

# Оптимизация параметров антипараллельных диодов модулей IGBT фирмы SEMIKRON

**Технология SKiP, разработанная специалистами фирмы SEMIKRON, позволила создать интеллектуальные модули с уникальными тепловыми и электрическими характеристиками и отличными показателями надежности. Параметры мощных модулей IGBT во многом зависят от характеристик примененных антипараллельных диодов. Диоды CAL с контролируемым временем жизни носителей имеют оптимальное сочетание характеристик проводимости и обратного восстановления. Эти диоды специально разработаны для применения в силовых модулях SEMIKRON. Данная статья посвящена особенностям применения диодов серии CAL и новой серии CAL HD, в которой значительно улучшены характеристики проводимости.**

**Андрей Колпаков**

kai@megachip.ru

В интеллектуальных модулях IGBT SEMIKRON серии SKiP с самого начала их производства использовались специально разработанные антипараллельные диоды с «мягкой» характеристикой восстановления, обеспечивающей минимальное значение динамических потерь. Технология производства антипараллельных диодов SEMIKRON называется CAL-FWD (Controlled Axial Lifetime — Free Wheeling Diode) [2]. При разработке диодов CAL особое внимание уделяется оптимизации соотношения таких параметров, как прямое падение напряжения VF, заряд обратного восстановления Q<sub>RR</sub> и характеристика обратного восстановления di<sub>r</sub>/dt, поскольку они оказывают решающее влияние на потери, вносимые диодом.

Одним из основных требований, предъявляемых к высоковольтным модулям IGBT, является требование выдерживать без повреждения большие значения di/dt, возникающие при переключении. Транзисторы не должны выходить из строя от перенапряжений, создаваемых на паразитных индуктивностях линий связи за счет di/dt, а динамические потери, создаваемые током обратного восстановления, не должны приводить к значительному увеличению рассеиваемой мощности. Применение диодов CAL помогает решить данные проблемы. Например, в разрабатываемом в настоящее время высоковольтном модуле, рассчитанном на ток 1200 А и напряжение 3300 В, установлено параллельно шесть 200-амперных кристаллов. При включении скорость возрастания тока каждого транзистора составляет di/dt = 800 А/мкс (4800 А/мкс на модуль). При этом ток обратного восстановления не превышает 125 А за счет оптимальных характеристик восстановления диодов CAL. Кроме уменьшения значения перенапряжения, низкое значение тока обратного восстановления позволяет получить и меньшие потери включения. На рис. 1 показаны потери полумостового каскада

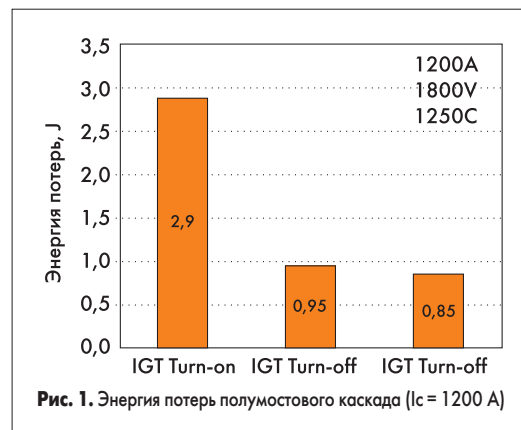


Рис. 1. Энергия потерь полумостового каскада (I<sub>c</sub> = 1200 А)

при включении, при выключении и потери, вносимые антипараллельными диодами.

Благодаря низким значениям динамических потерь, оптимальной характеристике восстановления диодов и отличным конструктивным характеристикам, позволившим получить минимальные величины паразитных индуктивностей, модули SKiP3, рассчитанные на напряжение 1200/1700 В, можно использовать без снабберов.

