Современные электронные компоненты фирмы Vishay.

Силовые IGBT- и MOSFET-модули

Юрий Петропавловский

23 февраля 2012 г. исполняется 50 лет со дня основания компании Vishay Intertechnology, Inc. (Малверн, Пенсильвания, США, рис. 1). Основатель компании доктор Феликс Зандман (Felix Zandman, 1927–2011 гг., родился в г. Гродно, рис. 2) занимал должность генерального директора компании до 2004 г. Он опубликовал множество научных работ, на его счету более 70 патентов и ряд высоких наград, в том числе орден Почетного легиона Франции [1].

Рис. 1. Штаб-квартира Vishay

Рис. 2. Основатель компании Vishay Феликс Зандман

Деятельность компании началась с разработки и производства тензодатчиков и резисторов различных типов, и к началу 80-х гг. Vishay достигла уровня ведущих производителей этих компонентов. Однако резерв для развития компании только за счет них был практически исчерпан, и начиная с 1983 г. фирма приступила к приобретению ведущих производителей различных электронных компонентов (или их подразделений), среди которых такие известные бренды, как Dale, Sprague, Siliconix, Telefunken, General Semiconductor и др. При этом названия приобретенных брендов не изменялись [2]. Такая политика позволила компании значительно расширить номенклатуру выпускаемых изделий, в том числе и для приложений силовой электроники.

Электронные компоненты Vishay используются практически во всех типах электронных устройств и оборудования, в промышленности, военной, аэрокосмической технике, телекоммуникациях, медицинских приборах, в автомобильном оборудовании, компьютерах и потребительской электронике. Фирма располагает производственными мощностями в Китае, ряде азиатских стран, Европе, Северной и Южной Америке, в Израиле, а также офисами продаж по всему миру. Продукты компании выпускаются под восемнадцатью торговыми марками, названия которых всегда начинаются с Vishay — Vishay Dale, Vishay Semiconductors, Vishay Siliconix и т. д.

К настоящему времени в штате компании более 25 000 сотрудников, ее рыночная стоимость оценивается в $2,2 млрд, генеральный директор Марк Зандман (Mark Zandman, Executive Chairman and Chief Business Development Officer).

В каталоге Vishay 2012 г. представлены продукты в следующих категориях:

- диоды — более 2500 типов;
- микросхемы — аналоговые коммутаторы и мультиплексоры, высоконадежные коммутаторы, микросхемы для источников питания (всего более 240 типов);

- модули — мосты, диоды, IGBT, MOSFET, тиристоры (около 200 типов);
- MOSFET общего назначения, высокой надежности, автомобильные, высокой надежности для военной техники, для медицинского оборудования (всего более 1200 типов);
- оптоэлектронные приборы — оптроны, изоляторы, ИФ-приемники, фотодетекторы, светодиоды, реле, трансиверы, датчики, ЖК, плазменные и светодиодные дисплеи, 7-сегментные индикаторы (более 1200 типов);
- тиристоры — 124 типа;
- конденсаторы электролитические алюминиевые, керамические, пленочные, для силовой электроники, танталовые (около 1000 типов);
- индуктивности — дроссели и трансформаторы (180 типов);
- резисторы — более 550 типов;
- датчики угловых и линейных перемещений, бесконтактные, температурные и влажности (125 типов);
- другие компоненты — чип-антенны, соединители, резонаторы, предохранители, генераторы, тонкопленочные светодиоды [3].

Компания выпускает широкую номенклатуру компонентов для силовой электроники, на рис. 3 показаны устройства для применения в силовых агрегатах ветрогенераторов, интеллектуальных энергосистемах и других промышленных приложениях. Предлагаются электролитические конденсаторы с выводами для монтажа в отверстия и с винтовыми терминалами; тиристорные и IGBT-модули; высоковольтные дисковые конденсаторы; чопперные и разрядные резисторы; закорачивающие резисторы; мощные конденсаторы. Компоненты отличаются высокой надежностью, длительным сроком службы, высокой плотностью мощности, соответствуют общепринятым нормам безопасности, могут выполняться по индивидуальным заказам.

Силовые компоненты для инверторов солнечных батарей показаны на рис. 4, для этих приложений предлагаются электролитические конденсаторы для монтажа в отверстия; пленочные конденсаторы для снабберов, буферов, схем подавления электромагнитных излучений; мощные шунтирующие диоды Шоттки; оптроны и полупроводниковые реле; инверторные модули.

