

# Новые MOSFET от Infineon Technologies

Юрий Петропавловский

В январе текущего года была завершена сделка по приобретению американской компании International Rectifier (IR) крупнейшим немецким производителем силовых полупроводниковых приборов Infineon Technologies AG.

Как итог, теперь в категорию силовых приборов Infineon входят следующие продукты:

- MOSFET — силовые и автомобильные приборы;
- IGBT — дискретные корпусированные приборы, кристаллы на пластинах (IGBT Bare Dies), модули, сборки (Stacks & IGBT Assemblies), интеллектуальные модули, модули автомобильного назначения, отладочные платы и блоки;
- интеллектуальные ключи верхнего и нижнего плеча, включая запатентованные продукты ISOFACE, HITFET, TEMPFET;
- интегральные силовые узлы DrBlade, DrMOS;
- стабилизаторы напряжения, включая AC/DC интегральные узлы CoolSET;
- DC/DC-конвертеры.

В каталогах объединенной компании 2015 г. представлена широкая номенклатура силовых MOSFET малой, средней и большой мощности, выполненных в традиционных и перспективных корпусах. Данные о продукции представлены на отдельных сайтах Infineon и IR [4, 5].

## Продукты на основе нитрида галлия

Активное развитие технологий на основе нитрида галлия IR начала с запуском программы GaNpowerIR в 2008 г., целью которой было создание технологии производства коммерческих полупроводниковых приборов на основе нитрида галлия с помощью процессов, совместимых с производством кремниевых КМОП-микросхем. Программой ставилась задача создания к 2011 г. AlGaN-GaN-транзисторов с высокой подвижностью электронов (HEMT) на кремниевых подложках с блокирующим напряжением 600 В, на долю которых приходится до 40% силовых полупроводников на напряжения 20–1200 В, и эта задача была выполнена [6].

Значимым результатом работы команды разработчиков стало создание на 150-мм эпитаксиальных пластинах GaN на кремнии мощных приборов для проведения поставщиками комплексного оборудова-

После поглощения IR компанией Infineon Technologies генеральным директором объединенного концерна стал Рейнхард Плосс (рис. 1), до этого с 2012 г. занимавший пост главного исполнительного директора (CEO) Infineon. Президентом американских подразделений назначен Роберт Ле Форт (Robert LeFort). По данным от 5 мая текущего года, объединенная компания располагает 33 дизайн-центрами и 20 заводами по всему миру, число сотрудников объединения превысило 35 000, технологии базируются на 22 800 патентах и патентных заявках. Компания лидирует на рынке силовых полупроводниковых приборов: ее доля 17,8% (Mitsubishi — 7,2%, Toshiba — 6%, STMicro — 5,8%, Fairchild — 5,5%) [3].

В результате слияния линейка мощных высоковольтных приборов Infineon дополнилась низковольтными приборами средней и малой мощности IR. Кроме того, увеличивается загрузка завода Infineon в Дрездене, обладающего технологией производства силовых приборов на 300-мм пластинах. Немаловажно, что теперь Infineon получает доступ к передовым технологиям IR в области силовых приборов на основе нитрида галлия, имеющим хорошие перспективы для применения в энергетике [2].



Рис. 1. Рейнхард Плосс



Рис. 2. Майкл Бриер

ния дополнительной независимой экспертизы и определения дальнейших работ по их совершенствованию. Приборы представляли собой каскодные схемы, состоящие из GaN НЕМТ, работающего в режиме обеднения, и низковольтного кремниевого МОП-транзистора (рис. 3). Исток кремниевого транзистора соединен с затвором GaN-транзистора, а исток последнего — со стоком Si-транзистора. При таком включении на затвор-исток GaN-транзистора подается напряжение, обратное напряжению кремниевого транзистора, а работой каскодного переключателя можно управлять стандартными для кремниевых переключателей способами, например логическими уровнями до 5 В.

Рассмотренная каскодная схема отличается высокой скоростью переключения (порядка 50 В/нс), что обеспечивает малые потери при высокой частоте коммутации. Кремниевый полевой транзистор в этой схеме можно заменить низковольтным кремниевым диодом, а получаемый в результате выпрямитель по характеристикам подобен SiC-диоду, и его можно использовать в качестве вторичного выпрямителя импульсных источников питания. На рис. 4 показаны зависимости эффективности ключевых каскадов источника питания с выходной мощностью 200 Вт на GaN с кремниевым выпрямителем и на полевом транзисторе с суперпереходом от выходной мощности при частоте коммутации 400 кГц с учетом потерь индуктивных элементов схемы [7].

Разработанная компанией IR технология производства приборов GaN на кремнии получила созвучное программе исследований название GaNpowIR. Приборы, выполненные по этой технологии, характеризуются значительно меньшими значениями сопротивления открытого канала  $R_{ds\ on}$  и параметра  $R_{ds\ on} \times Q_g$ . К 2014 году компании удалось снизить этот

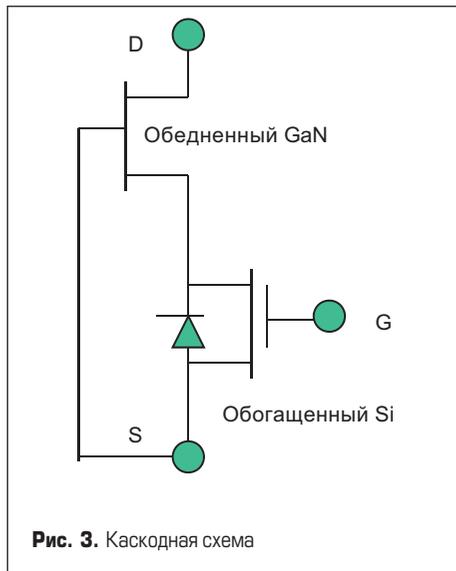


Рис. 3. Каскодная схема

параметр с примерно 30 мОм·мК у приборов первого поколения (Gen 1,1) GaNpowIR до менее 5 мОм·мК у приборов второго поколения (Gen 2.2) [8].

