

Технология GaN

быстро завоевывает новые рынки

Элементы силовой электроники на основе нитрида галлия (GaN) стремительно обретают популярность благодаря своей способности работать на частотах и скоростях переключения, значения которых лежат далеко за пределами возможностей силовых приборов на основе кремния. Дискретные компоненты на основе GaN могут функционировать при скоростях нарастания выходного напряжения вплоть до 70 В/нс, при этом на характеристики системы существенно влияют факторы, не связанные с активными силовыми компонентами, — такие как высокоскоростные драйверы затворов и компоновка печатных плат.

В данной статье рассматривается семейство мощных полевых транзисторов (FET) на основе нитрида галлия (eGaN FET) с улучшенными характеристиками в области высоких частот, предназначенных для применения в высокочастотных вольт-добавочных преобразователях, работающих в мультимеггерцевом диапазоне. Эти устройства были разработаны для выполнения операций переключения высоковольтных напряжений мощных токов на высоких частотах.

Алекс ЛИДОУ (Alex LIDOW)
Йохан СТРИДОМ (Johan STRYDOM)
Дэвид РЕЙШ (David REUCH)

Перевод: Святослав ЮРЬЕВ

Появление нового семейства силовых транзисторов eGaN FET, обладающих существенно улучшенными характеристиками, обеспечивает возможность переключения на более высоких частотах и с более высокими скоростями по сравнению с силовыми приборами, изготовленными на основе кремния (Si) по традиционной технологии MOSFET (полевой транзистор с МОП-структурой).

Сочетание повышенной скорости переключения и малых паразитных параметров монтажа, а также использование соединительных контактов оптимизированной конструкции обеспечивает возможность минимизировать величину монтажной (паразитной) индуктивности печатной платы и, соответственно, полностью задействовать потенциал этих но-

вых силовых приборов. Как показали измерения, опытные образцы вольт-добавочного преобразователя, работающие на частотах переключения до 10 МГц, обладают пиковой эффективностью больше 89%. Хотя это и очень хорошие результаты, все еще имеет место значительная составляющая потеря, причиной которых является использование современного кремниевого драйвера затвора.

Для того чтобы полностью реализовать потенциал новых высокочастотных транзисторов типа eGaN FET, имеющих к тому же уменьшенные габариты, необходимы целенаправленные усилия по совершенствованию структуры драйвера затвора, что, в свою очередь, позволит еще больше повысить эффективность и обеспечит возможность работать на повышенных скоростях переключения.

Критерий оценки эффективности переключения больших токов

Влияние заряда Миллера (Q_{GD}) на время переключения хорошо известно (он управляет скоростью спада и нарастания напряжения (t_f) в момент переключения), и для жестких условий переключения в качестве критерия эффективности (FOM) принято использовать величину произведения:

$$Q_{GD} \times R_{DS(on)}$$

где $R_{DS(on)}$ — сопротивление сток-исток. При пониженных напряжениях и больших величинах токов можно пренебречь членом Q_{GS2} , не зависящим от величины тока. Q_{GS2} является частью заряда затвора, когда