Электронные компоненты для гибридных и электромобилей показаны на рис. 5, в их число входят: выпрямители на диодах Шоттки TMBS; драйверы для IGBT/MOSFET-модулей; MOSFET и модули PowerPAK; IGBT/MOSFET-модули; модули пленочных конденсаторов; шунтирующие резисторы Power Metal Strip; мощные индукторы IHLP. Все компоненты отличаются высоким быстродействием, отличными тепловыми характеристиками, могут выполняться с учетом требований заказчиков.

Компания выпускает также электронные компоненты для интеллектуальных энергетических систем и счетчиков электроэнергии с дистанционным съемом данных.

Рис. 3. Компоненты для силовой электроники

Рис. 4. Компоненты для солнечных электрогенераторов

Рис. 5. Компоненты для автомобильного оборудования

Таблица 1. Классификационные параметры IGBT-модулей

Тип прибора	V_{ces}, В	I_c, А	T_c, °С	V_{ceon}, В	T_j, °С	E_{on}, мДж	E_{off}, мДж	Скорость (не более), кГц	Корпус	Структура
GA200HS60S1PbF	600	200	116	1,13	150	34	104	1	INT-A-PAK	Полумост без диодов
GA200SA60SP	600	200	97	1,33	150	–	–	5	SOT227	Одиночный ключ без диодов
GA200TS60UPbF	600	200	67	1,74	150	2,2	6,6	8	INT-A-PAK	Полумост
GA300TD60S	600	376	80	1,24	150	23	133	1	DIAP LOW PROFILE	Полумост
GA400TD60S	600	525	80	1,24	150	21	163	1	DIAP LOW PROFILE	Полумост
GB200TS60NPbF	600	142	80	2,6	150	3,65	6,9	8	INT-A-PAK	Полумост с резисторами затворов
GT100DA120U	1200	174	80	1,73	150	6,1	9,8	4	SOT227	Одиночный ключ с диодами
GT100DA60U	600	137	80	1,72	175	0,41	2,83	4	SOT227	Одиночный ключ с диодами

Рассмотрим особенности силовых IGBT- и MOSFET-модулей фирмы из каталога 2012 г. [4, 5]. В состав этой категории изделий входят 45 типов модулей IGBT и пять типов модулей MOSFET.

IGBT-модули

Классификационные параметры IGBT-модулей [4] с допустимым током коллектора более 130 А приведены в таблице 1, максимальные токи коллекторов $I_к$ модулей допустимы при температурах корпусов, приведенных в графе T_c. Внешний вид модулей в корпусе INT-A-PAK показан на рис. 6, в корпусе SOT227 — на рис. 7, в корпусе DIAL LOW PROFILE — на рис. 8.

Рис. 6. Внешний вид корпуса INT-A-PAK

Рис. 7. Внешний вид корпуса SOT227

Рис. 8. Внешний вид корпуса DIAL LOW PROFILE

GA200HS60S1PbF (Datasheet 2010 г.) — полумост, выполненный на IGBT 4-го поколения в бессвинцовом исполнении (рис. 9). Особенности и преимущества прибора (Feature/Benefits):

- параметры модуля оптимизированы для работы в режиме жесткого переключения с частотами от постоянного тока до 1 кГц;
- очень малые потери проводимости;
- стандартный промышленный корпус;
- сертификация безопасности по стандартам UL (Underwriters Laboratory), approved file E78996;
- удовлетворяет требованиям директивы RoHS 2002/95/EC;

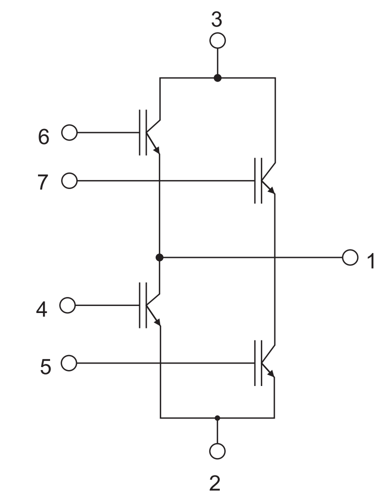

Рис. 9. Структура модуля GA200HS60SPbF

Рис. 10. Зависимость I_c модуля GA200HS60SPbF от температуры корпуса

- пригоден для применения в промышленности;
- увеличенная эксплуатационная эффективность;
- непосредственный монтаж на теплоотвод;
- параметры оптимизированы для работы в инверторах TIG сварочных аппаратов (TIG Welding — сварка ВИА, сварка вольфрамовым электродом в среде инертного газа).

