

02 (62) сентябрь 2025

ВЕКТОР

ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

Научно-практический журнал

▼ ОТ ПЕРВОГО ЛИЦА
Евгений Липкин

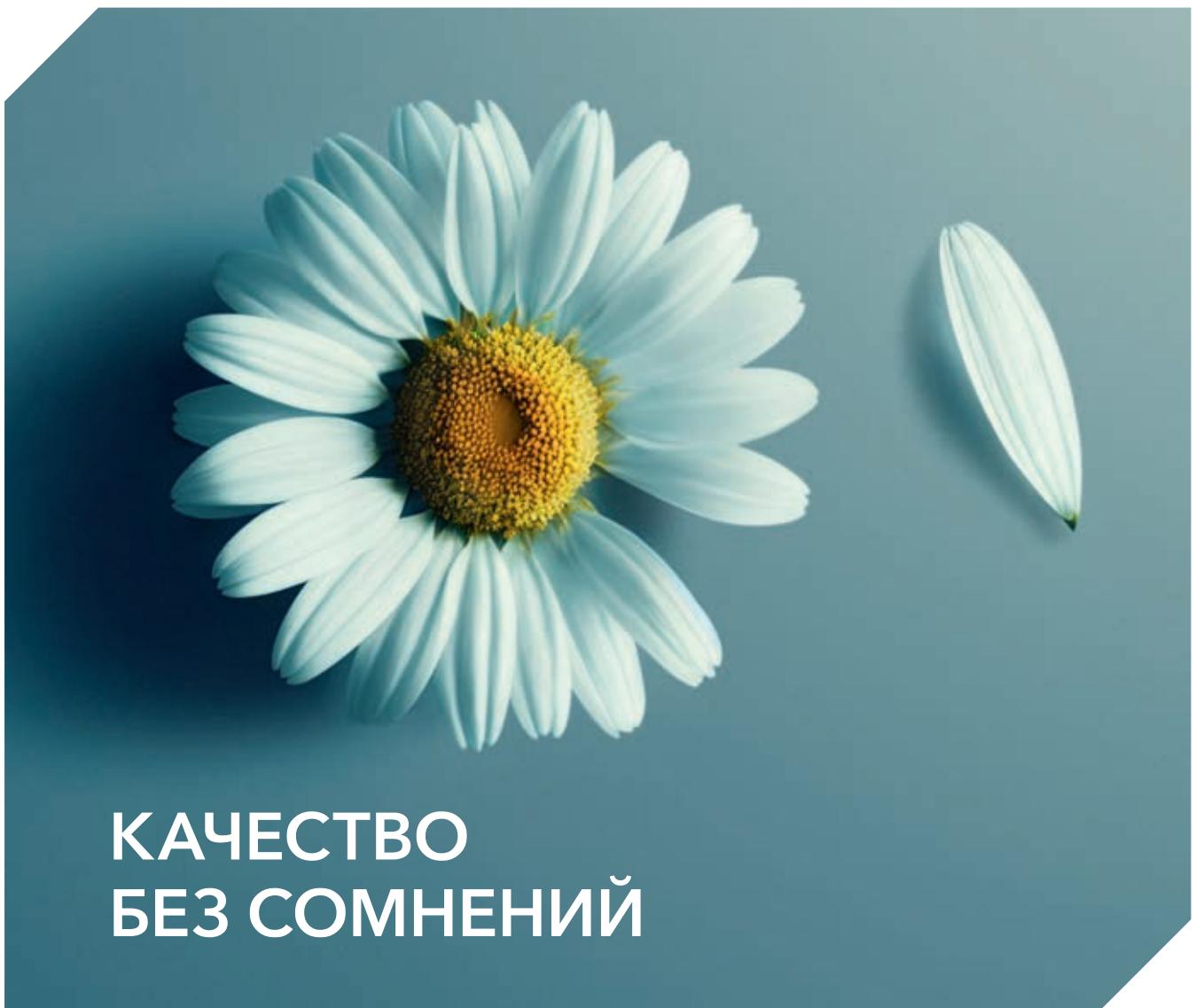
4 КАК ПОСТРОИТЬ
КОНКУРЕНТОСПОСОБНОЕ
ПРОИЗВОДСТВО

▼ ТЕХНОЛОГИИ
Дмитрий Суханов

42 ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА
ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ
ЗОЛОТА ИЛИ КАК СНИЗИТЬ
СТОИМОСТЬ КОНЕЧНОГО
ПРОДУКТА НА ОСНОВЕ
СОСТАВНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

▼ КАЧЕСТВО
Станислав Коваленко

76 ОТ МЕДИ К ГРАФЕНУ:
КАК МЕНЯЕТСЯ СЕРДЦЕ
БЕСПИЛОТНИКА



КАЧЕСТВО БЕЗ СОМНЕНИЙ

Вы давно знаете нас как надежного и проверенного поставщика материалов для электронной промышленности. Сегодня мы перешли на следующий уровень и стали их производителем. Сделанные нами материалы уже применяются более чем в тысяче техпроцессов на российских производствах. Мы убеждены, что современные отечественные материалы не должны уступать ведущим мировым брендам по своим техническим и эксплуатационным характеристикам. И активно работаем над этим — в собственной лаборатории и на нашем производстве в России.

ЭЛТРИН — линейка влагозащитных покрытий для ответственных применений собственного производства. Первое в линейке уретановое влагозащитное покрытие Элтрин У1 является полноценной заменой традиционным и менее технологичным уретановым и эпоксидным покрытиям. Однокомпонентный состав, любой способ нанесения, быстрая полимеризация и эксплуатационные характеристики на уровне лучших мировых продуктов. Чтобы электроника была под надежной защитой.



Сделано нами — сделано на совесть.



ОСТЕК-ИНТЕГРА
Технологические материалы для электронной промышленности
+7 495 788-44-44 | ostec-materials.ru



Уважаемые читатели!

Перед вами специальный выпуск научно-практического журнала «Вектор высоких технологий», приуроченный к Российскому форуму «Микроэлектроника 2025».

В номере представлены статьи, охватывающие широкий спектр вопросов – от фундаментальных исследований до практических решений в области производства электронных компонентов. Особое внимание удалено проблематике повышения эффективности производственных процессов и обеспечения качества продукции.

Большой интерес представляют кейсы компаний, которые в текущих условиях не просто адаптируются, а формируют новые стандарты работы. Некоторые предприятия, следуя

глобальным трендам, успешно переориентируют бизнес-модели, делая акцент на качестве продукции и сервиса. Их опыт подтверждает – даже в сложной ситуации возможно создание конкурентоспособных продуктов высокого уровня.

Редакция журнала «Вектор высоких технологий» выражает надежду, что материалы специального выпуска внесут вклад в продуктивный профессиональный диалог в рамках Форума «Микроэлектроника 2025» и станут основой для новых перспективных проектов в области микроэлектроники.

Редакция журнала
«Вектор высоких технологий»



Телеграм
https://t.me/ostec_news



ВКонтакте
https://vk.com/ostec_group

В НОМЕРЕ



ТЕХНОЛОГИИ стр. 12

ОТ ПЕРВОГО ЛИЦА

ЕВГЕНИЙ ЛИПКИН: КАК ПОСТРОИТЬ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОЕ ПРОИЗВОДСТВО 4

Беседовал Юрий Широков

ТЕХНОЛОГИИ

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ ЗОЛОТА ИЛИ КАК СНИЗИТЬ СТОИМОСТЬ КОНЕЧНОГО ПРОДУКТА НА ОСНОВЕ СОСТАВНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ 12

Автор: Дмитрий Суханов

ОБЗОР РЕЗУЛЬТАТОВ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕПЛОВОГО ПОЛЯ В УСТАНОВКЕ ВЫРАЩИВАНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ КАРБИДА КРЕМНИЯ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА 18

Автор: Артем Белых

ПРЯМОЙ ГИДРОФИЛЬНЫЙ БОНДИНГ АЛМАЗА (100) НА ПОДЛОЖКУ С НАПЫЛЕНИЕМ ИЗ SiO_2 28

Автор: Арсений Губкин

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ЛАЗЕРНЫХ ГРАНЕЙ НА НАДЕЖНОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРОВ С ГРЕБНЕВОЙ КОНСТРУКЦИЕЙ ВОЛНОВОДА 34

Автор: Алексей Симонов

КАЧЕСТВО

ОТ МЕДИ К ГРАФЕНУ: КАК МЕНЯЕТСЯ СЕРДЦЕ БЕСПИЛОТНИКА 42

Автор: Станислав Коваленко

ОБНАРУЖЕНИЕ ДЕФЕКТОВ НА КРИСТАЛЛЕ МИКРОСХЕМЫ ИЛИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТАХ МЕТОДОМ ТЕРМОЭМИССИОННОЙ МИКРОСКОПИИ 46

Авторы: Сергей Максимов, Артем Азарченков

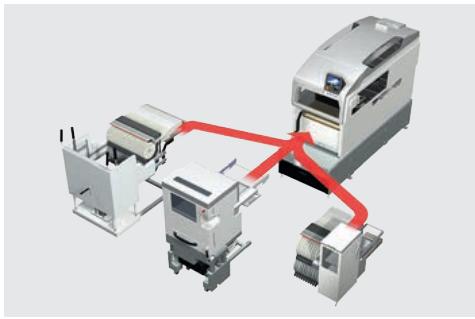


КАЧЕСТВО стр. 42

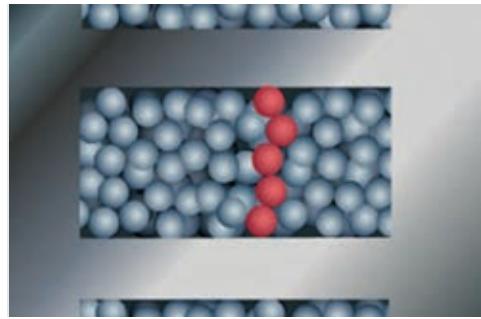


КАЧЕСТВО стр. 46

АВТОРЫ НОМЕРА



АКАДЕМИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ОСТЕК-СМТ стр. 54



АКАДЕМИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ОСТЕК-СМТ стр. 64

Юрий Широков

Главный редактор журнала
«Современная электроника»

Дмитрий Суханов

Заместитель технического директора
ООО «Остек-ЭК»
micro@ostec-group.ru

Артем Белых

Ведущий инженер
ООО «Остек-ЭК»
micro@ostec-group.ru

Арсений Губкин

Старший инженер
ООО «Остек-ЭК»
micro@ostec-group.ru

Алексей Симонов

Ведущий инженер
ООО «Остек-ЭК»
micro@ostec-group.ru

Станислав Коваленко

Главный специалист отдела сервиса
и главного технолога
ООО «Остек-ЭК»
osteiselectro@ostec-group.ru

Сергей Максимов

Начальник отдела нанометрологии
и анализа поверхности
ООО «Остек-АртТул»
info@arttool.ru

Артём Азарченков

Специалист отдела нанометрологии
и анализа поверхности
ООО «Остек-АртТул»
info@arttool.ru

Евгений Степанов

Генеральный директор
ICL Техно

Александр Завалко

Технический директор
ООО «Остек-СМТ»
smt@ostec-group.ru

Павел Алейников

Начальник отдела технической
поддержки
ООО «Остек-Умные технологии»
flex@ostec-group.ru

Геннадий Егоров

Начальник группы сборочно-
монтажного производства
ООО «Остек-Умные технологии»
flex@ostec-group.ru

Александр Романов

Главный специалист отдела
технической поддержки
ООО «Остек-Умные технологии»
flex@ostec-group.ru

Юрий Поздеев

Главный специалист отдела
технической поддержки
ООО «Остек-СМТ»
smt@ostec-group.ru

ОТ ПЕРВОГО ЛИЦА

ICL ТЕХНО: «ПРОИЗВОДИМ ВЕСЬ СПЕКТР ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ И ГОРДИМСЯ ЕЕ КАЧЕСТВОМ» 50

Рассказывает Евгений Степанов

АКАДЕМИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ОСТЕК-СМТ

АДАПТИВНОСТЬ ПРОМЫШЛЕННЫХ КИБЕР-ФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ КАК КЛЮЧЕВОЕ КАЧЕСТВО УСПЕШНОГО ПРОИЗВОДСТВА ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ 54

Автор: Александр Завалко

ТЕХНОЛОГИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО КОНТРОЛЯ 60

Автор: Павел Алейников

НАНЕСЕНИЕ ПАЯЛЬНОЙ ПАСТЫ МЕТОДОМ ТРАФАРЕТНОЙ ПЕЧАТИ 64

Авторы: Геннадий Егоров, Александр Романов

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ МОНТАЖА НА АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ЛИНИЯХ 70

Автор: Юрий Поздеев

ОТЛАДКА ТЕМПЕРАТУРНОГО ПРОФИЛЯ ДЛЯ ПАЙКИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ В КОНВЕКЦИОННЫХ КОНВЕЙЕРНЫХ ПЕЧАХ 76

Автор: Юрий Поздеев

ОТ ПЕРВОГО ЛИЦА

Евгений Липкин: Как построить конкурентоспособное производство

Беседовал Юрий Широков



Редакция ведущего журнала для специалистов, работающих в сфере электроники, «Современная электроника» подготовила интервью с генеральным директором компании Остек-СМТ Евгением Липкиным.

Поводом для интересной беседы стал выход его новой книги «Производство мирового уровня. Путь к эффективности российского приборостроения». Е. Липкин рассказал о построении передовых производств в нашей стране, актуальных проблемах отрасли и путях их решения.

Евгений, как вам пришла мысль написать книгу? Это же достаточно долгий и сложный процесс, на это требуется много времени, а вы занятой человек.

Свободное время, если что-то интересно и хочется сделать, найдется всегда, как подсказывает практика. В книжном деле я человек не новый, это уже моя вторая книга, и обе книги посвящены производственной тематике. Первая вышла в 2017 году и раскрывала тему, которая на тот момент бурлила в мировом экономическом сообществе – Индустрия 4.0, четвертая промышленная революция. Это первая в России книга, которая изначально была написана и издана на русском языке. Работа над книгой давалась крайне тяжело, и времени на нее ушло много, потому что, как неопытный автор, я конечно, периодически сворачивал немного не в том направлении. Подход ко второй книге был уже достаточно осмысленный, связанный с необходимостью, назревшей в стране и в отрасли.

Тема построения современных высококонкурентных производств у нас стоит на повестке в полный рост. Она обсуждается под разными углами, поднимается этот вопрос относительно производственной эффективности, производительности труда, экономики и менеджмента качества. И данная книга – попытка комплексно проанализировать, где же мы находимся, куда нам необходимо двигаться, и предложить некоторый план действий для тех предприятий, которые либо имеют собственное производство, либо плотно взаимодействуют с другими производителями по кооперации, с контрактными производителями в том числе. Работа над книгой заняла около семи месяцев.

То есть у вас уже были какие-то наработки? Потому что за семь месяцев такое с нуля не напишешь.

Самая главная наработка – это мой более чем 20-летний опыт промышленной тематики в реализации промышленных проектов. И книга – это в значительной степени результат накопленного ранее опыта, плюс то, что доступно сегодня, анализ современных подходов, лучших практик, анализ ситуации. Я считаю, что главный ограничитель такого рода деятельности – это наличие информации. Когда есть, что сказать, есть доступ к информации, есть надежные источники, куда можно заглянуть в поисках хороших примеров, работа идет намного быстрее.

Есть много западной переводной литературы, посвященной похожим вопросам. Как вы считаете, почему назрела необходимость написать книгу о специфике организации нашего производства, отечественного? Или может быть это связано с тем, что в западной литературе недостаточно качественно раскрыта эта тема?

Почему же? Огромное количество отличных примеров, отличных трудов, которые были переведены на русский язык. Как правило, у нас в стране известны труды, которые написаны на английском, чаще всего в США.



Евгений Липкин, генеральный директор ООО «Остек-СМТ», и Юрий Широков, главный редактор журнала «Современная электроника»

При этом есть огромное количество источников на других языках, для нас немножко экзотических, – индийский, китайский и так далее. Они, как правило, менее известны у нас в стране, хотя и Китаю, и Индии есть что сказать по части производственного менеджмента.

