

СОВРЕМЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

9

2024



Электронная
версия этого
журнала

ГЕТЕРОПЕРЕХОД В XXI ВЕК:

ЖОРЕС АЛФЁРОВ. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЛАЗЕРЫ

ПРОДОЛЖЕНИЕ СЛЕДУЕТ:

НОВИНКИ В DELTA DESIGN 4.0

Я Б В ТЕХНОЛОГИ ПОШЁЛ, ПУСТЬ МЕНЯ НАУЧАТ:

**О СТАНДАРТЕ ПРОФОБРАЗОВАНИЯ
В СФЕРЕ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ФОТОНИКИ**



ЖОРЕС АЛФЁРОВ

СССР

AI



ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ
ЛАЗЕРНЫЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬ

ВОЛОКОННАЯ ОПТИКА

ИЗОБРЕТЕНИЕ ЛАЗЕР



Yonggui – ведущий
производитель соединителей
для ж/д транспорта в Китае



Силовые прямоугольные соединители



Соединители для энергетики и промышленности



Соединители для телекома и автоматизации



100% замена известным
европейским брендам,
теперь доступен в России

Срок поставки от 6 недель



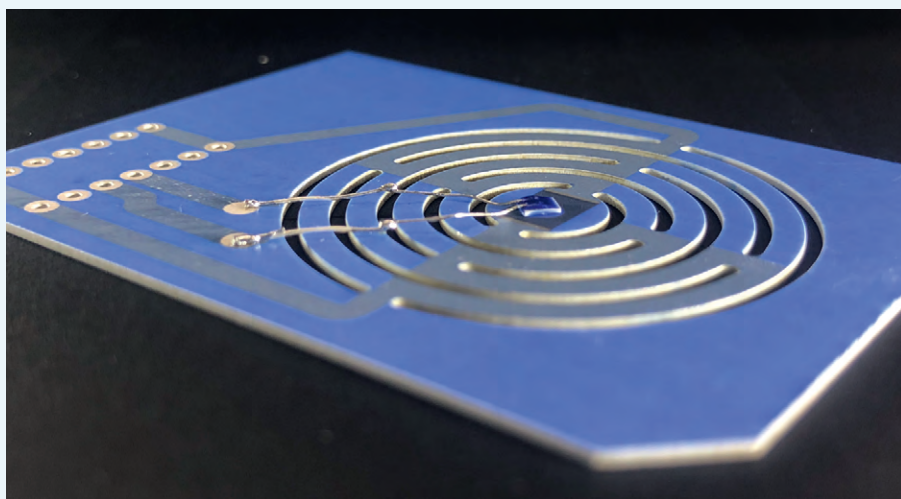
Плоские керамические нагреватели

ООО С-Компонент производит плоские нагревательные элементы собственной разработки, адаптированные для работы в самых разнообразных условиях: от чрезвычайно низких температур, до агрессивных сред при большом давлении.

Нагревательные элементы производятся по собственным, отработанным годами технологиям. В основе нагревателя – плоская керамическая пластина (на рисунке), обладающая высокой теплопроводностью и при этом являющаяся диэлектриком. Превосходная геометрическая стабильность керамического основания обеспечивает постоянный тепловой контакт в процессе нагревательных циклов. Сам резистивный нагревательный слой может формироваться из различных соединений, например на основе платины, оксида рутения, и многих других. После нанесения топологии нагревательный слой может быть дополнительно защищён тонким слоем стекла, что позволяет нагревательным элементам функционировать даже в самых агрессивных средах.

Возможные области применения:

- измерительное оборудование (хроматографы, газоанализаторы, оптические датчики);



- медицинское оборудование (алкотестеры, коагулометры, ингаляторы, аппараты подогрева/хранения инфузионных растворов);
- бытовые и промышленные электроннагревательные приборы (паяльные станции, сушилки для обуви, подогреватели пищи, йогуртницы, стеклянные чайники, фумигаторы, инкубаторы, системы подогрева топлива).

Запуск производства в г. Дубна Московской области позволил многократно увеличить объёмы изготовления плат на основе керамики. Благодаря собствен-

ной производственной базе и штату высокопрофессиональных специалистов С-Компонент имеет возможность в кратчайшие сроки разработать и изготовить по требованиям заказчиков даже самые специфичные нагреватели. При этом предприятие готово производить керамические нагреватели по чертежам клиента даже малыми партиями.

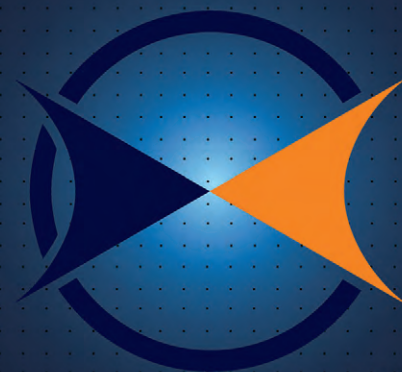
Чтобы оформить заказ или получить дополнительную профессиональную консультацию, свяжитесь с нами по телефону +7 (495) 663-93-17 или по электронной почте zakaz@c-component.ru



- Керамические подложки
- Металлизированные платы
- Керамические нагреватели
- Датчики, антенны
- Резисторы
- Заливные компаунды
- Сборки
- Технические стекла
- Пасты для металлизации
- LTCC
- МЭМС-технологии
- Мягкие подложки



+7 (495) 663-93-17
zakaz@c-component.ru
www.c-component.ru
 Московская обл., г. Дубна,
 ул. Творческая, д.8/5



Реклама



Здравствуйтесь, уважаемые друзья!

В этом, завершающем 2024 год выпуске журнала, мы продолжаем рассказ о лауреате Нобелевской премии и нашем соотечественнике Жоресе Ивановиче Алфёрове. Вторая часть статьи посвящена исследованиям российских учёных в период 1960–1970-х годов в области разработки двойных гетероструктур и созданию на их основе полупроводниковых инжекционных ДГС-лазеров.

САПР Delta Design – постоянно и динамично развивающийся продукт. В этом выпуске «Современной электроники» мы публикуем сразу две статьи, подготовленные разработчиками системы и посвящённые рассмотрению долгожданных и полезных новинок.

Ищете простую и надёжную схему линейного стабилизатора? Тогда вам сюда! Стабилизатор с выходным напряжением 28 В и током до 9 А на операционном усилителе и IGBT-транзисторе имеет встроенную токовую защиту и, при своей простоте, обладает очень неплохими характеристиками. В статье приведены принципиальные схемы устройства, разводка и внешний вид плат стабилизатора, а также результаты его тестирования.

В этом номере вы увидите описание проекта профессионального стандарта «Инженер-технолог в сфере производства элементов интегральной фотоники», прочтёте о трёхуровневой цифровой системе контроля доступа, об оригинальной конструкции разветвителя RS-485 с функцией PoE, о несложном устройстве автоматической парковки компьютера, а также о многом другом.

Заходите на наш информационный портал www.cta.ru! Там всегда свежие и уникальные новости из мира науки и высоких технологий со всего света! Для вас мы выкладываем на портале и свежие статьи, публикуемые в наших журналах!

Спасибо, что остаётесь с нами, читайте с удовольствием. Всего вам доброго.

Юрий Широков, главный редактор

Журнал «Современная электроника»
Издаётся с 2004 года

Главный редактор Ю. В. Широков
Заместитель главного редактора А. В. Малыгин
Редакционная коллегия А. Е. Балакирев, В. К. Жданкин,
С. А. Сорокин, Р. Х. Хакимов
Вёрстка М. Ю. Соколов
Обложка Д. В. Юсим
Реклама Н. А. Антипов +7 (968) 567-30-06 (antipov.n@cta.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: 117437, г. Москва,
Профсоюзная ул., 108

Тел.: (495) 232-00-87

shop@cta.ru • www.cta.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.)

Отпечатано: ООО «МЕДИАКОЛОР».

Адрес: Москва, Сигнальный проезд, 19,
бизнес-центр Вэлдан.

Тел./факс: (499) 903-69-52

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, 2024

Мы в соцсетях!



СОДЕРЖАНИЕ 9/2024

РЕКЛАМОДАТЕЛИ

Delta Design4-я стр. обл.

Litemax 16

Raystar 19

Yonggui2-я стр. обл.

C-Компонент 1

Элеконд 7

Эркон 11

Ассоциации АПКИТ, РУССОФТ, АРПП «Отечественный софт» и АРПЗ выражают обеспокоенность практикой заключения под стражу ИТ-предпринимателей



Сергей Сорокин,
генеральный директор
ООО «Эремекс»



ПРОЕКТИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

4 Delta Design 4.0. Задание правил проектирования топологии печатных плат в текстовом виде. Как это понимать

Дмитрий Сорока, Дмитрий Тимасов

12 Методология проектирования печатных плат с контролем волнового сопротивления в САПР Delta Design

Вячеслав Кухарук, Виктор Ухин, Александр Гладкевич, Дмитрий Тимасов

СТРАНИЦЫ ИСТОРИИ

20 Жорес Алфёров – учёный, благодаря которому работает большинство современных полупроводниковых лазеров. Часть 2. Гетерогенные лазеры

Виктор Алексеев

ИНЖЕНЕРНЫЕ РЕШЕНИЯ

31 Трёхуровневая электронная система контроля доступа

Сергей Шишкин

37 Применение IGBT-транзисторов в линейных стабилизаторах напряжения

Алексей Кузьминов

42 Разветвитель RS-485 с «Power over Ethernet»

Андрей Шаблонов

46 Устройство автоматической парковки компьютера

Олег Вальпа

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

48 Конструктивные особенности элементов РЭА, SSA и спутниковой навигации в космосе

Вадим Экземплярский

58 Квалификационные особенности проекта профессионального стандарта «Инженер-технолог в сфере производства элементов интегральной фотоники»

Татьяна Крупкина, Михаил Кульпинов, Владимир Лосев, Михаил Путьра, Юрий Чаплыгин

60 СВОДНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ЖУРНАЛА ЗА 2024 ГОД

Delta Design 4.0. Задание правил проектирования топологии печатных плат в текстовом виде. Как это понимать

Дмитрий Сорока, Дмитрий Тимасов

Пользователи, знакомые с Delta Design (www.eremex.ru) по работе с предыдущими версиями системы, при переходе на версию Delta Design 4.0 столкнутся с кардинальным изменением методологии задания правил проектирования для редактора топологии печатных плат. Привычная табличная форма задания правил уступила место текстовой. Значительная часть пользователей САПР печатных плат весьма консервативна, и новая методология на первых порах может вызывать некоторый дискомфорт. Поэтому в этой статье мы постарались, не вдаваясь в детали, пояснить базовые принципы организации нового текстового описания правил, после осознания которых переход не должен вызвать особых затруднений.

Взгляд на изменения сверху

Надо сразу отметить, что вместо многоярусной сложной системы таблиц, представленной в подсистеме «Правила» предыдущих версий, теперь все правила проекта представлены в виде единого текста, каждая строка которого задаёт отдельное правило (приоритет правила уменьшается от начала к концу текста), а задание и модификация правил, по сути, сводится к редактированию текста в текстовом редакторе. Все типы правил, поддерживаемые в версии 3.7, поддерживаются в версии 4.0, так же как и механизм автоматической конвертации правил в новое представление.

На рис. 1 показано, как выглядит фрагмент представления правил проектирования топологии печатной платы в подсистеме «Правила» для стандартного примера «Плата управления» в версии 3.7 (а) и в версии 4.0 после автоматической конвертации (б). Сверхсложное табличное представление правил превратилось в пол-экрана текста. К тому же это не самое оптимальное представление, его можно свернуть до полутора десятка строк (в).

Очевидно, новый вариант выглядит гораздо более компактно и вполне симпатично, но не очень привычно и поэтому не совсем понятно. Мы уже сказали, что все типы правил, поддерживаемые в версии 3.7, доступны для задания в текстовом представлении. Если обозначить крупными мазками, то все правила проектирования топологии можно разделить на несколько групп:

- зазоры;
- требования к трассировке цепей;
- запреты/разрешения на размещение объектов цепей.

Задаём зазоры

Зазоры определяют минимально допустимое расстояние между парой объектов топологии печатной платы. Величина задаваемого зазора может зависеть от типа объектов (трек, переходное отверстие, планарная контактная площадка, сквозная контактная площадка, металлизация, отверстие и другие), цепи, которой принадлежит объект, слоя и области печатной платы. Строка правил с ключевым словом **Clearance** позволяет задать значения зазоров между любыми типами объектов с учётом цепей, слоёв и областей. На примере строки для задания зазоров рассмотрим основные принципы, которые лежат в основе языка описания правил.

Формат строки правил для описания зазоров выглядит следующим образом:

Clearance: (ПредикатNO_1; ПредикатNO_2) on (ПредикатP) = {Min: Значение; Not: Значение}

Предикат в контексте языка описания правил – это логическое выражение, определяющее некоторое множество. При задании зазоров **ПредикатNO_1** и **ПредикатNO_2** имеют одну природу и формируют множество объектов топологии цепей на основе типов объектов, имён цепей и классов цепей. Выражение **IsTrack && Net="GND"** определяет множество всех трексов цепи с име-

нем «GND». Для понимания: это можно читать как множество трексов цепи «GND». Выражение **(IsTrack || IsVia) && Net="+5V"** читается как множество трексов и переходных отверстий цепи «+5V». Если цепи не присутствуют в логическом выражении, то считается, что множество указанных типов не фильтруется по цепям, т.е. в множество включаются объекты данного типа всех цепей. Так, например, выражение **IsTrack** задаёт множество всех трексов, а выражение **IsTrack || IsVia** – множество всех трексов и переходных отверстий на плате. Если нет указания на тип объектов, а определены только цепи, то множество включает все объекты цепей, например, выражение **Net="+5V"** определяет множество всех объектов цепи «+5V». Специальный вид выражения **Any** говорит, что все объекты всех цепей включаются в множество.

Скобочная форма (**ПредикатNO_1; ПредикатNO_2**) определяет условие применимости строки правил для заданной пары объектов. Правило применимо к паре объектов, только если существует вариант, когда объекты входят в разные множества, сформированные предикатами. При этом надо понимать, что множества, формируемые выражениями в **ПредикатNO_1** и в **ПредикатNO_2**, могут пересекаться и даже быть, по сути, эквивалентными множествами. Так, например, условие **(IsTrack; IsTrack)** определяет, что строка правил задаёт зазоры между двумя треками произвольных цепей, а условие **(Net="GND"; Net="GND1")** – между любыми объектами цепей «GND» и «GND1». Если надо определить единый зазор для всех объектов цепей, используется выражение **(Any; Any)**. Начало строки **Clearance: (IsSmdPad && Net="GND"; (IsTrack || IsVia) && Net="+5V")** читается как зазоры между планарными контактными площадками цепи «GND» и треками (или переходными отверстиями) цепи «+5V».

Скобочная форма (**ПредикатP**) определяет, в каких местах платы будет действовать правило. Если данная ско-

```

1 Allow: (IsTrack || IsVia || IsMetal) = true
2 Allow: (Any) = {TJunction:PinViaTrack}
3 Allow: (Any) = {ViaOnPad:false}
4 Allow: (Any) = {ViaStyle:[ALL]}
5 DiffPair: (Any) = {Min:0.25; Nom:0.25; Neck:0.25; NeckGlobal:0.25; NeckLocal:0.25; GapMin:0.25; GapNom:0.25; NeckGap:0.12; GapTolerance+:0.05; GapTolerance-:0.05}
6 DiffPair: (Any) = {UncoupledGlobal:3; UncoupledLocal:3; PhaseTolerance:3; IncludeGathering:true}
7 Width: (IsAnnualRing) = 0.1
8 Width: (Net="+12V") = {Min:0.25; Nom:1}
9 Width: (Net="+5V") = {Min:0.25; Nom:0.5}
10 Width: (Net="UCC_МК") = {Min:0.25; Nom:0.5}
11 Width: (Any) = {Min:0.25; Nom:0.25; Neck:0.25; NeckGlobal:0.25; NeckLocal:0.25}
12 Clearance: (IsTrack; IsTrack || IsPad || IsVia || IsHole || IsMetal) = 0.25
13 ClearanceSN: (IsTrack; IsTrack || IsPad || IsVia || IsHole || IsMetal) = 0.25
14 Clearance: (IsSmdPad; IsSmdPad || IsHole || IsMetal) = 0.25
15 ClearanceSN: (IsSmdPad; IsSmdPad || IsHole || IsMetal) = 0.25
16 Clearance: (IsThroughPad; IsPad || IsVia || IsHole || IsMetal) = 0.25
17 ClearanceSN: (IsThroughPad; IsPad || IsVia || IsHole || IsMetal) = 0.25
18 Clearance: (IsVia; IsSmdPad || IsVia || IsHole || IsMetal) = 0.25
19 ClearanceSN: (IsVia; IsSmdPad || IsVia || IsHole || IsMetal) = 0.25
20 Clearance: (IsHole; IsBorder) = 0.35
21 Clearance: (IsHole; IsHole) = 0.45
22 Clearance: (IsMetal; IsBorder || IsHole || IsMetal) = 0.25
23 ClearanceSN: (IsMetal; IsHole || IsMetal) = 0.25
    
```

```

1 Allow: (IsTrack || IsVia || IsMetal) = true
2 Allow: (Any) = {TJunction:PinViaTrack}
3 Allow: (Any) = {ViaOnPad:false}
4 Allow: (Any) = {ViaStyle:[ALL]}
5 DiffPair: (Any) = {Min:0.25; Nom:0.25; Neck:0.25; NeckGlobal:0.25; NeckLocal:0.25; GapMin:0.25; GapNom:0.25; NeckGap:0.12; GapTolerance+:0.05; GapTolerance-:0.05}
6 DiffPair: (Any) = {UncoupledGlobal:3; UncoupledLocal:3; PhaseTolerance:3; IncludeGathering:true}
7 Width: (IsAnnualRing) = 0.1
8 Width: (Net="+12V") = {Min:0.25; Nom:1}
9 Width: (Net="+5V" || Net="UCC_МК") = {Min:0.25; Nom:0.5}
10 Width: (Any) = {Min:0.25; Nom:0.25; Neck:0.25; NeckGlobal:0.25; NeckLocal:0.25}
11 Clearance: (IsHole; IsBorder) = 0.35
12 Clearance: (IsHole; IsHole) = 0.45
13 Clearance: (Any; Any) = 0.25
14 ClearanceSN: (Any; Any) = 0.25
    
```

Рис. 1. Представление правил в табличном и текстовом виде: фрагмент представления правил проектирования топологии печатной платы в подсистеме «Правила» для стандартного примера «Плата управления» в версии 3.7 (а); в версии 4.0 после автоматической конвертации (б); после оптимизации (в)

Рис. 2. Табличное представление «физических» правил для цепей

блочная форма отсутствует в строке, предполагается, что правило действует по всей плате. Предикат задаёт множество «областей-фрагментов» платы, отфильтровывая области по слоям, регионам и стекам слоёв. Задав выражение `Layer="L1"`, мы говорим, что правило относится к слою «L1». Задав `Region="RegionBGA"`, мы отфильтровываем только область платы внутри региона с названием «RegionBGA», а для `Stack="Flex"` область действия правила ограничивается гибкой (судя по названию стека слоёв «Flex») частью платы. Если предикат не содержит выражений, определяющих слой, регион или область с заданным стеком слоёв, то фильтрация области по этим параметрам не осуществляется. То есть выражение: `(Region="RegionBGA")` говорит о том, что правило распространяется на все слои области региона «RegionBGA», а выражение `(Stack="Flex")` – о том, что на все слои области платы со стеком слоёв «Flex». Выражение `(Layer="L1" | Layer="L2")` определяет, что правило действует на слоях «L1» и «L2» по всей области платы (во всех регионах и для всех стеков слоёв). Специальный вид выражения `Any` говорит, что правило работает на всей плате (хотя это можно определить просто, опустив скобочную форму). Если необходимо сказать, что правило действует на всех слоях, кроме слоя «L1» в регионе «RegionBGA», то это будет выглядеть как `(Layer!="L1" && Region="RegionBGA")`.

Теперь мы готовы с пониманием сформулировать условия применения правила, расположенные в левой части строки до знака «=». Например,

мы хотим задать зазоры между трека-ми цепи «+5V» и переходными отверстиями цепи «GND» на слое «L1» в регионе «RegionBGA». Левая часть строки в этом случае может выглядеть следующим образом:

`Clearance: (IsVia && Net="GND"; IsTrack && Net="+5V") on (Layer="L1" && Region="RegionBGA") =`

Или так:
`Clearance: (IsTrack && Net="+5V"; IsVia && Net="GND") on (Layer="L1" && Region="RegionBGA") =`,
 т.е. `ПредикатNO_1` и `ПредикатNO_2` можно переставлять в строке местами.

Осталось понять, каким, собственно, образом задавать значение зазоров. За задание значений отвечает правая часть строки после знака «=» – скобочная форма с фигурными скобками, внутри которой можно задать значения для набора параметров, поддерживаемых для рассматриваемого типа правила. Для правил, определяющих зазоры, поддерживается значение минимального зазора (собственно, то, что определяется как зазоры в большинстве САПР печатных плат) и значение номинального зазора (параметр, используемый инструментами топологического трассировщика TopoR, поддержки которого не было в версии 3.7 из-за трудностей расширения табличного интерфейса). Параметры именованные и значения задаются после имени параметра с двоеточием, точка с запятой разделяет параметры (порядок именованных параметров не важен). Выражение `{Min:0,25; Nom:0,4}` (или эквивалентное `{Nom:0,4; Min:0,25}`) означает, что минимальный разрешён-

ный зазор равен 0,25, а номинальный зазор для TopoR – 0,4 в единицах измерения по умолчанию. Единицы измерения также могут быть указаны после цифровых значений, например, задание в тысячных дюйма будет выглядеть как `{Min:0,25mil; Nom:0,4mil}`.

Теперь мы понимаем, как написать правило полностью:

`Clearance: (IsTrack && Net="+5V"; IsVia && Net="GND") on (Layer="L1" && Region="RegionBGA") = {Min:0,25mil; Nom:0,4mil}`

Что ещё важно понимать при задании значений, так это то, что одна строка правил может содержать не весь набор параметров. Например, строка:
`Clearance: (IsTrack && Net="+5V"; IsVia && Net="GND") on (Layer="L1" && Region="RegionBGA") = {Min:0,25mil}`
 задаёт только значения минимального зазора.

А строка правил:
`Clearance: (IsTrack && Net="+5V"; IsVia && Net="GND") on (Layer="L1" && Region="RegionBGA2") = {Min:0,25mil; Nom:0,4mil}`
 эквивалентна двум строкам:
`Clearance: (IsTrack && Net="+5V"; IsVia && Net="GND") on (Layer="L1" && Region="RegionBGA") = {Min:0,25mil}`
`Clearance: (IsTrack && Net="+5V"; IsVia && Net="GND") on (Layer="L1" && Region="RegionBGA") = {Nom:0,4mil}`.

Такой способ работы с параметрами, с учётом приоритетов правил, позволяет организовать «иерархическое» задание правил:

Clearance: (IsTrack && Net="+5V"; IsVia && Net="GND") on (Layer="L1" && Region="RegionBGA") = {Min:0,25mil}

Clearance: (Any; Any) = {Min: 0,4mil; Nom: 0,4mil}

В этом примере на нижнем уровне для всех объектов на плате задан минимальный и номинальный зазор 0,4, а потом минимальный зазор между треками цепи «+5V» и переходными отверстиями цепи «GND» на слое «L1» в регионе «RegionBGA» переопределён как 0,25. Этот принцип лежит в основе создания «стандартных» правил. Поскольку больший приоритет имеют параметры, определённые в правилах, расположенных ближе к началу текста, мы можем задать в конце текста общий, не детализированный массив правил, а потом переопределить значения для конкретных случаев.

Хотя рассмотренная конструкция задания правил для зазоров между объектами цепей теоретически может работать и для объектов внутри одной цепи, в версии Delta Design 4.0 для совместимости с предыдущими версиями используется конструкция

ClearanceSN: (ПредикатNO_1; Предикат NO_2) on (ПредикатP) = {Min: Значение; Nom: Значение}.

Она фактически повторяет конструкцию **Clearance**, но правило **ClearanceSN** используется только для пары объектов, принадлежащих одной цепи (в то время как в текущей версии 4.0 строка правил **Clearance** работает, только если объекты принадлежат разным цепям). Строки правил:

ClearanceSN: (NetClass="Земля"; Any) = {Min:0,25mm}

и

ClearanceSN: (NetClass="Земля"; NetClass="Земля") = {Min:0,25mm}

читаются одинаковым образом – «Минимальный зазор между любыми объектами одной цепи, для цепей, входящих в класс "Земля", равен 0,25 миллиметра».

Задаём требования к трассировке цепей

Достаточно подробно рассмотрев принципы организации строки текстовых правил для задания зазоров, рассмотрим, как можно задать правила других типов. Правила трассировки цепей в Delta Design 3.7 услов-

но разделены на «Физические» и «Электрические». Таблица для задания «Физических» правил в версии 3.7 представлена на рис. 2.

Здесь определяются требования к ширине треков при трассировке, типу и числу использованных переходных отверстий и другие.

Пожалуй, наиболее часто рассматриваемые требования – задание параметров, определяющих ширину трека. Ширина трека может зависеть от цепи (класса цепей) и от области, поэтому левая часть строки должна включать выражение, задающее множество цепей и областей:

Width: (ПредикатN) on (ПредикатP) =,

где предикат места **ПредикатP** организован так же, как и рассмотренный нами в строке описания требований к зазорам, а **ПредикатN** формирует подмножество цепей и классов цепей на базе всего множества цепей. Если мы хотим сказать, что правило относится к множеству цепей, состоящих из цепи «ВХОД8» и цепей, входящих в класс «Земля», то предикат будет выглядеть следующим образом:

(NetClass="Земля" || Net="ВХОД8").

ЭЛЕКОНД
РАЗРАБОТКА И ПРОИЗВОДСТВО КОНДЕНСАТОРОВ

<p>Оксидно-электролитические алюминиевые конденсаторы K50-... Номинальное напряжение, $U_{ном}$, В, Номинальная емкость, $C_{ном}$, мкФ, Диапазон температур среды при эксплуатации, $T_{ср}$, °С</p>	<p>3,2 ... 485 1,0 ... 470 000 -60 ... 125</p>	
<p>Объемно-пористые танталовые конденсаторы K52-... Номинальное напряжение, $U_{ном}$, В, Номинальная емкость, $C_{ном}$, мкФ, Диапазон температур среды при эксплуатации, $T_{ср}$, °С</p>	<p>3,2 ... 200 1,5 ... 60 000 -60 ... 175</p>	
<p>Оксидно-полупроводниковые танталовые конденсаторы K53-... Номинальное напряжение, $U_{ном}$, В, Номинальная емкость, $C_{ном}$, мкФ, Диапазон температур среды при эксплуатации, $T_{ср}$, °С</p>	<p>2,5 ... 63 0,033 ... 2 200 -60 ... 175</p>	
<p>Суперконденсаторы K58-... Номинальное напряжение, $U_{ном}$, В, Номинальная емкость, $C_{ном}$, Ф, Диапазон температур среды и эксплуатации, $T_{ср}$, °С</p>	<p>2,5 ... 2,7 1,0 ... 4 700 -60 ... 65</p>	
<p>Накопители электрической энергии на основе модульной сборки суперконденсаторов НЭЭ, МИК, МИЧ, ИТИ Номинальное напряжение, $U_{ном}$, В, Номинальная емкость, $C_{ном}$, Ф, Диапазон температур среды при эксплуатации, $T_{ср}$, °С</p>	<p>5,0 ... 48 0,08 ... 783 -60 ... 65</p>	

Россия, 427968, Удмуртская Республика, г. Сарапул, ул. Калинина, 3
 Тел.: (34147) 2-99-53, 2-99-89, 2-99-77, факс: (34147) 4-32-48, 4-27-53
 e-mail: elecond-market@elcudm.ru, www.elecond.ru


Реклама

Сигналы	Длина трека	Задержка сигнала	Относительная длина трека	Относительная задержка сигн...
U1.17(#17) -> U2.61(#61)				
U1.37(#37) -> U2.62(#62)				
U1.70(#70) -> U2.55(#55)				
U1.85(#85) -> U2.58(#58)				
U1.84(#84) -> U2.53(#53)				
U1.127(#127) -> U2.56(#56)				
ADD_DDR				1
CTRL_DDR				1
U1.89(#89) -> U2.63(#63)				
U1.88(#88) -> U2.57(#57)				
U1.70(#70) -> U2.55(#55)				
U1.127(#127) -> U2.56(#56)				
DATA_DDR				1
U1.31(#31) -> U2.33(#33)				
U1.49(#49) -> U2.9(#9)				
U1.86(#86) -> U2.34(#34)				
U1.83(#83) -> U2.10(#10)				
U1.29(#29) -> U2.41(#41)				
U1.11(#11) -> U2.38(#38)				
U1.30(#30) -> U2.46(#46)				
U1.48(#48) -> U2.45(#45)				
U1.10(#10) -> U2.43(#43)				
U1.47(#47) -> U2.48(#48)				
U1.9(#9) -> U2.31(#31)				
U1.28(#28) -> U2.36(#36)				
U1.46(#46) -> U2.17(#17)				
U1.8(#8) -> U2.14(#14)				
U1.7(#7) -> U2.22(#22)				
U1.27(#27) -> U2.21(#21)				

Рис. 3. Табличное представление «электрических» правил

Заметим, что союз «и» в предложении заменяется операцией «Или» (| |). Кажется, что использование операции «И» (&&) здесь вообще не потребуется, поскольку правило определяет требования к цепи, а не к паре объектов. Но вот в формах с отрицанием оно может быть вполне себе уместно и удобно, например, в выражении:

(NetClass != "Земля" && NetClass != "Питание"),

которое на словах будет звучать как «все цепи, не входящие в классы “Земля” и “Питание”». Выражение **Any** говорит, что правило будет действовать для всех цепей. Чтобы задать правило ширины, действующее по всей плате, мы можем написать:

Width: (Any) on (Any) = или **Width: (Any) =,**

опустив предикат места, так же, как и при задании зазоров.

Набор значений в правой части строки организован таким же образом, как и для зазоров, в виде скобочной формы с фигурными скобками:

{MinWidth: Значение; NominalWidth: Значение; NeckWidth: Значение; NeckMaxTotalLength: Значение; NeckMaxLocalLength: Значение}.

Набор значений такой же, как и в версии 3.7:

- минимальная ширина трека (**MinWidth** или **Min**);
- номинальная ширина трека (**NominalWidth** или **Nom**);
- ширина зауженного трека (**NeckWidth** или **Neck**);
- максимально допустимая суммарная длина зауженных участков (**NeckMaxTotalLength** или **NeckGlobal**);
- максимально допустимая длина одного зауженного участка (**NeckMaxLocalLength**, **NeckLocal**).

Интегрально формат строки для задания ограничений на ширины трексов выглядит как:

Width: (ПредикатN) on (ПредикатP) = {MinWidth: Значение; NominalWidth: Значение; NeckWidth: Значение; NeckMaxTotalLength: Значение; NeckMaxLocalLength: Значение}.

Если мы хотим задать набор параметров для ширины трексов для цепи «ВХОД8» на слое «L1» в регионе «BGA», то это может выглядеть так:

Width: (Net="ВХОД8") on (Layer="L1" && Region="BGA") = {MinWidth: 0,1; NominalWidth:0,2; NeckWidth: 0,08; NeckMaxTotalLength: 1,8; NeckMaxLocalLength: 0,9}.

Не забываем, что не обязательно задавать все параметры в одной строке правил и можно организовать «иерархические» правила.

Width: (Net="ВХОД8") on (Layer="L1" && Region="BGA") = {NominalWidth: 0,2}.
Width: (Any) = {MinWidth: 0,1; NominalWidth: 0,3; NeckWidth: 0,08; NeckMaxTotalLength: 1,8; NeckMaxLocalLength: 0,9}.

Последние две строчки, с точки зрения задания параметров ширины для цепи «ВХОД8», эквивалентны предыдущей строчке. Но, задав общий базовый набор параметров для всех цепей на нижнем уровне, на более верхнем можно определять только существенные параметры.

Важное замечание: заданные в строке **Width** параметры ширины трексов действуют только для регулярных цепей, для трексов дифференциальных цепей параметры задаются другим правилом:

DiffPair: (ПредикатN) on (ПредикатP) = {MinWidth: Значение; NominalWidth: Значение; NeckWidth: Значение; MinGap: Значение; NominalGap: Значение; NeckGap: Значение; NeckMaxLocalLength: Значение; NeckMaxTotalLength: Значение; GapTolerance+: Значение; GapTolerance-: Значение; LengthDelayTolerance: Значение; LocalUncoupledLength: Значение; GlobalUncoupledLength: Значение; IncludeGathering: Значение}.

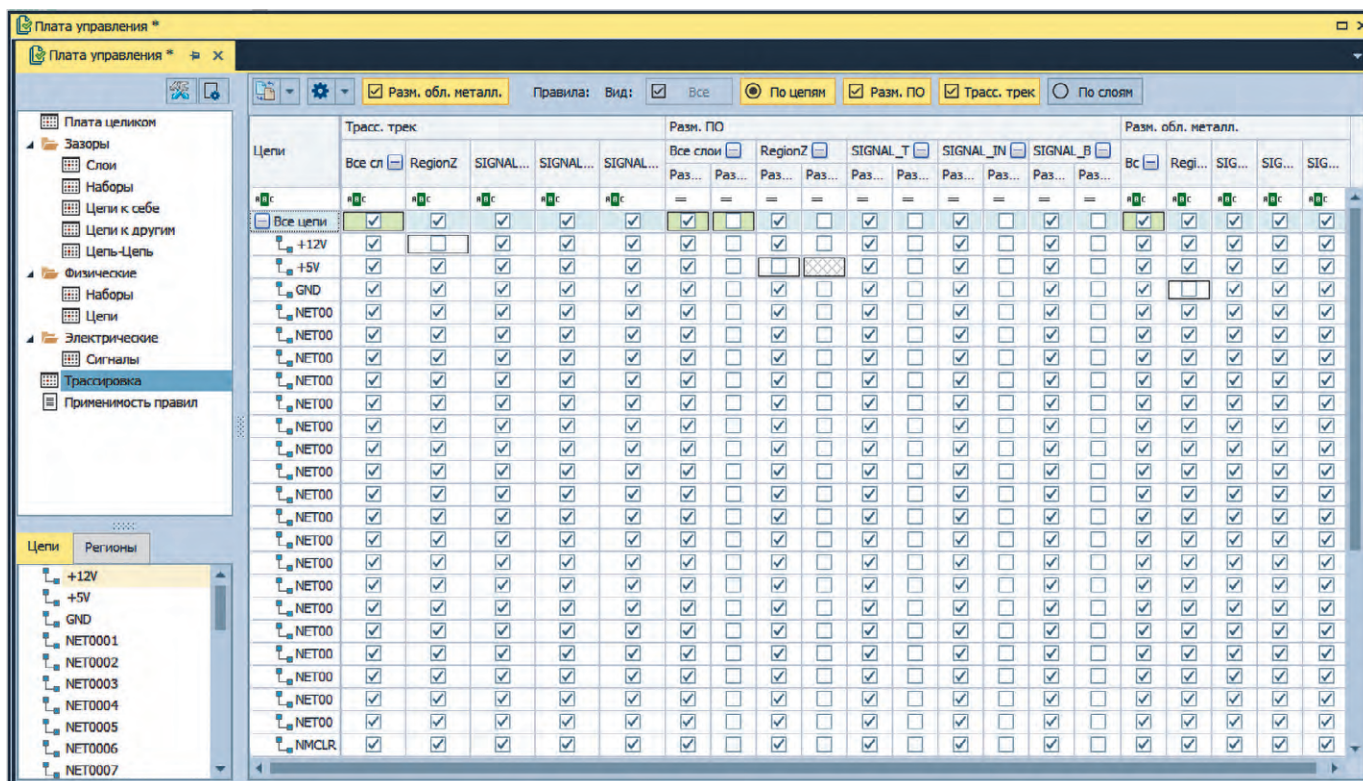


Рис. 4. Табличное представление запретов/разрешений на размещение объектов трассировки

Структура левой части правила аналогична структуре рассмотренного правила для ширины, но набор параметров гораздо шире. Связано это с особенностями трассировки дифференциальных пар, когда значения ширины трек и зазора должны быть синхронизированы, чтобы обеспечить неизменное значение волнового сопротивления выравниванием длин трек и синхронизацией фаз распространения сигнала:

- минимальная ширина трека и соответствующее ей значение дифференциального зазора (*MinWidth, Min, MinGap, GapMin*);
- номинальная ширина трека и соответствующее ей значение дифференциального зазора (*NominalWidth, Nom, NominalGap, GapNom*);
- ширина зауженного трека и соответствующее ей значение дифференциального зазора (*NeckWidth, Neck, NeckGap*);
- максимально допустимая суммарная и локальная длина зауженных участков (*NeckMaxTotalLength, NeckGlobal, NeckMaxLocalLength, NeckLocal*);
- максимально допустимая разность длин трек дифференциальной пары (*LengthDelayTolerance, PhaseTolerance*);
- ограничение на локальную, суммарную длину непарно-

го прохождения трасс и учёта выходов из контактных площадок (*LocalUncoupledLength, UncoupledLocal, GlobalUncoupledLength, UncoupledGlobal, IncludeGathering*);

- разрешённый допуск на уменьшение и увеличение зазора (*GapTolerance-, GapTolerance+*).

Поскольку параметров много, имеет смысл разбивать строку правил на несколько, например, так:

```
DiffPair: (Any) = {MinWidth:0,15;
MinGap:0,15; NominalWidth:0,2;
NominalGap:0,2}
DiffPair: (Any) = {NeckWidth:0,12; NeckGap:0,12;
NeckMaxTotalLength:0,8;
NeckMaxLocalLength:0,4}
DiffPair: (Any) = {UncoupledGlobal:2;
UncoupledLocal:1;
IncludeGathering:true}
DiffPair: (Any) = {LengthDelayTolerance:3}
DiffPair: (Any) = {GapTolerance+:0,05;
GapTolerance-:0,05}.
```

Другие типы поддерживаемых «физических» правил:

- разрешение на использование определённого стиля переходного отверстия;

- разрешение на установку переходных отверстий в области контактной площадки;
- разрешение на использование T-соединений при трассировке цепи;
- ограничение на число используемых при трассировке цепи переходных отверстий.

Первые два зависят от цепи и от области, два другие – только от цепи, соответственно для первых строка будет включать пару предикатов, а вторые – только предикат цепи.

```
Allow: (ПредикатN) on
(ПредикатP) = {ViaStyle: [Cnucok
значений]}
```

```
Allow: (ПредикатN) on
(ПредикатP) = {ViaOnPad:
Значение}
```

```
Allow: (ПредикатN) = {Tjunction:
Значение}
```

```
Allow: (ПредикатN) =
{MaxViaCount: Значение}
```

Здесь появляется ключевое слово **Allow**. С ним вот такое правило на разрешение использования переходных отверстий в области контактных площадок:

```
Allow: (Net="BXOД8") on
(Region="BGA") = {ViaOnPad:true}
```

звучит следующим образом: «разрешить при трассировке цепи “BXOД8” установку переходных отверстий на контактных площадках в регионе “BGA”». (Значение можно устанавли-

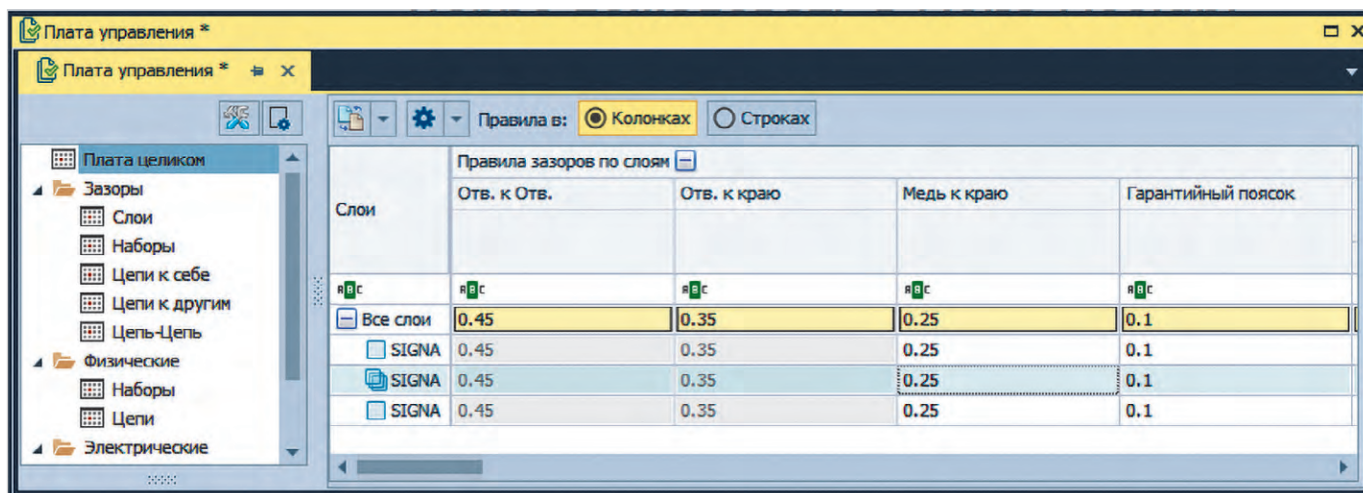


Рис. 5. Раздел «Плата целиком» табличного представления правил

вать в false, но на практике часто можно просто опустить правило.)

А вот правило
Allow: (Net="ВХОД8") on (Region="BGA") = {ViaStyle: ["ПО(flex)"; "Style 1"]}

будет читаться как «разрешить использование при трассировке цепи «ВХОД8» в регионе «BGA» только переходные отверстия со стилями «ПО(flex)» и «Style 1»». В квадратных скобках перечисляются через точку с запятой имена разрешённых к установке стилей переходных отверстий. Значение ALL говорит, что все существующие в проекте стили могут быть задействованы.

Прочитать следующее правило, думаем, не составит особого труда:

Allow: (Net="ВХОД8") = {MaxViaCount:2}

(Разрешить использование при трассировке цепи «ВХОД8» не более двух переходных отверстий.)

Ну и, наконец,
Allow: (Net="ВХОД8") = {Tjunction:PinViaTrack}

будет звучать как «разрешить при трассировке цепи «ВХОД8» формирование Т-соединений в области контактных площадок, переходных отверстий и трек (допустимые значения – **PinViaTrack, PinVia, Pin, None**). При значении **None** правило будет звучать как «не разрешается формирование Т-соединений».

«Электрические» правила трассировки цепей

Под «электрическими» правилами трассировки цепей в Delta Design 3.7 понимаются ограничения на длины/задержки и соотношение длин/задержек так называемых «сигналов» (сигнал представляется парой контактов,

обычно источник-приёмник, и фрагментом трассировки между этими контактами). Таблица для задания «Электрических» правил в версии 3.7 представлена на рис. 3.

Прямые ограничения на длины/задержки задаются правилом:

PinPair: (ПредикамS) = {MinLength: Значение; MaxLength: Значение},

где **ПредикамS** формирует множество имён сигналов (пар контактов), а значения задают минимальную и максимальную длину пути трассировки между контактами (или задержку, в зависимости от того, единицы длины или единицы времени используются при задании).

PinPair: (Name="XS4.2;DD1.2" || Name="XS5.1;DD1.3")

= {MinLength:10mm ; MaxLength:20mm},

PinPair: (Name="XS4.2;DD1.2" || Name="XS5.1;DD1.3") =

{MinLength:60ps ; MaxLength:20ps}

В правиле выравнивания сигналов в группах задаётся максимальная величина отклонения длины/задержки между двумя сигналами внутри одной группы сигналов:

MatchGroup: (ПредикамGS) = Значение максимального отклонения,

где **ПредикамGS** формирует множество имён групп сигналов, а значение может быть как длиной, так и задержкой в зависимости от используемых единиц измерения. В примере ниже для двух групп сигналов «GS1» и «GS2» задано, что максимальное отклонение задержки между сигналами внутри каждой группы не должно превышать 20 наносекунд:

MatchGroup: (Name="GS1" || Name="GS2") = 20ns.

