

# СОВРЕМЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

## ВОЗДЕЙСТВИЕ РАДИАЦИИ НА СИЛОВУЮ ЭЛЕКТРОНИКУ

В номере:

ВОЛНОВОДНО-РЕЗОНАНСНОЕ  
РАСПРОСТРАНЕНИЕ  
РАДИАЦИОННЫХ ПОТОКОВ

ТИ ДЛЯ ИНДУСТРИИ 4.0  
И ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ

БЧЗ ДЛЯ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ  
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

ЗАЩИТА  
ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ  
ОТ ГИТ ЭМИ ЯВ

ОБЛАЧНОЕ  
ПРОГРАММИРОВАНИЕ IoT

СОВЕТСКИЙ «ДОН КИХОТ»  
В РАДИОСТРОЕНИИ

и многое другое...



App Store



Google Play

**MARKET**

## 4 Russian Market News

**MODERN TECHNOLOGIES**

## 8 The Phenomenon and Consequence of Waveguide-Resonance Propagation and X-Ray Fluxes Interaction. Part 2

*Evgeniy Egorov, Vladimir Egorov, Alexey Galitsyn*

## 14 Influence of Radiation Factors on Semiconductor Components of Power Electronics. Part 1

*Viktor Bezrodny***ELEMENTS AND COMPONENTS**

## 20 Modern Components for Industry 4.0 and the IoT from Texas Instruments

*Yuriy Petropavlovskiy***DEVICES AND SYSTEMS**

## Oscilloscope Triggering Advanced Course: Trigger Performance Characteristics

*Colin F. Mattson*

## Block of Sensitive Elements for Inertial Control Systems

*Dmitriy Gamanuk*

## Electronic Relay for Protection of Power Electrical Equipment from Geomagnetic-Induced Currents of the Electromagnetic Pulse of a Nuclear Explosion

*Vladimir Gurevich***ENGINEERING SOLUTIONS**

## 42 Unipolar Power Supply of an Amplifier with Powerful Op Amps in Bridge Connection. Part 2

*Alexey Kuzminov*

## 46 NRF24L01 Radio Module for the IoT

*Oleg Valpa*

## 52 Magnetometer on the UART-USB Module

*Andrey Shabronov*

## 54 Controller Board for Security Detectors «Astra-5» and IO 102-26

*Sergey Shishkin***DESIGN AND SIMULATION**

## 58 Increasing the Resource of Reed-Relay by Optimizing the Acting Magnetomotive Force. Part 1

*Nikolay Lemeshko, Pavel Stroonin*

## 62 Cloud Programming of IoT Projects

*Oleg Valpa*

## 66 Review of Altium Concord Pro

*Aleksandr Fen'***PAGES OF HISTORY**72 Soviet «Don Quixote» and a Pioneer in Radio Engineering. To the 125<sup>th</sup> Anniversary of the Birth of Academician A.L. Mints*Vladimir Bartenev***COMPETENT OPINION**

## 76 Quality Management Systems and Expanding the Capabilities of Organizations Based on them

*Dmitriy Gamanuk*

Журнал «Современная электроника»

Издаётся с 2004 года

Главный редактор А.А. Смирнов

Редакционная коллегия А.Е. Балакирев, В.К. Жданкин,

С.А. Сорокин, Р.Х. Хакимов

Вёрстка А.М. Бабийчук

Обложка Д.В. Юсим

Распространение С.Ю. Чепурова (info@soel.ru)

Реклама И.Е. Савина (advert@soel.ru)

Учредитель и издатель ООО «СТА-ПРЕСС»

Генеральный директор К.В. Седов

Адрес учредителя и издателя:

117279, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 108, пом/ком/эт I/67/тех

Почтовый адрес: 119313, Москва, а/я 26

Тел.: (495) 232-0087 • Факс: (495) 232-1653

info@soel.ru • www.soel.ru

Производственно-практический журнал

Выходит 9 раз в год. Тираж 10 000 экз. Цена свободная

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия (свидетельство ПИ № ФС77-18792 от 28 октября 2004 г.) Свидетельство № 00271-000 о внесении в Реестр надёжных партнёров ТПП РФ.

Отпечатано: ООО «МЕДИАКОЛОР».

Адрес: Москва, Сигнальный проезд, 19, бизнес-центр Вэлдан  
Тел./факс: (499) 903-6952

Перепечатка материалов допускается только с письменного разрешения редакции. Ответственность за содержание рекламы несут рекламодатели. Ответственность за содержание статей несут авторы. Материалы, переданные редакции, не рецензируются и не возвращаются. Мнение редакции не обязательно совпадает с мнением авторов. Все упомянутые в публикациях журнала наименования продукции и товарные знаки являются собственностью соответствующих владельцев.

