



ПРЕИМУЩЕСТВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОЛЕВЫХ GAN-ТРАНЗИСТОРОВ В НЕПИЛОТИРУЕМЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТАХ

Киран Бернارد (Kiran Bernard), Industrial Analog & Power Group компании Renesas Electronics Corp.
Перевод: Владимир Рентюк, Павел Башмаков



Доминирующее положение в индустрии космического и высоконадежного оборудования уже долгое время занимают кремниевые полевые транзисторы, но они быстро приближаются к теоретическому пределу своих возможностей или как сейчас говорят — производительности. Поэтому, для того чтобы двигаться вперед, нам необходимо обратить внимание на полупроводники с широкой запрещенной зоной, а именно на приборы, выполненные на основе нитрида галлия (GaN). Такие транзисторы по сравнению с традиционными кремниевыми полевыми транзисторами имеют целый ряд преимуществ: габаритные размеры, вес, эффективность. Кроме того, полевые GaN-транзисторы характеризуются меньшим требуемым для них физическим рас-

стоянием между истоком и стоком, что приводит к значительно меньшему размеру кристалла и более низкому сопротивлению канала в открытом состоянии, а следовательно, к меньшим потерям проводимости. Меньший по размерам кристалл способствует и уменьшению выходной емкости и позволяет минимизировать паразитные индуктивности, что связано с особенностями компоновки транзистора, а это, в свою очередь, приводит к снижению коммутационных потерь.

Одновременное сочетание снижения коммутационных потерь и потерь проводимости позволяет значительно повысить эффективность рассматриваемых полевых транзисторов и выполненных на них устройств, например преобразователей. Чем эффективнее будет преобразователь, тем меньше его потери и, следовательно, мощность, рассеиваемая в виде тепла. Это приводит к уменьшению площади и упрощению решения теплоотвода и позволяет уменьшить вес завершеного источника питания в целом. Однако характерная черта полевых GaN-транзисторов заключается в том, что у них, в отличие от традиционных кремниевых МОП-транзисторов, напряжение исток-затвор без риска пробоя не может превышать 6 В. И это достаточно серьезная проблема. Дело в том, что большинство радиационно-стойких драйверов затворов полевых транзисторов, коммерчески доступных в настоящее время на рынке, обеспечивают напряжение, на выходе превышающее 10 В. Это связано с тем, что они проектировались для управления кремниевыми МОП-транзисторами. Но такое высокое напряжение может вывести GaN-транзисторы из строя. Отсюда следует, что для того, чтобы ускорить применение транзисторов, выполненных по прогрессивной GaN-технологии, в системах космических летательных аппаратов и в приложениях, в которых требуется исключительно высокая надежность, нужен драйвер затвора, который может сдвинуть уровень сигнала, превышающий 10 В, до уровней, приемлемых для полевых GaN-транзисторов. Разработка такого драйвера в буквальном смысле открывает этим транзисторам дорогу в космос.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛЕВЫХ GAN-ТРАНЗИСТОРОВ

Транзисторы на основе нитрида галлия (GaN) имеют ряд особенностей, которые делают их действительно привлекательным решением для использования в составе систем питания КА. Среди них: высокий уровень устойчивости к ионизирующему излучению, отсутствие паразитного р-п-диода, повышенная скорость переключения и КПД, а главное, малый размер кристалла и, как следствие, корпуса. Все это способствует увеличению эффективности и снижению общих габаритов системы энергоснабжения.

В отличие от кремниевых МОП-транзисторов, полевые GaN-транзисторы не имеют оксидного слоя затвора, поэтому гамма-излучение не образует ловушек (дырок), которые обычно могут образовываться в слое окисла затвора, что характерно для кремниевых МОП-транзисторов. Кроме того, полевые GaN-транзисторы также хо-

рошо показывают себя в тестах со случайными воздействиями тяжелыми заряженными частицами (англ. Single Event Effects, SEE)².

На рисунке 1 показана структура полевого GaN-транзистора. Основой такого транзистора является стандартная кремниевая пластина. Нитрид галлия и другие необходимые материалы добавляются сверху, как показано на рисунке. Обратите внимание, что этот полевой GaN-транзистор является полупроводниковым прибором с вертикальной структурой, ток течет горизонтально через двумерный электронный газ в объеме нитрида галлия (он показан на диаграмме пунктиром).