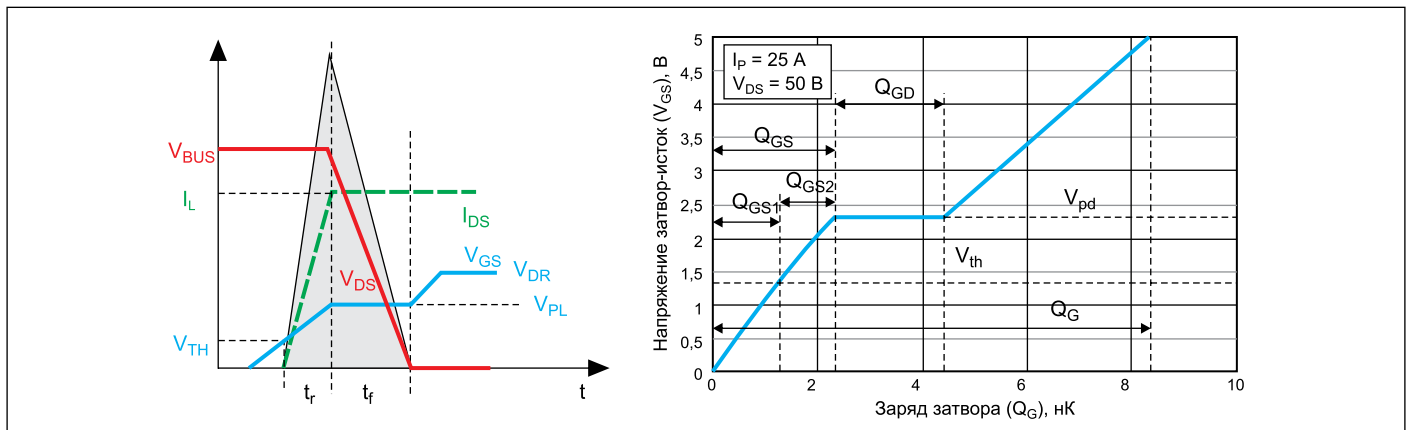


Рис. 1. Идеализированная форма сигнала переключения, используемая для вычисления величины потерь на переключение, и соответствующая диаграмма заряда FET

напряжение на приборе находится в интервале значений от V_{TH} (пороговый уровень) до V_{PL} (напряжение плато — плоская часть рабочей характеристики полевого транзистора). Q_{GS2} управляет скоростью нарастания (t_r) и спада тока. Эти составляющие заряда на затворе показаны на рис. 1б.

Идеализированный интервал включения, показанный на рис. 1а, начинается с роста напряжения, приложенного к затвору и управляющего его работой. Когда это напряжение достигает порогового значения, ток, протекающий через прибор, начинает возрастать под воздействием тока затвора (I_G).

В период роста тока стока на работу транзистора одновременно влияют и напряжение и ток, что приводит к потерям при переключении. За время, в течение которого ток растет, параметром, определяющим потери в приборе, является Q_{GS2} .

Когда ток, протекающий через транзистор, достигает значения тока нагрузки, напряжение на приборе начинает падать и в приборе при переключении возникают дополнительные потери. В течение периода спада напряжения параметром, который определяет величину потерь, является Q_{GD} . При анализе потерь при переключении применимы те же правила, и минимизация параметров Q_{GD} и Q_{GS2} приведет к снижению потерь в тяжелых режимах переключения.

Общая величина потеря мощности при осуществлении переключения определяется следующим образом:

$$P_{SW} = \frac{V_{IN} \times I_{ON} (Q_{GD} + Q_{GS2})}{2I_G} + \frac{V_{IN} \times I_{OFF} (Q_{GD} + Q_{GS2})}{2I_G}$$

Исторически несколько различных критериев было предложено для того, чтобы просто и ясно отражать потенциальные возможности устройств, в которых используются электронные приборы, изготовленные по определенным технологиям, в различных областях применения.

Приведенные выше уравнения, относящиеся к идеализированным условиям переключения больших мощностей, формируют основу для принятия определенных критериев в экстремальных случаях переключения FOM (FOM_{HS}) или:

$$Q_{SW} \times R_{DS(on)} = (Q_{GB} + Q_{GS2}) \times R_{DS(on)}$$

где Q_{SW} — полный заряд затвора во время интервала переключения большой нагрузки.

Эти идеализированные диаграммы переключения редко точно соответствуют реальным характеристикам работы схемы, поскольку паразитные параметры устройства и монтажа могут иметь существенно большие значения или даже доминировать над потерями при переключении.

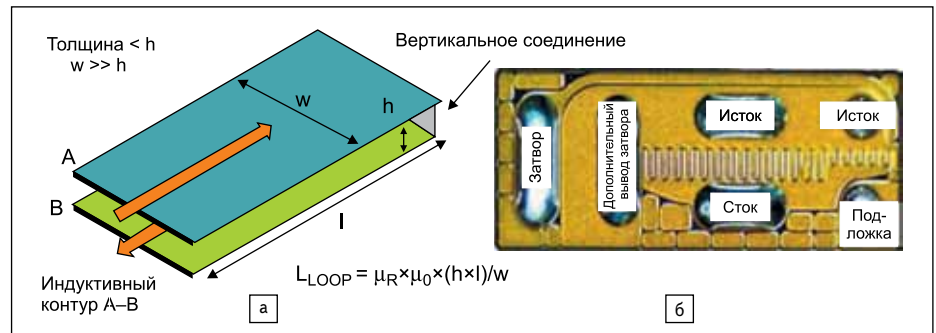


Рис. 2. а) Оптимальная конфигурация высокочастотного контура; б) конструкция eGaN FET с выводами

В вольт-добавочном преобразователе существуют две основные паразитные индуктивности, существенно влияющие на его работу, — общая индуктивность истока (L_S), определяемая цепью прохождения мощного тока сток-исток и цепью «драйвер-затвор», и индуктивность высокочастотной силовой цепи (L_{LOOP}), которая включает паразитную индуктивность положительного контактного вывода входного конденсатора, синхронный выпрямитель, цепь заземления и обратный путь через входной конденсатор. Показано, что индуктивность общего истока критически влияет на работу устройства, поскольку она непосредственно определяет скорость переключения приборов.

