

Влияние выбора диода

на характеристики силовой системы

Важно использовать силовые приборы, оптимизированные под конкретные условия работы силовой системы.

**Омар Хармон
(Omar Harmon)**

**Хольгер Хаскен
(Holger Husken)**

Такие силовые приборы, как IGBT и диоды, широко используются в силовой электронике. Диоды применяются во многих устройствах: силовой диод в корректорах коэффициента мощности, выполненных по топологии повышающего преобразователя; обратный защитный диод; выпрямители в первичных и вторичных цепях; быстродействующие выпрямители, например в устройствах зарядки батарей. Как правило, для IGBT характерны высокие потери на переключение из-за затянутого спада («хвоста») тока, что ограничивает рабочую частоту переключений. Для обеспечения выполнения требований стандартов по электромагнитной совместимости в качестве входной ступени в силовых устройствах широко используются активные корректоры коэффициента мощности (ККМ). В основном активные ККМ для систем большой мощности построены на базе топологии повышающего преобразователя, работающего в режиме непрерывных токов (Continuous Conduction Mode, ССМ). В подобных схемах ККМ требуется силовой диод, параметры которого должны быть оптимизированы для обеспечения высокой эффективности и высокой плотности мощности.

Чтобы добиться высокой эффективности при низком уровне электромагнитных помех, следует использовать силовые приборы, предназначенные для конкретного применения. Например, диод Rapid 1 компании Infineon с мало меняющимся при изменении температуры прямым падением напряжения 1,35 В оптимизирован для устройств с частотой переключения до 40 кГц. Такие частоты типичны в бытовой технике, инверторах солнечных батарей и сварочных аппаратах. В то же время диод Rapid 2 от Infineon с малым временем обратного восстановления оптимизирован для устройств с частотами переключения 40–100 кГц. Эти частоты типичны для построенных по топологии повышающего преобразователя ККМ, применяющихся в импульсных источниках питания общего назначения. Испытания устройств при использовании в них указанных диодов свидетельствуют о меньших потерях на проводимость и на переключение, мягком обратном восстановлении и стабильных характеристиках при изменении температуры.

Rapid 1 или Rapid 2?

Для разных приложений требуются диоды разных типов. Диоды с малым V_f (прямое падение напряжения) оптимизированы для устройств с низкой частотой переключения. В то же время диоды с низкими значениями Q_{rr} (заряд обратного восстановления) и t_{rr} (время обратного восстановления) оптимизированы для устройств с высокой частотой переключения. Таким образом, поскольку в приложениях требуются диоды, специально предназначенные для высокой или низкой скорости переключения, компанией Infineon были разработаны семейства диодов Rapid 1 и Rapid 2. Диоды семейства Rapid 1 оптимизированы по величине прямого падения напряжения V_f , что гарантирует минимальные потери на проводимость. Следовательно, эти приборы лучше всего подходят для устройств с частотой переключения до 40 кГц. В то же время для устройств с частотой переключения свыше 40 кГц было разработано семейство Rapid 2. У этих диодов время обратного восстановления $t_{rr} < 20$ нс, благодаря чему потери на переключение оказываются минимальными.

p-i-n-диоды можно классифицировать по соотношению между V_f и Q_{rr}/t_{rr} : либо у них низкое значение V_f при высоких Q_{rr} и t_{rr} , либо высокое V_f при низких Q_{rr} и t_{rr} . У диодов семейства Rapid 1 низкое значение V_f . Семейство Rapid 2 — это диоды с низкими Q_{rr} и t_{rr} . Статические (низкое V_f) и динамические (малое t_{rr}) характеристики *p-i-n*-диодов определяются плазмой избыточных носителей заряда, инжектированных в зону дрейфа диода. Эта плазма модулирует проводимость диода, но ее необходимо вывести из диода прежде, чем на него будет подано обратное напряжение. Чем выше концентрация плазмы, тем лучше проводимость, т. е. можно получить V_f меньшей величины. Но это означает и больший заряд, для удаления которого требуется время. Высокая концентрация заряда приводит к высокой величине Q_{rr} . Концентрация плазмы в проводящем состоянии *p-i-n*-диода определяется толщиной дрейфового слоя, временем жизни амбиполярных носителей в зоне дрейфа, ее изменением по глубине и инжекционной эффективностью анода или катода. Обычно плазмой

