

Партнерство заради надійного постачання промислових силових модулів

Пол Дрексхейдж (Paul Drexhage), менеджер з технічного маркетингу, Semikron Danfoss
Адаптований переклад українською та технічне редагування:
Володимир Павловський, к.т.н, с.н.с., Інститут електродинаміки НАН України

Користувачі потужних напівпровідників в останні роки почали потерпати від проблем через нестабільне постачання компонентів. Тому пошук альтернативних постачальників завжди є важливим моментом при розробці силових перетворювачів. Компанія Semikron Danfoss, як найбільший незалежний виробник силових модулів, має унікальні можливості для вирішення цієї проблеми. Разом зі своїм давнім партнером компанією ROHM Semiconductor вона додає до своєї лінійки модулів малої потужності новий повністю сумісний модуль 1200 В IGBT. Це допоможе зменшити дефіцит силових модулів і зробити ланцюг постачання таких модулів більш стабільним та надійним.

Невпинне зростання технологій у галузі електроенергетики створило безпрецедентний попит на силові модулі. Але часто саме процедура постачання модуля обмежує його доступність. Незважаючи на поточні інвестиції виробників чипів у виробничі потужності ситуація з постачанням модулів залишається напруженою. На цьому тлі компанія ROHM представила новий модуль 1200-В RGA IGBT як альтернативу модулям IGBT останнього, 7-го покоління, для застосування в промисловості. Впродовж багатьох років компанія ROHM є надійним партнером компанії Semikron Danfoss з постачання карбідкремнієвих приладів. Зараз ROHM розширює свої пропозиції для компанії Semikron Danfoss щодо кремнієвих кристалів, позиціонуючи себе як сучасну альтернативу традиційним постачальникам чипів.

RGA — це нещодавно розроблені IGBT з канавковою структурою затвора (trench gate structure) та максимально допустимою температурою $p-n$ -переходу — $T_{j,max} = 175$ °C. Характеристики провідності, комутаційні показники та теплові характеристики транзисторів оптимізовані для застосування промислових електроприводів у діапазоні низької та середньої потужності. У той же час RGA має бути сумісним з існуючими IGBT, забезпечуючи можливість легкої заміни транзисторів. Дана стаття ілюструє це за допомогою порівняння основних характеристик, які отримані в результаті тестування двох модулів ідентичних за рештою параметрів. Модуль IGBT 1200-В RGA був протестований в корпусі MiniSKiIP без базової пластини. В якості еталону для по-

рівняння використовували модуль SKiIP24AC12T7V1 7-го покоління ($I_{Cnom} = 35$ А). В обох модулях схеми вимірювання параметрів були ідентичні та використовували зворотний діод Semikron Danfoss CAL4F.

СТАТИЧНИЙ РЕЖИМ

Сучасний дизайн RGA з канавковою структурою затвора та тип носіїв вибрані так, щоб забезпечити мале падіння напруги на транзисторі у відкритому стані. Як у всіх сучасних кремнієвих IGBT, RGA має позитивний температурний коефіцієнт (PTC) для прямого падіння напруги на верхній межі діапазону робочого струму. Хоча крутизна цієї характеристики PTC у RGA більша, ніж у IGBT 7-го покоління, трохи збільшене пряме падіння напруги за високих температур частково компенсоване меншим падінням цієї напруги за кімнатної температури (рис. 1).

З рисунку 1 видно, що прямі падіння напруги для обох IGBT майже однакові при номінальному струмі, причому модуль RGA має розкид цієї напруги $\pm 4\%$ відносно пристрою 7-го покоління в заданому діапазоні температур. Загалом, як і IGBT 7-го покоління, модуль RGA демонструє набагато нижче пряме падіння напруги, ніж попередні покоління модулів.