Рис. 1. Структура мощного GaN-транзистора, предложенного компанией EPC

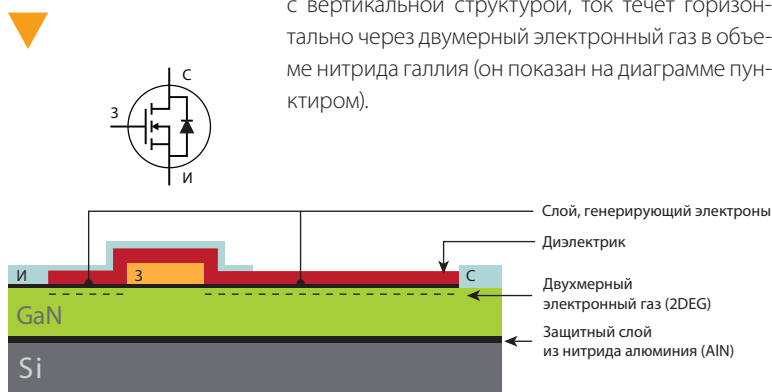
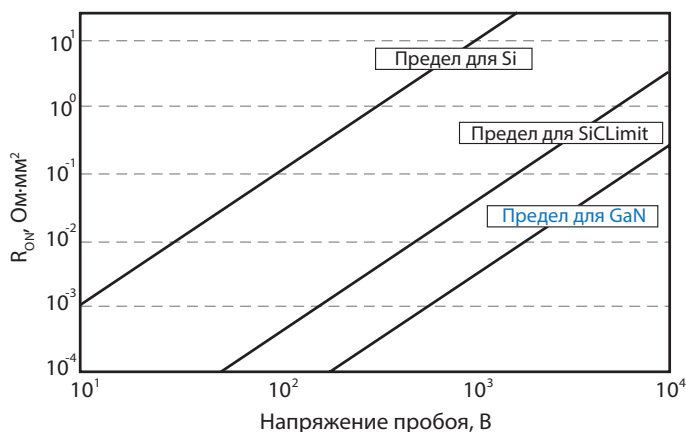


Рис. 2. Зависимость сопротивления в открытом состоянии от напряжения пробоя для основных полупроводниковых технологий



Как уже было сказано, нитрид галлия — это широкозонный полупроводник. По сравнению с кремнием разделение между стоком и истоком в нем теоретически может быть в 10 раз меньше. Для одного и того же сопротивления канала в открытом состоянии $r_{DS(ON)}$ ширина канала может быть значительно более узкой, частично как раз из-за гораздо меньшей длины.

В то время как кремниевые МОП-транзисторы очень близки к своему теоретическому пределу, полевые GaN-транзисторы, как это показано на рисунке 2, еще имеют возможности для своего дальнейшего совершенствования. Кроме того, для оборудования космических аппаратов, а именно использования в системах преобразования энергии, переход от стандартных

Ознакомьтесь с техническими характеристиками более подробно можно в приведенных ниже даташитах:



МОП-транзисторов к МОП-транзисторам космического исполнения приводит к ухудшению производительности, и они еще более проигрывают по сравнению с тем, что могут дать в этих приложениях полевые GaN-транзисторы.

Меньший размер кристалла GaN-транзисторов по сравнению с кремниевыми МОП-транзисторами позволяет повысить производительность импульсных источников питания. Это связано с тем, что они обладают меньшей выходной емкостью и минимальными значениями паразитных индуктивностей при их внутренней компоновке, что приводит к уменьшению коммутационных потерь и/или возможности работать на более высокой частоте преобразования энергии с одинаковыми по отношению к кремниевым МОП-транзисторам потерями.

Полевые GaN-транзисторы по своей природе не имеют обратного диода как такового. Однако есть механизм обратной проводимости, который выполняет его функцию. При этом при обратном направлении тока, в отличие от кремниевых МОП-транзисторов, здесь не происходит накопления неосновных носителей. А это значит, что потери на восстановление обратного диода отсутствуют. Так что это свойство рассматриваемых транзисторов удобно в том смысле, что нет обратного диода — нет и потерь обратного восстановления. Наличие потерь на обратное восстановление не только приводит к более длительному времени для восстановления заряда, но также зависит еще и от температуры, тока и проводимости диода. Возникает вопрос: если у полевого GaN-транзистора нет этого элемента, то как он проводит в обратном направлении (от источника к стоку), когда он заперт, то есть напряжение на затворе VGS равно нулю? Ответ прост — эти транзисторы проводят

в обратном направлении, используя тот же канал, который они используют в прямом направлении, минуя паразитный элемент. Падение напряжения при этой проводимости больше, чем падение на диоде, однако общая потеря может быть сведена к минимуму с использованием очень короткого времени восстановления. Из-за отсутствия обратного восстановления можно использовать мертвое время порядка всего 5–15 нс. Кроме того, при желании вдобавок к GaN-транзистору всегда можно установить дополнительный параллельный диод Шоттки, причем здесь, как правило, достаточно небольшого диода малой мощности.