Надо обратить внимание, что правило задаёт отклонение внутри каждой группы. Соотношение длин/задержек между группами здесь никак не ограничивается.

Следующее правило как раз задаёт соотношение длин/задержек между группами. Заметим, что введению таких ограничений в предыдущих версиях Delta Design препятствовал жёстко фиксированный табличный интерфейс. Текстовое представление обладает гораздо большей гибкостью, и добавление новых текстовых конструкций реализуется достаточно просто (поддержка новых правил в инструментах проектирования – это отдельный вопрос).

Delay: (ПредикамSuGS_1) from (ПредикамSuGS_2) = {MinLength: Значение; MaxLength: Значение},

где **ПредикамSuGS** формирует множество сигналов, как на основе имён сигналов, так и на основе имён групп сигналов (в данном случае группа сигналов трактуется как набор сигналов). Значения определяют минимальную и максимальную разницу между длинами/задержками двух сигналов, один из которых принадлежит множеству, определяемому предикатом **ПредикамSuGS_1**, а другой множеству, определяемому предикатом **ПредикамSuGS_2**. Например, строка правила

Delay: (Name="U3.1;U4.3") from (Name="SGroup") = {MinLength: 20ns; MaxLength: 40ns}

говорит, что задержка сигналов из группы «SGroup» должна быть на 20–40 наносекунд больше, чем задержка сигнала «U3.1;U4.3».

Запреты на размещение объектов цепей

На рис. 4 представлена табличная форма, которая позволяет для различных цепей указать, на каких областях и в каких регионах разрешено или запрещено размещение объектов трассировки.

Формат строки правил для запрета на размещения не предполагает наличия правой части:

Deny: (ПредикатNO) on (ПредикатP).

С предикатами типа **ПредикатNO** и **ПредикатP** мы уже познакомились при обсуждении зазоров. **ПредикатNO** указывает, что будет запрещено к размещению в области, определяемой предикатом **ПредикатP**.

Тем, кто внимательно дочитал до этого места, не должно составить труда проинтерпретировать следующую строку правил:

Deny: (IsTrack && Net="NET0001") on (Layer="L1" && Region="Z").

Но на всякий случай, здесь определено, что не допускается размещение трексов цепи «NET0001» на слое «L1» в регионе = «Z».

Ещё несколько правил

Поскольку мы говорили, что все типы правил, поддерживаемые в версии Delta Design 3.7, поддерживаются в версии 4.0, для полноты картины рассмотрим оставшиеся несколько правил, которые в табличной форме можно было определить в разделе «Плата целиком» (рис. 5), и то, как они определяются в текстовом виде.

Зазор между отверстиями:
Clearance: (IsHole; IsHole) on (ПредикатP) = Значение
Clearance: (IsHole; IsHole) = 0,45

Зазор между отверстием и границей платы:
Clearance: (IsHole; IsBorder) on (ПредикатP) = Значение
Clearance: (IsHole; IsBorder) = 0,35

Зазор между областью металлизации и границей платы:
Clearance: (IsMetal; IsBorder) on (ПредикатP) = Значение
Clearance: (IsMetal; IsBorder) = 0,25

Ширина гарантийного пояса:
Width: (IsAnnularRing) on (ПредикатP) = Значение
Width: (IsAnnularRing) on (ПредикатP) = 0,1

Что ещё

В этой статье мы рассмотрели основные принципы организации нового текстового описания правил проектирования топологии печатных плат, появившегося в версии Delta Design 4.0 (www.egemex.ru), показали, что все типы правил, поддерживаемые в подсистеме «Правила» предыдущей версии 3.7, доступны и в версии 4.0. Детали и полное описание формата строк можно найти в документе «Руководство пользователя. Редактор правил» (смотрите по ссылке в QR-коде).

Надо заметить, что методология текстового описания правил обладает большой гибкостью, и система правил и работы с текстовым описанием находится в развитии. Мы будем держать пользователей в курсе изменений и в следующей публикации рассмотрим, как работает «Помощник формирования правил» – пользовательский интерфейс, облегчающий формирование строки правил за счёт доступа к актуальным данным проекта и использования правильных синтаксических конструкций. ☺





Промышленный ТЕХНОПАРК

Производство, разработка и поставка постоянных резисторов, аттенюаторов и чип-индуктивностей:

- Эквиваленты нагрузок ПР1-24 (от 50 Вт - 2000 Вт)
- Аттенюаторы ПР1-25 (от 50 Вт - 2000 Вт)
- ТПИ -тепловые чип-перемычки
- СВЧ резисторы
- Мощные СВЧ резисторы Р1-170 (до 1000 Вт)
- Силовые резисторы Р1-150М (до 1500 Вт)
- Наборы резисторов НР1-82
- Чип-резисторы Р1-8В (А,И,С) соответствуют требованиям стандарта АЕС-Q200

■ Современная производственная база

■ Высокое качество

■ Индивидуальный подход к потребителю

■ Изделия по вашему ТЗ





Связаться с нами: **8 (800) 456-33-22**

г. Нижний Новгород, ул. Нартова, д.6
e-mail: info@erkonpark.ru

erkonpark.ru

Методология проектирования печатных плат с контролем волнового сопротивления в САПР Delta Design

Вячеслав Кухарук, Виктор Ухин, Александр Гладкевич, Дмитрий Тимасов

В статье рассматривается маршрут разработки печатных плат с учётом импеданса линий передач в САПР Delta Design.

Спроектировать современное устройство без учёта импеданса линий передач (ЛП) практически невозможно – это истина, известная каждому инжене-

ру в области разработки электронной аппаратуры. Для обеспечения высоких темпов развития электроники специалисты должны обладать многофункци-

ональными и практически совершенными системами автоматизированного проектирования, в том числе и для контроля первичных и вторичных электрофизических параметров линий передач.

Компания «ЭРЕМЕКС» совсем недавно представила инструмент SimPCB, который предназначен для проектирования высокоскоростных цифровых и высокочастотных аналоговых устройств. Это лаборатория, которая уже сейчас позволяет проводить специалисту целый ряд исследований свойств линий передачи и переходных отверстий [2, 3, 4]. Однако SimPCB не исключает рутинных действий, отвлекающих инженера от процесса проектирования. Поэтому компания «ЭРЕМЕКС» упростила и автоматизировала важные этапы разработки устройств с контролем импеданса путём внедрения расчётов в основной маршрут проектирования печатных плат. Вычисление геометрических параметров линий передачи и, как одиночных, так и дифференциальных, в САПР Delta Design теперь выполняется в инструменте «Конфигуратор набора слоёв и переходных отверстий». Все расчёты осуществляются с помощью решателя, реализованного в SimPCB.

Рассмотрим маршрут проектирования с учётом изменений на примере, представленном далее.

Маршрут проектирования устройств с учётом волнового сопротивления линий передачи

Маршрут проектирования состоит из трёх основных этапов и представлен на рис. 1.

1. Расчёт геометрических параметров ЛП под заданный импеданс, подбор материалов и структуры печатной платы:

- создание профиля импеданса;
- выбор типа ЛП;
- задание целевого импеданса;
- установка допуска на волновое сопротивление;

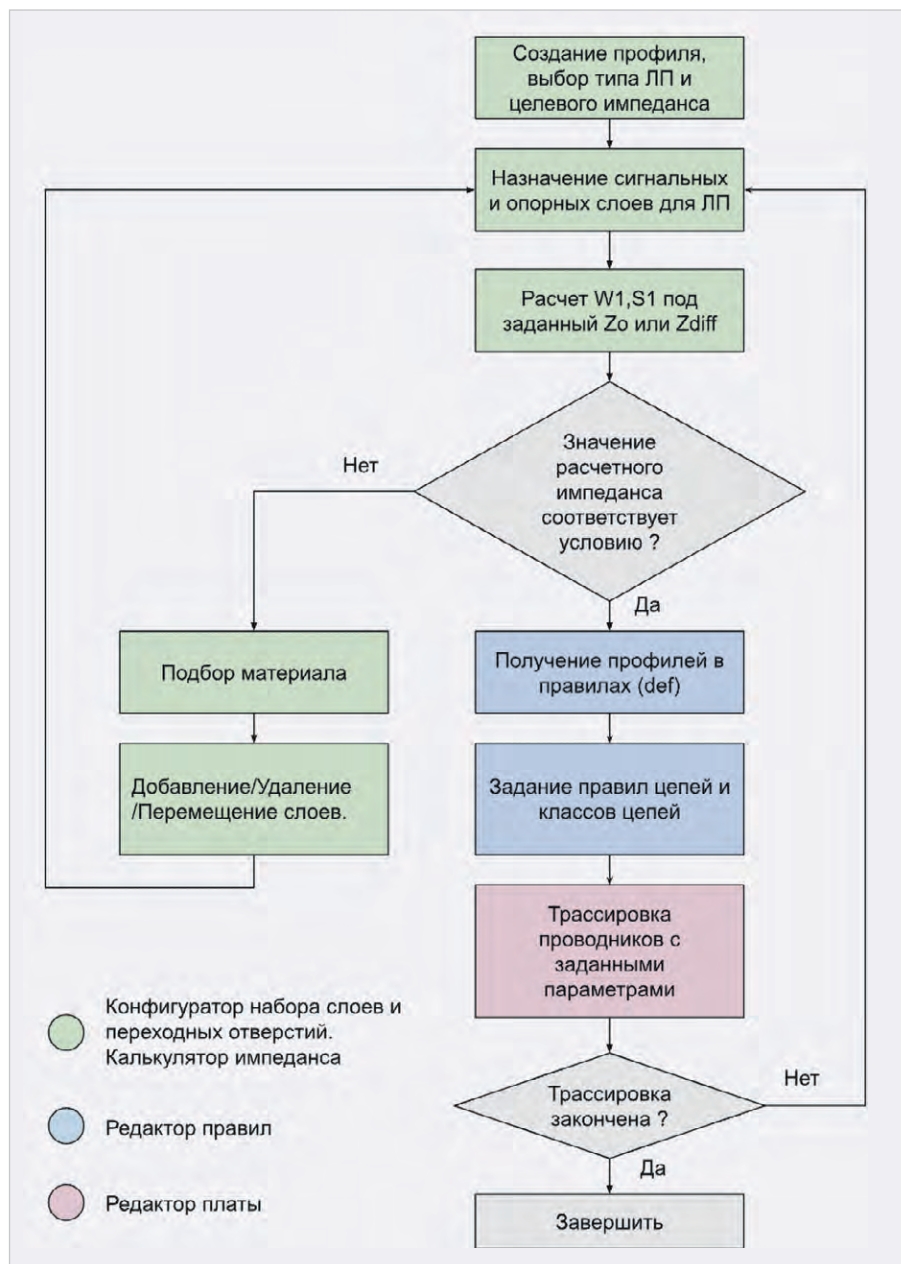


Рис. 1. Маршрут проектирования устройств с учётом волнового сопротивления линий передачи в САПР Delta Design

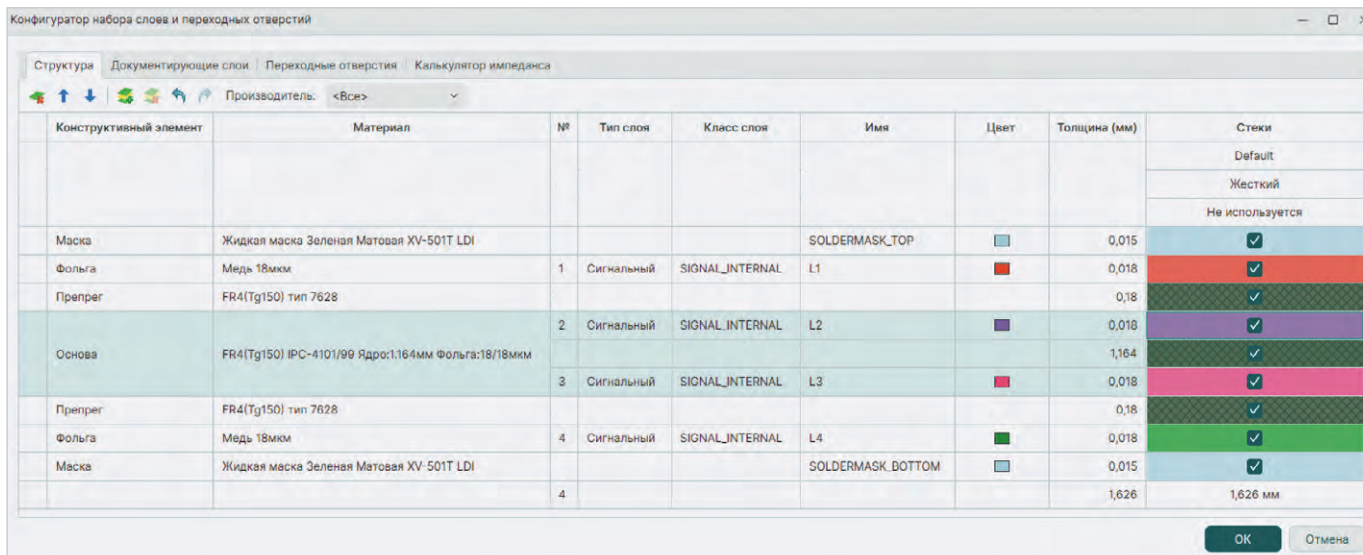


Рис. 2. Конфигуратор набора слоёв и переходных отверстий

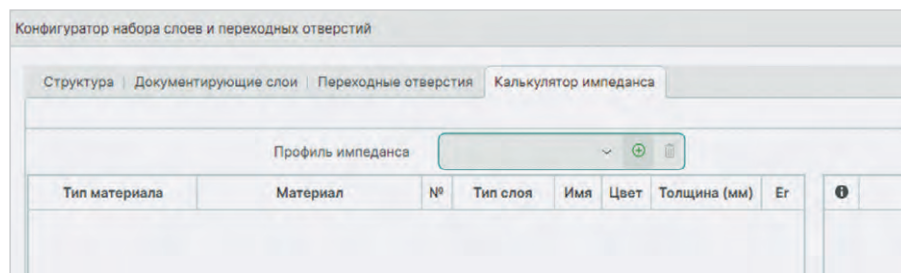


Рис. 3. Добавление профиля импеданса

- задание ширины проводника (W1), подтрава (W2), зазора для дифференциальных пар (S1) в случае необходимости;
 - подбор материалов, их добавление/удаление/перемещение, если это необходимо.
2. Применение рассчитанных параметров одиночных проводников и дифференциальных пар в правилах проектирования:
 - получение def-строчек, содержащих информацию о профиле: ширина проводника, зазор для дифференциальной пары, структура печатной платы, слой;
 - назначение правил для цепей и классов цепей.
 3. Трассировка ЛП, дифференциальных пар или их групп в редакторе печатной платы. При трассировке

рассчитанная ширина и зазор применяются автоматически.

Расчёт геометрических параметров ЛП под заданный импеданс, подбор материалов и структуры печатной платы

В данной статье будет рассмотрен пример проектирования печатной платы с контролем волнового сопротивления одиночной ЛП. Предположим, необходимо спроектировать ЛП для следующей печатной платы.

- Плата состоит из 4 слоёв. Количество слоёв зависит от конкретных конструктивных ограничений. Кроме этого, при формировании структуры печатной платы для высокочастотных цепей необходимо обеспечить прямой и возвратный путь протекания сигнала, а также

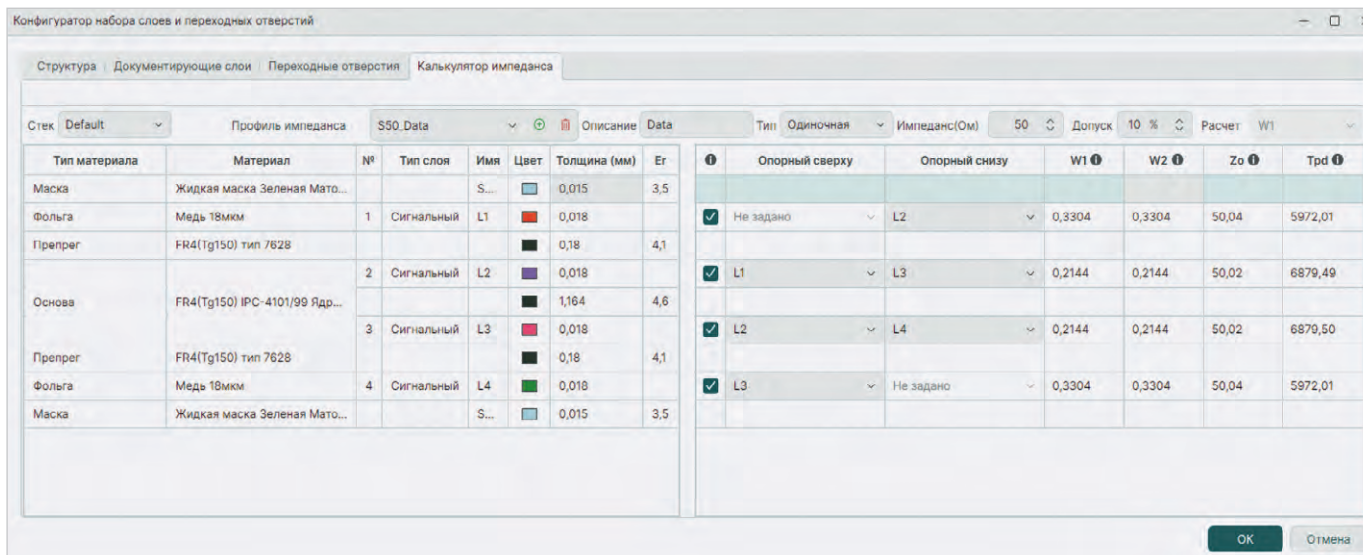


Рис. 4. Профиль одиночной ЛП с импедансом 50 Ом

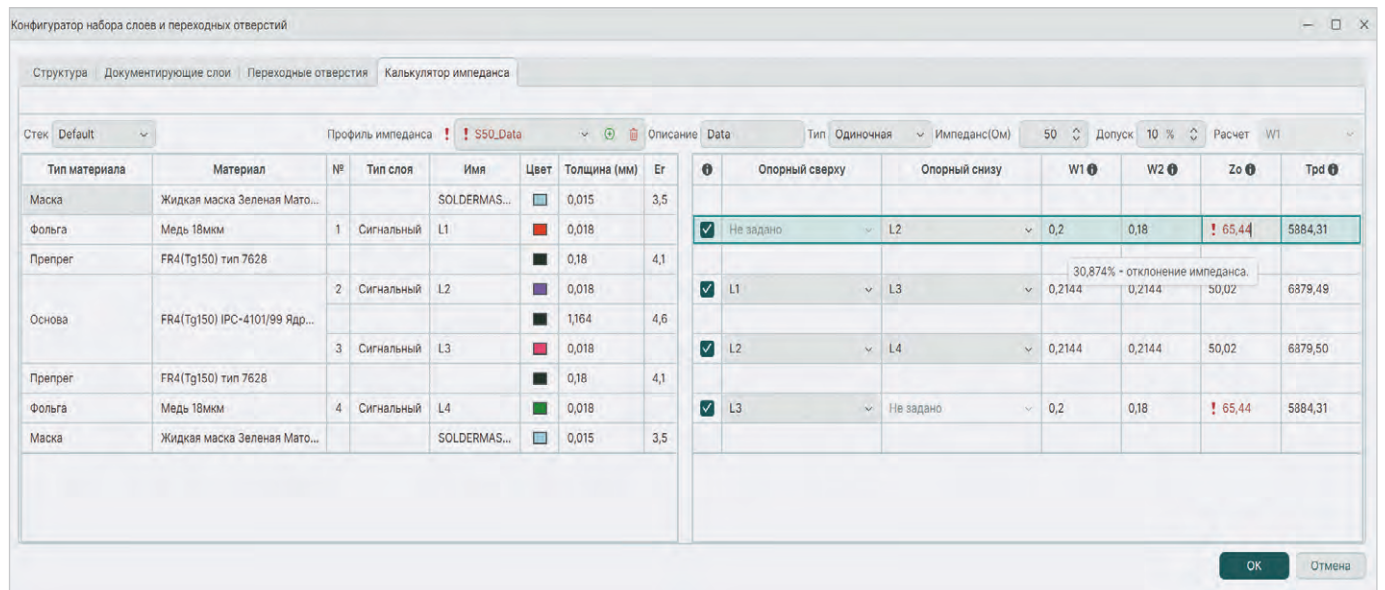


Рис. 5. Сообщение об ошибке, отклонение импеданса больше 30%

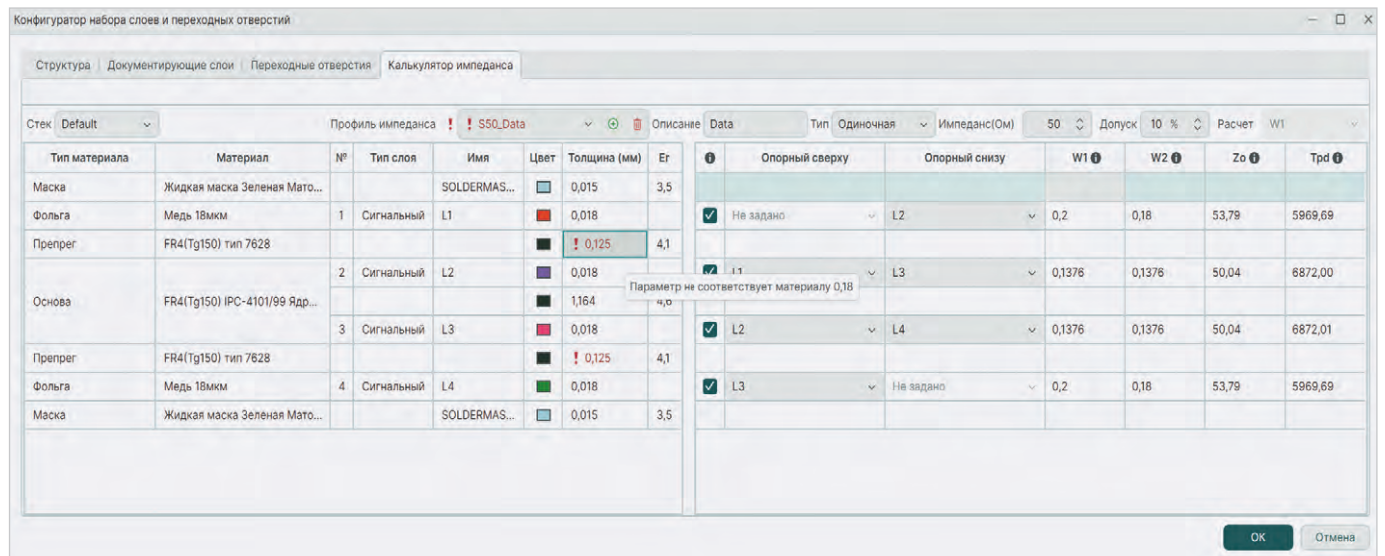


Рис. 6. Изменение толщины материала

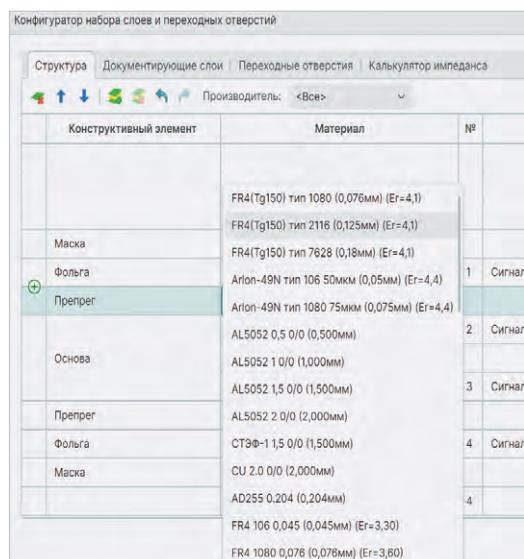


Рис. 7. Выбор материала во вкладке «Структура», колонке «Материал»

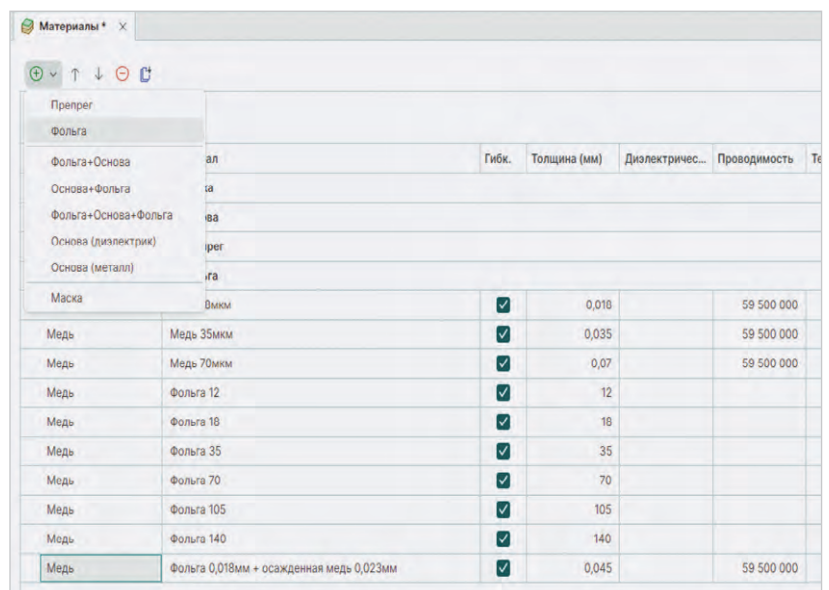


Рис. 8. Добавление нового материала в «Стандарты – Материалы»

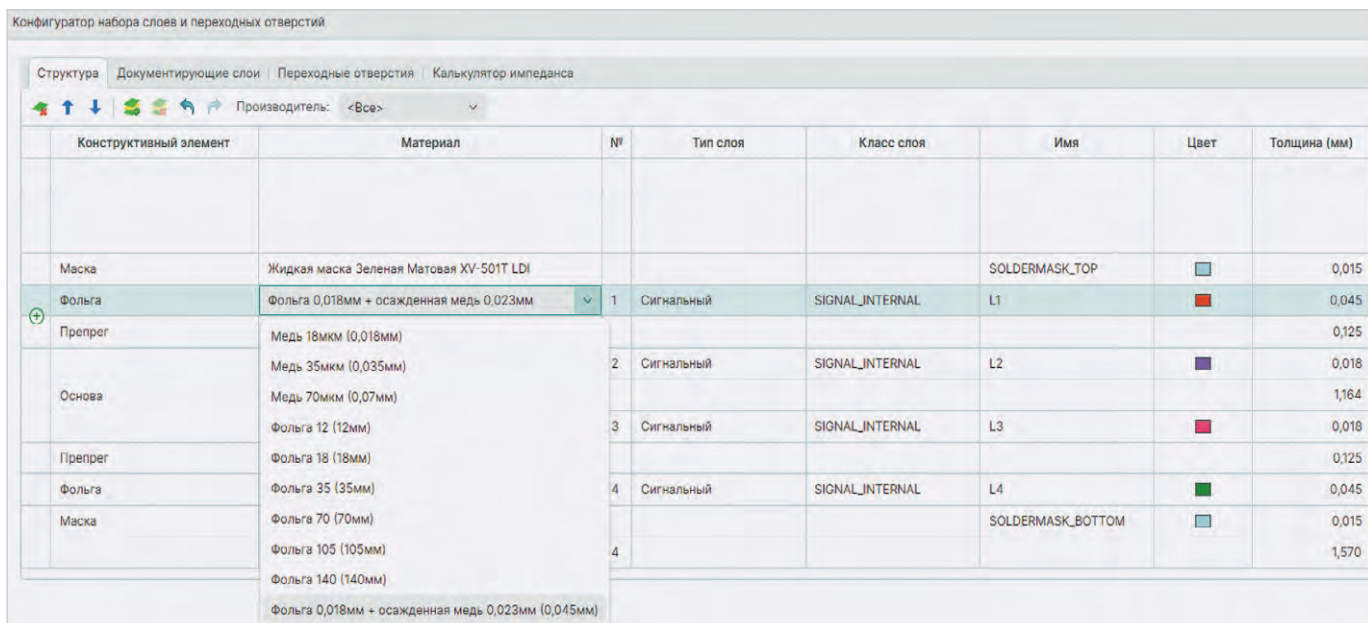


Рис. 9. Замена материала на внешних проводящих слоях

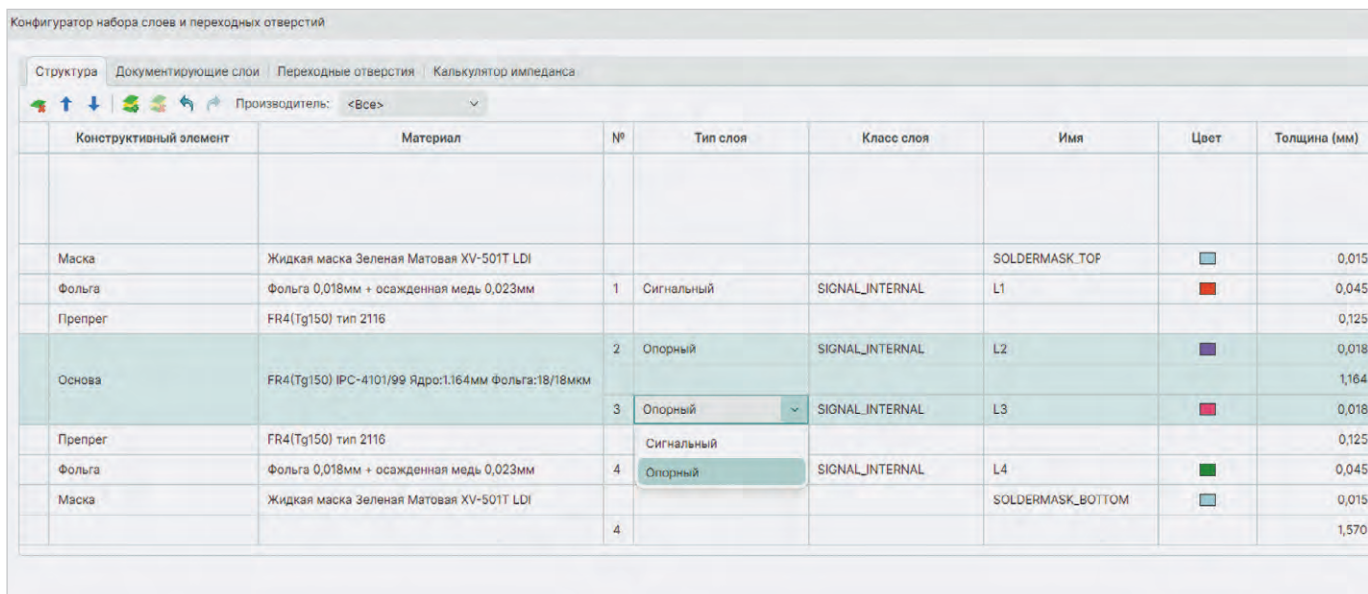


Рис. 10. Изменение типа слоя во вкладке «Структура»

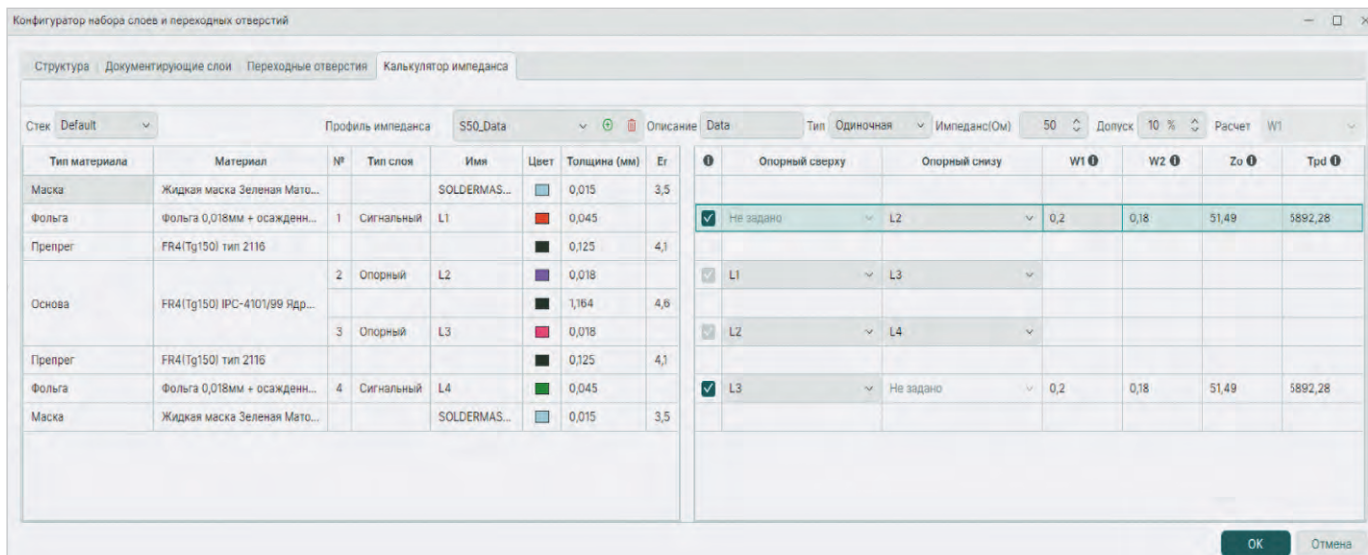


Рис. 11. Расчёт импеданса и задержки сигнала на внешних слоях для W1 = 0,2 мм

организовать планарный конденсатор между потенциальными (опорными) слоями.

- **Импеданс 50 Ом.** Конкретное значение импеданса зависит от выбранного интерфейса. Информация присутствует в документации.
- **Ширина проводника $W1 = 0,2$ мм, с учётом подтравы $W2 = 0,18$ мм на внешних слоях.** Выбор ширины проводника ($W1$) зависит от многих факторов, например, от материалов, доступных на производстве и соответствующих технологическо-

му процессу, класса точности ПП, минимального шага компонентов, потерь, перекрёстных помех и т.д. Подтрав ($W2$) зависит от технологических процессов на заводе. На внешних и внутренних слоях он, как правило, разный. Хороша практика уточнения инженером информации у технологических служб на заводе.

- **Отклонение расчёта импеданса не более 10%.** При расчёте волнового сопротивления для высокоскоростных и высокочастотных сигналов допуск в 10% вполне до-

статочен. В более требовательных случаях может использоваться отклонение в 5%.

- **Внутренние слои.** Второй и третий слой используются как опорные.

1. Необходимо запустить инструмент «Конфигуратор набора слоёв и переходных отверстий». Во вкладке «Структура» будет отображаться текущий стек с материалами (рис. 2).
2. Для контроля волнового сопротивления необходимо выбрать вкладку «Калькулятор импеданса» и добавить новый профиль импеданса, нажав на плюс в верхнем меню (рис. 3).
3. После добавления профиля импеданса программа автоматически посчитает ширину одиночного проводника ($W1$) под заданный импеданс (по умолчанию 50 Ом) на тех слоях, где это возможно (рис. 4).

В верхней части вкладки «Калькулятор импеданса» представлены следующие настройки.

- **Стек** – выбор структуры для расчёта. Например, если используется гибко-жесткая плата с несколькими структурами. Оставим по умолчанию Default.
- **Профиль импеданса** – полное название профиля. Здесь же осуществляется добавление/удаление или выбор другого профиля при его наличии. Оставим по умолчанию один профиль. После изменения типа линии и добавления текста в поле **Описание** название профиля должно измениться на $S50_Data$.
- **Описание** – дополнительная информация о профиле. Изменим имя на **Data**.
- **Тип** – одиночная или дифф. пара. Оставим по умолчанию **Одиночная**.
- **Импеданс** – значение целевого волнового сопротивления. Для данной задачи импеданс составляет 50 Ом. Пользователь всегда может его поменять, если требуется подстройка расчётов под другое значение.
- **Допуск** – рассчитывается между целевым и расчётным импедансом Z_0 или Z_{diff} , в зависимости от типа выбранной ЛП. Оставим по умолчанию 10%.
- **Расчёт** – для одиночной ЛП рассчитывается ширина проводника $W1$. Для дифф. пары вычисление может выполняться как для $W1$, так и для $S1$. Кроме автоматического расчёта $W1$ и $S1$ инженер всегда может ввести свои геометрические параметры



ВАШ ИНФОРМАЦИОННЫЙ ПОПУТЧИК!

Полосковые дисплеи для транспорта

- ЖК-дисплеи серии SPANPIXEL™ с яркостью до 3000 кд/м²
- Размеры по диагонали от 6,2 до 65
- Разрешение до 4K2K
- Угол обзора 178° (во всех плоскостях)
- Диапазон рабочих температур (некоторых моделей) -30...+85°C
- Возможна разработка под заказ
- Ресурс до 100 000 часов

PROCHIP
POWERED BY PROSOFT

ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИСТРИБЬЮТОР

АКТИВНЫЙ КОМПОНЕНТ ВАШЕГО БИЗНЕСА
(495) 232-2522 • INFO@PROCHIPRU • WWW.PROCHIPRU



PROCHIP

```

1 def 550_Data { L1 {Layer="L1"; Width=0,2; Stack="Default"}; L4 {Layer="L4"; Width=0,2; Stack="Default"}}
2 Allow: (Any) = {TJunction:PinViaTrack}
3 DiffPair: (Any) = {Min:0.1; Nom:0.1; Neck:0.1; NeckGlobal:3.0; NeckLocal:1.0; GapMin:0.1; GapNom:0.1; NeckGap:0.05; GapTolerance+:0.004; GapTolerance-:0.004}
4 DiffPair: (Any) = {UncoupledGlobal:3; UncoupledLocal:3; PhaseTolerance:3; IncludeGathering:true}
5 Width: (IsAnnualRing) = 0.025
6 Width: (Any) = {Min:0.1; Nom:0.1; Neck:0.1; NeckGlobal:3.0; NeckLocal:1.0}
7 ClearanceSN: (IsTrack; IsHole) = 0.1
8 ClearanceSN: (IsSmdPad; IsHole) = 0.1
9 ClearanceSN: (IsThroughPad; IsVia || IsHole) = 0.1
10 ClearanceSN: (IsVia; IsHole) = 0.1
11 Clearance: (IsHole; IsBorder) = 0.125
12 Clearance: (IsHole; IsHole) = 0.15
13 Clearance: (IsMetal; IsBorder) = 0.1
14 ClearanceSN: (IsMetal; IsHole) = 0.1
    
```

Рис. 12. Строчка def, содержащая информацию о профиле импеданса

```

1 def 550_Data { L1 {Layer="L1"; Width=0,2; Stack="Default"}; L4 {Layer="L4"; Width=0,2; Stack="Default"}}
2 Width: (Net="A0") use 550_Data
3 Width: (NetClass="B") use 550_Data
4 Allow: (Any) = {TJunction:PinViaTrack}
5 DiffPair: (Any) = {Min:0.1; Nom:0.1; Neck:0.1; NeckGlobal:3.0; NeckLocal:1.0; GapMin:0.1; GapNom:0.1; NeckGap:0.05; GapTolerance+:0.004; GapTolerance-:0.004}
6 DiffPair: (Any) = {UncoupledGlobal:3; UncoupledLocal:3; PhaseTolerance:3; IncludeGathering:true}
7 Width: (IsAnnualRing) = 0.025
8 Width: (Any) = {Min:0.1; Nom:0.1; Neck:0.1; NeckGlobal:3.0; NeckLocal:1.0}
9 ClearanceSN: (IsTrack; IsHole) = 0.1
10 ClearanceSN: (IsSmdPad; IsHole) = 0.1
11 ClearanceSN: (IsThroughPad; IsVia || IsHole) = 0.1
12 ClearanceSN: (IsVia; IsHole) = 0.1
13 Clearance: (IsHole; IsBorder) = 0.125
14 Clearance: (IsHole; IsHole) = 0.15
15 Clearance: (IsMetal; IsBorder) = 0.1
16 ClearanceSN: (IsMetal; IsHole) = 0.1
    
```

Рис. 13. Применение профиля к цепи и классу цепей

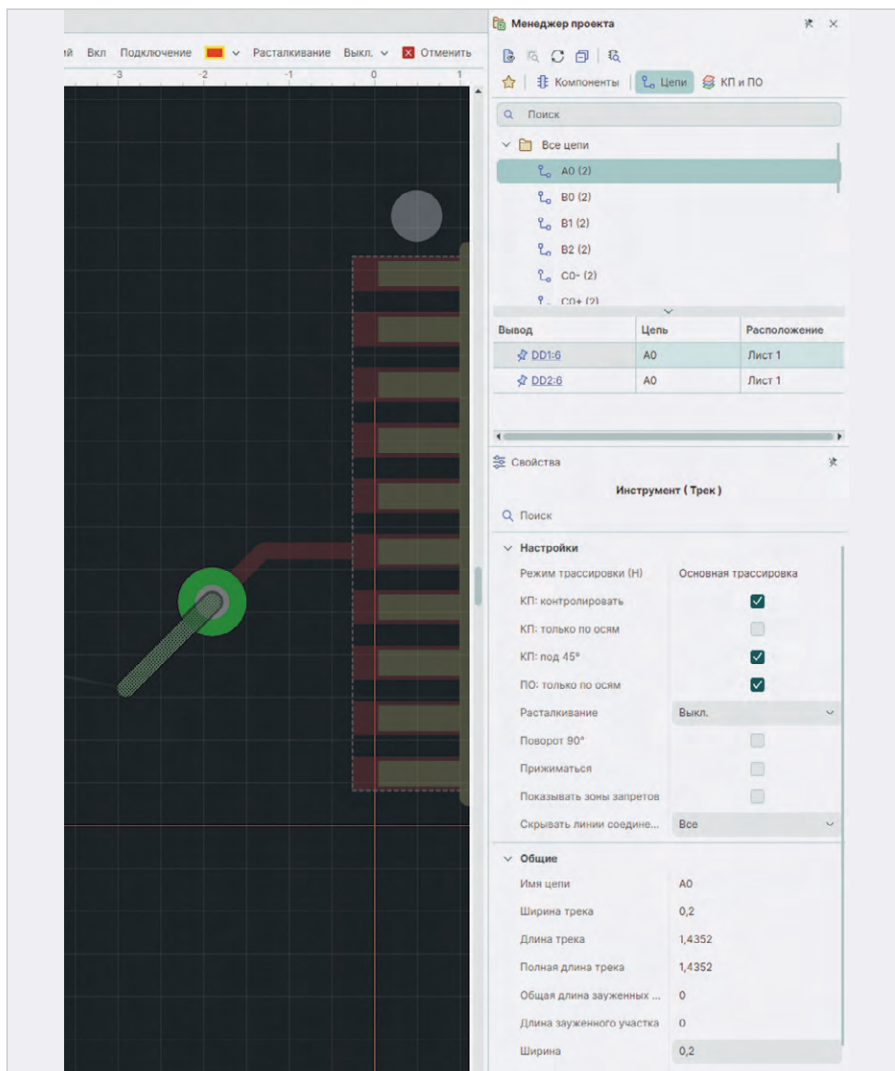


Рис. 14. Автоматическое применение размеров ширины проводника при переходе со слоя на слой для одиночного проводника

линии передачи и получить соответствующие им значения Z_0 или Z_{diff} . Система автоматически вычисляет $W1$ или $S1$ под заданное волновое сопротивление таким образом, чтобы отклонение от номинального значения было минимальным (рис. 4). В данном случае ширина проводника на слоях L1 и L4 для 50 Ом составляет 0,33 мм.

Изменим ширину проводника во вкладке «Калькулятор импеданса» для слоёв L1 и L2 на данные, указанные в условии выше: $W1 = 0,2$ мм, $W2 = 0,18$ мм. Расчётный импеданс примет значение 65,44 Ом. Отклонение более 30%, что недопустимо. В ячейке Z_0 и профиле импеданса будут сообщения об ошибке (рис. 5).

Для того чтобы импеданс попал в нужный допуск (%), а ширина проводника $W1$ соответствовала определённой величине, необходимо подобрать материалы с определёнными параметрами (толщина и диэлектрическая проницаемость) и стек ПП.