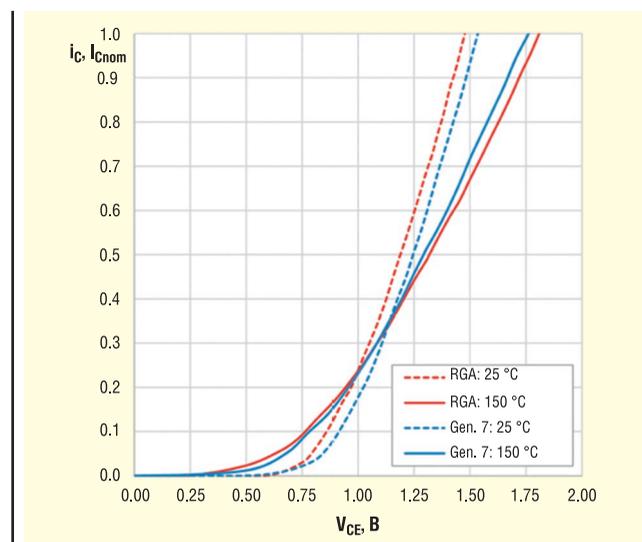


Рис. 1. Залежності прямого падіння напруги (chip level), приведені до номінального струму

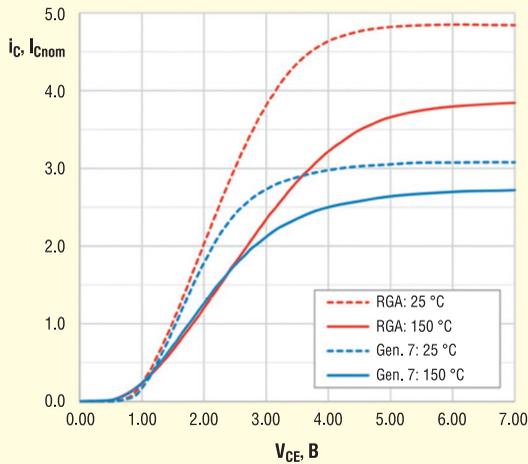


Рис. 2. Залежності прямого падіння напруги (chip level) для високого струму, приведені до номінального струму

Поведінка модуля RGA IGBT при протіканні великого струму відрізняється від модуля IGBT 7-го покоління. Як показано на рисунку 2, модуль RGA IGBT виходить з насичення при більшому струмі. Це дозволяє краще справлятися зі сплесками струмів, які виникають в умовах експлуатації з частими перевантаженнями, наприклад в електроприводах. Навіть при температурі чипа 150 °C модуль RGA може витримувати пікові струми, що в три рази перевищують номінальний. Це потенційно дозволяє використовувати модулі з номінальним піковим повторюваним струмом $I_{CRM} = 3 \times I_{Cnom}$, що підходить для умов експлуатації з очікуваними періодичними перевантаженнями.

Підвищена здатність до перевантаження силових вузлів з модулями RGA IGBT дозволяє експлуатацію при таких же високих температурах, як і з модулями IGBT 7-го покоління: допускається періодична робота при максимальній температурі чипа до 175 °C. Більш детально дозволений температурний профіль наведений в розділі 2.3 [1]. Для режиму безперервної роботи силових вузлів, оснащених модулями RGA IGBT, слід дотримуватися тих самих рекомендацій, що й для існуючих модулів: запас 25 K від максимально дозвільної температури p-n-переходу (тобто $T_{j,op} = 150$ °C).

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАТВОРА

У модулях IGBT 7-го покоління застосовують канавкову структуру затвора з метою отримати мінімально можливий крок комірки IGBT і високу електропровідність (тобто низьке падіння напруги). Однак недоліком такої структури є те, що вона має значно вищу ємність затвора порівняно, наприклад, з модулями IGBT 4-го покоління. Висока ємність затвора спричиняє під вищени вимоги до вихідної потужності схеми драйвера при перемиканні. Загальноприйнята канавкова структура затвора, яка використовується в модулях RGA IGBT, успішно пройшла тривалу перевірку і дозволяє на 18% зменшити заряд затвора порівняно з еквівалентним модулем IGBT 7-го покоління. У той же час порогова напруга затвора, $V_{GE(th)}$ залишається подібною (наприклад, 6.0 В) до інших сучасних IGBT, забезпечуючи оптимальний баланс між стійкістю до несанкціонованого переходу модуля у відкритий стан та простотою керування. Рекомендована напруга ке-

руванням затвором така ж, як і для більшості IGBT модулів, а випробування модулів проводилися з напругами $V_{G,on} = 15$ В і $V_{G,off} = -8$ В.

