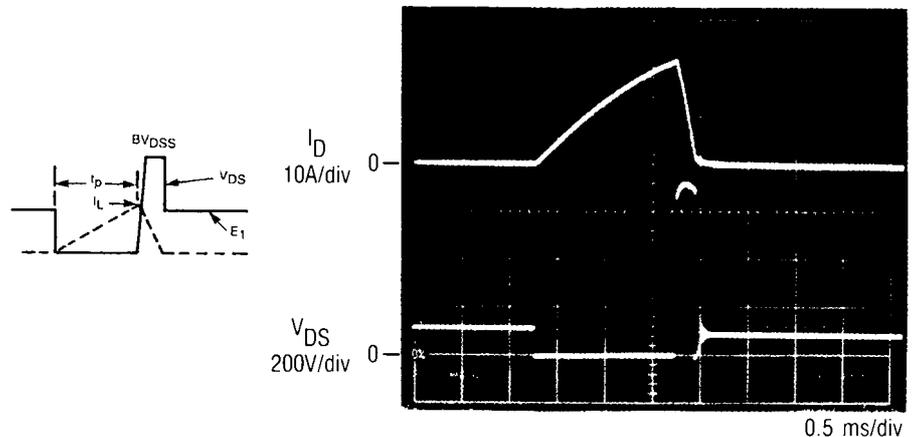


Рис. 4. Форма сигнала при поглощении МОП ПТ IRF460 лавинной энергии 1,2Дж

Тест связан с током выключения в индуктивной нагрузке без фиксации уровня напряжения. Ток сначала создается в нагрузке в индукторе, когда МОП ПТ включается на время соответствующей длительности. Затем МОП ПТ выключается. Резко падающее магнитное поле в индукторе заставляет напряжение стока возрастать неконтролируемым образом до тех пор, пока не будет достигнуто напряжение лавинного пробоя МОП ПТ. Напряжение стока остается на этом уровне, в то время как энергия, накопленная в индукторе, рассеивается в МОП ПТ лавинным образом. Когда вся энергия в индукторе освободится и ток нагрузки упадет до нуля, МОП ПТ возвратится в нормальное закрытое состояние. Рис. 4 показывает IRF460, безопасно поглощающий 1,2 джоуля лавинной энергии за время этого теста.

Тест индуктивной нагрузки без фиксации уровня напряжения имитирует условия, в которых происходит лавинный пробой в схемах силовой электроники - а именно, разряд индуктивно накопленной энергии. В этом тесте прибор подвергается большому лавинному току при рабочей температуре перехода, а затем малому току, когда переход нагревается лавинным током. Когда тест близится к завершению возникают условия, примерно эквивалентные тесту постоянного тока, как только температура перехода приближается к своему максимуму.

Главным преимуществом теста является простота схемы испытаний, которая позволяет пользователям легко проверить лавинные характеристики прибора. Единственным оборудованием, которое требуется для теста, являются источник питания, индуктор подходящего размера и генератор импульсов затвора. Номинал тока источника питания может быть мал, если используется внешний накопительный конденсатор. Напряжение источника питания может быть низким по сравнению с пробивным напряжением испытываемого прибора, так как напряжение, необходимое для пробоя прибора, вырабатывается резко падающим полем в индукторе.

Так как лавинный ток через открытый паразитный биполярный транзистор приводит к большому току в малой области кристалла, непрохождение теста отмечается катастрофическим отказом прибора. Все МОП ПТ подвергаются полному электрическому тестированию после лавинного теста, чтобы проверить, что прибор сохранил свои параметры.

### Спецификация лавинного процесса

Способность выдерживать лавинный процесс определяется параметром -максимальная разрешенная лавинная энергия,  $E_{AS}$ , подаваемая на МОП ПТ во время одиночного разряда индуктивной нагрузки без ограничения уровня напряжения. Лавинный процесс инициируется выключением МОП ПТ, когда ток индуктора равен  $I_{AS}$ , номиналу лавинного тока для МОП ПТ. Температура кристалла в начале теста должна быть 25°C. Величина индуктивности и напряжения источника питания указываются в спецификации.

Величина энергии, рассеиваемой в МОП ПТ, вычисляется по формуле:

$$E_{AS} = 1/2LP[BV_{DSS}/(BV_{DSS}-V_{DD})]$$

где  $I$  - пиковый ток индуктора,  $BV_{DSS}$  - лавинное пробивное напряжение HEXFETa, а  $V_{DD}$  - напряжение питания. Максимальная разрешенная температура кристалла не должна превышать в течение лавинного импульса. Спецификации лавинного процесса предполагают начальную температуру кристалла 25°C. Если температура кристалла выше, чем эта, в начале лавинного импульса, тогда максимальная разрешаемая лавинная энергия снижается. Поэтому, в справочные данные HEXFET III включается кривая снижения лавинной энергии, подобная показанной на рис. 5. Если прибор тестируется при малой частоте повторения, период времени между импульсами должен быть достаточно длинным, чтобы позволить температуре кристалла вернуться к своему предписанному исходному значению.

### Эквивалентность параметру $E_{S/b}$

Параметр  $E_{AS}$  имеет сходный аналогичный параметр  $E_{S/b}$ , иногда используемый для биполярных транзисторов военного применения. Он измеряется также на индуктивную нагрузку без ограничения уровня и также может быть указан в спецификации в режиме повторяющегося тестирования. Если частота повторения слишком высока, не позволяя температуре кристалла упасть до 25°C в течение интервала между импульсами, тогда  $E_{AS}$  может не быть точным эквивалентом  $E_{S/b}$  и может потребоваться коррекция величины  $E_{AS}$  (см.рис,5). Даже в этом случае, нам представляется, что все приборы HEXFET III будут легко достигать норм  $E$  биполярных транзисторов для эквивалентных значений напряжения и тока.

### Температура перехода во время лавинного процесса

Максимальная разрешаемая температура перехода ограничивает возможности применения независимо от того, был ли нагрев результатом лавинного процесса или прямой проводимости. Если лавинный процесс имеет место, пиковая температура перехода может быть рассчитана из кривых переходного теплового импеданса обычным образом. Мгновенная мощность рассеивания во время лавинного процесса может быть получена путем умножения величины мгновенного тока на величину лавинного напряжения.

Лавинное напряжение не приводится в справочных данных. Единственной гарантируемой величиной является минимальное пробивное напряжение  $BV_{DSS}$ . На практике представляется, что лавинное напряжение является несколько

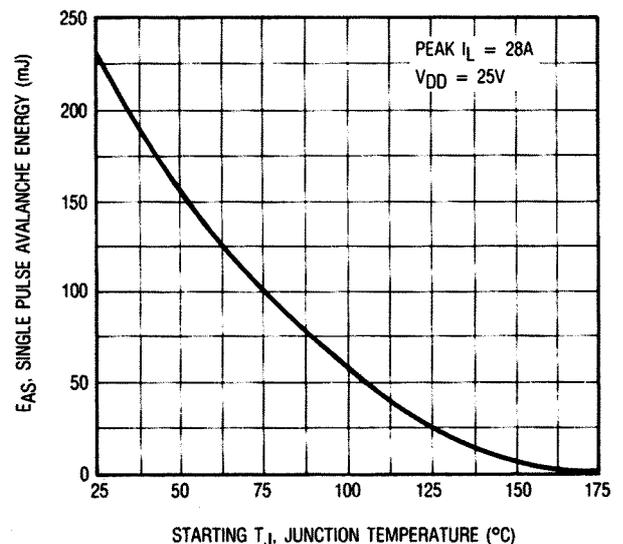


Рис. 5. Зависимость максимальной энергии лавинного пробоя от начальной температуры перехода МОП ПТ третьего поколения (IRF 540)

большой величиной из-за технологического запаса, устанавливаемого при проведении отбраковочного теста на  $V_{DSS}$ . Однако, величину  $V_{DSS}$  предсказать трудно, особенно когда речь идет о продукции с нормами напряжения не высшего класса. Например, если запас был 10%, прибор типа IRF631 может иметь диапазон величины лавинного напряжения 165-220В. При отсутствии спецификации на максимальное лавинное напряжение пользователь должен предполагать его величину, принимая во внимание является ли этот прибор первоклассным или нет в отношении норм напряжения.