В распоряжении инженера два поля: **Толщина (мм)** и диэлектрическая проницаемость ϵ_r , а также возможность проводить любые манипуляции с перемещением, добавлением и удалением слоёв как проводящих, так и диэлектрических. Используя данные о реальных материалах, изменим толщину диэлектрика между слоями L1–L2 и L3–L4 на 0,125 мм. Дан-

ный параметр соответствует **препрегу FR4 (Tg150) тип 2116**. При этом Z_0 на внешних слоях составит 53,79 Ом, что близко к заданному (рис. 6).

Система отслеживает параметры применяемых материалов и не позволяет использовать абстрактные. На рис. 6 показано сообщение об ошибке. Это реакция программы на несоответствие. Специалисту следует использовать материалы в структуре печатной платы только из «Стандартов», которые должны соответствовать реальным, имеющимся в наличии у завода-изготовителя.

В данном случае подходящий материал присутствует: **препрег FR4 (Tg150) тип 2116** с толщиной 0,125 мм. Установим его между слоями L1–L2 и L3–L4 (рис. 7).

Если материала нет в наличии, то его необходимо добавить в раздел «Материалы» панели «Стандарты». Параметры материала должны полностью соответствовать реальному, применяемому на заводе-изготовителе.

Для примера добавим в раздел новый материал: **Фольга 0,018 мм + осаждённая медь 0,023 мм** (рис. 8). Таким образом можно учесть увеличение толщины меди на внешних слоях после металлизации отверстий.

Во вкладке «Структура» для слоя L1 и L2 применим новый материал (рис. 9).

Здесь же, в колонке **Тип слоя**, назначим L2 и L3 как опорные (рис. 10). После этого в калькуляторе импеданса внутренние слои станут недоступны для расчёта волнового сопротивления.

В «Калькуляторе импеданса» снова назначим на внешних слоях $W1 = 0,2$ мм и $W2 = 0,18$ мм. При этом Z_0 составит 51,47 Ом.

В табл. 1 показано значение волнового сопротивления для разных материалов.

Последний вариант является наиболее предпочтительным. Для сохранения расчётов и передачи данных в правила необходимо нажать кнопку «ОК».

Применение рассчитанных параметров одиночных проводников и дифф. пар в правилах проектирования

Данные из «Калькулятора импеданса» в «Конфигураторе слоёв и переход-

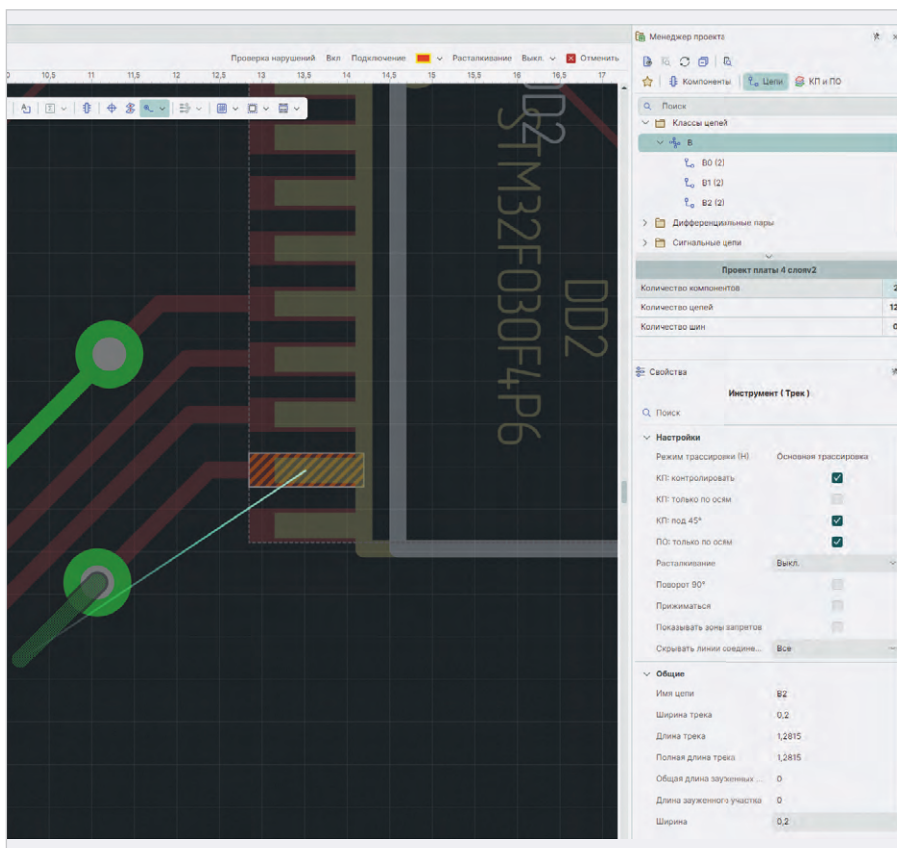


Рис. 15. Автоматическое применение размеров ширины проводника при переходе со слоя на слой для проводника, входящего в класс

Таблица 1. Импеданс ЛП

Описание	Материалы (мм)	Z_0 (Ом)
Изначальное состояние стека	Толщина препрега 0,18 Толщина фольги 0,018	65,44
Коррекция толщины диэлектрика, изменение препрега	Толщина препрега 0,125 Толщина фольги 0,018	53,79
Коррекция толщины проводящего слоя	Толщина препрега 0,125 Толщина фольги 0,045	51,47

ных отверстий» передаются в правила проектирования. В правилах они представляются в виде командных строк, которые начинаются с **def**.

Ниже представлен пример строчки из редактора правил (рис. 12).

Командная строка выглядит следующим образом:

```
def S150_Data { L1 {Layer="L1"; Width=0,2; Stack="Default"; L4 {Layer="L4"; Width=0,2; Stack="Default"}}
```

Здесь:

- S50_Data** – название профиля;
- Layer L1 и L4** – слои, для которых применяется правило;
- Default** – стек печатной платы;
- Width=0,2** – ширина проводника в мм.

На рис. 13 показано назначение профиля к конкретной цепи и классу цепей.

Командные строки выглядят так:

```
Width: (Net="A0") use S50_Data; Width: (NetClass="B") use S50_Data.
```

Если расчёт выполняется для дифф. пар, например с параметрами, представленными ниже:

D100_NewProfile:

- слой L1 с шириной проводника = 0,16 мм и зазором внутри дифф. пары = 0,1 мм, стек – Default;
- слой L2 с шириной проводника = 0,12 мм и зазором внутри дифф. пары = 0,12 мм, стек – Default, то:

```
def D100_NewProfile { L1 {Layer="L1"; Width=0,16; Stack="Default"; Gap=0,1}; L2 {Layer="L2"; Width=0,12; Stack="Default"; Gap=0,12};
```

Назначение профиля для конкретной дифф. пары:

DiffPair: (Net="A") use D100_NewProfile.

Для класса дифф. пар:
DiffPair: (NetClass="D") use D100_ NewProfile.

После внесения изменений в правила их следует сохранить.

Трассировка линий передач, дифф. пар или их групп в редакторе печатной платы

Трассировка проводников с контролируемым волновым сопротивлением аналогична прокладке обычных трасс. Система автоматически применяет ширину, рассчитанную для заданного импеданса. Например, если выбрать цепь A0 из представленного примера и начать выполнять трассировку на слое L1, то применится ширина проводника, равная 0,2 мм. Данный параметр соответствует волновому сопротивлению в 50 Ом. При переходе на слой L4 ширина сохранится (рис. 14).

Подобным же образом работает трассировка и для класса цепей (рис. 15).

Заключение

«Калькулятор импеданса» в «Конфигураторе набора слоёв и переходных отверстий» САПР Delta Design реализован на основе инструмента SimPCB и интегрирован в маршрут проектирования печатных плат, что позволяет осуществлять контроль волнового сопротивления как одиночных, так и дифференциальных линий передачи, проектировать структуру, учитывать материалы и особенности производства. Любые изменения структуры печатной платы приводят к быстрому пересчёту параметров линий. В случае выхода импеданса за указанный допуск система оповещает специалиста, исключая появление ошибок. Данные из конфигуратора набора слоёв автоматически передаются в правила проектирования, позволяя инженеру сосредоточиться на процессе разработки устройства, а не на рутинных действиях.

Основные преимущества нового подхода:

- расчёт геометрических параметров линий передачи (одиночных и дифференциальных) под заданный импеданс непосредственно в инструменте «Конфигуратор набора слоёв и переходных отверстий»;
- управление материалами. Специалист разрабатывает не абстрактную структуру, а реальную. Контроль импеданса осуществляется в связке с библиотекой материалов и их параметров;

осуществляется в связке с библиотекой материалов и их параметров;

● оповещение инженера в случае выхода волнового сопротивления за указанный допуск;

● автоматическое применение рассчитанных параметров линий передачи в правилах;

- трассировка с учётом импеданса.

Список литературы

1. Кечиев Л.Н. Печатные платы и узлы гигабитной электроники. М.: Грифон, 2017. 424 с.
2. Обзор основных возможностей инструмента SimPCB для расчёта параметров линий передач в программе Delta Design // Современная электроника. 2024. № 5. С. 34–36.
3. Ухин В.А., Коломенский Д.С., Кухарук В.С. и др. Методы расчёта волнового сопротивления линий передач на печатных платах // Современная электроника. 2023. № 9. С. 40–42.
4. Кухарук В.С., Коломенский Д.С., Ухин В.А. и др. Сравнение результатов расчётов волнового сопротивления линий передач на печатных платах // Современная электроника. 2023. № 9. С. 43–45.





OLED-дисплеи Raystar



Специсполнение по ТЗ заказчика



Прозрачные модели





АВТОМОБИЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА • СИСТЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ • ИЗМЕРИТЕЛИ МОЩНОСТИ • БЫТОВАЯ ТЕХНИКА • МЕДИЦИНСКИЕ ПРИБОРЫ

Характеристики

- Яркость экрана до 150 кд/м² обеспечивает считывание изображения при ярком солнечном свете
- Высокая контрастность 10 000:1
- Широкий угол обзора до ±175°
- Цвет свечения: жёлтый, зелёный, красный, белый, синий
- Формат изображения: 122×32, 128×64, 240×64, 256×64 и 96×64 точки

- Низкая потребляемая мощность 10 мА (схемы управления – токовые)
- Светоэмиссионная схема: не требуется система подсветки
- Короткое время отклика: 10 мкс при температуре +25°C
- Широкий диапазон рабочих температур от –40 до +80°C
- Малая толщина модуля дисплея, небольшой вес
- Срок службы: 50 000 ч для белого и синего цвета; 100 000 ч для жёлтого, зелёного, красного цветов



официальный дистрибьютор

АКТИВНЫЙ КОМПОНЕНТ ВАШЕГО БИЗНЕСА

(495) 232-2522 ▪ INFO@PROCHIP.RU ▪ WWW.PROCHIP.RU



Жорес Алфёров – учёный, благодаря которому работает большинство современных полупроводниковых лазеров.

Часть 2. Гетерогенные лазеры

Виктор Алексеев

В первой части статьи, опубликованной в журнале «Современная электроника» № 8, 2024, были рассмотрены те основные достижения в области лазеров, к которым мировая наука подошла в начале 1960-х. В этой части описаны основные научные достижения группы Алфёрова в исследованиях 1960–1970-х годов в области разработки двойных гетероструктур и создание на их основе полупроводниковых инжекционных ДГС-лазеров.

Полупроводники с гомопереходами

В первой части статьи, опубликованной в журнале «Современная электроника» № 8, 2024, были рассмотрены основные принципы и этапы развития лазеров до начала 1960-х годов. Завершался первый этап разработок полупроводниковых инжекционных лазеров с одним прямым р-п-переходом (гомопереходом). Эти лазеры могли испускать стимулированное когерентное излучение в инфракрасной области спектра только при охлаждении жидким азотом (77К). При комнатной температуре они работали как обычные светодиоды, излучающие некогерентные, размытые пучки фотонов с длинами волн, близкими к красной области спектра.

Многочисленные попытки усовершенствования этих первых твердотельных лазеров выявили ряд непреодолимых на тот момент времени конструкторских и технологических

барьеров, связанных, прежде всего, с неустойчивой инверсией населённости, а также с необходимостью охлаждения рабочего тела до криогенных температур, высокими порогами возбуждения, высокой расходимостью светового луча и низким КПД. Большинство теоретиков склонялось к мысли, что создание надёжного полупроводникового лазера в принципе невозможно.

Существовавшая в то время технология изготовления полупроводников была основана на том, что зоны акцепторного и донорного типов (р-зона и п-зона) изготавливались методом сильного легирования полупроводников, чаще всего на основе арсенида галлия. При этом собственные электрические свойства «материнского» полупроводника практически вытеснялись свойствами примеси. Арсенид-галлиевый р-п-переход получали стандартным методом с помощью диффузии цинка, легированного теллуром. Более подробно такие лазеры описаны в первой части статьи.

Такой тип перехода, образованного между двумя областями одного и того же полупроводникового материала, но с разными типами легирования (р-типа и п-типа), получил название «Homojunction» – гомопереход.

Упрощённая схема энергетических зон р-п-перехода GaAs, сильно легированного с обеих сторон и смещённого в прямом направлении, показана на рис. 1 [1].

При этом их рекомбинация вызывает некогерентное (спонтанное) излучение.

В случае недостаточного смещения электроны диффундируют со стороны п-типа на сторону р-типа, а дырки – в противоположном направлении.

Для того чтобы получить инициированное когерентное излучение, характерное для лазера, необходимо достичь инверсии населённости, которая возможна только в том случае, когда прямое смещение больше, чем ширина запрещённой зоны. Однако с помощью схемы, показанной на рис. 1, инверсию населённости трудно достичь в обычном р-п гомопереходе. Даже при вырожденном легировании как электроны, так и дырки будут быстро диффундировать из активной области в соседнюю противоположно легированную область, предотвращая условие возникновения инверсии населённости (более подробно этот вопрос рассмотрен в первой части статьи).

Полупроводниковые широкозонные транзисторы

В 1956 году будущий нобелевский лауреат Уильям Брэдфорд Шокли (William Bradford Shockley) впервые предложил использовать в транзисторах переход на базе широкозонного эмиттера (Wide-Gap Emitter), что позволяло обеспечить однонаправленную инжекцию носителей заряда и управлять потоком электронов или дырок в одном направлении [2].

Термин «широкозонный эмиттер» относится к полупроводникам с большей запрещённой зоной, определяющей разницу энергий между валентной зоной и зоной проводимости.

Уильям Шокли показал, что в случае транзисторов большая запрещённая зона создаёт энергетический барьер, который позволяет носите-

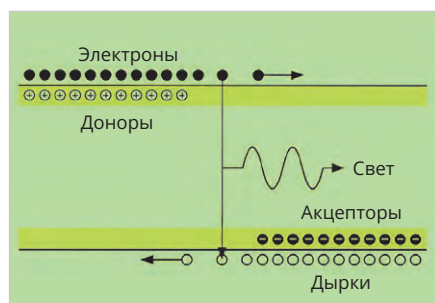


Рис. 1. Упрощённая схема энергетических зон р-п гомоперехода, смещённого в прямом направлении

лям заряда легко течь от эмиттера к базе, но затрудняет их перемещение в обратном направлении. Такой подход позволил создавать условия для однонаправленной инжекции и снижать нежелательную рекомбинацию.

Значительный вклад в развитие полупроводниковых широкозонных структур внёс немецкий физик-теоретик Герберт Крёмер (Herbert Kroemer), разделивший в 2000 году Нобелевскую премию с Жоресом Алфёровым. В то время как Шокли предложил только общую концепцию широкозонного эмиттера, Крёмер разработал обобщённую теоретическую модель, описывающую подобные вопросы. В настоящее время трудно сказать, кто первый ввёл термин «полупроводниковая гетероструктура». Однако этот термин стали широко использовать, именно ссылаясь на работы Крёмера [3, 4].

На сегодняшний день наиболее общими являются следующие понятия. Полупроводниковая гетероструктура – это выращенная на подложке структура, состоящая из слоёв различных полупроводников, которые различаются шириной запрещённой зоны или сродством к электрону. Гетеропереход – это тонкая граничная область между двумя полупроводниками в гетероструктуре. Важно понимать, что гетеропереход не является простым, чисто механическим контактом двух разных полупроводников.

Герберт Крёмер ввёл понятие градиентного гетероперехода, обусловившего постепенное изменение энергии и ширины запрещённой зоны. Крёмер также предложил концепцию встроенных квазиэлектрических полей в градиентной области гетероперехода, которые усиливают движение носителей в одном направлении. Благодаря этим полям на краях гетероперехода существуют области (Graded Heterojunction) с размерами порядка десятков нанометров, в которых переход от свойств одного полупроводника к свойствам другого меняется постепенно, а не резким скачком.

При этом постепенное изменение полупроводниковых свойств приводит к изменению также и зонной структуры, что обеспечивает плавный переход на краях зоны проводимости и валентной зоны. Кроме того, плавный переход может уменьшить количество состояний интерфейса, действующих как центры безызлу-

чательной рекомбинации, а также постепенное изменение структуры зоны может способствовать плавному транспорту носителей заряда через переход.

Как было отмечено в первой части статьи, разработки твердотельных полупроводниковых инжекционных лазеров к началу 1960-х практически натолкнулись на своеобразный барьер, непреодолимый с точки зрения существующих на тот момент времени технологий. Прежде всего, известные схемы лазеров и доступные полупроводники не позволяли создать зону инверсной заселённости, необходимую для возникновения стимулированного когерентного излучения.

Выход из сложившейся ситуации предложили в 1963 году практически одновременно и независимо друг от друга российские и американские физики.

В СССР сотрудники Ленинградского Физико-Технического Института Жорес Алфёров и Рудольф Казаринов сформулировали и запатентовали концепцию полупроводниковых лазеров на основе двойной гетероструктуры. В описании идеи патента они особо указали на то, что лазеры на гомопереходах не обеспечивают непрерывного режима генерации при высоких температурах. Вместо схемы с гомопереходом на основе вырожденных полупроводников (рис. 1) Алфёров и Казаринов предложили лазер с комбинированной полупроводниковой структурой, в которой активный полупроводник с узкой запрещённой зоной был размещён между двумя проводниками с более широкой запрещённой зоной. Забегая вперед, отметим, что толщина этого активного слоя составляет десятки-сотни нанометров.

Эта конструкция, напоминающая вафлю, предотвращала «утекание» из инверсной зоны как электронов, так и дырок с помощью внешних обкладок.

Напомним, что классическое определение гетероперехода (Heterojunction) означает интерфейс между двумя различными полупроводниковыми материалами с разной шириной запрещённой зоны.

Таким образом, в патенте Алфёрова и Казаринова два гетероперехода, ограничивающие тонкий полупроводниковый слой с меньшей запрещённой зоной, позволяют за счёт электрической накачки создать между ними уровень инверсной заселённости,

обусловливающий стимулированное когерентное излучение.

Позже такая схема получила название «лазеры с двойной гетероструктурой» – Double Heterostructure, или Double Heterojunction DH.

Важно то, что схема с двумя гетероструктурами (ДГС) предполагает инжекцию носителей с обоих ограничивающих боковых слоёв, значительно увеличивая плотность носителей и инверсную заселённость. Необходимым условием реализации схемы с ДГС является то, что эта транзисторная структура должна представлять собой единое целое, в котором полупроводники выращены один на другом, а не просто механически склеены [5].

Удивительно то, что, не имея никакой возможности узнать об этой работе, американский физик-теоретик Герберт Крёмер (Herbert Kroemer) пришёл к точно такому же выводу, что и Жорес Алфёров. Весной 1963 года на семинаре в корпорации «Varian Associates» (Пало-Альто, Калифорния, США) доктор Сол Миллер сообщил, что, согласно мнению авторитетных экспертов, принципиально невозможно добиться устойчивой инверсии населённости при комнатной температуре, поскольку инжектированные носители слишком быстро диффундируют на противоположную сторону перехода. На это категорическое заявление Герберт Крёмер возразил, что теоретически это вполне возможно, если увеличить энергетический разрыв между инверсным слоем и внешними донорными зонами. Эту идею Крёмер изложил в статье, которую направил в журнал Applied Physics Letters. Однако доказательства Крёмера настолько отличались от общепризнанной точки зрения, что эта статья была отклонена редакцией на основании того, что «не представляет интереса с точки зрения прикладной физики». Поэтому Крёмер отправил свою статью в журнал Proceedings of the IEEE, где она была принята для публикации 12 декабря 1963 года [6].

Используя свои отмеченные выше разработки в области широкозонных транзисторов, Крёмер предложил свою собственную конструкцию инжекционных лазеров с гетерогенными переходами [7].

В августе 1963 года Герберт Крёмер подал заявку на патент для своей кон-

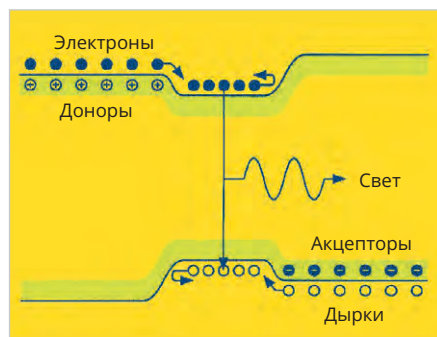


Рис. 2. Упрощённая структурная схема энергетических уровней инжекционного лазера с двойной гетероструктурой

струкции инжекционного гетеролазера [8].

На рис. 2 показана упрощённая структурная схема энергетических уровней лазера с двойной гетероструктурой [6], наглядно объясняющая принцип работы ДГС-лазера.

В гетеропереходе возникает повышенная концентрация носителей заряда, формирующая состояние, при котором электроны могут двигаться свободно только в двух направлениях. При этом движение носителей заряда в третьем направлении может регулироваться либо с помощью внешнего поля, либо за счёт уменьшения размеров полупроводника (квантово-размерный эффект – КРЭ).

При увеличении прямого смещения образуются потенциальные ямы как для электронов, так и для дырок. Ограничение носителей в двойной гетероструктуре связано с тем, что потенциальные барьеры препятствуют оттоку инжектированных электронов и дырок из инверсной области, не мешая при этом потоку основных носителей из областей инжектора.

При этом происходит накопление инжектированных носителей заряда до концентраций, сравнимых с вырожденными значениями.

Таким образом, создаются необходимые условия для возникновения состояния инверсной населённости, возбуждающего стимулированное лазерное излучение.

Нужно чётко понимать, что как патент Алфёрова, так и патент Крёмера представляли собой чисто теоретические разработки, не подкреплённые никакими собственными экспериментальными результатами.

Сравнивая вклады этих двух выдающихся учёных в теорию и практику развития направления полупроводни-

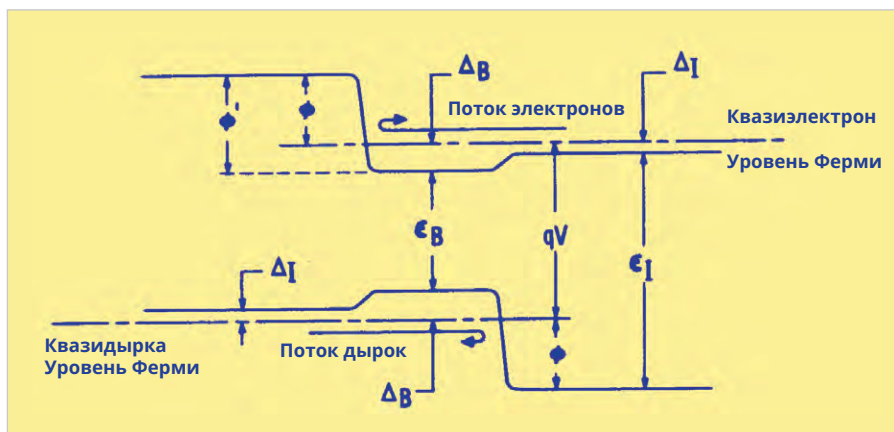


Рис. 3. Зонная диаграмма лазера с двойной гетероструктурой (Крёмер-1963)

ковых лазеров, следует подчеркнуть, что Герберт Крёмер, будучи блестящим физиком-теоретиком с огромным стажем работы в области полупроводниковых транзисторов, более подробно объяснил в своём патенте принципы работы инжекционного лазера с ДГС.

Однако Жорес Алфёров, обладавший реальным талантом экспериментатора и организатора науки, сумел много позже не только реализовать на практике эти идеи, но также и разработать технологии для массового производства ДГС-лазеров различных конструкций.

На рис. 3, взятом из первооткрывательской статьи Крёмера, 1963 [7], показана зонная диаграмма лазера с двойной гетероструктурой.

Электроны диффундируют из n-легированной области, а дырки, соответственно, из p-легированной. В активном слое они рекомбинируют и стараются вернуться в донорные зоны.

Характерной особенностью гетероперехода является наличие потенциальных ям, удерживающих электроны и дырки. В квантовой яме электроны, находящиеся в состоянии двумерного электронного газа (Two-Dimensional Electron Gas), ограничены в движении по одной из декартовых координат. Структура ямы определяется профилем зоны проводимости полупроводниковой структуры.

Вероятность того, что электрон может перейти на другой уровень с определённой энергией E , зависит от функции Ферми. Уровень Ферми (Fermi Level) расщепляется в активном слое благодаря инверсии. Для зоны проводимости и валентной зоны вводятся понятия квазиуровней Ферми, соответственно F_v и F_c . Электроны, находящиеся на уровне выше энергии

Ферми, могут ускоряться электрическим полем, и длина их пробега позволяет покинуть активную область в том случае, когда прямое смещение меньше, чем ширина запрещённой зоны. Обкладки из полупроводника с более широкой запрещённой зоной возвращают эти электроны обратно в активную зону. Такое изменение приводит к появлению на стороне p-проводимости квазиэлектрического поля, отталкивающего электроны, а на стороне n-проводимости аналогичного квазиэлектрического барьера, отталкивающего дырки. Квазиэлектрические силы с обеих сторон начинают выдавливать как электроны, так и дырки в активную область. В результате концентрации электронов и дырок могут значительно превышать значения, соответствующие уровням легирования в контактных областях. В активной зоне, непосредственно примыкающей к p-n-переходу, реализуется инверсная заселённость, характеризующаяся тем, что энергетическое расстояние между квазиуровнями Ферми больше, чем ширина запрещённой зоны ($F_v - F_c > E_g$).

Приоритетная дата патента Жореса Алфёрова была зафиксирована как «30 марта 1963 года». Статья в журнале Proceedings of the IEEE, которая официально представила идеи Герберта Крёмера, была опубликована 12 декабря 1963 года, то есть на восемь месяцев позже патента Алфёрова. Поэтому формально изобретателями первой конструкции инжекционного полупроводникового лазера с двумя гетеропереходами типа ДГС считаются Жорес Алфёров и Рудольф Казаринов.

Хотя статья Герберта Крёмера была опубликована значительно позже даты официальной регистрации заявки на патент Жореса Алфёрова, о рабо-

тах советских физиков Крёмер не знал, поскольку в начале 1960-х, во времена «железного занавеса», на Западе были практически недоступны любые публикации на русском. В основном западные учёные узнавали о работах советских физиков с задержкой в несколько лет из англоязычных обзоров. С другой стороны, учёные в СССР, печатавшиеся в основном в отечественных изданиях внутри страны, практически не имели реальной возможности публиковать свои статьи в иностранных журналах.

Несмотря на разницу в приоритетных датах, в 2000 году Нобелевская премия по физике в разделе «Фундаментальные работы в области информационных и коммуникационных технологий» была присуждена в соотношении 25% Жоресу Алфёрову и 25% Герберту Крёмеру за разработки в области гетерогенных лазеров (оставшиеся 50% получил Джек Килби за изобретение интегральной схемы).

Примечательно, что идея Жореса Алфёрова не была по достоинству оценена его коллегами. Они считали идею Алфёрова практически нереализуемой и называли «бумажным патентом». Такое отношение было отчасти вызвано тем, что в качестве примера реализации, который формально необходимо было указывать в заявке на изобретение, Алфёров указал фосфид галлия и сульфида кадмия в качестве эмиттеров, а селенид кадмия в качестве активного вещества. Достаточно быстро выяснилось, что эти соединения неустойчивы при комнатных температурах. Жоресу Алфёрову потребовалось максимально использовать свою целеустремленность, мужество и талант организатора, чтобы убедить администрацию Физтеха и своих молодых сотрудников продолжить работы в этом направлении [8].

Ещё более неприятная история произошла и с Гербертом Крёмером, которому было отказано в финансировании работ над новым типом лазеров с ДГС. В качестве основания для отказа американские научные чиновники использовали заключение «экспертов», заявивших о «бесперспективности реализации и невозможности практического использования данного изобретения». Поэтому Герберт Крёмер, фактически заложивший теоретические основы ДГС, в последующие десять лет был вынужден заниматься другими проблемами [6].

Устойчивые, согласованные полупроводниковые гетероструктуры для ДГС-лазеров

В целом изобретения Алфёрова и Крёмера указали путь для дальнейшего развития полупроводниковых лазеров. Однако для того, чтобы перейти от теоретической схемы к действующему макету гетерогенных лазеров, работающих при нормальных условиях окружающей среды, потребовались многие дальнейшие годы поисков эффективных комбинаций устойчивых полупроводниковых гетероструктур.

Вопрос соответствия кристаллических решеток в гетероструктурах является важнейшей концепцией в проектировании полупроводниковых приборов, особенно для лазеров и других оптоэлектронных приборов.

Напомним, что гетероструктура – это единое образование, а не просто механическое соединение разных полупроводников. Гетеропереходы образуются только тогда, когда слои полупроводников с разными запрещёнными зонами последовательно наращиваются один на другом.

При этом инверсный слой образуется в том случае, если два разных полупроводниковых материала имеют очень похожие параметры (постоянные) кристаллической решётки, определяемые размерами элементарной кристаллической ячейки кристалла. В литературе обычно приводят только среднюю длину рёбер ячейки и тип решётки.

Кроме того, не должно быть дефектов и деформаций на границе раздела между материалами. Крайне важное свойство, которым должны обладать структуры с гетеропереходами, – это сохранение всех своих параметров на протяжении по крайней мере десятков лет.

Таким образом, в начале 1960-х годов перед разработчиками стояла крайне сложная технологическая задача, решение которой многие считали вообще невозможным.

Кроме того, что многие из синтезированных образцов были просто нестабильны и разлагались на воздухе при комнатной температуре, не удавалось избавиться и от структурных дефектов. Например, дислокации несоответствия образовывались при снятии деформации в случаях, когда разница в значениях постоянных кри-

сталлических решёток была слишком большой для конкретной пары полупроводников.

В ряде случаев структурные дефекты приводили к образованию центров безызлучательной рекомбинации, в которых электроны и дырки рекомбинировали без испускания света, что сильно снижало эффективность устройства.

Экспериментально было установлено, что для успешной работы гетероструктуры необходимо, чтобы процентная разница в параметрах решетки не превышала 0,1%. Это значительно продвинуло поиски нужного состава.

Выбор первого из компонентов гетероструктуры не вызывал сомнений. Ещё в 1962 году Андерсон описал гетеропереход в структуре Ge-GaAs [9].

За период с 1960 по 1963 гг. сразу несколько лабораторий показали примеры успешного использования арсенида галлия в лазерных диодах с р-п гомопереходом [10–12].

Этот химически стабильный прямозонный полупроводник (GaAs) имеет ширину запрещённой зоны 1,424 эВ и постоянную кристаллической решетки 0,56537 нм.

Оставалось найти второй полупроводник с близким параметром решётки и более широкой запрещённой зоной.

Идеальной гетеропарой, судя по параметрам, был непрямозонный полупроводник AlAs (арсенид алюминия) с шириной запрещённой зоны 2,15 эВ и постоянной решётки 0,56608 нм. Однако в свободном состоянии он реагирует с водой и с водяным паром с образованием гидроксида алюминия и арсина. Это обстоятельство насторожило Алфёрова, и его группа начала работать с гетероструктурой на основе GaAs/GaAsP.

Отметим, что среди прочих достижений в этот период группа Алфёрова разработала многокамерную установку ГФЭ, которая позволяла осаждать из газовой фазы сверхтонкие слои одного полупроводника на кристаллической подложке другого полупроводника. Данный метод давал возможность получать эпитаксиальные слои толщиной около десятков нанометров, которые упруго компенсировали возникающие деформации.

Идею, заложенную в патенте Алфёрова-Казаринова, удалось реализовать с помощью структуры ДГС, в которых

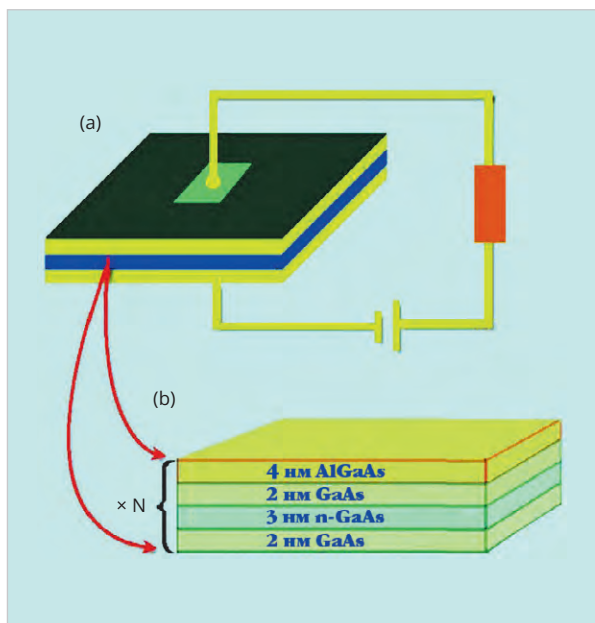


Рис. 4. Упрощённая схема полупроводниковой сверхрешётки

внутренний слой «вафли» был изготовлен на основе GaAs, а внешние обкладки были сделаны на базе GaAsP. Изготовленный таким образом гетеролазер работал при криогенных температурах [13].

Вскоре выяснилось, что пара GaAs/GaAsP из-за несоответствия параметров решёток между двумя материалами делала эти лазеры поликристаллическими, что вызывало необходимость использования высоких пороговых плотностей тока.

Дальнейшие эксперименты с различными комбинациями состава Ga-As-Ga-As-P окончательно доказали, что структура GaAs/GaAsP не может быть использована для создания инверсной заселённости и стимулированного лазерного излучения при комнатных температурах и атмосферном давлении.

Так или иначе у группы Алфёрова обозначилась новая проблема – поиск второго компонента согласованной гетероструктуры.

Нужно сказать, что сам Жорес Алфёров не считал эти годы потерянными впустую. В обзорной статье, посвящённой периоду 1970-х, он, в частности, отметил, что исследования, проведённые с помощью модернизированного метода ГФЭ, позволили выявить крайне важный «эффект расщепления зоны проводимости за счёт одномерного периодического потенциала сверхрешётки».

Эти первые сверхрешётки (superlattices) являлись в то же время и пер-

выми исследованными структурами с напряжёнными слоями [14].

В таких сверхрешётках напряжённые решётки является дополнительной степенью свободы, позволяющей в процессе эпитаксиального роста изменять непрерывно и независимо друг от друга толщину слоя, параметры решётки и ширину запрещённой зоны [15].

Одной из первых, посвящённых эффекту «сверхрешёток», была работа Л. Эсаки (L Esaki) и Р. Цу (R Tsu) [16].

Упрощённо сверхрешётку можно представить как последовательность чередующихся слоёв более узкозонного и более широкозонного полупроводников, то есть последовательность квантовых ям. В сверхрешётке энергетические уровни в отдельных квантовых ямах образуют энергетические «минизоны», которыми можно управлять, меняя толщины барьеров. Фактически, следуя терминологии Л. Эсаки, сверхрешётка представляет собой одномерный кристалл, созданный человеком.

На рис. 4 показана упрощённая схема полупроводниковой сверхрешётки [17].

Внешнее напряжение приложено между контактами в верхней и нижней части устройства, состоящего из периодических структурных слоев GaAs/Al_xGa_{1-x}As. Квантовые ямы GaAs (7 нм) разделены на три зоны для предотвращения диффузии легирования.

Теоретики из ФТИ имени А.Ф. Иоффе показали, что протекание тока в

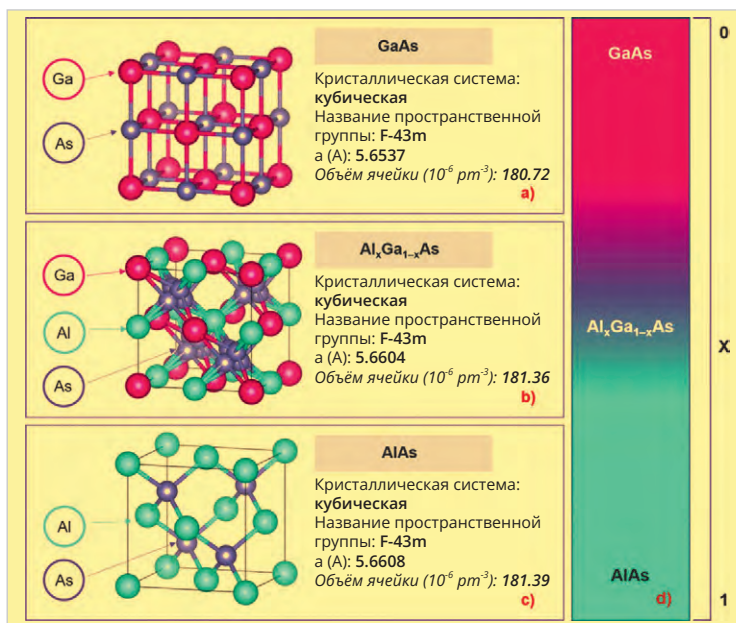


Рис. 5. Структурные схемы и параметры кристаллических решеток: а) GaAs; б) Al_xGa_{1-x}As; в) AlAs соответственно

сверхрешётках определяется туннелированием под действием электрического поля через потенциальные барьеры, разделяющие квантовые ямы.

В случае, когда основное состояние одной ямы совпадает с возбуждённым состоянием следующей ямы, возможно возникновение стимулированного излучения при туннелировании оптически возбуждённых носителей из основного состояния одной ямы в возбуждённое состояние следующей, расположенной на более низком энергетическом уровне [18].

Более развёрнутые теоретические описания свойств полупроводниковых сверхрешёток можно найти, например, в работе [19].

Сегодня сверхрешётки с напряжёнными слоями образуют новый широко используемый класс полупроводниковых гетероструктур с настраиваемыми электронными свойствами.

Возвращаясь к вопросам оптимальной пары согласованных ДГС, нужно сказать, что их поиском занимались практически все ведущие лаборатории мира. Не вдаваясь в подробности приоритета, можно считать, что первой из наиболее известных стала статья Джерри Вудолла, Ганса Руппехта и Джорджа Петита, опубликованная в 1967 году в журнале Applied Physics Letters, в которой были описаны разработанные в исследовательской лаборатории ИВМ эффективные светодиоды видимого света на основе

$\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$. При комнатной температуре измеренное значение внешней квантовой эффективности (External Quantum Efficiencies) составило 3,3%. Пик излучения диодов соответствовал 1,70 эВ. Измеренное время переключения для светового излучения при 300К составило 60 нс [20].

Нужно отметить, что Вудол и Рупрехт работали в IBM над проблемами создания эффективных солнечных батарей. В то время они не интересовались ДГС-лазерами, и тема их исследований не пересекалась с работами Алфёрова. Полученный ими сплав AlGaAs был предназначен для передачи максимального количества света из полупроводника с большой запрещённой зоной в p-n-переход полупроводника с запрещённой зоной меньшей ширины [21].

Считается, что именно счастливая случайность позволила независимо от американских физиков выбрать структуру $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ в качестве оптимального варианта согласованной пары ДГС на другом краю света, в Ленинградском Физтехе. Сотрудники ФТИ имени Иоффе Д. Третьяков и А. Борщевский обнаружили, что оставленные на хранение поликристаллические образцы твёрдого раствора AlGaAs, изготовленные два года назад, не изменили за это время своих свойств [22].

Дмитрий Третьяков и его коллеги из лаборатории Алфёрова установили, что критичный по отношению к парам воды в свободном виде арсенид алюминия абсолютно устойчив в форме твёрдого раствора: арсенид галлия – арсенид алюминия. Иначе говоря, AlAs становится стабильным при добавлении небольшого количества галлия. Оказалось, что в гетероструктурах можно также работать и с чистым AlAs, поскольку его тонкий слой, зажатый между двумя другими материалами, контактирует с воздухом только по очень тонкому краю и поэтому практически не разрушается в процессе эпитаксии [23].

На рис. 5 показаны структурные схемы и параметры кристаллических решеток: а) GaAs; б) $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$; в) AlAs соответственно [24].

По существу, «согласованная гетероструктура» представляет собой кристалл, в котором меняется химический состав и, соответственно, физические свойства. В итоге получается новая кристаллическая монокристаллическая структура, обладающая совершенно иными

качествами по сравнению с исходными компонентами.

Как видно из рис. 5, параметры кристаллической решетки всех трёх соединений практически совпадают: GaAs – 0,56537 нм; $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ – 0,56604 нм и AlAs – 0,56608 нм.

Таким образом, благодаря соответствию структурных параметров кристаллической решетки можно было утверждать, что GaAs является идеальной подложкой для выращивания $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Это позволило создавать гетероструктуры с хорошей кристаллической решёткой без дефектов и микронапряжений, которые обычно присутствуют на границе раздела полупроводников.

Спустя непродолжительное время после публикации этих результатов практически сразу в основных научных изданиях разработки новых ДГС-лазеров стали стремительно развиваться во всём мире.

Импульсные низкопороговые инжекционные лазеры на основе структур AlAs-GaAs

Основной целью разработчиков инжекционных полупроводниковых лазеров во всём мире, в том числе и в ФТИ имени Иоффе, в 1960–1970-е годы была борьба за снижение плотности порогового тока.

Накануне Нового года команда Алфёрова получила заслуженный приз: 30 декабря 1968 года редакция журнала «Физика и техника полупроводников – ФТП» зафиксировала поступление статьи Ж. Алфёрова и его коллег «Инжекционные лазеры на основе гетеропереходов в системе AlAs-GaAs с низким порогом генерации при комнатной температуре» [25].

В этой статье авторы сообщали о создании первого в мире полупроводникового лазера, работающего при комнатной температуре и имеющего плотность порогового тока $J_{\text{пор}} = 4,3 \text{ кА/см}^2$. Однако первые варианты лазеров этого типа, разработанные группой Алфёрова, могли работать только в импульсном режиме.

На рис. 6 приведены графики зависимости интенсивности излучения гетеролазера на основе AlAs-GaAs от длины волны при разных напряжениях смещения, которые Ж. Алфёров привёл в своей Нобелевской лекции [26].

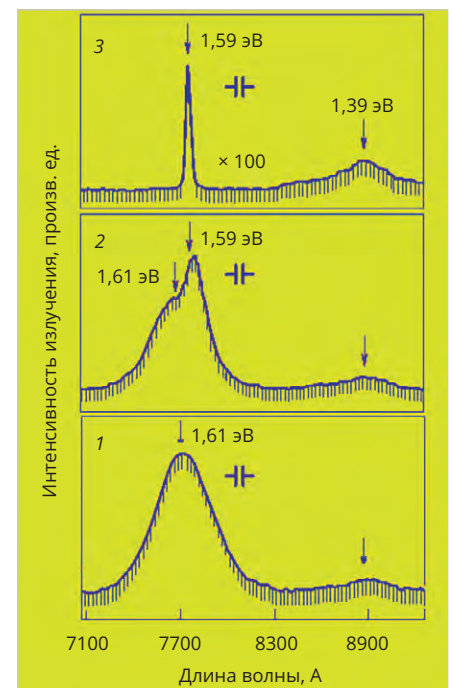


Рис. 6. Спектры генерации первого низкопорогового импульсного ДГС-лазера, разработанного группой Ж. Алфёрова

При температуре 300К пороговое значение тока составило 4,3 кА/см², что было рекордным на момент подачи статьи в редакцию.