ПОВЕДІНКА МОДУЛІВ ПРИ ПЕРЕМИКАННЯХ

Новіші покоління IGBT, як правило, демонструють вищі рівні dv/dt (наприклад, понад 7 кВ/мкс) через зменшені комутаційні втрати за рахунок збільшення швидкості процесів відкриття і закриття. Те ж можна сказати і про модулі RGA, але як і для IGBT 7-го покоління, швидкості наростання dv/dt та di/dt на етапі відкриття транзистора можна змінювати шляхом зміни опорного резистора у колі затвора. Так можна досягти рівнів dv/dt , прийнятних для роботи електроприводу (наприклад, <5 кВ/мкс), особливо на значних струмах. Загалом потрібно збільшувати значення R_{Gon} , щоб модуль RGA відповідав таким значенням dv/dt та di/dt , які є типовими для модулів 7-го покоління (рис. 3).

Збільшення швидкості перемикання та роль резистора у колі затвора видно при дослідженні процесу відкриття модуля RGA і модуля IGBT 7-го покоління за тих же умов і з однаковими резисторами у колі затвора ($R_{Gon} = 8.2$ Ом, рис. 4). У такій ситуації піковий струм у модулі RGA приблизно на 22% вищий, ніж у модулі 7-го покоління. Однак велика

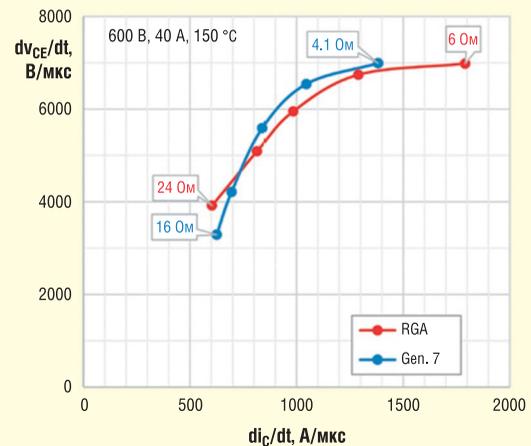


Рис. 3. Швидкості наростання dv/dt та di/dt на етапі відкриття транзистора в залежності від R_{Gon}

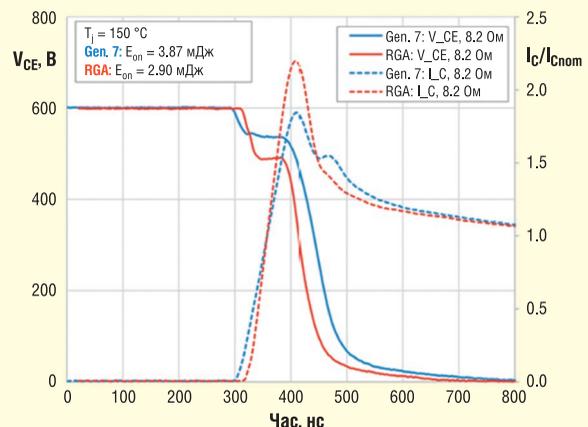


Рис. 4. Напруга на транзисторі та струм через транзистор в процесі відкриття; $R_{Gon} = const$, осцилограма струму відцентрована відносно I_{Cnom}

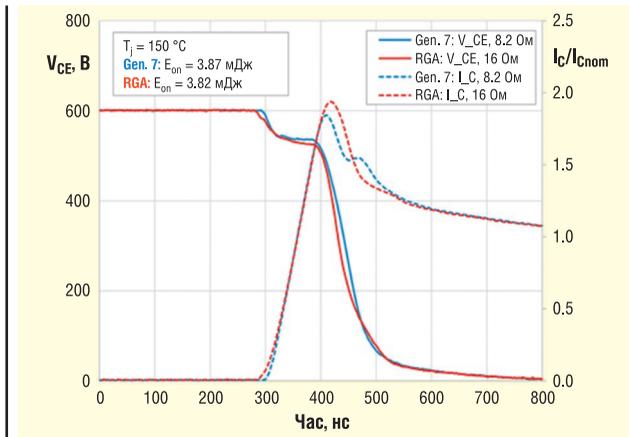


Рис. 5. Осцилограми напруги та струму на етапі відкриття для різних значень R_{Gon} , осцилограми струму відцентровані відносно $I_{Cном}$