### Параметры повторяющегося лавинного процесса

Приборы HEXFET III могут подвергаться повторяющимся лавинным процессам. Работа в режиме повторяющихся лавинных процессов ограничивается двумя параметрами. EAR и IAR. EAR - это энергия импульса, допустимая при повторяющихся условиях. IAR - это максимальный допустимый лавинный ток. Никакие ограничения не накладываются на форму сигнала лавинного тока, IAR обычно, хотя и не всегда, равен параметру  $I_D$  этого прибора. Значения EAR являются максимальными значениями, которые подтверждаются текущими данными испытаний на долговременную надежность.

Значения IAR и  $E_{AR}$ , указанные для приборов HEXFET III, достаточны для того, чтобы сделать условия повторяющегося лавинного процесса более чем приемлемыми для многих обычных применений [1].

Существование лавинных параметров предполагает, что прибор может работать при напряжении выше его нормального номинала по напряжению. Однако, если прибор находится длительное время при напряжениях выше номинальных норм при высокой температуре, то можно ожидать снижения времени наработки из-за фактора перегрузки по напряжению (см. квартальный отчет по надежности).

Испытания на надежность показали, что повторяющиеся лавинные процессы допустимы для приборов HEXFET III. Данные испытаний приборов HEXFET III в условиях повторяющихся лавинных процессов опубликованы в Квартальном отчете по надежности МОП ПТ.

### Использование параметров повторяющихся лавинных процессов

Существует много обычных применений, где мощный переключающий прибор должен быть защищен от лавинного пробоя из-за наличия в схеме индуктивности без фиксации уровня напряжения. Например, в импульсных источниках питания с использованием трансформатора всегда существует паразитная индуктивность, связанная с трансформатором. В однополюсных источниках питания (рис. 6) эта индуктивность представляет индуктивную нагрузку без фиксации уровня напряжения. При выключении напряжение переключающегося прибора будет расти неконтролируемым образом, если оно не ограничено схемой гашения или диодом Зенера.

При использовании HEXFET III от фиксирующего диода Зенера можно отказаться, если условия лавинного процесса находятся в разрешенном диапазоне. Это дает выгоды в уменьшении числа компонентов и площади печатной платы. На рис. 7 показаны сигналы, получаемые в типовом импульсном источнике питания на HEXFET III. В [1] дается подробное описание другой схемы, в которой может быть использована с большим преимуществом способность HEXFET III выдерживать повторяющиеся лавинные процессы.

Если способность HEXFET III выдерживать лавинный процесс используется для ограничения уровня напряжения стока, следует помнить, когда рассчитываете температуру перехода и размер требуемого теплоотвода, что энергия, которая рассеивалась в диоде Зенера, теперь рассеивается в МОП ПТ.

### СПОСОБНОСТЬ ВЫДЕРЖИВАТЬ $DV/DT$

#### $dv/dt$ восстановления диода

Другим важным фактором надежности прибора является его способность выдерживать  $dv/dt$  восстановления диода. Давно установлено, что мощные МОП-транзисторы могут выходить из строя в определенных ситуациях, когда используется интегральный диод самого МОП-ПТ. Вероятность отказа появляется, если напряжение сток-исток резко возрастает в момент, когда интегральный диод восстанавливается из проводящего состояния. Такая ситуация случается, например, в инверторах с широтно-импульсной модуляцией, когда ток коммутруется между верхним и нижним приборами каждого плеча схемы.

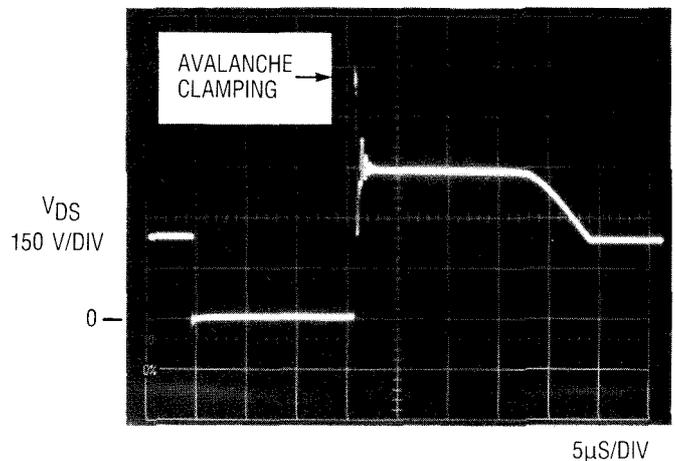
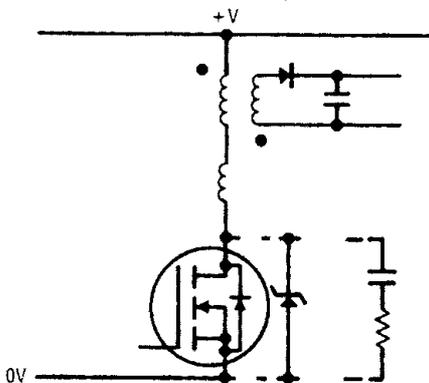
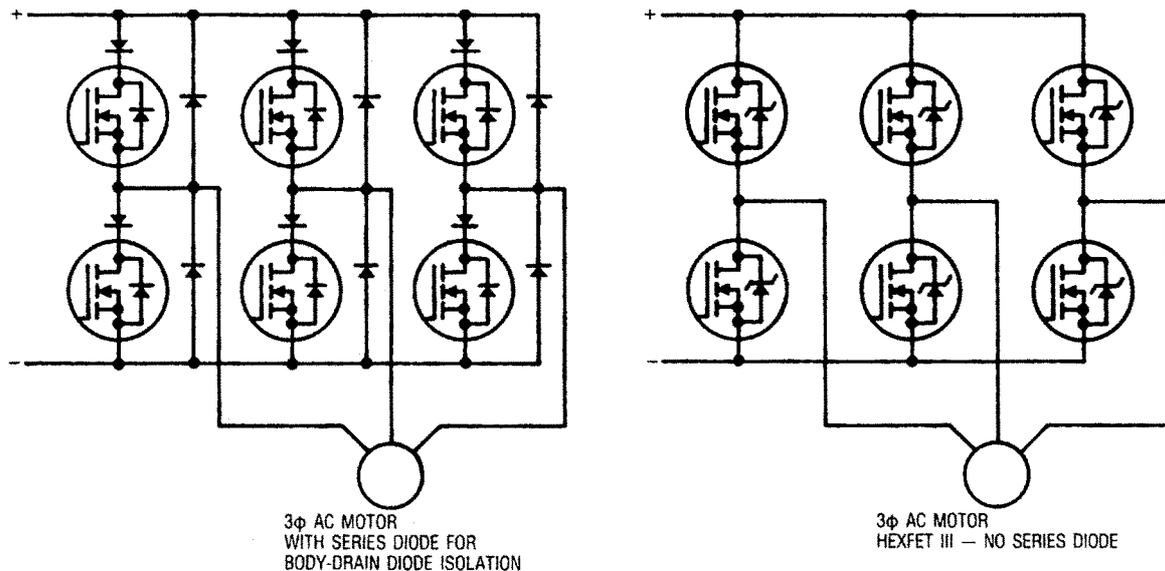