Модуль имеет большой запас по току коллектора I_c, зависимость максимального тока коллектора от температуры корпуса модуля приведена на рис. 10. Видно, что при температуре корпуса +80 °С (что вполне достижимо) модуль обеспечивает $I_c \approx 330$ А (при $T_c = +25$ °С нормированное значение $I_c = 480$ А). Зависимость энергии потерь включения/выключения модуля (E_{on}/E_{off}) с антипараллельными диодами типа 30EPH06 от тока коллектора приведена на рис. 11 (при $T_j = +125$ °С, $V_{ces} = 480$ В, $V_{ge} = 15$ В, $R_g = 10$ Ом). На рис. 12 показаны зависимости напряжения V_{ces} модуля от тока коллектора I_c при температурах кристаллов +25 и +125 °С (при длительности импульсов 0,5 мс). Другие параметры модуля (кроме приведенных в таблице 1):

- максимальная мощность рассеяния при $T_c = +85$ °С — 430 Вт;
- общий заряд затвора IGBT — 1600 нК (при $I_c = 200$ А, $V_{cc} = 400$ В; $U_{ge} = 15$ В);
- общие потери переключения при $T_j = +125$ °С — 138 мДж (антипараллельный диод 30EPH06, $I_c = 200$ А, $V_{cc} = 480$ В, $U_{ge} = 15$ В, $R_g = 10$ Ом);

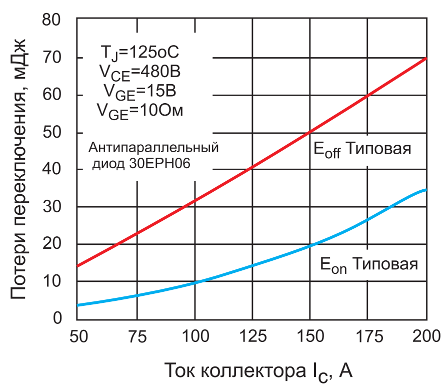

Рис. 11. Зависимости потерь переключения модуля GA200HS60PbF от тока коллектора

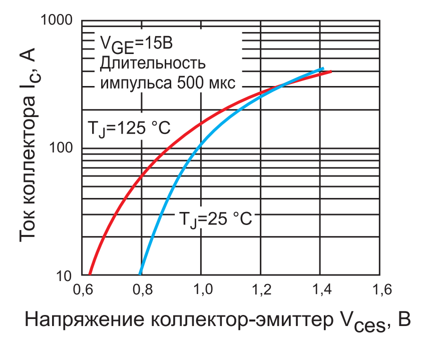

Рис. 12. Зависимости напряжения V_{ces} модуля GA200HS60SPbF от тока коллектора

- входная емкость — 32 500 пФ, выходная емкость — 2080 пФ, обратная проходная емкость (Reverse transfer capacitance) — 380 пФ;
- диапазон рабочих температур кристаллов –40…+150 °C;
- тепловые сопротивления: кристалл/корпус R_{thcs} — не более 0,15 °C/Вт, корпус/теплоотвод R_{thcs} — 0,1 °C/Вт.

GA400TD60S (2011 г.) — полумост, выполненный на IGBT 4-го поколения с интегрированными антипараллельными диодами (рис. 13). Особенности и преимущества модуля (только отличия от вышерассмотренного):

- низкое V_{ceon};
- квадратная характеристика безопасной работы (RBSOA);
- антипараллельные диоды HEXFRED с очень мягкой характеристикой обратного восстановления;
- подложка DBC (Direct-Copper-Bonded) из Al_2O_3;
- очень низкое тепловое сопротивление кристаллы/корпус.