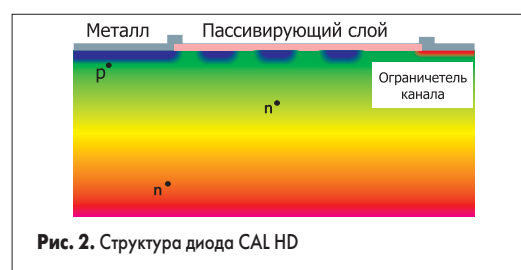


Рис. 2. Структура диода CAL HD

Новые диоды CAL HD (Controlled Axial Lifetime — High Density) являются дальнейшим развитием технологии CAL-FWD. Они разработаны для использования в новых поколениях интеллектуальных сило-

вых модулей SEMIKRON, где применяются современные транзисторы Trench IGBT.

По сравнению со стандартными IGBT-транзисторами транзисторы, изготовленные по технологии Trench IGBT, отличаются более высокой плотностью тока и низкими динамическими потерями. Использование Trench IGBT особенно целесообразно в мощных модулях, работающих в режиме высокочастотной модуляции, где они позволяют получить минимальные потери и максимальную мощность. Отсюда вытекают и требования к антипараллельным диодам: низкое прямое падение напряжения и малый ток обратного восстановления в сочетании с плавной кривой восстановления  $dI_{tr}/dt$ . Поскольку в мощных модулях часто приходится использовать параллельное соединение компонентов, то желательно также иметь положительный температурный коэффициент прямого напряжения.

Диоды CAL HD изготовлены по технологии, позволяющей оптимизировать время жизни и процесс рассасывания носителей в зоне p-n-перехода. На рис. 2 показана структура диода CAL HD. Основными особенностями новых диодов являются глубокая зона диффузии n+, примесная защитная структура p+ для повышения напряжения пробоя и ограничитель канала n+. Неметаллизированная поверхность диода покрыта пассивирующим слоем.

Время жизни носителей регулируется так называемым центром рекомбинации, индуцированным за счет облучения электронами высокой энергии и в процессе ионной имплантации. В результате образуется примесная область, состоящая из однородных компонентов в области базы и примесная область в зоне p-n-перехода. Для стабилизации плотности примеси используется процесс отжига при температуре 300 °C.

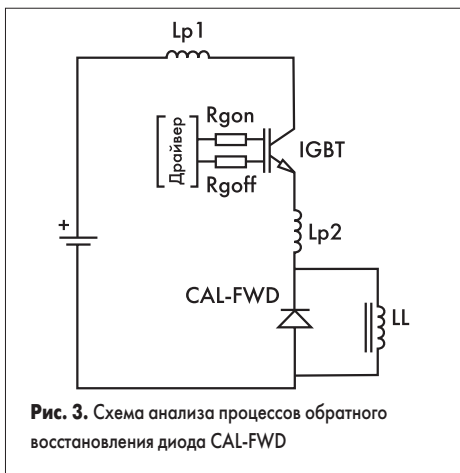


Рис. 3. Схема анализа процессов обратного восстановления диода CAL-FWD

Для измерения характеристик обратного восстановления диодов CAL служит тестовая схема, приведенная на рис. 3. На схеме приняты следующие обозначения:  $L_{p1}$  и  $L_{p2}$  — паразитные индуктивности линий связи,  $R_{GON}$  ( $R_{GOFF}$ ) — импеданс схемы управления в режиме включения (выключения),  $L_L$  — индуктивность нагрузки.

После выключения транзистора IGBT диод находится в состоянии проводимости, поддерживая в индуктивности ток, прерванный транзистором. При открывании транзистора на

пряжении на диоде становится обратным. Наличие заряда обратного восстановления  $Q_{tr}$  диода приводит к протеканию тока обратного восстановления  $I_{tr}$ . В результате через транзистор при открывании течет сумма токов: тока нагрузки и пикового значения тока обратного восстановления  $I_{trm}$ . Далее ток  $I_{tr}$  падает до установившегося значения в течение времени восстановления  $t_{tr}$ . Ток обратного восстановления вызывает дополнительные динамические потери в оппозитном транзисторе IGBT и перенапряжение  $dV$  на паразитных индуктивностях  $L_{p1}$  и  $L_{p2}$ , уровень которого определяется скоростью изменения тока восстановления:  $dV=L_p \times dI_{tr}/dt$ . Именно поэтому «плавность» характеристики восстановления не менее важна, чем значение тока восстановления.