### Силовые высоковольтные MOSFET Infineon с суперпереходом

Технология MOSFET с суперпереходом (Super Junction, SJ) впервые была применена Infineon в 1998 г. при производстве полевых высоковольтных транзисторов первого поколения CoolMOS S5 и на протяжении последующих лет постоянно совершенствовалась. Уже в первых поколениях MOSFET с суперпереходом удалось снизить удельное сопротивление открытого канала в сравнении с приборами, выполненными по традиционным технологиям, с 39 до 25 мОм/см<sup>2</sup>, а заряд затвора — на 60–65%. В период с 2001 г. по настоящее время было выпущено более десятка линеек высоковольтных полевых транзисторов с суперпереходом:

- 2001 г. — CoolMOS C3 на напряжения 500/600/650/800 В;

- 2004 г. — CoolMOS CFD на 600 В;
- 2005 г. — CoolMOS CP на 500/600 В;
- 2008 г. — CoolMOS C3 на 900 В;
- 2009 г. — CoolMOS C6/E6 на 600 В;
- 2011 г. — CoolMOS C6/E6, CFD2 на 650 В;
- 2012 г. — CoolMOS CE на 500 В, CoolMOS P6 на 600 В;
- 2013 г. — CoolMOS CFDA, C7 на 650 В;
- 2014 г. — CoolMOS CE на 600/650 В, CoolMOS C3 на 800/900 В, CoolMOS CE на 800 В;
- 2015 г. — CoolMOS C7 на 600 В.

В состав каждой линейки входят десятки типов приборов. Такое разнообразие номенклатуры вызвано тем обстоятельством, что для конкретных приложений силовой электроники, в которых будут использоваться транзисторы, для получения оптимальных результатов необходимы определенные совокупности электрических параметров, конструктивных и стоимостных характеристик приборов. Однако современные технологии производства MOSFET не обеспечивают реализацию одновременно наилучших значений ключевых параметров, таких как  $R_{ds\ on}$ ,  $Q_g$ , энергия потерь, быстродействие и др. Комплексный подход к выбору MOSFET с суперпереходом приведен в [9].

### Линейка приборов CoolMOS C7

19 мая текущего года Infineon объявила о запуске в производство линейки полевых транзисторов серии 600 В CoolMOS C7 в корпусах TO-220, TO-247 и TO-247 с четырьмя выводами (рис. 5), выпуск приборов в корпусах TO-220FP, DPAK, D<sup>2</sup>PAK запланирован на III кв. 2015 г. Потери выключения ( $E_{oss}$ ) новых приборов снижены на 50% по сравнению с приборами серии CoolMOS CP, а удельное сопротивление открытого канала транзисторов (Area-specific on resistance) впервые в отрасли снизилось до значения 1 Ом на мм<sup>2</sup> и менее. Ключевые параметры транзисторов линейки вплотную приблизились к параметрам, обеспечиваемым приборами на основе GaN [10].