© СТА-ПРЕСС, 2020

**МОБИЛЬНОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ «СОВРЕМЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА»**

можно скачать в Google Play в разделе «Приложения/Бизнес» (пользователям устройств на платформе Android) и в App Store в разделе «Бизнес» (пользователям iOS). Ко всем номерам журнала доступ в приложении бесплатный.

**ПОДПИСКА**

Концепция распространения журнала –  
**БЕСПЛАТНАЯ ПОДПИСКА ДЛЯ СПЕЦИАЛИСТОВ.**

Предусмотрена подписка на печатную или электронную версию журнала. Условие сохранения такой подписки – своевременное её продление каждый год.

**ПЛАТНАЯ ПОДПИСКА С ГАРАНТИРОВАННОЙ ДОСТАВКОЙ**  
 Преимущества:

- гарантированная доставка журнала, тогда как при бесплатной подписке редакция гарантирует только отправку, но не доставку журнала;
- подписка доступна любому желающему по всему миру.

**ОФОРМЛЕНИЕ ПЛАТНОЙ ПОДПИСКИ**

В любом почтовом отделении России,  
 подписное агентство «Роспечать»:

Тел.: (495) 921-2550.

Индексы на полугодие – 46459, на год – 36280.

Подписное агентство «Урал-Пресс»:

Тел.: (499) 700-0507 • http://www.ural-press.ru

## РЕКЛАМОДАТЕЛИ

Bulgin	6
EREMEX (Delta Design)	13
IEF	24
Keysight Technologies	4-я стр. обл.
MENTOR	5, 7
Raystar Optronics	6
Schaefer	26
XP EMCO	45
АРБЕЛОС	34
ММП-Ирбис	41
ПРОСОФТ	5
ПСБ Технологии	4
ТЕСТПРИБОР	50-51
ЭЛМ (ALTIUM)	4, 67

**МОБИЛЬНОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ  
ВСЕ НОМЕРА БЕСПЛАТНО!**



## РЫНОК

**4** Новости российского рынка

## СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

**8** Явление и последствия волноводно-резонансного распространения и взаимодействия радиационных потоков. Часть 2

*Евгений Егоров, Владимир Егоров, Алексей Галицын*

**14** Воздействие радиационных факторов на полупроводниковые компоненты силовой электроники. Часть 1

*Виктор Безродный*

## ЭЛЕМЕНТЫ И КОМПОНЕНТЫ

**20** Современные компоненты для систем Индустрии 4.0 и Интернета вещей от Texas Instruments

*Юрий Петропавловский*

## ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

**28** Характеристики системы запуска осциллографа

*Колин Мэттсон*

**32** Блок чувствительных элементов для инерциальных систем управления

*Дмитрий Гаманюк*

**36** Электронное реле для защиты силового электрооборудования от воздействия геомагнитно-индуцированных токов ЭМИ ЯВ

*Владимир Гуревич*

## ИНЖЕНЕРНЫЕ РЕШЕНИЯ

**42** Однополярное питание аудиоусилителя на мощных ОУ в мостовом включении. Часть 2

*Алексей Кузьминов*

**46** Модуль радиосвязи nRF24L01 для Интернета вещей

*Олег Вальпа*

**52** Магнитометр на модуле UART-USB

*Андрей Шабронов*

**54** Плата контроллера для охранных извещателей «Астра-5» и ИО 102-26

*Сергей Шишкин*

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

**58** Повышение ресурса герконов за счёт оптимизации воздействующей магнитодвижущей силы. Часть 1

*Николай Лемешко, Павел Струнин*

**62** Облачное программирование проектов Интернета вещей

*Олег Вальпа*

**66** Обзор Altium Concord Pro

*Александр Фень*

## СТРАНИЦЫ ИСТОРИИ

**72** Советский «Дон Кихот» и первопроходец в радиостроении. К 125-летию со дня рождения академика А.Л. Минца

*Владимир Бартенов*

## КОМПЕТЕНТНОЕ МНЕНИЕ

**76** Системы менеджмента качества и расширение возможностей организаций на их основе

*Дмитрий Гаманюк*

# Воздействие радиационных факторов на полупроводниковые компоненты силовой электроники

## Часть 1

Виктор Безродный (Москва)

При эксплуатации в космических и военных системах силовые полупроводниковые устройства подвергаются воздействию разнообразных источников радиации. В статье рассматриваются общие вопросы воздействия радиоактивного излучения на полупроводниковые приборы и представлены наиболее популярные радиационно-стойкие компоненты для применения в источниках питания специальной техники подразделения компании Infineon Technologies AG – International Rectifier HiRel Products, доступные для свободного экспорта в Россию.