Таким образом, диод, работающий совместно с транзистором IGBT в качестве оппозитного, должен быть оптимизирован по характеристикам проводимости и восстановления, то есть должен иметь минимальное прямое падение напряжения для снижения потерь проводимости и минимальный заряд обратного восстановления  $Q_{tr}$  для снижения динамических потерь транзистора и уровня перенапряжения по шинам питания. Характеристики восстановления  $Q_{tr}$  и  $I_{trm}$  определяются собственными параметрами диода, скоростью включения транзистора  $dI_F/dt$ , зависящей от  $R_{GON}$ , током транзистора  $I_F$  и напряжением питания.

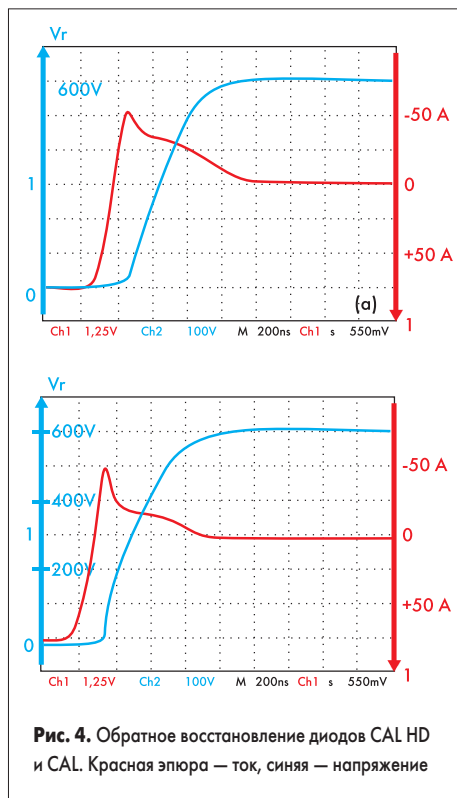


Рис. 4. Обратное восстановление диодов CAL HD и CAL. Красная эпюра — ток, синяя — напряжение

На рис. 4, а показан процесс обратного восстановления диода CAL HD в тестовой схеме рис. 3. Графики даны для следующих условий работы схемы:

- температура кристалла  $T_j = 125$  °C;
- ток транзистора  $I_F = 75$  A;
- напряжение шины питания  $V_R = 600$  В;
- скорость нарастания тока включения транзистора  $dI_F/dt = 800$  А/мкс.

Синие эпюры показывают напряжение на диоде, красные — ток диода. Для сравнения

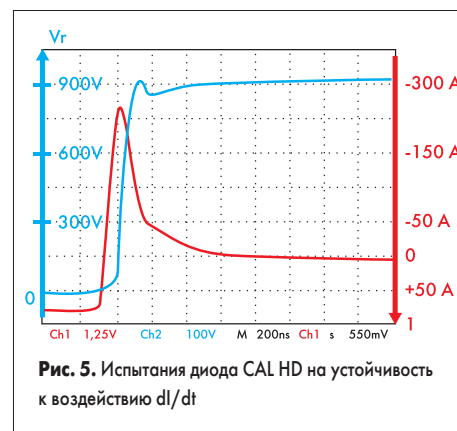


Рис. 5. Испытания диода CAL HD на устойчивость к воздействию  $dI/dt$

процессов обратного восстановления стандартного и улучшенного диода на рис. 4, б приведены аналогичные графики для диода CAL. Диоды CAL HD имеют «мягкую» характеристику восстановления, аналогичную CAL, с выраженным «хвостом» тока (Tail current), наблюдаемым после пикового значения  $I_{trm}$ . Из-за большего времени жизни носителей в первом случае значение  $I_{trm}$  несколько больше.