Там и научная школа достаточно серьезная, и специалистов хватает, и практического опыта более чем достаточно. Но, как правило, даже несмотря на то, что книги переведены на русский язык, обращены к российскому читателю, чувствуется некая чужеродность, другая специфика, немного другие исходные позиции. И ты понимаешь, что вещи-то классные, но как их применить – не совсем понятно.

Плюс надо держать в уме известный принцип – «культура есть стратегию на завтрак¹». И в общем-то это работает в тематике производственного менеджмента в полной мере. У нас люди с другой культурой, другими привычками, с другими традициями. И инструменты и подходы, которые хорошо работают в той же Америке или Европе, или в Китае, и на которые сейчас принято ориентироваться в том, что касается электроники, приборостроения и связанных отраслей, – они из другой культуры. И те советы, которые даются в этих источниках, книгах, публикациях, статьях, далеко не всегда могут быть эффективно внедрены в наших условиях.

У вас в книге проведена некая адаптация этих известных методик к нашим реалиям? Или на базе вашего собственного опыта выведены какие-то совершенно уникальные рекомендации?

Есть ряд рекомендаций, которые логически не следуют из тех рекомендаций, которые дают зарубежные эксперты. В общем-то, у меня есть четкое понимание того, что по времени мы заметно отстаем. Потому что наши производители на нашем же рынке сталкиваются с прямой конкуренцией с продукцией тех же самых производи-

¹ Питер Друкер, американский экономист

телей из Китая. Раньше это были американцы, европейцы и так далее. Они намного опережают нас. Я сейчас даже говорю не про производственные технологии – станки они используют или какие-то ручные инструменты. Вопрос не в этом. Вопрос в том, что, в первую очередь, мы отстаем с точки зрения производственного менеджмента. И отставание это – очень существенно. По моим оценкам – десятилетие.

Наверное, просто не требовалось в наших реалиях внедрять все эти суперсовременные методики. Может быть потому, что и конкуренция была не слишком сильная раньше?

В советское время конкуренция была сильная. И, в общем-то, научная организация труда, как предмет, имела место. На эту тему было много работ, анализа, исследований. Понятно, что в 90-е годы мы подрастирали свой производственный потенциал, и тех специалистов уже давно нет с нами – кто-то уехал, кого-то уже не стало, а кто-то ушел в совершенно другие сферы деятельности. И так получилось исторически, я в некотором смысле согласен с вами, что было не актуально.

Мы оставили у себя из такого серьезного «хай-тека» в основном те вещи, которые делаются небольшими объемами – ответственная электроника, критическая электроника. То, что делалось штучными объемами, небольшими сериями, под конкретные проекты. И получилось так, что значительная часть другой продукции производилась не у нас. То есть, мы либо покупали, либо размещали заказы на какие-то неплохие контрактные производства в той же самой Юго-Восточной Азии.

И нам вполне комфортно жилось, и напрягаться не надо было, хотя, может быть, и стоило бы поднапрячься. Если бы этой проблеме мы уделили внимание лет 20 назад, я думаю, мы ушли бы намного дальше, чем сейчас находимся. Тут случился интересный исторический момент, когда импорт стал ограничен. И нам стало экстренно необходимо наращивать серийное производство сложной высокотехнологичной продукции.

То есть, дело не в конкуренции между компаниями, а именно в недостаточных объемах производства? Не заполнен рынок? Сейчас, когда импорт ушел, получается, что наши отечественные компании не в состоянии проглотить этот образовавшийся рынок?

Они вроде поглощают достаточно хорошими объемами. Вопрос в том, что все равно присутствует некая искусственность этих условий. И при определенных обстоятельствах, когда границы вдруг откроются, а ограничения в той или иной мере снимутся, мы снова окажемся лицом к лицу с очень крепкими и серьезными мировыми игроками.

Я разговаривал со многими представителями разных компаний, и практически все в один голос говорят, что даже если западные ушедшие компании вернутся или попытаются сюда вернуться, мы

с ними работать не станем скорее всего. По крайней мере, в ответственных приложениях. Будем работать с отечественным производителем, использовать отечественные комплектующие по максимуму, чтобы иметь как можно меньше зависимостей. Так что в этом смысле особого риска нет, мне кажется.

Я вижу достаточно серьезный риск по одной простой причине – рынок имеет некие критерии оценки конкурентоспособности продукции. Эти критерии выражаются в спросе и поведении потребителей и покупателей. Если разница в цене на полностью аналогичную продукцию будет отличаться в разы, то верить в то, что добрыми словами можно будет убедить кого-то покупать что-то, что в разы дороже, мне кажется, весьма иллюзорно.

Все-таки надо ориентироваться на то, что предстоит настоящая, реальная конкуренция в условиях реального рынка, где выбор потребителя определяет не наличие каких-то искусственно созданных мер, а именно добровольный выбор потребителя, конечного пользователя продукции. Для того, чтобы это работало, необходимо обеспечить сопоставимые, близкие потребительские свойства продукции, характеристики, показатели надежности, качества и так далее, стоимость. Конечно, стоимость важна, тем более в высокотехнологичных проектах, где бюджеты достаточно серьезные. Уровень клиентского сервиса – это тоже очень важно. Сроки поставки продукции.

Все-таки у российских производителей должны быть твердые аргументы, твердые преимущества, которые позволят им выстоять и выиграть эту конкуренцию, даже если какие-то искусственно созданные меры поддержки не будут работать.

Некоторая часть нашего рынка подвержена госрегулированию. И там компании, я думаю, продолжат работать в прежнем режиме, государство не пустит никого в их нишу. Получается, что для них это по-прежнему будет неинтересно. Интересно будет только тем, кто находится на чисто коммерческом рынке.

Готов поспорить, что им это будет безразлично. Многие компании, которые работают на рынке, где отдается однозначный приоритет отечественной продукции, часто развиваются у себя направления, связанные с тематикой, которая, в общем-то, предполагает участие на более открытом рынке, различные B2C-решения, которые могут стоять на полочках в ритейле.

Почему им это интересно? Во-первых, это позволяет наращивать объем производства. При росте объема производства затраты распределяются, размазываются более тонким слоем, соответственно, экономические показатели могут улучшиться.

Плюс надо помнить про фактор сезонности в определенных отраслях, где две трети года работают на минимальных объемах, а одну треть – в круглогодичном режиме. И в те периоды, когда производство не загружено, логично его дозагрузить какой-то дополнительной продукцией,

которая позволит распределить и компенсировать затраты на содержание этого производства.

И вы правильно подметили – есть вопрос устойчивости. Когда предприятие делает ставку на нескольких заказчиков, количество которых не превышает пальцев одной руки, это определенные стратегические риски. И в наших реалиях для отечественной промышленности характерно то, что такую ставку стараются не делать. Предприятия стараются распределить риски, присутствовать на нескольких рынках, расширять номенклатуру продукции.

Это история про нас. И в этом случае надо понимать, что такие рынки могут быть высококонкурентными по цене. На одном у тебя все хорошо, а на другом уже сложнее конкурировать. И чтобы управлять более широкой номенклатурой, гибко переключаться с супердорогих сложных приборов на более простые продукты, где цена должна быть ниже и производить их надо в другом режиме, нужна производственная гибкость, которая предполагает не просто специальное оборудование, а принципиально другой производственный менеджмент.

Есть еще внутренняя конкуренция внутри страны. Наша отечественная производственная история знает массу примеров, когда у предприятия, которое себя чувствует очень комфортно, имеет регулярный рост заказов, вдруг что-то пошло не так, и бизнес закончился. Поэтому всегда надо быть в движении, всегда искать более эффективные пути, более эффективные подходы и воспринимать конкуренцию как некое перманентное состояние любого бизнеса. Потому что в противном случае можно просто расслабиться и потерять хватку.

Управление производственными проектами – это животрепещущая тема. Где в нашей отечественной производственной цепочке самые главные проблемы? Какие есть проблемные места, на которые в первую очередь нужно обращать внимание, чтобы быстро подняться на другой уровень?

Те вещи, о которых говорят из каждой розетки, наверное, повторять смысла нет. В первую очередь, это касается доступности комплектации. А вот что в нашей власти в полной мере, что делается и решается быстро – это вопросы компетенции персонала.

Потому что данная тема комплексная, связана с организацией производства, это вопрос знаний, методов, принципов того, как производство должно быть организовано. Руки-ноги у всех одинаковые – что у нас, что у китайцев, что у европейцев, а вот результат иногда получается разный.

Но компетенции персонала не рождаются по щелчу пальцев. Я, как руководитель предприятия, могу понимать, что моему персоналу недостаточно компетенций, их нужно наращивать. А вот как это сделать?

У нас не было возможности поработать на топовых мировых производствах, набраться теоретического и практического опыта, который мы могли бы применить у себя. То

есть у тех же самых китайцев этот шанс был. Они в течение десятилетий работали бок о бок с западными коллегами, перенимали лучшие практики, методологию, подходы, и в итоге это дало результат.

Они создали сообщество методически подкованных людей с практическим опытом, которые дальше расползлись по всей отрасли и успешно развивают производство собственных китайских производителей под собственными марками. Благодаря чему в значительной степени им удалось обеспечить высокую эффективность и конкурентоспособность китайских производителей сегодня. У нас такой возможности не было.

Если выделять, какие же категории персонала наиболее значимы в моменте, – это традиционная история про технологов, что их мало. Их мало, но они есть.

Технологов слишком много и не требуется, наверное.

Тут можно масштабировать: если организовать обмен знаниями, обмен опытом, то задача решаема. Да, возможно в моменте есть некий ярко выраженный дефицит, но экспертиза есть. Просто может быть носителей этой экспертизы меньше.

А вот в том, что касается производственного менеджмента и организации производства, здесь очень тяжелая ситуация. Специалисты, которые понимают, как построить завод мирового уровня, – единичные люди, имеющие опыт, понимание, кругозор, достаточный для решения такой задачи. Часто они уже в ранге топ-менеджеров и далеки от реального производства.

Здесь ярко выраженный дефицит. И, конечно, выстроить производственные процессы, правильно расставить все необходимые элементы производства по своим местам, организовать эффективно их взаимодействие и выступить в роли производственного дирижера, который заставит весь этот сложный оркестр играть слаженно, четко, чтобы получилась красивая симфония – таких специалистов у нас очень мало.

Что же с этим делать? Требуются определенные усилия со стороны руководства предприятия, отвлечение или привлечение новых ресурсов. И возникает вопрос, а ради чего? Как можно оценить?

Если руководство предприятия не понимает, зачем ему производство, зачем его развивать и каким образом это будет вознаграждено, то не стоит заниматься данным вопросом. Идти в собственное производство – это стратегический выбор, который должен исходить из стратегических целей предприятия, целей бизнеса. Если нет понимания «зачем?», лучше не ввязываться. Потому что когда непонятна цель, то путь будет не тот, результаты не будут радовать.

Если же есть понимание, зачем собственное производство, как его можно использовать для построения новых интересных бизнес-моделей, каким образом можно получить конкурентное преимущество на рынке относительно своих

коллег по отрасли или внешних игроков – то, как правило, есть понимание, какие компетенции необходимо усиливать, какие инвестиции вкладывать в людей. Развитие людей – это тоже инвестиция, развитие компетенций – тоже инвестиция.

Можно инвестировать в здание, можно инвестировать в средства производства, можно инвестировать в знания людей, в компетенции людей. И то, и то значимо для общего результата.

Допустим, предприятие фокусируется на том, чтобы дать более конкурентную стоимость своей продукции на рынке при прочих равных показателях. Это важный параметр, несомненно, то есть цена позволяет выигрывать.

Так вот, допустим, надо оптимизировать себестоимость производства. При всех тех усилиях, которые предприятие предпринимает сегодня, есть некая планка, ниже которой они опуститься не могут. Чтобы снизить себестоимость, нужно ли знать и понимать какие-то лучшие практики, какие-то подходы, решения, то, каким образом это происходит на других предприятиях? Несомненно.

Можно ли реализовать эту задумку по снижению цены, ничего не меняя? Нет. Сама по себе себестоимость не поменяется, со станками она не меняется точно. Но при прочих равных могут быть два абсолютно зеркально похожих предприятия, оснащенных абсолютно одним и тем же оборудованием, но вот результат у них будет разный. Это может быть связано с тем, насколько эффективно организованы процессы не только на производстве, но и около производства. На сколько эффективно организована логистика, насколько классно оптимизирована производительность труда. Если 10 человек закручивают одну лампочку, как в анекдоте, то понятно, что там себестоимость будет далека от ожиданий.

Так вот, чтобы решить эту задачу, необходимо людям дать знания. Где их взять? К сожалению, у нас, если взять высшую школу, все непросто с подготовкой по специальностям производственного менеджмента, с актуальностью тех материалов, которые там подаются. Это территория, которой явно стоит уделить внимание.

Это самое начало, кстати. Это же исток.

Да, это исток. Опять-таки, имеем, что имеем. Высшая школа тоже имеет некоторую инертность, и там небыстро все меняется.

Первое, что бы я посоветовал, это проанализировать доступные источники теоретической информации. Есть много книг, публикаций, которые тоже можно аккумулировать, можно это сделать как в рамках конкретного предприятия, так и в рамках всей отрасли. Создать некую отраслевую библиотеку, а те книги, которые не переведены на русский, можно перевести.

Я, в частности, использовал среди источников информации огромное количество англоязычной литературы, статей и так далее. У меня всего два источника на русском, третий – это моя голова.

Больше всего материалов в источниках на английском языке, есть отличные книги, которые на русский не переведены. Если помочь отечественным специалистам собрать эту библиотеку, то мне кажется, это поможет. Сейчас англоговорящих людей в нашей сфере достаточно, но в любом случае, можно помочь тем, кто испытывает сложности с переводом.

А что касается практики, тут, наверное, надо пробовать и внедрять. Не применяя теорию, в общем, далеко не уедешь. И это вопрос готовности немножко рисковать ради будущего успеха – без риска сложно что-то поменять.

Вы свою книгу рассматриваете все-таки как начальный ликбез или как практическое руководство, которым можно пользоваться?

Книга ради самой книги была бы неправильной затеей. Книга предназначена для людей-практиков, которые работают с производством, и, в первую очередь, ориентирована на производственный менеджмент. И я бы рекомендовал ее к прочтению в том числе и будущим руководителям производства или начинающим руководителям в производственной сфере. Там много идей, которые могут, я надеюсь, замотивировать людей начать копать чуть глубже в каждую конкретную тему.

Что касается производства, то невозможно все вместить даже в тысячу страниц. Производство – очень сложная деятельность, включающая огромное количество факторов, направлений, поднаправлений, сфер и нюансов этой тематики. Это и технологии, и техника, и логистика, и управление персоналом, и управление качеством. Можно до бесконечности перечислять.

И, конечно, ни одна книга на сегодняшний день не в состоянии ответить на все вопросы или дать исчерпывающую информацию. Но однозначно для расширения кругозора необходимо все-таки анализировать весь спектр, хотя многие у нас поклоняются лишь отдельным авторам, которых успели перевести на русский язык. А есть и другие авторы, у которых альтернативная точка зрения и даже где-то конфликтующая.

И другие мнения и позиции тоже надо понимать, потому что в каждом конкретном случае могут быть применимы различные модели на одном и том же рынке. Здесь много нюансов.

И у нас в работе таких примеров хватает, когда компании физически делают продукцию по принципу «найди 10 отличий». Работают на одном рынке, понятное дело, но производство построено принципиально по разной логике. Это связано с тем, что разные сегменты рынка делают акценты на разные вещи в своей маркетинговой стратегии. Допустим, одно предприятие больше ориентировано на стандартную номенклатуру продукции, а другое – на кастомные решения. Одни молотят на склад, другие только под конкретного заказчика. А продукция, в общем-то, плюс-минус та же самая. В этих двух случаях необходимы принципиально разные подходы к организа-

ции производства. И поэтому моя книга, хотя мне самому она близка больше всего, ни в коем случае не является истиной или финальной инстанцией. Это набор некоторых идей, направлений для размышлений и изучения. В ней есть темы, по которым можно еще пятитомник написать. Но, к сожалению, для такого труда у меня точно нет времени.