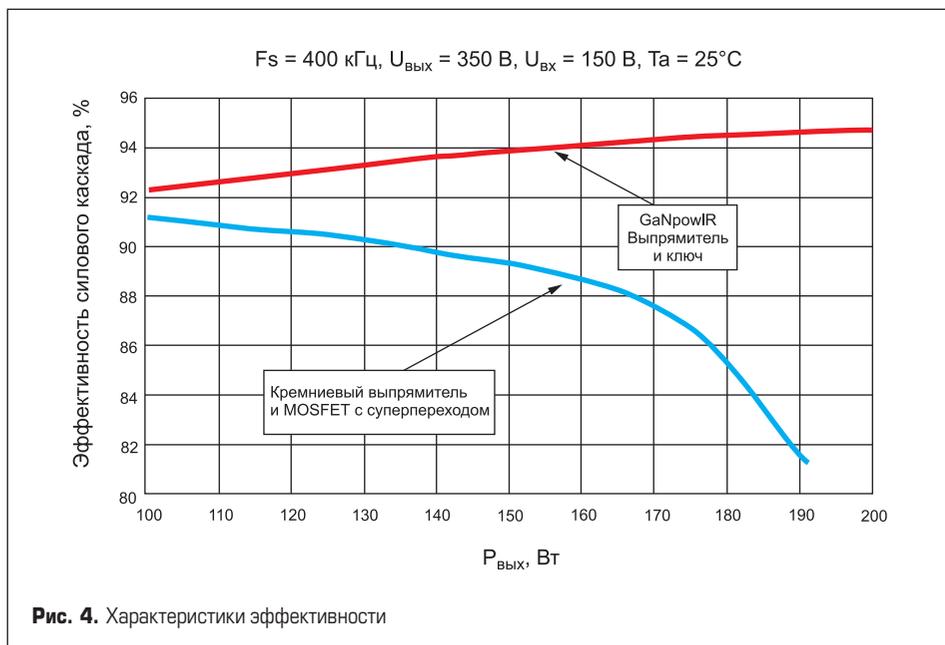


Рис. 4. Характеристики эффективности

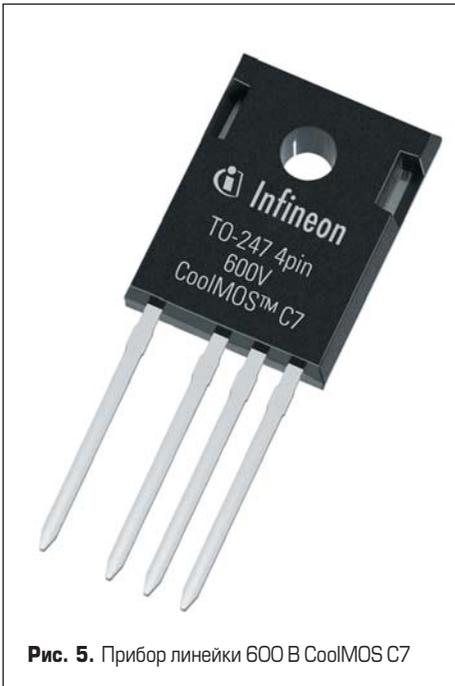


Рис. 5. Прибор линейки 600 В CoolMOS C7

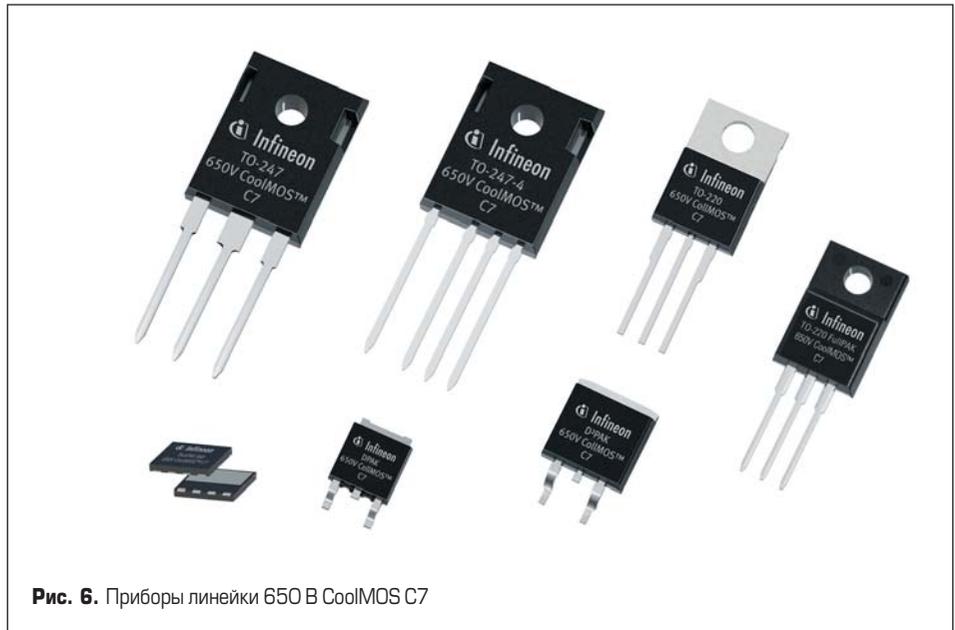


Рис. 6. Приборы линейки 650 В CoolMOS C7

Приборы 600 В CoolMOS C7 относятся к последнему (седьмому) поколению высоковольтных MOSFET с суперпереходом и являются усовершенствованной версией линейки приборов 650 В CoolMOS C7 (рис. 6). В состав линейки входят восемь типов MOSFET с  $R_{ds\ on}$  180–185, 99–104 и 40 мОм, номинальные значения этого параметра определяются числом элементарных полевых транзисторов, размещенных на одном кристалле и включенных параллельно. Классификационные параметры приборов приведены в таблице. В таблицу включены приборы линейки 650 В CoolMOS C7 только в корпусах TO-247, но компания выпускает их также в корпусах DPAK, D<sup>2</sup>PAK, ThinPAK, TO-220, TO-220 FullPAK, TO-247 4 pin.

Усовершенствования приборов линейки 600 В/C7, в сравнении с 650 В/C7, состоят в следующем: применены обратные защит-

ные диоды со значительно лучшими характеристиками быстродействия и электрической прочности (см. таблицу); снижено удельное сопротивление открытого канала с 10 до 8,5 мОм на см<sup>2</sup> и, соответственно,  $R_{ds\ on}$  приблизительно на 10% в соответствующих группах приборов; за счет снижения зарядов затвора  $Q_g$ ,  $Q_{gb}$  и входной емкости  $C_{iss}$  увеличена скорость переключения  $dV/dt$ .

Рассматриваемая линейка приборов разработана с целью повышения эффективности и снижения совокупной стоимости владения для преобразователей напряжения различных топологий: ККМ (PFC), резонансных (LLC), прямоходовых двухтранзисторных (Two Transistor Forward, TTF) и др. (с жестким режимом переключения). Снижение потерь переключения за счет улучшения таких параметров, как заряд затвора  $Q_g$  и выходная емкость  $C_{oss}$ , позволяет использовать более высокие частоты переключения. Например, увеличение частоты переключения с 65 до 130 кГц

обеспечивает значительное уменьшение размеров и стоимости индуктивных элементов блоков питания без снижения эффективности. Двукратное снижение потерь выключения (в сравнении с приборами линейки CoolMOS CP) приближает их к GaN-приборам.