Динамические характеристики диода CAL HD при воздействии высокого значения  $dI/dt$  показаны на рис. 5 для следующих условий работы:

- температура  $T = 125$  °C;
- ток транзистора  $I_F = 75$  A;
- напряжение шины питания  $V_R = 900$  В;
- скорость нарастания тока включения транзистора  $dI_F/dt = 6250$  А/мкс.

График демонстрирует высокий иммунитет нового поколения диодов в режиме «жесткого переключения» с максимальными скоростями коммутации.

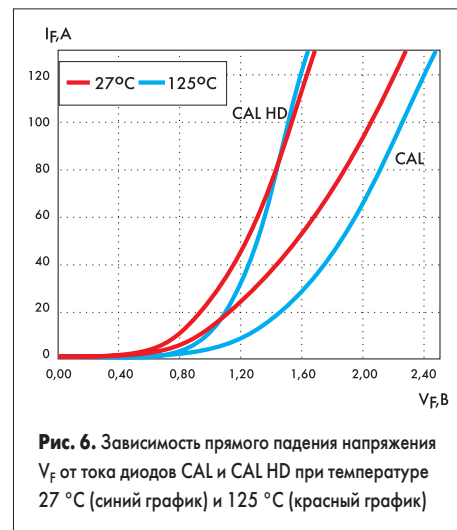


Рис. 6. Зависимость прямого падения напряжения  $V_F$  от тока диодов CAL и CAL HD при температуре 27 °C (синий график) и 125 °C (красный график)

Основное преимущество диодов CAL HD по сравнению с диодами предыдущего поколения — низкое прямое падение напряжения, что иллюстрирует график на рис. 6. Падение напряжения снижено более чем на 700 мВ при токе 100 А. Поскольку потери на диодах вносят значительный вклад в общие потери проводимости IGBT-модуля, следует ожидать, что при использовании диодов CAL HD повысится эффективность модуля, особенно при работе на индуктивную нагрузку.

Как видно из графика, в усовершенствованных диодах также значительно снижен температурный коэффициент  $dV_F/dT$ . Кроме того,

**Таблица 1.** Сравнительные характеристики диодов CAL и CAL HD с одинаковым размером кристалла

Параметр	Режим измерения	SKCD 61C120	SKCD 61C120HD	
$Q_{rr}$ , мКК	$T = 125\text{ }^\circ\text{C}$ $V_R = 600\text{ В}$ $I_F = 75\text{ А}$ $di/dt = 800\text{ А/мкс}$	11	18	
$I_{rrm}$ , А		45	51	
$E_{off}$ , мДж		4	5,3	
$V_F$ , В	$I_F = 75\text{ А}$	$T_a = 27\text{ }^\circ\text{C}$	2,25	1,53
		$T_a = 125\text{ }^\circ\text{C}$	2,05	1,53
$J$ , А/см <sup>2</sup>	$T_j = 150\text{ }^\circ\text{C}$ $T_c = 80\text{ }^\circ\text{C}$	126	153	
$I_{FSM}$ , А	$T_j = 150\text{ }^\circ\text{C}$	720	840	

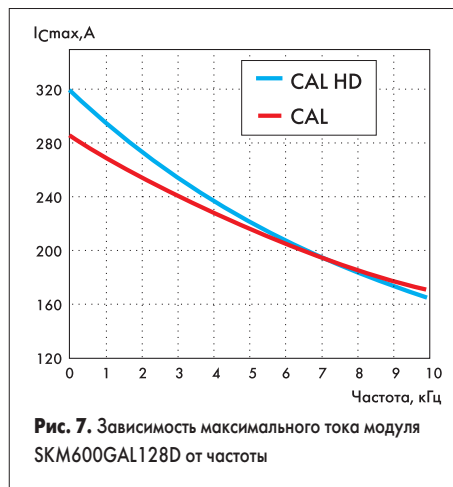
**Таблица 2.** Параметры модуля SKM600GAL128D