Будет ли продолжение книги?

Я работаю в производственной тематике большую часть своей жизни. Она мне нравится. Она правильная, она интересная, заряжает энергией. И работая в этой теме, конечно, я буду стараться всеми силами помогать коллегам, помогать отрасли. Я считаю, что это вклад, который может помочь не одному предприятию, не одному специалисту. Я и по прошлой книге до сих пор получаю благодарности.

Эффект от внедрения правильных производственных бизнес-процессов состоит в том, что и компании, с которыми вы взаимодействуете по своему бизнесу, начинают работать вменяемо. И для вас это хорошо и интересно. Получается, есть заинтересованность в том, чтобы все поднялись выше на несколько ступенек?

Есть такое понятие как «уровень зрелости рынка». Конечно, на ранних фазах, когда у нас серийное производство в стране начало только появляться, зарождаться в 90-е годы, многим вещам вообще не уделялось внимания. В какой-то момент начали задумываться о том, что важно качество, начали инвестировать в качество. Когда уже все количеством насытились, то начали думать, как количество в качество перегнать. Сейчас мы находимся в фазе, когда необходимо уделять внимание производственной эффективности, потому что все, по большей части, уже научились делать продукцию в нужном количестве и в нужном качестве, теперь надо думать, что делать с экономикой.

И, конечно, книги, просветительско-образовательная деятельность позволяют повысить уровень зрелости рынка, чтобы уже люди на местах понимали, что важно, чему стоит уделить внимание, на что стоит потратить время и даже средства.

Очень люблю приводить пример с автомобилями. Если у человека никогда не было машины, он вообще вне информационного поля, и поставь перед ним несколько автомобилей разной ценовой категории и сегментов, для него отличий может и не быть.

С точки зрения производства подход примерно такой же. Если посмотреть конечную продукцию, она может не сильно отличаться, но с точки зрения того, что внутри этого производства, есть огромное количество нюансов, которые не всегда видны, и им не всегда уделяют внимание. И дальше, конечно, необходимо погрузиться и понять эти отличия. А работа с литературой позволяет расширить кругозор и начать видеть эту разницу.

А вы, как руководитель, собственные идеи и рекомендации используете в своей деятельности?

У нас в стратегии написано, что мы строим производство мирового уровня. То есть книга – некий манифест, некое заявление, транслированное на бумаге для внешнего рынка, для наших партнеров, заказчиков, представителей отрасли. Внутри у нас огромное количество работы, и мы тоже прошли определенную дистанцию – около 10 лет. Мы постепенно собирали кирпичики, элементы всей конструкции. И многое чего еще предстоит сделать, это факт.

У нас не литературная деятельность, не должно быть такой иллюзии. Мы работаем в реальном секторе, мы помогаем нашим заказчикам строить реальное производство.

То есть вы не просто можете оснастить производство технически и технологически, а еще и методически помочь?

Мы с этим очень серьезно работаем и развиваем то, что касается производственного консалтинга. Потому что станки – это всего лишь инструмент, но этим инструментом надо людей научить пользоваться. Раньше это были более простые участки, там стояло по 5-10 станков. Сейчас у нас есть проекты, в которых количество станков может измеряться сотнями.

Предприятие – это сложное, серьезное производство с большим количеством технологических операций. И управление этим большим организмом является сложной задачей. Многие наши заказчики не имеют многолетнего производственного опыта, но у них есть стратегические устремления, желаемые показатели качества и они просят нас помочь.

Поддержка такого рода проектов может длиться несколько лет. До тех пор, пока сам заказчик прочно не встанет на ноги, пока его специалисты не будут достаточно образом подготовлены, не получат нужный объем теоретических и, что не менее важно, практических знаний. Это серьезная работа, многоэтапная, длительная, сложная.

Но мы сами выбрали для себя этот путь. И у нас есть оцифрованные показатели того, какое количество производств мирового уровня, соответствующих нужным критериям, которые внутри этого понятия заложены, мы должны получить в стране к 2030 году.

Мы под эту работу тоже выделяем и развиваем собственные ресурсы, собственные компетенции. У нас достаточно серьезная инженерно-техническая команда, которая обладает весьма ощутимым багажом знаний и компетенций в данной сфере, чтобы помочь нашим заказчикам. А другим участникам рынка помочь в том, чтобы наша отрасль, сфера радиоэлектроники, в целом стала конкурентна на уровне отрасли мирового масштаба.

Может ли ваша компания помочь заказчикам в части развития их персонала до должного уровня?

Компания Остек еще с 90-х годов прошлого столетия занимается активным трансфером технологий. Тогда у нас в стране слабо понимали, что такое поверхностный

монтаж, что есть такая технология. Основатели компании потратили очень много сил и времени, чтобы все эти знания донести и помочь отечественным предприятиям эту технологию освоить. Проводили симпозиумы, конференции, семинары, выпускали бюллетень «Поверхностный монтаж».

Образовательная деятельность имела место всегда. И на моей книге в правом нижнем углу написано «Академия технологий Остек-СМТ». Это наш большой проект, и часть нашей образовательной деятельности мы упаковали в него. Он многоканальный, у него есть различные носители – Телеграм-канал, видеоматериалы, печатные издания. Книга также входит в этот проект. Наша цель – повысить уровень зрелости специалистов, расширить их кругозор. Мы не сможем дать ответы на все вопросы, но мы можем направить людей.

Если ты проактивный человек, то сможешь открыть компьютер, в поисковой строке забить нужные слова и найти, что есть в мире на нужную тему. А если не интересно, то тут мы не поможем. Если человек не хочет учиться, его не научишь. Детей надо уговаривать, а взрослых людей, которые получают за свою работу деньги, больше мотивировать не стоит. Они либо развиваются, либо нет.

Мы проводим большое количество онлайн-мероприятий в формате вебинаров и очных мероприятий, различные семинары, ворк-шопы. Мы плотно работаем с тем, чтобы помочь специалистам отрасли разобраться в теме, найти нужные ответы, направить их.

Конечно, как и в институте, самообучение – основа всего. Мы можем направить, а дальше интернет и вперед.

Так что мы достаточно активны в сфере образования. Путь не быстрый, нельзя за полгода все радикально поменять. Он имеет накопительный эффект. Мы работаем в этом направлении.

А с вузами вы взаимодействуете?

Есть определенное взаимодействие, не такое широкое, как хотелось бы, но мы будем расширять это направление при встречной заинтересованности.

Вам обязательно нужно участвовать в наполнении новых программ, раз у вас есть такой опыт.

Я личноучаствую в работе отраслевых комитетов, связанных с кадровой тематикой. В рамках этих комитетов ведется работа с высшими учебными заведениями.

Там, где мы можем оказать содействие, конечно, мы будем это делать. Успех, в том числе и нашего бизнеса, будет зависеть от того, насколько будет крепкая отрасль, насколько она будет успешно развиваться, насколько успешно конкурировать с зарубежными производителями и отраслями.

У нас команда патриотов. Постоянно поддерживаем наших сотрудников, которые участвуют в сторонних семинарах, конференциях, ведут работу со студентами и взрослыми специалистами. Так что тема для нас значимая, это часть нашей стратегии. Если у вас есть предложения – мы всегда рады их услышать и влиться в любой интересный проект, который поможет сделать нашу отрасль еще сильнее.

Но эта образовательная деятельность ведется не на коммерческой основе?

Я скажу, что это инвестиции в будущее, я вижу это так. У нас в команде есть успешные примеры, когда люди, будучи совсем молодыми и зелеными, услышали что-то, прочитали, вдохновились и пришли работать в отрасль. Если у нас будет сильная отрасль, у нас будет хороший бизнес. Если отрасль будет слабая, неконкурентная, я думаю ни у нас, ни у других игроков нашего рынка не будет нормального будущего. Да и у страны, наверное, тоже.

Электроника – это тема достаточно значимая в современных реалиях. И об этом уже много раз было сказано. Она имеет стратегическое значение для нашего государства. И, конечно, надо поддерживать и укреплять ее всеми доступными способами. Если каждое предприятие, которое является носителем знаний в этой сфере, будет хоть понемногу, по кручинке вносить свой вклад, я думаю, все мы сделаем большое дело и станем сильнее. Выиграют все. □

Как построить конкурентоспособное производство



Часть 1
clck.ru/3NFruT



Часть 2
clck.ru/3NFrwv



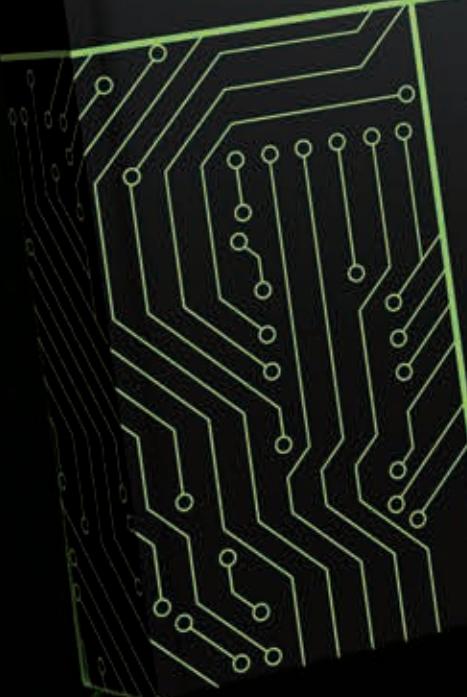
Часть 3
clck.ru/3NFs47

ПРОИЗВОДСТВО
МИРОВОГО УРОВНЯ

БИОЭЛЕКТРОНИКА

ЕВГЕНИЙ
ЛИПКИН

ПРОИЗВОДСТВО МИРОВОГО УРОВНЯ



ПУТЬ К ЭФФЕКТИВНОСТИ
Российского
Приборостроения

АКАДЕМИЯ
ТЕХНОЛОГИЙ
ОСТЕК-СМТ



НОВИНКА

ТЕХНОЛОГИИ

Оптимизация процесса гальванического осаждения золота

или как снизить стоимость
конечного продукта
на основе составных
полупроводников

Текст: Дмитрий Суханов

”

Составные полупроводники – технология следующего поколения в современной электронике. Давайте попробуем разобраться, где можно ее применить и какими будут затраты, а особенно – как эти затраты снизить.

Компьютеры, смартфоны и множество других устройств используют микроэлектронные компоненты – кремниевые чипы. Как следует из названия, эти чипы сделаны из кремния, элемента, который в изобилии содержится на нашей планете в песке. Используя этот дешевый элемент, можно производить очень много разных сложных устройств в больших количествах, поэтому 80 % полупроводниковых компонентов в мире применяют кремний в качестве основы – пластины, на которой в дальнейшем формируется то или иное устройство.

Оставшиеся 20 % компонентов используют составные полупроводники, которые объединяют два или более элементов из периодической таблицы, образуя различные соединения. Например, кремний (Si) и углерод (C) образуют карбид кремния (SiC), а галлий (Ga) и мышьяк (As) – арсенид галлия (GaAs). Составные полупроводники намного сложнее в производстве, чем кремний, но они обладают тремя очень важными свойствами для микроэлектроники, превосходящими кремний:

- мощность (электромобили, электронные устройства, преобразователи питания и т. д.);
- скорость (сотовая связь и беспроводной интернет (5G), радиолокация);
- фотоэлектрическое преобразование (фотоника, оптоволоконная связь, лазеры и многое другое).

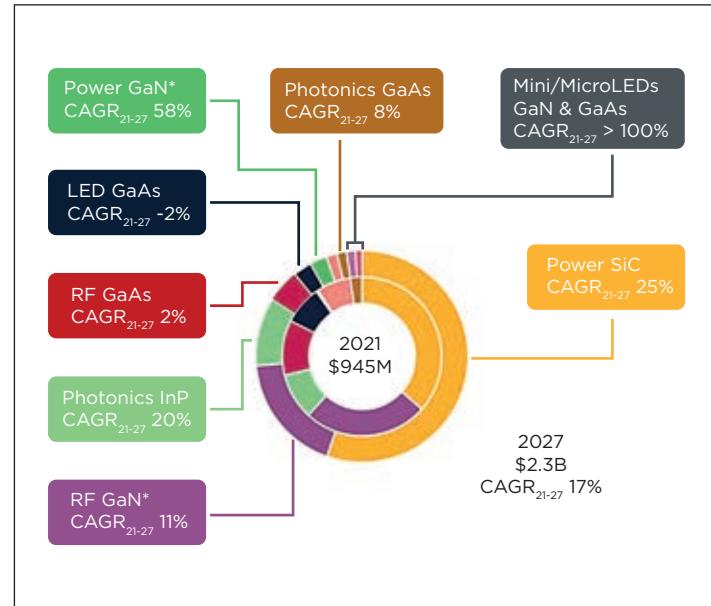
Давайте разберемся, где можно применять изделия, полученные на основе составных полупроводников, и что происходит на рынке.

Области применения составных полупроводников в основном включают транспорт, энергетику, связь, спецпромышленность, авиацию и т. д. Поскольку электроны в составных полупроводниках движутся намного быстрее, чем в кремнии, т. е. подвижность носителей заряда выше, то благодаря этому можно получить большую скорость обработки данных, более чем в 100 раз. При этом носители заряда в составных полупроводниках обладают следующими особенностями и преимуществами:

- могут работать при более низких напряжениях;
- излучают и воспринимают свет;
- устойчивы к высоким температурам;
- генерируют микроволны;
- потребляют лишь часть энергии, используемой текущими материалами для хранения, передачи и обнаружения данных.

Основными полупроводниковыми соединениями на рынке являются GaAs, GaN и SiC, среди которых SiC имеет наибольшую долю. Основные игроки рынка: Infineon, Texas Instruments, Nichia, NXP, Qorvo и ряд других компаний.

А теперь, после небольших вводных, перейдем к технологии, которая лежит в основе создания всех чипов на основе составных полупроводников.



1

Отрасль составных полупроводников по оценке Yole. Источник: Yolegroup.com

Осаждение металлической пленки золота

Нанесение металлической пленки из чистого золота имеет больше преимуществ, чем нанесение металлической пленки из меди, предоставляя:

- антиокислительную защиту и высокую коррозионную стойкость;
- более высокую эффективность рассеивания тепла;
- обеспечение более эффективного процесса бондинга пластин и слоев;
- более высокую электропроводность и меньшие потери, особенно в СВЧ-диапазоне;
- высокую стойкость к электромагнитному излучению.

По сравнению с другими процессами осаждения скорость осаждения гальванического золота на горизонтальную плоскость можно регулировать в соответствии с различными составами и характеристиками реагентов. Все это позволяет улучшить однородность покрытия, увеличивает однородность заполнения отверстий и снижает стоимость создания общего слоя пленки.

Давайте рассмотрим, какие еще существуют методы формирования золотой пленки и в чем их различия.

Чистая химическая реакция. Может осаждать максимум до 1 мкм толщины металла. Требует большого объема реагента при низкой скорости осаждения и высокой стоимости обработки в пересчете на один кристалл.

Испарение. Низкая скорость и неселективное осаждение. Плохой контроль осаждения металлической пленки и высокая стоимость обработки одного кристалла.

Гальваническое осаждение в вертикальной плоскости. Высокий расход реагента в пересчете на один



2

Стоимость гальванического нанесения Au

кристалл. Высокий расход ионов золота. Большой объем реагента. Низкая однородность получаемого покрытия на поверхности. Высокая стоимость обработки одного кристалла и низкий выход годных продукции.

Метод гальванического покрытия

Основная проблема существующего метода покрытия золотом в горизонтальной плоскости заключается в одновременном достижении однородности и выхода годных. Долгое время это было проблемой для технологов. Она заключается в том, что ионы комплекса золота движутся гораздо медленнее, чем ионы меди или других металлов. Поэтому небольшие различия в скорости жидкости для золотого покрытия на поверхности пластины приведут к разным скоростям покрытия по всей пластине и плохой однородности. Другие технологии для нанесения золотого покрытия использовали различные методы, чтобы попытаться сгладить или облегчить эти проблемы, но каждый метод достиг ограниченного успеха.