Выбор силовых полупроводниковых устройств для применения в космических и военных системах, которые будут подвергаться воздействию ионизирующих излучений, является сложной задачей вследствие обширного ряда радиационных факторов и особенностей применений в силовых устройствах. В некоторых случаях будет достаточно применения устройств без специфицированных показателей радиационной стойкости, в других ситуациях потребуются радиационно-стойкие устройства. Задача выбора компонентов осложняется отсутствием для большинства выпускаемых промышленных приборов, используемых в военных встраиваемых системах, доступных данных, связанных с эксплуатацией в радиоактивных условиях. Более того, стойкость силовых устройств к радиации может быть снижена изменением процесса или конструкции при их производстве, что не влияет на их функционирование в обычной обстановке.

Силовые компоненты являются важными для любой электронной системы. Некоторые эффекты, вызванные воздействием радиации, являются простым параметрическим смещением, таким как смещение пороговых значений (порогов) при суммарной накопленной дозе радиации. Другие воздействия являются в большей степени катастрофическими, такие как одиночный эффект пробоя подзатворного диэлектрика в МДП-структурах (Single Event Gate Rapture, SEGR) или одиночный эффект вторичного пробоя в мощ-

ных МДП-транзисторах (Single Event Burnout, SEB). Для предотвращения таких эффектов требуется применение схем резервирования в силовой части системы и дополнительные силовые компоненты для переключения между альтернативными силовыми трактами.

Надёжное функционирование электронных систем может потребоваться в различных типах радиационного окружения – от спутников на низких или высоких орбитах до военных систем, которые должны быть способными выдерживать выбросы гамма лучей или нейтронов.

### ЭФФЕКТЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА СИЛОВЫЕ УСТРОЙСТВА

Существует несколько различных видов ионизирующих излучений, каждый из которых отличается воздействием на полупроводниковые устройства. Эти виды радиации включают высокоэнергетичные фотоны (рентгеновское и гамма-излучение), нейтроны (высокоэнергетичные и тепловые) и высокоэнергетичные частицы (субатомные и атомные). Каждый тип излучения вносит свой вклад в суммарную накопленную дозу (Total Ionizing Dose, TID), которая определяет энергию, поглощаемую материалами электронных устройств.

Из определения следует, что ионизирующее излучение имеет достаточную энергию для выбивания электронов из атомов. В материалах это приводит к тому, что разрушаются химические связи, и атомы покидают свои нормальные положения в кристаллической решётке.



Нарушение химической связи порождает два вида эффектов: постоянные заряды в диэлектриках и ловушки на границах раздела (поверхностные ловушки) в полупроводниковой изолирующей поверхности раздела. Смещение атомов из устойчивых положений в кристаллической решётке приводит к появлению центров генерации/рекомбинации в полупроводниковых приборах.

Накопление объёмного заряда в подзатворном диэлектрике служит причиной смещений порогового напряжения мощных MOSFET-транзисторов. Во всех силовых устройствах это может также быть причиной изменений блокирующего напряжения (напряжения пробоя) вследствие изменений распределения поля в соединении перехода.

Поверхностные ловушки являются причиной смещений в пороговом напряжении и уменьшения коэффициента усиления и уровня нагрузки по току стока MOSFET-транзистора. Поверхностные ловушки также приводят к повышению сопротивления открытого канала  $R_{DS(ON)}$ .

Смещение атомов из устойчивых положений в кристаллической решётке создаёт центры генерирования/рекомбинации. Этот дефект смещения, в свою очередь, приводит к уменьшению коэффициента усиления биполярных устройств и повышению тока утечки всех обратно смещённых переходов. Силовые устройства в большей степени подвержены данным эффектам, чем низковольтные устройства, вследствие больших площадей их переходов.

Степень повреждения из-за смещения атомов, вызванного воздействием радиации, зависит от природы излучения, а также суммарной накопленной дозы радиации. По сравнению с протонами или нейтронами, воздействие фотонов не приводит к особенно большим повреждениям из-за смещения атомов, так как фотоны имеют не настолько высокую кинетическую энергию.

Эффекты ещё одного типа происходят при вспышке излучения. Основным результатом таких выбросов является генерирование большого числа носителей в обеднённых областях. Это может привести к «зашёлкиванию» устройства. Из этого состояния оно не может восстановиться, пока не будет отключено питание. В случае силовых устройств при воздействии вспышки излучения в фиксированном состоянии может рассеиваться мощность, достаточная для повреждения устройства. Это может случиться, даже если устройство разработано таким образом, чтобы предотвратить режим «зашёлкивания». Проблема заключается в том, что фототок, генерируемый вспышкой излучения, может протекать в устройстве с высоким обратным напряжением смещения в выключенном состоянии. Рассеяние мощности приведёт к нагреву устройства и возможному превышению температурного предела. Способность силового устройства выдерживать вспышку излучения будет зависеть от используемых в схеме силовых устройств элементов, таких как число индуктивных элементов, установленных последовательно в устройстве, количество конденсаторов, включённых параллельно устройству, времени восстановления схемы управления и тепловых сопротивлений на участках кристалл–корпус–плата.