Параметр	IGBT	CAL	CAL HD
$R_{thjc}$ , К/Вт	0,056	0,125	0,125
$V_{CEsat}$ , В	2,2	–	–
$E_{off}$ , мДж	4,42	0,89	1,17
$V_F$ , В	–	1,2	0,97

В таблицах использованы следующие обозначения:

$Q_{rr}$  — заряд обратного восстановления;  
 $I_{rrm}$  — пик тока обратного восстановления;  
 $E_{off}$  — энергия выключения;  
 $V_F$  — прямое падение напряжения диода;  
 $J$  — плотность тока;  
 $I_{FSM}$  — пиковый прямой ток;  
 $I_F$  — средний прямой ток;  
 $T_j$  — температура кристалла;  
 $T_c$  — температура корпуса;  
 $T_a$  — температура окружающей среды;  
 $R_{thjc}$  — тепловое сопротивление «кристалл — корпус»;  
 $V_{CEsat}$  — напряжение насыщения транзистора.

при токах, больших 100 А, значение  $dV_F/dT$  становится положительным, что дает преимущество при параллельном соединении, когда рост температуры кристалла компенсируется снижением рассеиваемой мощности. Отрицательный температурный коэффициент может привести к разбалансу токов в предельных ре-



**Рис. 7.** Зависимость максимального тока модуля SKM600GAL128D от частоты

жимах работы и разрушению кристалла. При использовании диодов предыдущего поколения при параллельном соединении приходилось подбирать диоды с идентичным значением прямого напряжения.

Сравнительные характеристики диодов CAL и CAL HD приведены в таблице 1. Необходимо отметить, что некоторый проигрыш в динамических параметрах диодов CAL HD компенсируется значительным снижением прямого падения напряжения, увеличением допустимой плотности тока и предельного значения тока.

Для оценки эффективности работы диодов нового поколения на различных частотах используется тестовая схема чоппера (рис. 3), в которой влияние параметров оппозитного диода наиболее четко выражено. В качестве чоппера с оппозитным диодом применен модуль SEMITRANS — SKM600GAL128D с транзистором Trench IGBT, параметры которого приведены в таблице 2. Модуль имеет два исполнения: с диодом CAL и CAL HD, что и позволяет провести сравнение. Результаты расчета максимального тока модуля в зависимости

от частоты при постоянной температуре радиатора  $T_h = 40\text{ }^\circ\text{C}$  и температуре кристалла  $T_j = 125\text{ }^\circ\text{C}$  приведены на рис. 7. График демонстрирует, что применение диодов CAL HD оправдано при частотах до 7 кГц, на более высоких частотах динамические потери, обусловленные большим значением тока  $I_{rrm}$ , доминируют над потерями проводимости.

Диоды семейства Controlled Axial Lifetime, разработанные для применения в модулях IGBT, имеют очевидные преимущества перед стандартными быстрыми диодами благодаря оптимальному сочетанию параметров проводимости и восстановления: низким прямым напряжением, малым током обратного восстановления и «мягкой» кривой обратного восстановления  $di_{rr}/dt$ . Указанные особенности обеспечивают как низкое значение потерь, так и отсутствие перенапряжений, возникающих из-за наличия паразитных индуктивностей шин питания модулей IGBT.

В модулях IGBT, предлагаемых SEMIKRON, применяются различные компоненты: транзисторы SPT и Trench IGBT, диоды CAL и CAL HD. Это позволяет пользователю выбрать компоненты, имеющие оптимальные характеристики для конкретного применения.

## Литература

1. K. Haupl, B. Konig. CAL HD — An optimized Freewheeling Diode for Trench-IGBT Modules. Semikron Elektronik GmbH, Nurnberg, Germany.
2. J. Lutz. Axial Recombination Center Technology for Freewheeling Diodes.
3. А. Колпаков. SKiiP — интеллектуальные силовые модули IGBT фирмы SEMIKRON // Компоненты и Технологии. 2003. № 1.
4. А. Колпаков. Особенности применения силовых IGBT-модулей фирмы SEMIKRON // Электронные компоненты. 2002. № 6.