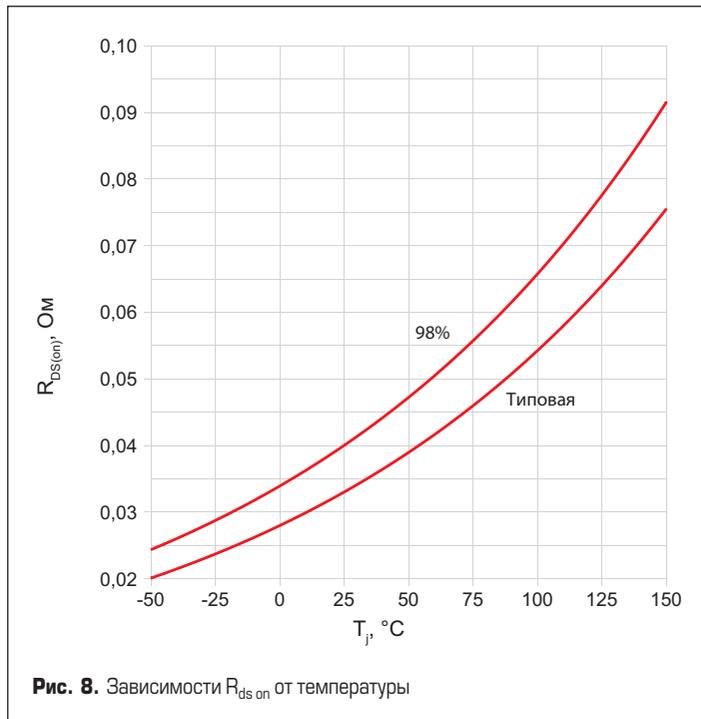
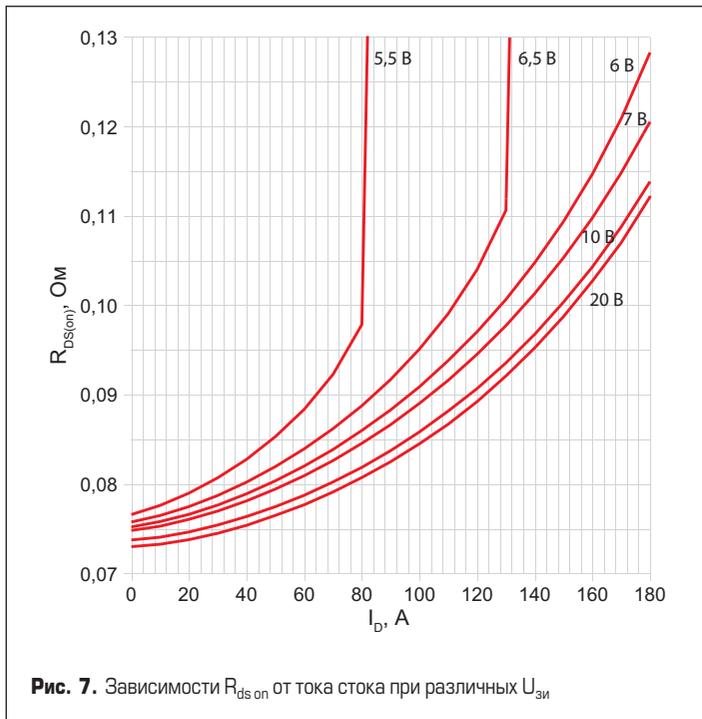
Основные области применения приборов линейки: телекоммуникационная аппаратура, источники питания серверов и компьютеров высокого класса (High-End PC Power), преобразователи для солнечных электростанций. Приборы в корпусах TO247-4 отличаются наличием отвода Кельвина. Рассмотрим особенности и параметры прибора IPZ60R040C7 с наименьшим  $R_{ds\ on}$  (кроме приведенных в таблице):

- повышенная экономичность блоков питания при использовании жесткой (ККМ, ШИМ) и мягкой коммутации (High Performance LLC);
- высокая электрическая прочность при скорости нарастания напряжения MOSFET 120 В/нс, которая обеспечивает лидерство

Таблица. Классификационные параметры приборов линеек C7

Тип прибора	$U_{си\ макс}$ , В	$R_{ds\ on}$ , мОм, тип./макс	$Q_g$ , нК	$I_{сг}$ , А, пост/имп.	$E_{oss}$ , мДж	$C_{вх}/C_{вых}$ , пФ	$t_{r}/t_{f}$ , нс	$t_{rr}$ , нс	$di/dt$ диода, А/мкс	Корпус
<b>600 В CoolMOS C7</b>										
IPP60R180C7	650	155/180	24	22/45	2,7	18/1080	7/6	280	350	PG-TO220
IPP60R099C7		85/99	42	36/83	4,95	33/1819	8/4,5	350	360	
IPP60R040C7		34/40	107	73/211	12,6	85/4340	11/3,2	460	450	
IPW60R180C7		155/180	24	22/45	2,7	18/1080	7/6	280	350	PG-TO247
IPW60R099C7		85/99	42	36/83	4,95	33/1819	8/4,5	350	360	
IPW60R040C7		34/40	107	73/211	12,6	85/4340	11/3,2	460	450	
IPZ60R099C7		85/99	42	36/83	4,95	33/1819	6/4,5	350	400	PG-TO247-4
IPZ60R040C7		34/40	107	73/211	12,6	85/4340	8/3,2	460	480	
<b>650 В CoolMOS C7</b>										
IPW65R190C7	700	168/199	23	8/49	2,7	17/1150	11/9	830	55	PG-TO247
IPW65R125C7		111/125	35	12/75	4,2	26/1670	15/8	800	55	
IPW65R095C7		84/95	45	15/100	5,5	33/2140	12/7	800	60	
IPW65R065C7		58/65	64	21/145	8	48/3020	14/7	800	60	
IPW65R045C7		40/45	93	29/212	11,7	70/4340	14/7	725	60	
IPW65R019C7		17/19	215	62/496	27	160/9900	27/5	760	70	

**Примечание:** Для линейки 600 В: значение максимального напряжения сток-исток  $U_{си\ макс}$  действительно при температуре кристалла  $T_j = +150\ ^\circ\text{C}$  (блокирующее напряжение  $V_{(BR)DSS}$  не менее 600 В); приведено типовое значение заряда затвора  $Q_g$ ; значения максимального постоянного тока стока приведены при температуре кристалла до  $+150\ ^\circ\text{C}$ , импульсного — при температуре корпуса  $+25\ ^\circ\text{C}$ ;  $E_{oss}$  — потери выключения при напряжении на стоке 400 В; значения  $C_{вх}/C_{вых}$  приведены при  $U_{си} = 400\ \text{В}$ ,  $U_{зи} = 0\ \text{В}$ ,  $f = 250\ \text{кГц}$ ;  $di/dt$  — максимальная скорость коммутации диода.