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛЕВЫХ GAN-ТРАНЗИСТОРОВ В ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ

Как уже было сказано ранее, применение полевых GaN-транзисторов позволяет разработчикам систем электропитания дополнительно оптимизировать свои конструкции. Общие преимущества их использования в источниках питания включают в себя выигрыш в габаритах и весе, повышение эффективности (КПД), сокращение излучения электромагнитных помех (ЭМП) и, потенциально, меньшее напряжение и более широкую полосу пропускания контура управления, что уменьшает переходные процессы, возникающие при сбросе/набросе нагрузки и резком изменении входного напряжения.

Габариты и вес. Высокая скорость переключения и уменьшение паразитных эффектов приводят к уменьшению потерь в каждом цикле переключения. Разработчик системы электропитания может на свое усмотрение выбрать, как использовать это преимущество: либо повысить частоту преобразования, либо увеличить эффективность, либо найти приемлемый баланс между более высокой частотой и одновременная более высокой эффективностью. Поскольку сами по себе полевые GaN-транзисторы меньше по размерам, чем эквивалентные им кремниевые МОП-транзисторы, то уже это привлекательно для космических приложений, в которых меньший размер и вес всего источника питания дают выигрыш в полезной нагрузке. Повышенная эффективность источников питания, спроектированных на основе полевых GaN-транзисторов, может привести к уменьшению размера и соответственно веса системы теплоотвода, а также к уменьшению потребляемой мощности от бортового источника питания космического аппарата. Увеличенная частота может привести

к уменьшению номиналов и габаритов индуктивностей и конденсаторов, а силовые дросселя и катушки индуктивности фильтров с меньшим значением индуктивности могут привести к меньшим собственным потерям в их обмотках за счет снижения сопротивления по постоянному току R_{DC} .

Эффективность функционирования. Благодаря способности эффективно работать на более высоких частотах быстрдействие петли обратной связи контура управления также может быть увеличено, если в этом есть необходимость. Преимущества более быстрого отклика и, как следствие, более быстрого подавления негативных эффектов переходного процесса включают в себя возможность уменьшения емкости выходных конденсаторов и, соответственно, их габаритов. В этом случае с расширением полосы пропускания контура регулирования источник питания будет иметь возможность быстрее реагировать на сброс/наброс нагрузки или резкое изменение входного напряжения, так что ему нет необходимости накапливать большую компенсирующую такие возмущения энергию в выходных конденсаторах.

Электромагнитные помехи и электромагнитная совместимость. Увеличение частоты и скорости переключения может увеличить проблемы в части излучения ЭМП и выполнения требований по ЭМС, однако технология нитрида галлия имеет преимущества даже здесь. Уменьшенные паразитные емкости означают и меньше энергии, накапливаемой и выделяемой в этих паразитных элементах в течение каждого цикла переключения. Кроме того, из-за меньшего размера платы можно уменьшить и паразитные индуктивности. Ниже (рис. 3) приведен пример сигнала переключения, взятого с макета платы полумостового источника питания [3]. Обратите внимание, что

даже несмотря на то, что представленный понижающий преобразователь имеет очень короткое время нарастания и спада импульса, выбросы напряжения, благодаря оптимизированной компоновке платы, не столь велики, как можно было бы ожидать.