Коротко о каждом из них

Технология иммерсионного золочения контролирует скорость потока жидкости, подавая ее на пластину через сопло. В основе лежит «избегание» достижения предельной плотности тока, так как требуется медленное формирование покрытия, а турбулентность потока может привести к разной скорости нанесения покрытия и плохой равномерности по всей пластине.

Системы, использующие метод центрифугирования пластин и струйную подачу реагента, гарантируют более высокую скорость потока, однако это проблематично, поскольку золото по своей природе отличается от привычных меди и никеля. Постоянные линии тока

и направленные вихри устанавливаются при высоких скоростях вращения пластины, что приводит к плохой однородности всех характеристик.

Процесс гальванического осаждения в вертикальной плоскости ведет к высокому потреблению золота из-за его «выноса» с поверхности и плохой однородности каждой детали. Расход золота, растворенного в растворе, и ионов крайне высок. Из-за ряда факторов распределения поля в потоке электролита однородность всей детали будет крайне невысокой, а также серьезно сократит процессное окно, что приведет к уменьшению скорости нанесения покрытия и уменьшению выхода годных.

Как мы видим на **рис 2**, стоимость процесса гальванического нанесения золота растет из-за ряда мировых тенденций на драгоценные металлы.

Рассмотрим преимущества оборудования и технологического процесса осаждения золота в горизонтальной плоскости одного из наших партнёров, который доказал, что стоимость процесса можно сократить, а качество процесса повысить.

Основной принцип, принятый для оптимизации процесса осаждения золота в горизонтальной плоскости, – это использование компактных реакторов фонтанного типа, которые проводят процесс на одной пластине. Разработанная конструкция и отработанная технология обладают высокоточными возможностями осаждения гальванического покрытия, а также высокой повторяемостью процесса. Даже в условиях ручной загрузки и выгрузки пластин, если оборудование не полностью автоматическое, все показатели, влияющие на точность и повторяемость процесса, могут быть установлены и автоматически управляться с по-



3

Полуавтоматическая система гальванического осаждения

мощью программного обеспечения и рецептов. Это будет гарантировать, что условия процесса полностью соответствуют настройкам рецепта для выполнения высокоточных и повторяемых автоматизированных процессов. Более того, такое оборудование позволяет регистрировать и отслеживать все показатели процесса, такие как: ток, напряжение, поток электролита, температура и т. д. Оборудование может быть сконфигурировано с различными вспомогательными модулями (камерами) для совместимости с эффектом вакуумного предварительного смачивания перед процессом гальванического осаждения или очистки и сушки поверхности после процесса осаждения,

а также полностью сочетать производительность высокоточного автоматизированного оборудования в системе с малыми габаритами.

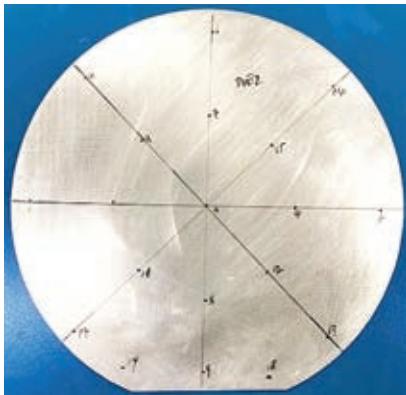
Рассмотрим оптимизацию процесса для достижения однородности покрытия поверхности золотом.

Оптимизация процесса осаждения золота для достижения однородности покрытия поверхности проводилась на различных процессах, таких как: формирование межуровневой металлизации, столбиковых выводов, мостовых межсоединений и просто равномерного покрытия обратной стороны пластины с учетом отверстий. Благодаря оптимизации процесса удалось получить неравномерность покрытия 2-3 % по пластине диаметром 150 мм и сокращение расхода золота на 10-12 % (как пример: для 12 мкм золотого столбикового вывода расход золота составил 2,33 г, а не 2,67 г как было до оптимизации).

Основная возможность оптимизации однородности покрытия поверхности пластины направлена на снижение расхода покрытия драгоценным металлом, что снижает затраты в целом. В дополнении к этому улучшена однородность покрытия по всей поверхности пластины, это позволило улучшить характеристики плоскостности и копланарности для обеспечения связи между всеми покрытыми выступами.

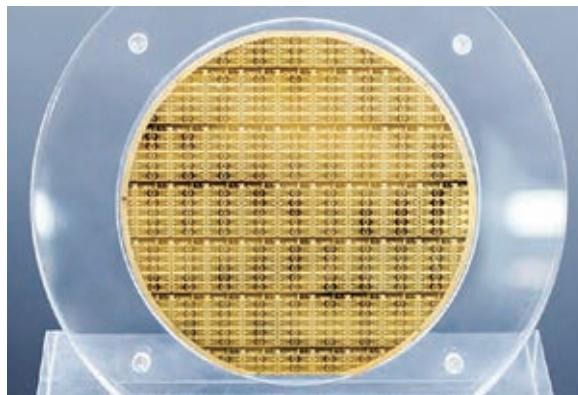
Далее была проведена оптимизация для улучшения однородности покрытия поверхности золотом обратной стороны пластины и оптимизация покрытия переходных отверстий на обратной стороне (BSV – Backside Via).

После проведённых оптимизаций процесса используемое оборудование позволило объединить уникальные технологии распределения электрического поля в потоке электролита и самого потока электролита, чтобы соответствовать сложнейшим требованиям к процессу гальванического покрытия обратной стороны платины и переходных отверстий. Также это дало возможность выйти за рамки технологий, до-



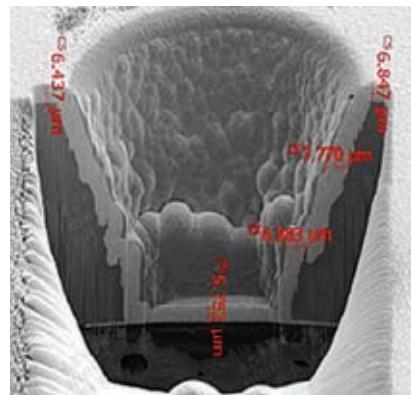
4

Обратная сторона пластины с золотым покрытием с точками измерения толщины слоя золота



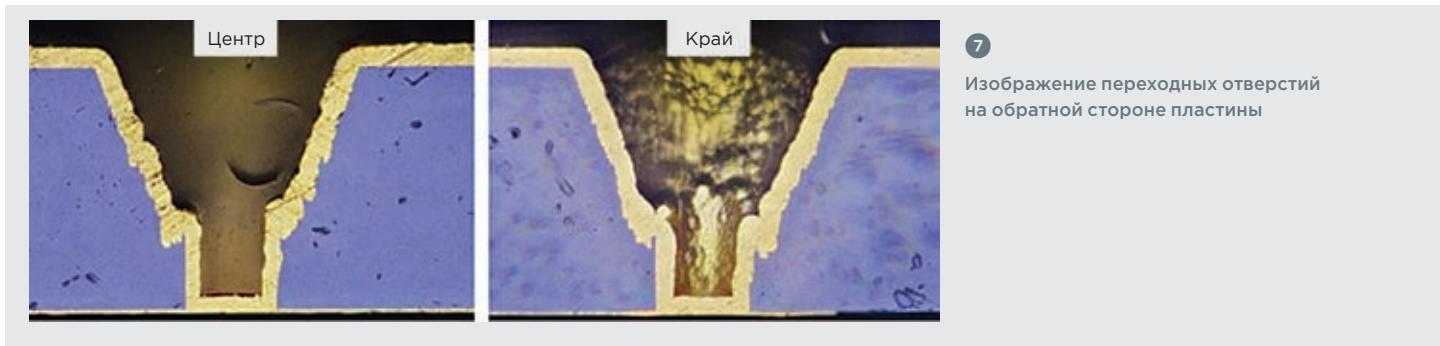
5

Пластина с лицевой стороны (со сформированной топологией)



6

Изображение переходного отверстия на обратной стороне пластины (FIB)



7

Изображение переходных отверстий на обратной стороне пластины

Т 1

Значения толщины слоя золота на обратной стороне пластины Ø150 мм

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
мкм	1,42	1,39	1,46	1,41	1,44	1,37	1,39	1,4	1,46	1,4	1,39	1,45	1,44	1,39	1,4	1,39	1,42	1,45	1,46

ступных на текущий момент, с учетом доступности материалов на рынке.

На рис. 4 и 5 показана исследуемая пластина после оптимизации процесса формирования слоя золота на обратной стороне, а на рис. 6 и 7 – изображения переходного отверстия с обратной стороны пластины в разрезе. В Т 1 отображены значения толщины покрытия в различных точках на пластине.

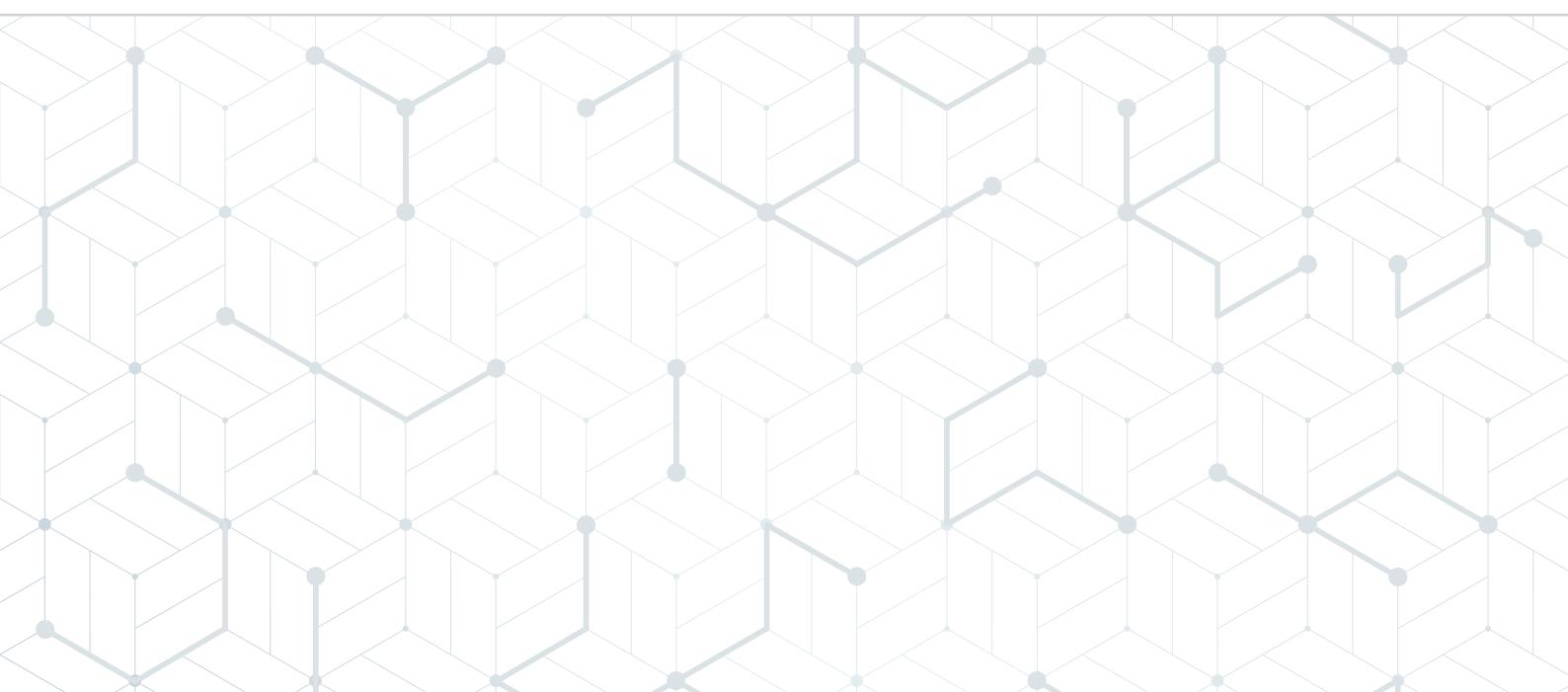
Параметр переходного отверстия:

- морфология отверстия: 30 × 60 мкм – верх отверстия, 20 × 40 мкм – низ отверстия, глубина отверстия 75 мкм;
- площадь покрытия поверхности: Ø6 дюймов: 1,18367 дм² (3 мм исключение краевой зоны), включая металл на поверхности, боковой стенке и дне отверстия;
- однородность покрытия поверхности: 5 %;

- состояние покрытия: >50 %, обеспечение толщины металлической пленки 2 мкм на дне отверстия;
- расход золота составил 0,9–0,95 г на пластину Ø6".

Используя уникальную технологию для снижения потерь осаждения золота на поверхности и увеличения толщины слоя металлической пленки, покрывающего дно переходного отверстия, удалось обеспечить значительную экономию затрат на золото при каждой обработке пластины с экономией затрат на золото до 275 юаней на одну пластину. □

Материалы, использованные в статье, подготовлены совместно с эксклюзивным партнером компании «Остек-ЭК», лидером на рынке процессов электрохимического осаждения. За более подробной информацией обращайтесь к автору материала.

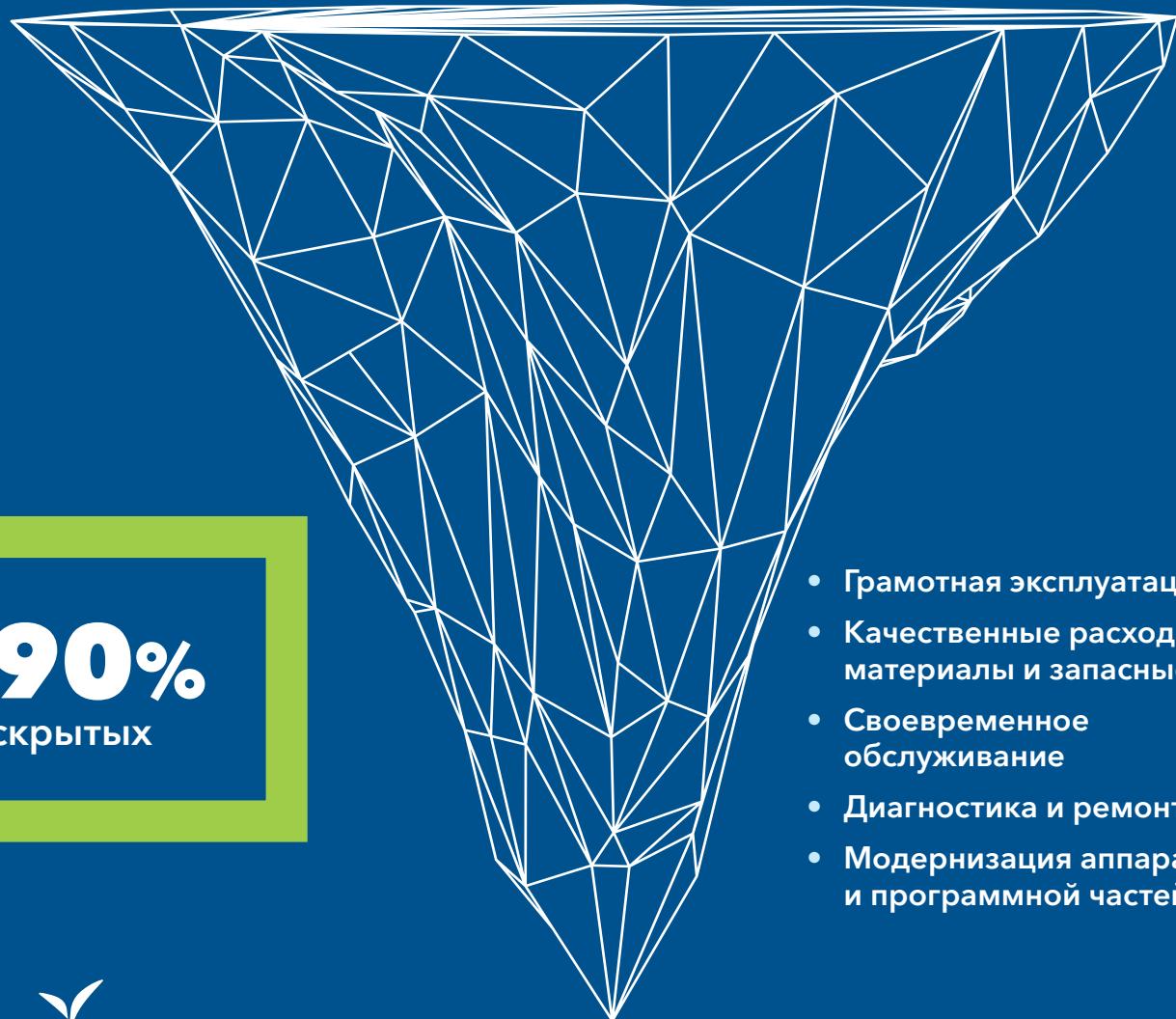
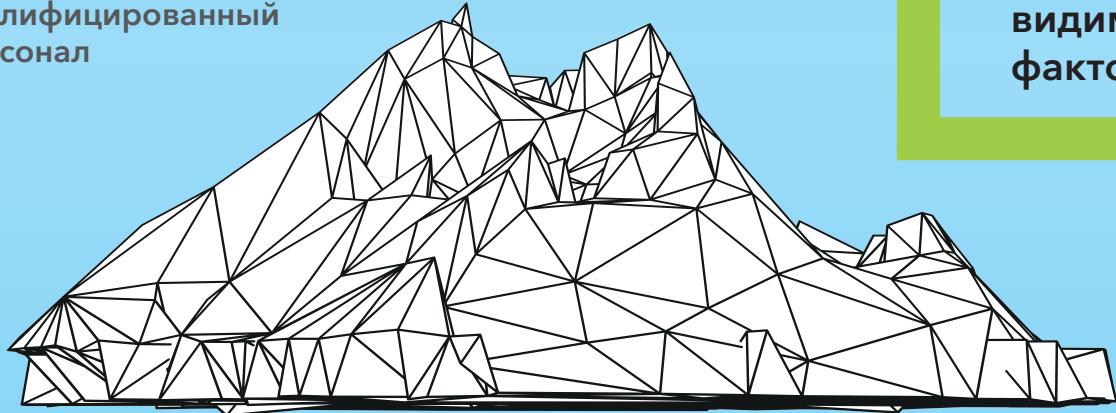