Диапазоны изменений значений тока составляли: 0,7...8,3 А (а); 8,3...13,6 А (б); 13,6...18 А (в).

После того как стали понятны основные пути дальнейшего развития ДГС-лазеров, группа Алфёрова стала быстро и успешно продвигаться в этом направлении. Во-первых, были получены экспериментальные данные, подтверждающие уникальные свойства широкозонных эмиттеров, эффект суперинжекции, принцип стимулированного излучения, а также зонную диаграмму гетероперехода в структуре $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As-GaAs}_x$ [27].

Кроме того, были получены данные, позволившие объяснить природу диффузии носителей заряда и особенности протекания тока в плавном гетеропереходе. Так, например, была предложена конструкция ДГС-лазера, отличающаяся тем, что пассивные области, выполненные на основе твёрдых растворов структуры AlGaAs-GaAs, имеют плавно увеличивающееся содержание алюминия от активного слоя к эмиттерам [28].

Как и в любой физической лаборатории, ежедневная работа группы Алфёрова состояла в основном из кропотливых измерений различных пара-

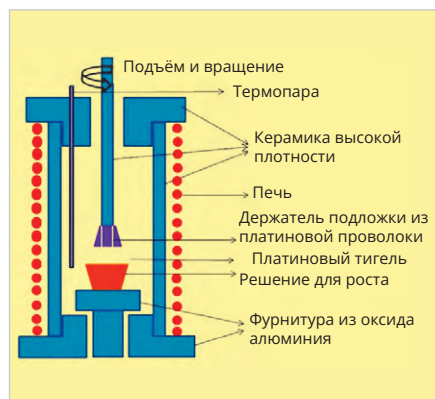


Рис. 7. Упрощённая схема метода жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ)

метров, обработки результатов и их интерпретации. Эти действия лишь иногда приводили к неординарным открытиям. Тем не менее в результате таких рутинных исследований порой обнаруживались крайне важные научные результаты. Так, например, было установлено, что такие параметры гетероструктуры, как толщина слоёв, уровень легирования и структура перехода могут оказывать заметное влияние на пороговый ток лазеров, что, в свою очередь, облегчает переход к режиму непрерывной работы.

Пороговый ток, определяющий минимальное значение, необходимое для начала генерации лазерного излучения, может быть снижен за счёт уменьшения толщины инверсного слоя, оптимизации уровня легирования во внешних обкладках GaAs и AlAs и увеличения количества квантовых ям.

С другой стороны, повышение температуры перехода может увеличить пороговый ток из-за увеличения термической рекомбинации носителей [29].

Опыт и возможности группы Алфёрова в исследованиях гетероструктур на основе элементов групп $A^{III}B^V$ реализовались также в работах, связанных с поиском альтернативных кремнию материалов, предназначенных для импульсной силовой электроники.

По сравнению с кремнием GaAs обладает большей шириной запрещённой зоны и значительно большей подвижностью электронов.

По отношению к другим традиционным материалам компонентов силовой электроники, таких, например, как SiC и GaN, арсенид галлия имеет относительно высокую электрическую прочность и достаточно малые времена жизни носителей заряда. Немало-

важным было то, что GaAs обладает также большей радиационной стойкостью.

Поэтому нужно также отметить успехи группы Алфёрова в этих направлениях. В 1968 году была принята заявка на изобретение способа изготовления полупроводниковых диодов на основе соединений $A^{III}B^V$ [30].

В журнале «Физика и техника полупроводников» в 1969 году была опубликована статья с результатами разработки высокоэффективных светодиодов на одиночных и двойных гетероструктурах [31].

Тиристорные p-n-p-переходы на гетеропереходах были описаны в статье [32].

На метод использования тройных твёрдых растворов на основе арсенида галлия для изготовления омических контактов полупроводниковых приборов была принята заявка на изобретение в 1970 году [33].

В этом же году был запатентован полупроводниковый фотоэлемент на основе гетероперехода GaAs-Al [34].

Тем временем конкуренты Алфёрова тоже уверенно шли вперед. В 1969 году Хаяши, Паниш и Сумски из Bell Telephone Laboratories опубликовали в апреле 1970 в журнале Applied Physics Letters статью о создании ДГС-лазеров на основе AlGaAs/GaAs с порогом всего 2300 A/cm^2 [35].

Новые ДГС-структуры, полученные методом ЖФЭ для инжекционных лазеров, работающих в непрерывном режиме

Поскольку газофазная эпитаксия имела ряд недостатков, основным из которых было соблюдение крайне строгого контроля температуры, давления и состава газовой смеси, многие лаборатории мира стали отказываться от ГФЭ. Поэтому начиная с конца 1960-х учёные, экспериментировавшие с новыми ДГС-структурами, стали постепенно переходить на метод жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ), предложенный Х. Нельсоном (H. Nelson) в 1963 году [36].

Одним из реальных достижений группы Алфёрова была разработка модифицированного метода жидкостной эпитаксии, который был использован также в других лабораториях Физтеха. Разработанная в ФТИ методика была внедрена в нескольких научно-технических организациях СССР.

Эта технология была проста в реализации, экономически эффективна и является до сих пор одной из основных для получения GaAs p-n-переходов [37].

Упрощённая схема метода жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) показана на рис. 7 [38].

Метод жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) заключается в наращивании тонкого монокристаллического слоя из металлического расплава, насыщенного полупроводниковым материалом, на поверхности подложки.

Идея ЖФЭ заключается в том, что при контакте подложки с пересыщенным раствором полупроводника в легкоплавком растворителе (расплаве) при наступлении температурного равновесия подложки с твёрдым раствором из-за рекристаллизации целевого полупроводника происходит наращивание тонкой плёнки.

С помощью ЖФЭ можно изготавливать эпитаксиальные слои толщиной от долей до сотен микрон, легировать эпитаксиальные слои, изготавливать многослойные эпитаксиальные гетероструктуры.

Процесс выращивания гетероструктур GaAs-AlGaAs ведётся в кварцевом реакторе в токе водорода. Продувка газом необходима для восстановления оксидных плёнок на поверхности подложек и расплава.

В графитовую лодочку помещают отдельно монокристаллическую пластину из GaAs и нарезку Ga с добавкой Al.

Затем включают нагрев, и расплав наносят на пластину. Рост слоёв структуры начинается при температуре кристаллизации $970 \pm 5^\circ\text{C}$. После чего осуществляют охлаждение расплава, в течение которого происходит кристаллизация твёрдых растворов. Оставшаяся часть галлия удаляется путём травления в соляной кислоте.

В методике, использованной группой Алфёрова, охлаждение и кристаллизация проводилась со скоростью 180°C/ч от 970°C до 870°C с последующим быстрым охлаждением со скоростью 2000°C/ч до комнатной температуры.

Эта описанная выше упрощённая схема описывает только основную лабораторную схему процесса. Современное оборудование ЖФЭ работает под управлением специального компьютера и не требует вмешательства оператора.

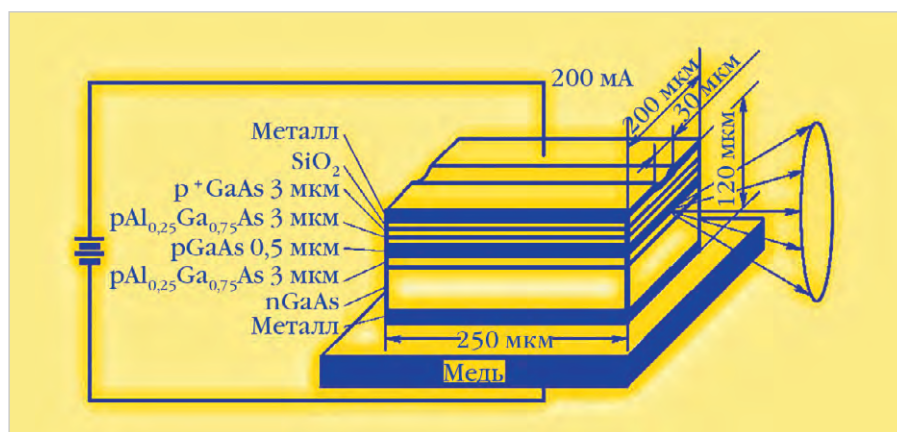


Рис. 8. Упрощённое схематическое изображение структуры инжекционного ДГС-лазера, работающего в непрерывном режиме при комнатной температуре, разработанное группой Алфёрова

Использование модернизированного метода жидкофазной эпитаксии (МЖФЭ) позволило получить более качественные образцы с меньшим количеством дефектов, что способствовало улучшению оптических свойств и снижению порогового тока.

Использование контроля концентрации легирующих элементов и компонентов раствора в течение всего процесса МЖФЭ дало возможность изменять свойства получаемых слоев, таких как ширина запрещённой зоны и проводимость. Кроме того, контроль условий кристаллизации в жидкой фазе позволил избежать образования макрорельефа на поверхности и обеспечил более высокое качество эпитаксиальных слоев.

С помощью МЖФЭ была получена согласованная по кристаллическим решеткам структура ДГС для новой конструкции лазера, разработанная группой Алфёрова. Широкозонные эмиттеры n- и p-типа (твёрдые растворы $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$) были легированы теллуром и германием.

С новой конструкцией ДГС-лазера группа Алфёрова добилась непрерывного режима работы. Статья с описанием результатов этой работы была отправлена в журнал «Физика и техника полупроводников – ФТП» в мае 1970 года.

На рис. 8, взятом из Нобелевской лекции Алфёрова, приведено схематическое изображение структуры первого инжекционного ДГС-лазера, работающего в непрерывном режиме при комнатной температуре [39].

В конструкции ДГС-лазера на рис. 8 использована геометрия, в которой активная область размещена на медных тепловодах, покрытых сере-

бром. Такая геометрия позволяла эффективно отводить тепло из активной области. Эта идея использовалась в дальнейшем практически во всех ДГС-лазерах. В одном случае для отвода тепла использовались алмазные основания. В других вариантах активная область изготавливалась в виде узких полосок («полосковая геометрия»).

В этой конструкции усовершенствованный вариант гетеролазера на основе AlAs-GaAs работал в непрерывном режиме при 300K. Пороговая плотность тока при комнатных температурах находилась в диапазоне от 900 до 1000 А/см² [40].

Следует отметить, что примерно в то же время группа Хаяши и Паниша смогла уменьшить пороговый ток до 1600 А/см² и реализовать работу своего лазера в непрерывном режиме [41].

Летом 1971 года Жорес Алфёров с коллегами подали заявку на изобретение, в которой был обобщён опыт лаборатории в исследованиях ДГС-лазеров на основе AlAs-GaAs [42].

Крайне важно то, что в этой заявке авторы сформулировали идею, которая в будущем была воплощена в «лазерах с распределённой обратной связью – РОС» (Distributed Feedback Laser).

В этом патенте описана модель ДГС-лазера, конструкция которого аналогична показанной на рис. 6. За счёт двухсторонней инжекции создаётся инверсная заселённость носителей тока, которая с помощью оптического резонатора специальной конструкции позволяет получить когерентное световое излучение.

Простыми словами принцип действия оптического резонатора РОС

лазера можно объяснить с помощью схемы, показанной на рис. 9 [43].

В РОС-лазерах гофрированная гетерограница создаёт периодическое изменение показателя преломления и приводит к интерференционному отражению стимулированного излучения. Период решётки выбирается таким образом, чтобы обеспечить выполнение условия Брэгга для отражений в обратном направлении $d = \lambda/2n_e$, где λ – длина волны света в вакууме, n_e – эффективный показатель преломления активной области, d – период решётки. Период решётки, например, в лазере на арсениде галлия равен 130 нм.

Поскольку отражение от периодической структуры существует для лучей, распространяющихся в обоих направлениях, то обратная связь в обоих направлениях распределяется по всей длине лазера. Кроме того, благодаря селективности обратной связи РОС-лазер работает в режиме одномодовой генерации.

Первыми сообщили о практической реализации РОС-лазера американские физики из California Institute of Technology, Pasadena.

Свою статью в журнале Applied Physics Letters они зарегистрировали 13 февраля 1973 года. В этой статье описан лазер с распределённой обратной связью на основе GaAs с оптической накачкой. В экспериментах был получен узкий стимулированный спектр с длиной волны около 0,83 мкм при пороговой мощности накачки примерно 2×10^5 Вт/см² [44].

В следующем, 1974 году были опубликованы две работы. Группа Жореса Алфёрова сообщила об успешных испытаниях своего полупроводникового квантового генератора с поверхностной решёткой, распределённой обратной связью и сверхмалой расходимостью излучения [45].

Группа из Калифорнийского исследовательского центра Xerox Palo Alto Research Center представила результаты экспериментов с лабораторной моделью GaAs/GaAlAs лазерного диода с распределённой обратной связью (DFB) и одиночным гетеропереходом (SH). В зависимости от периода решётки различные образцы этого лазерного диода излучали в диапазоне от 8430 до 8560 Å [46].

Наряду с ДГС-лазерами с середины 1970-х начало развиваться направле-

ние создания гетероструктур на основе соединений $A^{III}B^V$.

Использование четверных твёрдых растворов, таких, например, как различные составы InGaAsP, открыло принципиально новые методы, существенно расширяющие возможности подбора решёточно-согласованных гетеропар. Ещё в 1970 году Жорес Алфёров и его коллеги на конференции в Будапеште предложили вариант получения согласованных гетеропереходов с использованием четверных твёрдых растворов группы $A^{III}B^V$ [47].

На рис. 10 приведены значения ширины запрещённой зоны и постоянной решетки для наиболее популярных гетероструктур на основе соединений $A^{III}B^V$ [48].

Энергия запрещённой зоны (левая ось y) и постоянной решетки (ось x) даны для значений при комнатной температуре. Линии, соединяющие точки для часто используемых сплавов, соответствуют хорошо изученным гетероструктурам, согласованным по параметрам решетки.

Твёрдые растворы типа AlGaInAs на подложках InP и GaAs имеют ширину запрещённой зоны в районе 1,2 эВ. Однако для получения структур с такой шириной запрещённой зоны на подложках GaAs необходимо использовать переходные слои, компенсирующие разницу в параметрах решеток.

Меняя состав четырёхкомпонентного твёрдого раствора $In_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}$, можно получать новые гетероструктуры с различными значениями постоянной решетки и ширины запрещённой зоны.

На подложках InP возможно выращивание четверных твёрдых растворов InGaAsP с шириной запрещённой зоны в промежутке 0,68...1,2 эВ.

Следует отметить, что результаты работ группы Алфёрова, связанные с четырёхкомпонентными твёрдыми растворами полупроводниковых соединений III-V, II-VI групп, находят применение и в наши дни, например, при производстве фотоэлектрических преобразователей лазерного излучения [49].

В области физики полупроводников годы научной деятельности Жореса Ивановича Алфёрова с 1960 по 1980 г. можно назвать этапом разработки классических ДРГ-лазеров.

Подводя итог этому периоду, можно сказать, что Алфёров за это время

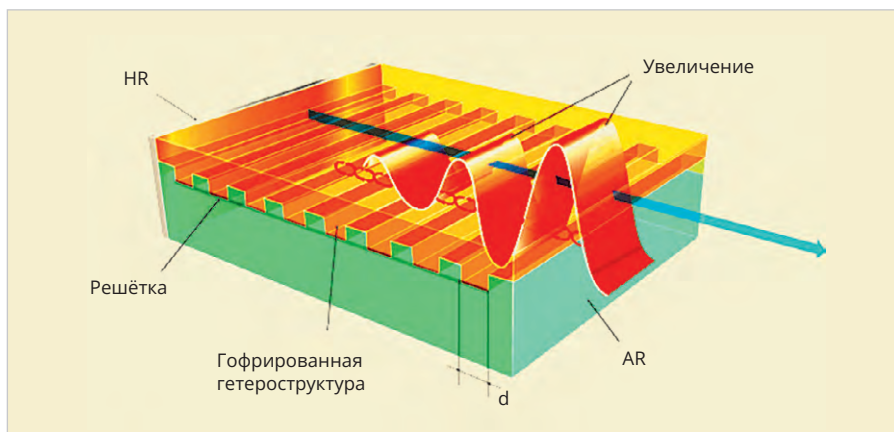


Рис. 9. Схема работы лазера с распределённой обратной связью – РОС

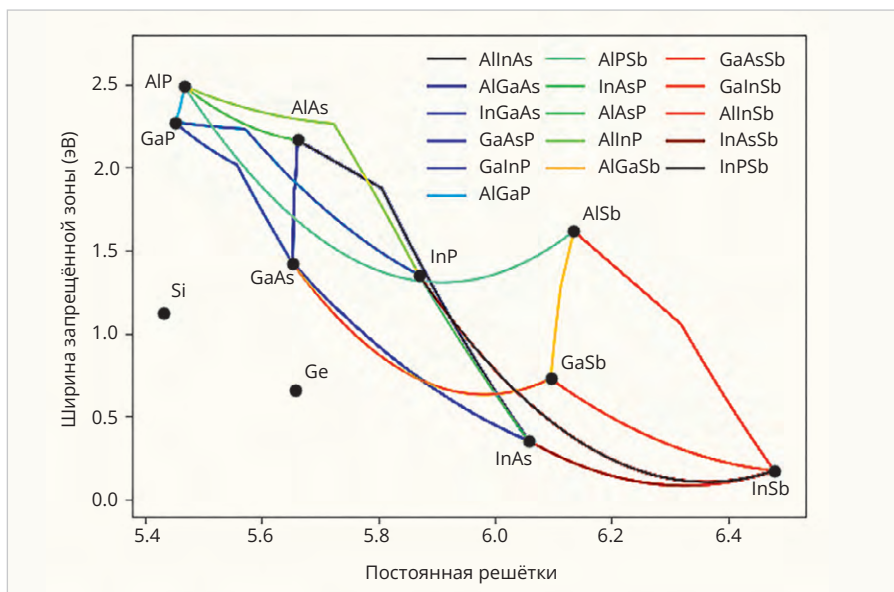


Рис. 10. Значения ширины запрещённой зоны и постоянной решетки для наиболее популярных гетероструктур на основе соединений $A^{III}B^V$

вместе с коллегами сделал свои самые значимые открытия и изобретения, которые стали основой его будущей Нобелевской премии.

Самым главным в исследованиях Алфёрова было то, что разработанные его группой устройства и технологии смогли повторить не только в других научных лабораториях, но они также нашли применение в массовом производстве различных бытовых, специальных приборов и оборудования.

Дальнейшие исследования Жореса Ивановича Алфёрова были связаны с разработкой лазеров на основе квантово-размерных эффектов. Эти его работы будут рассмотрены в следующей части статьи.

Литература

1. Kroemer H. Nobel Lecture, 2001. URL: https://web.ece.ucsb.edu/Faculty/Kroemer/pubs/10_NobelLecture.pdf.

2. Shockley W. Circuit element utilizing semiconductor material. U.S. Patent 2269347, September 25, 1951. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/2b/c2/a4/677433baba5fe9/US2681993.pdf>.
3. Kroemer H. RCA Review, vol. 18, pp. 332–342, 1957. URL: https://web.ece.ucsb.edu/Faculty/Kroemer/pubs/1a_57Quasi_Electric.pdf.
4. Kroemer H., 1957. Theory of a wide-gap emitter for transistors. Proc. IRE 45, 1535. URL: https://web.ece.ucsb.edu/Faculty/Kroemer/pubs/1b_wide_gap.pdf.
5. Алфёров Ж.И., Казаринов Р.Ф. Двойной гетероструктурный лазер. Авторское свидетельство № 27448. Заявка № 950840 с приоритетом от 30 марта 1963 г. PatentDB. URL: <https://patentdb.ru/patent/181737>.
6. Kroemer H. A proposed class of hetero-junction injection lasers. In Proceedings of the IEEE, vol. 51,

- no. 12, pp. 1782–1783, Dec. 1963. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1444636>.
7. Алфёров Ж.И. История и будущее полупроводниковых гетероструктур. URL: <https://journals.ioffe.ru/articles/34218>.
 8. Anderson R.L. Experiments on Ge-GaAs heterojunctions. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0038110162901156>.
 9. Early Work at Lincoln Laboratory on GaAs Semiconductor Devices. URL: https://archive.ll.mit.edu/publications/journal/pdf/vol02_no1/2.1.1.earlywork.pdf.
 10. Hall R.N., Fenner G.E., Kingsley J.D., Soltys T.J. and R.O. Light Emission From GaAs Junctions, Phys. Rev. Lett. 9, 366. – Published 1 November 1962. URL: <https://journals.aps.org/prl/pdf/10.1103/PhysRevLett.9.366>.
 11. Stimulated emission of radiation from GaAs p-n junctions. Marshall I. Nathan et al. Appl. Phys. Lett. 1, 62 (1962). URL: <https://bit.ly/4d69e6r>.
 12. Алфёров Ж.И. История и будущее полупроводниковых гетероструктур // ФТП. 1998. Т. 32. № 1. URL: <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/34218>.
 13. Алфёров Ж.И., Винокуров Д.А., Капитонов В.А. и др. Самоорганизующиеся наноразмерные кластеры InP в матрице InGaP/GaAs и InAs в матрице InGaAs/InP. URL: <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/35807>.
 14. Алфёров Ж.И., Жилаев Ю.В., Шмарцев Ю.В. ФТП, 5, 196 (1971)*. URL: <https://journals.ioffe.ru/articles/34218>.
 15. Esaki L., Tsu R. Superlattice and negative differential conductivity in semiconductors. IBM Journal of Research and Development, *ieeexplore.ieee.org*, 1970. URL: https://ieeemilestones.ethw.org/w/images/6/62/IBM_JRD_14%2C_61_%281970%29.pdf.
 16. Enhancing Chaotic Behavior at room temperature in GaAs/(Al,Ga)As Superlattices. Physical review. B, Condensed matter. March 2017. URL: https://www.researchgate.net/publication/313724166_Enhancing_Chaotic_Behavior_at_room_temperature_in_GaAsAlGaAs_Superlattices/figures?lo=1.
 17. Казаринов Р.Ф., Суриц Р.А. О возможности усиления электромагнитных волн в полупроводниках со сверхрешёткой // ФТП. 1971*. Т. 5, вып. 4. С. 797. URL: <http://journals.ioffe.ru/articles/catalog>.
 18. Osbourn G.C. A GaAs_xP_{1-x}/GaP strained-layer superlattice. Appl. Phys. Lett. 41, 172–174 (1982). URL: <https://doi.org/10.1063/1.93450>.
 19. Rupprecht H., Woodall J.M., Pettit G.D. Efficient Visible Electroluminescence at 300°K from Ga_{1-x}Al_xAs p-n Junctions Grown by Liquid-Phase Epitaxy. Applied Physics Letters, Volume 11, Issue 3, p. 81–83, 1967. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1967ApPhL..11..81R/abstract>.
 20. Rupprecht H.S., Woodall I.M., Pettit G.D. Appl. Phys. Lett., 11, 81 (1967) (Submitted June 19, 1967). URL: <https://woodall.ece.ucdavis.edu/wp-content/uploads/sites/84/2016/02/rupprecht1967.pdf>.
 21. Третьяков Д.Н. Материал из Википедии. URL: <https://bit.ly/3YbfzIs>.
 22. Алфёров Ж.И. Двойные гетероструктуры: концепция и применения в физике, электронике и технологии // УФН. 2002. Т. 172, № 9. С. 1068–1086. URL: <https://www.mathnet.ru/links/987e195e847f2779db9179e60274eefe/ufn2057.pdf>.
 23. Lattice Constant of AlAs. URL: [https://doi.org/10.1002/crat.2170270118;Al_xGa_{1-x}As/GaAs/Al_xGa_{1-x}As](https://doi.org/10.1002/crat.2170270118;AlxGa1-xAs/GaAs/AlxGa1-xAs).
 24. Double Quantum Well with a Thin AlAs Interwell Barrier. URL: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1023913804235>.
 25. Алфёров Ж.И., Андреев В.М., Портной Е.Л., Трукан М.К. Инжекционные лазеры на основе гетеропереходов в системе AlAs-GaAs с низким порогом генерации при комнатной температуре // ФТП. 1970, т. 3*. URL: <https://journals.ioffe.ru/articles/34218>.
 26. Alferov Zh.I. Nobel lectures. Reviews of modern physics v. 72, July 2001. URL: <https://journals.aps.org/rmp/abstract/10.1103/RevModPhys.73.767>.
 27. Алфёров Ж.И., Андреев В.М., Портной Е.Л. и др. Патент № 300126, МПК H01S 5/32, Опубликован 05.01.1977. URL: <https://patents.su/3-300126-inzhekcionnyj-lazer.html>.
 28. Алфёров Ж.И., Андреев В.М., Клепикова Н.В. и др. Полупроводниковый лазер с гетеропереходами. Патент СССР № SU 521806; МПК: H01S 5/30. URL: <https://patents.su/patents/shelovanova>.
 29. Алфёров Ж.И., Андреев В.М., Гарбузов Д.З. и др. Исследование влияния параметров гетероструктуры в системе AlAs-GaAs на пороговый ток лазеров и получение непрерывного режима генерации при комнатной температуре // ФТП. 1970. Т. 4. С. 1826. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001470767?ysclid=m24si2ska3854365508>.
 30. Алфёров Ж.И., Андреев В.М., Корольков В.И. и др. Патент № 251096, МПК: H01H 21/203. Способ изготовления полупроводниковых диодов на основе соединений A3B5. Заявка 1210943, 15.01.1968. Опубликовано: 05.01.1977. URL: <https://patents.su/3-251096-sposob-izgotovleniya-poluprovodnikovyykh-diodov-na-osnove-soedinenij-a-v.html>.
 31. Алфёров Ж.И., Андреев В.М., Корольков В.М. и др. ФТП, 3, 930, 1969*. URL: <http://journals.ioffe.ru/articles/catalog>.
 32. Алфёров Ж.И., Андреев В.М., Корольков В.М. и др. ФТП, 4, 578, 1970*. URL: <http://journals.ioffe.ru/articles/catalog>.
 33. Алфёров Ж.И., Дураев В.П., Андреев В.М. и др. Омический контакт полупроводниковых приборов. Номер патента: 325908, МПК: H01L 21/28, Заявка: 30.04 1970. Опубликовано: 05.04.1974. URL: <https://patents.su/1-325908-325908.html>.
 34. Алфёров Ж.И., Андреев В.М., Каган М.Б. и др. Полупроводниковый фотоэлемент. Номер патента: 344781, МПК: H01L 31/02. Заявка 1465206, 14.07.1970. Опубликовано: 23.07.1981. URL: <https://patents.su/2-344781-poluprovodnikovyyj-fotoehlement.html>.
 35. Panish M.B., Hayashi I. and Sumski S. Double heterostructure injection lasers with roomtemperature thresholds as low as 2300 A/cm². Appl. Phys. Lett. 16, 326–328 (1969). URL: <https://pubs.aip.org/aip/apl/article-abstract/16/8/326/41930/DOUBLE-HETEROSTRUCTURE-INJECTION-LASERS-WITH-ROOM?redirectedFrom=fulltext>.
 36. Nelson H. Epitaxial growth from the liquid state and its application to the fabrication of tunnel and laser diodes. RCA Rev. 24, 603–615 (1963). URL: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1571417125842515584?lang=en>.
 37. Солдатенков Ф.Ю., Козлов В.А. Технология жидкофазной эпитаксии для выращивания многослойных гетероструктур силовой электроники на основе арсенида галлия // Наноиндустрия. 2018. Вып. 9. URL:

- <https://www.nanoindustry.su/journal/article/6788>.
38. Ying Liu, Peng Zhou, et. al. Strain induced anisotropy in liquid phase epitaxy. Nature scientific reports. URL: <https://bit.ly/3BUNMEz>.
39. Alferov Zh.I. Nobel Lecture: The double heterostructure concept and its applications in physics, electronics, and technology. REVIEWS OF MODERN PHYSICS, VOLUME 73, JULY 2001. URL: <https://journals.aps.org/rmp/abstract/10.1103/RevModPhys.73.767>.
40. Alferov Zh.I., Andreev V.M., Garbuzov D.Z., et. al. Journal Sov. Phys. Semicond, v. 4, iss. 9, p. 1573 (1971). URL: https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=Mv3S6FkAAAAJ&citation_for_view=Mv3S6FkAAAAJ:u5HHmVD_uO8C.
41. Hayashi I., Panish M.B., Foy P.W. and Sumski S. Junction lasers which operate continuously at room temperature. Appl. Phys. Lett. 17, 109–110 (1970). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780120029044500115>.
42. Алфёров Ж.М., Андреев В.М., Каза-ринов Р.Ф. и др. Полупроводни-
 ковый оптический квантовый генератор. Авторское свидетельство № 392875, СССР, МКИ H01 S 3/19. Заявка № 167749. Заявлено 19.07.1971 г. // Бюллетень изобретений (1), 259, 1977. URL: <https://patents.su/patents/h01s-5-32>.
43. Distributed feedback laser, Wikipedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Distributed-feedback_laser.
44. Nakamura M., Yariv A., Yen H.W. et. al. Optically pumped GaAs surface laser with corrugation feedback. Appl. Phys. Lett. Volume 22, Issue 10, p. 515–516. Pub Date: May 1973. URL: <https://pubs.aip.org/aip/apl/article-abstract/22/10/515/43663/Optically-pumped-GaAs-surface-laser-with?redirectedFrom=fulltext>.
45. Алфёров Ж.И., Гуревич С.А., Каза-ринов Р.Ф. и др. ПКГ со сверхмалой расходимостью излучения // Физика и техника полупроводников. 1974*. Т. 8. С. 832. URL: <http://journals.ioffe.ru/articles/catalog>.
46. Scifres D.R., Burnham R.D., Streifer W. Distributed – feedback single heterojunction GaAs diode laser. Appl. Phys. Lett. Vol 25, Issue 4, id. 203 August 1974. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1974ApPhL...25..203S/abstract>.
47. Alferov Zh.I., Andreev V.M., Konnikov S.G. et. al. Heterojunctions on the base of АПВВ semiconducting and of their solid solutions. Proc. Int. Conf., Academiai Kiado, Budapest, Vol. 1, p. 93, 1971. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01596252>.
48. Solcore 5.10.0 documentation. Materials and units. The Material System. URL: <http://docs.solcore.solar/en/latest/Systems/Materials.html>.
49. Маричев А.Е. Исследование твёрдых растворов InGaAsP для фотоэлектрических преобразователей лазерного излучения. ФТИ имени Иоффе, 2023. URL: https://www.ioffe.ru/serve/theses/avtoref/Thes_0589.pdf.

**Примечание: статьи в журнале «Физика и техника полупроводников» доступны для всех желающих на сайте ФТИ (<http://journals.ioffe.ru/articles/catalog>) только начиная с 1988 года. Более ранние статьи предоставляются по дополнительному согласованию с редакцией журнала.*



НОВОСТИ МИРА

Барьеры искрозащиты NewPWR – оптимальное решение для обеспечения искробезопасности цепей

Компания Nanjing New Power (KNP), основанная в 2002 году, специализируется на разработке и производстве устройств безопасности и защиты сигналов, таких как барьеры искрозащиты, реле безопасности, изоляторы сигналов, УЗИП и др. На сегодняшний день компания является одним из основных поставщиков на рынке устройств искрозащиты Китая, пользуясь высокой репутацией благодаря своим собственным разработкам и качеству продукции. Благодаря высокому уровню автоматизации производства, интеллектуальным и высокотехнологичным системам на своём предприятии, компания NewPWR обладает небольшим, но высококвалифицированным штатом сотрудников, в основном инженеров и разработчиков, что позволяет сконцентрировать усилия на разработке новых продуктов высокого класса, за что имеет множество правительственных наград в области науки и технологий, а также входит в несколько престижных ассоциаций.

Одним из главных направлений разработок и производства являются барьеры искробе-



зопасности. В частности компания NewPWR предлагает бюджетные, но при этом высоконадёжные барьеры серии С. Устройства обладают достаточно компактным размером – 12,8 мм или 17,8 мм, в зависимости от количества каналов, – а также съёмными клеммниками для удобства монтажа. Барьеры обеспечивают гальваническую развязку между источником питания, входом и выходом. Использует независимый источник питания, при этом есть возможность питания по общей шине. Дополнительная надёжность обеспечивается за счёт ряда разработок компании, таких как: собственный предохранитель, обладающий быстродействием, низким внутренним сопротивлением и достаточно низким подъём температуры; собственные магнитные материалы с низким температурным дрейфом и высокой проникаемостью. Помимо прочего, все барьеры серии обладают

широким диапазоном как напряжения питания – 18–60 В DC, так и рабочих температур (–20...+60°C). Высокоточная термокомпенсация, а также программируемый ввод дополняют функциональность устройств.

За счёт широкого спектра поддерживаемых сигналов, как, например, от терморезисторов, потенциометров, датчиков вибраций и деформаций, а также частотных и интерфейсных (RS-485/RS-232/RS-422/CAN) сигналов, барьеры могут применяться в различных отраслях промышленности. Тем более что все модели барьеров искрозащиты соответствуют требованиям ТР ТС 012/2011 и имеют маркировку взрывозащиты: [Ex ia Ga] IIC.



Трёхуровневая электронная система контроля доступа

Сергей Шишкин

В статье представлен вариант построения электронной трёхуровневой системы доступа на базе микроконтроллера семейства AVR. Подробно рассматривается работа отдельных составных частей системы.



Дополнительные материалы к статье вы можете скачать с нашего сайта по этой ссылке

Главная цель СКУД (систем контроля и управления доступом) – обеспечить безопасность и контроль доступа для персонала, работающего в организации, и посетителей.

СКУД могут выполнять следующие функции:

- предотвращение несанкционированного доступа персонала;
- интеграция новых комплексов оборудования в имеющиеся системы безопасности;
- управление реагированием на инциденты из единого диспетчерского центра;
- поиск и отслеживание сотрудника по биометрии, по лицу;
- контроль за соблюдением регламентов сотрудниками;
- ограничение доступа сотрудников на закрытые территории;
- предотвращение краж сотрудника и пр.

Конечно, на базе встраиваемых систем, программируемых логических контроллеров (ПЛК) или программируемых реле могут быть выполнены суперсовременные, сложные, многоуровневые СКУД. На рынке представлено много подобных систем «под ключ». Как правило, они очень дорогие, для их функционирования и поддержания работоспособного состояния требуется достаточно подготовленный и квалифицированный персонал, им

необходим текущий ремонт, сервисное обслуживание.

Рассмотрим локальную, недорогую 3-уровневую электронную систему доступа с несложным интерфейсом управления для небольших производственных линий, участков, научных лабораторий, складских помещений среднего размера (класса В) и пр., выполненную на базе микроконтроллера семейства AVR. Основные функции устройства:

- ограничение доступа сотрудников;
- доступ в заданные интервалы времени.

Структурная схема электронной 3-уровневой системы доступа (далее системы) приведена на рис. 1.

Основные составные части системы на структурной схеме: диспетчерский пункт А1, модуль электронного ключа А2, базовый блок А3, кодовый замок № 1 АВ1, кодовый замок № 2 АВ2. Всё вышеуказанное и есть элементы системы, которая ограничивает доступ персонала в помещение А4, где расположено производственное оборудование. Доступ может быть ограничен как к самому оборудованию, так и к её составным частям, машинам и механизмам. Модуль электронного ключа А2 выдаёт сигнал разрешения на работу базового блока А3. Сигнал разрешения на изменение эталонного кода в модуле электронного ключа

А2 поступает из диспетчерского пункта А1. Базовый блок – 4-канальный. Он задаёт временные ограничения в суточном режиме работы в формате: часы – минуты – секунды. Рабочий интервал определяется выданным нарядом на проведение работ и особенностями производственного процесса. Каналы № 1 и № 2 базового блока задают соответственно интервал работы кодовых замков № 1 и № 2. А каналы № 3 и № 4 непосредственно задают рабочий интервал, в котором разрешена работа производственного оборудования (машин и механизмов). Для нормального функционирования системы целесообразно наличие на каждом уровне портативной радиостанции для контроля и оперативной связи. Элементы из представленной системы могут быть «кубиками» для построения подобных систем с более разветвлённой архитектурой. Например, неограниченное количество базовых блоков может управляться с одного модуля электронного ключа.

Применительно к производству 3-й уровень доступа имеют рабочие, ремонтный персонал, инженеры-технологи, инженеры-конструкторы, осуществляющие техническое сопровождение изготовления изделия, и др. – все, кто задействован непосредственно в технологическом процессе на производственном участке.

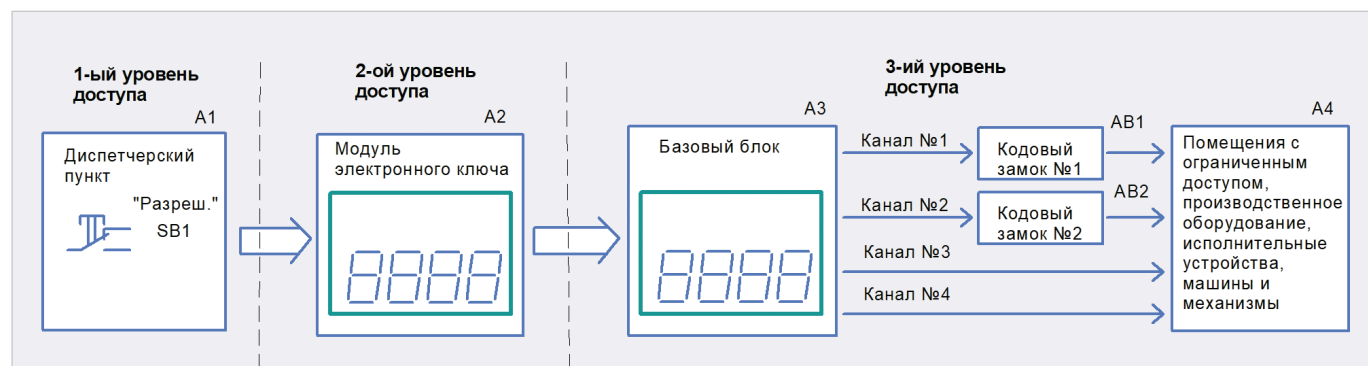


Рис. 1. Структурная схема электронной трёхуровневой системы доступа

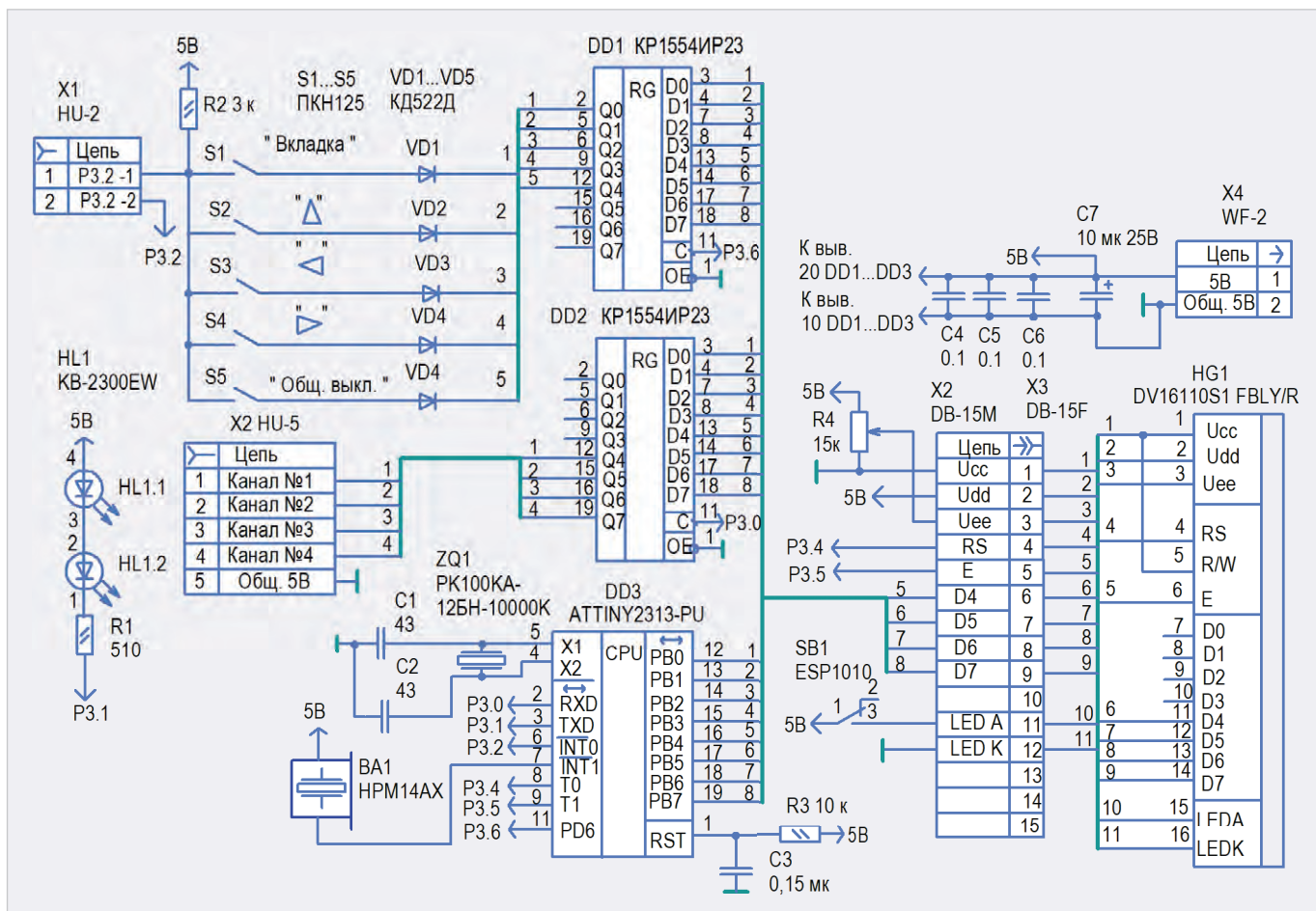


Рис. 2. Принципиальная схема базового блока

2-й уровень доступа имеют представители оперативного персонала, мастер, начальник смены, ответственные за проведение работ и пр. 1-й уровень доступа имеют сотрудники из числа административного или административно-технического персонала. Уровень доступа определяется руководством предприятия и прописывается в должностных инструкциях и других соответствующих документах, регламентирующих работу предприятия или лаборатории. Принципиальная схема базового блока (далее – блока) представлена на рис. 2.

Принципиальная схема модуля электронного ключа и диспетчерского пункта представлена на рис. 3.

Кодовые замки № 1 и № 2 – совершенно одинаковые. Принципиальная схема кодового замка № 1 приведена на рис. 4.

Рассмотрим принципиальную схему блока. Его основные элементы: микроконтроллер AVR ATtiny2313-20PU DD3 и двухстрочный жидкокристаллический индикатор DV-16232 FBL/Y-H/R HG1. Рабочая частота микроконтроллера DD3 задаётся генератором с внеш-

ним резонатором ZQ1 на 10 МГц. Пьезоэлектрический излучатель BA1 включается с вывода 7 микроконтроллера DD3. Сигнал с выхода 3 микроконтроллера DD3 через резистор R1 периодически, с периодом 1 с, включает световую полосу HL1. С порта PB микроконтроллер DD3 управляет ЖК-индикатором HG1 и клавиатурой (кнопки S1...S5) через регистр DD1. Для функционирования клавиатуры также задействован вывод 6 микроконтроллера DD3. Сигнал с любой нажатой кнопки S1–S5 поступит на вывод 6 микроконтроллера DD при условии, что цепь в соединителе X1 между контактами 1 и 2 замкнута. Резистор R1 – токоограничительный, для световой полосы HL1. Состояние выходных сигналов блока определяет регистр DD2. Питательное напряжение поступает на блок с соединителя X4. Конденсаторы C4...C6 фильтруют пульсации в цепи питания 5 В.

В блоке предусмотрены следующие функции:

- счёт реального времени, индикация текущего времени в 24-часовом формате в режиме часы–минуты–секунды;

- установка текущего времени и его корректировка;
- управление нагрузками по 4 независимым каналам (каналы № 1–4);
- установка трёх интервалов времени (интервалы № 1–3), в которых нагрузки, подключённые к каналам № 1–4, управляются в соответствии с заранее запрограммированным алгоритмом.