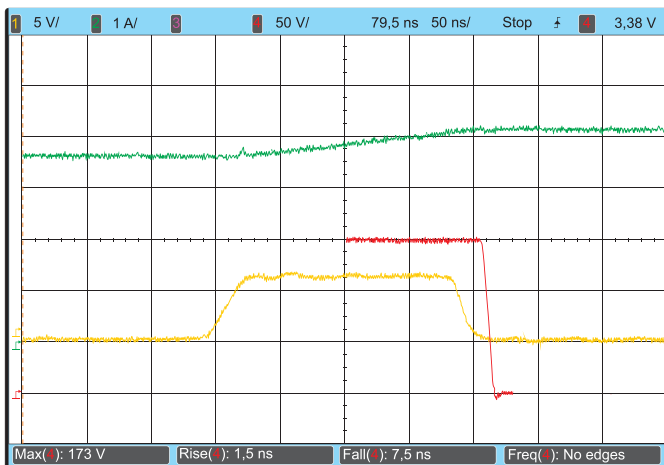
ДРАЙВЕР ЗАТВОРА И ЕГО ОСОБЕННОСТИ

Для того чтобы полностью реализовать на практике уникальные возможности полевых GaN-транзисторов, необходим специализированный драйвер затвора, быстрый и стабилизированный до идеального для транзисторов данной технологии выходного управляющего напряжения. Максимальное допустимое напряжение затвора нитрид-галлиевых транзисторов составляет 6 В, поэтому в большинстве применений коммерческого назначения в качестве управляющего напряжения используют уровень в 5 В. Однако для космических и высоконадежных приложений часто требуется повышенный запас по напряжению управления. Так что идеальное выходное напряжение драйвера затвора для этих приложений составляет 4,5 В. Это управляющее напряжение, если сравнивать его с 5 В, не оказывает еще заметного влияния на сопротивление канала транзистора в открытом состоянии $r_{DS(ON)}$. Однако в некоторых случаях использование напряжения менее 4,5 В может привести к слишком заметному увеличению $r_{DS(ON)}$ и, следовательно, к росту потерь проводимости. Нельзя забывать, что графики, приведенные в спецификациях GaN-транзисторов, относятся к типовым для конкретного устройства, они не должны интерпретироваться в контексте, что «номинальное напряжение драйвера затвора 4 В или менее — это хороший выбор». Так что здесь необходим взвешенный и вдумчивый подход.

Как уже отмечалось ранее, большинство коммерчески доступных контроллеров и драйверов полевых транзисторов рассчитаны на напряжение управления более 10 В, которое может повредить затвор полевого GaN-транзистора. Наличие драйвера, который может принимать уровни напряжения кремниевых МОП-транзисторов и обеспечивать их сдвиг вниз до необходимых 4,5 В, было бы для рассматриваемого нами случая просто идеальным выбором. Это позволило бы использовать доступные на рынке контроллеры, но при наличии такого драйвера в конечном решении достаточно было бы просто поменять силовые полевые транзисторы.

При рассмотрении решения драйвера есть два важных фактора: во-первых, нужно гаранти-

Рис. 3. Формы сигналов для полумостового понижающего импульсного преобразователя с входным напряжением $V_{IN}=150$ В и выходным напряжением $V_{OUT}=5$ В, при токе нагрузки 4 А и рабочей частоте 200 кГц. Канал CH1: входное напряжение V_{PWM} ; канал CH2: ток силового дросселя; канал CH4: напряжение на выходе ключей V_{OUT}



ровать, что он имеет хорошо стабилизированный выход напряжения управления затвором при переключении, то есть в динамическом режиме, а во-вторых, иметь полную уверенность в том, что полевой GaN-транзистор при любых внешних воздействиях будет оставаться включенным только в те моменты, когда это необходимо.

Должным образом спроектированный драйвер затвора будет поддерживать стабильное напряжение управления независимо от флуктуаций напряжения питания и изменения нагрузки по его выходу. Природа драйвера такова, что он должен иметь возможность стабильно подавать амперы тока в течение коротких промежутков времени.

Обычно это достигается путем настройки компенсации петли регулирования внутреннего стабилизатора напряжения драйвера для заданной для него выходной емкости. Поскольку об этом моменте, как правило, заботится изготовитель микросхемы, то реальная проблема разработчика системы питания связана с паразитной индуктивностью линии связи с этой емкостью и линиями подключения выхода драйвера к затвору GaN-транзистора.