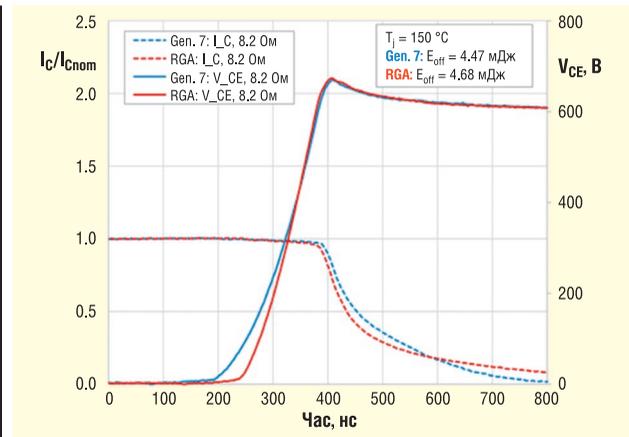


Рис. 6. Осцилограми напруги та струму на етапі закривання для $R_{Gon} = const$, осцилограми струму відцентровані відносно $I_{Cном}$

швидкість di/dt у поєднанні зі швидким падінням напруги колектор-емітер означають, що добуток струму і напруги та підсумкові втрати при перемиканні є меншими.

Якщо висока швидкість dv/dt є прийнятною (наприклад, у високошвидкісних сервоприводах), то при використанні модулів RGA IGBT можна досягти 25% зниження втрат енергії на етапі відкриття транзистора.

І навпаки, якщо потрібно, щоб швидкість перемикання транзисторів була подібною до IGBT 7-го покоління, то подвоєння опорного резистора у колі затвора дозволяє одержати цей результат. Рисунок 5 демонструє, що плавні, майже з повним збігом, осцилограми напруги та струму досягаються у разі підвищеного опорного резистора у колі затвора ($R_{Gon} = 16 \text{ Ом}$). Нижча швидкість перемикання збільшує втрати, але для розглянутого вище прикладу значення енергії на етапі відкриття у модулі RGA та у еталонному модулі 7-го покоління майже однакові.

IGBT 7-го покоління, як і більшість сучасних конструкцій IGBT з канавковою структурою затвора, менше реагують на вплив невеликих змін опорного резистора на етапі закривання транзистора. Це також вірно для модулів RGA IGBT, у яких вибір опорного резистора в діапазоні вище $\sim 20 \text{ Ом}$ дозволяє отримати незначні зміни як у швидкості di/dt , dv/dt , так і у значенні енергії на етапі закривання. Порівняння з IGBT 7-го покоління на етапі вимкнення транзистора з використанням того самого опорного резистора 8.2 Ом показує майже ідентичне значення перенапруги, незважаючи на більшу швидкість наростання напруги (рис. 6). Модуль RGA IGBT демонструє монотонно спадний, але довгий «хвіст» струму, що збільшує добуток напруга-струм. Однак цей ефект частково компенсується більшою швидкістю dv/dt . Кінцевий результат полягає в тому, що в модулі RGA енергія на етапі закривання лише на 5% вища, ніж у еталонному пристрої 7-го покоління.

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МОДУЛІВ ЗА ОДНАКОВИХ УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Сумарний ефект від втрат на провідність і на комутацію, а також тепловий режим модуля найкраще виявляється шляхом розрахунку підсумкової температури $p-n$ -переходу для заданих умов експлуатації модуля. Як приклад розглянуто трифазний 2-рівневий інвертор напруги з модулем MiniSKIIP

в sixpack топології; параметри застосування наведені в таблиці 1. Для порівняння обрано два модулі з номінальним струмом 35 А . Цей тип модуля підійде для організації електроживлення електродвигуна з потужністю в діапазоні $5.5\text{--}11 \text{ кВт}$, залежно від заданого рівня перевантаження.