Ostec-Care

Независимость от скрытых проблем

- Качество оборудования и ПО
- Проект и конфигурация производственных процессов
- Квалифицированный персонал

10%
видимых
факторов



90%

скрытых

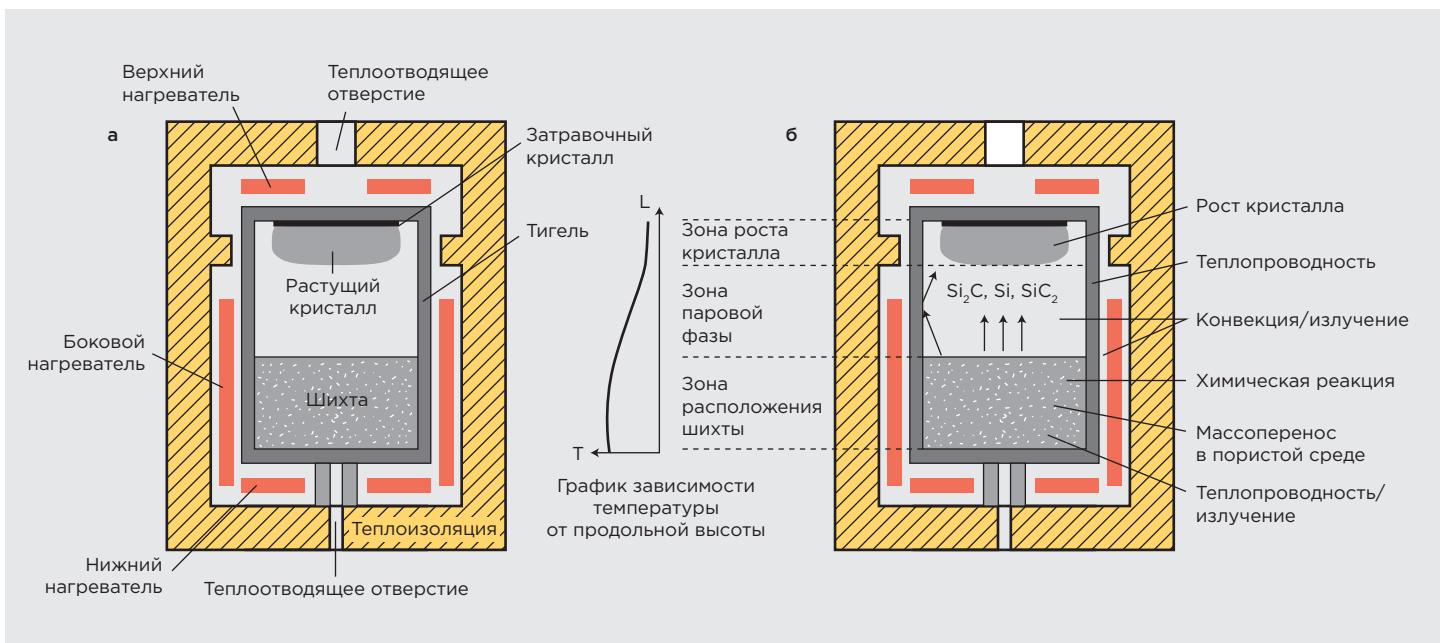
- Грамотная эксплуатация
- Качественные расходные материалы и запасные части
- Своевременное обслуживание
- Диагностика и ремонт
- Модернизация аппаратной и программной частей

Обзор результатов оптимизации теплового поля в установке выращивания моноцисталлов карбида кремния большого диаметра

Текст: Артем Белых

”

Моноцисталлы карбида кремния (SiC) большого диаметра с низкой дефектностью – ключевой материал для силовой и радиочастотной электроники. Их выращивают методом физического газофазного переноса (PVT), где критически важны контроль состава паровой фазы, температурного градиента и давления. В статье представлен обзор метода компьютерного моделирования теплового поля в установке с резистивным нагревом для роста 8-дюймовых кристаллов SiC; проводится анализ влияния конструкции нагревателей, теплоизоляции и других параметров на распределение температуры. Оптимизация конструкции установки позволяет достичь нужных температурных градиентов, обеспечивая стабильный рост кристаллов в условиях изменения их толщины и расхода шихты.



1

(а) Конструкция PVT-системы с резистивным нагревом; (б) Зоны с различными физическими процессами и особенностями тепломассопереноса.

Источник: Journal of Synthetic Crystals, 2022, Design and Thermal Optimization of Resistive Heating Systems for Bulk Silicon Carbide Crystal Growth By Jiazheng Lu, Hui Zhang, Lili Zheng, Yuan Ma, Depeng Song

Карбид кремния (SiC) – перспективный полупроводник с широкой запрещённой зоной, высокой теплопроводностью и устойчивостью к большим напряжениям, активно используемый в силовой и высокочастотной электронике, включая электромобили, системы телекоммуникации, энергетику. Однако высокая стоимость подложек SiC сдерживает массовое применение технологии.

Основной метод выращивания кристаллов SiC – физический газофазный перенос (PVT). Этот процесс сложен из-за необходимости точного контроля температуры, состава газовой фазы и тепловых градиентов. При увеличении диаметра кристаллов (до 8 дюймов и более) возникают проблемы: неравномерный нагрев, дефекты структуры и нестабильность роста.

В данной статье анализируются результаты исследования тепловых полей в PVT-установках для выращивания монокристаллов карбида кремния большого диаметра, представленные в работе «Design and Thermal Optimization of Resistive Heating Systems for Bulk Silicon Carbide Crystal Growth»; авторы статьи Jiazheng Lu, Hui Zhang, Lili Zheng, Yuan Ma, Depeng Song. Статья опубликована в журнале «Journal of Synthetic Crystals», Vol.51, №3 в 2022 году.

Принципы тепло- и массопереноса в процессе роста кристаллов методом PVT

На РИС 1а показана схема типичной PVT-установки для выращивания кристаллов SiC . В отличие от индукционного нагрева здесь используются расположенные вокруг тигля резистивные элементы, которые передают тепло

через излучение, что позволяет точнее контролировать температурное поле. При нагреве шихты (исходный материал) разлагается, образуя газообразные компоненты Si-C , которые переносятся к более холодной затравке в верхней части реактора, где происходит кристаллизация.

Ключевые зоны тепломассопереноса (РИС 1б):

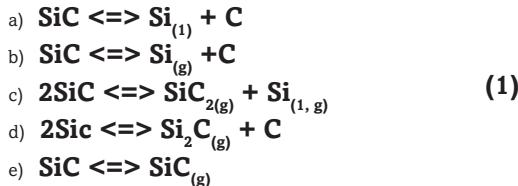
- Зона расположения шихты. Температурное распределение здесь критически важно – перегрев периферии ускоряет разложение шихты у стенок, а недостаточный нагрев центра приводит к неравномерному росту кристалла. Оптимальная температура (~2800 K) поддерживает баланс Si/C в газовой фазе, предотвращая образование избыточного углерода.
- Зона паровой фазы. Газообразные компоненты перемещаются к кристаллу под действием градиентов давления и температуры. Взаимодействие с графитовыми стенками тигля может изменять состав газовой среды.
- Зона роста кристалла. Равномерность температуры здесь определяет качество кристалла – локальные перепады приводят к дефектам (дислокации, микропоры). Небольшой избыток кремния в газовой фазе улучшает рост, тогда как избыток углерода провоцирует образование дефектов.

По мере расходования шихты её структура меняется: периферийные области становятся более пористыми, что увеличивает газопроницаемость, но снижает содержание кремния в паровой фазе. На поздних стадиях процесса спекание шихты ещё сильнее смещает баланс

в сторону углерода, и это требует точного управления температурными режимами.

В процессе роста кристаллов SiC методом PVT газовая фаза в тигле содержит различные соединения кремния и углерода (Si, SiC, Si₂C, SiC₂ и др.). Их состав зависит от температуры и реакций между продуктами разложения шихты и графитовыми стенками тигля.

Ключевые химические реакции:



Эти процессы определяют баланс Si/C в газовой фазе, что критически влияет на качество выращиваемого кристалла.

Моделирование показало, что оптимальный температурный диапазон для роста кристаллов SiC методом PVT лежит между 2546 К и 2900 К. При этом:

- ниже 2546 К формируется кремний-обогащенная среда, где процесс контролируется реакцией (b);
- в диапазоне 2546-2900 К ключевую роль играет реакция (c);
- выше 2900 К начинается нежелательная конденсация компонентов.

Основными активными компонентами газовой фазы, обеспечивающими рост кристалла, являются SiC₂ и Si, тогда как Si₂C играет второстепенную роль. Аргон служит транспортным газом, не участвуя в химических реакциях.

Исследование сосредоточено на расчете температурных распределений в установке для выращивания кристаллов SiC. В модели учитываются ключевые механизмы теплопередачи (тепловое излучение, теплопроводность, конвективные потоки газа исключены как незначительные), основные параметры системы: геометрия тигля и нагревателей, свойства материалов, используемых в конструктиве установки.

Для расчетов был использован программный комплекс ANSYS.

Моделирование и оптимизация теплового поля в установке выращивания монокристаллов карбида кремния большого диаметра

Рассмотрим оптимизацию тепловых полей в установках резистивного нагрева для выращивания 200 мм кристаллов и влияние ключевых параметров: геометрия системы (размеры нагревателей и теплоотводящих элементов), температурные режимы. Разработанная конструкция обеспечивает равномерное радиальное распределение температуры, оптимальный продольный градиент между кристаллом и шихтой.

Проектирование систем выращивания кристаллов должно решать пять основных задач, таких как:

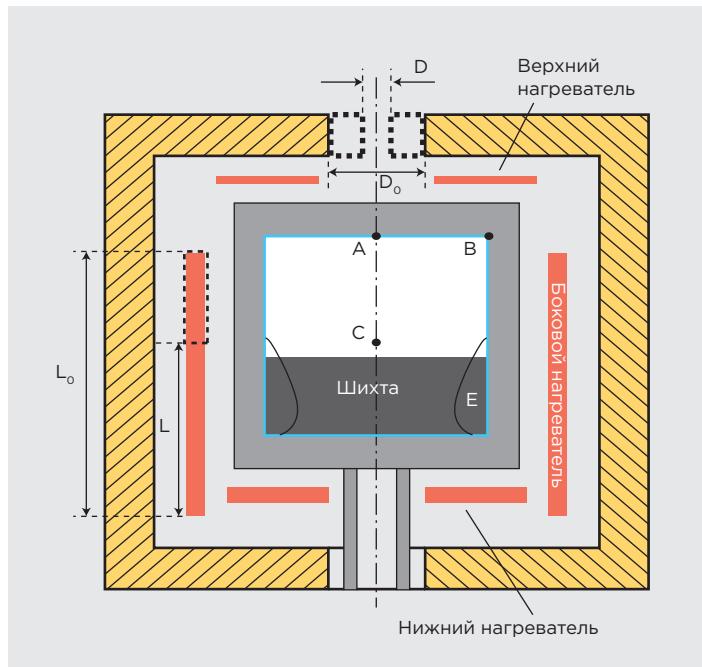
1. Обеспечение равномерного температурного поля с контролируемым радиальным градиентом на поверхности кристалла.
2. Поддержание оптимального продольного градиента между шихтой и кристаллом.
3. Предотвращение спекания шихты за счет оптимизации перепада температуры в ее объеме.
4. Стабилизация газовых потоков.
5. Динамическая регулировка температурного поля для систем, в которых наблюдается рост толщины кристалла и расходование шихты.

Эксперименты показывают, что радиальный градиент температуры определяет качество поверхности кристалла, продольный градиент влияет на скорость его роста.

Для установки роста кристаллов диаметром 200 мм (схема на РИС 2) проведено численное моделирование с базовыми параметрами:

- диаметр теплоотвода: 60 мм;
- температура нагревателя: 2238 °C;
- длина бокового нагревателя: 420 мм.

Выполнено четыре численных эксперимента с анализом радиальных и продольных температурных градиентов, локальных экстремумов температуры. Результаты представлены в ТАБЛИЦА 1.