Рис. 6. Ограничение напряжения стока в схеме однополюсного импульсного источника питания

Рис. 7. Использование способности HEXFET III выдерживать лавинный пробой в импульсном источнике питания



**Рис. 8. Способность HEXFET III выдерживать  $dv/dt$  диода позволяет использовать диод подложка-сток в мостовых схемах с ШИМ**

Для предотвращения отказа из-за  $dv/dt$  пользователи обычно устраняют проводимость интегрального диода включением диода последовательно МОП-ПТ и с внешним диодом, как показано на рис. 8 (или с помощью других способов, как например, последовательная индуктивность с диодной фиксацией уровня напряжения). Последовательный диод блокирует протекание тока через интегральный диод, в то время как диод обеспечивает

путь для пульсирующего тока. Приборы HEXFET III имеют надежность в отношении проводимости диода, так что практически во всех применениях интегральный диод может быть использован без опасений отказа из-за  $dv/dt$  и последовательные диоды можно удалить из схемы, как показано на рис. 8. Характеристики HEXFET III гарантируются при таких условиях нормой  $dv/dt$  восстановления диода.

#### Причины отказа из-за $dv/dt$ в мощном МОП-транзисторе

Важно понимать отличие ситуаций, в которых  $dv/dt$  может вызвать отказ мощного МОП-ПТ, с тем, чтобы можно было предпринять соответствующие корректирующие меры.

Существует три принципиальных механизма, посредством которых быстро растущее напряжение стока может вызвать отказ мощного МОП ПТ. Все они являются результатом наличия паразитных элементов, связанных с базовой структурой мощного МОП ПТ на рис. 9 показана примерная эквивалентная схема мощного МОП ПТ, включая паразитные емкости и паразитный биполярный транзистор. Два из механизмов отказа связаны с самим прибором, а один со схемой включения. Причиной, связанной со схемой, является емкостное включение МОП ПТ из-за увеличения напряжения затвора, вызываемого ростом напряжения стока, и это является эффектом общим для всех мощных МОП ПТ.

Подъем напряжения стока передается на затвор емкостной связью между ними. Эта причина представляет потенциально разрушительное явление в мостовых схемах, где произвольное включение выключенного прибора создает короткое замыкание между шинами питания. Однако, этого можно избежать соответствующей конструкцией схемы запуска затвора.

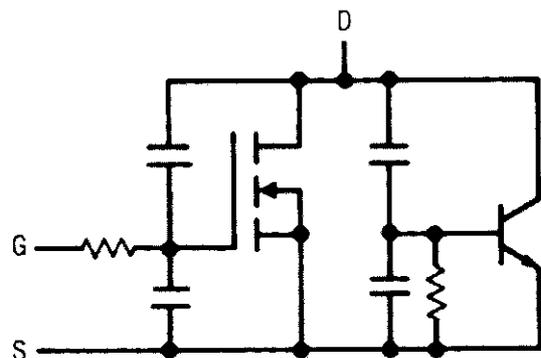
#### $dv/dt$ выключенного состояния

Другой причиной, по которой  $dv/dt$  может теоретически вызвать отказ мощного МОП-транзистора, является введение в действие паразитного биполярного транзистора, находящегося при нормальных условиях в выключенном состоянии (без предварительного входа интегрального диода в состояние проводимости) из-за резкого подъема напряжения стока. Механизмом, который может теоретически привести к этому, является поток емкостных токов через переход база-эмиттер паразитного биполярного транзистора, как показано на рис. 10.

Практически очень трудно создать это явление в МОП ПТ, даже когда тестовая схема разработана так, чтобы получить возможно высокие величины  $dv/dt$ . Поэтому отказ из-за  $dv/dt$  в выключенном состоянии на практике маловероятен.

#### $dv/dt$ восстановления диода

При условии, что спонтанное включение из-за емкостной связи стока и затвора устранено, отказ из-за  $dv/dt$  восстановления диода становится наиболее вероятной причиной, связанной с  $dv/dt$  в схемах, в которых используется интегральный диод. Механизм этого отказа показан на рис. 11.



**Рис. 9. Приближенная эквивалентная схема МОП ПТ**

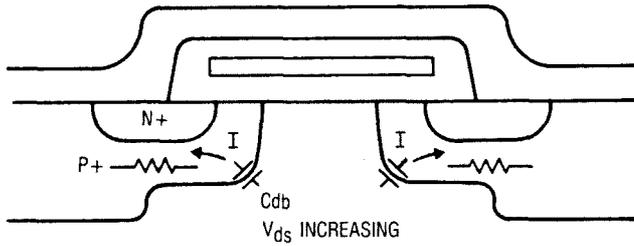


Рис. 10. Включение паразитного биполярного транзистора при изменении  $dv/dt$  в выключенном состоянии

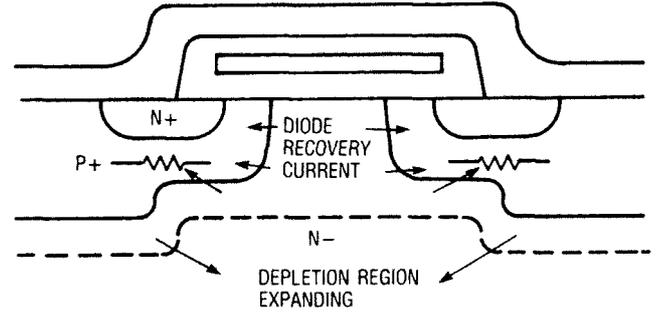


Рис. 11. Включение паразитного БИП транзистора вызываемое  $dv/dt$  диода

Вход интегрального диода в состояние проводимости приводит к инжекции неосновных носителей в область стока МОП-транзистора. В конце времени нахождения диода в состоянии проводимости внешняя схема пытается сменить напряжение на диоде на обратное так, чтобы МОП- транзистор получил прямое смещение. В первый момент это невозможно из-за высокой концентрации неосновных носителей в области перехода сток-подложка. В ходе восстановления эти носители удаляются обратным током восстановления диода.

В конце концов, достаточное количество неосновных носителей будет либо устранено, либо рекомбинирует, что создаст обедненную область перехода и блокирует напряжение. По мере расширения обедненной области в область стока неосновные носители будут выбрасываться, создавая увеличение обратного тока восстановления. Это и есть критическая фаза процесса восстановления, во время которой может включиться паразитный биполярный транзистор.