Таблиця 1. Параметри застосування для прикладу теплового розрахунку

Параметри	Значення
Напруга пост. струму, V_{DC}	650 В
Лінійна напруга, V_{out}	400 В
Коеф. потужності, $\cos(\phi)$	0.85
Частота основної гармоніки, f_{out}	50 Гц
Вихідний струм, I_{out}	25.9 А (Вих. потужність 15.3 кВт)
Частота ШИМ, f_{sw}	Змінна
ШИМ	Синус-трикутник
Температура $p-n$ переходу, T_j	Змінна
Тепловий опір «тепловідвід-повітря», $R_{th(b-a)}$	0.1 К/Вт
Темп. навколишн. середовища, T_a	450 °C
Тепловий опір «кристал-тепловід», $R_{th(j-c)}$	0.80 К/Вт (RGA)
R_{Gon}	0.93 К/Вт (7 покоління)
	16.4 Ом (RGA)
R_{Goff}	8.2 Ом (7 покоління)
	13.7 Ом (RGA)
	8.2 Ом (7 покоління)

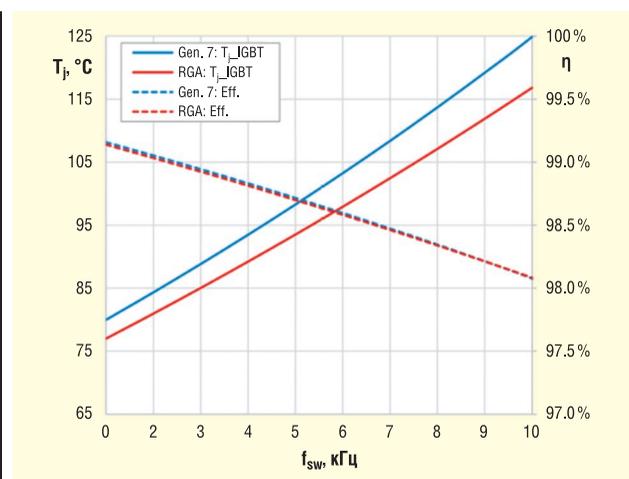


Рис. 7. Розрахована температура переходу та коефіцієнт потужності для фіксованого вихідного струму

Для проведення порівняльних розрахунків використано п'яту версію стандартної програми розрахунку SemiSel від Semikron Danfoss. Один модуль MiniSKiiP змонтовано на гіпотетичному радіаторі з використанням високоефективної термопасти (HPTP) та примусовим охолодженням повітрям з температурою 45 °С. Температуру *p-n*-переходу розраховують для ситуації, коли схема інвертора має параметри та працює в режимах, які наведені у таблиці 1. У відповідності до приведеного раніше, для кола затвора RGA IGBT вибрано резистор з підвищеним опором, щоб забезпечити таку ж швидкість dv/dt на етапі відкриття, як у IGBT 7-го покоління. Далі вибирають струм, який забезпечує температуру *p-n* переходу 125 °С для найвищої обраної частоти перемикання. Ця температура визначає обмеження типової тривалості безперервної роботи для класифікації модулів у системах електроприводів через негативний вплив циклічних режимів роботи на строк служби модулів. Підсумкова температура *p-n*-переходу та коефіцієнт потужності в залежності від частоти зображені на рисунку 7.

За тих самих умов експлуатації розрахована температура *p-n*-переходу IGBT RGA в середньому на 6 К нижча, ніж у IGBT 7-го покоління (суцільні лінії на рисунку 7). Це є результатом оптимізації розміру чипа у модулі RGA IGBT, що призводить до зниження теплового опору від *p-n* переходу до радіатора на 14%. Нижча температура *p-n*-переходу дає меншу термомеханічну напругу в силовому модулі і зменшує негативний вплив термоциклічних режимів роботи на строк служби модулів. Якщо така температура *p-n*-переходу є прийнятною для RGA IGBT, можна зменшити вимоги до охолодження модуля. Це може бути у формі зменшення вартості радіатора або зниження швидкості вентилятора.

