

КЛЮЧЕВЫЕ МОМЕНТЫ ПРИ ВЫБОРЕ SUPER-JUNCTION MOSFET

ДЖОН ХЭНКОК (JON HANCOCK), главный инженер, Infineon Technologies

Десятилетняя эволюция развития технологии Super-Junction MOSFET достигла пределов применения кремниевых технологий. Уменьшение сопротивления канала $R_{DS[ON]}$ на единицу площади активной зоны и продолжающееся снижение размеров кристалла улучшают соотношение стоимость/производительность [1]. Однако эти достижения не решают всех проблем разработчиков источников питания.

Фактически, успех в решении некоторых вопросов, связанных с зарядом затвора, привел к усложнению задачи разработки надежных схем из-за недостаточно хорошо проработанной топологии [2]. В силу этого обстоятельства возникла необходимость лучше понять, как электрические характеристики высоковольтных MOSFET влияют на работу конкретного приложения, чтобы затем их оптимизировать. И только после этого становятся понятными модели функционирования различных топологий схем. Придерживаясь такой методологии, попробуем проанализировать эволюцию Super-Junction MOSFET, начиная с появившихся 10 лет назад CoolMOS™, и определить перспективы развития этого направления.

Во-первых, удалось значительно снизить $R_{DS[ON]}$ по сравнению с технологией, популярной 10 лет назад в PCIM (Power Conversion Intelligent Motion). В 2005 г. технология CoolMOS позволила уменьшить $R_{DS[ON]}$ с 39 до 25 мОм/см² [3, 4]. Данная технология также дала возможность существенно уменьшить заряд затвора Q_{GD} MOSFET в целом на 60—65%. На рисунке 1 для сравнения приведены характеристики заряда затвора для трех семейств полевых транзисторов диапазона 190...199 мОм:

C3 (2003), CP (2005) и C6 (2009) при токе нагрузки 20 А.

С учетом значительного снижения выходной емкости C_{OSS} , играющей основную роль в механизме потерь в режиме жесткого переключения, эффективность переключения семейства CP значительно превзошла эффективность семейства C3 [3—5]. Это очень хорошо, но остальные характеристики MOSFET не улучшились.

СЛИШКОМ БЫСТРОЕ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ?

Из всего многообразия схемотехнических решений и режимов работы рассмотрим только наиболее распространенные из них. Основная категория преобразователей реализована на основе однотактных схем, которые используют жесткое переключение и работают либо в прямом или инверсном режиме (прямоходовые, обратногоходовые или повышающие преобразователи), либо в режимах DCM (Discontinuous Conduction Mode — режим прерывистых токов), CrCM (Critical Conduction mode — режим критической проводимости), либо CCM (Continuous Conduction Mode — режим непрерывных токов). Первые два режима характеризуются треугольной формой токового сигнала с нулевым первоначальным

током и низкими потерями при включении, а также следующими требованиями к рабочим характеристикам: минимальное сопротивление в проводящем состоянии и малые потери при выключении на большом токе. В данном случае концепция Super-Junction MOSFET работает хорошо из-за низкого $R_{DS[ON]}$ и нелинейного сглаживающего эффекта выходной емкости [3, 4].

Низкие C_{OSS} также ведут к малым E_{OSS} при включении, поддерживая DCM-режим. В таких схемах режим выключения квази-ZVS (ZVS — отключение при нулевом напряжении) способствует повышению эффективности, поскольку канал проводимости быстро закрывается и выходная емкость заряжается током индуктивной нагрузки.

Низкий заряд затвора CoolMOS CP определяется малой величиной емкости затвор-сток, что повышает скорость переключения, но снижает «контроль» над величиной di/dt . В большинстве рассматриваемых схем, работающих в паре с трансформатором, это обстоятельство не приводит к каким-либо затруднениям, поскольку внутренний импеданс схемы стремится ограничить di/dt и dV/dt . Разработчикам повышающих PFC-преобразователей приходится при высоких значениях di/dt и dV/dt уделять особое внимание низким импедансам схемы и потенциалам. Обратной стороной небольшого заряда затвора является низкая проходная емкость C_{RSS} и большая чувствительность к разводке печатной платы. На рисунке 2 иллюстрируется функциональная схема MOSFET вместе с паразитными элементами печатной платы, которые в определенных случаях приводят к возникновению колебательных процессов в моменты включения и выключения. Кроме внутренней емкости обратной связи сток-затвор имеется внешняя емкость, главным образом определяемая корпусом MOSFET и проводниками платы.