Рассматриваемый модуль также имеет запас по току коллектора, зависимость максимального постоянного тока коллектора модуля от температуры корпуса приведена на рис. 14, при T_c = +80 °C ток $I_c \approx$ 520 А (при T_c = +25 °C нормированное значение I_c = 750 А). Другие параметры модуля (кроме приведенных в таблице 1):

- максимальная мощность рассеяния при T_c = +80 °C — 875 Вт;
- максимальный прямой ток антипараллельных диодов при T_c = +80 °C — 145 А;
- прямое напряжение на антипараллельных диодах — 1,7 В (при I_f = 400 А, T_j = +125 °C);
- общие потери переключения при T_j = +125 °C — 184 мДж (при V_{cc} = 360 В, I_c = 400 А, U_{ge} =15–0 В, R_g = 22 Ом);
- время восстановления обратного сопротивления диодов при T_j = +125 °C — 236 нс (при I_f = 300 А, $dI_{пр}/dt$ = 500 А/мкс, V_{cc} = 400 В);
- тепловое сопротивление: кристалл/корпус R_{thcs} — не более 0,08 °C/Вт (IGBT), не более 0,4 °C/Вт (диоды).

GT100DA120U (2010 г.) — ключевой IGBT с антипараллельным диодом (рис. 15). Особенности и преимущества модуля:

- IGBT выполнены по технологии Trench с положительным температурным коэффициентом;
- квадратная характеристика безопасной работы (рис. 16);
- устойчивость к коротким замыканиям длительностью до 10 мкс;
- антипараллельные диоды HEXFRED со сверхмалым временем восстановления обратного сопротивления;
- полностью изолированный корпус;
- очень малая внутренняя индуктивность (менее 5 нГн);
- промышленное исполнение;
- соответствие требованиям UL approve file E78996 и RoHS 2002/95/EC;
- параметры оптимизированы для работы в источниках бесперебойного питания, импульсных источниках питания, сварочных аппаратах, установках индукционного нагрева;
- легкость параллельного включения модулей;
- непосредственный монтаж на радиаторы;
- частоты переключения 4–30 кГц;
- очень малое сопротивление открытого канала;
- малый уровень электромагнитных излучений.

Менее мощные IGBT-модули (I_c менее 100 А) выпускаются в следующих конфигурациях: полумост, полный мост, четыре инвертора, шесть инверторов, чоппер, ключ.

Рассмотрим особенности и основные параметры модуля GB15XP120KTPbF (2010 г.) из этой группы. Прибор является трехфазным инвертором с интегрированными антипараллельными диодами, выполнен в корпусе MTP и предназначен для электропривода двигателей переменного тока (рис. 17). Основные особенности и преимущества прибора:

- применение NPT IGBT пятого поколения на напряжение 1200 В;
- антипараллельные диоды HEXFRED со сверхмалым временем восстановления обратного сопротивления;
- очень малая перекрестная проводимость и потери переключения;
- интегрированный терморезистор с отрицательным ТКС (опция);
- подложка DBC из оксида алюминия;
- конструкция с минимальными индуктивностями для обеспечения высокого быстродействия;
- устойчивость к коротким замыканиям длительностью до 10 мкс;
- квадратная характеристика безопасной работы;
- рабочий диапазон частот переключения 8–60 кГц;
- промышленное исполнение;
- параметры модуля оптимизированы для работы в электроприводе двигателей;
- малый уровень электромагнитных излучений;
- непосредственный монтаж на радиатор;

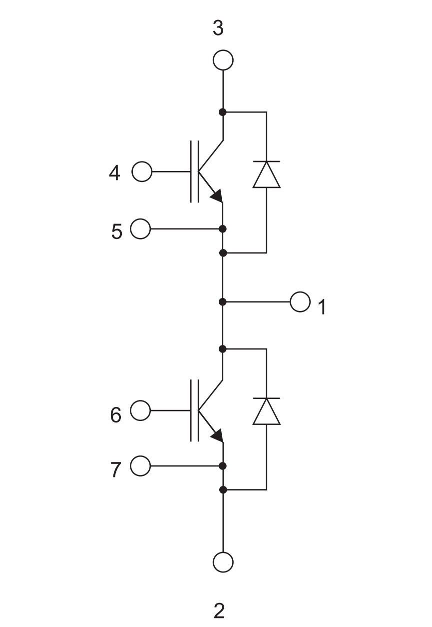

Рис. 13. Структура модуля GA400TD60S

Рис. 14. Зависимость максимального тока коллектора модуля GA400TD60S от температуры корпуса