Часть тока восстановления диода будет протекать латерально через область подложки. Если его величина достаточна, чтобы создать прямое смещение перехода база-эмиттер биполярного транзистора, то прибор будет терять свою способность поддерживать напряжение, приложенное к нему. Как и в случае ввода в действие паразитного биполярного транзистора лавинным процессом, ток будет в большом количестве устремляться в первую ячейку, в которой заработает биполярный транзистор и таким образом уничтожит прибор.

HEXFET III разработан так, чтобы ток восстановления диода был распределен равномерно между ячейками с тем, чтобы ни одна из ячеек не подверглась перегрузке. Это, вместе с конструкцией ячейки, препятствует включению биполярного транзистора, а технология изготовления, дает приборам HEXFET III высокую устойчивость к  $dv/dt$ .

**Применения, требующие устойчивости к  $dv/dt$**

Высокий номинал  $dv/dt$  критичен в тех применениях, где используется интегральный диод и напряжение сток-исток подается немедленно с восстановлением диода; примером являются приводы двигателей с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). На рис 12 показаны сигналы, полученные из одного плеча ШИМ инвертора во время коммутации тока нагрузки от верхнего прибора к нижнему,  $dv/dt$  во время восстановления диода равна 4В/нсек. (Провал на выходном напряжении во время восстановления диода создается высоким значением  $di/dt$  в это время и индуктивностью разводки схемы.)

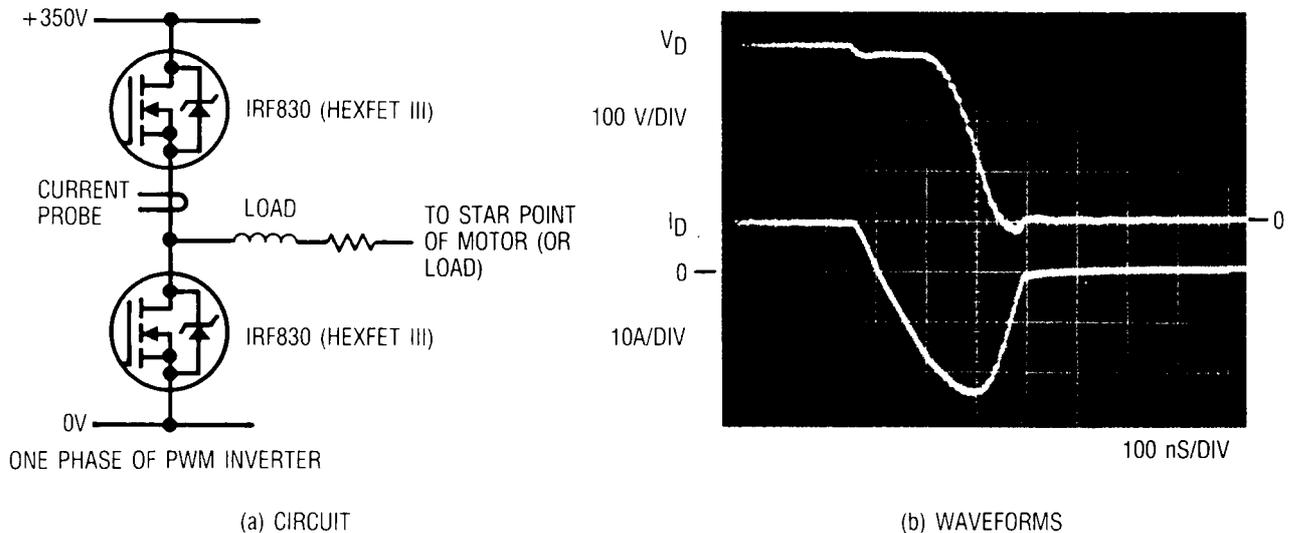


Рис. 12. Формы коммутационных сигналов ШИМ инвертора с учетом проводимости диода

Проводимость диода с высокой  $dv/dt$  восстановления может происходить в схемах со «звоном» (переходными процессами в виде затухающих колебаний). Переход напряжения стока в отрицательную область может ввести интегральный диод в состояние проводимости в то время как переход в положительную область может подвергнуть прибор высоким значениям  $dv/dt$ , могущим привести к отказу МОП-транзистора, не способного выдерживать  $dv/dt$ .

Способность HEXFET III выдерживать высокие уровни  $dv/dt$  восстановления диода делает их идеальными для применения в приводах двигателей. Встречающаяся в этих применениях  $dv/dt$  находится в пределах возможностей приборов. Аналогично, там, где использовался интегральный диод, уже нет необходимости применять схемы гашения или излишне снижать скорость переключения, чтобы избежать возможности отказа из-за  $dv/dt$ . И самое важное, максимально разрешенная  $dv/dt$  - это параметр в справочных данных при котором интегральный диод может применяться с уверенностью.

Если индуктивность значительной величины без фиксации уровня напряжения присутствует между верхним и нижним плечами мостовой схемы, как показано на рис. 13, за восстановлением диода может следовать лавинный процесс, как только энергия, накопленная в паразитной индуктивности, будет освобождена током восстановления. HEXFET III способен выдерживать такие условия, что иллюстрирует рис. 14. Здесь IRF530 подвергается  $dv/dt$  12В/нсек, после тока диода 20А. Напряжение стока продолжает подниматься, пока не будет зафиксировано лавинным процессом. Происходит следующее: сначала прибор подвергается перегрузке  $dv/dt$  восстановления диода и немедленно после этого лавинному пробую.

#### Схема испытания и норма $dv/dt$

Рис. 15 показывает схему испытаний для  $dv/dt$  восстановления диода. Номинал  $dv/dt$  восстановления диода задает много условий испытаний. Так как включение паразитного биполярного транзистора наиболее вероятно при более высоких температурах, задается температура кристалла равная  $T_{jmax}$ . Величина тока, проводимого диодом, и скорость спада тока влияют на способность диода выдерживать  $dv/dt$ . Ток диода устанавливается равным  $I_D$  и величина  $di/dt$  значительно большая, чем типовая, встречающаяся в большинстве применений. Окончательное напряжение стока равно номиналу напряжения данного прибора. Таблица 1 представляет значения справочных данных на момент написания статьи.

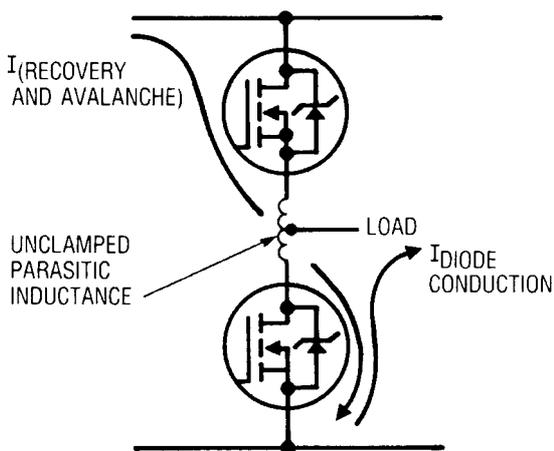
### МАКСИМАЛЬНАЯ ТЕМПЕРАТУРА ПЕРЕХОДА 175°C

#### Максимальные допустимые температуры перехода

Максимальная допустимая температура перехода для HEXFET III с напряжением 100В или меньшем значении, была увеличена до 175°C. Это оказалось возможным благодаря новой конструкции полевого кольца, улучшению технологического процесса и расширению испытаний на надежность.