- приборов в высокоэффективных приложениях с высокой частотой коммутации;
- лучшее в классе соотношение  $R_{ds\ on}$ /корпус, обеспечивающее высокую системную эффективность приложений;
  - соответствие промышленным стандартам JEDEC (J-STD20, JESD22);
  - увеличенная плотность мощности приложений при малых размерах корпуса;
  - четырехвыводный корпус с отводом Кельвина, позволяющий повысить эффективность преобразователей при полной нагрузке на частоте коммутации 100 кГц на 0,5% по сравнению с трехвыводным эквивалентом прибора (IPW60R040C7);
  - мощность рассеяния 227 Вт при температуре корпуса +25 °С;
  - диапазон рабочих температур -55...+150 °С;
  - максимальный постоянный ток обратного диода 50 А, импульсный — 211 А при  $T_c = +25$  °С;
  - тепловое сопротивление кристалл-корпус не более 0,55 °С/Вт;
  - сопротивление открытого канала  $R_{ds\ on}$ , 0,077 Ом при  $T_j = +150$  °С,  $I_c = 25$  А и не более 0,034 Ом при  $T_j = +25$  °С.

Сопротивление  $R_{ds\ on}$  приборов существенно зависит от напряжения на затворе и тока стока, а также от температуры. На рис. 7 приведены зависимости этого параметра транзистора от тока стока при различных напряжениях  $U_{зи}$  и  $T = +125$  °С, на рис. 8 — зависимости  $R_{ds\ on}$  от температуры при  $I_c = 24,9$  А,  $U_{зи} = 10$  В.

**Устройства на основе приборов линейки 600 В CoolMOS C7**

**ККМ-преобразователь Platinum Server Design**

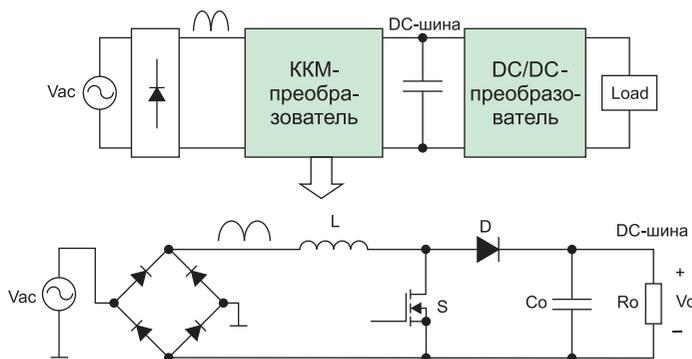
В мае текущего года компания представила демонстрационный ККМ-преобразователь (БП) Platinum Server Design мощностью 800 Вт с частотой коммутации



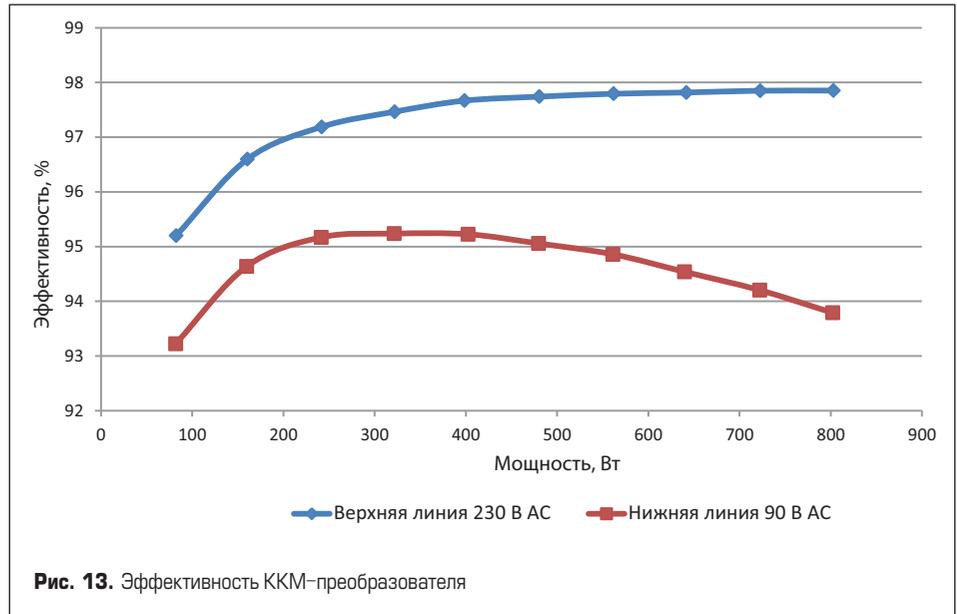
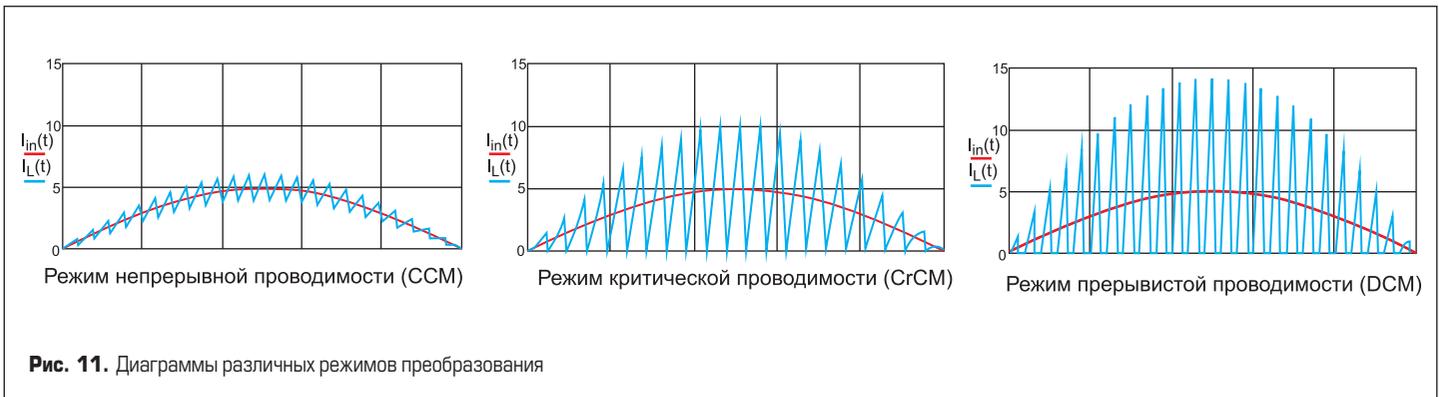
**Рис. 9.** ККМ-преобразователь Platinum Server Design