Высокоэнергетичные частицы, такие как галактические космические лучи (ГКЛ), могут вызывать ряд одиночных эффектов (Single Event Effect, SEE), включая одиночный сбой (Single Event Upset, SEU) и тиристорный эффект – возбуждение паразитных тиристорных полупроводниковых структур (Single Event Latchup). В силовых устройствах основными проблемами являются одиночный эффект вторичного пробоя в мощных MOSFET-транзисторах и одиночный эффект пробоя подзатворного диэлектрика. Так как эти пробойи являются разрушающими отказами, разработчики должны выбирать устройства,

которые будут выдерживать воздействие любых ожидаемых высокоэнергетичных частиц.

Одиночные эффекты воздействия радиации являются критичными для схем, которые управляют силовыми устройствами, таких как ШИМ-контроллеры, драйверы затворов или цифровые сигнальные процессоры. Они могут приводить к импульсным помехам в линиях силовой шины или к состояниям, которые вызовут разрушение силовых устройств, таким как одновременное включение высоковольтной и низковольтной частей полумостовой схемы.

## РАДИАЦИОННЫЕ ОКРУЖАЮЩИЕ СРЕДЫ

К счастью, для большей части применений разработчик силовых приборов не должен учитывать все эти источники радиации. Однако в околоземном пространстве радиация является главной проблемой для электроники. Это пространство обычно делится на три зоны: низкие круговые, средневысотные и геостационарные орбиты.

Низкие круговые орбиты используются для полётов космических кораблей с космонавтами на борту, таких как Международная космическая станция (МКС) и многие миссии по изучению и исследованию Земли, а также низкоорбитальные космические аппараты (КА) для связи с подвижными объектами. Низкие орбиты простираются на высоте до 1000 км, ниже радиационных поясов Ван Аллена, первый из которых располагается выше 1500 км. Космические аппараты (КА) на этой высоте не накапливают большую дозу радиации. Однако они являются объектом одиночных эффектов, так как ГКЛ могут проникать ниже этих высот. Для работы на низких орбитах должны быть выбраны такие силовые полупроводниковые устройства, которые смогут выдержать воздействие ГКЛ при рабочих напряжениях без возникновения одиночных эффектов SEB или SEGR.

Средневысотные орбиты попадают в зону радиационных поясов Ван Аллена, трасса средневысотных спутников проходит между первым и вторым поясами Ван Аллена (на высоте от 500 до 15 000 км). Эти пояса сформированы заряженными частицами, захваченными магнитным полем Земли. Внутренний пояс имеет высокие плотности захваченных электронов и протонов, которые могут

существенно отражаться на требованиях к накопленной дозе и неионизирующему радиационному воздействию (результат смещения атомов в полупроводниковом материале из устойчивых положений в кристаллической решётке). Так как магнитное поле Земли не является простым диполем, расположенным в центре Земли, внутренний пояс Ван Аллена простирается до низких орбит в зоне, называемой Южной Атлантической аномалией. Внешний радиационный пояс Ван Аллена содержит электроны и сильно деформирован солнечным ветром. Эти электроны вызывают существенные дозовые воздействия на спутники.

В «целевой» зоне между двумя поясами Ван Аллена уровни радиации ниже, чем в пределах любого из двух поясов. Радиация в этой зоне зависит от солнечных вспышек, так как они могут создавать временные радиационные пояса, которые сохраняются в течение значительного времени.

Геостационарные орбиты сохраняют фиксированное положение над экватором Земли. Они используются для КА, которые будут передавать сигнал на стационарные антенны, такие как спутники для систем радио- и телевизионного вещания. Данные орбиты расположены выше радиационных поясов Ван Аллена и выше большей части магнитной экранирующей оболочки Земли, что подвергает их прямым воздействиям солнечной радиации, включая солнечные вспышки и ГКЛ. Воздействие суммарной дозы не очень высокое. Однако в течение срока активного существования КА будет существовать множество возможностей для появления одиночных эффектов, вызванных ГКЛ.

Существует много других классов космических миссий со специальными требованиями, например, межпланетные миссии, где должны быть учтены уникальные окружающие среды около других планет, или эллиптические орбиты (орбиты с большим коэффициентом эксцентриситета) вокруг Земли, где КА будут подвергаться воздействию окружающих сред каждой из ранее упомянутых зон.

Военные системы часто должны быть разработаны таким образом, чтобы выдерживать воздействия ближних ядерных взрывов. Воздействие суммарной дозы (дозовые эффекты) от таких взрывов обычно низкое, но выброс гамма-лучей способен значительно повредить любое электронное оборудование.

Энергетическая система особенно уязвима из-за её многочисленных электрических ёмкостей с накопленной энергией и наличия высоких напряжений. Сохранить работоспособность должны не только отдельные устройства, но и вся система в целом должна вернуться в нормальное рабочее состояние после радиационно-индуцированного переходного процесса.