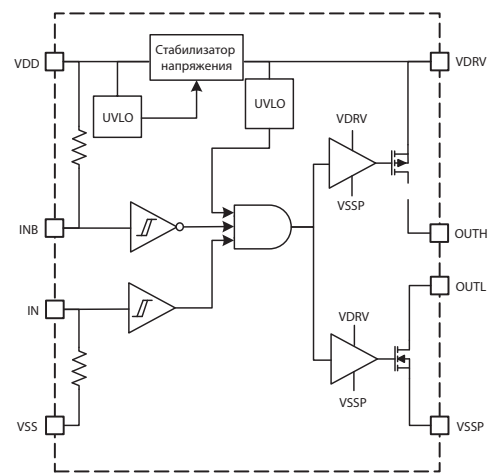
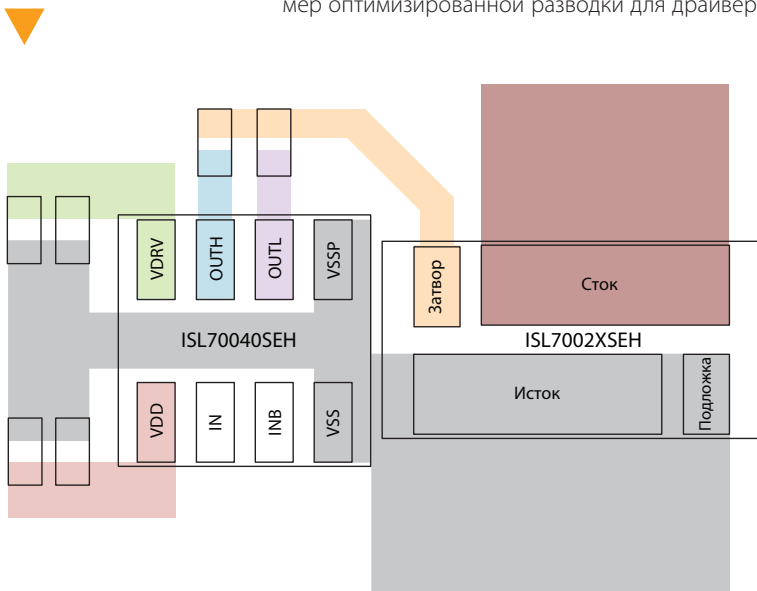
Генерация тока на уровне ампер в короткие промежутки времени приводит к большим переходным процессам напряжения, которые могут повредить затвор полевого транзистора, особенно если речь идет о таком чувствительном к перегрузкам по входу приборе, как полевой GaN-транзистор. Решая эту проблему, мы должны гарантировать, что проводник, соединяющий выход драйвера с затвором полевого транзистора, выполнен настолько коротким, насколько это практически возможно. В качестве иллюстрации на рисунке 4 приведен пример оптимизированной разводки для драйвера

нижней стороны полумостового преобразователя ISL70040SEH [4] в паре с ключом на полевом GaN-транзисторе ISL70024SEH [5].

Следующей задачей, которую необходимо решить, является обеспечение того, чтобы индуктивность обратной линии связи для возвратного тока, возникающего при выключении транзистора, также была минимизирована. В приведенном выше примере (рис. 4) для достижения минимального пути возврата ток от разряда емкости затвора течет через подложку, которая связана напрямую с плоскостью истока. Если на затворе при включении все еще имеют место нежелательные броски напряжения, то для их компенсации номиналы последовательных резисторов в цепи затвора можно несколько увеличить. Однако нужно учитывать, что это увеличивает время включения/выключения и повышает коммутационные потери.

Важно также убедиться, что драйвер имеет отказоустойчивую встроенную систему защиты, которая в случае аварийной ситуации выключит полевой транзистор. Также если на входы драйвера по каким-то причинам перестали поступать команды управления, то драйвер должен переходить в режим, при котором управляемый им транзистор будет гарантированно выключен. Другая ситуация, в которой нужно отключить транзистор, возникает, когда напряжение на затворе недостаточно высоко, чтобы включить полевой GaN-транзистор с оптимальным $r_{DS(OH)}$. Блок-схема драйвера полевого GaN-транзистора, который отвечает изложенным выше требованиям, приведена на рисунке 5.

Рис. 4. Оптимизированная для минимизации индуктивности в цепи драйвера затвора компоновка схемы управления ключом нижней стороны. Линия подключения максимально минимизирована и выполнена широким проводником. Путь тока — от VDRV (зеленый) к OUTH (синий) и Gate (оранжевый) и обратно до VSSP (серый) через OUTL (фиолетовый)



Помимо проблем чисто технического характера, проектирование драйвера именно для космических систем создает специфические сложности, которые также требуют решения. Чтобы

космические аппараты должным образом функционировали на орбите, их компоненты в условиях космического пространства должны поддерживать надлежащую работу при длительном воздействии с медленно (Low Dose Rate, LDR) и быстро (High Dose Rate, HDR) накопленной дозой облучения и полной поглощенной дозой ионизирующего излучения (Total Ionizing Dose, TID), а также быть устойчивыми к одиночным событиям (Single Event Effects, SEE), возникающим при воздействии таких ионизирующих частиц, как, например, тяжелые ионы.