130 кГц (рис. 9). БП представляет собой импульсный преобразователь напряжения с корректором коэффициента мощности (ККМ), функционирующий в трех режимах:

непрерывной проводимости (CCM), критической проводимости (CrCM) и прерывистой проводимости (DCM). Укрупненная структурная схема БП приведена на рис. 10,



**Рис. 10.** Структурные схемы ККМ-преобразователя

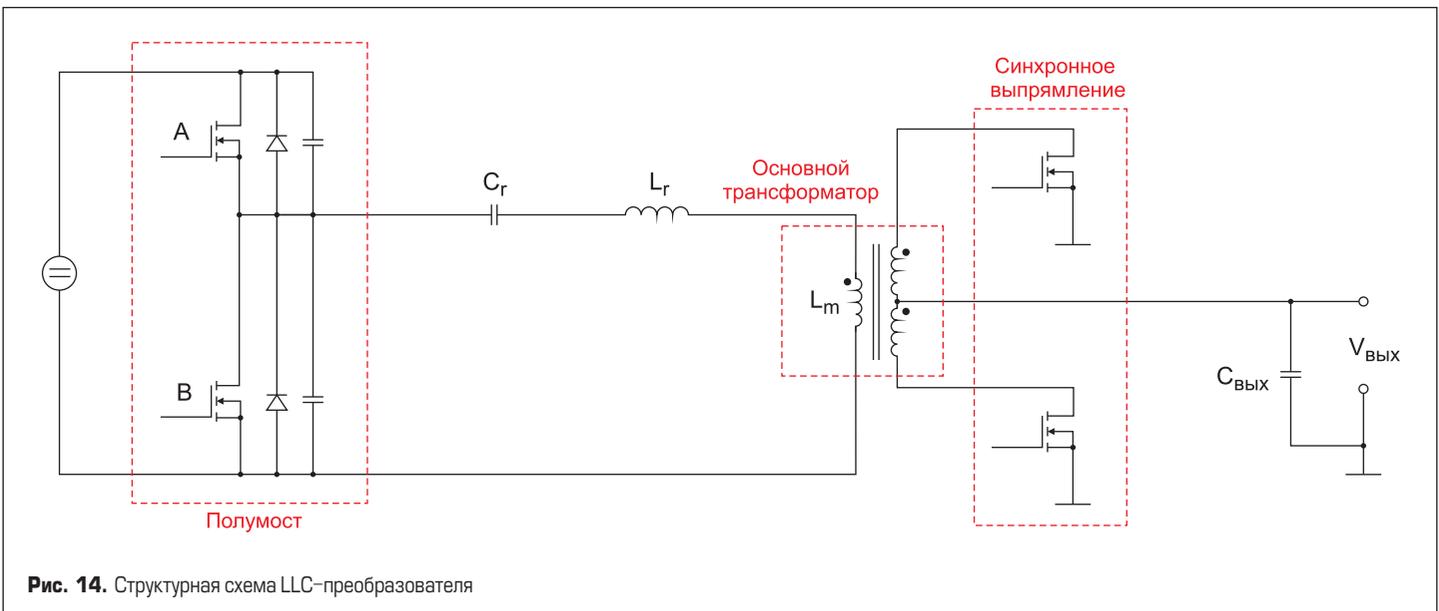


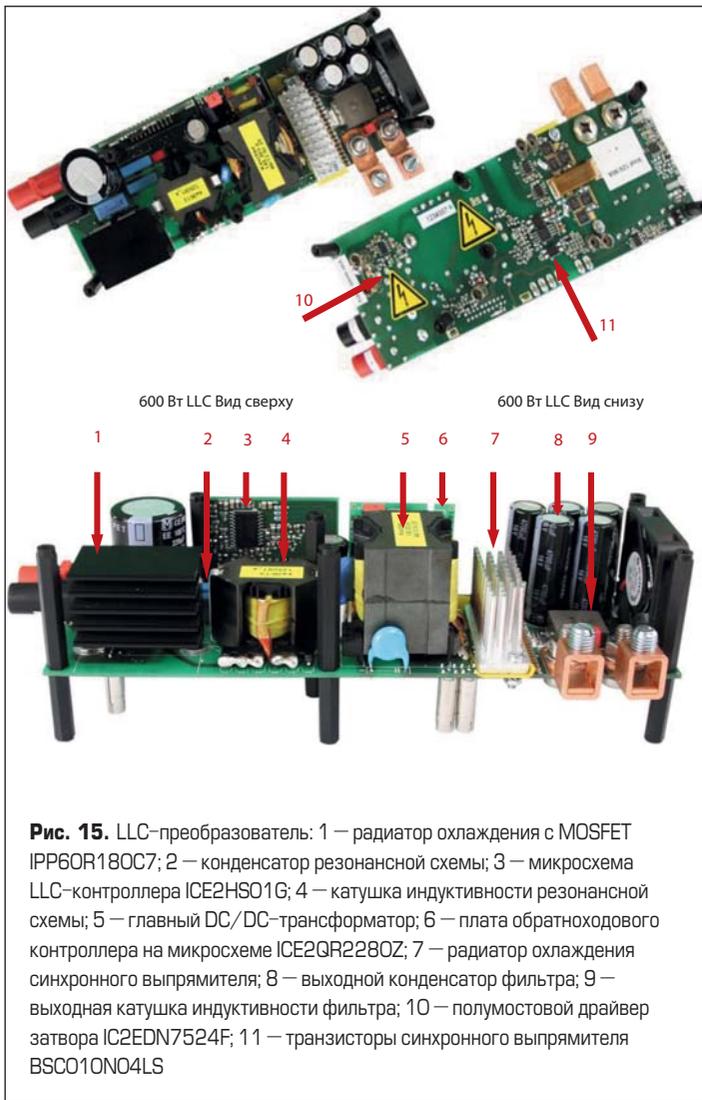
диаграммы функционирования в различных режимах — на рис. 11. В БП применены современные полупроводниковые приборы и микросхемы Infineon в сочетании с высококачественными электронными компонентами, в том числе:

- MOSFET из линейки 600 В CoolMOS C7 (IPP60R180C7);
- SiC-диод Шоттки 5-го поколения из линейки 650 В thinQ;
- неизолированный драйвер затвора 2EDN7524F семейства EiceDRIVER;
- контроллер ККМ IEC3PCS01G;
- контроллер управления XMC1300 (компьютерная карта/CPU Card на основе микроконтроллеров XMC1300-T038, XMC4200-QFN48);

- контроллер обратного преобразователя ICE2QR4780Z;
  - дроссель ККМ на основе сердечника CH270060 компании Chang Sung Corporation Ø27 мм (рис. 12);
  - конденсатор выходного фильтра 470 мкФ × 450 В фирмы Rubycon.
- БП обеспечивает работу от сетей переменного тока 47–64 Гц напряжением 90–265 В, на выходе прибора формируется постоянное

напряжение 380 В, максимальная выходная мощность — 800 Вт, максимальный выходной ток — 2,1 А. Блок отличается высокой эффективностью: не менее 94% при выходной мощности более 100 Вт. Зависимости эффективности БП от выходной мощности при различных сетевых напряжениях приведены на рис. 13. Как показывают диаграммы, при входном напряжении 230 В эффективность БП при выходной мощности более 200 Вт превышает 97%.

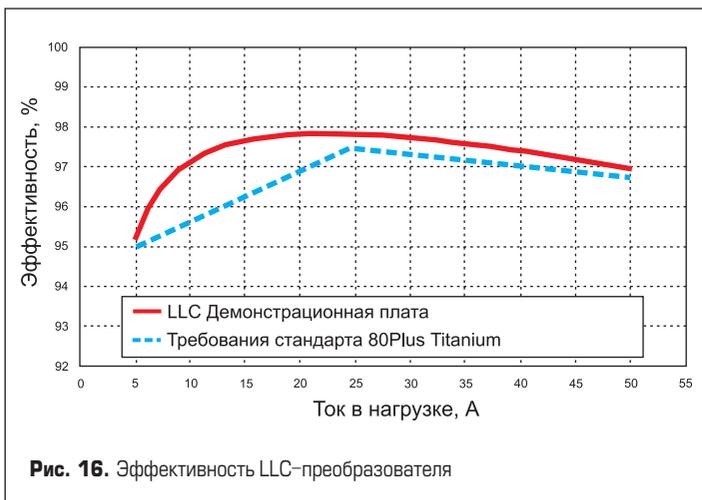




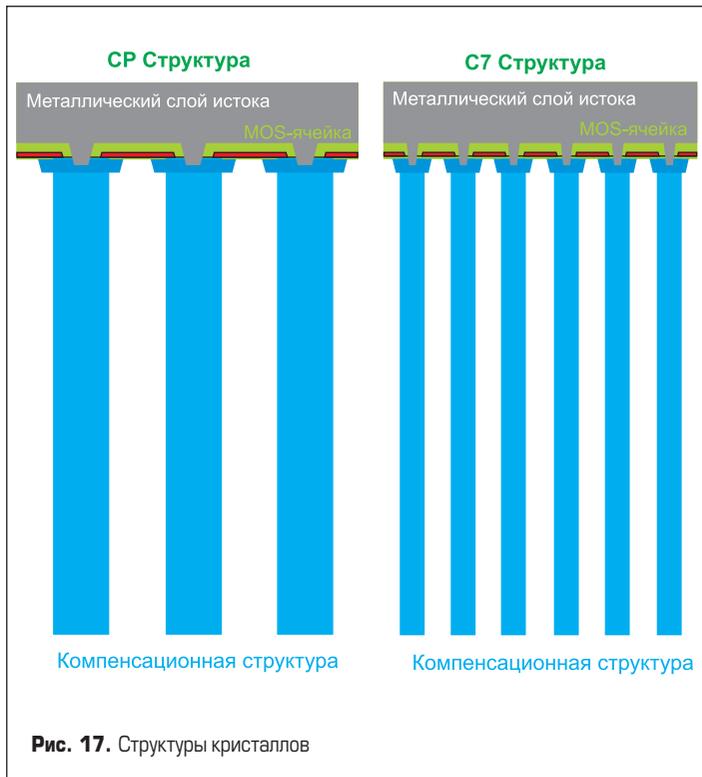
**Рис. 15.** LLC-преобразователь: 1 — радиатор охлаждения с MOSFET IPP60R180C7; 2 — конденсатор резонансной схемы; 3 — микросхема LLC-контроллера ICE2HS01G; 4 — катушка индуктивности резонансной схемы; 5 — главный DC/DC-трансформатор; 6 — плата обратноходового контроллера на микросхеме ICE2QR2280Z; 7 — радиатор охлаждения синхронного выпрямителя; 8 — выходной конденсатор фильтра; 9 — выходная катушка индуктивности фильтра; 10 — полумостовой драйвер затвора IC2EDN7524F; 11 — транзисторы синхронного выпрямителя BSC010N04LS

**Полумостовой LLC-преобразователь**

Также в мае 2015 г. Infineon представила отладочную (демонстрационную) плату полумостового резонансного (LLC) DC/DC-преобразователя напряжения EVAL\_600W\_12V\_LLC\_C7 мощностью 600 Вт и выходным напряжением 12 В. Данное решение нацелено на оказание помощи разработчикам эффективных и гибких высоковольтных устройств HV DC/DC для серверных источников питания класса 80Plus Titanium Standard. При изменении входного постоянного напряжения в пределах 350–410 В преобразователь обеспечивает выходной ток до 50 А, при этом нестабильность выходного напряжения не превышает +0,1/-0,3 В при изменении тока в нагрузке от 0 до 90%.