Збільшене падіння прямої напруги у RGA при високих температурах впливає на коефіцієнт потужності на низьких частотах комутації, де домінують втрати провідності. І навпаки, зменшена енергія на увімкнення модуля RGA дає йому перевагу в коефіцієнті потужності на вищих частотах перемикання. Однак у наведеному прикладі застосування коефіцієнти потужності напівпровідників в діапазоні 1...10 кГц для двох чипів по суті однакові (див. пунктирні лінії на рисунку 7).

Крім того, можна скористатись дуже хорошими тепловими характеристиками RGA для того, щоб отримати більший вихідний струм без переходу до модуля з

більшою потужністю. Розрахунок теплового режиму модуля показав, що RGA IGBT здатний віддавати вихідний струм на 2...9% вищий у діапазоні 1...10 кГц, ніж IGBT 7-го покоління, ціною деякого зниження коефіцієнту потужності.

СТІЙКІСТЬ МОДУЛІВ ДО КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ

Загальна тенденція до зменшення розмірів чипів зменшила теплову потужність сучасних IGBT матриць і, отже, стійкість до короткого замикання порівняно зі старими поколіннями IGBT чипів. Модуль 1200-В RGA IGBT відповідає вимогам сучасного стандарту по часу стійкості до імпульсного короткого замикання t_{psc} , що дорівнює 8 мкс при 800 В постійного струму та температурі 150 °С, який також є чинним для IGBT 7-го покоління. Висока швидкість di/dt у модулі IGBT RGA означає, що під час коротких замикань виникають значні сплески струму, амплітуда яких у п'ять разів перевищує номінальний струм $I_{ном}$. Незважаючи на це, процес вимкнення модуля залишається контрольованим, без будь-яких високочастотних коливань.

ВОЛОГОСТІЙКІСТЬ

Уміру того, як використання перетворювачів енергії поширюється на нові застосування по всьому світу, все більше силових напівпровідникових пристроїв, імовірно, будуть піддаватися впливу навколишнього середовища з високою вологістю. Цей факт, в поєднанні з кращим розумінням процесів збоїв у модулях, підштовхнув галузь до проведення більш суворої кваліфікаційних випробувань. Зокрема високовольний, з високою вологістю та високою температурою (HV-H³TRB) тест на зворотне зміщення

став стандартом для вимірювання довготривалої стійкості модулів до вологості. У цьому тесті піддають жорсткій перевірці кінцеву структуру IGBT чипа шляхом подачі на модуль 80% від паспортної напруги блокування (наприклад, 960 В постійного струму) у випробувальній камері при температурі повітря 85 °С і відносній вологості 85%. Модулі оцінюються на основі того, скільки годин (наприклад, 168/504/1000 год.) вони можуть витримувати такі умови експлуатації без перевищення заданого стандарту струму витоку для даної напруги блокування. Тестування, проведене у фірмі Semikron Danfoss, показало, що модулі RGA IGBT витримують 1000 годин і більше, що ставить їх в той самий клас, що й IGBT 7-го покоління.

РЕАЛІЗАЦІЯ МОДУЛІВ

Фірма Semikron Danfoss може запропонувати модулі 1200-В RGA IGBT у всьому діапазоні номінального струму від 10 до 150 А. Такий діапазон струмів у поєднанні зі зручністю застосування чипів RGA означає, що сімейство MiniSKiiP є ідеальним вибором модуля для електроприводів. Модулі MiniSKiiP з пружинним контактом і без базової пластини широко представлені на світовому ринку електроприводів і містять IGBT останнього покоління. Тому для цього продукту важливо мати альтернативне джерело постачання IGBT для диверсифікації ланцюжка поставок. Сімейство корпусів MiniSKiiP однакової висоти (рис. 8) також пропонується на ринку; це робить будь-який альтернативний тип IGBT вигідним варіантом для виробників. Перші модулі MiniSKiiP, обладнані RGA, будуть доступні в sixpack топологіях («AC») і топологіях converter-inverter-brake («NAB»), щоб забезпечити можливість легкої заміни модулів, об-