Индуктивность высокочастотного контура хотя и отрицательно не влияет на скорость переключения в такой же степени, как индуктивность истока, тем не менее она отрицательно сказывается на характеристиках переключения.

Еще одним важным отрицательным эффектом наличия индуктивности высокочастотного контура является выброс напряжения, наводимый во время коммутационного перехода, как показано на правой части рис. 1. Этот выброс уменьшает максимальное используемое значение напряжения прибора и увеличивает потери при переключении. Для того чтобы обеспечить высокую скорость переключения, свойственную GaN-приборам с низким FOM, необходимо минимизировать паразитные параметры конструкции и монтажа на печатной плате,

разделив цепи затвора и питания для минимизации полной индуктивности истока.

На уровне общей компоновки следует обеспечить минимальную паразитную индуктивность, используя корпус с матрицей шариковых выводов или другие аналогичные конструкции с шариковыми выводами (WLCPS).

Более того, влияние общей индуктивности истока — наиболее критичного из паразитных параметров — может быть полностью исключено с помощью отдельного терминала истока, обеспечивающего только обратный путь для сигнала затвора. Для уменьшения длин цепей питания и затвора на уровне компоновки конструкции требуется конструктивно оптимизировать печатную плату с монтажом. Максимально эффективно эта задача решается установкой в параллель проводников больших габаритов, в которых ток контура протекает в противоположных направлениях, как показано на рис. 2а.

Протекание тока в противоположных направлениях приводит к устранению магнитного потока за пределами индуктивного контура, при этом минимизируется длина контура и высокое вертикальное монтажное соединение может уменьшить энергию, накапливаемую внутри контура. И последнее, ширина проводника должна быть максимальной, чтобы минимизировать величину индуктивности, приходящуюся на единицу его длины. Для того чтобы обеспечить оптимальную структуру монтажа на уровне конструкции, контакты должны проектироваться широкими и располагаться перпенди-

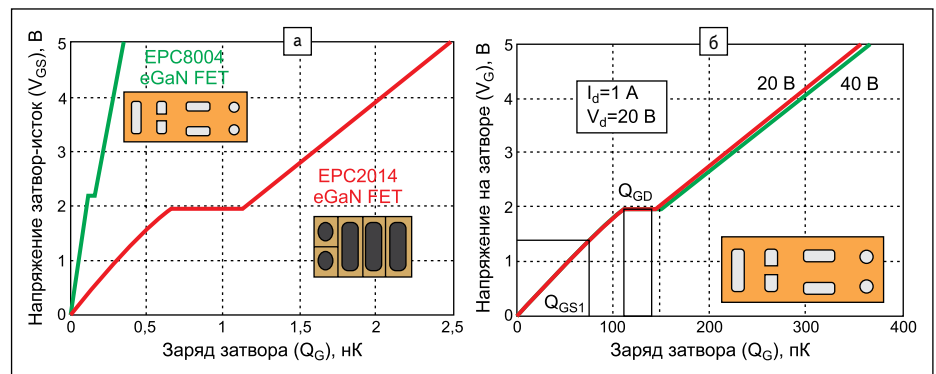


Рис. 3. Диаграммы заряда затвора

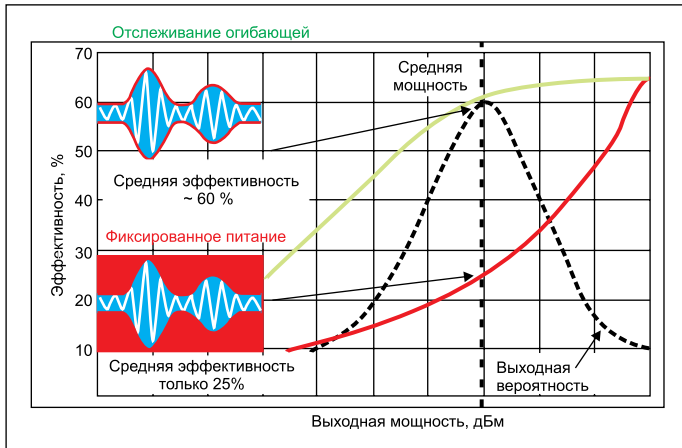


Рис. 4. Схематичное представление фиксированного питания и питания при отслеживании огибающей в радиочастотном усилителе мощности