**Рис. 16.** Эффективность LLC-преобразователя

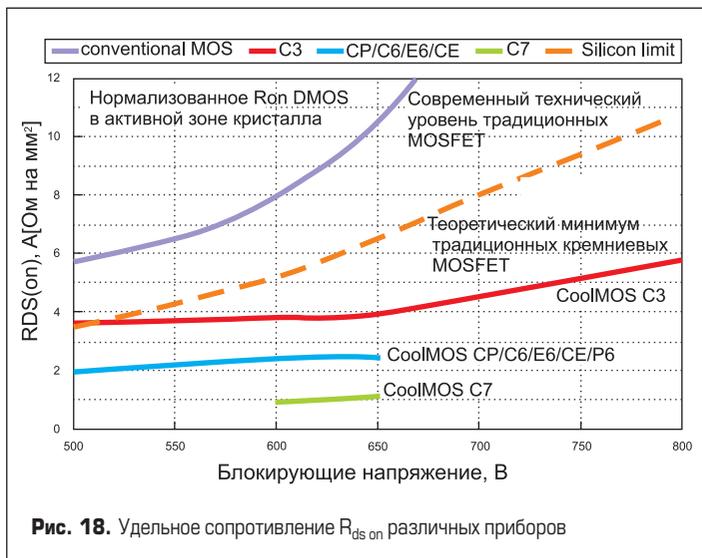


**Рис. 17.** Структуры кристаллов

Принцип функционирования полумостового LLC-преобразователя поясняется структурной схемой, приведенной на рис. 14. В качестве ключей А и В полумоста используются MOSFET IPP60R180C7 рассматриваемой линейки 600 В CoolMOS C7; управление резонансной схемой осуществляется с помощью частотной модуляции. В качестве синхронных выпрямителей используются полевые транзисторы BSC010N04LS семейства OptiMOS (по три прибора в плече). Внешний вид и состав отладочной платы LLC-преобразователя показан на рис. 15. Преобразователь отличается экстремально высокой эффективностью — более 97% при  $I_{\text{вых}}$  более 10 А. На рис. 16 приведена зависимость его эффективности от выходного тока в сравнении с требованиями стандарта 80Plus Titanium.

\* \* \*

Приборы линеек 650/600 В CoolMOS C7, по сравнению с ранее разработанными, характеризуются существенно меньшим удельным сопротивлением открытого канала за счет более плотного размещения элементарных транзисторных ячеек на кристалле (рис. 17). На рис. 18 приведены соответствующие зависимости этого параметра от блокирующего напряжения.



**Рис. 18.** Удельное сопротивление  $R_{ds(on)}$  различных приборов

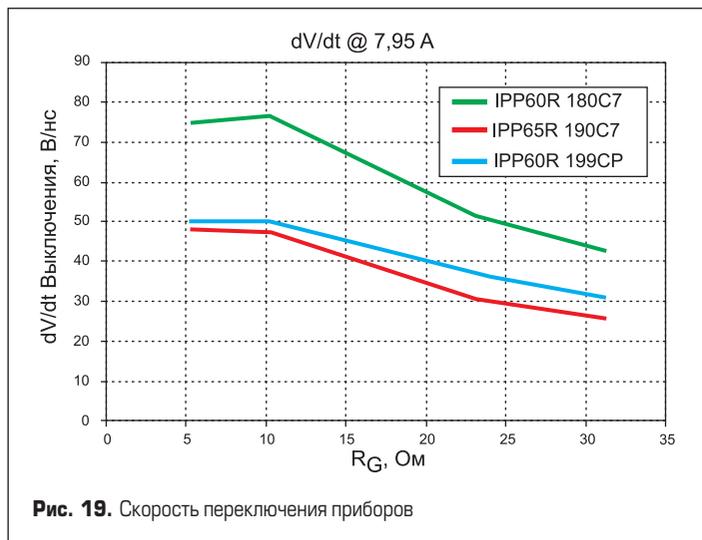


Рис. 19. Скорость переключения приборов

рующего напряжения. На рис. 19 показаны зависимости  $dV/dt$  сопоставимых по группам  $R_{ds(on)}$  приборов 600/650 С7, СР от сопротивления затворов  $R_g$  при токе стока 7,95 А.

Применение новых транзисторов в импульсных преобразователях различных топологий позволяет повысить эффективность систем первичного и вторичного питания до 95–97% при нагрузках 10–100%.

#### Литература

1. [www.infineon.com/cms/en/about-infineon/press/press-releases/2015/INFXX201501-020.html](http://www.infineon.com/cms/en/about-infineon/press/press-releases/2015/INFXX201501-020.html)
2. [www.infineon.com/cms/en/about-infineon/press/press-releases/2014/INFXX201408-056.html](http://www.infineon.com/cms/en/about-infineon/press/press-releases/2014/INFXX201408-056.html)
3. [www.infineon.com/cms/en/about-infineon/press/press-releases/2015/INFXX201505-052.html](http://www.infineon.com/cms/en/about-infineon/press/press-releases/2015/INFXX201505-052.html)
4. <https://www.infineon.com/cms/en/product/power/mosfet/power-mosfet/channel.html?channel=ff80808112ab681d0112ab6a579104b6>
5. [www.irf.com/product/\\_/N~1njcht](http://www.irf.com/product/_/N~1njcht)
6. <http://powerelectronics.com/discrete-power-semis/commercial-600v-gan-based-power-devices-coming-age>
7. [www.irf.com/pressroom/articles/000pee1503.pdf](http://www.irf.com/pressroom/articles/000pee1503.pdf)
8. [www.irf.com/gan](http://www.irf.com/gan)
9. <http://powerelectronics.com/discrete-power-semis/multiple-metrics-define-performance-super-junction-mosfet-selection>
10. [www.infineon.com/cms/en/about-infineon/press/press-releases/2015/INFPM201505-057.html](http://www.infineon.com/cms/en/about-infineon/press/press-releases/2015/INFPM201505-057.html)