Чтобы выполнить это требование, необходимо иметь драйвер полевого GaN-транзистора, который не изменяет своего состояния в момент, когда тяжелый ион приводит к образованию заряда на полупроводниковом переходе и не имеет сдвига порога срабатывания при воздействии накопленной дозы радиации с малой скоростью облучения. Такое накопление радиации более точно соответствует условиям космического пространства, чем накопление с высокой скоростью или воздействию частиц с высокой энергией, но в этих случаях, естественно, необходимо принимать в расчет и учитывать накопление полной поглощенной дозы

ионизирующего излучения. Вышесказанное, а именно сохранение состояния драйвера при накоплении радиации, — это то, что должно быть учтено при проектировании микросхемы на всех этапах ее разработки. Ниже приведено несколько графиков, которые показывают, как должен работать драйвер, когда он, в отличие от микросхем коммерческого назначения, не имеющих защиты от излучения, разрабатывается буквально с нуля для приложений, предназначенных работать в условиях открытого космоса. Испытания проводились в динамическом режиме, а также в режимах заземления (LDR GND и HDR GND) и смещения (LDR BIAS и HDR BIAS) драйвера для медленного (LDR) и быстрого (HDR) накопления дозы ионизирующего излучения TIR.

Для драйвера ISL70040SEH, рассмотренного выше, под воздействием частиц с LET (линейная передача энергии) с энергией 86 МэВ/мг/см² не было замечено каких-либо переходных процессов одиночного события (Single Event Transients, SET), зафиксированных со статическим входом. Это значит, что драйвер является устойчивым к таким воздействиям и не будет непреднамеренно включать или выключать силовой транзистор GaN из-за удара тяжелого иона.



Рис. 5.
Блок-схема драйвера ключа нижней стороны ISL70040SEH



Рис. 6.
Напряжение на выходе драйвера затвора ISL70040SEH в зависимости от высокой (50–300 рад (Si)/с) и низкой (менее 10 мрад (Si)/с), скорости накопления дозы ионизирующего излучения

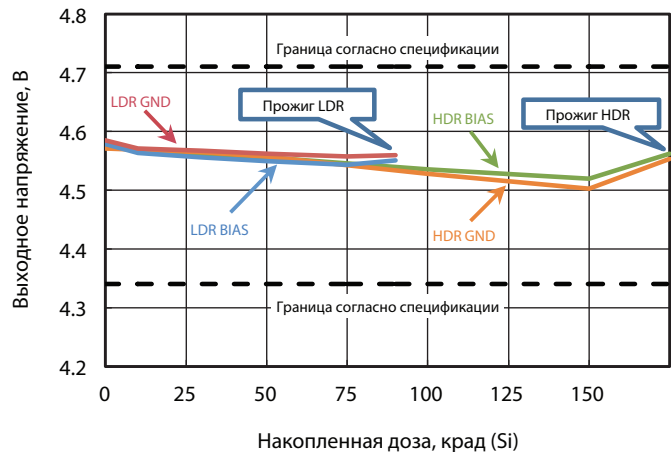
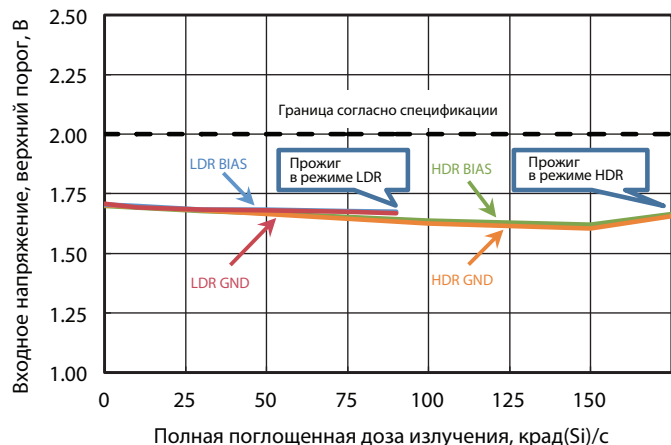


Рис. 7.
Входное напряжение логики драйвера затвора ISL70040SEH, верхний порог, в зависимости от высокой (50–300 рад (Si)/с) и низкой (менее 10 мрад (Si)/с) скорости накопления дозы ионизирующего излучения