### ПРИМЕНЕНИЯ СИЛОВЫХ УСТРОЙСТВ

Сфера применений для силовых полупроводниковых приборов в радиационных окружениях является довольно широкой и включает в себя прежде всего DC/DC-преобразователи для различных напряжений, схемы управления приводами и переключателями. В аппаратуре КА используются шины с напряжениями в диапазоне от 28 до 120 В. Разработчики некоторых систем рассматривают возможности использования шин с напряжениями выше 600 В, но на данный момент такие решения не реализованы на практике. В то же время рабочими напряжениями для низковольтного электронного оборудования являются обычно напряжения от 0,8 до 15 В. В связи с этим для КА требуются высокоэффективные DC/DC-преобразователи для формирования низких уровней напряжений от основной шины. Силовые MOSFET-транзисторы используются в качестве ключей практически во всех DC/DC-преобразователях. Данные транзисторы также применяются в качестве синхронных выпрямителей во вторичной цепи, так как подобные выпрямители в преобразователях с низким выходным напряжением позволяют получить КПД выше 90%.

Силовые MOSFET-транзисторы также используются вместо механических реле для коммутации нагрузки из-за их высокой надёжности и низкой мощности, необходимой для их переключения. Обычно для коммутации нагрузки используются транзисторы с каналом р-типа, поскольку именно в этом случае напряжение управления затвором выше напряжения шины. Применение р-канальных транзисторов обусловлено также увеличением порогового напряжения по модулю с ростом величины поглощённой дозы, вплоть до напряжения пробоя затвора, что повышает уровень отказа ключевого элемента.

Высокие напряжения необходимы для питания усилителей на лампах бегущей волны передатчиков данных со спутника на наземную станцию или радаров, установленных в космосе, а также для некоторых ламп импульсных лазеров для атмосферных исследований.

### ВЫБОР ПОДХОДЯЩЕГО УСТРОЙСТВА

Разработчики, выбирающие силовые устройства для применения в радиационной среде, должны очень хорошо знать требования миссии. Анализ наихудшего сценария требует рассмотрения параметрических смещений, а также режимов катастрофического отказа. Некоторые из этих параметрических смещений имеют следствия, которые могут быть не очень очевидными, такие как влияние смещения порогов на времена задержки. Например, порог силового MOSFET-транзистора с каналом n-типа смещается в сторону полностью открытого состояния при воздействии суммарной накопленной дозы радиации. Побочным эффектом снижения порога является уменьшение времени задержки включения и увеличение времени задержки выключения.

Современные коммерческие силовые устройства быстро эволюционируют по пути снижения потерь мощности и повышения функциональности. Новые устройства обычно имеют более тонкие окислы затвора и неглубокие переходы по сравнению с предыдущими поколениями. Это приводит к способности лучше выдерживать воздействие накопленной дозы, но ухудшает стойкость к одиночным эффектам или быстрым дозовым эффектам. Необходимо проводить тестирование для определения реакции устройства на вероятное воздействие радиации.

Ограничение допустимых значений часто используется для гарантированного сохранения работоспособности устройств в условиях воздействия радиации. Но это не является состоятельным методом, который будет гарантировать живучесть, и по-прежнему требует проведения тестирования. Как правило, ограничение допустимых параметров приводит к значительному снижению эффективности энергетической системы. Так как стоимость мощности в системах питания КА весьма высокая, снижение эффективности

может приводить к повышению общей стоимости системы.

Жёсткие условия эксплуатации военных и космических систем требуют применения электронных устройств, которые способны работать при высоких уровнях радиации. Сегодня на рынке доступны радиационно-стойкие силовые MOSFET-транзисторы для большей части применений, описанных выше. Например, подразделение International Rectifier HiRel Products компании Infineon Technologies AG разрабатывает и производит радиационно-стойкие электронные устройства, используемые для преобразования энергии, помещает их в герметичные корпуса для обеспечения дополнительной защиты. Эти устройства включают в себя простые компоненты, интегрированные системы, драйверы затворов транзисторов MOSFET/IGBT, полупроводниковые реле и сложные компоненты, такие как DC/DC-преобразователи, преобразователи типа POL, линейные регуляторы напряжения со сверхнизким падением напряжения.

С начала 90-х годов в России существует проблема обеспечения ракетно-космической промышленности высококачественной радиационно-стойкой электронно-компонентной базой (ЭКБ). В связи с этим отечественные разработчики вынуждены использовать ЭКБ иностранного производства, главным образом производства США. Однако 27 марта 2014 года Министерство торговли США ввело мораторий на выдачу американским компаниям лицензий на экспорт товаров и продукции двойного назначения. Приостановка оформления лицензий распространялась и на радиационно-стойкие компоненты.