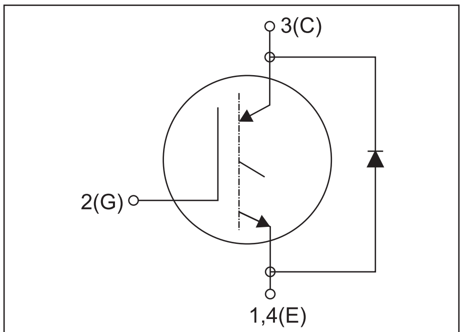

Рис. 15. Структура модуля GT100DA120U

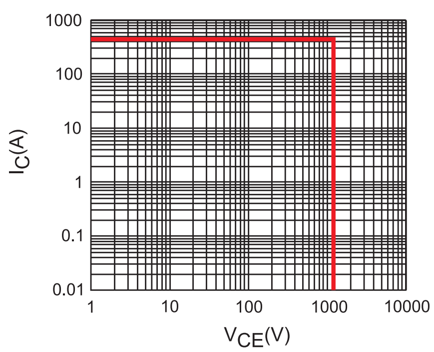

Рис. 16. Характеристика безопасной работы модуля GT100DA120U

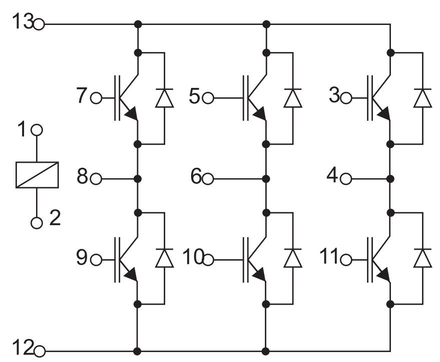

Рис. 17. Структура модуля GB15XP120KTPbF

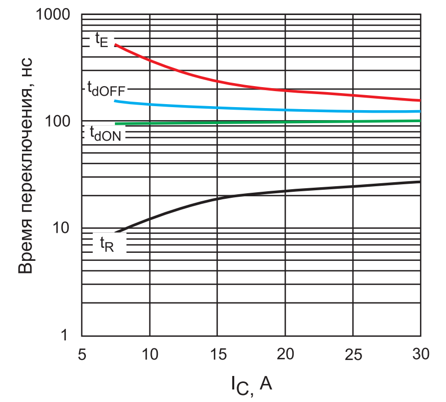

Рис. 18. Характеристики переключения модуля GB15XP120KTPbF

- терминалы для пайки в отверстия печатных плат;
- очень низкое тепловое сопротивление кристаллы/корпус.

Токи коллекторов IGBT-модуля I_c = 15 А и прямой ток антипараллельных диодов I_f = 15 А нормированы при температуре корпуса +100 °С (при T = +25 °С $I_к$ = 30 А, $I_{пр}$ = 30 А), импульсный ток коллектора 60 А, мощность рассеяния 75 Вт (при T = +100 °С). Некоторые другие параметры модуля:

- напряжение V_{ceon} — 2,94 В (при T_j = +125 °С, I_c = 15 А);
- прямое напряжение на диодах — 2,27 В (при T_j = +125 °С, I_f = 15 А);
- общий заряд затвора IGBT — 98 нК (при $I_к$ = 15 А, V_{cc} = 600 В, U_{ge} = 15 В);
- входная емкость — 1302 пФ, выходная емкость — 717 пФ, обратная проходная емкость — 38 пФ;
- параметры терморезистора: R_0 = 30 кОм, β = 4000 (+25/+85 °С).

Характеристики переключения модуля показаны на рис. 18.

MOSFET-модули

Классификационные параметры всех MOSFET-модулей фирмы из каталога 2012 г. [5] приведены в таблице 2.

Таблица 2. Классификационные параметры MOSFET-модулей фирмы из каталога 2012 г.

Тип прибора	V_{dss}, В	I_d, А	T_c, °С	$R_{ds\ on}$, Ом	T_j, °С	E_{AS}, мДж	I_{AR}, А	Корпус	Структура
19MT050XFAPbF	500	19	100	0,21	150	493	31	MTP	Полный мост
FA38SA50LCP	500	24	100	0,13	150	580	38	SOT-227	Ключ
FA57SA50LCP	500	36	100	0,08	150	725	57	SOT-227	Ключ
FC40SA50FKP	500	26	100	0,084	150	1240	40	SOT-227	Ключ
VS-FB190SA10	100	130	100	0,0065	150	700	180	SOT-227	Ключ

Примечание: I_{AR} — лавинный ток (Avalanche current), E_{AR} — повторяющаяся лавинная энергия (Repetitive avalanche energy).