В интерфейс блока входит клавиатура (кнопки S1...S5), световая полоса HL1 и ЖК-индикатор HG1. Имеются два режима работы: рабочий и конфигурирования. Сразу после подачи питания блок переходит в режим конфигурирования. В обоих режимах на дисплее HG1 можно поочередно открыть три вкладки: «интервал 1», «интервал 2», «интервал 3».

Выходные сигналы каналов № 1–4 – это соответственно выходы 12, 15, 16, 19 регистра DD2.

При инициализации в них загружается лог. 1. Далее пользователь сам устанавливает нужную конфигурацию. Данные сигналы могут быть задействованы для управления кодовыми замками, составными частями электроустановок, машин и т.д.,

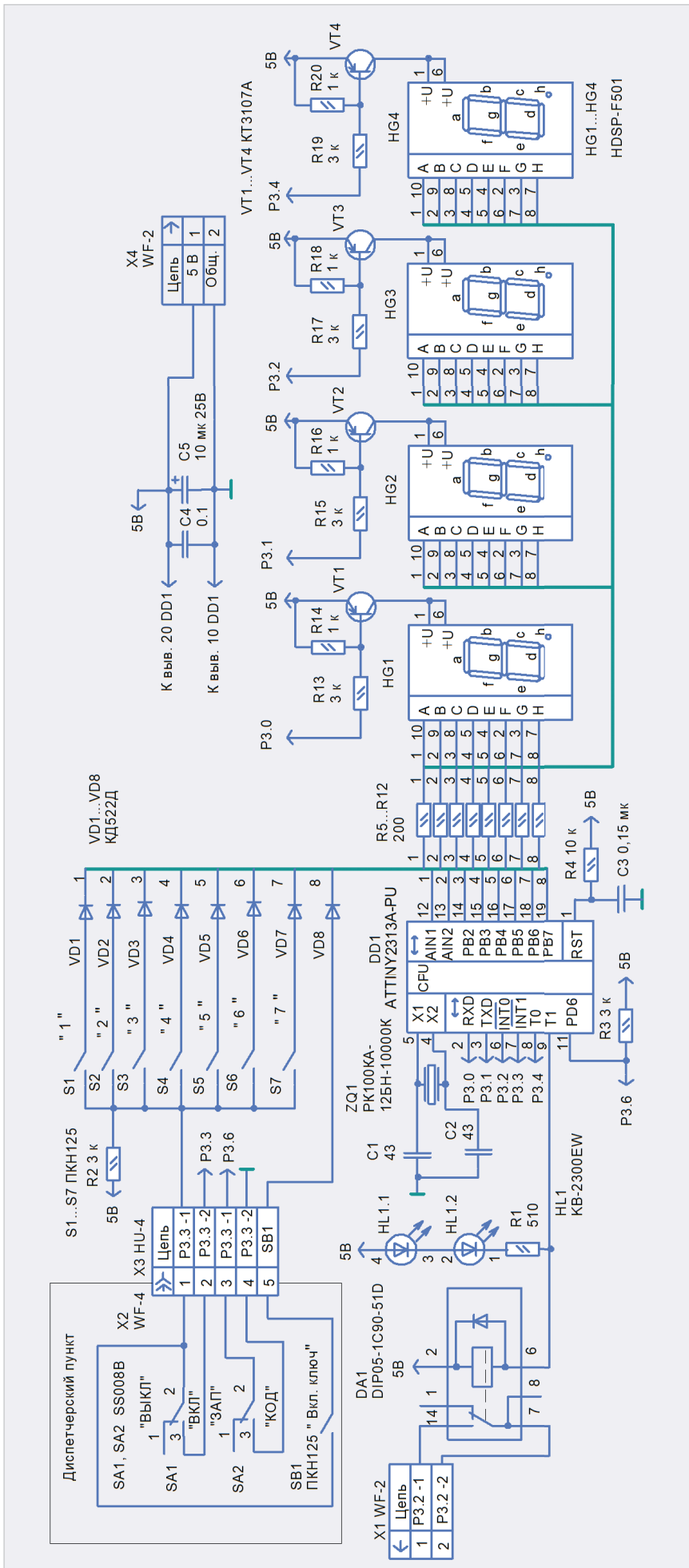


Рис. 3. Принципиальная схема модуля электронного ключа и диспетчерского пункта

в которых ограничение доступа может быть осуществлено как по цепям питания, так и по цепям управления.

Границы интервалов № 1–3 программируются в рамках 24-часового формата. Окончание предыдущего интервала является началом следующего. Проще говоря, в блоке в течение суток можно запрограммировать 3 будильника, в момент срабатывания которых включаются (или выключаются) четыре нагрузки, подключённые к нему. Тем самым осуществляется ограничение доступа во времени.

Время включения каждого будильника может быть установлено любым, в 24-часовом формате в режиме часы-минуты. То есть можно в данном формате установить любое время каждого будильника или границы трёх интервалов. Например, интервал № 1 – 00:00–06:00; интервал № 2 – 06:00–12:00; интервал № 3 – 12:00–24:00. На дисплее ЖК-индикатора HG1 можно одновременно наблюдать текущее время и границы одного из трёх интервалов (начало интервала и его окончание), а также состояние четырёх нагрузок (лог. 1 или лог. 0) в данном интервале. Если текущее время совпало с началом какого-либо интервала – на 60 с включается звуковая сигнализация с частотой повторения 2 Гц, и в регистр DD2 загружается байт управления нагрузками для данного интервала времени. Сразу после подачи питания на блок на выводе 1 микроконтроллера DD3 через RC-цепь (резистор R3, конденсатор C3) формируется сигнал его аппаратного сброса. Далее идёт инициализация программы, в которой настраивается индикатор HG1. При этом происходит очистка его буфера, разрешается отображение курсора. В регистр DD2 записываются сигналы уровня лог. 1 (нагрузки выкл.). Интерфейс управления блока после инициализации индикатора HG1 приведён на рис. 5.

Управление осуществляется с помощью клавиатуры, кнопки которой (по схеме S1...S5) имеют следующее назначение:

- S1 (B) – выбор вкладки устройства в замкнутом цикле («интервал 1», «интервал 2», «интервал 3»), после подачи питания устройство сразу переходит на вкладку «интервал 1», каждое нажатие данной кнопки переводит устройство на следующую вкладку, за вкладкой «интервал 3» следует «интервал 1»;

- S2 (▲) – увеличение на единицу (инкремент) значения каждого разряда при установке текущего времени часов и границ временных интервалов, а также принудительное выключение звукового и светового сигнала в начале каждого интервала. Инкремент происходит в разрядах временных значений. В разрядах отображения состояния нагрузок при нажатии данной кнопки происходит инвертирование состояния (было «1», стало «0», и наоборот);
- S3 (◀) – выбор разряда – при установке значений во всех вышеуказанных режимах у выбранного разряда устанавливается курсор, при каждом нажатии на данную кнопку курсор сдвигается справа налево на один разряд;
- S4 (▶) – выбор разряда – при установке значений во всех вышеуказанных режимах у выбранного разряда устанавливается курсор, при каждом нажатии на данную кнопку курсор сдвигается слева направо на один разряд;
- S (Общ. выкл) – экстренное выключение всех нагрузок, подключённых к устройству, установка выходных сигналов уровня лог. 1 во всех каналах.

В каждой строке ЖК-индикатора HG1 отображается 16 символов. Разряды дисплея индикатора HG1 имеют следующее назначение (слева направо по рис. 5). Номера разрядов на рис. 5 сверху условно отмечены цифрами с 1 по 16, которые не отображаются в ЖК-индикаторе.

Первая строка:

- 1 разряд отображает «десятки часов» текущего времени;
- 2 разряд отображает «единицы часов» текущего времени;
- 3 и 6 разряды отображают символ «:» с периодом включения 1 с во всех режимах, во время корректировки или установки текущего времени символ «:» включён постоянно;
- 4 разряд отображает «десятки минут» текущего времени;
- 5 разряд отображает «единицы минут» текущего времени;
- 7 разряд отображает «десятки секунд» текущего времени;
- 8 разряд отображает «единицы секунд» текущего времени;
- 9, 10, 11, 12 разряды отображают пробел (space);
- 13...16 разряды отображают состояние нагрузок в каналах № 1–4 в текущем выбранном режиме работы;

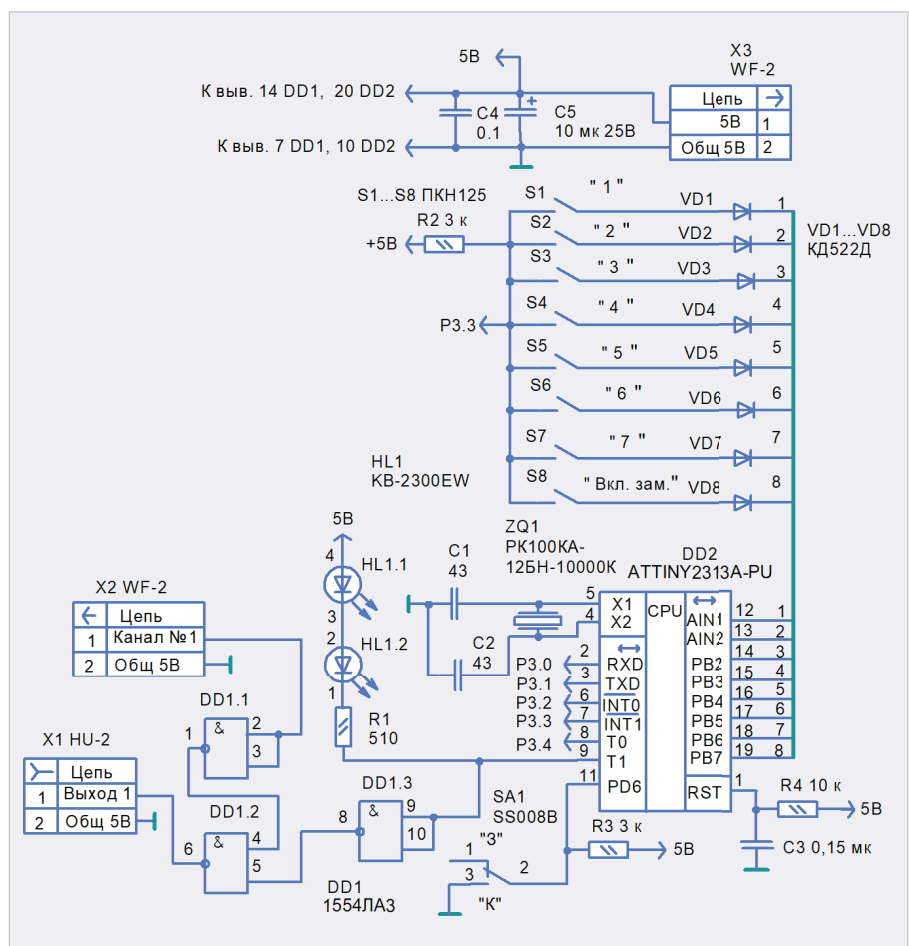


Рис. 4. Принципиальная схема кодового замка № 1

13 разряд – состояние нагрузки, подключённой к каналу № 1, и т.д.

Вторая строка:

- 1 разряд отображает открытую вкладку, если открыта вкладка «интервал 1», в данном разряде индицируется «1», открыта вкладка «интервал 2» – «2»; открыта вкладка «интервал 3» – «3»;
 - 2 разряд отображает пробел (space);
 - 3...7 разряды отображают в часах-минутах (через символ «:») начало интервала в отображаемом режиме работы устройства;
 - 8 разряд отображает пробел (space);
 - 9...13 разряды отображают в часах-минутах (через символ «:») конец интервала в отображаемом режиме работы устройства;
 - 14 разряд отображает пробел (space);
 - 15 разряд отображает флаг RAZ, (1 – режим конфигурирования, 0 – рабочий режим).
 - 16 разряд отображает курсор (во всех вкладках сразу после подачи напряжения питания).
- После подачи питания на индикаторе HG1 отображается вкладка «интервал 1» (в первом разряде второй строки дисплея индицируется

«1»). Только в данной вкладке устанавливается или корректируется текущее время. Для этого необходимо кнопками S3 или S4 подвести курсор к изменяемым разрядам текущего времени и кнопкой S2 изменить значение разряда. Для установки начального и конечного значений интервалов необходимо проделать аналогичные операции. Текущее время и флаг RAZ отображается во всех вкладках. Для программирования подключаемых нагрузок необходимо подвести курсор к нужному разряду и кнопкой S2 изменить его значение. Каждое нажатие кнопки S2 в данном случае инвертирует предыдущее состояние разряда было «0» – будет «1», и наоборот. Для перехода в рабочий режим флаг RAZ (отображаемый в 15 разряде второй строки на дисплее индикатора) необходимо установить в ноль. При этом установленные сигналы (лог. 0 или лог. 1) в разрядах 13–16 будут выведены в регистр DD2. В каждой вкладке в разрядах 13–16 можно установить любую комбинацию.

Изменить флаг RAZ можно только на вкладке «интервал 1». Границы

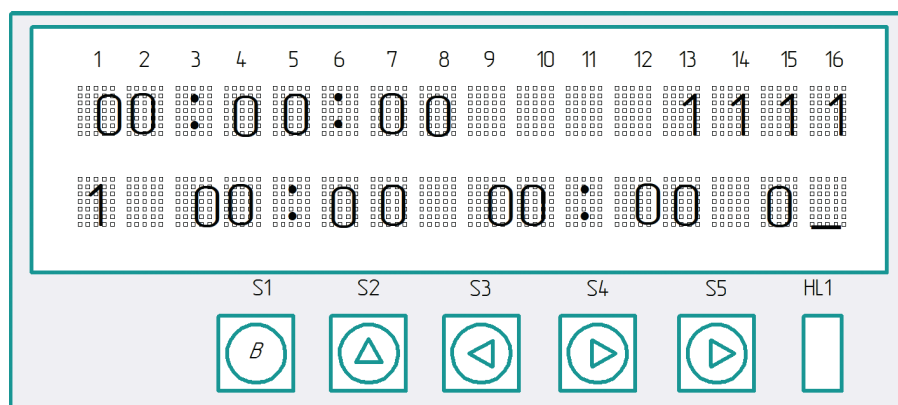


Рис. 5. Интерфейс управления блока после инициализации индикатора HG1

интервалов на других вкладках можно перепрограммировать.

В памяти данных микроконтроллера DD3 с адреса \$2 по \$F организован буфер отображения для вывода информации на индикатор HG1. Адресное пространство памяти данных контроллера разбито на следующие функциональные группы:

- \$2...\$7 – адреса, где хранится текущее время в минутах и в секундах (регистры R2...R7). Эти адреса выводятся на индикатор во всех режимах;
- \$80...\$83 – адреса, где хранится в часах и в минутах начало первого интервала (или окончание третьего интервала). Эти адреса выводятся на индикатор на вкладках «интервал 1», «интервал 3»;
- \$84...\$87 – адреса, где хранится в часах и в минутах начало второго интервала. Эти адреса выводятся на индикатор на вкладках «интервал 1», «интервал 2»;
- \$88...\$8B – адреса, где хранится в часах и в минутах начало третьего интервала. Эти адреса выводятся на индикатор на вкладках «интервал 2», «интервал 3». На рисунке 6 приведена фотография макета блока базового.

На рис. 6 на индикаторе HG1 отображается следующая информация. Блок находится в режиме конфигурирования (RAZ установлен в 1). Открыта вкладка «интервал 1». Установлено следующее текущее время: десять часов, пятьдесят одна минута, тридцать четыре секунды. Границы интервала № 1 выставлены от нуля часов нуля минут до восьми часов нуля минут. В данном интервале будут включены нагрузки № 2 и № 4.

В базовом блоке применены резисторы C2-33H-0.125, подойдут любые другие с такой же мощностью рас-

сеивания и погрешностью 5%. Резистор R4 типа СП5-2ВА. Конденсаторы C7 типа К50-35. Остальные конденсаторы типа К10-17. Базовый блок не требует никаких настроек и регулировок, кроме регулировки контрастности индикатора HG1 переменным резистором R4. Движком переменного резистора R4 выставляется приемлемый контраст изображения индикатора HG1.

Клавиатура блока не сможет функционировать, если не замкнуты контакты 1 и 2 соединителя X1. Данный соединитель подключается к соединителю X1 модуля электронного ключа (далее – ключа).

Вышеуказанные контакты замыкаются при включении ключа. Рассмотрим его работу (рис. 3).

Интерфейс ключа включает в себя: индикацию (дисплей) из цифровых семисегментных индикаторов HG1–HG4, клавиатуру – кнопки S1–S7. Кнопки S1–S7 обозначены цифрами от «1» до «7». Данные кнопки задают код ввода. На 4-разрядном дисплее отображается вводимый код. Ключ включён, если вводимый код совпал с эталонным. При этом включается реле DA1 и замыкаются контакты 1 и 2 в соединителе X1. Работа ключа задаётся с диспетчерского пункта тумблерами SA1, SA2 и кнопкой SB1. Они имеют следующее назначение:

- SA1 – подключает клавиатуру (кнопки S1–S8) к микроконтроллеру DD1 ключа;
- SA2 – задаёт режимы работы ключа. Их два: рабочий и записи эталонного кода;
- SB1 – однократное нажатие на данную кнопку включает/выключает ключ.

При включённом ключе в первом разряде (индикатор HG4) загорается точка h. То есть ключ можно вклю-

чить либо набрав правильный код, либо нажав кнопку SB1 в диспетчерском пункте.

Пусть тумблер SA1 находится в положении «ВКЛ», а тумблер SA2 в положении «КОД». Сразу после подачи питания на дисплее индицируется число 0000. Микроконтроллер DD1 ждёт ввода четырёхразрядного кода. Вводимый с клавиатуры код микроконтроллер индицирует на дисплее и записывает в ОЗУ. После ввода пятого разряда кода (после ввода четвёртого разряда нужно нажать любую кнопку из S1–S7) микроконтроллер побайтно сравнивает его с четырёхразрядным кодом, записанным в EEPROM-памяти (эталонным кодом). Если в рабочем режиме вводимый код совпал с эталонным кодом, то микроконтроллер на тридцать секунд подаёт сигнал на включение реле DA1. Данное реле замыкает контакты 1 и 2 в соединителе X1. Через тридцать секунд микроконтроллер DD1 выключает реле DA1 и обнуляет дисплей. Если вводимый код не совпал с эталонным кодом, то микроконтроллер не включит реле DA1 и после ввода четвёртого разряда четырёхразрядного кода сразу обнуляет дисплей (на дисплее индицируется число 0000).

В режиме записи эталонного кода тумблер SA2 в диспетчерском пункте находится в положении «ЗАП». При этом во втором разряде (индикатор HG3) загорается точка h. Вводимый с клавиатуры код микроконтроллер индицирует на дисплее и записывает в ОЗУ. После ввода четырёхразрядного кода необходимо нажать любую кнопку из S1–S7. При этом код, индицируемый на дисплее, запишется в EEPROM-память микроконтроллера. После записи на дисплее индицируются нули.

Рассмотрим основные функциональные узлы ключа. Рабочая частота микроконтроллера DD1 задаётся генератором с внешним резонатором ZQ1 на 10 000 МГц. Порт PD микроконтроллера DD1 управляет динамической индикацией. Динамическая индикация собрана на транзисторах VT1–VT4, цифровых, семисегментных индикаторах HG1–HG4. Резисторы R4–R11 – токоограничительные для сегментов индикаторов HG1–HG4. Коды для включения вышеуказанных индикаторов при функционировании динамической индикации поступают в порт PB микроконтрол-

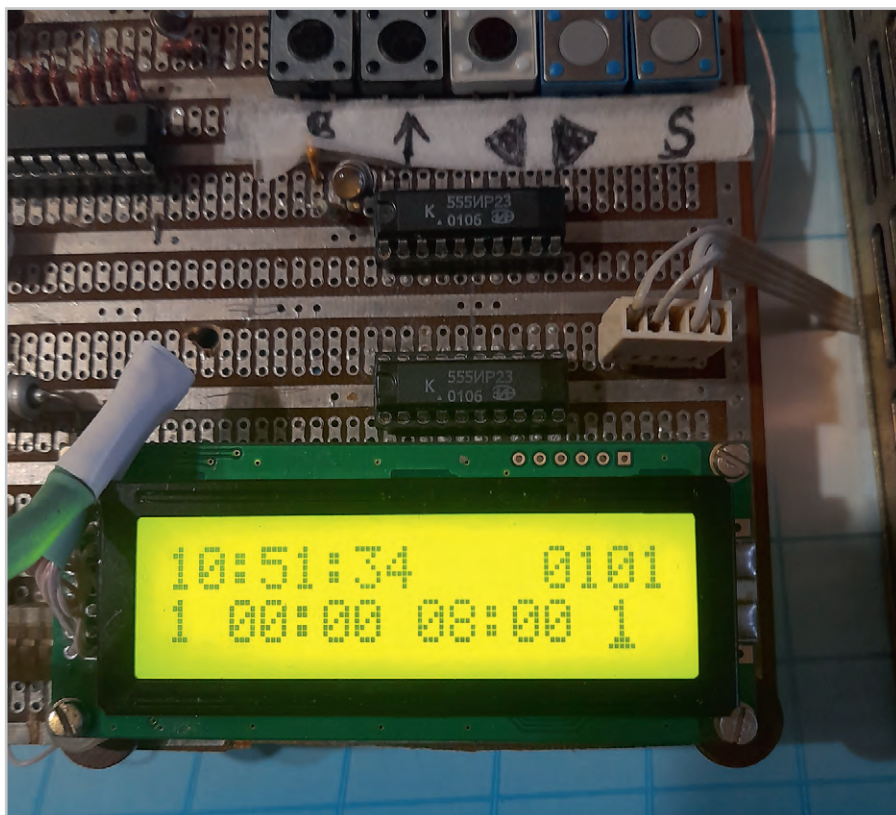


Рис. 6. Фотография макета блока базового

лера DD1. Для функционирования клавиатуры задействован вывод 7 (PD3) микроконтроллера DD1. Сразу после подачи питания на выводе 1 микроконтроллера DD1 через RC-цепь (резистор R4, конденсатор C3) формируется сигнал системного сброса для микроконтроллера DD1. На дисплее индицируется код 0000. Питающее напряжение 5 В поступает на устройство с соединителя X4.

В ОЗУ микроконтроллера с адреса \$60 по адрес \$64 организован буфер отображения для динамической индикации. (RAM = \$60 – начальный адрес буфера отображения.) Флаги, задействованные в программе, находятся в регистрах R19 (f0) и R25 (f01). Эталонный код хранится в EEPROM-памяти программ микроконтроллера. Она организована как отдельное адресное пространство для хранения данных, в котором каждый байт может быть отдельно прочитан или записан. Память EEPROM допускает не менее 100 000 циклов записи/стирания. Регистры, используемые для работы с EEPROM: регистр адреса – EEAR; регистр данных – EEDR; регистр управления – EECR. Разработанная программа на ассемблере занимает порядка 0,8 Кбайт памяти программ микроконтроллера. Применены резисторы типа С2-33Н, подойдут любые другие

с такой же мощностью рассеивания и погрешностью 5%. Конденсаторы C1...C4 типа K10-17, C5 – типа K50-35.

Для ограничения доступа в системе реализовано последовательное блокирование клавиатуры в его составных частях. Тумблер SA1 в диспетчерском пункте блокирует клавиатуру в модуле электронного ключа. А модуль электронного ключа – это фактически кодовый замок, который блокирует клавиатуру в базовом блоке.

Рассмотрим алгоритм работы кодового замка № 1 (рис. 4). Его интерфейс включает в себя: клавиатуру – кнопки S1–S8 и переключатель SA1. Кнопки S1–S7 обозначены цифрами от «1» до «7». Данные кнопки определяют код ввода. Алгоритм работы кодового замка совершенно идентичен алгоритму работы ключа. Только выходной сигнал кодового замка (лог. «0» на выходе 8 DD2) активируется на 5 с. В аппаратной части кодового замка отсутствуют семисегментные индикаторы.

Так же, как и в модуле электронного ключа, предусмотрено два режима работы: рабочий и записи кода. Режим работы задаётся переключателем SA1. В рабочем режиме (SA1 в положении «К») сразу после подачи питания микроконтроллер DD2 «ждёт» ввода четырёхразрядного кода. Вводимый с клавиатуры код (младшие четыре раз-

ряда) микроконтроллер записывает в ОЗУ и сравнивает его с эталонным кодом, записанным в EEPROM-памяти микроконтроллера. Если в рабочем режиме вводимый код совпал с эталонным кодом, то микроконтроллер на пять секунд подаёт сигнал на включение механизма открывания замка. Через пять секунд микроконтроллер DD2 выключает механизм открывания замка. Если необходимо подать постоянный сигнал на включение механизма открывания замка (отпирания), то необходимо нажать на кнопку S8. Если необходимо закрыть замок, то снова нужно нажать на S8.

В режиме записи переключатель SA1 должен быть в положении «3». После перевода переключателя SA1 в данное положение вводимый с клавиатуры код микроконтроллер записывает в своё ОЗУ. После ввода четырёхразрядного кода необходимо нажать любую кнопку из S1...S7. При этом код запишется в EEPROM-память микроконтроллера. Понятно, что доступ к переключателю SA1 и кнопке S8 должен быть ограничен. Время работы кодового замка № 1 определяется каналом № 1 базового блока. Сигнал «Канал № 1» поступает на схему кодового замка через соединитель X2 (рис. 4). Выходной сигнал кодового замка № 1 поступает на соединитель X1.

В алгоритме работы всей системы в целом можно выделить следующие режимы работ.

- Режим конфигурирования. В данном режиме происходит запись эталонных кодов в модуль электронного ключа и кодовых замков № 1 и № 2. А также задание необходимых параметров в базовом блоке.
- Рабочий режим. Работа по заданному алгоритму. Допускается перепрограммирование параметров базового блока, минуя модуль электронного ключа (минуя 2-й уровень). Для этого необходимо нажать на кнопку SB1 в диспетчерском пункте. Проконтролировать после этого включение световой полосы HL1 в модуле электронного ключа (контроль деблокировки клавиатуры базового блока) и задать новые параметры в базовом блоке.

Представленные устройства не требуют никакой настройки и наладки. При правильном монтаже они начинают работать сразу после подачи на них напряжения питания.



Применение IGBT-транзисторов в линейных стабилизаторах напряжения

Алексей Кузьминов

В статье описан линейный стабилизатор с выходным напряжением 28 В и током до 9 А на ОУ MC34072MTTBG/MC33072DR2G и IGBT-транзисторе DG20X06T2. Порог срабатывания токовой защиты на ОУ и оптосимисторе VOM160NT составляет около 10 А. Размах пульсации выходного напряжения на нагрузке при максимальном токе составляет около 1 мВ (0,97 мВ для MC33072DR2G и 1,12 мВ для MC34072MTTBG), а падение напряжения – не более 0,1 В. Приведены принципиальные схемы, разводка и внешний вид плат стабилизатора, а также результаты его тестирования.

Введение

Биполярный транзистор с изолированным затвором в отечественной литературе имеет аббревиатуру БТИЗ, в зарубежной – IGBT (Insulated-Gate Bipolar Transistor). Такой прибор представляет собой мощный и, как правило, высоковольтный (600 В и даже 1200 В) биполярный транзистор, к базе которого подключён менее мощный полевой транзистор, задающий базовый ток, а на его затвор уже подаётся управляющее напряжение. Такие транзисторы обычно используются в переключающем режиме работы в составе импульсных ИП, в инверторах для сварочных аппаратов и т.п. Поскольку в составе IGBT-транзисторов имеется полевой транзистор, передаточные характеристики полевых и IGBT-транзисторов имеют похожий вид (рис. 1). Однако между ними имеется одно очень существенное отличие, которое касается так называемого порогового напряжения затвора – $V_{GS(th)}$ (Gate Threshold Voltage). Это такое напряжение между истоком и затвором (для IGBT – между эмиттером и затвором – $V_{GE(th)}$), при котором транзистор начинает открываться. Обычно это пороговое напряжение затвора для полевых транзисторов составляет в среднем 2–4 В (рис. 1б). Однако среди полевых транзисторов встречается такие, у которых это пороговое напряжение затвора существенно больше. Например, у IRFP4710 $V_{GS(th)}$ составляет 3,5–5,5 В (рис. 1а). У IGBT-транзисторов пороговое напряжение затвора, как правило, ещё больше. Например, у DG20X06T2 $V_{GE(th)}$ составляет 5,2–6,5 В (рис. 1в). Причём с увеличением температуры у обо-



Дополнительные материалы к статье вы можете скачать с нашего сайта по этой ссылке

их типов транзисторов это пороговое напряжение затвора смещается влево, т.е. оно снижается, что можно легко проследить по рис. 1. Схожесть передаточных характеристик полевых и IGBT-транзисторов натолкнула автора на идею: а нельзя ли использовать IGBT-транзисторы в линейном (а не в переключающем) режиме работы при конструировании линейных стабилизаторов напряжения? Забегая вперед, можно отметить, что эта идея себя оправдала. Мало того, IGBT-транзисторы в подобных стабилизаторах напряжения показали такой высокий результат работы, которого автор даже не ожидал.

Но прежде чем описывать конкретную принципиальную схему линейного стабилизатора, сделаем некоторое отступление относительно способа включения транзистора в подобном стабилизаторе. В статье автора [1] была приведена структурная схема стабилизатора отрицательного напряжения на ОУ и мощном n-канальном полевом транзисторе (рис. 2а). Более подробно эта схема показана на рис. 2б. Такая схема применена автором в линейных стабилизаторах, описанных в [2] и [3]. В этой схеме ОУ и источник опорного напряжения (ИОН) питаются входным напряжением, пропущенным через НЧ RC-фильтр, который несколько подавляет пульсации входного напряжения. Опорное напряжение подаётся на инвертирующий вход ОУ, а выходное напряжение с

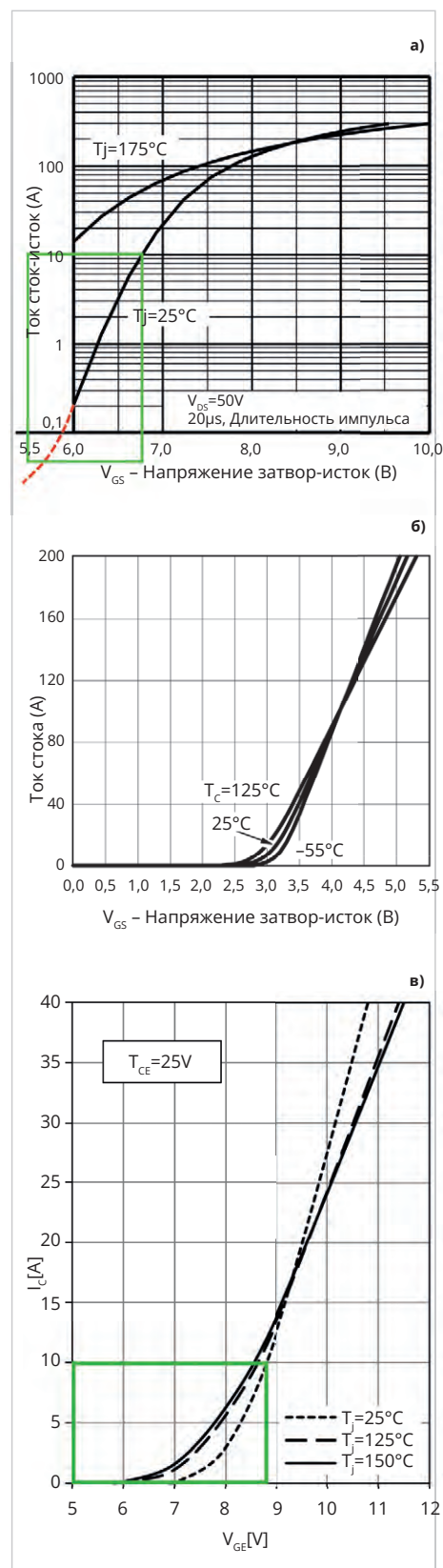


Рис. 1. Передаточные характеристики транзисторов: полевых – IRFP4710 (а) и SUP90P06 (б), IGBT – DG20X06T2 (в)

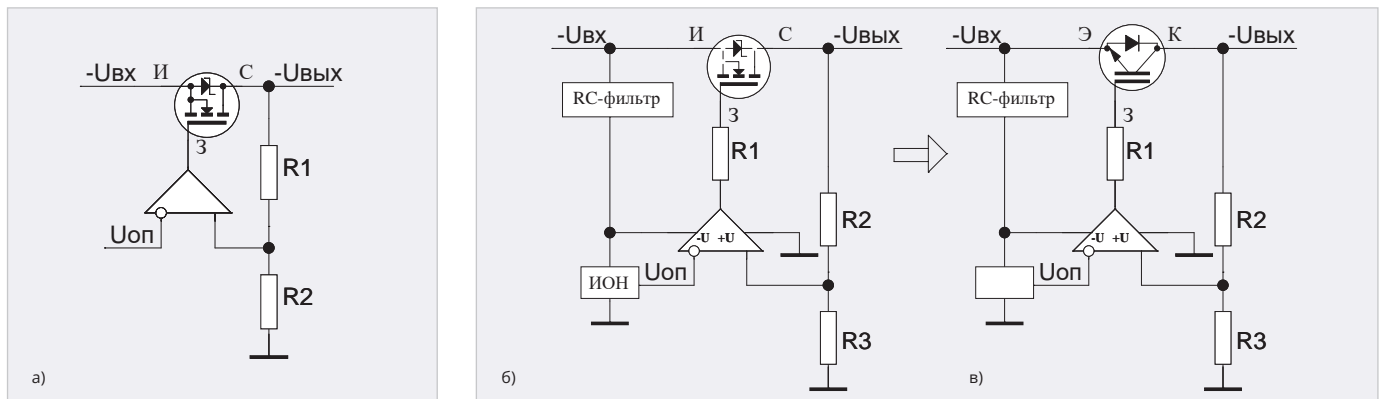


Рис. 2. Упрощённые схемы стабилизаторов напряжения на полевом (а, б) и IGBT- (в) транзисторах

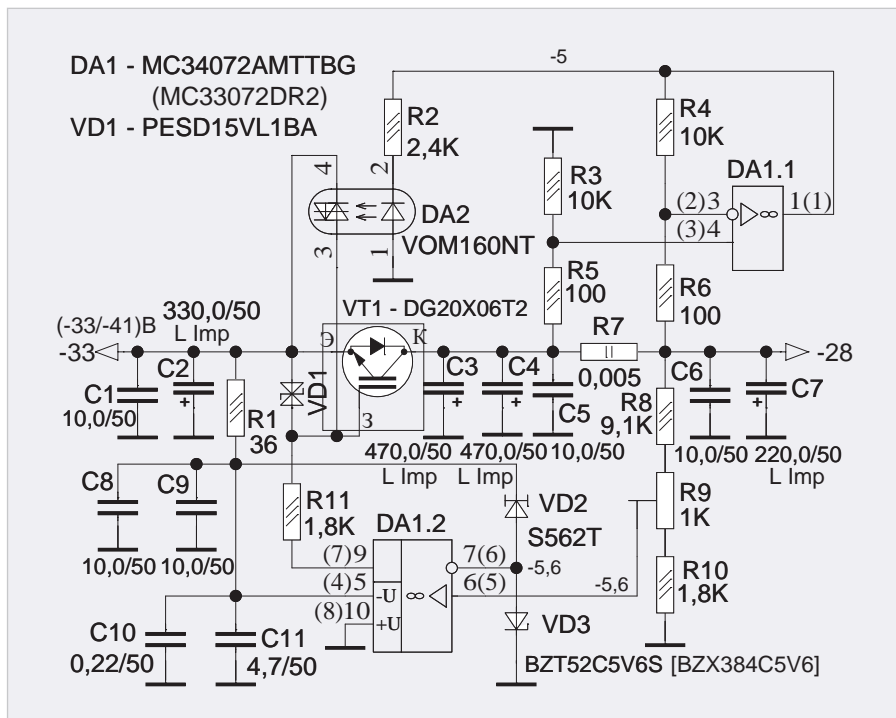


Рис. 3. Принципиальная схема стабилизатора

делителя R2–R3 – на его неинвертирующий вход. При таком включении ОУ, если выходное напряжение падает (например, при подключении нагрузки), то падает и напряжение, снятое с делителя R2–R3, а поскольку оно подключено к неинвертирующему входу ОУ, падает и выходное напряжение ОУ (т.е. оно становится более положительным), так как ОУ стремится сохранить напряжение на своих входах. Более положительное напряжение, приложенное к затвору транзистора (рис. 1), заставляет его приоткрыться, отчего выходное напряжение устанавливается на прежний уровень. При снятии нагрузки всё происходит с точностью до наоборот, т.е. транзистор прикрывается, восстанавливая выходное напряжение на прежний уровень. Однако при закрытии транзистора существует один существен-

ный нюанс. Для того чтобы закрыть транзистор, на его затвор требуется подать напряжение, близкое к напряжению истока, т.е. входному напряжению. Если даже ОУ обладает так называемым свойством Rail-to-Rail Output по отрицательному напряжению, т.е. он может воспроизвести выходное напряжение, почти равное отрицательному напряжению питания ($-U$), то всё равно он не может полностью закрыть транзистор, поскольку на RC-фильтре, выходным напряжением которого питается ОУ, будет небольшое падение напряжения. Хотя, конечно, полностью закрывать транзистор не требуется, поскольку он должен сохранять выходное напряжение на прежнем уровне и обеспечивать хотя бы небольшой ток, проходящий через све-

диод, подключённый к выходному напряжению для его индикации [3]. В сумме эти два тока составляют несколько мА. Но даже такой маленький ток может обеспечить не каждый полевой транзистор, управляемый ОУ по схеме на рис. 2б. Для того чтобы это было возможно, транзистор должен иметь достаточно большое пороговое напряжение затвора ($V_{GS(th)}$). Из всех полевых транзисторов, насколько это известно автору, только транзистор IRFP4710 (IRFB4710) имеет достаточно большое пороговое напряжение затвора (3,5–5,5 В) – см. выше. Если максимальный выходной ток стабилизатора составляет около 10 А, то транзистор IRFP4710 будет работать в области, очерченной зелёным прямоугольником на рис. 1а, т.е. выходное напряжение ОУ (напряжение затвора) будет изменяться в пределах приблизительно от 5,5 В до 6,75 В. Но это только если транзистор холодный, т.е. его температура не больше 25°C. При большом токе (например, 8–9 А) транзистор будет нагреваться, и его температура может повыситься до 40–60°C, что приведёт к смещению передаточной характеристики влево (рис. 1). Но поскольку транзистор в таком режиме работы открыт и на затвор подаётся достаточно высокое напряжение, ни к какому негативному эффекту это не приведёт, и всё будет работать в штатном режиме. Но что будет, если снять нагрузку, когда транзистор горячий? В этом случае на его затвор необходимо будет подать напряжение ещё ближе к напряжению истока (так как передаточная функция смещена влево), и если этого напряжения недостаточно, т.е. ОУ уже не сможет подать на затвор нужное напряжение, может возникнуть самопроизвольная генерация частотой около 300–500 Гц и амплитудой в несколь-

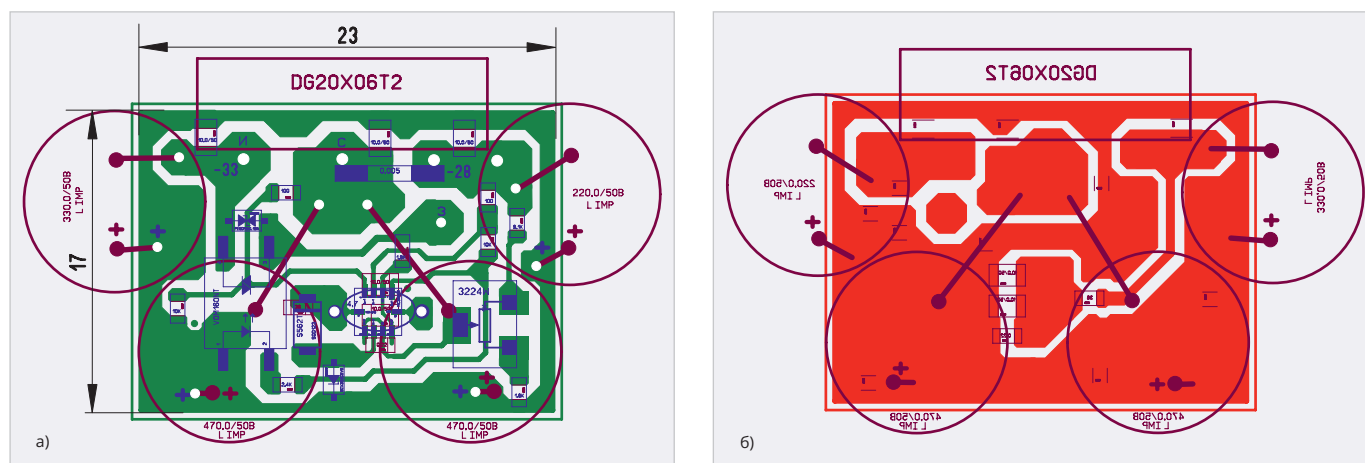


Рис. 4. Разводка платы с ОУ MC34072MTTBG: а) вид со стороны расположения ОУ, б) вид с обратной стороны

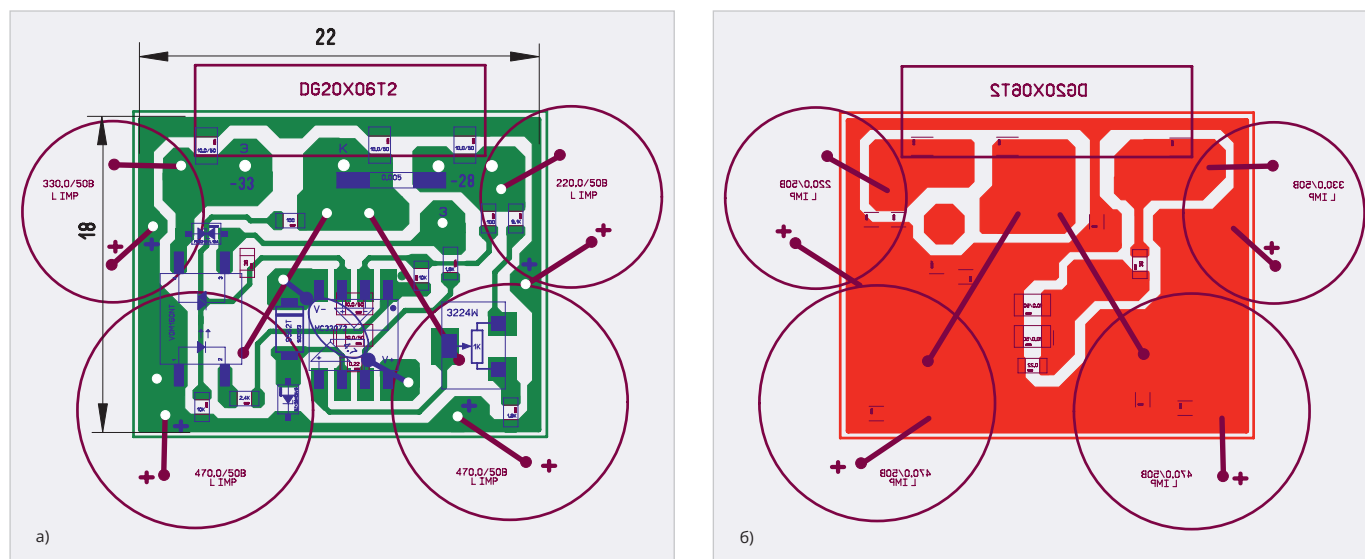


Рис. 5. Разводка платы с ОУ MC33072DR2G: а) вид со стороны расположения ОУ, б) вид с обратной стороны

ко мВ. Этот эффект автор наблюдал с одним из экземпляров транзистора IRFP4710 (при использовании остальных экземпляров подобная генерация отсутствовала).