Внедрение новой системы регулирования экспорта технологий и продукции военного назначения в США позволило компании IR перевести ряд DC/DC-преобразователей космической категории качества и многие другие радиационно-стойкие компоненты из номенклатуры International Rectifier из перечня ITAR USML Category XV(e) в Перечень критических товаров (CCL) под контроль Правил экспортного регулирования (EAR99). Таким образом, многие радиационно-стойкие компоненты компании International Rectifier стали доступны для экспорта в Россию без оформления лицензии в государственных ведомствах США,

ответственных за регулирование экспорта технологий и продукции военного назначения.

Классификация продукции International Rectifier, представленная в таблице 1, основана на постановлении, опубликованном 10 ноября 2014 года. Тем не менее необходимо помнить, что подразделение ведомства, ответственного за соблюдение национальной безопасности при экспортных поставках из США, – Отдел промышленности и безопасности Министерства торговли США – сохраняет за собой право вносить поправки в постановление в любое время.

На протяжении более 30 лет International Rectifier HiRel Products предлагает уникальный перечень высоконадёжной продукции для преобразования и управления энергией, которая находит широкое применение в условиях воздействия жёстких внешних факторов, характерных для бортовой аппаратуры ракетно-космической техники, авиационной аппаратуры и другой электроники специального назначения. Далее кратко представлены категории радиационно-стойкой продукции компании IR.

### РАДИАЦИОННО-СТОЙКИЕ MOSFET-ТРАНЗИСТОРЫ

Компания IR внесла существенный вклад в создание мощных транзисторов MOSFET с малым сопротивлением канала при включении. В 1978 году была разработана технология производства MOSFET-транзисторов с гексагональной (шестиугольной) формой ячейки – HEXFET. Такая форма ячеек обеспечивает высокую плотность их упаковки на площади кристалла. Размер ячейки – 5 мкм. В 1989 году с использованием этой технологии было создано первое поколение радиационно-стойких MOSFET-транзисторов, стойких к дозовым эффектам, – поколение GEN4. Диапазон напряжений составлял 100...500 В (*n*-канал) и 60...200 В (*p*-канал).

Второе поколение (R5) радиационно-стойких силовых MOSFET-транзисторов с полосковой структурой ячеек (StripFET) было выпущено в 1998 году. Их отличает особая надёжность при работе в предельных режимах. Транзисторы StripFET имеют более компактную ячейку (1,5 мкм) и пониженные потери на проводимость и переключение по сравнению с HEXFET в диапазоне напряжений до

Таблица 1. Классификация продукции подразделения International Rectifier по ECCN

Диоды (корпусированные и кристаллы, диоды Шоттки, быстродействующие)	EAR99
MOSFET-транзисторы без специфицированных показателей радиационной стойкости (исполнение: корпусированные и кристаллы)	EAR99
Интегральные микросхемы без специфицированных показателей радиационной стойкости (корпусированные и кристаллы, например драйверы затворов)	EAR99
Радиационно-устойчивые DC/DC-преобразователи (SEE < 80 МэВ·см <sup>2</sup> /мг; TID < 100 крад, например серии AMA, AMF, AMR, L., H., D...)	EAR99
Радиационно-стойкие MOSFET-транзисторы (корпусированные и кристаллы, TID > 100 крад, SEE > 80 МэВ·см <sup>2</sup> /мг, например поколения R5, R6, R7)	9E515.e (EAR99)
Радиационно-стойкие MOSFET-транзисторы (корпусированные и кристаллы, TID > 500 крад, SEE < 80 МэВ·см <sup>2</sup> /мг, например поколения GEN IV)	3E001
Радиационно-стойкие MOSFET-транзисторы (корпусированные и кристаллы, TID > 100 крад, < 500 крад; SEE < 80 МэВ·см <sup>2</sup> /мг, например поколения GEN IV)	EAR99
Радиационно-стойкие микросхемы драйвера затворов RIC7113 (корпусированные и кристаллы)	9E515.e (3E001) (EAR99)
Радиационно-стойкие полупроводниковые реле (TID > 100 крад)	9E515.e (EAR99)
Радиационно-стойкие DC/DC-преобразователи (TID > 100 крад; SEE > 80 МэВ·см <sup>2</sup> /мг, например серии M3G, LS, GH, S, DH, ARA)	9E515.e (EAR99)
Радиационно-стойкие DC/DC-преобразователи, выполненные на печатной плате (TID > 100 крад; SEE > 80 МэВ·см <sup>2</sup> /мг, например серии MX, EX, ZX)	9E515.e (EAR99)

200 В. Кроме того, транзисторы поколения R5 имеют улучшенные показатели стойкости к одиночным радиационным эффектам SEB и SEGR. Диапазон напряжений составлял 30...250 В (*n*-канал) и 60...200 В (*p*-канал).

В 2002 году выпущены транзисторы поколения R6, имеющие лучшее в своём классе значение сопротивления открытого канала  $R_{DS(ON)}$ . В этих транзисторах, также изготовленных по технологии StripFET и имеющих размер ячейки 0,6 мкм, улучшена область безопасной работы при воздействии ТЗЧ. Форма кристалла лучше подходит для обеспечения показателя  $R_{DS(ON)}/Q_G$ . Диапазон напряжений в *n*-канале – 100...600 В.