Максимальная допустимая температура кристалла, в основном, определяется соображениями надежности, в частности способностью прибора поддерживать возможность блокировать напряжение во времени. Примеси в кремнии мигрируют со скоростью, определяемой напряжением и температурой, пока концентрация ионов не вырастет до такой величины, которая увеличит ток утечки и может в конечном итоге привести прибор к пробую. Тест, наиболее часто используемый для того, чтобы оценить мощный полупроводниковый прибор при определенных напряжениях и температуре, называется тест обратного смещения при высокой температуре. Результаты этого теста на приборах с более низким напряжением, работающих при 175°C, позволили квалифицировать

HEXFET III с номинальным напряжением 100В для работы при 175°C (рис. 16). Подробное описание испытаний на надежность при 175°C можно найти в Квартальном отчете по надежности МОП ПТ, который можно получить в отделе инженерных применений фирмы International Rectifier.



ONE PHASE OF PWM INVERTER

Рис. 13. Паразитная индуктивность влияющая на ток восстановления диода

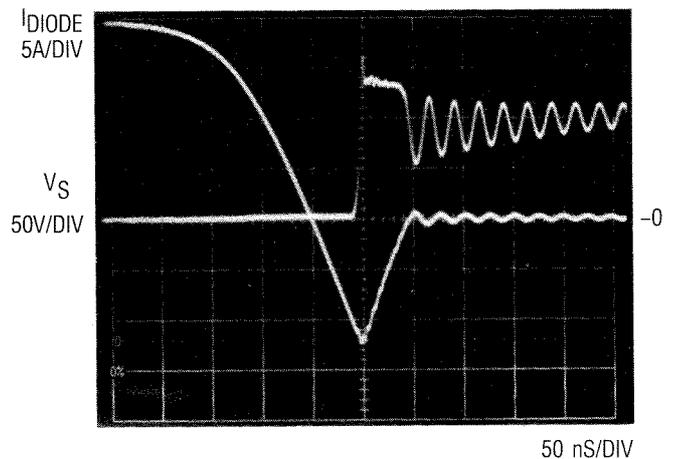


Рис. 14. Формы сигнала  $dv/dt$  восстановления и тока лавинного пробоя в диоде IRF530

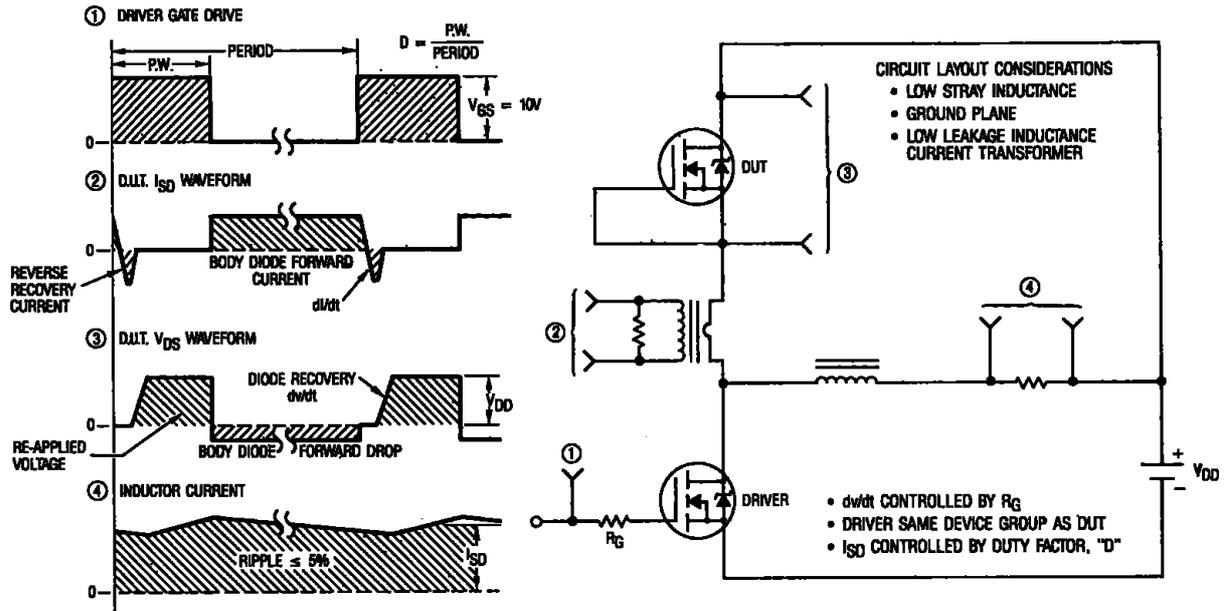


Рис. 15. Тестовая схема определения  $dv/dt$  восстановления диода

**Увеличение мощности при более высоких температурах окружающей среды**

Мощность, которую может рассеивать прибор, определяется формулой:

$$P_d = (T_j - T_c) / R_{thjc}$$

где  $T_j$  - температура перехода,  $T_c$  - температура корпуса и  $R_{thjc}$  - тепловой импеданс переход-корпус.

Таким образом, способность конкретного прибора рассеивать мощность снижается с увеличением температуры корпуса. На рис. 17 показаны кривые ухудшения параметров для двух приборов с одними и теми же  $I_D$  и  $P_d$  при  $25^\circ\text{C}$ , но с различными максимальными допустимыми температурами переходов.

Ясно, что при высоких значениях температуры корпуса есть заметная разница в способности рассеивать мощность двух приборов и это отражается на их возможности по мощности при данной температуре корпуса.

Способность приборов HEXFET III с напряжением 100V и ниже работать при  $175^\circ\text{C}$  дает преимущество там, где высока температура окружающей среды. Например, у схем, работающих под капотом автомобиля, температура окружающей среды может быть  $125^\circ\text{C}$ , а температура корпуса  $135^\circ\text{C}$ . Как показывает рис. 17, способность рассеивать мощность  $175^\circ\text{C}$ -градусных приборов при этих условиях выше более, чем в два раза по сравнению со  $150^\circ\text{C}$ -градусными приборами. Так как  $P_d$  пропорциональна  $I_d$  в квадрате,  $175^\circ\text{C}$ -градусный прибор может проводить на 45 % тока больше.