Теперь посмотрим на передаточную характеристику IGBT-транзистора DG20X06T2 (рис. 1в). Как можно заметить, его работа при максимальном токе до 10 А очерчена зелёным прямоугольником, а поскольку пороговое напряжение затвора ($V_{GE(th)}$) составляет 5,5–6,2 В, т.е. существенно выше порогового напряжения затвора IRFP4710 (3,5–5,5 В), то даже приличный нагрев этого транзистора и после этого снятие нагрузки не приведёт к вышеуказанной генерации. Автор специально достаточно сильно нагрел этот транзистор (в схеме рис. 2в), а потом снял нагрузку и наблюдал за выходным напряжением на осциллографе. Никакой генерации не было и в помине. В связи с этим схема рис. 2в, где осуществлена прямая замена IRFP4710 на

DG20X06T2, и была принята за основу принципиальной схемы стабилизатора.

Автор также обнаружил ещё один интересный эффект у транзистора DG20X06T2 – менее сильный нагрев, чем у транзистора IRFP4710, при одном и том же времени работы (около 5 минут) и одном и том же токе (9 А). Если радиатор с IRFP4710 в этом режиме был почти горячим (по ощущениям автора, около 50–60°C), то радиатор с DG20X06T2 был только тёплым (около 40°C). Объяснить этот эффект можно тем, что у DG20X06T2 падение напряжения составляет около 1–2 В (так как выходной транзистор биполярный), а IRFP4710 имеет очень низкое сопротивление в открытом состоянии (максимальное значение составляет всего 14 мОм), в связи с чем он работает как полностью регулируемое сопротивление во всём диапазоне токов. А падение напряжения даже в 1 В при токе 9 А (у DG20X06T2) приведёт к мощности 9 Вт,

которая, возможно, вычтется из всей рассеиваемой мощности при нагреве транзистора. Второй версией сниженного нагрева IGBT-транзисторов является их меньшее тепловое сопротивление переход–корпус по сравнению с биполярными и полевыми транзисторами, отчего тепло IGBT-транзисторов рассеивается радиатором более интенсивно. Но это только предположения автора. Во всяком случае, факт остаётся фактом: транзистор DG20X06T2 по сравнению с IRFP4710 при одних и тех же условиях греется явно меньше.

Стоит упомянуть и ещё одно свойство IGBT-транзисторов – это существенно меньшая ёмкость затвор–эмиттер по сравнению с ёмкостью затвор–исток у полевых. Входная ёмкость у IRFP4710 $C_{ISS} = 6160$ пФ, тогда как входная ёмкость DG20X06T2 $C_{IES} = 2320$ пФ (см. справочные листки на эти транзисторы). Меньшая ёмкость C_{IES} объясняется тем, что полевой транзистор, входящий в состав

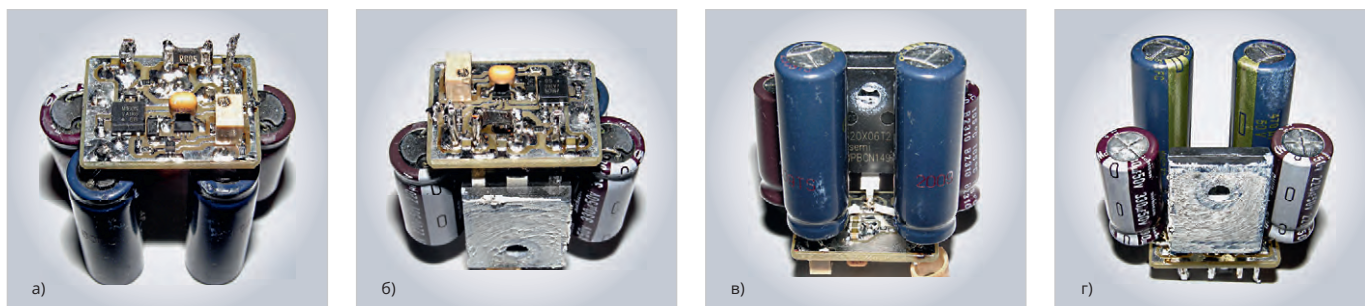


Рис. 6. Внешний вид платы с ОУ MC34072MTTBG: а, б – вид со стороны расположения ОУ (а – спереди (ср. с рис. 4а), б – сзади), в, г – вид с обратной стороны (в – спереди (ср. с рис. 4б), г – сзади)

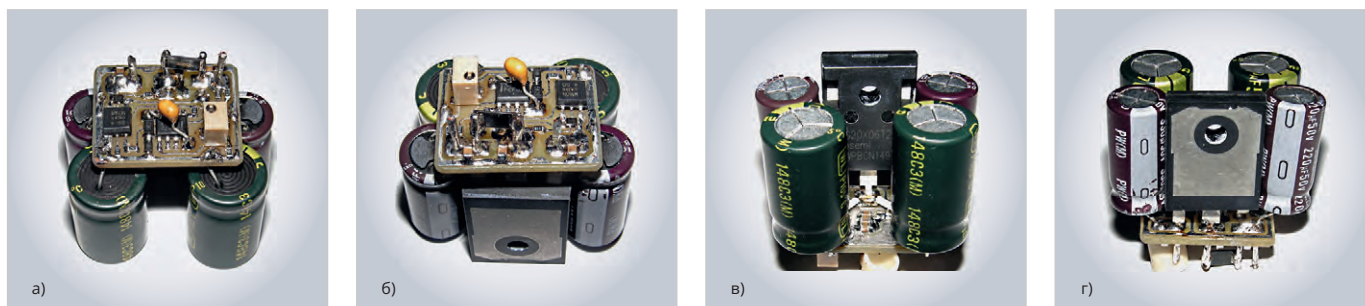


Рис. 7. Внешний вид платы с ОУ MC33072DR2G: а, б – вид со стороны расположения ОУ (а – спереди (ср. с рис. 5а), б – сзади), в, г – вид с обратной стороны (в – спереди (ср. с рис. 5б), г – сзади)

DG20X06T2 и определяющий только базовый ток (несколько ампер) биполярного транзистора, существенно менее мощный, чем транзистор IRFP4710, который выдаёт полный ток (до 70 А). Но чем меньше мощность полевого транзистора, тем меньше его кристалл и соответственно меньше значение входной ёмкости. А чем меньше эта ёмкость, тем легче управлять транзистором со стороны ОУ. Хотя максимальная ёмкость, которую допускает выход ОУ MC33072/MC34072, применённый в стабилизаторе (см. далее), составляет 10 000 пФ, всё же более лёгкое управление IGBT-транзистором приводит к снижению уровня пульсаций выходного напряжения стабилизатора (см. далее).

И последнее, что следует упомянуть, – это уникальная дешевизна транзистора DG20X06T2 (не более 100 руб.) по сравнению с транзистором IRFP4710 (300–700 руб., а то и дороже).

Итак, резюмируем все преимущества транзистора DG20X06T2 перед транзистором IRFP4710.

- Существенно большее пороговое напряжение затвор–эмиттер, которое исключает возникновение паразитной генерации стабилизатора в неблагоприятном режиме работы (отключение нагрузки при нагревом транзисторе).
- Меньший нагрев транзистора DG20X06T2 по сравнению с нагревом

IRFP4710 при одном и том же времени работы и одном и том же токе.

- Меньшая входная ёмкость DG20X06T2, что в итоге приводит к снижению размаха пульсаций выходного напряжения.
- Существенно меньшая стоимость DG20X06T2 по сравнению со стоимостью IRFP4710.

Кстати, по поводу стоимости ОУ. Применённые в стабилизаторе ОУ MC34072MTTBG (около 200 руб.) и MC33072DR2G (40–60 руб.) стоят заметно меньше, чем ОУ ADA4522-2 (300–500 руб.), применённый в [3].

Теперь, после этих предварительных пояснений, можно уже перейти к принципиальной схеме стабилизатора.

Принципиальные схемы

Принципиальная схема (рис. 3) построена по упрощённой схеме рис. 2в. По сравнению с принципиальной схемой, приведённой в [3], сделаны всего два изменения: во-первых, вместо транзистора IRFP4710 применён транзистор DG20X06T2, а во-вторых, вместо ОУ ADA4522-2 применены ОУ MC34072MTTBG/MC33072DR2G. Поскольку эта схема подробно описана в [3] и работает аналогичным образом, подробно описывать её нет смысла. Единственное, что необходимо отметить, это номера выводов ОУ. В скобках на схеме пока-

заны выводы ОУ MC33072DR2G, без скобок – выводы MC34072MTTBG.

Разводка и внешний вид плат стабилизатора

Разводка плат (рис. 4, рис. 5) сделана автором с помощью программы Sprint-Layout 6.0. Файл разводки в формате *.lay6 приведён в дополнительных материалах на сайте журнала. Несмотря на существенно больший размер ОУ MC33072DR2G по сравнению с MC34072MTTBG, размеры плат остались практически одинаковыми (18×22 мм для MC33072DR2G и 17×23 мм для MC34072MTTBG).

Внешний вид плат (рис. 6, рис. 7) также практически одинаков. На рис. 6в и рис. 7в можно заметить транзистор DG20X06T2 с соответствующим обозначением на его лицевой поверхности.

Результаты работы стабилизатора

Осциллограммы входных и выходных напряжений (рис. 8), снятые двухканальным цифровым осциллографом с закрытыми входами для стабилизаторов на базе ОУ MC34072MTTBG и MC33072DR2G, показали следующее.

При одинаковом размахе пульсации входного напряжения в 860 мВ (надпись «Vpp(1) = 860mV» в левом нижнем углу рис. 8а и рис. 8б) размах пульсации выходного напряжения для MC34072MTTBG чуть больше:

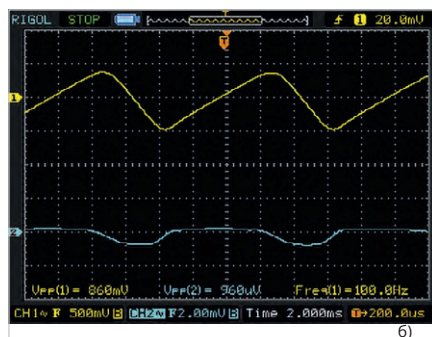
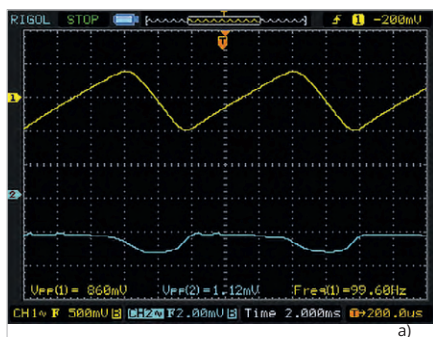


Рис. 8. Пульсации входного (жёлтый) и выходного (бирюзовый) напряжений стабилизаторов при токе 9 А: а – для MC34072MTTBG, б – для MC33072DR2G

1,12 мВ (надпись «Vpp(2) = 1.12mV» внизу в середине рис. 8а) против 960 мкВ (надпись «Vpp(2) = 960uV» внизу в середине рис. 8б) для MC33072DR2G. Осциллограммы сняты при токе чуть больше 9 А. По сравнению с размахом пульсации выходного напряжения стабилизатора на базе ОУ ADA4522-2 и полевого транзистора IRFP4710 (1,36 мВ) [3], размах пульсации выходного напряжения описанного стабилизатора снизился почти в полтора раза.

Плата на базе ОУ MC33072DR2G и IGBT-транзистора DG20X06T2 была признана автором как наилучший вариант (самая дешёвая и имеющая самый маленький размах пульсации выходного напряжения – 0,96 мВ). Она и была установлена на радиатор ИП (рис. 9).

Заключение

Применение IGBT-транзистора позволило усовершенствовать описанный в [3] стабилизатор напряжения, повысить надёжность его работы, снизить размах пульсации его выходного напряжения

и существенно его удешевить, применив ОУ MC34072MTTBG/MC33072DR2G и IGBT-транзистор DG20X06T2. Настоящий стабилизатор автор применил в ИП, описанном в [3], для питания современного аудиоусилителя, хотя область применения подобного стабилизатора, на взгляд автора, гораздо шире. Кроме того, пониженная ёмкость затвор–эмиттер, более высокое пороговое напряжение затвора, меньшее тепловыделение и, наконец, невысокая стоимость современных IGBT-транзисторов составляют существенную конкуренцию полевым транзисторам при конструировании относительно мощных линейных стабилизаторов напряжения на их основе совместно с ОУ. Вообще, линейный режим (а не, как правило, переключательный, использующийся, например, в импульсных ИП или инверторах сварочных аппаратов) работы IGBT-транзисторов, их существенно более лёгкая управляемость по сравнению с полевыми и тем более биполярными транзисторами позволяют под-

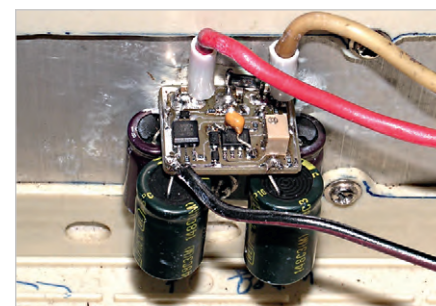


Рис. 9. Плата на базе ОУ MC33072DR2G и транзистора DG20X06T2, установленная на радиаторе ИП

ключать затвор IGBT непосредственно (либо через резистор) к выходу практически любого ОУ, что даёт возможность не только построения на их основе совместно с ОУ линейных стабилизаторов, как описано в настоящей статье, но и использования таких транзисторов в более широких областях.

Литература

1. Кузьминов А. Использование мощных полевых транзисторов и операционных усилителей в прецизионных регуляторах и стабилизаторах напряжения // Современная электроника. 2012. № 7.
2. Кузьминов А. Однополярное питание аудиоусилителя на мощных ОУ в мостовом включении // Современная электроника. 2020. № 1, № 2.
3. Кузьминов А. Модернизированный стабилизированный блок питания для аудиоусилителя с защитой по току и низким уровнем пульсаций // Современная электроника. 2024. № X.



НОВОСТИ МИРА

2,7-дюймовый графический OLED-дисплей с обширным набором интерфейсов для связи с микроконтроллерами

Предлагаемое устройство управляется микросхемой драйвера-контроллера SH1106 (производится компанией SINO WEALTH), который обеспечивает обмен данными с внешним микроконтроллером через стандартные параллельные интерфейсы микропроцессоров типа 8080/6080 в 8-битовом режиме и последовательные интерфейсы: I²C (Inter Integrated Circuit) и 4-проводной SPI (Serial Peripheral Interface). Разнообразие интерфейсных вариантов позволяет использовать этот дисплейный модуль практически в любом проекте или системе. Новинка оптимальна для применения в системах типа интеллектуальный дом, торговых терминалах (Point of Sale system), облач-

ных системах, медицинских приборах, системах IoT (Интернет вещей) и других.

Для работы логической схемы дисплея требуется напряжение питания от 1,65 до 3,3 В (типичное значение 3 В). Кристалл драйвера SH1106 соединён с выводами на стеклянной подложке по технологии COG (Chip On Glass), при этом обеспечивается небольшая толщина конструкции кристалл + стекло.

Предлагаемая модель REX012864AM WPP3N00000 характеризуется свечением экрана белого цвета. Коэффициент мультиплексирования строк 1/64 (64 – число адресуемых строк). Контрастность дисплея 10 000:1, что позволяет воспринимать изображение в широком диапазоне внешней освещённости при небольшой яркости свечения экрана 80 кд/м².

Основные параметры:

- Размер матрицы: 128×64 точек

- Размер диагонали 2,7"
- Габаритные размеры модуля 73×41,86×2,01 мм
- Рабочая площадь экрана: 61,41×30,69 мм
- Размер пикселя 0,45×0,45 мм
- Шаг пикселя 0,48×0,48 мм
- Контрастность 10 000:1
- Тип адресации дисплея: пассивно-матричная
- Цвет свечения экрана: белый (планируется выпуск моделей с жёлтым цветом свечения экрана)
- Коэффициент мультиплексирования строк 1/64
- Микросхема контроллера управления SH1106
- Диапазон рабочих температур –40...+80°C
- Диапазон температур хранения –40...+85°C



Разветвитель RS-485 с «Power over Ethernet»

Андрей Шабронов

Основное достоинство RS-485 заключается в повышенной помехоустойчивости при условии использования линии типа «шина», поскольку наведённая помеха компенсируется в витом кабеле. Однако на практике требуются «древовидные» и «звёздные» структуры линий, что вызывает проблему помехоустойчивости для интерфейса RS-485. Общее решение для перехода к разным структурам линий состоит в том, что принято использовать разветвитель или повторитель RS-485 [1]. Предлагаемая конструкция выполняет разветвление RS-485, используя питание по кабелю по принципу «Power over Ethernet», в отличие от наиболее известных промышленных изделий. Разветвитель позволяет обеспечить помехоустойчивость при переходе от шинной структуры линии к древовидной структуре при расширении системы сбора данных термометрии.

Структурная схема подключения разветвителя RS-485 PoE термометрии силосов элеватора

Действующий элеватор состоит из десяти корпусов, расположенных симметрично относительно центра, и диспетчерской с компьютером для термометрии. Исходный проект создан для девятого корпуса, нумерация корпу-

сов указана жёлтыми цифрами, рис. 1. Суммарная длина линии составляет не менее 250 метров. Для расширения по условиям эксплуатации потребовалось подключение восьмого корпуса. Структура линии преобразовалась в «древовидную», и также увеличилась суммарная длина линии. Установленный разветвитель позволил выполнить плановую модернизацию

без остановки работы системы термометрии.

Принципиальная схема разветвителя RS-485

Схема разветвителя (рис. 2) модернизирована из схемы «гроза-защита» [2] и практически повторяет входные и выходные линии RS-485.

Первоначально предполагалось использовать схему [2] в качестве «повторителя-ответвителя» RS-485, но в этом случае уже длинная линия объекта получала бы дополнительную нагрузку в середине линии. Анализ такой топологии предсказывал, наоборот, повышение вероятности помех, поскольку середина линии в случае передачи от неё представляет два достаточно длинных луча. И компенсации наведённых сигналов может и не быть, так как эти лучи разные по длине.

Для полного дублирования разветвителя уже требовалось два повторителя,

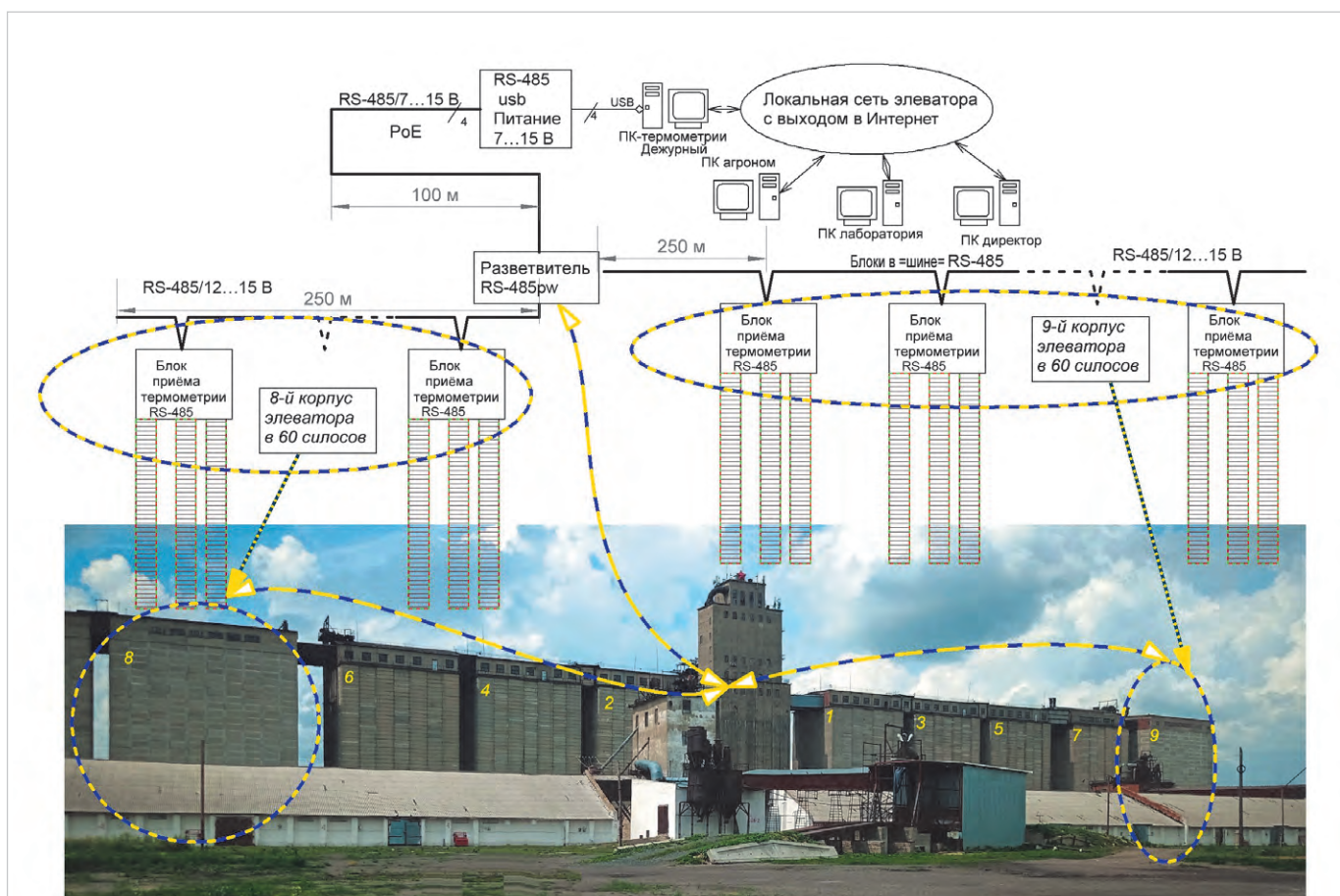


Рис. 1. Структурная схема подключения разветвителя RS-485

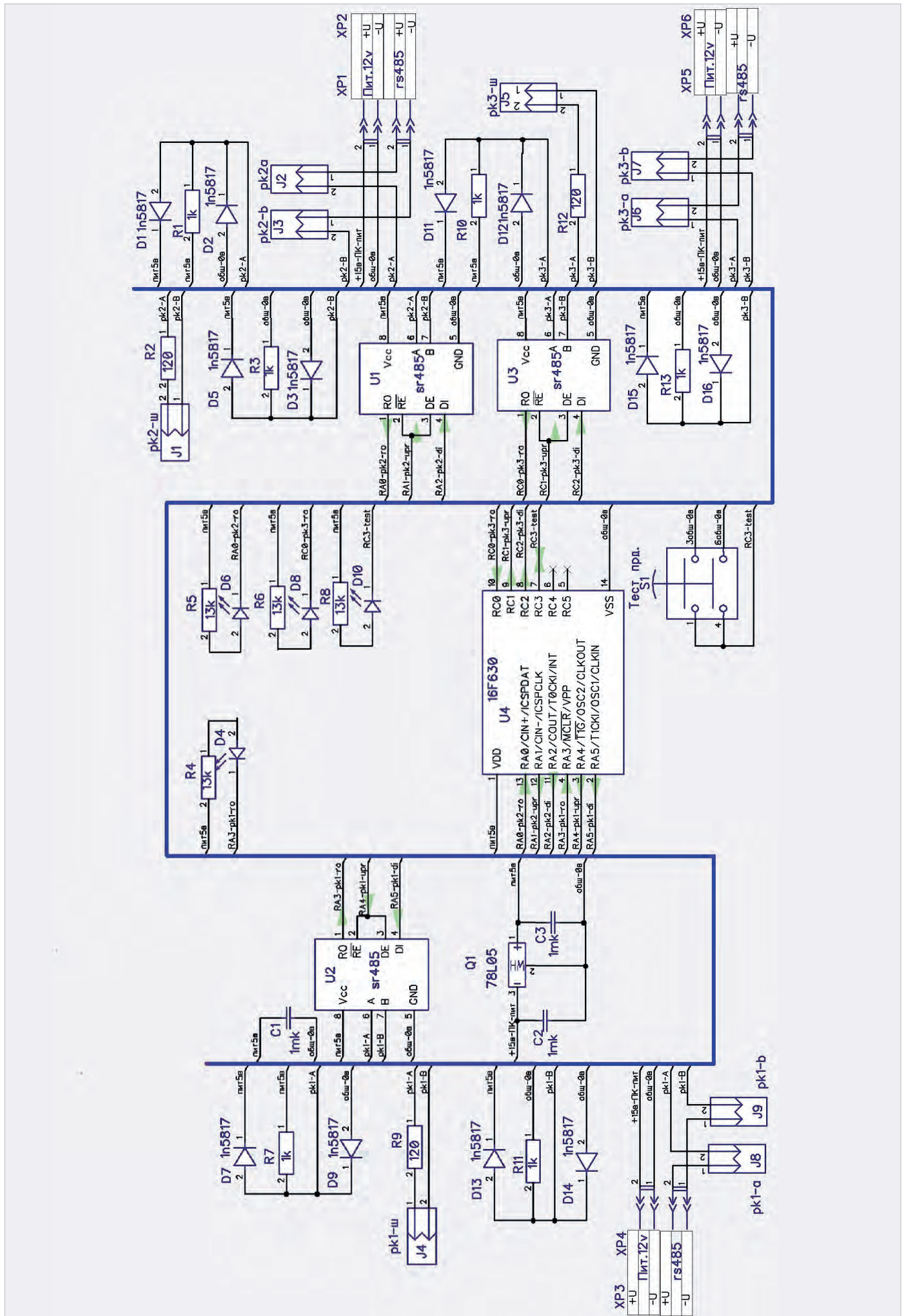


Рис. 2. Схема разводки платы RS-485

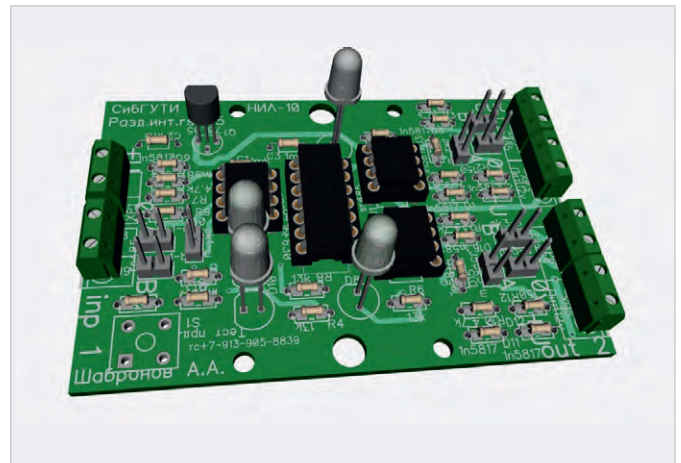


Рис. 3. Фото собранной платы разветвителя RS-485-1wire (слева) и её 3D-модель в DipTrace (справа)

что было неудобно и неконструктивно. Таким образом, возникло решение создать отдельный разветвитель на два направления.

Отличие предлагаемой схемы в использовании микроконтроллера (МК) с большим количеством выходных линий. Поскольку обмен интерфейса определён для 1200 бод, допустимо отказаться и от кварцевого резонатора. Однако, в случае необходимости, выводов МК хватает для его использования.

Далее в описании одинаковые функциональные элементы входных и выходных цепей разветвителя указываются в скобках.

На разъём XP3,4 (XP1,2; XP5,6) подключены линии с двумя проводами питания и двумя проводами интерфейса RS-485. Микросхема U2 (U1, U3) типа RS-485 преобразует парные противофазные входные сигналы в уровни логических сигналов $=0=$ и $=1=$, которые поступают на выводы 4 (13, 10) RA3 (RA0, RC0) микроконтроллера (МК) U4 (PIC16F630) [5].

Резисторы R7, R11 (R1, R3, R10, R13) формируют начальные уровни напряжения для линий А, В интерфейса. Резисторы R9 (R2, R12) выполняют согласование с входным сопротивлением интерфейса. Все диоды в цепях А, В обеспечивают защиту от возможных импульсных наведённых напряжений.

Сигнализацию обмена обеспечивают светодиоды D4, D6, D8, включённые через ограничительные резисторы R3, R5, R6.

Для проверки работоспособности разветвителя предусмотрена кнопка теста S1. Если её нажать, то программа в МК начинает выдавать в сторону PK1 тестовую АТ-комбинацию на скорости 1200 бод, и, таким образом,

приём этой комбинации подтверждает исправность линии и схемы. Кроме того, светодиод сигнализирует о наличии питания на МК.

Питание элементов выполняется через стабилизатор Q1 (78L05), при этом общий потребляемый ток схемы не превышает 10 миллиампер.

Входные цепи А, В и резистор согласования включаются через штыревые переключки на плате, что позволяет быстро «прозвонить» участки линии по сопротивлению обычным мультиметром и определить с неисправностью.

Все компоненты схемы собраны на печатной плате и предназначены для монтажа входной линии под «винт». На рис. 3 представлены: слева – фото собранной печатной платы в прозрачном защитном боксе на объекте, справа – 3D-модель той же платы. Печатная плата разработана в среде проектирования DipTrace, проект доступен в каталоге программ [3] и находится в файле **shema_vetvitel_rs485.zip**.

На печатной плате предусмотрена установка некоторых компонентов под два размера: DIP и SOIC. Все микросхемы устанавливаются через переходные колодки DIP-8 и DIP-14, что позволяет ремонтировать блок, модифицировать и изменять программное обеспечение и возможные функции использования.

В печатной плате предусмотрены отверстия и «пустые» участки для установки на DIN-рейку аналогично конструкции [2].

Программное обеспечение

Для настройки разветвителя RS-485 используется программное обеспечение, представленное по адресу [3]. Программа **shema_vetvitel_rs485.exe** подготовлена на языке программирования

FORTH [5]. Программа содержит все компоненты для программирования и модификации разветвителя RS-485, а также печатные платы и схемы.

Программный код для МК формируется при первом включении программы и выборе режима «восстановление всех файлов – компиляция нового кода». Для этого режима нажать клавишу $=4=$ после старта программы. Код формируется в папку **povtoritel_2_rs485_16f630_v1** и подготовлен в двух файлах с расширением **hex**.

После программирования МК при первом включении требуется выдать код «АТТ» на скорости 1200 бод в разветвитель. Этот код выполняет настройку на выбранную скорость. Всего для ретрансляции без кварца доступно две скорости: 1200 и 2400 бод. Для других скоростей требуется использование кварцевого резонатора, поскольку максимальная частота работы МК без кварца не более четырёх мегагерц.

Используется алгоритм ретрансляции по тактовым интервалам старт-стопной последовательности. В исходном состоянии проверяется последовательно уровень $=1=$ от PK1, PK2, PK3 и нажатие кнопки теста.

Как только любой из этих уровней установится равным $=0=$, это будет означать, что на соответствующем входе появился сигнал данных и начался стартовый интервал от соответствующего PK или передача теста. Для используемой схемы разветвителя сигнал с разъёма PK1 ретранслируется на PK2 и PK3. Обратная ретрансляция выполняется только на PK1. Соответственно, сигнал с PK2 передаётся только на PK1, и сигнал с PK3 также только на PK1. Сигнал теста передаётся тоже только на PK1.

Фрагмент текста программы основного алгоритма приведён далее на языке форт-ассемблера:

```

ORG @ m1 ! portc 0x3 btfs
\ проверка на тест нажатия
m5 goto
\ появился 0, выдача теста кнопки
porta 0x3 btfs
\ проверка PK1 пропустить, если 1
m2 goto
\ появился 0, переходим к ретрансляции
porta 0x0 btfs
\ проверка PK2 пропустить, если 1
m3 goto
\ появился 0, переходим к ретрансляции
portc 0x0 btfs
\ проверка PK3 пропустить, если 1
m4 goto
\ появился 0, переходим к ретрансляции
m1 goto
\ проверяем снова
ORG @ m2 ! 1 WORK_PK1PK2ATPK3#
\ передача от PK1 к PK2 PK3
m1 goto
\ проверяем снова
ORG @ m3 ! 1 WORK_PK2PK1AT#
\ передача от PK2 на PK1

```

m1 goto

```

\ проверяем снова
ORG @ m4 ! 1 WORK_PK3PK1AT#
\ передача от PK3 на PK1
m1 goto
\ проверяем снова
ORG @ m5 ! 1 OUT_TEST_OTV# \
передача теста на PK1
m1 goto
\ проверяем снова

```

После передачи байта в выбранном направлении программа возвращается к опросу входов. Таким образом, ретрансляция не зависит от количества байтов, и направление передачи определяется только по принципу «кто первый».

Подробное описание приведено в тексте файла **povtoritel1_2_rs485_16f630_v1.f** на языке Форт [5]. Текст форт-ассемблера находится в файле **assmb_pik12f_v1.f** и компилируется при формировании кода исполнения для МК. Все тексты программ имеют подробные комментарии и доступны для модификации и изменений.

Выводы

Предложенная схема разветвителя RS-485 позволяет формировать раз-

личные структуры линий интерфейса и, кроме того, выполняет тестирование линии и защиту участков линии. Использование питания устройств термометрии по линии связи увеличивает надёжность и ремонтпригодность системы измерений. Дополнительное программное обеспечение МК при необходимости допускает ввести и другие функции работы, кроме простой ретрансляции. Например, резервирование, независимую работу между шинами или передачу специальных сигналов или кодов управления.

Литература

1. Повторитель RS-485. URL: <https://ipc2u.ru/catalog/mwe485-ygs/>.
2. Шабронов А. «Гроза-зонт» RS-485 // Современная электроника. 2024. № 2. С. 48–49. URL: <https://www.cta.ru/articles/soel/2024/2024-2/178207/>.
3. Каталог программы, платы. URL: http://90.189.213.191:4422/temp/predohranim_i_uvelichim_rs485_v1/test/.
4. Описание 16F630. URL: <https://www.chipdip.ru/product/pic16f630-i-sl>.
5. Описание языка Форт spf4.exe, автор версии А. Черезов. URL: <http://www.forth.org.ru/>.



НОВОСТИ МИРА

Arm предоставляет разработчикам инструменты на основе искусственного интеллекта на GitHub

Компания Arm намерена произвести революцию в разработке программного обеспечения, интегрировав свою вычислительную платформу с GitHub, крупнейшим сообществом разработчиков, и она будет усовершенствована за счёт использования мощного GitHub Copilot. С помощью предложений кода Copilot на основе искусственного интеллекта разработчики могут быстрее писать, тестировать и оптимизировать код на Arm, а за счёт интеграции инструментов Arm в GitHub Actions они смогут оптимизировать задачи в приложениях, от облачных веб-приложений до решений искусственного интеллекта, при этом снижая затраты и повышая производительность.

«Это партнёрство даёт возможность 20 миллионам разработчиков, использующих Arm сегодня, использовать весь потенциал самой распространённой в мире вычислительной платформы и крупнейшей в мире платформы для разработчиков, чтобы сделать разработку быстрее, проще и эффективнее», – сказал Алекс Спинелли, старший вице-президент по искусственному интеллекту и платформам и услугам для разработчиков, Arm.



Расширение Arm для GitHub Copilot, которое скоро будет доступно в рамках GitHub Marketplace, поможет разработчикам более эффективно создавать, тестировать и развёртывать программное обеспечение. Расширение, интегрированное с курируемыми наборами данных, предложит специализированные инструменты для разработки кода ИИ, такие как миграция кода, контейнеризация, рабочие процессы CI/CD и оптимизация производительности, обеспечивая более плавное развёртывание от облака до периферии.

Ранее в этом году GitHub объявил об общедоступной версии средств запуска Arm64 Linux и Windows Native Arm для GitHub Actions. Эти средства выполнения, доступные клиентам с планами GitHub Team и Enterprise

Cloud, оптимизируют разработку, снижают затраты и увеличивают скорость. Средства выполнения Arm64 также повышают эффективность конвейеров искусственного интеллекта с помощью популярных платформ, таких как PyTorch.

По словам Спинелли, долгосрочное видение заключается в том, чтобы дать разработчикам возможность беспрепятственно развёртывать, тестировать и оптимизировать свои приложения по всей поверхности от самых больших облачных решений до самых маленьких датчиков.



Устройство автоматической парковки компьютера

Олег Вальпа

Описано разработанное автором статьи устройство, защищающее операционную систему компьютера от сбоя при аварийном пропадании питания путём автоматической парковки компьютера.

В современном мире значительно возросла роль компьютера, который выполняет не только рутинные вычислительные операции, но и управляет многими технологическими процессами в автоматическом режиме. В настоящее время производится широкая номенклатура компьютеров с питанием от источников постоянного тока с напряжением 12 В. Отсутствие у таких компьютеров активной вентиляционной системы охлаждения и малые габариты делают их очень привлекательными для создания систем автоматизации технологических процессов. Но для любых подобных систем недопустимо аварийное отключение питания компьютера. Самые распространённые новейшие операционные системы Windows10, Windows11 и другие крайне чувствительны к таким аварийным ситуациям. Как правило, аварийное отключение питания приводит к сбою или полному разрушению операционной системы компьютера. Естественно, что на восстановление операционной системы требуется немало времени, что приводит к непроизводительным потерям. Кроме того, важные данные могут быть безвозвратно потеряны.

Конечно, в своё время были разработаны устройства бесперебойного питания [1], которые обеспечивают защиту от аварийного отключения питания и даже автоматическую парковку. Но они сложны, дороги и имеют довольно большие габариты, вес и высокую стоимость.

Предлагаемое автором устройство предназначено для автоматической парковки компьютеров, питающихся от источника постоянного напряжения 12 В. Оно лишено перечисленных выше недостатков устройств бесперебойного питания и является простым, недорогим и малогабаритным. Повторить такое устройство не составит большого труда.

Устройство представляет собой коммутационный автомат с таймером. В качестве энергонезависимого источни-

ка питания к нему можно подключить любой аккумулятор необходимой ёмкости, например, малогабаритный литий-ионный, состоящий из трёх последовательно соединённых элементов 18650 [2], которые широко распространены во всём мире и недороги. Схема подключения устройства представлена на рис. 1.

На этой схеме показано подключение к устройству компьютера, источника питания и внешнего аккумулятора. Рассмотрим схему устройства, представленную на рис. 2, и принцип его работы.

При наличии питающего напряжения 220 В внешний сетевой блок питания компьютера формирует постоян-

ное питающее напряжение 12 В, которое поступает через диод VD1 на контакт 1 коммутирующего реле K1 устройства и на внешний аккумулятор. При этом происходит зарядка аккумулятора малым током от 12 В через ограничительное сопротивление R2. Одновременно это напряжение формирует через токоограничивающее сопротивление R1 ток, который открывает выходной транзистор оптрона U1. При этом формируется цепь заряда конденсатора CP1 от диода VD1 через резистор R3. Потенциал заряженного конденсатора приложен к затвору полевого транзистора VT1, который открывается после достижения зарядного напряжения конденсатора CP1 более 3 В и замыкает цепь питания реле K1. Таким образом напряжение питания от сетевого источника коммутируется на вход питания компьютера. Также вход-

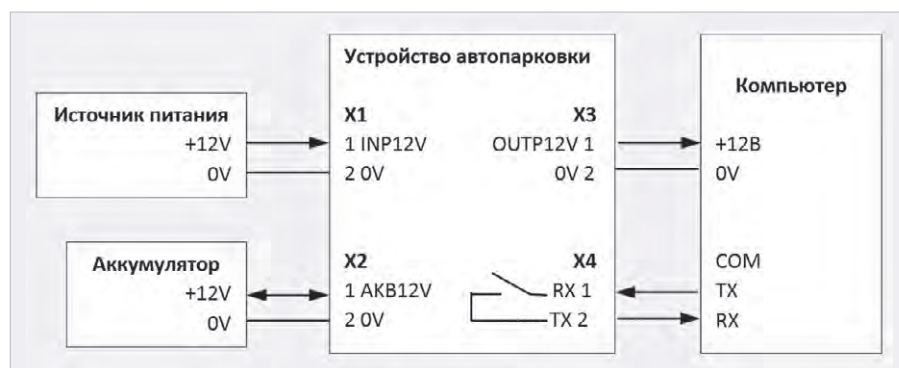


Рис. 1. Схема подключения устройства

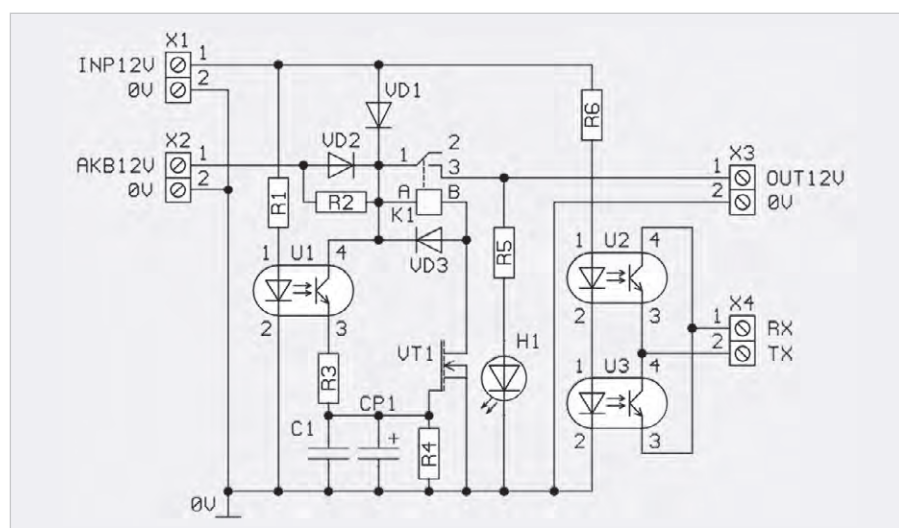


Рис. 2. Схема электрическая принципиальная устройства

Таблица. Перечень элементов устройства

Обозначение	Наименование	Количество
C1	Конденсатор 0805-V5V-0,1 мкФ +80%–20% 50 В	1
CP1	Конденсатор SR-16B-100 мкФ	1
H1	Диод светоизлучающий L-934YD	1
K1	Реле TRD-12VDC-SC-CL-R	1
R1, R5, R6	Резистор 0805 1,0 Ом±5%	3
R2, R3	Резистор 0805 100 Ом±5%	2
R4	Резистор 0805 1,0 МОм±5%	1
U1-U3	Оптрон PC817A	3
VD1-VD3	Диод 1N4007	3
VT1	Транзистор IRLML2803	1
X1-X4	Соединитель DG142V-02P	4

ное напряжение формирует через токоограничивающее сопротивление R6 ток, открывающий выходные транзисторы оптронов U2 и U3. Они позволяют коммутировать биполярные сигналы порта RS-232, формируемые компьютером. Таким образом, формируется контрольная замкнутая цепь, позволяющая компьютеру автоматически определять наличие внешнего питания. Компьютер осуществляет эту проверку путём ежесекундной отправки нескольких байт через последовательный порт, подключённый к данной контрольной цепи, и проверки возврата этих байт на приём этого же порта. При пропадании внешнего питания контрольная цепь разомкнётся, и компьютер обнаружит это событие. Питание компьютера автоматически начнёт осуществляться от аккумуляторной батареи через диод VD2. В случае если внешнее питание не восстановится в течение времени, заданного в программе контроля, компьютер приступит к автоматической парковке под управлением этой программы.

В это время конденсатор CP1 начнёт разряжаться через резистор R4 в течение трёх минут, достаточных для парковки компьютера. При снижении напряжения на конденсаторе CP1 ниже 3 В полевой транзистор закроется и разомкнёт цепь питания коммутационного реле K1. После этого схема устройства приводится в исходное состояние в ожидании появления внешнего питания. При восстановлении питания компьютер автоматически запустится благодаря соответствующим настройкам BIOS и восстановит свою работу. Таким образом, будет защищена операционная система компьютера и предотвращено аварийное прерывание его работы.

Светодиодный индикатор H1 с токоограничивающим сопротивлением R5 индицирует наличие питающего напряжения компьютера. Диод VD3

гасит напряжение самоиндукции во время размыкания реле K1. Керамический конденсатор C1 фильтрует высокочастотные импульсы, возникающие при работе устройства. Соединители X1–X4 являются самозажимными [3] и обеспечивают простоту подключения и надёжность соединений при эксплуатации устройства.

Перечень элементов устройства представлен в таблице.