Технология управления затвором логическим уровнем впервые появилась в MOSFET-транзисторах поколения R7. Эти транзисторы были разработаны специально для преобразователей POL и синхронного выпрямления. Показатели TID/SEE сходны с показателями устройств поколения R6. Диапазон напряжений составил 60...250 В (*n*-канал) и 60 В (*p*-канал).

Транзисторы поколения R8, которые были представлены в 2012 году, выполнены по Trench-технологии (вертикальное расположение затвора). Благодаря вертикальному расположению затвора транзисторы этого типа имеют минимальный размер ячейки (0,5 мкм) и самое низкое сопротивление открытого канала. Показатели TID/SEE сходны с показателями устройств поколения R6. Диапазон напряжений в *n*-канале – 30...60 В.

В 2017 году компания выпустила первые транзисторы поколения R9 на осно-

ве собственной платформы. По сравнению с предыдущими новая технология предлагает улучшение размеров, веса и мощности. Это особенно важно в таких системах, как спутники с высокопроизводительной бортовой аппаратурой. MOSFET-транзисторы с максимальным рабочим напряжением 100 В и током 35 А идеально подходят для ответственных применений, требующих срока активного существования 15 лет и выше. Целевые применения включают в себя DC/DC-преобразователи космического уровня качества, преобразователи напряжений промежуточной шины, контроллеры электроприводов и другие устройства с высокой скоростью переключения.

Разработанные модели IRHNJ9A7130 и IRHNJ9A3130 характеризуются стойкостью в области дозовых эффектов 100 и 300 крад соответственно. Типовое значение сопротивления открытого канала  $R_{DS(ON)}$  составляет 25 мОм, что на 33% меньше, чем у транзисторов предыдущего поколения. В сочетании с повышенным током стока (35 против 22 А) это позволяет обеспечивать новым транзисторам повышенную плотность мощности и сниженные потери мощности в коммутационных применениях. Новые транзисторы характеризуются повышенной стойкостью к воздействию тяжёлых заряженных частиц (ТЗЧ) с линейными потерями энергии до 90 МэВ·см<sup>2</sup>/мг, что на 10% лучше, чем у транзисторов предыдущих поколений. Оба устройства выполнены в лёгком герметичном керамическом корпусе для поверхност-

Таблица 2. Радиационно-стойкие транзисторы MOSFET с каналом n-типа, TID > 100 крад, SEE с LET = 60 МэВ·см<sup>2</sup>/мг

Модель	Температура хранения, °C	Макс. ток стока I <sub>DS</sub> , А	Макс. ток стока при T <sub>DS</sub> = 25 °C, А	Макс. ток стока при T <sub>DS</sub> = 100 °C, А	Макс. ток стока при T <sub>DS</sub> = 175 °C, А	Макс. ток стока при T <sub>DS</sub> = 200 °C, А	Макс. ток стока при T <sub>DS</sub> = 250 °C, А
IRHLUB7S70Z4	60	680	3,6	0,8	±10	Z	UB
IRHLF7S110	100	290	11	6	±10	1	TO-39
IRHF6S7130	100	64	50	11,7	±20	3	TO-39
IRHNJ6S7130	100	42	50	22	±20	3	SMD 0.5
IRHYS6S7130CM	100	42	50	20	±20	3	TO-257 (LO)
IRHMS6S7160	100	11	170	45	±20	6	TO-254 (LO)
IRHNA6S7160	100	10	170	56	±20	6	SMD 2
IRHF6S7230	200	153	42	9,1	±20	3	TO-39
IRHNJ6S7230	200	130	42	16	±20	3	SMD 0.5
IRHYS6S7230CM	200	130	42	16	±20	3	TO-257 (LO)
IRHMS6S7260	200	29	240	45	±20	6	TO-254 (LO)
IRHNA6S7260	200	28	240	56	±20	6	SMD 2
IRHF6S7234	250	233	50	5,4	±20	3	TO-39
IRHNJ6S7234	250	210	50	12,4	±20	3	SMD 0.5
IRHYS6S7234CM	250	220	40	12	±20	6	TO-257 (LO)
IRHMS6S7264	250	41	220	45	±20	6	TO-254 (LO)
IRHNA6S7264	250	40	220	50	±20	6	SMD 2

Таблица 3. Радиационно-стойкие транзисторы MOSFET с каналом p-типа, TID > 100 крад, SEE с LET = 60 МэВ·см<sup>2</sup>/мг