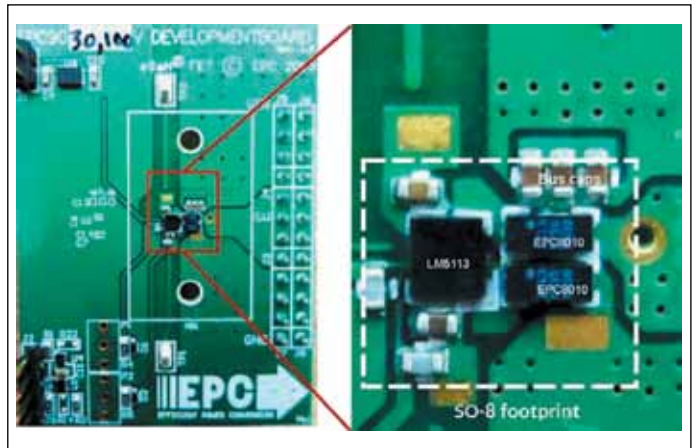


Рис. 5. Прототип печатной платы устройства для отслеживания огибающей

кулярно к направлению движения тока питания по соответствующей цепи. Законченная конструкция с eGaN FET типа EPC8000 показана на рис. 2б.

Для повышения частоты переключения требуются приборы с более низким зарядом, которые, в свою очередь, обладают повышенным сопротивлением во включенном состоянии, при этом во время работы нужна меньшая мощность. В качестве примера такого прибора с уменьшенным зарядом на рис. 3а показан прибор типа EPC8004 (обладает невосприимчивостью к изменениям dv/dt , обеспечиваемой величиной отношения QGD/QGS1 меньше 1) в сравнении с самым маленьким из существующих приборов, работающих с тем же уровнем напряжения (40 В), — EPC2014. На рис. 3б видно уменьшение заряда затвора примерно в семь раз.

Еще один важный фактор, который необходимо рассмотреть, — требование к нечувствительности к dv/dt . Первостепенным параметром для оценки нечувствительности к dv/dt является коэффициент Миллера, демонстрирующий, насколько чувствительны к возвращению на высокое значение dv/dt затворы. Для приборов типа EPC8000 коэффициент Миллера (QGD/QGS1) на половинном уровне рабочего напряжения понижается ниже значения 0,4, то есть гораздо ниже уровня требования, определяемого теоретически. Диаграмма заряда устройства типа EPC8004, на которой показаны диапазоны изменений Q_{GS1} и Q_{GD} , представлена в правой части рис. 3. Надо отметить, что коэффициент Миллера должен оставаться меньше 1 даже при полной величине рабочего напряжения, если необходимо избежать включения, вызываемого изменением dv/dt .

Новые области применения

Технология изготовления электронных приборов из GaN обеспечивает возможность их применения в новых областях. В этой статье мы рассматриваем внедре-

ние электронных приборов на основе GaN в четырех новых направлениях — отслеживание огибающей, беспроводная передача электроэнергии, LiDAR и спутниковая связь. Мы также обсуждаем вывод этих приборов на новый целевой сегмент рынка — DC/DC-преобразование.

Наше общее заключение состоит в том, что технология GaN создает рынки сбыта не меньшие по сравнению с теми, где предлагается предшествующее поколение электронных приборов на основе кремния.

Отслеживание огибающей

Принцип отслеживания огибающей в радиочастотных усилителях не является открытием. Однако постоянно возрастающая необходимость в повышении эффективности базовых станций и увеличении их мощности, как и потребность в увеличении эффективности мощных радиочастотных усилителей, становятся причинами проведения интенсивных исследований и разработок в области отслеживания огибающей радиочастотного сигнала. Мощные радиочастотные усилители используются для передачи голосовых сообщений и данных через систему, в состав которой входят спутники, базовые станции и мобильные телефоны.