2

PVT-система с основными контрольными точками:
A - центр поверхности кристалла, B - край поверхности кристалла,
C - центр поверхности шихты, E - краевая зона шихты. Исследуются
диаметр теплоотвода (D), длина нагревателя (L). Источник: Journal of
Synthetic Crystals, 2022, Design and Thermal Optimization of Resistive Heating
Systems for Bulk Silicon Carbide Crystal Growth By Jiazheng Lu, Hui Zhang, Lili
Zheng, Yuan Ma, Depeng Song

Т 1

Основные параметры моделирования и их вариации

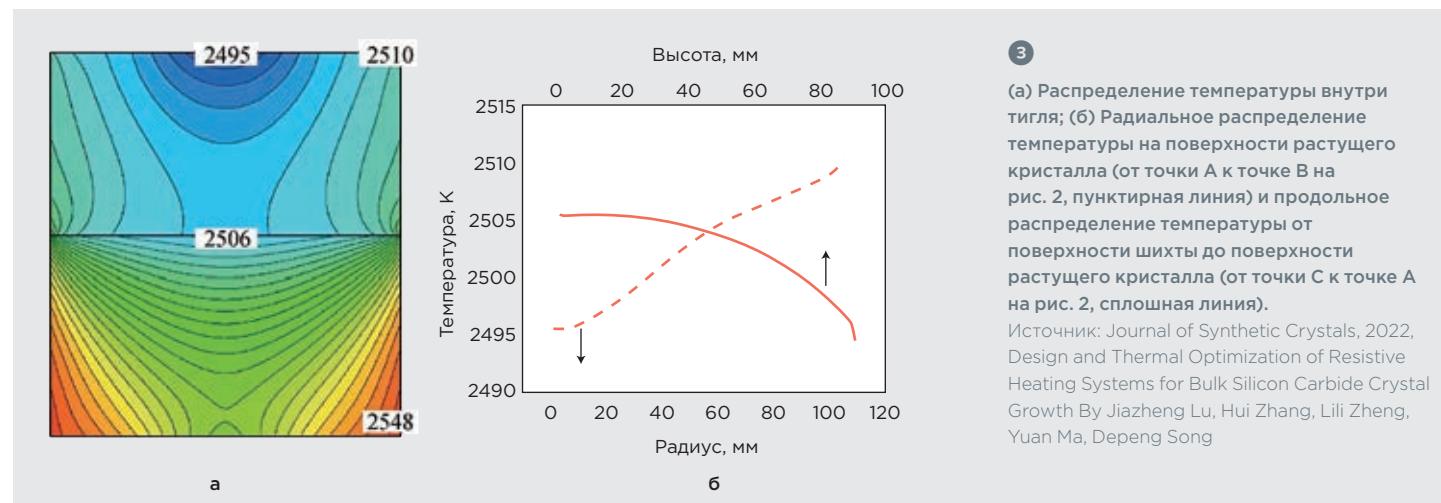
НОМЕР ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА	АНАЛИЗИРУЕМЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ	КОНТРОЛИРУЕМЫЕ ПЕРЕМЕННЫЕ ПАРАМЕТРЫ СИСТЕМЫ	ОЖИДАЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ
1	Базовый расчетный сценарий	$T_0 = 2553 \text{ K}$, $D_0 = 60 \text{ мм}$, $L_0 = 420 \text{ мм}$	
2.1, 2.2	Влияние температуры нижнего нагревателя (T) на распределение температуры в шихте	$T_1 = T_0 - 20 \text{ K}$, $T_2 = T_0 - 30 \text{ K}$	Снижение температуры нижнего нагревателя приводит к пропорциональному уменьшению температуры в нижней части шихты
3.1, 3.2	Влияние диаметра верхнего охлаждающего отверстия (D) на распределение температуры в тигле	$D_1 = 0,5*D_0$, $D_2 = 0,25*D_0$	Увеличение диаметра верхнего охлаждающего отверстия приводит к возрастанию температурного градиента между поверхностями растущего кристалла и шихты
4.1, 4.2	Влияние длины бокового нагревателя (L) на температурное распределение в тигле	$L_1 = 0,75*L_0$, $L_2 = 0,6*L_0$	Увеличение длины бокового нагревателя приводит к повышению температуры в объеме тигля

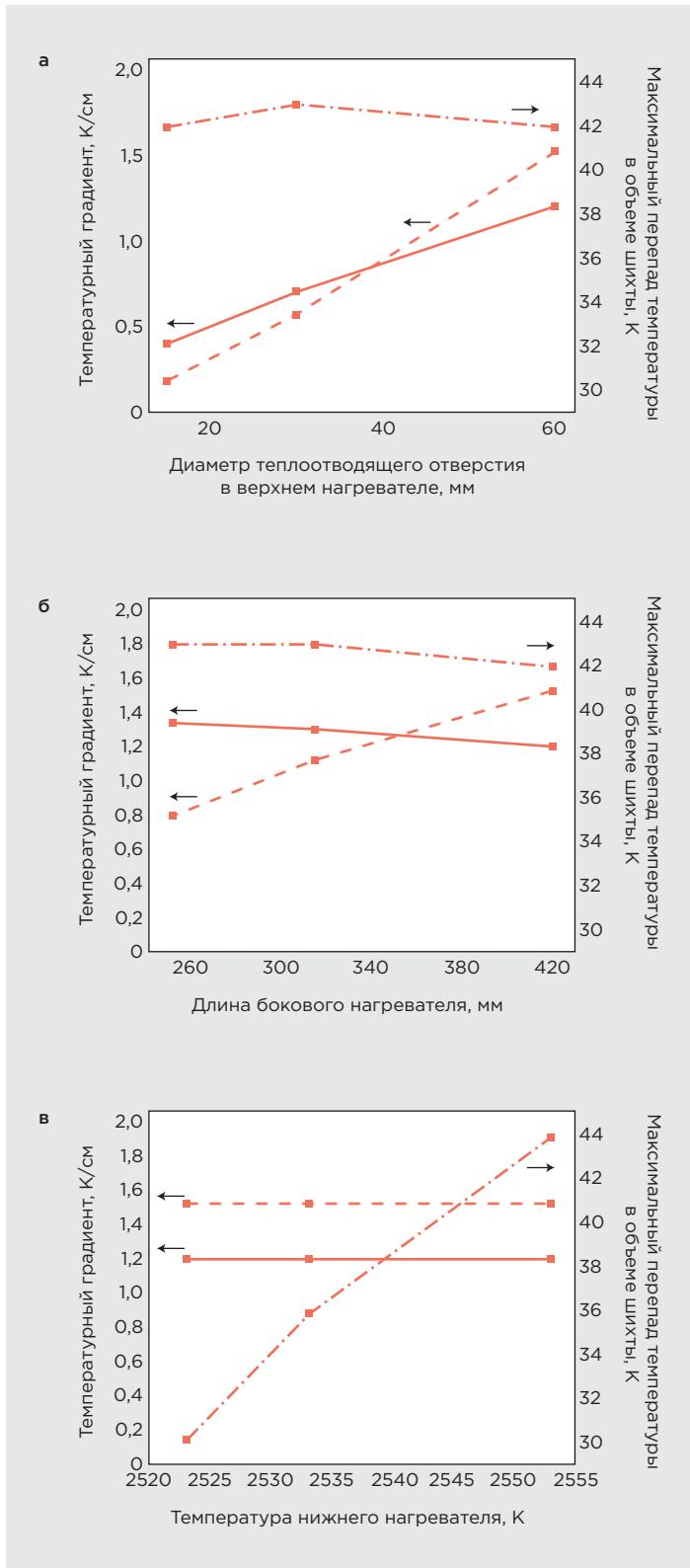
На РИС 3а показано распределение температуры в тигле для численного эксперимента № 1 (он же – базовый расчетный сценарий). Температура в центре поверхности растущего кристалла составляет 2495 К, на краю – 2510 К, что соответствует перепаду 15 К и градиенту 1,52 К/см. В центре поверхности шихты зафиксирована температура 2506 К с продольным градиентом 1,2 К/см. Максимальная температура в объеме шихты (2548 К) наблюдается в нижней боковой области.

РИС 3б демонстрирует радиальное распределение температуры на поверхности растущего кристалла (пунктирная линия) и продольное распределение температуры от поверхности шихты до поверхности растущего кристалла от точки С к точке А.

Анализ показывает для поверхности растущего кристалла от центра (А) к краю (В) – рост температуры с переменным градиентом, от центра поверхности шихты (С) к центру поверхности растущего кристалла (А) – снижение температуры с уменьшающимся градиентом.

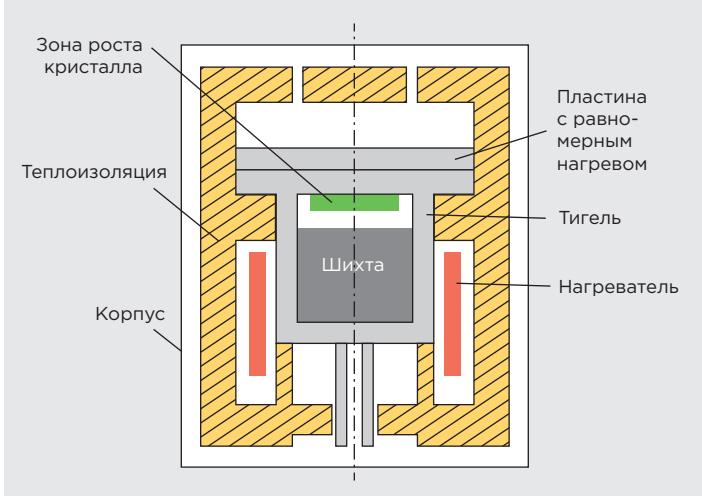
На РИС 4 показано, как изменяются температурные градиенты при варьировании диаметра охлаждающего отверстия, длины бокового нагревателя, температуры нижнего нагревателя для численных экспериментов № 2, 3, 4. Штриховой, сплошной и штрихпунктирной линиями обозначены соответственно радиальный градиент на поверхности растущего кристалла, продольный градиент между поверхностями шихты и растущего кристалла, максимальный перепад темпе-





4

Влияние конструктивных и технологических параметров на радиальный температурный градиент на поверхности растущего кристалла (пунктирная линия), продольный температурный градиент между поверхностями растущего кристалла и шихты (сплошная линия) и максимальный перепад температуры в объеме шихты (штрихпунктирная линия): (а) изменение диаметра верхнего отверстия теплоотвода; (б) изменение длины бокового нагревателя; (в) изменение температуры нижнего нагревателя. Источник: Journal of Synthetic Crystals, 2022, Design and Thermal Optimization of Resistive Heating Systems for Bulk Silicon Carbide Crystal Growth By Jiazheng Lu, Hui Zhang, Lili Zheng, Yuan Ma, Depeng Song



5

Оптимизированная конструкция установки для роста монокристаллов.

Источник: Journal of Synthetic Crystals, 2022, Design and Thermal Optimization of Resistive Heating Systems for Bulk Silicon Carbide Crystal Growth By Jiazheng Lu, Hui Zhang, Lili Zheng, Yuan Ma, Depeng Song

ратур в шихте. В **табл. 2** приведены сводные данные по градиентам для всех четырех случаев.

Анализ температурных градиентов (**рис. 4**) выявил ключевые закономерности. Уменьшение диаметра охлаждающего отверстия на 50-75 % приводит к значительному снижению радиального (на 62-87 %) и продольного (на 40-66 %) градиентов, обеспечивая более равномерное охлаждение, но ограничивая формирование необходимого продольного градиента температуры. Сокращение длины бокового нагревателя на 25-40 % демонстрирует противоположный эффект: радиальный градиент уменьшается на 26-47 %, тогда как продольный незначительно возрастает (на 8-11 %). При этом повышение температуры нижнего нагревателя на 30 К увеличивает перепад температур в шихте на 35 К, практически не влияя на градиенты в зоне роста кристалла.

Полученные результаты указывают на необходимость комплексного подхода при проектировании системы. Оптимальные параметры достигаются балансом между размерами охлаждающего отверстия и нагревательных элементов: уменьшение диаметра отверстия снижает радиальный градиент, но требует коррекции длины бокового нагревателя для поддержания достаточного продольного градиента. Температура нижнего нагревателя остается эффективным инструментом управления тепловыми процессами в шихте без воздействия на зону роста кристалла. Такая параметрическая настройка позволяет минимизировать дефекты кристаллической структуры при сохранении высокой скорости роста.

При выращивании кристаллов диаметром 8 дюймов традиционное увеличение центрального теплоотводящего отверстия приводит к переохлаждению центральной зоны и нарушению температурных градиентов. Для решения этой проблемы структура установки была оптимизирована: внедрена система с кольцевым

Т 2

Анализируемые параметры

НОМЕР ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА	РАДИАЛЬНЫЙ ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ГРАДИЕНТ НА ПОВЕРХНОСТИ РАСТУЩЕГО КРИСТАЛЛА, К/СМ	ПРОДОЛЬНЫЙ ГРАДИЕНТ ТЕМПЕРАТУРЫ МЕЖДУ ПОВЕРХНОСТЯМИ РАСТУЩЕГО КРИСТАЛЛА И ШИХТЫ, К/СМ	МАКСИМАЛЬНЫЙ ПЕРЕПАД ТЕМПЕРАТУРЫ В ОБЪЕМЕ ШИХТЫ, К
1	1,52	1,2	42
2.1	1,52	1,2	35
2.2	1,52	1,2	30
3.1	0,57	0,7	43
3.2	0,19	0,4	42
4.1	1,12	1,3	43
4.2	0,8	1,34	43

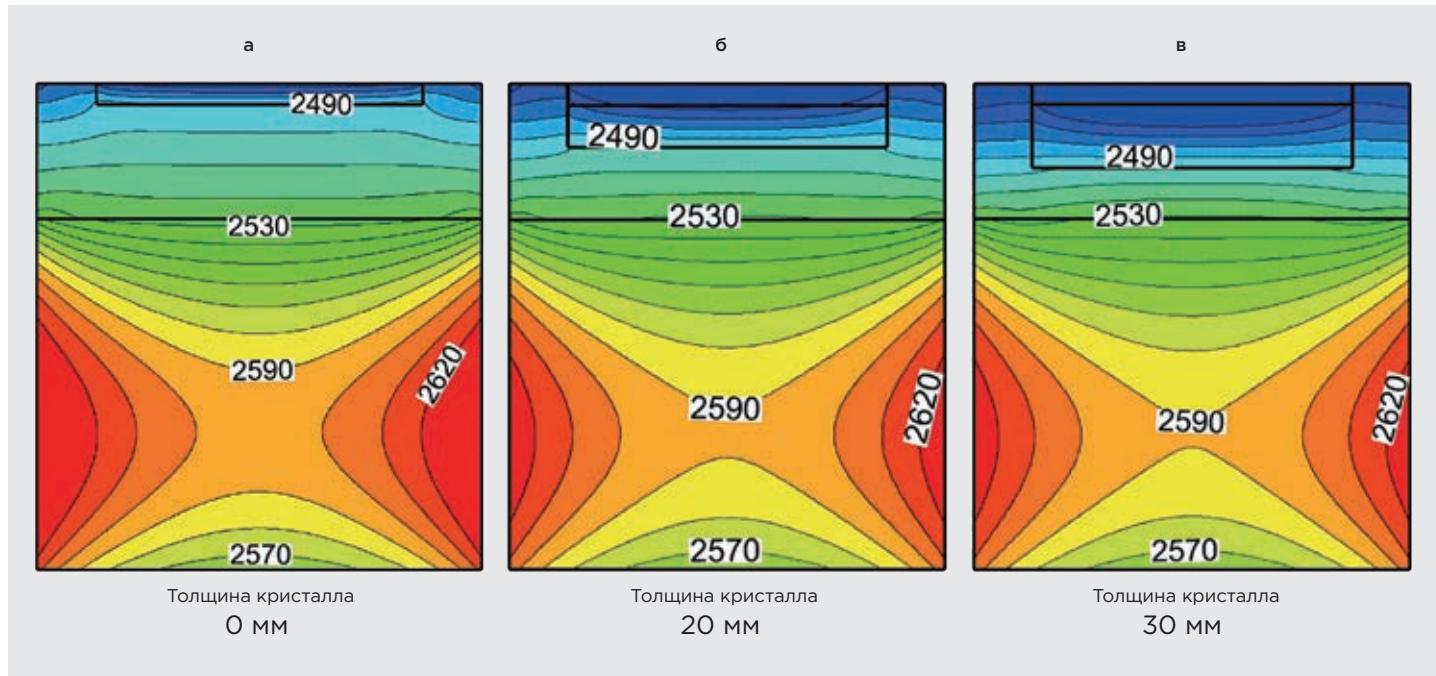
расположением ряда теплоотводящих отверстий для равномерного радиального распределения температуры. Конструкция дополнена теплоизолирующими элементами и плитой с равномерным нагревом для оптимизации теплового распределения (рис 5). Смещённые вниз боковые нагреватели мощностью 8-10 кВт в сочетании с уменьшенным расстоянием между шихтой и кристал-

лом создают стабильный направленный тепловой поток и увеличивают продольный градиент до 15-20 К/см. В результате в тигле диаметром 210 мм достигается оптимальный баланс между равномерностью нагрева и необходимыми температурными перепадами, критически важными для роста качественных кристаллов большого диаметра.