Окончательным тестом для полевых транзисторов с изолированным затвором обычно является испытание на индуктивную нагрузку без фиксирования уровня. Это позволяет определить стойкость прибора и его способность поглощать энергию при лавинном пробое. Устойчивость к пробою может использоваться многократно, в справочных данных МОП-транзисторов приводятся значения максимальной энергии на импульс E_{AR} и максимальный ток пробоя, разрешаемых при повторяющихся условиях возникновения лавинного процесса. Это означает, что из схем можно удалить компоненты фиксации уровня напряжения и упростить их, то есть в определенных условиях возникновение лавинного пробоя не отражается на надежности МОП-транзисторов.

Рис. 19. Внешний вид корпуса MTP

MOSFET-модули компании выпускаются в корпусах двух типов — MTP (рис. 19) и SOT227 (рис. 7). Все приборы в корпусах SOT227 представляют собой отдельные транзисторы с защитными диодами, а в категорию модулей они отнесены по конструктивным характеристикам.

19MT050XFAPbF (2010 г.) — полный мост на мощных полевых транзисторах типа FREDFET MTP с обратными диодами (рис. 20). Основные особенности и преимущества прибора:

- низкое сопротивление R_{dson};
- высокоэффективная работа модуля оптимизирована за счет использования защитных диодов с быстрым восстановлением обратного сопротивления;
- возможности прибора полностью характеризуются величиной емкости нагрузки и значениями лавинных токов и напряжений;
- подложка DBC из Al_2O_3;
- минимальные паразитные индуктивности для обеспечения высокого быстродействия;
- малый заряд затвора позволяет использовать простые драйверы для раскачки;
- усовершенствованный затвор, отсутствие выбросов, вызванных лавинным пробоем и большой скоростью нарастания напряжения dV/dt;
- малое время t_{rr} диода с мягким восстановлением обратного сопротивления;
- параметры оптимизированы для работы в сварочных аппаратах, импульсных и бесперебойных источниках питания;
- возможность работы с переключением при нулевом напряжении (ZVS/ПНН) и на высоких частотах;
- непосредственный монтаж на радиатор;
- выводы для монтажа в отверстия печатных плат;
- очень низкое тепловое сопротивление кристаллы/корпус.

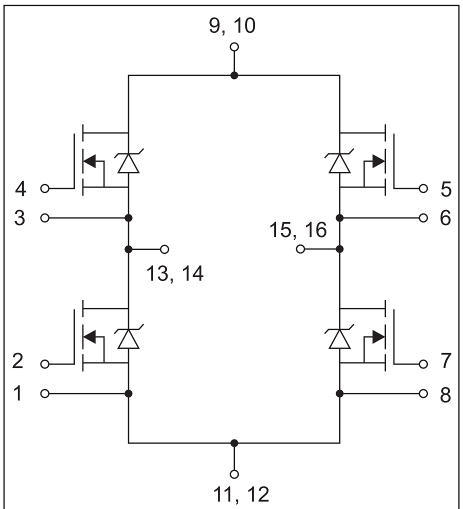

Рис. 20. Структура модуля 19MT050XFAPbF

Максимально допустимый ток стоков MOSFET-модуля нормирован при температуре корпуса +100 °С, при снижении температуры корпуса допустимый I_d может быть увеличен, например при +T_c = 50 °С допустимый I_d = 28 А. Другие параметры модуля:

- максимальная мощность рассеяния — 456 Вт (при T_c = +100 °С);
- рабочий диапазон температур кристаллов –55…+150 °С;
- общий заряд затвора 105 нК (при I_c = 31 А, V_{ds} = 400 В, V_{gs} = 10 В);
- динамические характеристики: $t_{d(on)}/t_{d(off)}$ — 49 нс/80 нс, t_r/t_f — 165/76 нс (при I_d = 31 А, V_{ds} = 250 В, V_{gs} = 10 В, R_g = 4,3 Ом);
- прямое напряжение на защитном диоде — 1,01 В (при T_j = +125 °С, dI/dt = 100 А/мкс, I_f = 31 А);
- время восстановления обратного сопротивления t_{rr} — 252 нс.

VS-FB190SA10 (2011 г.) — мощный MOSFET третьего поколения. Он является прибором с комбинацией оптимальных параметров: высокого быстродействия, отсутствия выбросов, очень малого сопротивления открытого канала и доступной цены. Особенности модуля:

- полностью изолированный корпус;
- легкость параллельного соединения;
- очень низкое сопротивление канала $R_{ds(on)}$;
- нормирование по скорости нарастания напряжения dV/dt;
- нормирование по параметрам лавинного пробоя;
- возможность применения простых схем драйверов;
- малый заряд затвора;
- малая емкость сток/корпус;
- малые внутренние паразитные индуктивности;
- соответствие требованиям UL, RoHS;
- промышленное исполнение.