Хуже того, влияние внешней емкости совместно с паразитными индуктив-

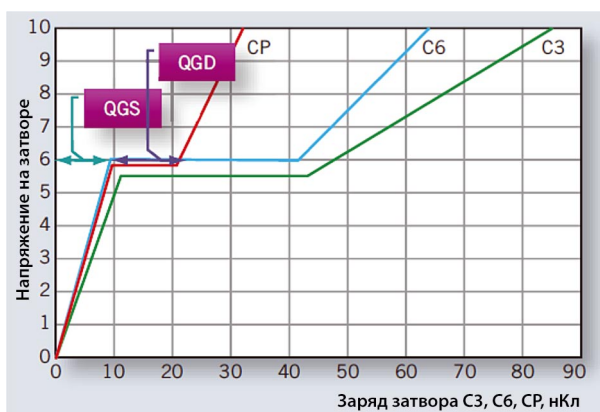
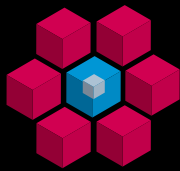


Рис. 1. Сравнение зарядов затворов для устройств CoolMOS C3, C6, CP группы 190 мОм при $I_b = 20$ А



newElectronics / RUSSIA



19 – 21

АПРЕЛЯ



МОСКВА
ЭКСПОЦЕНТР
НА КРАСНОЙ ПРЕСНЕ

главная
российская
выставка
электронных
компонентов
и модулей

ВЕДУЩИЕ РОССИЙСКИЕ
ПОСТАВЩИКИ ЭЛЕКТРОННЫХ
КОМПОНЕНТОВ И МОДУЛЕЙ
НА ДЕЛОВОМ ФОРУМЕ И ВЫСТАВКЕ
«НОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА / РОССИЯ»

- новая продукция мировых технологических лидеров
- новые сервисы для разработчиков и производителей электронной аппаратуры
- новые программы сотрудничества

Симметрон
ГРУППА КОМПАНИЙ



ЮЕ-Интернейшл

АЛЬТОНИКА



Компэл



Petro in Trade



www.platan.ru ПЛАТАН

АТПП.

PROMELECTRONICS

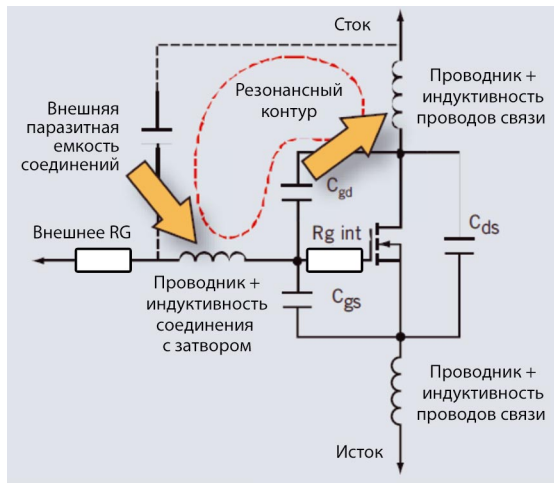


Рис. 2. При совместной работе MOSFET и печатной платы следует учитывать влияние внутренних и внешних емкостей

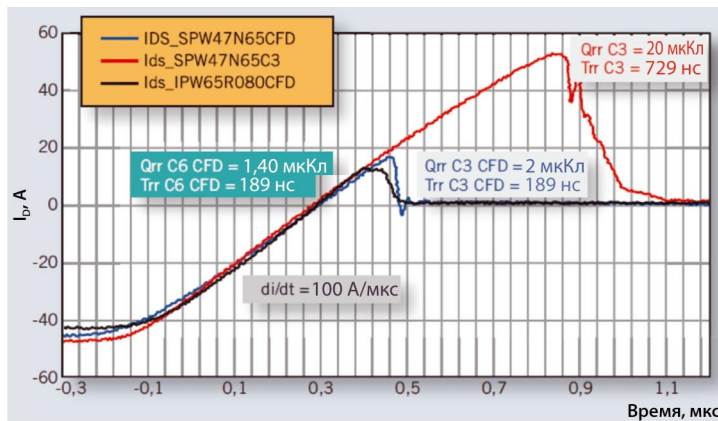


Рис. 3. Снижение Q_{rr} и сглаживание наклона при отключении тока улучшает поведение встроенного диода в режиме переключения для CFD-устройств

ностями ведет к появлению дополнительного фазового сдвига. Основным способом борьбы с этим является минимизация внешней емкости между стоком и затвором. Кроме того, можно прибегнуть и к таким паллиативным мерам как использование ферритовых колец с большими резистивными потерями порядка 30...50 Ом на частоте 100 МГц [1]. Таким образом, на практике достигается быстрое переключение. Однако для некоторых схем и приложений оно может оказаться слишком быстрым.