Стандартные мощные радиочастотные усилители действуют при фиксированном уровне выходной мощности, обеспечивая ее максимум независимо от того, нужно это или нет для работы передатчика. Когда в мощном радиочастотном усилителе применяется отслеживание огибающей, усилитель не работает при фиксированном уровне мощности, но при этом точно регулируется мощность, необходимая для модуляции сигнала. Это иллюстрируется рис. 4. На рис. 5 показана плата, на которой смонтировано устройство для осуществления слежения за текущим значением огибающей.

В течение многих лет инженеры пытались реализовать функцию слежения за огиба-

ющей, используя дорогостоящие LDMOS-транзисторы. Впрочем, без заметных успехов. Однако осуществление необходимой модуляции мощных сигналов стало реальностью при использовании транзисторов на основе GaN, обладающих улучшенными в области высоких частот характеристиками и способных работать при больших напряжениях и высоких скоростях переключения, что необходимо для эффективного отслеживания огибающей. Такие режимы функционирования выходят за рамки возможностей транзисторов на основе кремния.

К радиочастотным мощным усилителям для систем LTE четвертого поколения предъявляются более высокие требования, чем было принято при технологиях предыдущих поколений. Именно в таких усилителях использование отслеживания огибающей дает максимальный эффект. Сегодня оборудование, изготовленное на базе технологии 4G LTE (оконечная аппаратура линии передачи данных четвертого поколения), составляет лишь 9% оборудования глобальной беспроводной платформы, но в конце концов в мире передачи данных произойдет замена оборудования сетей предыдущего, третьего поколения на оборудование сетей четвертого поколения.

Использование устройств отслеживания огибающей может удвоить энергетическую эффективность мощных радиочастотных усилителей в сети четвертого поколения. Еще больший эффект можно ожидать от их применения в сети пятого поколения.

Беспроводная передача энергии

Обеспечение электропитанием без помощи проводов становится все более популярным во многих потребительских товарах — например, в мобильных телефонах. До настоящего времени большинство решений по беспроводному электропитанию сосредоточено на бесконтактном наведении электрического тока частотой приблизительно 200 кГц в катушках индуктивности.

Так требует стандарт Qi, основными недостатками которого являются низкая эффективность преобразования и необходимость располагать питаемые устройства в строго определенном положении для согласования передающих и принимающих катушек.

Лидеры электронной промышленности, в число которых входят компании Qualcomm, Intel, Broadcom, Samsung, Delphi и Witricity, образовали консорциум A4WP для разработки и коммерциализации недавно выбранного для рассмотрения стандарта (6,78 МГц) беспроводной передачи электрической энергии (Highly Resonant Power Transfer). Способность GaN-транзисторов осуществлять переключение с высокими скоростями делает их идеальными кандидатами для областей применений, где требуется высокореzonансная передача электроэнергии и устойчивое к ошибкам обнаружение иностранных объектов.

К первым областям применения беспроводного электропитания относятся мобильные телефоны, ноутбуки, планшетные компьютеры, игровые контроллеры и даже электромобили с подзарядкой без контактного подключения, то есть без реального физического соединения с источником питания. Все, что для этого требуется, — знать, на каком расстоянии возможно беспроводное получение электрической энергии.

По прогнозам, к 2020 году мировой рынок устройств беспроводного питания достигнет \$15,1 млрд. Потребность только в устройствах для беспроводной зарядки электромобилей, как ожидается, утроится в течение последующих восьми лет.

LiDAR

Для детектирования оптического излучения и измерения расстояний требуются лазерные импульсы, позволяющие создавать трехмерные изображения или карты окружающей местности. К самым ранним областям применения этой технологии относятся карты Google для автомобилей без водителей. Способность современных GaN-транзисторов работать на высоких частотах предоставляет возможность создавать системы с повышенной удельной разрешающей способностью, с повышенным быстродействием и большей точностью. Характеристики этих электронных приборов обеспечивают возможности существенного расширения области их практического применения — например, для обнаружения движения в видеоиграх, в компьютерах, которые реагируют на жесты (что противоположно сенсорным экранам), в полностью автономных транспортных средствах.

Повышенная радиация

Силовые преобразователи используются и в жестких условиях эксплуатации — таких как космос, полеты на большой высоте или в военных целях, где требуется высокая надежность оборудования, которое должно быть устойчивым к разрушающим воздействиям или к сбоям, вызванным повышенным уровнем радиации.