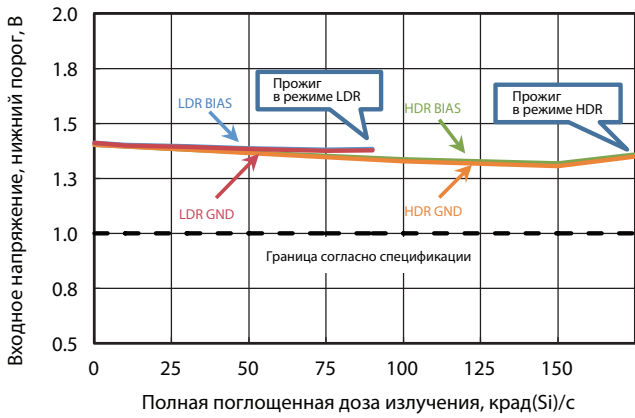


Рис. 8.

Входное напряжение логики драйвера затвора ISL70040SEH, нижний порог, в зависимости от высокой (50–300 рад (Si)/с) и низкой (менее 10 мрад(Si)/с) скорости накопления дозы ионизирующего излучения

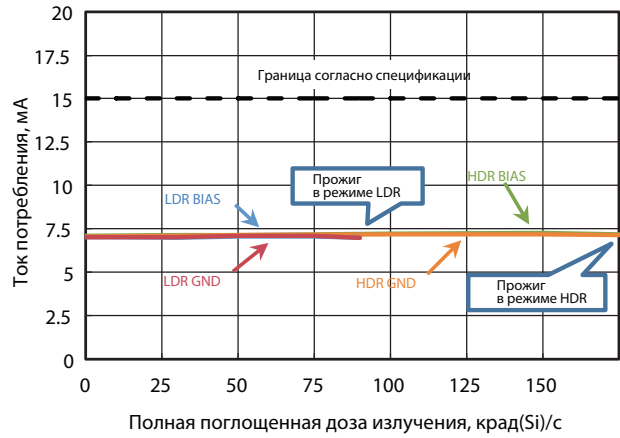


Рис. 9.

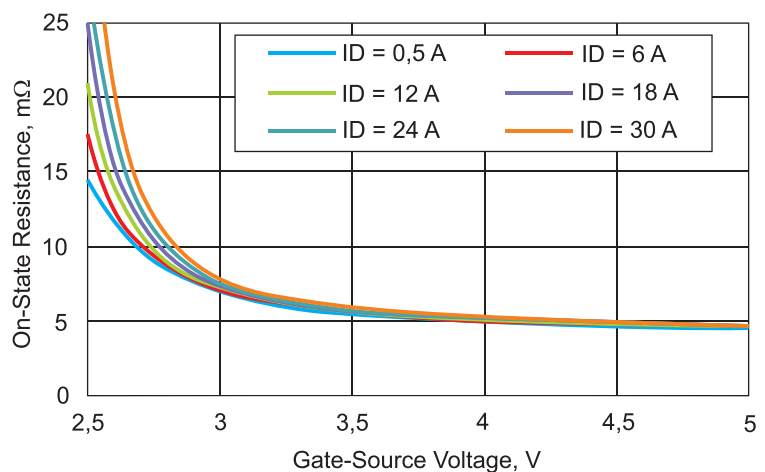
Ток потребления драйвера затвора ISL73040SEH в рабочем режиме в зависимости от высокой (50–300 рад (Si)/с) и низкой (менее 10 мрад (Si)/с) скорости накопления дозы ионизирующего излучения

КРАТКИЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛЕВЫХ GAN-ТРАНЗИСТОРОВ ISL70023SEH / ISL70024SEH

ПАРАМЕТР	ISL70023SEH	ISL70024SEH
Напряжение пробоя	100 В	200 В
Ток коммутации	60 А	7,5 А
Сопротивление открытого канала $R_{ds(on)}$	5 мОм	45 мОм
Общий заряд затвора	14 нКл	2,5 нКл
Диапазон рабочих температур	-55 °С...+125 °С	
Стойкость по накопленной дозе	75 крад (Si) (LDR 0,01 рад (Si)/с) 100 крад (Si) (HDR 50–300 рад (Si)/с)	
Стойкость к воздействию ТЗЧ	86 МэВ*см ² /мг	
Компактный SMD-корпус общей площадью 42 мм ²		