Вместо приведённых в таблице элементов допускается использовать аналогичные элементы любого типа.

Устройство изготавливается на монтажной или специально разработанной печатной плате и размещается в любом корпусе с подходящими размерами, например, в обычной монтажной коробке для электрического монтажа.

Программа управления компьютером разработана в виде командного файла ups1.bat. Код этой программы состоит всего из двух строк и приведён в листинге 1.

```
Листинг 1. Код программы ups1.bat
@echo off
start /min powershell
-executionpolicy bypass -file
ups1.ps1
```

Ярлык данной программы необходимо поместить в каталог автозагрузки компьютера. Таким образом программа будет автоматически запускаться при каждом включении компьютера и контролировать наличие внешнего сетевого питания.

Первая строка этой программы отключает отображение строк на экране монитора, а вторая строка вызывает программу, хранящуюся в файле ups1.ps1. Файл этой программы необходимо поместить в один каталог с программой ups1.bat. Программа файла ups1.ps1 разработана на основе команд программной оболочки power shell. Данная программа снабжена комментариями, позволяющими модифицировать её при необходимости. Предварительной трансляции такая программа не требует и выполняется автоматически. Код программы ups1.ps1 для автопарковки компьютера приведён в листинге 2.

```
Листинг 2. Код программы ups1.ps1
# П em. IO. Ports.
SerialPort]::getportnames() # Получить список доступных COM портов
Write-Host 'Доступны порты: '; $cp
# Создать новый порт COM1 с параметрами
$port = new-Object System.
IO. Ports. SerialPort
COM1, 9600, None, 8, one # COM1 <- $cp
```

Автовыбор

```
$port.ReadTimeout = 1000; # Задать время ожидания ответа в мс
$port.open() # Открыть порт
$х = 0 # Счетчик циклов проверки
$е = 0 # Счетчик ошибок проверки
while ($е -lt 3) # Если ошибок меньше 3
{
    $port.WriteLine($buftx); $х++; # $х=$х*2; # Отправить строку и увеличить счётчик проверки
    $bufrx = "Нет связи" # Заполнить буфер строкой отличной от тестовой
    Start-Sleep -Seconds 1 # Пауза 1 сек.
    $bufrx = $port.ReadLine() # Принять строку
    if ( $buftx -ne $bufrx ) {$е++; $е; Write-Host 'Отключено питание!'} # COM порт не отвечает!
    else {$е=0; $х; Write-Host 'Питание в норме! Не закрывайте эту программу! Сверните окно программы!'}
    Start-Sleep -Seconds 2 # Пауза 2 сек.
}
$port.Close() # Закрыть порт
Write-Host 'Обнаружено отключение питания!'
Write-Host 'Завершение работы через 10 сек!'
shutdown /s /f /t 10
# Следующие 4 строки закомментировать символом # после отладки:
Start-Sleep -s 3 # Пауза 3 сек.
Write-Host 'Отмена парковки!'
shutdown /a
Start-Sleep -s 3 # Пауза 3 сек.
Exit # Выход
```

Для проверки работы программы можно запустить её в ручном режиме и убедиться в её функционировании.

Если у компьютера отсутствует последовательный COM-порт, вместо него можно использовать любой свободный USB-порт с адаптером USB-COM. После подключения адаптера USB-COM к компьютеру и установки драйверов для него в диспетчере устройств появится виртуальный COM-порт с определённым номером. Если этот номер будет отличаться от COM1, потребуется заменить в файле ups1.ps1 все записи «COM1» на «COMn», где n – номер из диспетчера устройств.

Литература:

1. URL: <http://www.apc.com>.
2. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/18650_battery.
3. URL: <https://degson.com>.



Конструктивные особенности элементов РЭА, SSA и спутниковой навигации В КОСМОСЕ

Вадим Экземплярский

Космос и околоземная орбита специфичны, и к устройствам предъявляются особые требования по надёжности, управляемости и безопасности летательных аппаратов. Применение РЭА в космосе уже много лет является сферой приложения конструкторских идей разработчиков. Более того, ведущие мировые державы соревнуются в совершенствовании технологий и стараются использовать конкурентные преимущества. Впечатляют новейшие разработки в области солнечных батарей, различных модификаций эпитаксиальных структур, материаловедения, а также защищённых электронных модулей и дискретных компонентов. В статье рассматриваются особенности РЭА для космоса, инновационные решения сборки солнечных панелей и батарей (SSA) и проблемные вопросы обеспечения надёжности и безопасности РЭА в условиях повышенной солнечной активности, радиации, необходимости отвода тепла и механической стойкости конструкций в условиях невесомости.

Все современные космические аппараты (КА), к которым относятся космические корабли с разным режимом пилотирования, зонды и спутники различного назначения, насыщены радиоэлектронной аппаратурой (РЭА). Устойчивое, управляемое и безопасное функционирование элементов модулей РЭА в космосе зависит от качественной организации теплового режима, радиационной стойкости и способов интеграции в космические системы (группировки КА), особенностей энергосбережения, коммуникационных

систем, ПО, использования новейших технологий и даже эргономики и удобства использования КА. На рис. 1 представлена Международная космическая станция (МКС) с раскрытыми отражателями и солнечными панелями.

Спутниковые группировки. У кого преимущество?

Согласно анализу ситуации с 2017 по 2019 год, рынок спутников для околоземной орбиты увеличился на 1% [6]. А к 2019 году количество спутников и зондов разного назначения – от раз-

ных стран и производителей – достигло 2500 КА. Назначение большинства спутников заявлено как коммерческое, при этом максимальное количество (830) было у США. Россия на третьем месте. Если говорить о действующих навигационных группировках, то в разных сегментах первенство держат Россия (GLONASS), США (GPS), совместная европейская группировка Galileo и китайская BeiDou BD5. По системам связи лидирует Iridium, в обеспечении мониторинга (разведки) Nora и Planet – все принадлежат США. По телетрансляции первые роли у Intelsat GSO (Люксембург) и Globalstar LEO (США) и др. Россия представлена спутниковой системой «Гонец» (орбита LEO). Кроме того, существуют сверхбольшие группировки спутников, такие как SpaceX Starlink (775/1600 КА, вес КА – 250 кг, орбита 300–1300 LEO, США), OneWeb (74/650 КА, вес КА – 250 кг, орбита 1200 LEO, UK) и др. Только в России, согласно программе развития космической отрасли «Сфера», чуть менее 600 КА, каждый из которых имеет вес от 100 до 2000 кг, на орбитах 300–1300 LEO [5]. На рис. 2 представлены сферы развития спутниковой группировки России.

В декабре 2023 года правительство России одобрило ратификацию заключённого ранее соглашения с КНР о сотрудничестве в области создания Международной научной лунной станции. Ключевые участники проекта – Роскосмос и Китайское национальное космическое управление. Планируется отправить на китайскую лунную станцию в 2033–2035 годах ядерную энергетическую установку российского производства и провести её монтаж. Разработка установки уже в процессе, и технологические решения готовы [4].

Все действующие КА (и спутники) можно разделить по функциональным задачам на виды: экспериментальные, образовательные, обеспечения связи, трансляционные, научные, военного назначения. Среди классических КА отметим крупногабаритные, по весу более 1000 кг (к примеру,



Рис. 1. Современный вид МКС



Рис. 2. Сферы развития спутниковой группировки России

КА WorldView-1 Ball Aerospace 2500 кг 2007 года), средние 500–1000 кг, малые (по весу 10–100 кг), микро- и миниспутники, к примеру, ТаблетСат-Аврора (2014 года) весом 26 кг, наноспутники весом 1–10 кг, к примеру SiriusSat-1 (2018 года) весом 1,5 кг, регистрирующий разные виды излучения космоса, и даже пикоспутники – до 1 кг. Стандартный срок службы современных геостационарных КА – 15 лет.

Из классификации околоземных орбит известны низкоорбитальные (НОО, LEO) – до 2000 км, среднеорбитальные (СОС, МЕО) – 2–35 тыс. км, геостационарные и геосинхронные – 35 786 км, высокоорбитальные. В составе КА обязательно задействованы система электроснабжения, система обеспечения температурного режима, система связи, система ориентации, а также двигательная установка и полезная нагрузка.

Системы управления КА

Задача системы электропитания (СЭП) – обеспечить для потребителей электрической энергии необходимое напряжение и ток. На больших КА типично бортовая сеть сделана с напряжением 100 В DC. Чем меньше аппарат и его мощность, тем меньше и напряжение питания. В систему входят солнечные панели и батареи (СБ) – источник энергии, несущие конструкции и система развёртывания. Солнечная батарея на испытаниях большого КА представлена на рис. 3.

Электронные датчики ориентации солнечных батарей и привода ориентации выполняют соответствующие задачи. Привод (электродвигатель)

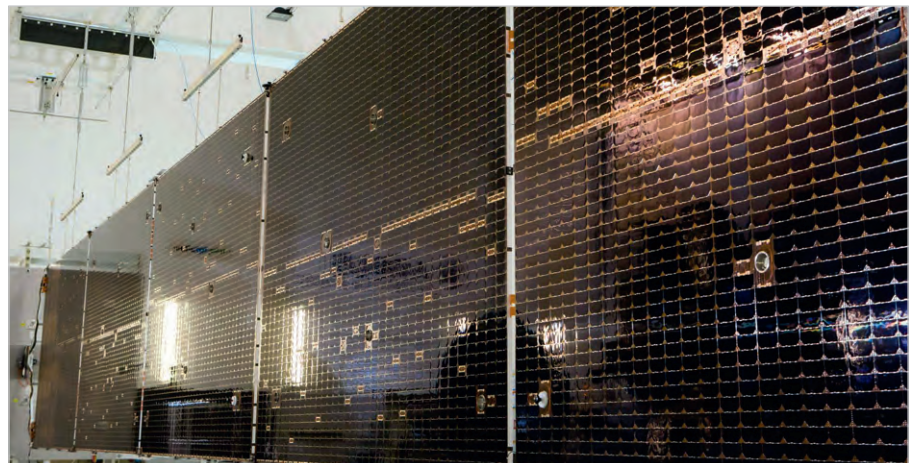


Рис. 3. Солнечная батарея в развёрнутом виде на испытаниях

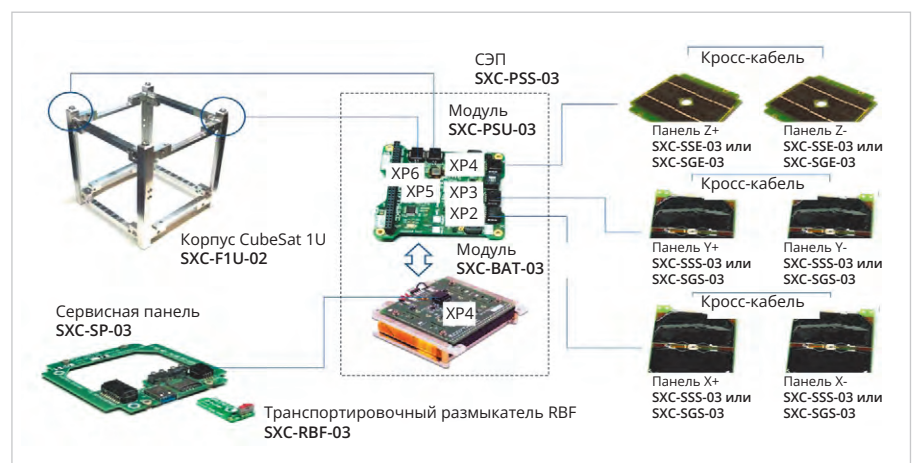


Рис. 4. Блок-схема системы электропитания космического аппарата (спутника)

необходим, чтобы СБ ориентировать по солнцу при движении КА по орбите. Аккумуляторный блок и электронный контроллер условно называют модулем питания (МП). Основные функции МП: стабилизация напряжения солнечных батарей, контроль заряда-

разряда АКБ, управление приводами, обеспечение электроэнергией других модулей. На рис. 4 представлена блок-схема системы электропитания космического аппарата (спутника).

Без системы ориентации и стабилизации (СОС) КА случайным образом



Рис. 5. Принцип работы и основные элементы системы ориентации и стабилизации (СОС) в развёрнутом виде на испытаниях

вращается при движении по орбите. Для контроля и управления вращением необходимы электронные датчики, определяющие угловое положение относительно системы отсчёта (к примеру, по месту и времени, связанному с Землей) и исполнительные устройства – коррективщики углового положения. Принцип работы и основные элементы СОС представлены на рис. 5.

В КА применяют несколько типов электронных датчиков разной степени точности. Магнитометры – датчики ориентации на Землю – относятся к грубым. «Датчик Солнца», измеряющий угол между направлением на солнце и плоскостью панели, на которой установлен, используется для точной настройки. Он же используется для ориентации СБ по солнцу. Но самый точный и сложный датчик ориентируется «по звёздам». Он «фотографирует» видимое положение звёзд и сравнивает с цифровой картой, заложенной в электронной памяти. Очень точно вычисляет угловое положение КА. Для телекоммуникационного спутника целевым критерием работы СОС является точность нацеливания антенн КА в нужную область на поверхности Земли. Расхождение реальной оси нацеливания антенны с теоретической

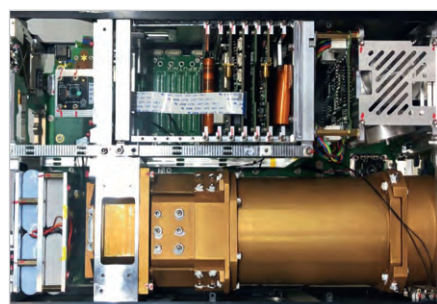


Рис. 7. Вид на реальный спутник SES-9 с отсеками для расположения модулей

должно составлять порядка 0,1...0,2° по азимуту и углу места. Соответственно, угловое положение КА должно быть ещё точнее ввиду естественной погрешности установки антенн на корпусе КА. Исполнительными устройствами для СОС являются маховики (для корректировки углового положения задействованы минимум три) или гиродины. Первые нужны для поворота КА в противоположное основному вращению направление за счёт реакций в опорах маховика. Поскольку системы спутника обычно резервируются, для надёжности в реалии маховиков не три, а намного больше. Силовой гироскоп – гиродин – определяет текущий момент (положение спутника) по нескольким осям и заменяет несколько маховиков, но является более сложным и дорогим устройством. На рис. 6 представлены внешний вид и схема расположения отсеков малого спутника.

На рис. 7 представлен вид спутника SES-9 с отсеками для расположения модулей.

Несколько двигательных установок, включая маршевую, необходимы для смены/удержания заданной орбиты и выведения на неё, а есть ещё несколько коррекционных – для стабилизации. В 60-х годах XX века эту роль выполняли реактивные двигатели, работавшие на токсичном гидразине и окислителе. В современных реалиях работают электрореактивные двигатели с меньшей тягой, но с большим удельным импульсом (более экономичны), используют инертный газ ксенон [2].

Система траекторных измерений необходима, чтобы определять координаты спутника. КА получает сигналы управления с Земли, а на Землю передаёт телеметрическую информа-



Рис. 6. Внешний вид и схема расположения отсеков малого спутника

цию (служебную информацию о параметрах работы). Каналы и антенны системы отделены, поскольку полёт до околоземной орбиты занимает примерно 108 секунд, а полезная нагрузка после отделения от РН включается не сразу. Это вкратце принцип работы командно-телеметрической системы (КТС). Большой электронный блок, который управляет работой аппарата, иначе называют «бортовой компьютер управления (БКУ)». Для силовых элементов КА применяются интегральные многослойные композиционные конструкции.

Система обеспечения температурного режима

Корректный температурный режим работы РЭА в космосе зависит от орбиты КА, его ориентации, конструкции и совокупности совместно используемых электронных устройств, их конструктивных элементов (СОТР). Системы СОТР, применяемые в радиоэлектронных средствах, классифицируют по допустимому диапазону температур элементов и узлов на системы охлаждения и системы термостабилизации: наземные, корабельные, самолётные, ракетные, космические – по месту установки. В этой проблематике опасны отклонения рабочего температурного диапазона микросхем, приводящие к «усталостному» разрушению кристаллов, эффектам резонанса, отрыву компонентов, нарушению пайки и вторичным разрушениям даже в «залитых» конструкциях, что приводит к неработоспособности РЭА. В условиях невесомости опасны для РЭА такие факторы, как пыль, проводящая ток, и электростатика от жгутов и шлейфов. Кроме того, скорость и величина накопления электроста-

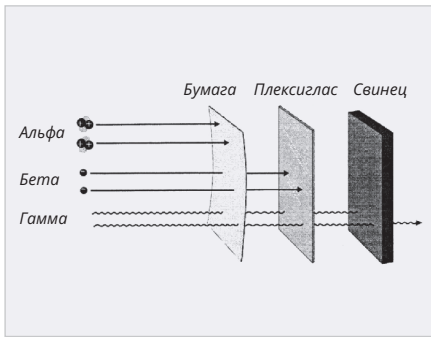


Рис. 8. Условная проникающая способность радиации разного излучения через разные материалы

тического заряда (ЭСЗ) неравномерны на разных орбитах.

Опасность электростатического заряда

Опасность ЭСЗ реальна, и вот почему. Заряд накапливается как на поверхности КА, так и внутри, в зависимости от энергетики заряженных частиц. Разделяют внутреннее накопление (IESD) и внешнее накопление заряда (ESD). Причём имеет значение глубина проникновения заряженных частиц в РЭА. Причины появления электростатики повышенного уровня в КА связаны с неравномерностью накопления зарядов, с окружающей корпус КА плазмой, облучением, собственной ионизацией, когда основная опасность – электростатические пробои (разряды), а объект накопления заряда – поверхность и внутренности КА. Эту проблематику можно смягчить оптимальным дизайном КА и размещением РЭА в модулях.

Электростатические разряды могут проявляться на платах РЭА, между корпусом и платой, корпусом и кабелем, между корпусом КА и космическим пространством. От электростатических разрядов предусмотрено несколько вариантов защиты, причём лучший – комплексный. Прежде всего, это обоснованный расчёт орбиты, экранирование КА, «заземление» на одну шину элементов, экранирование и заземление кабельной сети, отказ от типовых диэлектриков в конструкции, защита разъёмов и элементов РЭА – микросхем. На больших КА с телекоммуникационными функциями появлению ЭСЗ вблизи от источника излучения способствуют все-направленные УКВ-передатчики (мощностью более 10 Вт) и в целом всенаправленные передатчики ВЧ, СВЧ-передатчики и генераторы мощ-

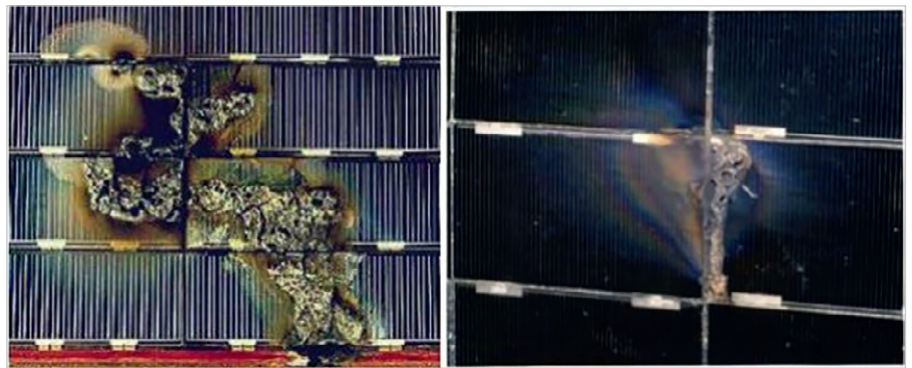


Рис. 9. Примеры поражения солнечных модулей разрядом статического электричества в космосе

ностью свыше 10 кВт. При этом УКВ-передатчик и СВЧ-генератор с сопоставимой мощностью 2 Вт (к примеру) неодинаково влияют на бортовую РЭА: приёмники ГНСС и MEMS-датчики. Кроме того, для предупреждения и локализации проблемы для РЭА в космосе необходим постоянный контроль перепада температур, надёжная фиксация радиоэлементов и микросхем. Для повышения отказоустойчивости РЭА применяют корпусирование, закрепление (улучшенную фиксацию), лакирование плат. Также применяют стандартную схему защиты от импульсных помех, развязку по ВЧ.

Необходимо отталкиваться от условий эксплуатации и назначения КА, иначе называемых внешними воздействующими факторами (ВВФ). При создании РЭА для КА стойкость к ВВФ подтверждается анализом и испытаниями. Среди ВВФ: радиационные и тепловые воздействия, вакуум или «отсутствие среды», электростатические разряды (ЭСР) или факторы электризации, а также электромагнитная совместимость (ЭМС). На рис. 8 представлена иллюстрация проникающей способности радиации относительно разных материалов.

Для внешних поверхностей КА в качестве факторов риска добавляются микрометеоритные воздействия (особенно актуально для оптики) и прочие факторы. На рис. 9 представлены иллюстрации поражения статическим электричеством солнечных модулей для КА.

Особенности конструкций РЭА для космоса

Система радиосвязи КА предполагает управляющий и дистанционный каналы. К первому относится диапазон УКВ, S, L в формате двусторонней связи, всенаправленная антенна и

условно невысокая скорость передачи данных. Информационный канал организуется в диапазонах X, S в формате односторонней связи с направленными антеннами и обеспечением высокой скорости передачи данных. На рис. 10 представлен КА SES-10 в сборочном цехе.

На рис. 11 представлен вид на модуль электронного контроллера КА SES-10.

Несущие конструкции (корпус КА) и каркасы солнечных батарей

Разработка и изготовление неподвижных несущих конструкций и трансформируемых каркасов солнечных батарей с удельной массой до 0,5 кг/м², включая узлы раскры-

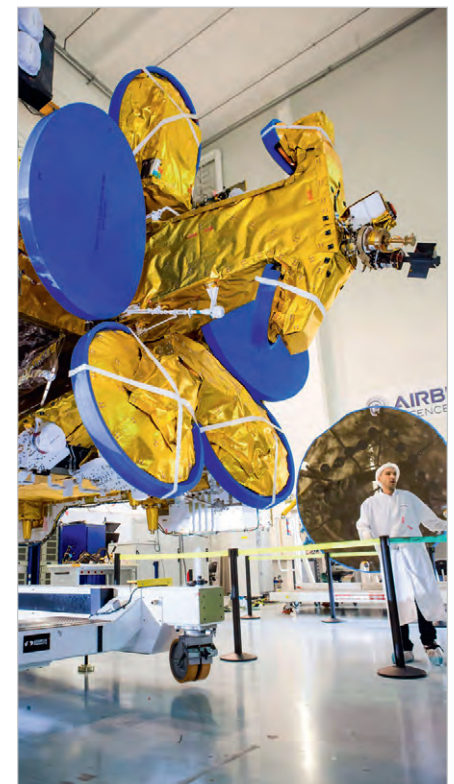


Рис. 10. Спутник SES-10 в сборочном цехе



Рис. 11. Модуль контроллера КА SES-10

тия, фиксации и надёжной связи, объединённые в телеметрическую сеть, предполагают создание специальных транспортных пылевлагозащищаемых контейнеров и корпусов для электронных модулей. Заслуживают внимания многослойные композиционные конструкции, к примеру, силовые и тепловые сотовые панели с алюминиевыми и углепластиковыми обшивками от ООО НПП «Тепловые агрегаты и системы» [8]. Тепловые сотовые панели содержат встроенные и коллекторные патрубки, жидкостные контуры, термооптическое покрытие различного типа, нагреватели, термодатчики, ЭВТИ. Теплопроводы и радиаторы на базе тепловых труб позиционируются как теплопередающие устройства с двухфазным теплоносителем для космической техники в диапазоне рабочих температур от 80К до 240° С, в том числе тепловые патрубки разных типов:

- с гомогенной капиллярной структурой из различных сплавов;
- с аксиальными канавками из алюминиевых сплавов;
- артериальные из нержавеющей стали;
- контурные тепловые трубы и двухфазные контуры с капиллярным и механическим насосом.

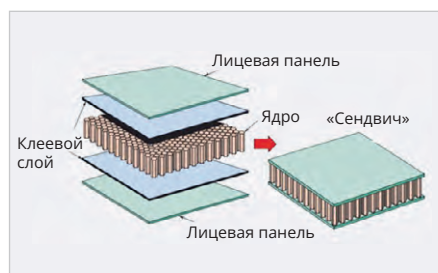


Рис. 13. «Сотовая» текстура плоского углепластика

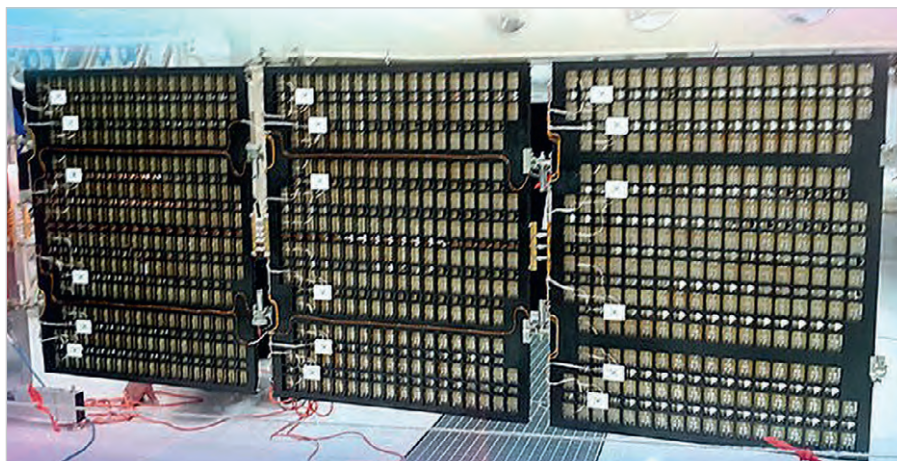


Рис. 12. Модуль жидкостного контура охлаждения среднего КА SES-6

На рис. 12 представлен вид на систему жидкостного контура охлаждения среднего КА SES-6.

Отражательные характеристики материалов

СБ, развёрнутые в космосе, ориентированы на Солнце, поэтому конструктивно выполнены так, чтобы с обратной (относительно солнца) стороны отводить избыток нагрева (тепла). Это одна из проблем в разработках (усовершенствовании) СБ, которую с разной степенью эффективности решают разработчики уже много лет. Защитные «целлофановые» плёнки на антеннах связи (в форме «тарелок») перед стартом КА не снимают. Эти элементы конструкции радиопрозрачны, то есть выполнены из диэлектрических материалов, а чёрный (матовый тёмный) цвет напыления применяют для сброса избыточного тепла на элементах КА, предупреждая тепловую деформацию металла и рассеивая его за счёт неправильной формы (иначе мог бы нагреваться излучатель в фокусе). Рефлектор (тарелку) космических антенн изготавливают из углепластика, примерно по тому же принципу, что и сотовые панели (два слоя плоского углепластика, между ними углепла-

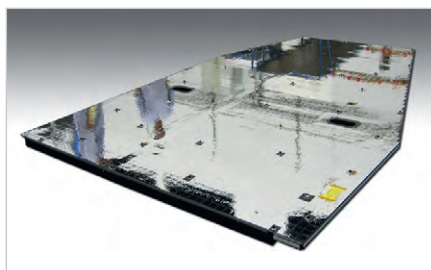


Рис. 14. Углепластик с отражающим покрытием

стиковые соты), только с более сложной текстурой и формой (рис. 13). На рис. 14 представлен участок углепластика с отражающим покрытием.

По своей структуре сотовая панель напоминает картон, только из алюминия или других материалов (антенные панели обычно делают из углепластика). Два тонких алюминиевых листа, как правило, толщиной 0,3–0,5 мм, между ними шестиугольные «соты» из алюминиевой фольги высотой 20–50 мм. Технологии изготовления подробно описаны в [7]. Похожие технологии применяются не только в авиации и космосе. Сотовая панель для КА имеет ряд дополнительных элементов. К примеру, резьбовые отверстия внутри панелей они между собой монтируются с помощью уголков и винтов/болтов. Панель со всеми закладными элементами склеивается в единой технологической операции: на листы с внутренней стороны наносят плёночный клей (эпоксидный). Сверлятся листы обшивки, делаются выборки в сотовом наполнителе, устанавливаются втулки и фланцы, а затем всё вместе подвергается мощному нагреву.

В данном случае тепловые деформации не критичны для функционирования, потому что углепластик без механического воздействия, только от солнечной активности, не повреждается, но диаграмма направленности претерпевает изменения. Дополнительно с рабочей стороны рефлектор защищён солнечным экраном, подобие радиопрозрачной ЭВТИ (рис. 15), при этом солнечный экран для эффективного отражения делают зеркальным, блестящим.

Несколько слоёв чёрного матового или «чёрного» покрытия экрана, разумеется, защитят от избыточ-

ной солнечной световой энергии, но не очень хорошо. Применяют также технологию нагрева излучателя отражённым излучением Солнца в фокусе антенны. Элементы СБ (в форме пластинок) сделаны из арсенид-галлия с дополнительными теплоотводящими покрытиями. Материал отражающего диэлектрика имеет германиевое покрытие на полиамидной плёнке. Коэффициент излучения (ϵ) с обратной относительно солнечной стороны близок к «1». Чтобы вникнуть в проблематику и особенности экранов СБ иностранного производства, можно изучить материалы в [11].

На рис. 16 показан адаптер – алюминиевый или углепластиковый конус с механизмами разделения.

Узкой частью адаптер стыкуется к нижней панели КА, а широкой – к разгонному блоку или ракете-носителю (РН). При срабатывании системы разделения адаптер отделяется от нижней поверхности и остаётся на РН, а спутник «летит» дальше. Срабатывание систем разделения является причиной ударных воздействий на оборудование КА, одного из типов критических механических воздействий.

Автономность РЭА и критические условия эксплуатации

Она обеспечена в многофакторном понимании. Каждый электронный датчик состояния имеет серийный номер и отслеживается компьютерной системой по таким параметрам, как ток, напряжение, температура и др. Защита электронных модулей и плат обеспечивается по двум направлениям: аварийное отключение доменов питания и отключение периферийных устройств. Причём любой случай отказа РЭА на борту (при восстановлении параметров) хоть и фиксируется, но не приводит к остановке эксплуатации устройства, а каждый «двойной отказ» (повторный) ведёт к запуску системы дублирования и сокращению функционала повреждённого устройства. Как в области функционала РЭА, так и софта в аварийной ситуации обеспечивается автоматическое переключение режимов (активация безопасного режима) с предотвращением неконтролируемых действий. Самовосстановление и дублирование повреждённой РЭА связано с активацией области памяти «с образами» и той же конфигурацией. Первое предполагает

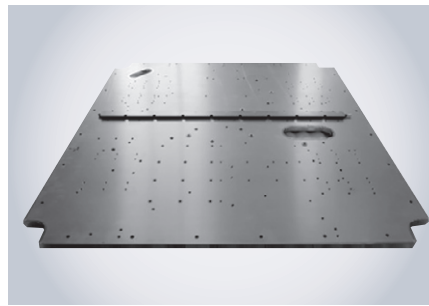


Рис. 15. Структура ЭВТИ

использование разных (резервных) модулей памяти. При этом модульная система постоянно контролирует и тестирует электронную память на износ, а наличие резервного загрузчика обеспечивает обновление ПО – в случае надобности.

В РЭА космического назначения наиболее критичными и быстро деградирующими компонентами считают аккумуляторы, пластиковые разъёмы (ПВХ), реле и переключатели, кабели и шлейфы с пластиковой изоляцией, кремниевые солнечные панели – батареи (СБ) и оборудование, связанное с пневмо- и механической составляющей.

Из рискованных опасностей можно отметить наиболее существенные: возможные механические повреждения критичной инфраструктуры КА мощным потоком космического мусора, частиц и тяжёлых фрагментов (ядер), и второе – радиационная активность звезды по имени Солнце. Особенно опасна для людей (в космосе) и РЭА накопленная (аккумулируемая) радиация. Это один из главных рискованных факторов для современной электроники в космосе. Поэтому используется радиационностойкое оборудование или средства РЭА в специально защищённых корпусах.

В части дискретных элементов и микросборок опасно попадание «тяжёлой» заряженной частицы, что приводит к пробое элемента.

Сборки солнечных батарей для КА

Источник всей внешней энергии – это Солнце. Прямой поток солнечного излучения примерно равен 1400 Вт/м^2 . Он колеблется в зависимости от расстояния от Земли до Солнца в течение года: по известным значениям, 1322 Вт/м^2 минимум и 1414 Вт/м^2 максимум. Конвекция, как вид теплопередачи в условиях космоса, исключается: современные спутники делаются



Рис. 16. Типичный адаптер космического аппарата

негерметичными, как и большинство приборов внутри. Так и легче, и надёжнее. При этом кондуктивный теплообмен возможен только внутри спутника, сбросить тепловую мощность в окружающее пространство можно только излучением. По этой причине уместно задействовать рефлекторы. Солнечные элементы для КА предполагают высокую эффективность, поэтому в современных солнечных элементах используется технология тройного и четверного перехода, при которой слои буквально «выращиваются» на германиевой подложке. Как пример инженерных решений для РЭА космического назначения с высоким уровнем интеграции уместно рассматривать продукцию Space Assemblies. Сборки на основе высокоэффективных солнечных элементов дополнительно оснащены защитными стёклами и межблочными разъёмами. Солнечный элемент с тройным переходом и площадкой $8 \times 8 \text{ см}^2$ представлен на рис. 17.

Согласно техническому паспорту изделия HNR 0005906-01-00 сборка солнечных элементов с тройным переходом типа 3G30A 8×8 реализована на подложке InGaP/GaAs/Ge, что обеспе-

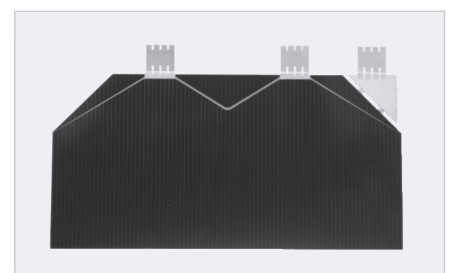


Рис. 17. Солнечная батарея с тройным переходом и площадкой $8 \times 8 \text{ см}$

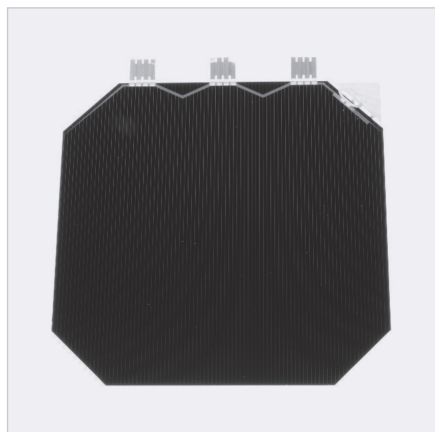


Рис. 18. Солнечная ячейка 3G30A с площадкой SCA 40×80 мм и площадью ячейки 30,18 см²

чивает повышенный класс эффективности (более 30% относительно аналогичных по мощности модулей). Модель имеет улучшенную сетчатую конструкцию. С подробностями можно ознакомиться в [10].

Размеры элементов, а также встроенный байпасный диод такие же, как и в типичных солнечных элементах. Защитное стекло покрывает площадь солнечного элемента (СЭ) полностью и фиксируется прозрачным клеем на передней стороне СЭ. Контакты-соединители покрыты серебром, зафиксированы с помощью сложной сварки и предназначены для спутников и КА, действующих в группировках LEO, MEO и GEO. Поэтому используемые материалы и компоненты соответствуют космическим требованиям, предъявляемым к РЭА для использования на околоземной орбите. В дополнение к стандартным SCA (сборкам солнечных батарей) имеет значение то, что сборка солнечных элементов с тройным соединением типа 3G30A 8×8 представляет собой трёхпереходную солнечную батарею InGaP/GaAs/Ge

Таблица 1. Технические свойства солнечной батареи InGaP/GaAs/Ge типа 3G30A 8×8

Базовый материал	GaInP/GaAs/Ge на Ge-подложке
AR-покрытие	TiOx/Al ₂ O ₃
Размеры	80,15 мм × 80,15 мм ±0,1 мм
Площадь ячейки	60,36 см ²
Толщина ячейки	150 мкм
Средний вес	≤ 7,2 г
Общая толщина сборки	280 ±50 мкм
Защитное стекло	CMX 100 толщина 100 мкм
Толщина контактной металлизации (Ag/Au)	4–10 мкм
Лицевая сторона интерфейса (катод)	Kovar
Задняя сторона интерфейса (анод)	Ge-подложка с контактной металлизацией Ag/Au
Толщина межблочного соединения	25 мкм (15 мкм Kovar + 2 × 5 мкм Ag-Flash)

на подложке Ge (повышенный класс эффективности), обладает улучшенной конструкцией решетки и оснащена внешним диодом. После ввода в эксплуатацию стандартные солнечные элементы не должны испытывать воздействие температуры свыше +150°C. Каждый солнечный элемент защищён байпасным диодом. В табл. 1 представлены технические свойства солнечной батареи InGaP/GaAs/Ge типа 3G30A 8×8.

В модуле предусмотрена защита от перегрева и реализована внешняя электрическая защита на полупроводниковом диоде. В табл. 2 представлены сведения об электрических характеристиках модуля.

Есть другие, отличающиеся по фактору и электрическим характеристикам изделия. К примеру, представленный на рис. 18 солнечный элемент 3G30A с площадкой SCA 40×80 мм имеет электрические характеристики, представленные в табл. 3, согласно

Таблица 3. Электрические характеристики (SCA)

Параметр	BOL	2.5E14	5E14	1E15
Среднее значение Voc при разомкнутой цепи, мВ	2690	2606	2554	2512
Среднее значение Isc при коротком замыкании, мА	519,6	517,9	513,4	501,3
Напряжение при макс. мощности Vmp, мВ	2409	2343	2288	2244
Ток при макс. потребляемой мощности, мА	502,9	501,7	499,1	485,1
Средний КПД ηbare (1367 Вт/м ²), %	29,3	28,4	27,6	26,3
Средний КПД Δ bare (1353 Вт/м ²), %	29,6	28,7	27,9	26,6
Допустимое напряжение Vor, мВ	2350			
Минимальный средний ток Iop при Vor, мА	500			
Минимальный ток Iop в среднем при Vor, мА	470			
Рабочая температура, °C	25 ±3			
Прямое напряжение при токе 620 мА, В	≤ 0,8			

Таблица 2. Электрические характеристики модуля

Среднее значение Voc в разомкнутой цепи Средний КПД ηbare (1367 Вт/м ²)	2698 мВ 28,8%
Среднее значение Isc при коротком замыкании. Средний КПД ηbare (1353 Вт/м ²)	1018 мА 29,1%
Напряжение при макс. мощности Vmp	2402 мВ
Ток при макс. потребляемой мощности	989 мА
Напряжение Vor	2350 мВ
Минимальный средний ток Iop при Vor	1000 мА
Минимальный индивидуальный ток Iop при Vor	940 мА
Рабочая температура	25°C ±3°C
Прямое напряжение при токе 620 мА	≤ 0,8 В
Обратное напряжение при токе ≤ 1 мкА	4 В

техническому паспорту HNR 0003805-01-01.

Модуль имеет защиту от затенения и внешний Si-диод с защитной функцией по питанию.

Полезные данные и технические характеристики для солнечной батареи TJ 3G30C с площадкой 8×8 см с тройным переходом 3G30C-Advanced рассмотрены в техническом паспорте изделия HNR 0003421-01-02 и HNR 0003422-02-02 для площадки размерами 12×6 см. СБ малых или, как их называют, GBK с тройным переходом и площадкой 8×4 см и 4×7 см имеют толщину рабочей поверхности 80 мкм. Характеристики солнечной батареи с четырьмя переходами 4G32C-Advanced с размерами площадки 8×4 см приведены в техническом паспорте HNR 0005979-01-01 [11].

Защитные диоды для РЭА космического назначения

Диоды для РЭА космического назначения обеспечивают надёжную защиту отдельных ячеек от отрицательного смещения в случае возможного неоднородного воздействия энергии солнца или механических повреждений. Доступны два типа байпасных диодов: внешний Si-диод и диод GaAs, монолитно интегрированные в структуру солнечного элемента. Оба типа диодов пригодны для использования в космосе и применимы для космических аппаратов и СБ в группировках НОО, МЕО и GEO. Дискретный кремниевый диод Si By-Pass Diode (рис. 19) предназначен для надёжной защиты от повреждения электронного модуля

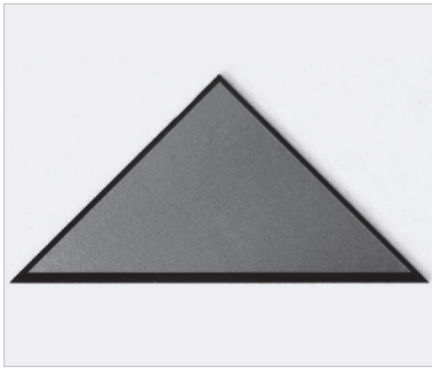


Рис. 19. Форма Si By-Pass Diode

СБ и отдельных многопереходных солнечных элементов класса РЭА для космоса обратным током. Предназначены они для установки в скошенных углах солнечного элемента, но, в принципе, могут иметь и другую форму, адаптированную к конкретным условиям применения.

Согласно техническому паспорту изделия, n-образная сторона контакта покрыта термоксидом по краям, p-образная сторона полностью закрыта. В табл. 4 представлены некоторые технические и электрические характеристики диодов для СБ космического назначения.

Испытание на растяжение > 5 Н проводилось при сварке под углом 45° (с полосами Ag толщиной 35 мкм). Статус разработки соответствует требованиям ECSS [11].

Защита РЭА КА от солнца

Если говорить о действующей сегодня международной космической станции (МКС) и в целом о пилотируемых КА, их внешняя оболочка выдерживает быстрые температурные перепады, пока КА вращается вокруг Земли, переходя от солнечного света к темноте каждые 45 минут. В жилых и рабочих отсеках тепло не поднимается и не циркулирует, как обычно происходит на Земле под действием силы тяжести. Международная лаборатория оснащена сложной системой терморегулирования, позволяющей управлять температурными изменениями за бортом, обеспечивая внутри комфортный климат. А традиционные многослойные изоляционные покрытия (MLI) для использования на спутниках, зондах и КА состоят из слоя металлического покрытия на пластиковой плёнке. Листы-площадки объединяются с изолирующими промежуточными слоями. Такая конфигурация обеспечивает высокоэффективную блоки-



Рис. 20. Защитная плёнка для РЭА космических аппаратов и их внешних антенн

ровку солнечного теплового излучения, но металлическое покрытие также поглощает и отражает радиочастоты, ослабляя сигнал и снижая скорость передачи данных. Чтобы решить эту дилемму, конструктивная конфигурация в виде сетки подвергается лазерной абляции на металлической плёнке, чтобы обеспечить улучшенную радиочастотную передачу. Однако сохраняется прямая связь между блокировкой (отводом) солнечного тепла и снижением передачи данных в покрытиях MLI. С другой стороны, защитные покрытия DSI представляют уникальную, полностью диэлектрическую тонкую плёнку, нанесённую на полиамидные листы в один слой. Полностью диэлектрическая конструкция эффективно отражает солнечное тепловое излучение, а также «прозрачна» на радиочастотах ниже 18 ГГц.

Спутниковые обтекатели для КА применяют на поверхности антенн и апертуры для термоконтроля и контроля ЭСЗ. В современных КА применяют технологию DSI, обеспечивающую высокий уровень подавления падающей солнечной тепловой энергии. Одним из важных факторов для надёжной работы РЭА в космосе является радиочастотная прозрачность защитных материалов на частотах в диапазонах L, S, C, X, Ku, K, Ka и V.

Гибкая, чрезвычайно лёгкая и удобная плёнка даже на относительно большой площади покрытия (защиты) до 2,5×10 футов позволяет нейтрализовать электростатический заряд (ESD), возникающий от постоянного воздействия солнечной энергии и движения КА. Солнечное отражение обеспечивается на уровне ≥ 86%, солнечное пропускание ≤ 2%. На рис. 20 представлена защитная плёнка с сетчатой структу-

Таблица 4. Некоторые технические и электрические характеристики диодов для СБ космического назначения

Базовый материал	CZ, < 100%, структура n+ p+
Размеры	10,9×10,9 мм
Площадь	0,59 см ²
Средний вес	≤ 30 мг
Толщина общая	130 ±30 мкм
Толщина поверхности Ag	3–11 мкм (все контакты)
Удельное сопротивление, легированное p (бор)	2 ±1 Ом/см
Прямое напряжение при IFV = 620 мА	≤ 0,8 В
Обратный ток при VREV = 4 В	≤ 1 мкА

рой для РЭА космических аппаратов и их внешних антенн.