Модель	Температура хранения, °C	Макс. ток стока I <sub>DS</sub> , А	Макс. ток стока при T <sub>DS</sub> = 25 °C, А	Макс. ток стока при T <sub>DS</sub> = 100 °C, А	Макс. ток стока при T <sub>DS</sub> = 175 °C, А	Макс. ток стока при T <sub>DS</sub> = 200 °C, А	Макс. ток стока при T <sub>DS</sub> = 250 °C, А
IRHLNJ7S97034	-60	72	36	-22	±10	3	SMD 0.5
IRHLNYS797034CM	-60	74	36	-20	±10	3	TO-257 (LO)
IRHLF7S97034	-60	95	36	-1,6	±10	3	TO-39
IRHLUB7S97034	-60	1350	2,8	-0,53	±10	Z	UB
IRHNA5S97064	-60	16	200	-56	±20	6	SMD 2
IRHMS5S97064	-60	17	160	-45	±20	6	TO-254 (LO)
IRHNJ5S97130	-100	205	45	-12,5	±20	3	SMD 0.5
IRHYS5S97130CM	-100	205	45	-12,5	±20	3	TO-257 (LO)
IRHF5S97130	-100	228	45	-6,7	±20	3	TO-39
IRHNA5S97160	-100	49	170	-52	±20	6	SMD 2
IRHMS5S97160	-100	50	170	-45	±20	6	TO-254 (LO)
IRHNJ5S97230	-200	505	45	-8	±20	3	SMD 0.5
IRHYS5S97230CM	-200	510	45	-8	±20	3	TO-257 (LO)
IRHF5S97230	-200	533	45	-4,5	±20	3	TO-39
IRHNA5S97260	-200	102	180	-35,5	±20	6	SMD 2
IRHMS5S97260	-200	103	180	-32	±20	6	TO-254 (LO)

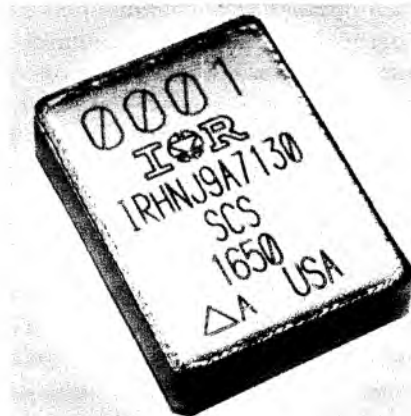


Рис. 1. Внешний вид MOSFET-транзистора поколения R9

ного монтажа (SMD-0.5) с размерами 10,28×7,64×3,12 мм. Внешний вид корпуса транзистора поколения R9 показан на рисунке 1.

Следует отметить, что компания IR является создателем ряда технологий корпусирования кристаллов силовых транзисторов для снижения активного сопротивления, улучшения теплопередачи и повышения плотности мощности. В таблицах 2 и 3 представлены конкретные модели радиационно-стойких MOSFET-транзисторов с каналами n- и p-типа, которые не имеют ограничений для поставки в Россию. При экспорте в Россию необходимо иметь основную информацию о конечном получателе поставляемых компонентов и видах продукции, производимой из них.

Во второй части статьи будут рассмотрены радиационно-стойкие твердотельные реле, высоковольтные интегральные микросхемы драйверов и DC/DC-преобразователи.

НОВОСТИ МИРА

**СОВНАМ GAISLER УСПЕШНО ВЕРИФИЦИРОВАЛА СВОЙ ПЕРВЫЙ RISC-V С ПОМОЩЬЮ ALDEC RIVIERA-PRO**

Компания Aldec, Inc., пионер в моделировании смешанного кода HDL и аппаратной верификации проектов FPGA и ASIC, объявила о том, что компания Cobham Gaisler успешно проверила свою первую линейку процессоров RISC-V, называемую NOEL-V™, используя программу Riviera-PRO™ для симуляции смешанного кода HDL.

NOEL-V представляет собой синтезируемую модель VHDL 64-разрядного процессо-

ра, которая реализует архитектуру RISC-V с усовершенствованным 7-ступенчатым сдвоенным конвейером и обеспечивает до 4,69 CoreMark/МГц.

«Как ведущему поставщику микропроцессоров для космического применения нам необходимо было проверить NOEL-V с помощью надёжного и высокопроизводительного RTL-симулятора с расширенными возможностями отладки и проверки DRС», – сказал Ян Андерссон, технический директор Cobham Gaisler. – Мы использовали Riviera-PRO для функционального моделирования, моделирования на уровне вентилей и синхронизации и были пол-

ностью удовлетворены его мощной поддержкой VHDL, скоростью компиляции и моделирования».

«Благодаря модели с открытым исходным кодом, RISC-V представляет собой технологию, изменяющую рынок, для аппаратного обеспечения, которое охватывает различные встроенные приложения, включая оборудование для работы в космосе и критически важные задачи», – сказал Луи Де Луна, директор по маркетингу Aldec. – Мы рады помогать и работать с Cobham Gaisler и с нетерпением ждём новых задач по проверке будущих поколений NOEL-V».