Большинство электронных компонентов должны иметь специальную конструкцию или быть изготовленными по специальной технологии для снижения их восприимчивости к повреждению радиационным излучением. По этой причине приборы, способные противостоять воздействию радиации, разрабатываются с техническим уровнем, опережающим большинство недавних технологических достижений.

Мощные кремниевые MOSFET-транзисторы не являются исключением, особенно если принять во внимание то, что усовершенствованные GaN-транзисторы имеют в 40 раз лучшие электрические характеристики и при этом могут выдерживать воздействие в десять раз более интенсивной радиации.

Кроме того, поскольку коммерческие мощные GaN-транзисторы по своей природе в большей степени защищены от радиации, их использование открывает возможности для удешевления телекоммуникационных и исследовательских спутников. В настоящее время считают, что в 2023 году при общем глобальном космическом рынке объемом \$200 млрд на рынке радиационно-устойчивых транзисторов общим объемом \$100 млн будут доминировать именно GaN- транзисторы.

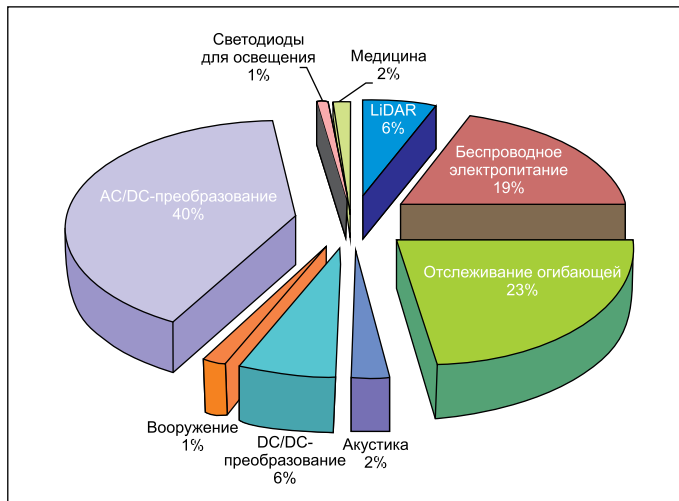


Рис. 6. Прогноз доходов компании EPC по областям применения ее продукции на 2018 год

DC/DC-преобразователи в оборудовании систем передачи данных

Потребность в более высокой эффективности использования электроэнергии продолжает оставаться движущей силой в электронике — в особенности в таких областях ее применения, как серверные и централизованные телекоммуникационные центры.

В сравнении с полевыми транзисторами, изготовленными на основе технологии MOS, транзисторы на нитриде галлия значительно более эффективны. Снижение потерь мощности позволяет создавать изделия с более мощным выходом, повышенной плотностью мощности и увеличенной эффективностью. Все это приводит к снижению уровня энергопотребления и к меньшим счетам за электроэнергию.

Чего еще можно ожидать

Мы ожидаем, что в ближайшие годы приборы на основе нитрида галлия позволят расширить область применимости известного закона Мура и сделать его приемлемым не только для дискретных транзисторов, но и для разнообразных интегральных схем, которые будут обладать превосходными характеристиками, иметь низкую стоимость при очень высоком значении их для электронной промышленности вообще. Все это соответствует законам циклического развития, когда каждое последующее поколение имеет существенно лучшие характеристики и меньшую стоимость, открывая возможности создавать новые, непредвиденные ранее области применения.

Технология GaN находится в стадии очень быстрого развития. Причина тому — замена кремниевых приборов с худшими характеристиками (чья стоимость вскоре будет относительно более высокой) и вновь возникающие технические применения, которые становятся возможными из-за нового уровня электроники на основе GaN.

В соответствии с прогнозом компании EPC (рис. 6), в 2018 году ожидается резкое повышение доходов компании от ее технологической линии по производству eGaN-полевых транзисторов. Расширяющиеся области применения, LiDAR, отслеживание огибающей и беспроводная передача энергии обеспечивают 48% этих прогнозируемых доходов. В настоящее время происходит становление данного процесса, но его влияние на рынок может быть подобно взрыву.

Литература

1. Strydom J., Reusch D. Multi Megahertz Buck Converters using eGaN FETs for Envelope Tracking // Efficient Power Conversion Corporation (EPC), PP44 PCIM Europe. 2014.
2. <http://www.power-mag.com/pdf/issuearchive/70.pdf>