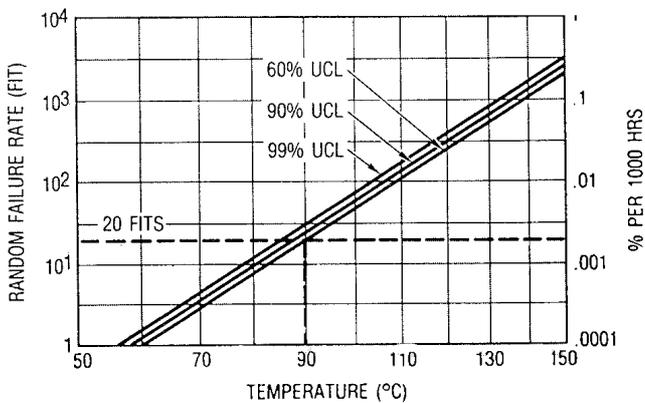


Рис. 17. Зависимость рассеиваемой мощности от температуры корпуса

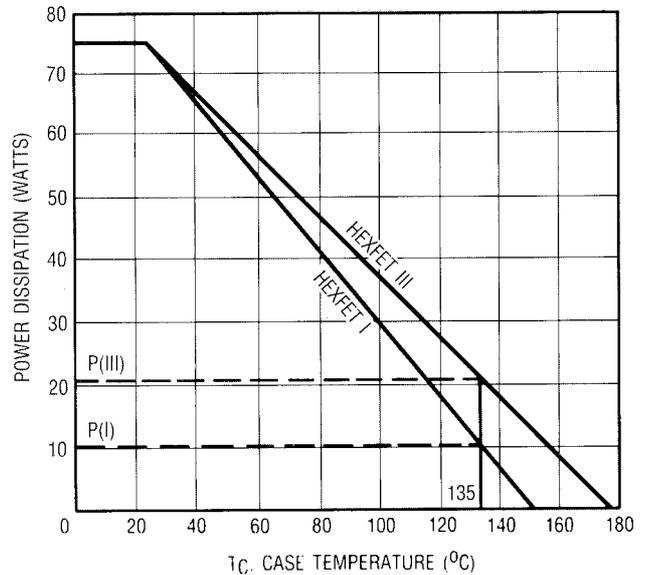


Рис. 16. Интенсивность отказов при воздействии температуры и смещения

## ВРЕМЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДИОДА

### Время обратного восстановления диода $t_{rr}$

Справочные данные для HEXFET III приводят максимальное время восстановления диода, а также типовую величину, приводимую в справочных данных предшествовавших МОП ПТ. Значения времени обратного восстановления,  $t_{rr}$ , во многих случаях будут меньше для приборов HEXFET III, чем у их эквивалентов из семейств HEXFET I и HEXFET II. Это, в основном, результат переработки конструкции прибора. Оптимизация размера ячейки, новая конструкция полевого кольца и контактных площадок позволили снизить размеры кристаллов МОП ПТ. Это означает меньший накапливаемый заряд при данном токе стока и соответственно меньшее  $t_{rr}$ .

Быстродействие диода HEXFET III сравнимо с быстродействием мощных МОП-транзисторов, разработанных специально, чтобы они имели быстродействующий интегральный диод. В этих приборах с быстрым восстановлением используется легирование или облучение тяжелыми металлами для увеличения концентрации центров рекомбинации в кремнии. Это снижает время жизни неосновных носителей, таким образом ускоряя восстановление диода, но за счет увеличения  $R_{ds(on)}$  МОП ПТ. Как показывает рис. 18, при типовых рабочих температурах и с восстановлением диода, имеющим место при обычно встречающихся величинах  $di/dt$ , время восстановления диода подобно этому параметру у специальных приборов.

Если время восстановления диода HEXFET III должно быть достаточно быстрым для конкретного применения, тогда развязка интегрального диода внешними диодами будет оставаться необходимой. И наоборот, формирование сигнала включения может быть использовано для снижения потерь при восстановлении диода.

## ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ HEXFET III

### Номера приборов HEXFET III

Семейство HEXFET III взаимно совместимо с семействами HEXFET I и HEXFET II. Это означает, что электрические характеристики приборов HEXFET III равны или превосходят характеристики их аналогов в семействах HEXFET I МОП ПТ I и HEXFET II. Поэтому приборы HEXFET III носят те же самые номера, что и приборы HEXFET I и HEXFET II. Приборы, изготовленные по технологическому процессу HEXFET III, отличаются по обратному размещению в коде партии букв и цифр. Например, в то время как HEXFET I и HEXFET II в корпусе TO-220 могут быть замаркированы кодом партии A2A3, прибор HEXFET III будет замаркирован 2A3A. Когда код партии отсутствует, на корпус HEXFET III ставится идентифицирующий символ. (Смотрите индивидуальные справочные данные по маркировке.)

### Различия в справочных данных

Справочные данные, прилагаемые к приборам, выполненным по технологии HEXFET III, имеют указание на первой странице, что содержащиеся данные действительны только для приборов HEXFET III.

Основными отличиями справочных данных приборов HEXFET III в сравнении с приборами HEXFET I и HEXFET II являются:

- \* Улучшенные параметры лавинного процесса.
- \* Новые параметры для повторяющихся лавинных процессов.
- \* Новые нормы  $dv/dt$  восстановления диода.
- \* Гарантированные максимальные времена восстановления диода.
- \* Меньшие значения  $R_{ds(on)}$ .
- \* Увеличение максимальной температуры кристалла.

Основные электрические параметры (номинальное напряжение,  $R_{ds(on)}$  и  $I_D$ ) или те же самые или улучшены в варианте МОП ПТ III. Другие важные параметры, такие как  $P_d$  и  $I_{dm}$  также остаются неизменными или улучшенными.

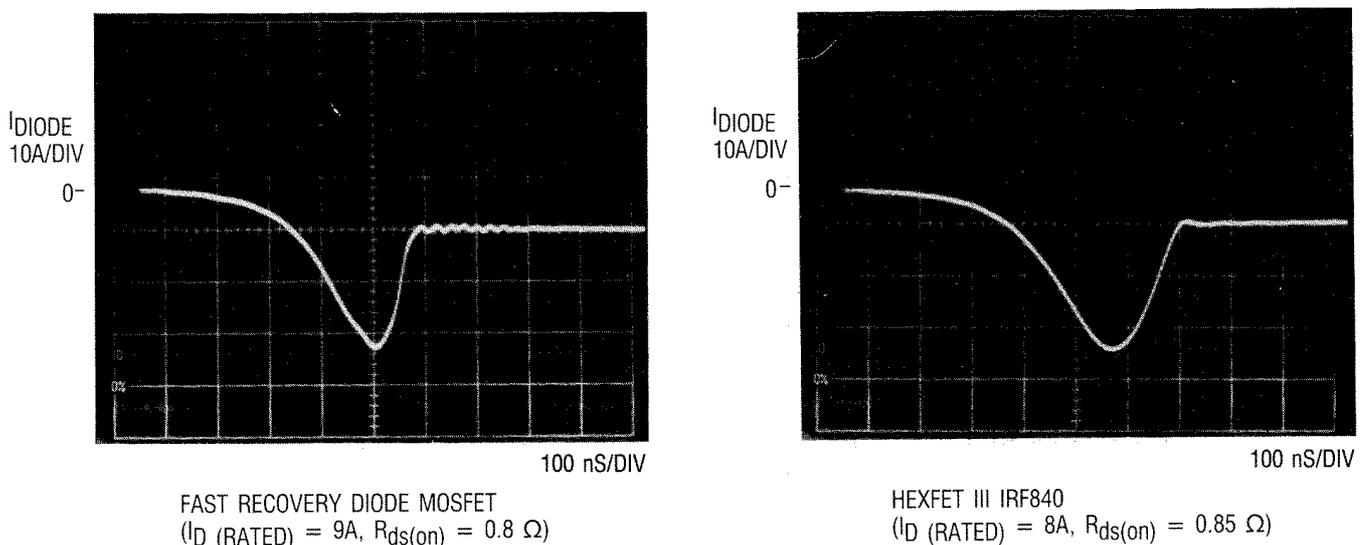


Рис. 18. Сравнение времени восстановления диода МОП ПТ III с МОП ПТ с уменьшенным временем жизни носителя

Максимальные значения  $C_{iss}$ ,  $C_{oss}$  и  $C_{rss}$  больше не приводятся в справочных данных МОП ПТ III. Вместо них даются максимальные значения  $Q_g$ ,  $Q_{gs}$  и  $Q_{gd}$ . Это сделано в соответствии с мнением промышленности, что более правильно сравнивать приборы на базе заряда, чем емкости.