ВЗВЕШЕННЫЙ ПОДХОД

Итак, если для одного класса приложений хорошо подходят MOSFET семейства CP, характеризующиеся низкими потерями при выключении и очень быстрым переключением, то для других приложений необходим более взвешенный подход. Для этого в 2009 г. были разработаны MOSFET семейств C6/E6, позволяющие контролировать di/dt и dV/dt в широком диапазоне токов нагрузки.

В таких устройствах как двухтактный преобразователь, в котором через встроенный диод может протекать или не протекать реактивный ток, необходимо отслеживать скорость переключения, даже если MOSFET при быстром переключении работает довольно-таки надежно. Это следует из ограничений, характерных для большинства плавающих драйверов (floating drivers) или драйверов с полумостовой конфигурацией, у которых часто верхний предел CMRR (Common Mode Rejection Ratio — коэффициент ослабления синфазных сигналов) находится в диапазоне 15...40 В/нс. Поскольку уменьшение выходной емкости снижает потери при включении, dV/dt повышается. Контроль над di/dt и dV/dt должен осуществляться с высокой скоростью в широком диапазоне токов нагрузки, что необходимо для того, чтобы при увеличении тока нагрузки поддерживалась заданная скорость переключения выходных импульсов. Это требование следует учитывать при расчете емкости затво-

ра и обеспечении управления скоростью переключения затвора в широком диапазоне токов стока вплоть до типовых максимальных значений напряжений около 400 В.

Еще более строгие требования предъявляются к рабочему режиму встроенного диода и его быстрого восстановления после переключения. Необходим внимательный подход к разработке встроенного диода, а также к емкости затвора, чтобы обеспечить согласованную и надежную работу таких мощных силовых мостов, а также управлять скоростью di/dt и пиковым напряжением при коммутации. Для этого требуется оптимизировать процесс рекомбинации носителей, что позволит уменьшить объемный заряд Q_{rr} встроенного диода [6].

Необходимость данного требования еще более велика для Super-Junction MOSFET с их компенсационными структурами, поскольку они ограничивают рост напряжения на диоде до тех пор, пока практически все носители не будут удалены с нижнего эпитаксиального слоя рядом с подложкой. Это обычно приводит к резкому падению тока и высоким значениям di/dt в конце интервала переключения. Высокие значения di/dt , в свою очередь, приводят к появлению dV/dt на индуктивности контура преобразователя, что ведет к возникновению всплесков перенапряжений и лавинообразных пробоев. На рисунке 3 показано, как совершенствование технологии и схемы позволяет улучшить суммарный Q_{rr} и наклон di/dt в конце фазы восстановления.

ВОЗМОЖНОСТИ УЛУЧШЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК

Рассмотренный подход показал, что в высоковольтных MOSFET можно улучшить не только $R_{DS(ON)}$. Однако после анализа публикаций на эту тему становится ясным, что разработчики стремятся улучшить именно этот параметр (см. рис. 4). Однако данные публикации являются только вершиной айсберга и не раскрывают всех направлений работы лидеров индустрии.

Проблемы с улучшением $R_{DS(ON)}$ Super-Junction MOSFET заключаются не в формировании концептуального представления о необходимых структурах, а в развитии реальных производственных технологий, приводящих к улучшению Cr_k (индекса воспроизводимости процесса). Причина этих проблем лежит в фундаментальных физических взаимоотношениях, требуемых для получения низкого $R_{DS(ON)}$, к числу которых относится соотношение геометрических размеров столбиков, ограничивающее степень леги-

 ufi
Approved
Event

Весна в электронике!

19-21 АПРЕЛЯ 2011. МОСКВА, КРОКУС ЭКСПО

14-Я МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА
КОМПОНЕНТОВ И КОМПЛЕКТУЮЩИХ
ДЛЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

E • X • P • O 
ELECTRONICA

www.expoelectronica.ru

+7 (812) 380 6003/07/00, electron@primexpo.ru

Организаторы:



При содействии:



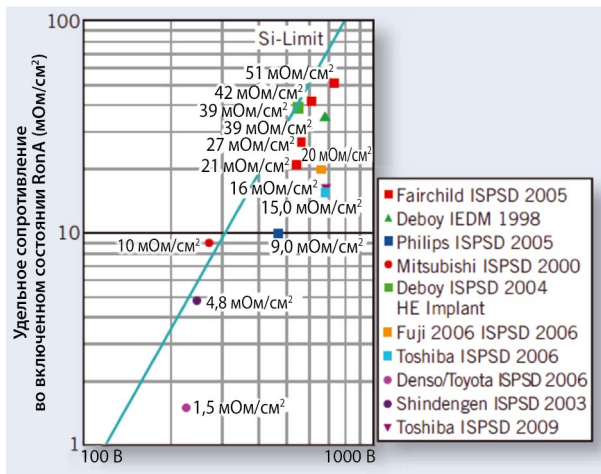


Рис. 4. SJ MOSFET, реализованные по технологии Trench Filling с самыми низкими показателями $R_{DS(ON)}$ из обзора опубликованных работ

рования, которое используется для достижения заданного блокирующего напряжения.

Соотношение геометрических размеров Super-junction столбика определяется выражением:

$$A_{SJ} = t_{SJ} / W_{SJ}$$

где t_{SJ} — высота столбика для компенсации заряда (p-столбики под основными p-карманами); W_{SJ} — период ячеек. Тогда для SJ MOSFET:

$$A \propto 1/A_{SJ}$$

Из этих соотношений следует вывод о необходимости изготовления столбиков с высоким соотношением геометрических размеров и периодичностью, а также о потребности соблюдения баланса зарядов при достаточно высоких уровнях легирования. На рисунке 4 представлены значения $R_{DS(ON)}$, достигнутые различными кампаниями. В большинстве слу-

чаев вместо традиционной технологии многослойного эпитаксиального выращивания с отжигом, используемой для большей части существующих поколений серийно выпускаемой продукции, применялся метод Trench Filling, позаимствованный из технологии изготовления DRAM. В последних публикациях [7] внимание уделено недавно разработанным методам измерений и анализа, позволяющих определять количество структур и оценивать ход процесса для контроля над серийным производством. Другие технологические подходы, например имплантация при высоких энергиях, продемонстрировали свою состоятельность в лабораторных условиях, но пока недостаточно проработаны для внедрения в промышленные системы [8].

Несмотря на то, что в [9] еще в 2005 г. был предсказан дальнейший заметный технологический прогресс, он пока медленно осуществляется в коммерческих масштабах, возможно, из-за проблем с серийным внедрением техно-

логий Trench Filling. Однако история показывает, что мы запаздываем только с высокопроизводительными приложениями со средним бюджетом, но не с гораздо более дорогостоящими решениями на базе SiC и GaN, скачок развития которых ожидается в 2011—2012 гг. Вероятно, тогда на рынке специализированных приложений появится широкий ряд изделий с характеристиками, удовлетворяющими спросу потребителей с разным бюджетом.

ЛИТЕРАТУРА

1. J. Hancock, F. Bjork, G. Deboy. "AN-CoolMOS-CP-01 Application Note CoolMOS CP"//Infineon Technologies AG. Austria.
2. L. Lorenz, I. Zverev, J. Hancock. "Second Generation CoolMOS Improves on Previous Generation's Characteristics"//PCIM Magazine. Nov. 2000.
3. J. Hancock. "Meeting the Challenge for Offline SMPS Through Improved Semiconductor Current Density".
4. J. Hancock. "Superjunction FETs Boost Efficiency in PWMs"//Power Electronics Technology Magazine. July 2005.
5. J. Hancock. "Bridgeless PFC Boosts Low-line Efficiency"//Power Electronics Technology Magazine. February 2008.
6. G. Deboy, J. Hancock, M. Puerschel, U. Wahl, A. Willmeroth. "Compensation devices solve failure mode of the Phase Shift ZVS Bridge during light load operation"//Proceedings APEC Conference 2002.
7. S. Ono, L. Zhang, H. Ohta, M. Watanabe, W. Saito, S. Sato, H. Sugaya, and M. Yamaguchi. "Development of 600V-class trench filling SJ-MOSFET with SSRM analysis technology"//ISPSD 2009.
8. M. Rub, M. Bar, G. Deboy, F.J. Niedernostheide, M. Schmitt, H. Schulze, A. Willmeroth. "550V Superjunction 3.9 Ω/mm² Transistor Formed by 25 MeV Masked BorDS [on] Implantation"//ISPSD 2004.
9. I. Bencuya. "The Future of Power Semiconductors"//APEC 2005 Plenary.

СОБЫТИЯ РЫНКА

| TEXAS INSTRUMENTS ОТТЕЧНЯЕТ FREESCALE И NXP | По данным ABI Research, компания Texas Instruments (TI) заняла первое место в рейтинге Vendor Matrix среди поставщиков интегральных схем стандарта 802.15.4. На втором и третьем местах, соответственно, компании Freescale Semiconductor и NXP Semiconductors.