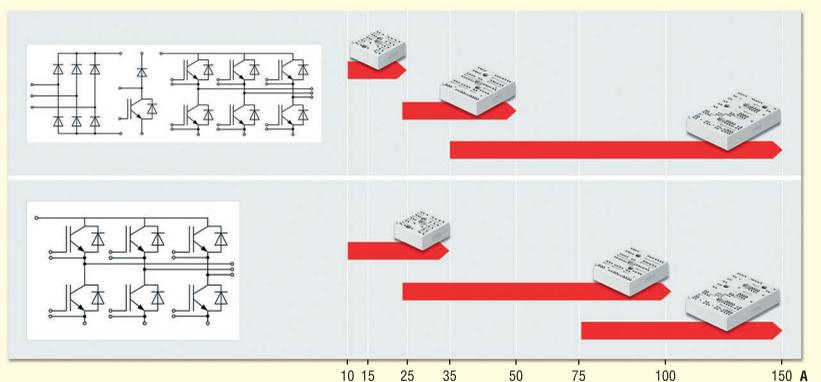


Рис. 8. MiniSKiiP 1/2/3, оснащений RGA

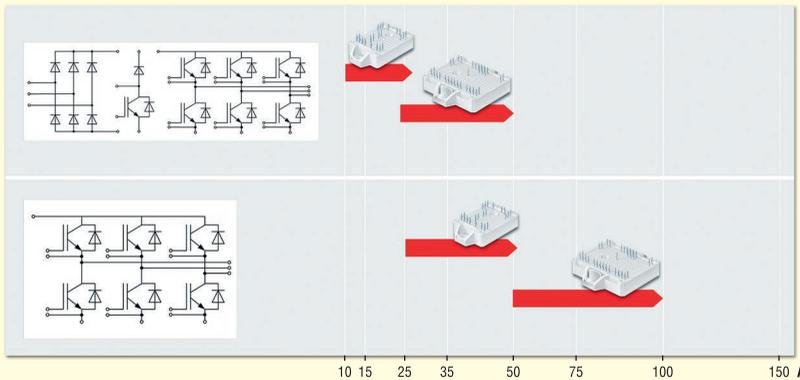


Рис. 9. Модуль SEMITOR E1/E2, оснащений RGA

ладнаних IGBT 7-го покоління. Для модуля MiniSKiiP підходить такий самий тип високоефективної теплопровідної пасти (НРTP), який використовувався у вищезгаданих порівняльних розрахунках умов застосування.

Для застосувань з кріпленням модуля притисканням або пайкою призначений модуль SEMITOR E у конфігураціях, сумісних з нумерацією контактів для існуючих модулів IGBT 7-го покоління. У вищезгаданому сімействі корпусів (рис. 9) також будуть передбачені sixpack («GD») схемні конфігурації та конфігурації «converter-inverter-brake» («DGDL»).

Конструкція модуля SEMITOR E повністю сумісна з модулями інших конструктивів, і має удосконалення у вигляді інтегрованих монтажних вкладок замість металевих затискачів. Вони створюють підвищений монтажний тиск у місці з'єднання, що призводить до зниження теплового опору. Поліпшений штифт з пресою посадкою забезпечує зняття механічної напруги для більшої надійності механічного кріплення. Модуль SEMITOR E поставляють із попередньо нанесеною теплопровідною пастою НРTP або новим ексклюзивним високоефективним фазозмінним матеріалом фірми Semikron Danfoss (HP-PCM), що полегшує монтаж модуля. Модуль 1200-V RGA IGBT буде мати позначення «12RA» в описі цього модуля: наприклад модуль Mini-SKiiP C1B з номінальним струмом 35 А буде називатися SKiiP 24NAB12RAV1.