Структура и эскиз конструкции модуля приведены на рис. 21, максимальный ток стока прибора нормирован при температуре

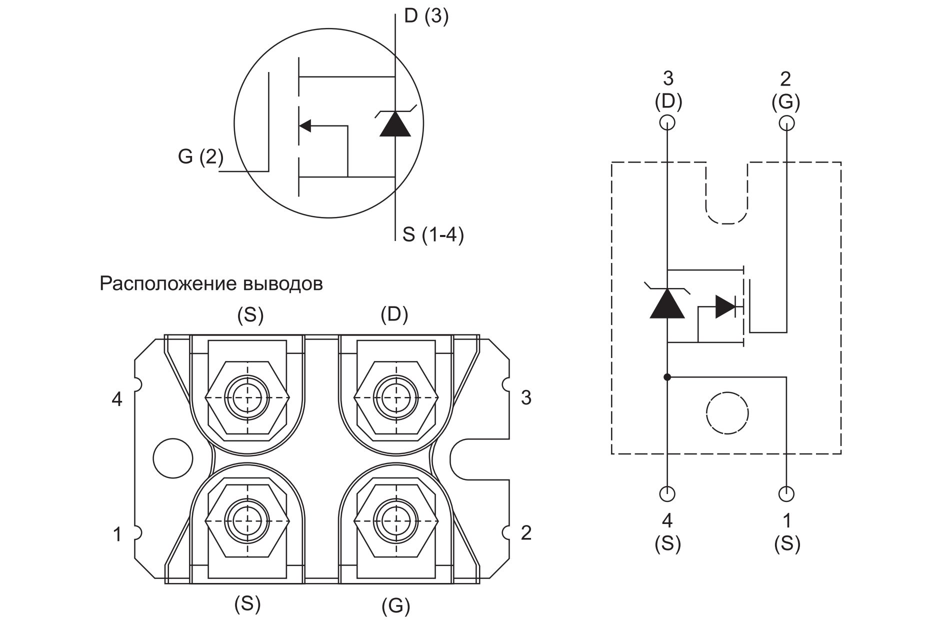

Рис. 21. Структура и конструкция модуля VS-FB190SA10

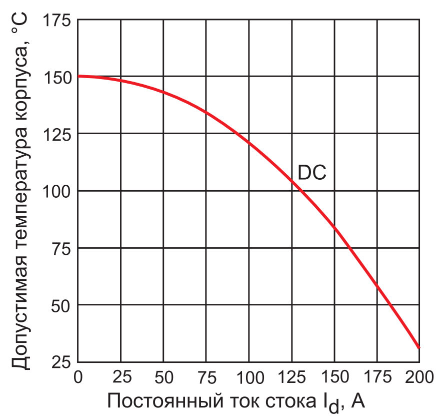

Рис. 22. Зависимость максимального тока стока модуля VS-FB190SA10 от температуры корпуса

корпуса +100 °C, при снижении температуры допустимый ток стока может быть увеличен. На рис. 22 показана зависимость максимально допустимого тока стока модуля от температуры кристалла. Основные параметры прибора:

- мощность рассеяния — 568 Вт (T_c = +25 °C);
- диапазон рабочих температур кристалла — –55…+150 °C;
- тепловое сопротивление кристалл–корпус — не более 0,22 °C/Вт, корпус–теплоотвод — 0,05 °C/Вт;
- общий заряд затвора — 250 нК (при I_c = 180 А, V_{ds} = 80 В, V_{gs} = 10 В);
- динамические характеристики: $t_{d(on)}/t_{d(off)}$ — 45/181 нс, t_r/t_f — 351/335 (при V_{dd} = 50 В, I_d = 180 А, внутреннее R_g = 2 Ом).

Литература

1. http://www.eetimes.com/electronics-news/4216649/Felix-Zandman-Vishay
2. http://www.fundinguniverse.com/company-histories/Vishay-Intertechnology-Inc-Company-History.html
3. http://www.vishay.com/products/
4. http://www.vishay.com/modules/igbt-modules/
5. http://www.vishay.com/modules/mosfet-modules/