Рис. 10. Сопротивление открытого канала ISL70023SEH



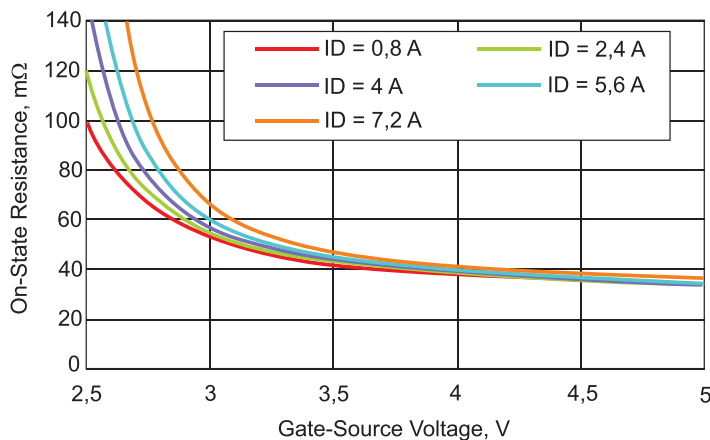


Рис. 11.
Сопротивление открытого канала ISL70024SEH

Рис. 12.
Компактный SMD-корпус полевых GaN-транзисторов ISL70023SEH / ISL70024SEH



КРАТКИЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДРАЙВЕРА ЗАТВОРА ПОЛЕВЫХ GAN-ТРАНЗИСТОРОВ ISL70040SEH

- Широкий диапазон рабочих напряжений: 4,5...13,2 В.
- Уровень напряжения на логических входах: до 14,7 В (независимо от напряжения, подаваемого на VDD).
- Инвертирующие и не инвертирующие входы.
- Оптимизирован для управления GaN-транзисторами в режиме обогащения:
 - внутренне регулируемое напряжение затвора 4,5 В;
 - независимые выходы для регулирования скорости включения/выключения.
- Диапазон рабочих температур: от -55 °C до +125 °C.

Рис. 13.
Компактный SMD-корпус драйвера затвора полевых GaN-транзисторов ISL70040SEH



- Стойкость к радиации:
 - накопленная доза: LDR (0,01 рад(Si)/с): 75 крад (Si); HDR (50–300 рад(Si)/с): 100 крад (Si);
 - воздействие ТЗЧ: 86 МэВ*см²/мг.
- Компактный SMD-корпус 6x6 мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полевые транзисторы, выполненные по технологии нитрида галлия, идеально подходят для применения в беспилотных космических летательных аппаратах, но для раскрытия их потенциала в полной мере для них требуется хороший драйвер затвора. Вместе с таким драйвером полевые GaN-транзисторы могут использоваться на более высоких частотах преобразования, что обеспечивает высокую эффективность и уменьшенные габариты конечного приложения, кроме того, они, по сравнению с решениями на основе традиционных кремниевых транзисторов, требуют и меньшее напряжение питания драйвера.

Яркими представителями данного решения являются полевые GaN-транзисторы семейства ISL70023SEH / ISL70024SEH и драйвер затвора ISL70040SEH. Новые компоненты обладают превосходными характеристиками радиационной стойкости и, что немаловажно, имеют модификации, которые не попадают под экспортное ограничение, не требуют оформления лицензии и свободны для ввоза на территорию РФ. Доступны инженерные образцы и отладочные платы.



Литература:

1. HEMTs In Space — A New Take On Rad Hardness, Compound Semiconductor, <https://compoundsemiconductor.net/article/99757-HEMTs-in-space-a-new-take-on-rad-hardness.html>
2. Alex Lidow et al, GaN Transistors for Efficient Power Conversion, Wiley, 2015, p. 172-178.
3. EPC9014 Quick Start Guide, EPC, page 2 Figure 4.
4. ISL70040SEH, ISL73040SEH Radiation Hardened Low-Side GaN FET Driver, FN8984, Rev.4.00, Apr 6, 2018, Renesas Electronics Corporation // <https://www.intersil.com/en/products/space-and-harsh-environment/rad-hard-power/rh-gan-fets/ISL70040SEH.html>
5. ISL70024SEH, ISL73024SEH 200V, 7.5A Enhancement Mode GaN Power Transistor, FN8976, Rev. 3.00, Mar 8, 2018, Renesas Electronics Corporation // <http://www.intersil.com/products/isl70024seh>