ВИСНОВОК

Галузь силової електроніки продовжує відновлюватися та засвоювати уроки з проблем постачання, що мали місце в останні роки. Зрозуміло, що диверсифікація як у виробництві напівпровідникових чипів, так і у виробництві модулів потрібна для того, щоб забезпечити віль-

ний доступ до силових модулів за принципом «з кількох джерел». Для модулів IGBT 1200-V 7-го покоління тепер доступний надійний еквівалент від авторитетного виробника у діапазоні низьких потужностей. Модуль 1200-V RGA IGBT від компанії ROHM є ідеальною альтернативою модулям IGBT 7-го покоління, і шляхом невеликого регулювання опору резистора у колі затвора цьому модулю можна встановити режим роботи, в якому зазвичай працюють модулі IGBT 7-го покоління. Невеликі відмінності у втрат провідності модуля повністю компенсуються його покращеними тепловими характеристиками. Це робить модуль 1200-V RGA IGBT повністю сумісним з модулями IGBT 7-го найновішого покоління. Завдяки стійкості до вологи, короткого замикання та підвищеної температури модуль 1200-V ROHM RGA IGBT позиціонується як дуже надійний вибір, якщо його використовують в комплекті з силовими модулями Semikron Danfoss.

Більш детальну інформацію щодо продукції Semikron Danfoss можна отримати, звернувшись до офіційного дистриб'ютора в Україні — ТОВ НВП «Техносервіс-привід»:

**03057, м. Київ,
пр-т Берестейський, 56,
офіс 335,
тел. +38 (044) 458-47-66,
e-mail: sp.tsdrive@gmail.com,
www.tsdrive.com.ua,
https://semismart.com.ua**

Література:

1. Представлення нового IGBT 7-го покоління (AN 19-002). <https://www.semikron-danfoss.com/dl/service-support/downloads/download/semikron-application-note-introduction-of-new-igbt-generation-7-en-2019-10-10-rev-01.pdf> **CN**

НОБЕЛІВСЬКУ ПРЕМІЮ З ФІЗИКИ ПРИСУДИЛИ ЗА ПРОРИВ У ДОСЛІДЖЕННІ ЕЛЕКТРОНІВ

Дослідження П'єра Агостіні, Ференца Крауша й Анн Л'Юльє дозволить вивчати настільки швидкі процеси, за якими спостерігати раніше вчені не були в змозі. Зміни у світі електронів відбуваються за кілька десятків аттосекунди — однієї квінтільйонної частки секунди (уявіть, таких відрізків у секунді приблизно стільки ж, скільки пройшло загалом секунд з моменту народження Всесвіту) — і раніше не було можливості їх простежити.

Л'Юльє, професорка Лундського університету у Швеції (яка стала лише 5-ю жінкою, яку відзначили Нобелівською премією з фізики) виявила новий ефект від взаємодії лазерного світла з атомами в газі. А Агостіні, професор Університету штату Огайо, і Крауш, професор Інституту квантової оптики Макса Планка в Німеччині, продемонстрували, що його можна використовувати для створення коротших імпульсів світла, які вимірюються в аттосекундах.

«Тепер ми можемо відкрити двері у світ електронів. Аттосекундна фізика дає нам можливість зрозуміти механізми, якими керують електрони. Наступним кроком буде їх використання», — каже Єва Олссон, голова Нобелівського комітету з фізики.

Потенціал для застосування таких коротких імпульсів світла загалом є у багатьох областях, але у першу чергу буде корисним в електроніці та ідентифікації різних молекул, наприклад, у медичній діагностиці.

Премія у розмірі 11 мільйонів шведських крон буде розподілена порівну між лауреатами.

Торік Нобелівську премію з фізики присудили Алену Аспекту, Джону Клаузеру й Антону Цайлінгеру за експерименти із заплутаними квантовими станами, у 2021 році — Джорджу Парізі, Сюкуро Манабе та Клаусу Хассельману за моделювання складних систем, а у 2020-му відзначили Роджера Пенроуза, Райнхарда Генцеля та Андреа Гез — за дослідження чорних дір.

Як тало відомо, Ференц Крауш планує витратити свою премію на благодійність та допомогу українцям. Зокрема, він передасть кошти ініціативі Science4People, яка допомагає відбудувати українські школи. Цей фонд у 2022 році заснував сам Крауш.

www.nobelprize.org