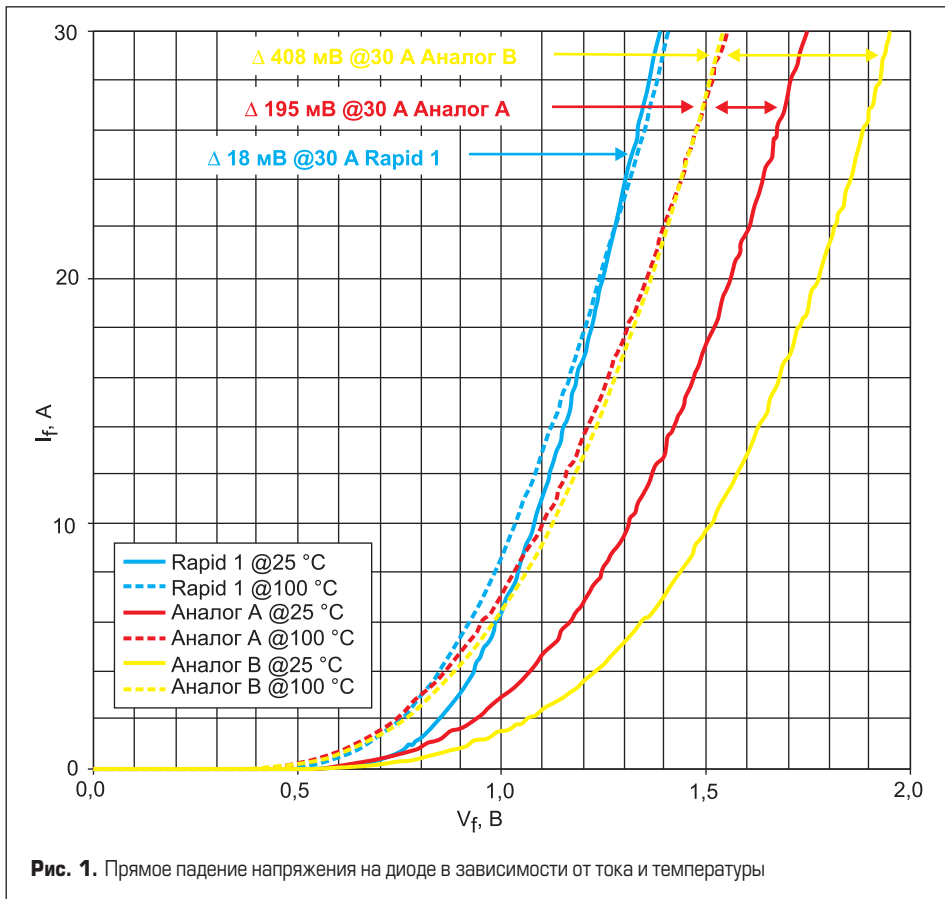


Рис. 1. Прямое падение напряжения на диоде в зависимости от тока и температуры

управляют, снижая время жизни амбиполяризованных носителей. Недостаток этого способа — сильная зависимость от температуры (более высокая концентрация плазмы при повышенной температуре приводит к отрицательному температурному коэффициенту для V_f и сильному возрастанию потерь при высокой температуре) и возникновение дополнительных уровней генерации в запрещенной зоне, из-за чего при высоких температурах резко возрастает обратный ток утечки.

Семейство Rapid 1 для низкочастотных устройств

Для устройств высокой мощности необходимы мощные силовые полупроводниковые приборы. IGBT обычно используются в качестве силовых ключей, а диоды — в качестве выпрямителей и защитных устройств. Из-за затянутаго спада тока IGBT лучше все-

го подходят для работы на низких частотах. Поэтому системы с высокой выходной мощностью, как правило, работают при низких частотах переключения. Для работы на низких частотах важно, чтобы приборы имели малые потери на проводимость. Семейство Rapid 1, которое имеет низкое значение V_f , подходит для низкочастотных устройств высокой мощности даже при повышенных температурах перехода.

Достижения в технологии производства диодов семейства Rapid 1 на тонких полупроводниковых пластинах обеспечивают стабильную величину V_f при изменении температуры. Были проведены сравнительные испытания диода на 30 А/650 В семейства Rapid 1 и двух аналогичных диодов на 30 А/600 В с низким V_f , которые выпускаются конкурирующими производителями и довольно часто встречаются на азиатском рынке устройств солнечной энергетики. У диода Rapid 1 разница между значениями V_f при температурах перехода $T_j +25$ и $+100$ °C составила 18 мВ. По сравнению с аналогами у данного диода зависимость от температуры величина V_f более стабильна (у аналога А разница составляет 195 мВ,

Таблица 1. Диоды и $E_{on(сwиtсh)}$. Результаты испытаний ($I_D = 30$ А, $T_j = +100$ °C)