Как показывает рис. 19, значения емкостей широко изменяются с напряжением стока. Форма кривой, связывающей  $V_{ds}$  с емкостью может заметно отличаться у разных изготовителей, особенно при напряжении стока, при котором они делают классификацию. Таким образом, хотя величина емкости в значительных точках кривой может быть той же самой, значения емкости при номинальных условиях, обычно  $V_{ds} = 25V$ , могут существенно отличаться. С другой стороны, величины зарядов задаются для напряжений переходных процессов; составляющих 80% от номинального напряжения прибора. Обычно, пользователь интересуется максимальными значениями емкостей, чтобы рассчитать передачу заряда, имеющую место при переключении прибора. Поэтому логично оценивать максимальные величины зарядов вместо значений емкостей с тем, чтобы дать пользователю прямые данные измерения важного параметра. Типовые значения емкостей пока еще даются в справочных данных на HEXFET III.

## ВЫВОДЫ

Фирма International Rectifier выпустила новое семейство МОП ПТ, основанное на технологическом процессе HEXFET III. МОП ПТ, сделанные по этому стандарту, обладают большей надежностью, имеют улучшенные параметры лавинного процесса, а также улучшенную устойчивость к  $dv/dt$  восстановления диода. Нормы на  $dv/dt$  восстановления диода добавлены в справочные данные, что позволит пользователям с уверенностью применять интегральный диод.

Параметр разового лавинного процесса гарантирует способность HEXFET III поглощать большое количество лавинной энергии во время случайной перегрузки по напряжению. Способность приборов HEXFET III выдерживать повторяющиеся лавинные процессы позволит удалить фиксирующие напряжение диоды Зенера из многих применений.

Максимальная допустимая температура перехода для HEXFET III была поднята от  $100^{\circ}C$  до  $175^{\circ}C$ . Это дает возможность работать с большими мощностями при высокой температуре окружающей среды и увеличение надежности, когда переход работает при температурах ниже максимально допустимой.

Приборы носят те же номера, что и приборы HEXFET I и HEXFET II, которые они заменили, и код данных, указывающий на то, какие справочные данные применимы к этим приборам. Принципиальные электрические характеристики приборов HEXFET III равны или лучше характеристик соответствующих приборов HEXFET I и HEXFET II. Новые методы производства и структура завода позволяют поставлять МОП ПТ с временем заказ-отгрузка намного короче, чем у обычных заводов с обычными методами производства.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1.

### ПРОИЗВОДСТВО HEXFET III

Семейство HEXFET III изготавливается на новом специально построенном заводе International Rectifier под названием HEXFET America. На этом заводе традиционные методы производства пластин заменены линиями линейного потока продукции. Это, вместе с компьютерным управлением и мониторингом всего производственного оборудования нацелено на производство мощных МОП-транзисторов, несравнимых по значению, характеристикам и надежности.

На обычном заводе по производству пластин, как показано на рис. (A), пересекаются проходы через различные рабочие участки. На различном оборудовании образуются очереди и становится трудно предугадать заранее время, требуемое для партии, чтобы завершить свое прохождение по заводу. На HEXFET America продукция протекает непрерывно через завод, имея различные участки для каждой операции процесса (рисунок B).

Поэтому прохождение пластин через завод не нарушается другими партиями прибывающими одновременно на конкретный участок. Время, требуемое для прохождения пластинами завода значительно укорочено и предсказуемо. Затем кристалл проходит на линию корпусирования для помещения в популярные виды корпусов. Линия корпусирования построена на той же идеологии, что и производство пластин - уникальная концепция в промышленности.

Технологический процесс и линейный поток продукции дает заводу очень короткое время реагирования. Поэтому, для заказов большого объема, которые нельзя поставить со склада, время от заказа продукции до ее отгрузки значительно сокращено по сравнению с традиционными полупроводниковыми заводами. Таким образом, идеология производства МОП ПТ хорошо соответствует требованиям своевременной поставки.