Т 3

Анализируемые параметры

НОМЕР ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА	НАЗНАЧЕНИЕ	УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА	ОЖИДАЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ
5	Подтверждение оптимального распределения температур в системе перед началом процесса кристаллизации	Исходное состояние (толщина кристалла 0 мм) при постоянной мощности нагревательных элементов 8,5 кВт (в этом и во всех последующих экспериментах)	Наблюдается малый радиальный температурный градиент в затравочном кристалле, значительный продольный температурный градиент между поверхностями шихты и растущего кристалла, а также равномерное распределение температуры в объеме шихты
6.1, 6.2, 6.3	Изучение влияния толщины кристалла на распределение температуры в тигле	Толщины кристаллов: 10, 20 и 30 мм	Стабильный радиальный температурный градиент в кристалле и постоянная разница температур между поверхностями шихты и растущего кристалла
7.1, 7.2	Анализ влияния расхода шихты на распределение температурного поля в тигле в установленных временных точках технологического цикла	Временные точки роста кристалла: по истечении 27 часов достигнута толщина 10 мм, по истечении 52 часов достигнута толщина 20 мм	Расход шихты приводит к усилиению радиационного теплообмена в шихте, что вызывает повышение температуры и улучшение равномерности её распределения в объеме исходного материала

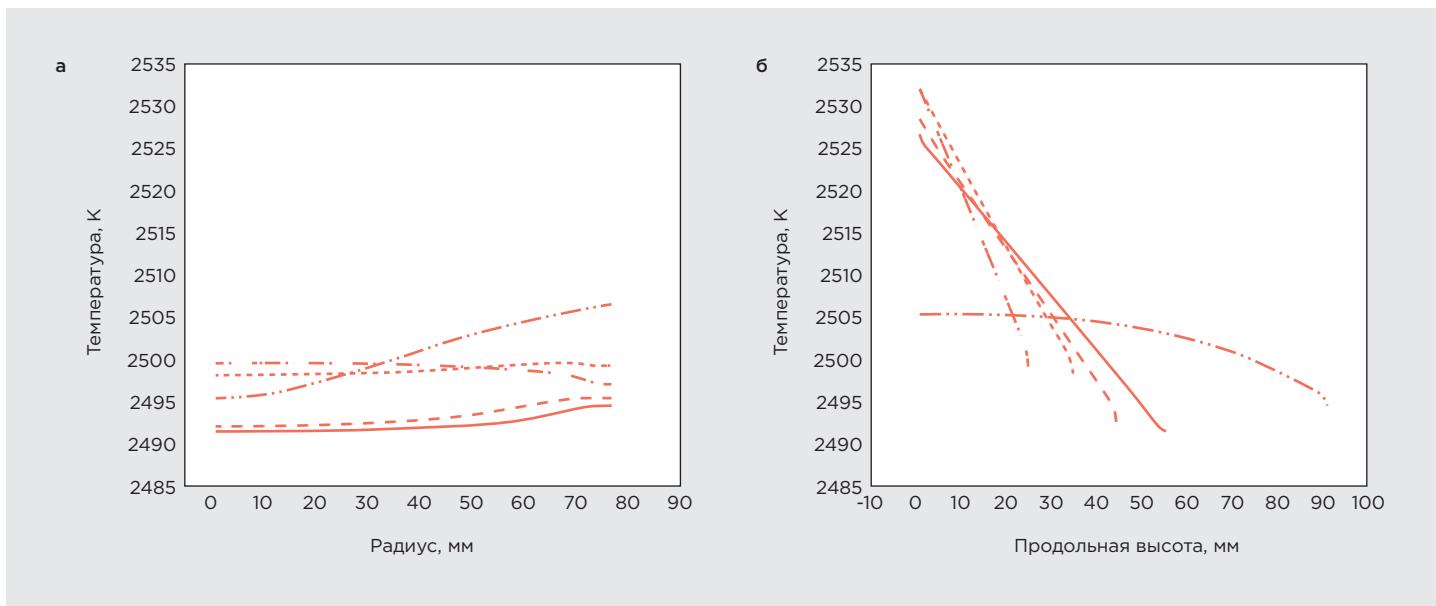


6

Распределение температуры (К) в оптимизированной системе при разных режимах роста кристалла. Источник: Journal of Synthetic Crystals, 2022, Design and Thermal Optimization of Resistive Heating Systems for Bulk Silicon Carbide Crystal Growth By Jiazheng Lu, Hui Zhang, Lili Zheng, Yuan Ma, Depeng Song

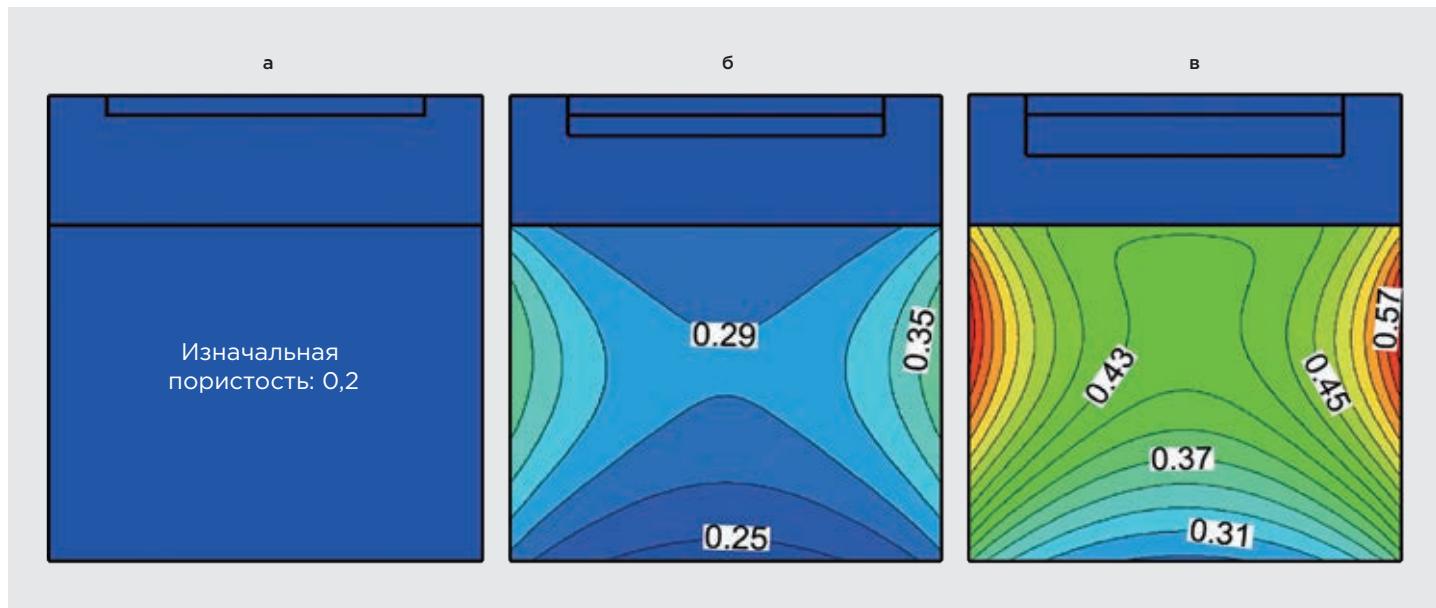
Компьютерное моделирование позволило проанализировать ключевые аспекты технологического процесса. Для оптимизированной конструкции в серии из трех численных экспериментов исследовались: распределение температур до начала роста кристалла (эксперимент № 5), тепловые режимы для кристаллов разной толщины (эксперимент № 6) и влияние расход-

да шихты на температурное поле (эксперимент № 7). Все параметры расчетов систематизированы в **табл. 3**, где представлены детальные условия каждого численного эксперимента. Полученные данные показывают, как изменения конструктивных и технологических параметров влияют на тепловые характеристики системы.



7

Распределение температуры: (а) Радиальное на поверхности растущего кристалла; (б) Продольное между поверхностями шихты и растущего кристалла для систем с толщиной кристалла 0 мм (сплошная линия), 10 мм (пунктир), 20 мм (точечная линия), 30 мм (штрихпунктир) и до оптимизации (численный эксперимент № 1, двойной штрихпунктир). Источник: Journal of Synthetic Crystals, 2022, Design and Thermal Optimization of Resistive Heating Systems for Bulk Silicon Carbide Crystal Growth By Jiazheng Lu, Hui Zhang, Lili Zheng, Yuan Ma, Depeng Song



8

Пространственное распределение пористости шихты: (а) Начальное состояние (0 ч, толщина кристалла 0 мм); (б) Промежуточная стадия (27 ч, толщина 10 мм); (в) Завершающая стадия (54 ч, толщина 20 мм). Источник: Journal of Synthetic Crystals, 2022, Design and Thermal Optimization of Resistive Heating Systems for Bulk Silicon Carbide Crystal Growth By Jiazheng Lu, Hui Zhang, Lili Zheng, Yuan Ma, Depeng Song

Численные эксперименты № 5 и 6 показывают распределение температуры в тигле (рис 6). На поверхности растущего кристалла наблюдается равномерный радиальный нагрев, но при этом сохраняется значительный продольный градиент между шихтой и кристаллом. При увеличении толщины кристалла до 20–30 мм радиальное распределение температуры на поверхности кристалла остается стабильным, с небольшим ростом абсолютных значений. Перепад температур между поверхностями растущего кристалла и

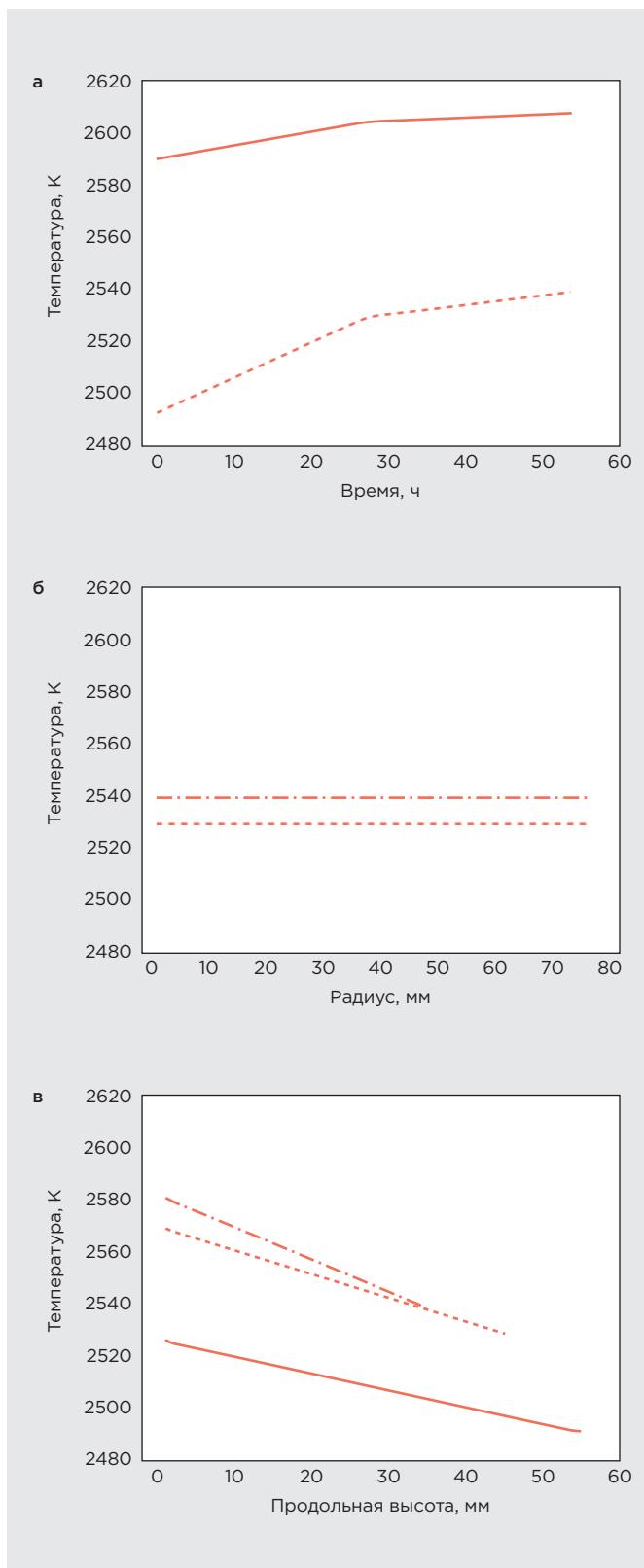
шихты почти не меняется, но из-за сокращения расстояния продольный градиент увеличивается.

Оптимизированная система обеспечивает более равномерное радиальное распределение температуры на границе роста с минимальными градиентами, сохраняя при этом высокий продольный градиент (рис 7). По сравнению с исходной конфигурацией (численный эксперимент № 1) в оптимизированном варианте достигается лучшая равномерность нагрева и увеличенный температурный градиент между поверхностями кристалла и шихты.

Т 4

Анализируемые параметры

НОМЕР ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА	РАДИАЛЬНЫЙ ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ГРАДИЕНТ НА ПОВЕРХНОСТИ РАСТУЩЕГО КРИСТАЛЛА, К/СМ	ПРОДОЛЬНЫЙ ГРАДИЕНТ ТЕМПЕРАТУРЫ МЕЖДУ ПОВЕРХНОСТИМИ РАСТУЩЕГО КРИСТАЛЛА И ШИХТЫ, К/СМ	МАКСИМАЛЬНЫЙ ПЕРЕПАД ТЕМПЕРАТУРЫ В ОБЪЕМЕ ШИХТЫ, К
1	1,52	1,2	42
5	0,28	6,7	90
6.1	0,27	8	88
6.2	0,25	10,3	86
6.3	0,26	14,2	84
7.1	0,27	8,3	50
7.2	0,27	10,5	40



9

(а) Зависимость средней температуры поверхности растущего кристалла (пунктирная линия) и средней температуры шихты (сплошная линия) от времени; (б) Радиальное распределение температуры на поверхности растущего кристалла; (в) Продольное распределение температуры между поверхностями шихты и растущего кристалла в моменты времени 0 ч (сплошная линия), 27 ч (пунктирная линия) и 54 ч (штрихпунктирная линия). Источник: Journal of Synthetic Crystals, 2022, Design and Thermal Optimization of Resistive Heating Systems for Bulk Silicon Carbide Crystal Growth By Jiazheng Lu, Hui Zhang, Lili Zheng, Yuan Ma, Depeng Song

РИС 8 показывает, как меняется пористость шихты по мере её расходования. В пристеночной области тигля материал расходуется быстрее, чем у дна. При высоких температурах в тигле, где основной механизм теплообмена – излучение, рост пористости увеличивает эффективную теплопроводность шихты. Рисунок иллюстрирует постепенный нагрев шихты и поверхности растущего кристалла. В разные моменты времени (РИС 8а, 8б и 8в) радиальное распределение температуры на кристалле остаётся равномерным, с перепадом около 40 К между шихтой и кристаллом. По мере роста толщины кристалла продольный градиент температуры увеличивается.

В Т4 представлены результаты оптимизации теплового режима. В новой схеме установки радиальный градиент на поверхности кристалла уменьшился на 81 %, а продольный вырос в 5 раз. При росте кристалла радиальный градиент стабилизировался на уровне 0,25-0,28 К/см, а перепад температур между шихтой и кристаллом составил 36-38 К.

Повышение пористости шихты увеличило её теплопроводность, снизив максимальный перепад температур с 90 до 40 К. При этом продольный градиент вырос на 54 %, сохранив стабильный радиальный (~0,27 К/см).

Оптимизированная система обеспечила нужные параметры – минимальный радиальный и значительный продольный градиенты. Однако остаются нерешенные вопросы, касающиеся распределения температуры в шихте и равномерности газовых потоков, они требуют дополнительного исследования.

Рост 8-дюймовых кристаллов карбида кремния требует точного контроля температурных градиентов. Моделирование показало, что конструкция с теплоотводящими отверстиями, плитой с равномерным нагревом и теплоизоляционными перегородками позволяет поддерживать малый радиальный градиент на поверхности растущего кристалла (0,25-0,28 К/см) при сохранении высокого продольного градиента (до 14,2 К/см) между шихтой и кристаллом.

Проведенное моделирование выявило важный эффект: температура в тигле значительно возрастает в процессе роста кристалла и расходования шихты. Это говорит также о необходимости проработки адаптивного управления мощностью нагревателей. Особое внимание при работе с крупными кристаллами следует уделять деталям конструкции установки, что открывает перспективы для дальнейших исследований по оптимизации тепловых режимов. ■

Использованные материалы

- «Design and Thermal Optimization of Resistive Heating Systems for Bulk Silicon Carbide Crystal Growth» By Jiazheng Lu, Hui Zhang, Lili Zheng, Yuan Ma, Depeng Song, Journal of Synthetic Crystals, 2022, Vol.51, №3

Нужна **НОВАЯ**
производственная линия?