Параметры	V_f , В	I_{RRM} , А	Q_{rr} , нКл	$E_{on(сwиtсh)}$, мДж
Rapid 1	1,406	14,99	861,2	1,019
Аналог А	1,550	19,22	712,7	1,016
Аналог В	1,542	22,74	772,3	1,019

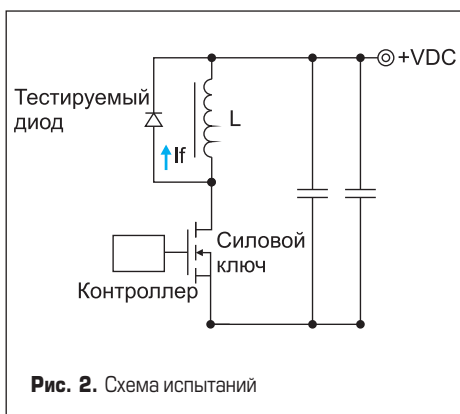


Рис. 2. Схема испытаний

у аналога В — 408 мВ). Кроме того, диод Rapid 1 имеет и более низкое значение прямого падения напряжения V_f (1,406 В), чем у аналогов (1,550 В у аналога А и 1,542 В у аналога В) (рис. 1).

На рис. 2 представлена схема испытаний (a double pulse test fixture), которая используется для определения максимальных I_{rrm} и Q_{rr} , а также позволяет увидеть, как эти параметры влияют на потери, возникающие при отпирании силового ключа $E_{on(сwиtсh)}$ (таблица 1).

Семейство Rapid 2 для корректоров мощности

Существует два режима работы ККМ: режим прерывистых токов (Discontinuous Current Mode, DCM) и режим непрерывных токов (Continuous Current Mode, CCM). В режиме прерывистых токов силовой ключ открывается при нулевом токе дросселя. Поэтому через силовой диод повышающей схемы ток перед отпиранием силового ключа не течет. Следовательно, здесь нет необходимости в диоде с малым временем восстановления. В режиме непрерывных токов через силовой диод повышающей схемы перед отпиранием силового ключа течет прямой ток. Когда силовой ключ отпирается, диод переходит из проводящего в непроводящее состояние. Этот переход (или время обратного восстановления) должен быть максимально быстрым, так как он характеризуется большим током и высоким напряжением, а значит, и большими потерями. Чтобы время обратного восстановления было малым, диод в повышающей схеме должен иметь малый заряд Q_{rr} .

Диод Rapid 2 с малым Q_{rr} снижает потери силового ключа при отпирании E_{ON} . Благодаря мягкой характеристике восстановления также снижаются и электромагнитные помехи, генерируемые во время восстановления силового диода. Чтобы подтвердить это, в качестве испытательной платформы использовалась построенная по повышающей топологии схема ККМ, работающего в режиме непрерывных токов с жесткой коммутацией, выходной мощностью 800 Вт (рис. 3). Входное напряжение испытательной платформы можно было менять в диапазоне 110–220 В·АС. Выходное напряжение V_{OUT} ККМ составляло 400 В·DC. Испытания проводились при температуре окружающей среды $+25$ °C.

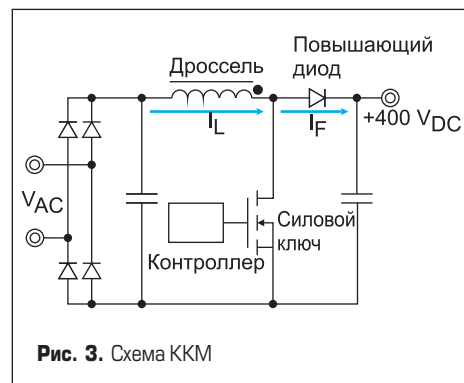


Рис. 3. Схема ККМ

На рис. 4 приведены осциллограммы, позволяющие сравнить время обратного восстановления диода на 8 А/650 В семейства Rapid 2 (силовой диод в повышающей схеме) с временами обратного восстановления некоторых диодов-аналогов (на 8 А/600 В с малым Q_{rr}). Как видно из осциллограмм, через силовой диод течет прямой ток I_F . Через 20 нс по мере отпирания силового ключа часть тока диода начинает течь через этот ключ. Еще через 6 нс весь ток включенного в повышающую цепь диода отводится в силовой ключ. По прошествии 26 нс через диод начинает нарастать обратный ток (ток обратного восстановления) со скоростью di_F/dt (2000 А/мкс); он достигает своего максимального значения I_{RRM} и далее снова спадает до нуля.