Внешняя поверхность обеспечивает ESD с сопротивлением листа в диапазоне 2,5E5–1,0E9 Ом/кВ. Полусферическая излучающая способность плёнки заявлена разработчиками на уровне ≥ 0,72 при температуре 300 К. Вносимые радиочастотные потери ≤ 0,8 дБ в диапазоне от 1 до 69 ГГц [11].

Капельный радиатор

Типичный рефлектор имеет КПД примерно 0,5. Рефлектор поглощает световую энергию от Солнца, а излучает её в обе стороны (наружную и внутреннюю). С учётом кондуктивного теплового сопротивления экрана (по его толщине) рефлектор выполняет важную роль. Снаружи его укрывают экранно-вакуумная теплоизоляция (ЭВТИ) (англ. Multi-Layer Insulation), а внутри наносят отражающее радиоволны покрытие.

Этот тип теплоизоляции, предназначенной для ограничения притоков тепла от излучения, состоит из множества параллельных отражающих экранов с низкой излучающей способностью и отделяющих их прокладок. ЭВТИ является наиболее эффективным типом изоляции, применяемым в резервуарах для сжиженных газов, криогенных трубопроводах, криостатах и других установках, использующих очень низкие температуры.

Облучатели не перегреваются, так как в конструкции рефлектора применяется углепластик с электро- и теплопроводными свойствами. На внутреннюю поверхность не надо наносить отражающее покрытие. Но если говорить о других конструкциях для космоса, к примеру, надувных антеннах, то отражающее покрытие необходимо.

В данном случае сброс излишка тепла идёт через подложку элемента СБ.

В области астронавтики и ракетной динамики капельное охлаждение изобретено очень давно. Ещё в 1982 году состоялась публикация о жидкостно-капельном холодильнике-излучателе в системе теплового сброса для эффективного преобразования энергии в космосе [1]. В конструкции холодильника-излучателя вместо излучающих твёрдых поверхностей использовали струи, состоящие из капель жидкости. Основным преимуществом излучающей системы являлась малая масса: в несколько раз меньше массы самой лёгкой конструкции излучающего поля, состоящего из тепловых труб. Это связано как с отсутствием разграничивающих рабочее тело и окружающее пространство твёрдых стенок, так и со снятием проблемы метеоритной опасности. Генератор капель в данной конструкции – полая ёмкость, одна из стенок оснащена отверстиями с соплами, а противоположная является вибратором. Генератор при частоте вибраций 105 Гц обеспечивал равномерный поток мелких капель размером менее 50 мкм; примерно тот же принцип используется в технике струйной печати.

Возможность распыления таким же образом жидких металлов ранее была ограничена проблемами, связанными с подбором конструкционных материалов для генератора капель жидких металлов, работающего при высоких температурах. Проблема компенсации электрического заряда капель решалась на этапе образования капель, что позволило использовать стандартные методы нейтрализации, разработанные для электронной части ракетных двигателей. Пример такого радиатора охлаждения представлен выше на рис. 12.

Отражают тепло (как и звук) любые формы выступов, ребристых поверхностей. Использование капельно-жидкостного холодильника-излучателя на КА требует решения ряда побочных технических проблем. К ним относятся: проблема загрязнения поверхности летательного аппарата парами теплоносителя и самого теплоносителя газовыми компонентами от струй реактивных двигателей; проблема снятия электростатического заряда капель; необходимость ориентации излучателя; производственные проблемы при изготовлении элементов излучателя и другие. Проблема

устранения загрязнений поверхностей аппаратов является весьма важной для качественной работы оптических систем, в частности, объективов высокой разрешающей способности и плёночных просветляющих покрытий. Загрязнение газовыми включениями теплоносителя излучающей струи нежелательно из-за ухудшения эффективности сборника капель. Решение упростилось вследствие низкого давления внешней среды ($1,3 \times 10^{-5}$ Па), когда путь движения молекул составляет порядка нескольких километров. Тогда для предотвращения загрязнений эффективно использование экранирующих рёбер и перегородок [1].

Систематические ошибки и контроль качества

В производстве РЭА даже гражданского (широкого) назначения уже несколько лет внедряют методы тотального контроля с элементами военной приёмки. Причём данные по электронным датчикам, модулям, деталям и заготовкам фигурируют в электронных журналах и доступны для контроля «пути» изделия на всём протяжении производственной цепочки. Для этого задействована система специальной маркировки, самый простой элемент в которой – штрихкод. Контроль качества механических изделий проверяется не только электронным штангенциркулем с отправкой данных на облачный сервер, но и электронным микрометром и весами – с тем же способом оперативной передачи цифровых данных. В такой производственной цепочке гораздо сложнее допустить брак, чем при «ручном» заполнении соответствующей документации. Это касается всех сложных, а потому дорогих в изготовлении модулей и нестандартных деталей; каждый производственный шаг на конвейере подконтролен с помощью цифровой электронной системы, считывающей штрихкод и параметры изделия. Много ранее собственный отдел технического контроля (ОТК) Роскосмоса был организован так, что «пятая» и «девятая» приёмки подчинялись заказчику, а не заводу-изготовителю. В начале «нулевых» годов XXI века военную приёмку ОТК (в области РЭА для космоса) разделили на сферы оборудования для гражданского (коммерческого) и военного назначения после многих лет монополии военного контроля, в том чис-

ле запусков КА исключительно военными расчётами (ВКС РФ).

Выводы

Что касается ошибок, они, как и прежде, связаны с человеческим фактором, который всё ещё допустим при отключении оборудования электронного контроля (по разным, в том числе надуманным основаниям), а также систематические ошибки происходят при неправильной настройке и диагностике оборудования. К примеру, все современные станки имеют электронный блок и несколько датчиков (прообраз станков с ЧПУ), однако качество закрепления заготовки в шпиндель реза всё ещё делается вручную. С РЭА и платами разной конфигурации принята апробированная и автоматизированная технология проверки качества: никто вручную и с лупой токопроводящие дорожки и отверстия между слоями печатной платы не проверяет. Автоматизирован контроль качества условно мелких дискретных радиокомпонентов: резисторов, диодов (и др.), и только затем в автоматизированном режиме на плату припаивают основные элементы, такие как центральный процессор (ЦП) и энергонезависимая память.

Есть проблема с импортозамещением: не всё возможно заместить. Коммерческую полезную нагрузку для телекоммуникационного спутника из отечественной компонентной базы пока не сделали. А сложность в том, что есть специальные радиационно-стойкие элементы, которые трудно, а главное, нерентабельно замещать.

Любопытные факты о жизни современных космонавтов

Особенностей функционирования современных КА (в том числе пилотируемых) очень много, и мы коснёмся только самых интересных.

Интернет и связь

Корпорация «Роскосмос», NASA и другие приняли меры обеспечения информационной безопасности: международная космическая станция, как и беспилотные КА, изолирована от общедоступных сетей Интернета. Влияние хакерских атак на РЭА в космосе минимизировано. Впрочем, Интернет доступен на относительно небольшой скорости, так как в целях безопасности трафик организован через несколько

защищённых каналов и серверов. Для стабильности и устойчивости работы РЭА с обновлением ПО внедрены межсетевые экраны и системы обнаружения вторжений. Принято резервирование данных: прямое (дублирование) и косвенное (смежные функции). Полнота телеметрии и команд обеспечивается ограниченным по скорости каналом данных, наличием сервисных и низкоуровневых команд и, конечно, контролем всех входных параметров.

Рециркуляция жидкости из всего

В пилотируемых КА система «сточные воды» собирает испарения и жидкие отходы в установке очистки воды и рециркуляции (WPA), производящей воду, пригодную для питья. В специализированном компоненте используют усовершенствованные осушители для улавливания влаги, попадающей в воздух кабины от дыхания и пота экипажа. Известно, что в ходе испытания системы жизнеобеспечения достигнута степень восстановления воды 98%. Электронные датчики проверяют чистоту воды и, в случае её непригодности по биохимическим параметрам, снова отправляют на цикл переработки. Дополнительно в уже очищенную воду для предотвращения роста микробов добавляется йод. Расход воды на одного члена экипажа рассчитан примерно в 4,5 литра воды в день для потребления, приготовления пищи и гигиены. Поскольку вода на вес золота, в международной космической станции (МКС) нет стиральной машины. Одежду обитатели станции не стирают; поскольку одежда позиционируется одноразовой, её сжигают, но без применения открытого огня. Как только беспилотные КА, регулярно запускаемые с Земли с грузами (в том числе одеждой) на МКС, пристыкуются к станции, экипаж разгружает доставленные припасы, а после заполняет пустой космический аппарат различным мусором, отходами и грязной одеждой. Затем аппарат отстыковывается и устремляется к Земле по рассчитанной и запрограммированной траектории. Приближаясь к Земле, корабль и всё, что находится на борту, сгорает в плотных слоях атмосферы над Тихим океаном. «Одноразовые» беспилотные космические аппараты для доставки новых припасов на МКС запускаются в том числе с космодромов на территории нашей страны. Они



Рис. 21. Космическое трёхствольное стрелковое оружие российского производства

могут совершать полёты только в одну сторону и не приземляются. МКС планируется вывести из эксплуатации к 2030 году, но нелёгкая утилизация в необитаемой толще Тихого океана орбитальной лаборатории – недешёвое мероприятие. Чтобы втянуть КА в атмосферу Земли, разрабатывают специальный космический буксир стоимостью 1 млрд долларов – пока самый дорогой мусоровоз в мире [9]. Общий вес МКС – 445 075 кг. Грузовые КА, такие как «Сигнус» компании Northrop Grumman и российская «Звезда», могут быть использованы для придания движения (или для торможения) лаборатории, но их применение для этой цели пока не санкционировано. К примеру, для работы двигателей КА «Звезда» требуется дополнительная подготовка: РН «Прогресс» должен заправить «Звезду» топливом для выполнения задачи.

Оружие

После того как в 1965 году командир КА «Восход-2» Павел Беляев и второй пилот Алексей Леонов (выходивший в открытый космос) при приземлении спускаемого аппарата столкнулись на Земле с агрессивными настроенными потревоженными дикими медведями, на МКС в специальном сейфе хранят два пистолета. Среди международного состава экипажей огнестрельное оружие принадлежит только российским космонавтам – больше его никто туда не привозит [9]. Пистолеты хранятся в «наборе выживания», но доступ имеется у всех космонавтов на станции. Каждый пистолет необычен: имеет три ствола и стреляет сигнальными ракетами, винтовочными патронами, а также патронами для дробовика. Пистолеты оснащены складными элементами, поэтому универсальную конструкцию можно использовать в качестве лопаты или ножа (рис. 21).



Рис. 22. Командир отряда космонавтов Роскосмоса, ветеран космоса Олег Кононенко

Космический ветеран

Российский космонавт Олег Кононенко, командир отряда космонавтов Роскосмоса, уже установил мировой рекорд по суммарному пребыванию в космосе (рис. 22). В пяти космических полётах он провёл более 900 суток. Очередная космическая экспедиция на МКС завершилась 23 сентября 2024 года. Таким образом, суммарно Кононенко провёл в космосе 1110 суток.

Литература

1. Жидкостно-капельный холодильник-излучатель в системе теплообмена для эффективного преобразования энергии в космосе. URL: <http://interstellar-flight.ru/03/kr1.pdf>.
2. Конструкции космической электроники. URL: <https://habr.com/ru/articles/545864/>.
3. Модуль SES-10 в сборочном цехе. URL: www.ses.com/media-gallery/satellite-manufacturing.
4. Началась разработка ядерной энергоустановки для лунной станции РФ и КНР. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/6689073>.
5. Программа «Сфера», доклад Роскосмоса. URL: <https://www.roscosmos.ru/21922/>.
6. Рынок космический спутников. URL: <https://sia.org/news-resources/state-of-the-satellite-industry-report/>.
7. Технология изготовления сотозаполнителя. URL: www.kuranty.pro/sotovyiy-zapolnitel/obzor1.
8. ТОО «Таис» Тепловые агрегаты и системы. URL: <http://npptais.ru/>.
9. 16 вещей, которые вы не знали о Международной космической станции. URL: <https://emosurff.com/post/9786>.
10. TJ Solar Cell Assembly 3G30A. URL: https://www.azurspace.com/images/0005906-01-00_DB_3G30A_8x8.pdf.
11. Sunshade Thermal Control Material. URL: <https://www.depsci.com/products-app/sunshade-thermal-control-material/>.



Квалификационные особенности проекта профессионального стандарта «Инженер-технолог в сфере производства элементов интегральной фотоники»

Татьяна Крупкина, Михаил Кульпинов, Владимир Лосев, Михаил Путря, Юрий Чаплыгин

В статье подтверждена актуальность проблемы обеспечения высококвалифицированными кадрами индустрии производства элементов нанофотоники. Показана важная роль профессионального стандарта в данном процессе. Приведено описание и обоснование квалификационного содержания проекта профессионального стандарта (ПС) «Инженер-технолог в сфере производства элементов интегральной фотоники». Приведено краткое описание содержания квалификаций и требований к ним.

О необходимости разработки ПС

С развитием технологий интегральной фотоники возрастает спрос на специалистов, обладающих глубокими знаниями и навыками в области проектирования, производства и тестирования фотонных устройств.

Сфера интегральной фотоники представляет собой одну из наиболее перспективных и быстроразвивающихся областей науки и техники. В условиях глобальной конкуренции и стремительного технологического прогресса разработка ПС для инженеров-технологов, работающих в этой области, является весьма актуальной [1].

Включение в ПС конкретных компетенций позволит чётко определить требования к образованию и подготовке таких специалистов, что будет способствовать удовлетворению потребностей рынка труда [2, 3].

Разработка ПС «Инженер-технолог в сфере производства элементов интегральной фотоники» создаёт основу для стандартизации образовательных программ в вузах и колледжах. Это обеспечит единообразие в подготовке специалистов, что, в свою очередь, повысит уровень их квалификации и упростит процесс трудоустройства. Образовательные учреждения смогут адаптировать свои курсы под актуальные требования, что сделает их выпускников более конкурентоспособными.

В содержание разрабатываемого ПС включены чёткие критерии оценки

знаний и умений. Это поможет минимизировать разрыв между теорией и практикой, который часто наблюдается в образовательном процессе. Разрабатываемый ПС будет служить ориентиром для оценки качества образовательных программ и повышения их эффективности.

Также ПС будет способствовать внедрению инновационных технологий и методов в производственный процесс. Специалисты, подготовленные в соответствии с новым стандартом, смогут быстрее осваивать и применять новшества, что повысит конкурентоспособность предприятий в сфере интегральной фотоники.

Также отметим, что ПС включает элементы этики и культуры труда, что поможет сформировать у специалистов ответственность за свою работу и понимание значимости своей роли в обществе. Это особенно важно в высокотехнологичных отраслях, где ошибки могут иметь серьёзные последствия. Разработка данного стандарта будет способствовать зарождению платформы для диалога между образовательными учреждениями и представителями промышленности в области производства элементов интегральной нанофотоники.

Включение и описание необходимых компетенций и требований в ПС инженера-технолога в сфере интегральной фотоники является важным шагом к обеспечению качественной подготовки специалистов, способных

эффективно работать в быстроразвивающейся области.

Включение в содержание данного ПС обобщённых трудовых функций (ОТФ), таких как моделирование и экспериментальная апробация технологических маршрутов, планирование, разработка и сопровождение технологических процессов, а также метрологическое обеспечение производства и организация проведения исследований в области проектирования и производства элементов интегральной фотоники и внедрения новых технологий производства в организациях является обоснованным шагом для обеспечения высокой квалификации специалистов и повышения конкурентоспособности отрасли. Далее рассмотрим подробнее перечисленные ОТФ, включённые в состав ПС.

Моделирование и экспериментальная апробация технологических маршрутов и процессов

Инженеры-технологи должны уметь создавать математические модели производственных процессов, использовать инструменты TCAD (Technology computer-aided design – инструменты для многомерного моделирования интегральных полупроводниковых структур), что позволяет прогнозировать их результаты в различных условиях. Экспериментальная апробация этих моделей на практике позволяет выявлять недостатки и вносить необходимые коррективы на ранних стадиях разработки. Это существенно сокращает время и ресурсы на разработку и внедрение новых технологий.

Включение этой функции в профессиональный стандарт обеспечит системный подход к разработке технологий, что приведёт к более высокому качеству производимых элементов интегральной фотоники. Специалисты будут готовы к решению сложных

задач, связанных с проектированием и оптимизацией производственных маршрутов и процессов.

Планирование, разработка и сопровождение технологических маршрутов

Инженеры-технологи должны уметь анализировать существующие технологии, выбирать оптимальные методы производства и разрабатывать новые маршруты, учитывающие специфику продукции и требования рынка.

Сопровождение технологических процессов включает в себя мониторинг их эффективности, выявление узких мест и внедрение улучшений. Это требует от специалистов не только технических знаний, но и навыков управления производственными процессами и проектами.

Включение данной функции в стандарт позволит обеспечить высокую степень интеграции между различными этапами производственного процесса, что способствует повышению его эффективности.

Планирование и контроль функционирования технологического модуля

Технологический модуль организации – это совокупность оборудования, технологий и человеческих ресурсов, необходимых для производства элементов интегральной фотоники. Планирование его функционирования включает в себя распределение ресурсов, графиков работы и контроль за выполнением производственных задач. Контроль функционирования технологического модуля позволяет своевременно выявлять отклонения от плана и принимать меры для их устранения. Это особенно важно в условиях высокой динамики рынка и необходимости быстрой адаптации к изменениям. Включение в ПС этой функции создаст основу для системного управления производственными процессами и повысит их предсказуемость.

Метрологическое обеспечение производства

Качество продукции напрямую зависит от точности измерений и контроля параметров на всех этапах производства. Инженеры-технологи должны обладать знаниями в области метрологии, уметь разрабатывать планы

метрологического обеспечения, проводить калибровку оборудования и контролировать качество продукции.

Включение этой функции в ПС позволит гарантировать высокое качество производимых элементов интегральной фотоники, что является критически важным для удовлетворения требований клиентов и соблюдения международных стандартов.

Организация проведения исследований в области проектирования и производства элементов интегральной фотоники и внедрения новых технологий производства в организациях

Включение обобщённой трудовой функции «Организация проведения исследований в области проектирования и производства элементов интегральной фотоники и внедрения новых технологий производства в организации» в ПС «Инженер-технолог в сфере производства элементов интегральной фотоники» также является необходимым шагом для обеспечения конкурентоспособности и инновационного развития отрасли.

Во-первых, интегральная фотоника представляет собой высокотехнологичную область, которая активно развивается и находит применение в различных сферах, включая телекоммуникации, медицину и информационные технологии. В условиях стремительного прогресса технологий инженеры-технологи должны обладать навыками не только в проектировании, но и в проведении научных исследований, что позволяет им адаптироваться к изменяющимся требованиям рынка.

Во-вторых, внедрение новых технологий производства является ключевым фактором повышения эффективности и качества продукции. Данная обобщённая трудовая функция позволит инженерам-технологам систематизировать знания о современных методах и инструментах, необходимых для оптимизации производственных процессов и сокращения времени на вывод новых продуктов на рынок.

В-третьих, акцент на исследования и внедрение технологий способствует развитию инновационной культуры внутри организаций, что, в свою очередь, ведёт к улучшению конкурентных позиций на международной

арене. Инженеры-технологи, обладая необходимыми компетенциями, смогут инициировать и реализовывать проекты, направленные на создание уникальных решений и продуктов.

Таким образом, включение данной трудовой функции в ПС не только повысит качество подготовки специалистов, но и будет способствовать устойчивому развитию отрасли интегральной фотоники в России.

Заключение

Включение проанализированных обобщённых трудовых функций в ПС «Инженер-технолог в сфере производства элементов интегральной фотоники» является необходимым шагом для повышения квалификации специалистов и конкурентоспособности отрасли в целом. Моделирование и экспериментальная апробация, планирование и сопровождение технологических процессов, контроль функционирования технологического модуля и метрологическое обеспечение – все эти функции способствуют созданию системного подхода к производству, что важно в условиях быстро меняющегося рынка. Таким образом, создание и утверждение данного стандарта не только повысит уровень подготовки специалистов, но и создаст предпосылки для инновационного развития сферы интегральной фотоники, обеспечивая устойчивый рост и развитие технологий на основе современных научных достижений.

Литература

1. Фотоника – электроника будущего. ГК «Ростех», 2022 г. URL: <https://rostec.ru/news/fotonika-elektronika-budushchego/>.
2. Приказ Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации от 12 апреля 2013 г. № 148н «Об утверждении уровней квалификации в целях разработки проектов профессиональных стандартов».
3. Приказ Министерства образования и науки Российской Федерации от 1 февраля 2022 г. № 89 (ред. от 29 августа 2022 г.) «Об утверждении перечня специальностей и направлений подготовки высшего образования по программам бакалавриата, программам специалитета, программам магистратуры, программам ординатуры и программам ассистентуры-стажировки» (вступил в силу с 1 сентября 2024 г.).



ВОПРОСЫ ТЕОРИИ

- №3 / стр. 55 **Поисковое проектирование минимально-фазовых цифровых фильтров** ВЛАДИМИР БУГРОВ
- №4 / стр. 50 **Частицы в ультрачистой воде** ВЛАДИМИР СМИРНОВ, СВЕТЛАНА ЯКИМЕНКО
- №5 / стр. 40 **Поле атмосфериков на фоне сейсмической активности при различной геофизической обстановке (экспериментальные данные)** АЛЕКСЕЙ ГАЛАХОВ
- №5 / стр. 46 **Сверхпроводимость при высоких температурах: реальность и фальсификации. Часть 1. От низкотемпературной до высокотемпературной сверхпроводимости** ВИКТОР АЛЕКСЕЕВ
- №6 / стр. 26 **Оценка устойчивости электронной аппаратуры к воздействию дестабилизирующих факторов космического пространства**
СЕРГЕЙ КРАВЧУК, ВЛАДИМИР СОКОЛОВ, ОКСАНА ВОВК, НИКОЛАЙ ЖЕГОВ
- №6 / стр. 32 **Сверхпроводимость при высоких температурах: реальность и фальсификации. Часть 2**
ВИКТОР АЛЕКСЕЕВ
- №7 / стр. 36 **Сверхпроводимость при высоких температурах: реальность и фальсификации. Часть 3. Афера Ранга Диаса** ВИКТОР АЛЕКСЕЕВ

ИНЖЕНЕРНЫЕ РЕШЕНИЯ

- №1 / стр. 40 **Контроллер стоп-сигнальных огней** АЛЕКСАНДР ОДИНЕЦ
- №1 / стр. 48 **Георадар: обзор решения для неразрушающего контроля бетонных конструкций**
МИХАИЛ ОСИПОВ, КОНСТАНТИН КРАВЦОВ
- №1 / стр. 64 **Современный способ изготовления двусторонних печатных плат с высоким разрешением своими силами. Часть 3** АЛЕКСЕЙ КУЗЬМИНОВ
- №2 / стр. 36 **Усовершенствованный НЧ-генератор синусоидальных сигналов на базе DDS AD9833, микроконтроллера EFM8SB10 и 0,91" дисплея OLED-1306 с батарейным питанием**
АЛЕКСЕЙ КУЗЬМИНОВ
- №2 / стр. 48 **«Гроза-зонт» RS-485** АНДРЕЙ ШАБРОНОВ
- №2 / стр. 50 **Модуль управления для производственных помещений на базе программируемого реле**
СЕРГЕЙ ШИШКИН
- №4 / стр. 42 **Двухканальный индикатор уровня звука на базе микроконтроллера EFM8LB12 и дисплея OLED 1306** АЛЕКСЕЙ КУЗЬМИНОВ
- №5 / стр. 18 **Применение программируемого реле для задач управления шаговым двигателем**
АЛЕКСЕЙ ШИШКИН
- №5 / стр. 24 **Программируемое 32-канальное светодинамическое устройство** АЛЕКСАНДР ОДИНЕЦ
- №5 / стр. 32 **Альтернативный ремонт пылесосов фирмы Dyson в условиях санкций** АНТОН ЧЕПЕНЁВ
- №6 / стр. 39 **Усовершенствованный двухканальный индикатор уровня звука на базе цветного 1,3" TFT-дисплея и микроконтроллера EFM8LB10F16** АЛЕКСЕЙ КУЗЬМИНОВ
- №6 / стр. 46 **Аккумулятор 18650 для радиоканала** АНДРЕЙ ШАБРОНОВ

- №6 / стр. 48 **Биометрические системы, информационные киоски (БИК), турникеты и шлюзы с АСО. Обзор оборудования, компонентов и особенностей установки** ВАДИМ ЭКЗЕМПЛЯРСКИЙ
- №7 / стр. 47 **Программируемый выключатель электропитания в электроустановке** СЕРГЕЙ ШИШКИН
- №7 / стр. 52 **Модернизированный стабилизированный блок питания с защитой по току и низким уровнем пульсаций для аудиоусилителя** АЛЕКСЕЙ КУЗЬМИНОВ
- №7 / стр. 61 **Акустические светодиодные драйверы с низковольтным питанием** АЛЕКСАНДР ОДИНЕЦ
- №8 / стр. 31 **Автомат световых волн «Бегущая волна»** АЛЕКСАНДР ОДИНЕЦ
- №8 / стр. 38 **Умный дом с приусадебным участком на базе программируемого реле** СЕРГЕЙ ШИШКИН
- №9 / стр. 31 **Трёхуровневая электронная система контроля доступа** СЕРГЕЙ ШИШКИН
- №9 / стр. 37 **Применение IGBT-транзисторов в линейных стабилизаторах напряжения** АЛЕКСЕЙ КУЗЬМИНОВ
- №9 / стр. 42 **Разветвитель RS-485 с «Power over Ethernet»** АНДРЕЙ ШАБРОНОВ
- №9 / стр. 46 **Устройство автоматической парковки компьютера** ОЛЕГ ВАЛЬПА
- №3 / стр. 52 **Квазипиковый измеритель уровня звукового сигнала** АЛЕКСАНДР ОДИНЕЦ

КОМПЕТЕНТНОЕ МНЕНИЕ

- №2 / стр. 68 **Особенности и возможности индийского рынка радиоэлектроники** АНДРЕЙ КАШКАРОВ
- №5 / стр. 60 **Выставка ExpoElectronica 2024 и проблемы импортозамещения. Альтернативы китайским поставщикам** АНДРЕЙ КАШКАРОВ

ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

- №4 / стр. 38 **Обзор рынка анализаторов спектра и сигналов** АНТОН ТИМОНОВИЧ, АНГЕЛИНА КОРНЕЕВА

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

- №1 / стр. 54 **Восстановление тактового сигнала и построение глазковых диаграмм на осциллографах Rigol серии MSO8000** НИКОЛАЙ ЛЕМЕШКО, МИХАИЛ ГОРЕЛКИН
- №5 / стр. 34 **Обзор основных возможностей инструмента SimPCB для расчёта параметров линий передач в программе Delta Design** ВЯЧЕСЛАВ КУХАРУК, ВИКТОР УХИН, ОЛЬГА СМИРНОВА, ДМИТРИЙ КОЛОМЕНСКИЙ
- №5 / стр. 37 **Учёт и оценка влияния параметров переходного отверстия на передачу высокочастотного сигнала** ВИКТОР УХИН, ВЯЧЕСЛАВ КУХАРУК, ОЛЬГА СМИРНОВА, ДМИТРИЙ КОЛОМЕНСКИЙ
- №9 / стр. 4 **4 Delta Design 4.0. Задание правил проектирования топологии печатных плат в текстовом виде. Как это понимать** ДМИТРИЙ СОРОКА, ДМИТРИЙ ТИМАСОВ
- №9 / стр. 12 **Методология проектирования печатных плат с контролем волнового сопротивления в САПР Delta Design** ВЯЧЕСЛАВ КУХАРУК, ВИКТОР УХИН, АЛЕКСАНДР ГЛАДКЕВИЧ, ДМИТРИЙ ТИМАСОВ

РЫНОК

- №8 / стр. 44 **Россия налаживает собственный выпуск электронного оборудования** АНДРЕЙ КАШКАРОВ
- №1...9 / стр. 4 **Новости рынка**

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

- №1 / стр. 6 **Мультикоптеры: помощники или угроза?** АНДРЕЙ ЛАСОРЛА
- №1 / стр. 16 **Обзор технологии FTENG для создания энергонезависимых носимых медицинских датчиков и стимуляторов** НАДЕЖДА ЛЮБИМАЯ
- №1 / стр. 24 **Мониторинг окружающей среды и защита РЭА от инфразвуковых колебаний**
ВАДИМ ЭКЗЕМПЛЯРСКИЙ
- №2 / стр. 7 **Перспективы развития ПСЭ и материалов для преобразователей солнечной энергии в электрический ток** АНТТИ ЭС
- №2 / стр. 14 **Инновационные методы коррекции свойств RR- и RC-материалов электронными устройствами – генераторами волн СВЧ-диапазона частот** ВАДИМ ЭКЗЕМПЛЯРСКИЙ
- №2 / стр. 20 **Будущее летательных аппаратов с электрическими силовыми установками**
ВАДИМ ЭКЗЕМПЛЯРСКИЙ
- №2 / стр. 28 **Особенности функционала и условия применения РЭА специального назначения для экстремальных ситуаций** АНТТИ ЭС
- №3 / стр. 7 **Электронные устройства DOT в медицинской технике** АНДРЕЙ КАШКАРОВ
- №3 / стр. 16 **Инновационные электронные и оптогенетические технологии в беспроводном управлении мозговой активностью через имплантат** АНТТИ СУОМАЛАЙНЕН
- №3 / стр. 20 **Ядерные батареи будущего** АНДРЕЙ ЛАСОРЛА
- №3 / стр. 26 **Преимущества переноса производства микросхем малой степени интеграции на кремниевые пластины большего диаметра** КАРИНА АБАГЯН, АНДРЕЙ ДЕНИСОВ
- №3 / стр. 28 **Практические решения автоматизации производства, видеоидентификации и связи. Обзор и перспективы** ВАДИМ ЭКЗЕМПЛЯРСКИЙ
- №4 / стр. 8 **Перспективное развитие дальности и устойчивости связи для IoT вплоть до космоса. Технологии и стандарты Wi-Fi, RAN с поддержкой NTN и спутниковой связи VSAT: от SCPC к TDM/MF-TDMA** ЖОСС БОМОН
- №4 / стр. 18 **Особенности построения сетей IoT на базе протокола LoRaWAN** АЛЕКСЕЙ ИЩЕНКО
- №4 / стр. 24 **Электронные датчики и радары в системе беспроводной связи OTA, LOP и E-peas**
АНДРЕЙ КАШКАРОВ
- №4 / стр. 32 **Новые методы альтернативной биометрии: биоакустическая «подпись». Обзор особенностей и перспектив** АНТТИ ЭС
- №5 / стр. 12 **Нетрадиционные источники энергии MFC и электропитания РЭА из биосреды. Инновационная разработка** АНТТИ ЭС
- №6 / стр. 6 **Электронные устройства специального назначения для выявления, диагностики, контроля ВВ и НС. Обзор** АНТТИ ЭС
- №6 / стр. 18 **Перспективы и безопасность оптоволоконных линий на основе GOF, POF, PSF, а также формата SMPTE и РЭА для потоковой передачи данных** ВАДИМ ЭКЗЕМПЛЯРСКИЙ

- №7 / стр. 8 **Биоразлагаемые источники питания: необычные технические решения и перспективы**
ЖОСС БОМОН
- №9 / стр. 48 **Конструктивные особенности элементов РЭА, SSA и спутниковой навигации в космосе**
ВАДИМ ЭКЗЕМПЛЯРСКИЙ
- №9 / стр. 58 **Квалификационные особенности проекта профессионального стандарта «Инженер-технолог в сфере производства элементов интегральной фотоники»** ТАТЬЯНА КРУПКИНА,
МИХАИЛ КУЛЬПИНОВ, ВЛАДИМИР ЛОСЕВ, МИХАИЛ ПУТНЯ, ЮРИЙ ЧАПЛЫГИН

СТРАНИЦЫ ИСТОРИИ

- №2 / стр. 57 **Открытие квантовых точек и разработка технологии их массового производства. Часть 1. Полупроводниковые наноматериалы с эффектом запрета перемещения зарядов по определённым направлениям** ВИКТОР АЛЕКСЕЕВ
- №2 / стр. 64 **Прообраз Интернета: история средств распространения информации** АНДРЕЙ КАШКАРОВ
- №4 / стр. 52 **Открытие квантовых точек и разработка технологии их массового производства. Часть 2. Коллоидные полупроводниковые квантовые точки** ВИКТОР АЛЕКСЕЕВ
- №4 / стр. 58 **Первые электромобили отечественного производства** ГАЛИНА МОРОЗОВАТАЯ
- №5 / стр. 54 **Открытие квантовых точек и разработка технологии их массового производства. Часть 3. Технология синтеза коллоидных квантовых точек** ВИКТОР АЛЕКСЕЕВ
- №8 / стр. 4 **Жорес Алфёров – учёный, благодаря которому работает большинство современных полупроводниковых лазеров. Часть 1** ВИКТОР АЛЕКСЕЕВ
- №8 / стр. 50 **Особенности производства РЭА и развития массового радиовещания в Европе и СССР**
АНДРЕЙ ДОЕЗЖАЕВ
- №9 / стр. 20 **Жорес Алфёров – учёный, благодаря которому работает большинство современных полупроводниковых лазеров. Часть 2. Гетерогенные лазеры** ВИКТОР АЛЕКСЕЕВ

ЭЛЕМЕНТЫ И КОМПОНЕНТЫ

- №1 / стр. 32 **Современные кварцевые и рубидиевые генераторы** ЮРИЙ ИВАНОВ
- №3 / стр. 36 **Точность и стабильность инерциальных датчиков КТР** АЛЕКСАНДР БЕКМАЧЕВ
- №3 / стр. 42 **На пути к электронному обонянию. Обзор электрохимических, оптических, инфракрасных, полупроводниковых, термокаталитических датчиков газа для контроля параметров разных сред** НАДЕЖДА ЛЮБИМАЯ
- №5 / стр. 8 **Резьбовые радиочастотные соединители для монтажа на печатные платы под углом 45 и 30 градусов** КИВА ДЖУРИНСКИЙ, АЛЕКСАНДР СОТНИКОВ
- №7 / стр. 18 **E-Lock как элемент ЕБС СКУД: перспективы систем NFC Key и ISBC Key** ВАДИМ ЭКЗЕМПЛЯРСКИЙ
- №7 / стр. 30 **Радиочастотные соединители повышенной мощности компании Radiall, применяемые в антеннах и базовых станциях** КИВА ДЖУРИНСКИЙ
- №8 / стр. 14 **Электронные системы для животных, безопасности людей и ветеринарного контроля**
АНДРЕЙ ДОЕЗЖАЕВ
- №8 / стр. 26 **Зарубежные коаксиальные высоковольтные соединители** КИВА ДЖУРИНСКИЙ

Печатная версия журнала
«СОВРЕМЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА» 2025 г.

Подписка только для юридических лиц

Выход каждого нового номера будет сопровождаться полным комплектом закрывающих бухгалтерских документов.

Издание	Назначение платежа	Периодичность	Подписная цена, руб.
«СОВРЕМЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА»	Подписка на 2025 год	9 номеров в год	9 900,00

ООО "СТА-ПРЕСС"

ИНН 7726208996 КПП 772801001

ОГРН 1037739253100

АО "АЛЬФА-БАНК" г. Москва, БИК 044525593

к/сч 30101810200000000593

р/сч 40702810202870017754

Счет на оплату № СЭ-2025 от 21 октября 2024 г.

Поставщик ООО "СТА-ПРЕСС", ИНН 7726208996, КПП 772801001, 117437, Москва г, Профсоюзная ул,
(Исполнитель): дом № 108, пом/ком I/67, тел.: (495) 2340635

Основание: Счет № СЭ-2025 от 21 октября 2024 г.

№	Товары (работы, услуги)	Кол-во	Ед.	Цена	Сумма
1	Подписка на ПЕЧАТНУЮ версию журнала "Современная Электроника" на 2025г.	9	шт	1 100,00	9 900,00

Итого: 9 900,00
В том числе НДС 10%: 900,00
Всего к оплате: 9 900,00

Всего наименований 1, на сумму 9 900,00 руб.

Девять тысяч девятьсот рублей 00 копеек

Внимание!

При оплате счета укажите в платёжном поручении в графе "Назначение платежа" полный адрес доставки (с почтовым индексом), телефон для связи (с кодом города), контактное лицо, E-mail.

Оплата данного счета означает согласие с условиями поставки товара.

Руководитель

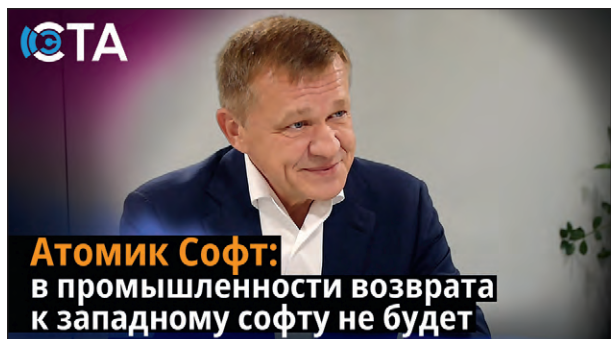
Седов К. В.





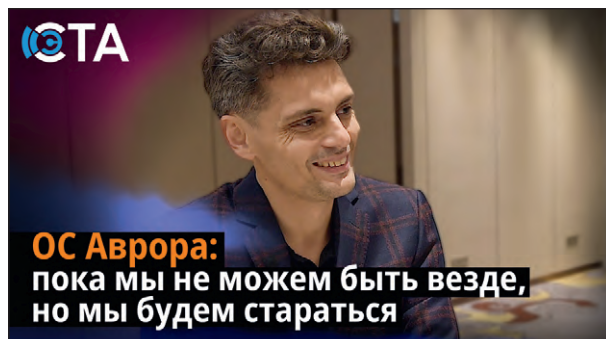
СОВРЕМЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА
И ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЗАЦИИ

ЭКСКЛЮЗИВНЫЕ ИНТЕРВЬЮ



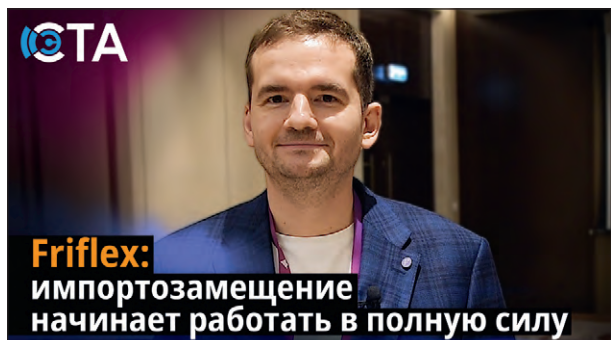
Атомик Софт:
в промышленности возврата
к западному софту не будет

Интервью с Валерием Одеговым –
генеральным директором «Атомик Софт»



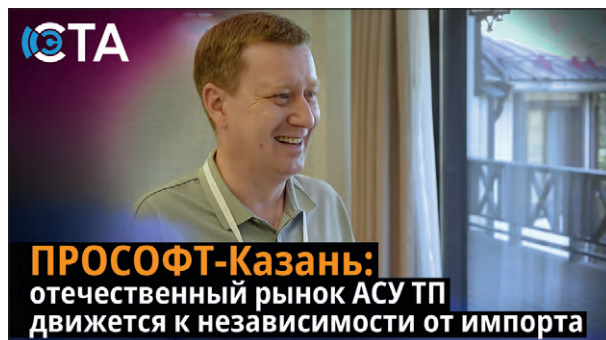
ОС Аврора:
пока мы не можем быть везде,
но мы будем стараться

Интервью с Алексеем Коганом –
директором по продуктам и технологиям
компании «Открытая мобильная платформа»



Friflex:
импортозамещение
начинает работать в полную силу

Интервью с Петром Чернышевым –
генеральным директором компании Friflex



ПРОСОФТ-Казань:
отечественный рынок АСУ ТП
движется к независимости от импорта

Интервью с Вячеславом Маценко –
начальником коммерческого отдела ПРОСОФТ-Казань

СМОТРИТЕ НА КАНАЛЕ

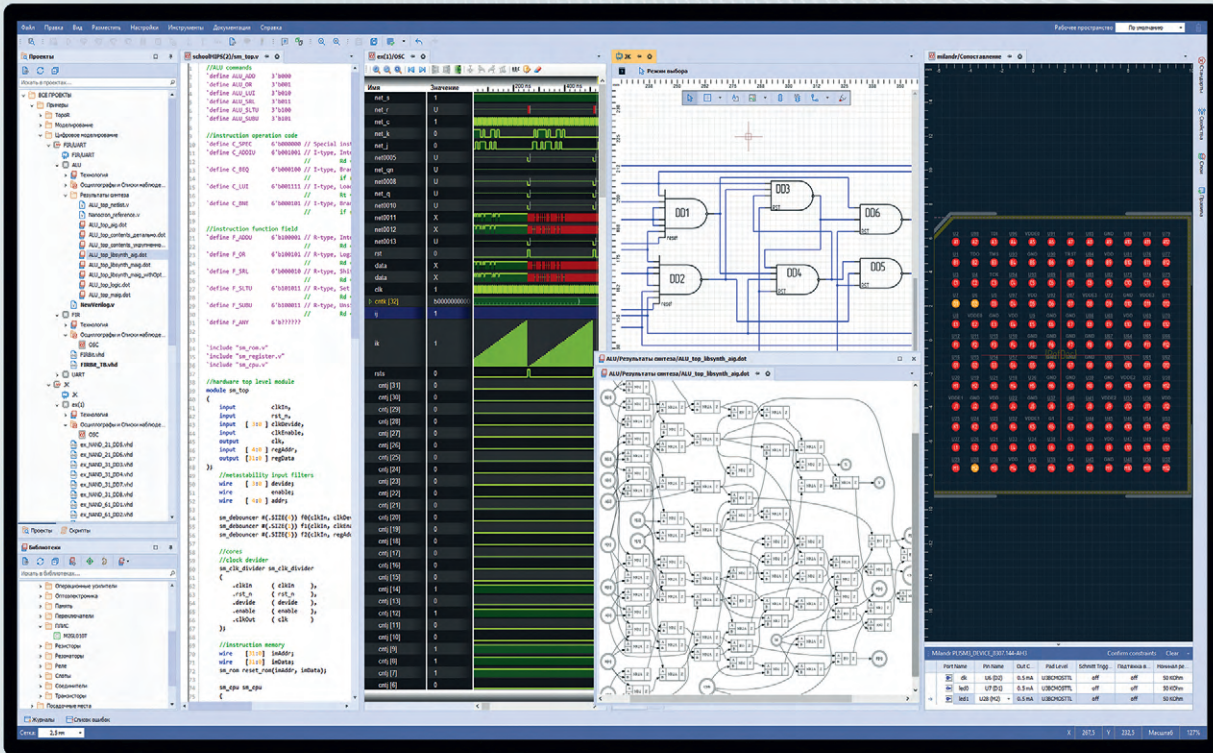



СЛУШАЙТЕ В ПОДКАСТЕ








Российская САПР микроэлектроники




 **Верификация и поведенческое моделирование Verilog, SystemVerilog и VHDL**

 **Схемотехническое проектирование цифровых устройств**

 **Создание файлов конфигурации для отечественных программируемых логических интегральных схем (ПЛИС)**

 **Интерактивная среда разработки**

 **Логический синтез ПЛИС и СБИС**

Консультацию по российской САПР микроэлектроники DeltaDesign SimteraIC можно получить у специалистов ЭРЕМЕКС