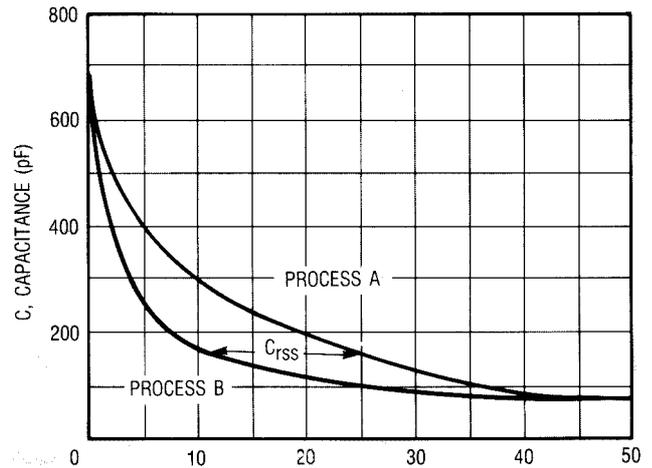


Рис. 19, Зависимость емкости  $C_{rss}$  от напряжения стока

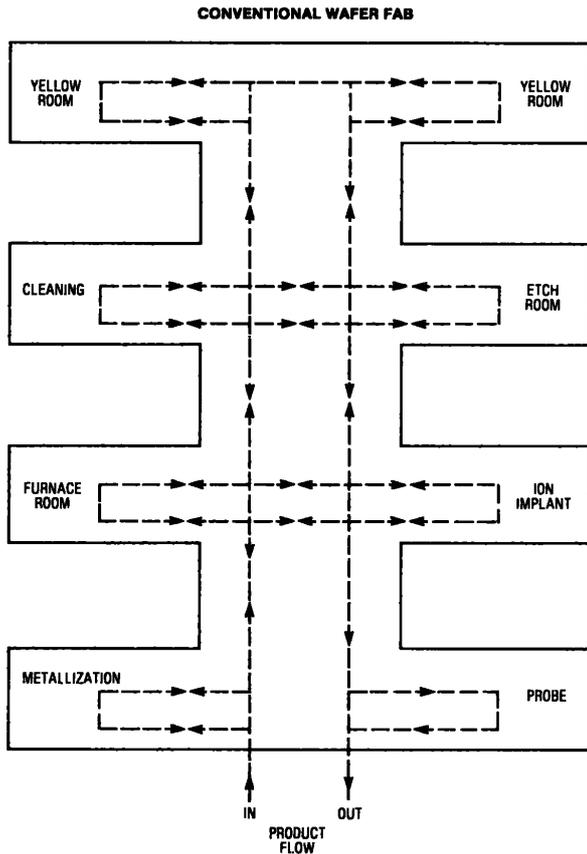


Рис. А. Действующий технологический маршрут изготовления пластин

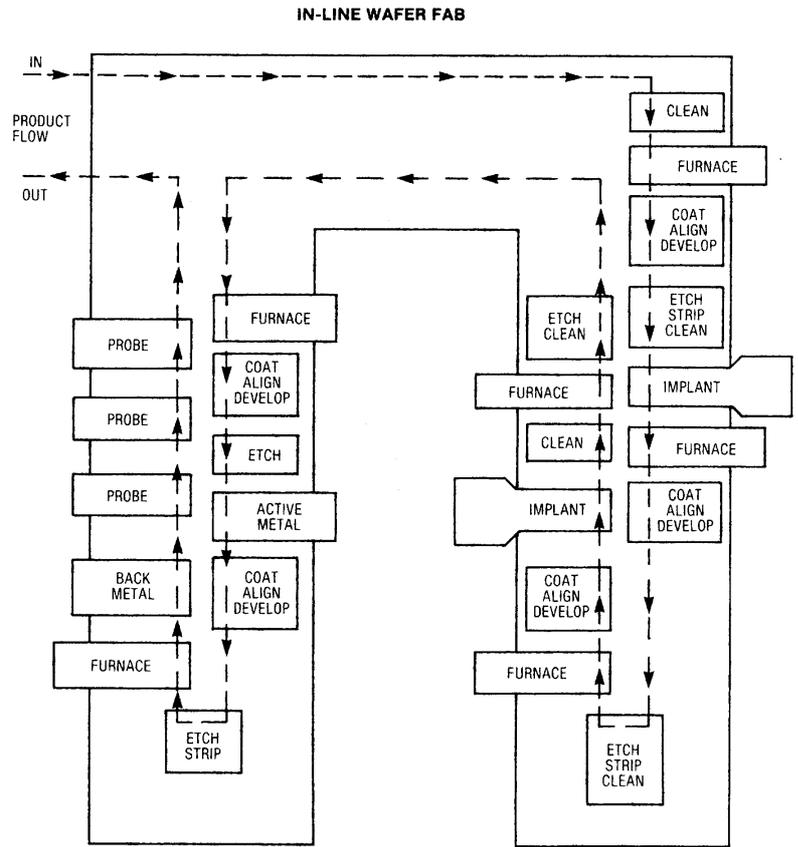


Рис. В. Оптимизированный технологический маршрут изготовления пластин

### КРИТЕРИЙ РАЗРАБОТКИ МОЩНОГО МОП-ТРАНЗИСТОРА

В процессе двойной диффузии, который является базой для большинства мощных МОП-транзисторов, получается биполярный NPN транзистор внутри каждой ячейки МОП-транзисторов (PNP транзистор в случае P-канального МОП-транзистора). Для предотвращения включения этого паразитного биполярного транзистора металлизация истока покрывает и область истока N-типа и область P-типа. Это закорачивает базу паразитного биполярного транзистора с его эмиттером, таким образом предотвращая повышение потенциала области базы по отношению к эмиттеру.

В действительности закорачивание базы и эмиттера паразитного биполярного транзистора полностью эффективно только в области закорачивания. На любом расстоянии от закорачивания сопротивление кремния, особенно области тела P-типа, должно учитываться в цепи закорачивания, как показывает рис. (С).

Если через подложку протекает существенный ток, падение напряжения, произошедшее по любой причине на области тела, может быть достаточным, для смещения в прямом направлении перехода база-эмиттер паразитного биполярного транзистора. Переход база-эмиттер наиболее легко смещается в прямом направлении при высоких температурах, так как сопротивление на ней возрастает с температурой, в то время как напряжение, требуемое для прямого смещения перехода база-эмиттер уменьшается.

### КОНСТРУКЦИЯ HEXFET III

HEXFET III сконструированы и производятся так, что практически исключается возможность включения паразитного биполярного транзистора. Наиболее важной характеристикой конструкции в этом аспекте является низкое удельное сопротивление области P-типа. Поддерживая путь латерального тока в подложке как можно более коротким и широким, поддерживается минимальное его сопротивление.

Уровень легирования этой области также поддерживается высоким для дальнейшего снижения сопротивления материала, через который может протекать латеральный ток.

Другие особенности конструкции обеспечивают равномерное распределение тока неосновных носителей при лавинном процессе и во время восстановления интегрального диода с тем, чтобы ни одна конкретная ячейка не подвергалась более,

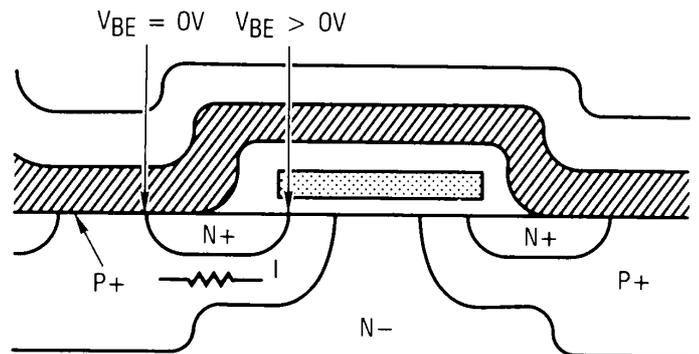
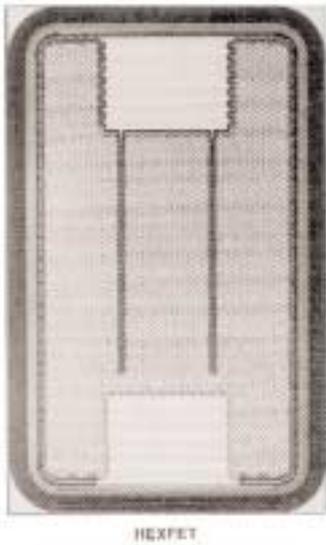


Рис. С. Пассивные паразитные структуры БИП ПТ



HEXFET I



HEXFET III

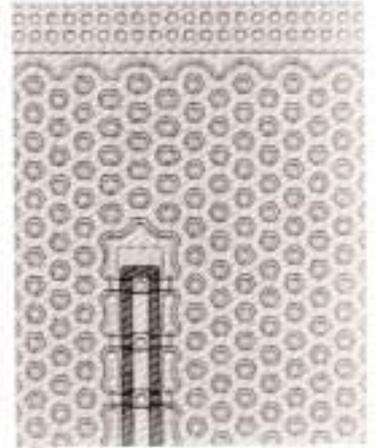


Рис. D. Сравнение внешнего вида кристаллов МОП ПТ

Рис.Е. Сравнение внешнего вида ячеек на кристаллах МОП ПТ

чем другая, условиям, при которых может включиться паразитный биполярный транзистор. Рис. (D) показывает кристалл HEXFET I и аналогичный ему HEXFET III . Рис (E) показывает эти два кристалла при большем увеличении. Оптимизированный размер ячейки и конструкция полевого кольца видны на снимке, то же относится к контактным площадкам и конструкции затвора. Патентованные особенности International Rectifier, использованные для получения минимального  $R_{DS(on)}$  на единицу площади HEXFET II присутствуют и в конструкции HEXFET III .

В результате этих конструкторских особенностей приборы HEXFET III обладают высокой способностью выдерживать лавинный процесс и высокие значения  $dv/dt$  восстановления диода. Оптимизация размера кристалла и улучшенные конструкции контактных площадок и полевого кольца привели к улучшению других характеристик, таких как быстрое переключение и более короткое время восстановления диода.