Значение I_{RRM} влияет на E_{ON} силового ключа, так как I_{RRM} — это максимальное значение тока на этапе перехода силового ключа из закрытого состояния в открытое. Следовательно, для минимизации E_{ON} силового ключа необходимо, чтобы I_{RRM} был минимален. Более того, время t_{rr} (t_a+t_b) также должно быть как можно меньше, чтобы минимизировать длительность E_{ON} . Следует обеспечить мягкость восстановления повышающего диода, чтобы длительность t_b была больше t_a . Коэффициент мягкости ($S = t_b/t_a$) всегда должен быть больше единицы. В противном случае говорят, что диод характеризуется резким восстановлением. Резкое восстановление может приводить к увеличению мощности, рассеиваемой на диоде за время t_b .

Диоды семейства Rapid 2 характеризуются малыми значениями I_{RRM} и t_a , что обеспечило при измерениях самую низкую величину E_{ON} силового ключа, а поэтому и наибольшую эффективность, и более низкую температуру

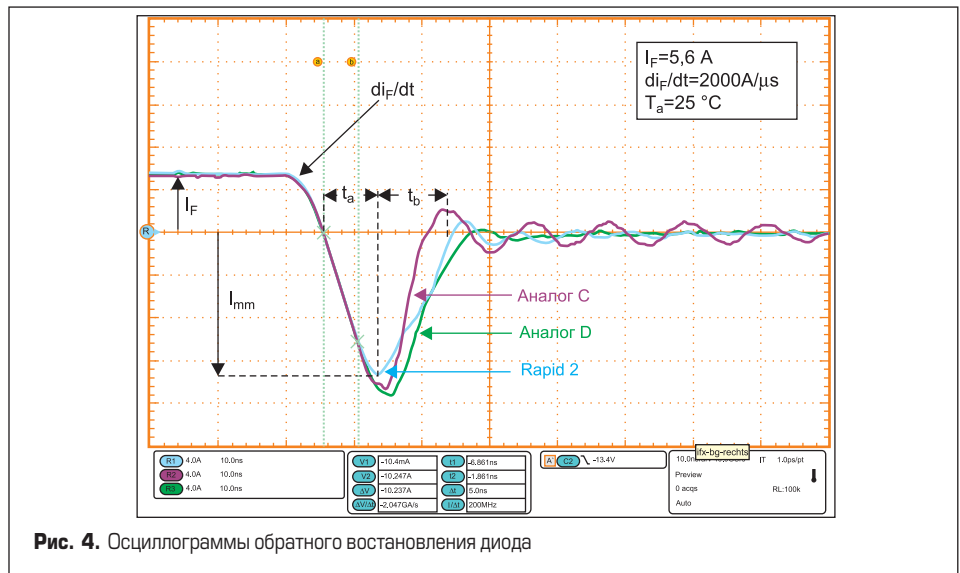


Рис. 4. Осциллограммы обратного восстановления диода

Таблица 2. Обратное восстановление и $E_{on(сwіtсh)}$ — результаты испытаний

	I_{RRM} , А	t_a , нс	t_b , нс	t_{rr} , нс	Q_{rr} , нКл	S	$E_{on(сwіtсh)}$, мкДж
Rapid 2	13,46	7,8	11,2	19,0	127,9	1,4	51,1
Аналог С	14,74	9,0	6,4	15,4	113,5	0,7	55,1
Аналог D	15,38	9,9	12,2	22,1	169,9	1,2	58,5
Способ получения результатов	измерено	измерено	измерено	t_a+t_b	$t_{rr} \times I_{RRM} \times 0,5$	t_b/t_a	измерено

T_j ключа. Кроме того, коэффициент мягкости восстановления S у диодов этого семейства больше, чем у аналогов (табл. 2).

Диоды Rapid 2 характеризуются наилучшим сочетанием низкого значения Q_{rr} и высокого коэффициента мягкости S. Благодаря удачному компромиссу между V_f и Q_{rr} , диод Rapid 2 при сравнении ККМ (при входном напряжении 115 и 230 В·АС, температуре окру-

жающей среды +25 °С, во всем диапазоне нагрузок) обеспечил лучшую эффективность ККМ в диапазоне малых и средних нагрузок. При полной нагрузке эффективность ККМ также поддерживалась на хорошем уровне. Кроме того, диоды Rapid 2 и Rapid 1 с мягким восстановлением более надежны, поскольку рассчитаны на обратное напряжение 650 В·DC, что на 50 В выше, чем у аналогов.