Vendor Matrix — аналитическое средство компании ABI Research, обеспечивающее четкое понимание положения вендоров в тех или иных сегментах рынка. Вендоры оцениваются по таким важным параметрам как «инновация» и «внедрение». Первый параметр охватывает ряд характеристик поставляемой продукции, включая энергопотребление, Rx-чувствительность, размеры памяти, параметры микроконтроллеров, форм-фактор, а также наличие стека протоколов. Под вторым параметром подразумевается положение поставщика на рынке, деятельность компании на вертикальных рынках и уровень поддержки заказчиков.

Texas Instruments удалось занять первое место в рейтинге за счет высокого сочетания обоих параметров. Freescale заняла второе место благодаря высокому показателю внедрения, а NXP — благодаря приобретению Jennic. Цель этого приобретения — интеграция номенклатуры маломощных РЧ-решений Jennic в продукцию NXP, однако пока рано судить о том, усилит ли поддержка NXP положение Jennic.

www.elcomdesign.ru

От редактора



С удовольствием представляю наш новый интернет-проект. Он задумывался не как электронная версия журнала, но как отдельное направление в работе медиа-группы «Электроника». Мы создаем отдельную профессиональную среду, рассчитанную, прежде всего на технических специалистов. Сайт будет знакомить с информацией на мировом и российском рынках электроники: новости, обзорные статьи, интервью с сотрудниками компаний – участниками рынка.

Новости

Российской микроэлектронике не хватает потребителя

© 21 мая 2010, [Российский рынок](#)

К 2025 г. российская радиоэлектроника должна занимать более 50% российского рынка электронной аппаратуры. Перемены произойдут и в структуре отрасли.

Front-end-модуль GPS

© 23 мая 2010, [Технологии](#)

GPS-модуль BGM781N11 компании Infineon является, по данным производителя, самым миниатюрным в мире. В модуле интегрированы все важные функции, требующиеся для усиления и фильтрации сигнала GPS.

Утверждены отечественные стандарты в области ESD-защиты

Интервью



«Иновации являются основой наших успехов»

Андреас Шеффер, директор по продажам компании Xilinx в Центральной Европе.

Обзоры

Источники бесперебойного питания для стационарных и подвижных объектов

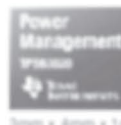
© 10 июня 2010, [Энергоснабжение](#)

Для электроснабжения ответственных потребителей, которые не допускают перерывов питающего напряжения, ИБП постоянного тока широко используются уже третье столетие. Без таких ИБП была бы не возможна работа

Поиск по сайту

[Вход](#) [Регистрация](#)

Компактный эффективный импульсный 4-A преобразователь



TPS63020

- Повышение эффективности до 96 %
- Конструктивная гибкость
- Размер резонанса < 100 мкВ

www.elcomdesign.ru

Новый номер

№4 (2010) [Содержание](#)
[Архив](#)



Microchip приобретает компанию ZeroG Wireless

© 26 мая 2010, [Мировой рынок](#)

Это приобретение позволит укрепить позиции Microchip в области беспроводных предложений и поможет разработчикам легко интегрировать решения на основе 8-, 16- и 32-разрядных PIC-микроконтроллеров в современные беспроводные сетевые инфраструктуры.

[Все новости](#)

Пресс-релизы

Ericsson поделится своими ноу-хау на «ЭкспоЭлектронике»

© 1 июня 2010, [Компании](#)

Компания Ericsson научит разработчиков новаторским подходам в проектировании современных систем электропитания и расскажет об особенностях концепции Digital Power. В рамках выставки «ЭкспоЭлектроника» в Москве, компания Ericsson совместно с компанией «МакроГрупп» организуют для разработчиков практический семинар, посвященный цифровым источникам питания.

«Датум» - передача данных

Медиагруппа «Электроника» организует Первую всероссийскую конференцию «Датум - передача данных». Цель конференции – представить аспекты передачи данных во всех физических средах: эфир, медь, оптоволокно.

8 - 11 июня 2010 AUTOMATICA 2010

Пермь, Москва
AUTOMATICA является значимым мероприятием, объединяющим все сегменты робототехники и автоматизации.

[Все события](#)

ЕЖЕДНЕВНЫЕ НОВОСТИ РЫНКА ЭЛЕКТРОНИКИ

СОБЫТИЯ

АНАЛИТИКА

ИНТЕРВЬЮ

ОБЗОРЫ

Время электроники

www.russianelectronics.ru

электроника
медиагруппа