С **Остек-ЭК**
всё сложится!



**Сервисно-инжиниринговая
служба Остек-ЭК**

- 01** Восстановление и модернизация оборудования
- 02** Обслуживание и запасные части
 - запасные части
 - годовой сервисный контракт
 - плановое ТО
- 03** Диагностика и ремонт
- 04** Аудит
- 05** Отработка технологии
- 06** Обучение специалистов

>3000
заказчиков в России и СНГ

>1200
единиц инсталлированного
оборудования

>60
сервисных инженеров,
опыт ведущих
инженеров - 20 лет



Ostec-ЭК | Группа компаний Остек

Оборудование и сервис для микроэлектронных производств
ostec-micro.ru | micro@ostec-group.ru | +7 (495) 788-44-42

Прямой гидрофильный бондинг алмаза (100) на подложку с напылением из SiO_2

Текст: Арсений Губкин

”

Алмаз – перспективный материал для квантовых технологий и экстремальной электроники. Спиновые центры (NV, SnV) в алмазе обладают длительной спиновой когерентностью, возможностью оптического считывания, высокой рабочей температурой и совместимостью с наноструктурами, что делает их ключевыми для квантовых применений.

SnV-центры дополнительно отличаются пониженной чувствительностью к шумам. Благодаря превосходным электронно-тепловым свойствам (высокая напряженность пробоя, подвижность носителей, теплопроводность) алмаз идеален для мощных устройств с эффективным теплоотводом, обладает выдающимися оптическими и механическими характеристиками.

Несмотря на перспективность, интеграция алмазных систем, особенно в квантовых технологиях, затруднена из-за отсутствия подходящих подложек. Эпитаксиальный рост или осаждение высококачественного монокристаллического алмаза сложны, а коммерческие НРНТ-пластины имеют малые размеры (менее сантиметра), что ограничивает современные алмазные квантовые устройства.

Для квантовой фотоники критичны два фактора: качество поверхности (дефекты или захваченные заряды ухудшают оптические свойства спиновых кубитов и снижают производительность системы) и необходимость интеграции фотонных устройств. Последнее требует алмазных подложек на изоляторе (DOI, Diamond-on-Insulator).

Вызовы создания алмазных подложек на изоляторе (DOI) методом бондинга

Для масштабируемой интеграции в квантовых технологиях и силовой электронике DOI-подложки, создаваемые методами бондинга, могут стать ключевым решением. Методы бондинга обычно классифицируют в зависимости от использования промежуточных материалов/слоев: прямой бондинг и бондинг с использованием дополнительного слоя. Для соединения алмазных пластин к другим подложкам применялись различные технологии бондинга, включая: Бондинг с активной поверхностью, Атомно-диффузионный бондинг, Термокомпрессионный бондинг, Адгезивный бондинг, Металлический бондинг, Бондинг с активацией поверхности плазмой, Прямой бондинг, Гидрофильный прямой бондинг.

Обзор методов прямого бондинга, используемых для алмазных подложек, представлен в **Т 1**. Большинство из них может приводить к значительным проблемам на границе раздела, таким как аморфизация, металлизация, образование дефектов.

Эти недостатки делают бондинг непригодными для сложных процессов крупномасштабной 3D-интеграции и квантовых применений.

Перспективы прямого бондинга для создания DOI-структур

Методы прямого бондинга наиболее перспективны для создания подложек типа DOI, необходимых для алмазных квантовых систем на чипе. В других опытах было продемонстрировано, что гидроксилированная поверхность алмаза (111) и подложки Si или SiO₂/Si могут химически соединяться через реакцию дегидратации. Однако предыдущие исследования ограничивались использованием исключительно гладких (<0,5 нм) алмазных подложек (111) и применением термически выращенных или естественно выращенных слоев SiO₂ на границе раздела. Следует отметить, что монокристаллический алмаз (100) более доступен и лучше подходит, особенно для групповых IV центров окраски в алмазе,

таких как SnV-центр. Также монокристаллический алмаз (111) имеет еще меньшие размеры из-за резки вдоль плоскости (111) алмазных пластин (100). Термически выращенный SiO₂ требует высокотемпературных процессов, что ограничивает применение, например, для гетерогенной интеграции алмаза на термоочувствительные материалы.

Результаты настоящего исследования

В исследовании достигнуто прямое гидрофильное соединение алмазных подложек (100) со слоями SiO₂, выращенными методом PECVD на кремниевых пластинах, путем оптимизации шероховатости поверхности алмаза. Дополнительно был исследован химический состав поверхности алмаза после обработки Пираньей и проанализировано влияние условий обработки на прочность сдвига после бондинга.

Экспериментальная методика

Экспериментальный процесс включал следующие этапы:

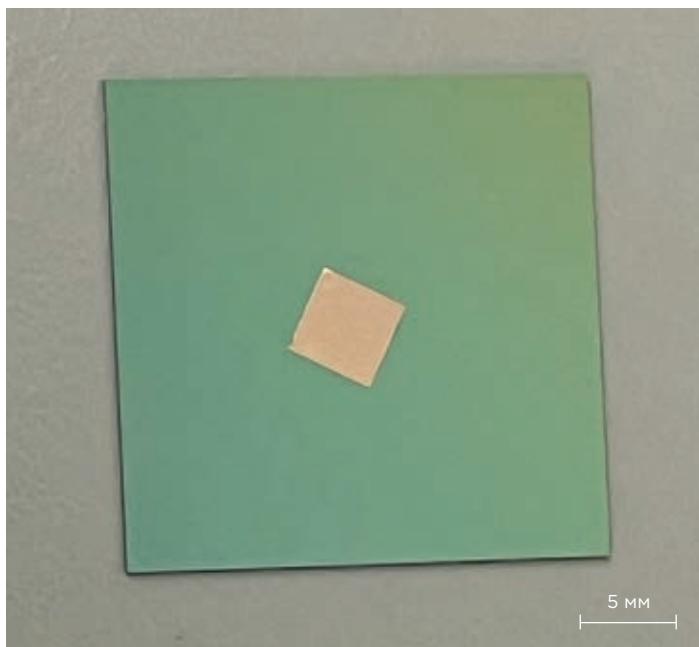
- Подготовка алмазной пластины (100). Погружение алмазной подложки с различной шероховатостью в раствор Пиранья (H₂SO₄ и H₂O₂ в соотношении 3:1) при 75 °C на различное время для достижения гидроксилирования поверхности. Затем промывка алмазной подложки в деионизированной воде в течение 5–10 минут.
- Подготовка подложек SiO₂/Si. Нанесение слоя SiO₂ толщиной 300 нм на кремниевую пластину с использованием PECVD-реактора при температуре 400 °C. Резка подложек SiO₂/Si на отдельные чипы. Гидроксилирование SiO₂ с помощью O₂-плазмы (1000 Вт, 5 минут).
- Процесс бондинга подложек. Размещение алмазной подложки на подложке SiO₂/Si в присутствии воды без приложения внешнего давления. Выдержка стека подложек в атмосферных условиях (20 °C, 40 % относительной влажности) в течение 3 дней для удаления избыточных молекул воды.
- Отжиг образцов при 200 °C в течение 24 часов для инициации реакции, описывающей процесс формирования связи на границе алмаз-SiO₂.

На **РИС 1** представлена алмазная пластина (100), приклеенная к подложке из SiO₂/Si после обработки в растворе Пиранья при температуре 75 °C в течение 30 минут. На изображении синяя подложка – это SiO₂/Si, а прозрачная пластина – алмаз (4 × 4 мм², толщина 50 мкм), и на ней нет видимых полос. Этот результат демонстрирует, что алмаз, очищенный надлежащим раствором Пиранья, может быть эффективно соединен с подложкой SiO₂/Si без видимых воздушных зазоров. На **РИС 2** показана прочность на сдвиг алмазных пластин, скрепленных с 300-нм SiO₂/Si. Использовались три типа алмазных пластин с различной начальной шероховатостью – 4,48, 2 и 1,31 нм. Шероховатость поверхности была оценена с помощью атомно-силового

Т 1

Обзор методов прямого бондинга алмазов

тип бондинга	тип подложки	оБРАБОТКА АЛМАЗНОЙ ПОВЕРХНОСТИ	ТЕХНОЛОГИЧЕ- СКИЕ УСЛОВИЯ (ШЕРОХОВАТОСТЬ, ДАВЛЕНИЕ, ТЕМПЕРАТУРА)	площадь СОЕДИНЕ- НИЯ (ДО)	ПРОЧ- НОСТЬ НА СДВИГ	УНИВЕРСАЛЬ- НОСТЬ	СОВМЕСТИМОСТЬ ДЛЯ КВАНТОВЫХ УСТРОЙСТВ
Гидро- фильный бондинг	Алмаз (111), различные полупроводни- ковые подлож- ки (InP, Si) и SiO_2/Si	Окисляющие рас- творы, $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}_2$ и $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ смесь, - 75 °C, атмосфер- ное давление	Sa < 0,5 нм, дав- ление 0-1 МПа, температура 200-250 °C	5 x 5 мм ²	10-35 МПа	Не подходит для фотоники	Аморфный слой 3-5 нм
Гидро- фильный бондинг	Алмаз (100), Si	Окисляющие рас- твор, $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}_2$ и $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ смесь, 75 °C, атмосфер- ное давление	Sa - 0,1-0,2 нм, давление 10 МПа, темпера- тура 200-250 °C	5 x 5 мм ²	1,7 МПа	Не подходит для фотоники, слабая проч- ность на сдвиг	Аморфный слой 3-5 нм
Бондинг с активной поверхно- стью	Алмаз (100), Сапфир	Ar-облучение, вы- сокий вакуум <1 * 10 ⁻⁵ Па	Sa < 0,2 нм, дав- ление 20 МПа, комнатная тем- пература	4 x 4 мм ²	≥ 14 МПа	Хорошая уни- версальность	Аморфный слой толщиной 300 нм; наблюдается диф- фузия связующих элементов; непод- ходящая поверх- ность для кванто- вых устройств
Адге- зивный бондинг	Алмазная под- ложка, Si или SiO_2/Si под- ложки	Кипящий раствор Пираньи	Sa < 0,4 нм или 2 нм, адгезив - Силесеквиок- сан водорода (HSQ), давле- ние 0-105 кПа, температура 500-600 °C, мем- бранный синтез и перенос	От 200 x 200 мкм ² до 1 x 1 мм ²	Не изме- рялось	Плохая уни- версальность и интеграция	Незначительный аморфный слой; фоновая флуорес- ценция HSQ
Бондинг с активаци- ей по- верхности плазмой	Нанесение алмаза на раз- личные под- ложки (крем- ний, плавленый кремнезем, сапфир, тер- мооксидная смола, ниобат лития)	Плазменная обра- ботка O_2 (расход O_2 -200 куб. см и мощность RF-излучения – 600 Вт в течение 150 сек) гидро- фильной поверх- ности	Sa < 1 нм, мем- бранный синтез и перенос, на- грев до 170 °C, атмосферное давление, отжиг при температу- ре 550 °C	200 x 200 мкм ²	Не изме- рялось	Однородность в нанометро- вом масштабе, толщина плен- ки DOI = 10 нм, низкая мас- штабируе- мость и инте- грация	Межфазный слой толщиной менее нанометра
Гидро- фильный бондинг	Алмаз (100), PECVD SiO_2/Si	Окисляющие растворы - смесь $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}_2$, 75°C, атмосферное дав- ление	Sa - 1,5-5 нм, атмосферное давление, 200 °C	4,5 x 4,5 мм ²	9 МПа	Хорошая уни- версальность	Незначительный промежуточный слой, подходящий для квантовой и фотоники

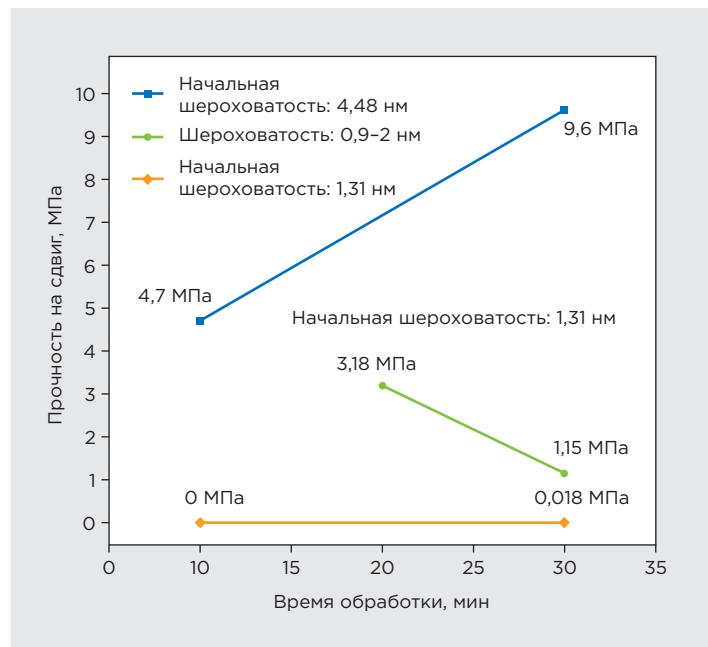


1

Алмазная пластина размером 4x4 мм² приклеена к подложке SiO₂/Si 25×25 мм²

микроскопа. После бондинга прочность на сдвиг была измерена с помощью прибора для испытания на сдвиг. Процедура тестирования соответствует рекомендациям, указанным в стандарте MILSTD-883.

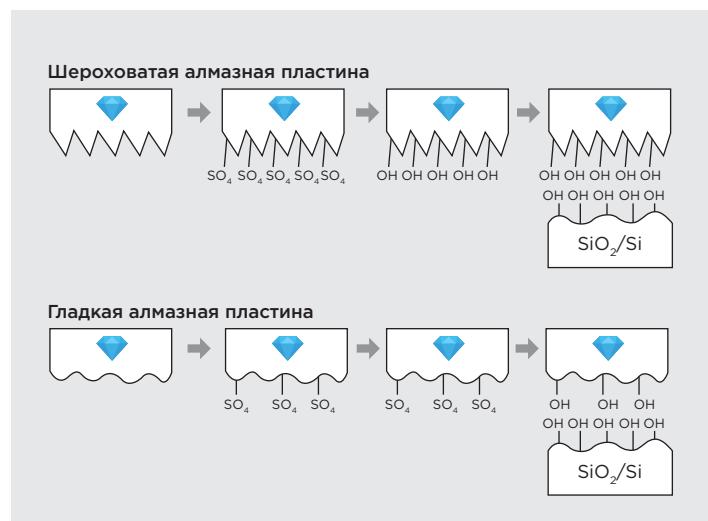
Необработанные алмазы с начальной шероховатостью 4,48 нм демонстрируют самую высокую прочность на сдвиг (4,7 и 9,6 МПа) по сравнению с двумя другими экспериментальными группами, и наблюдается тенденция к увеличению времени обработки. Для сравнения, гладкие алмазы с начальной шероховатостью 1,31 нм не поддаются склеиванию даже при длительной обработке. Это выделяется на фоне предыдущих работ, которые показали, что склеиванию поддаются только очень гладкие алмазные (111) пластины. Интересно, что промежуточная группа алмазов с шероховатостью 2 нм демонстрирует тенденцию к снижению средней прочности на сдвиг по мере увеличения времени обработки. Возможно, это связано с тем, что, когда шероховатость алмаза достигает определенного порога, она становится доминирующим фактором, влияющим на сцепление, в результате чего поверхность становится более шероховатой. И наоборот, когда шероховатость алмаза ниже этого порога, другие факторы, такие как химический состав поверхности и активация, играют более важную роль. Химический состав подложек был определен как критический фактор для надежного соединения. Химический состав обработанной поверхности алмаза исследовали с помощью рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (XPS). Анализы проводились с использованием спектрометра, оснащенного монохроматическим источником рентгеновского излучения Al K α ($h\nu = 1486,7$ эВ). Вакуум во время XPS-анализа поддерживался на уровне приблизительно 10⁻⁹ мбар. Во время измерений анализируемая область



2

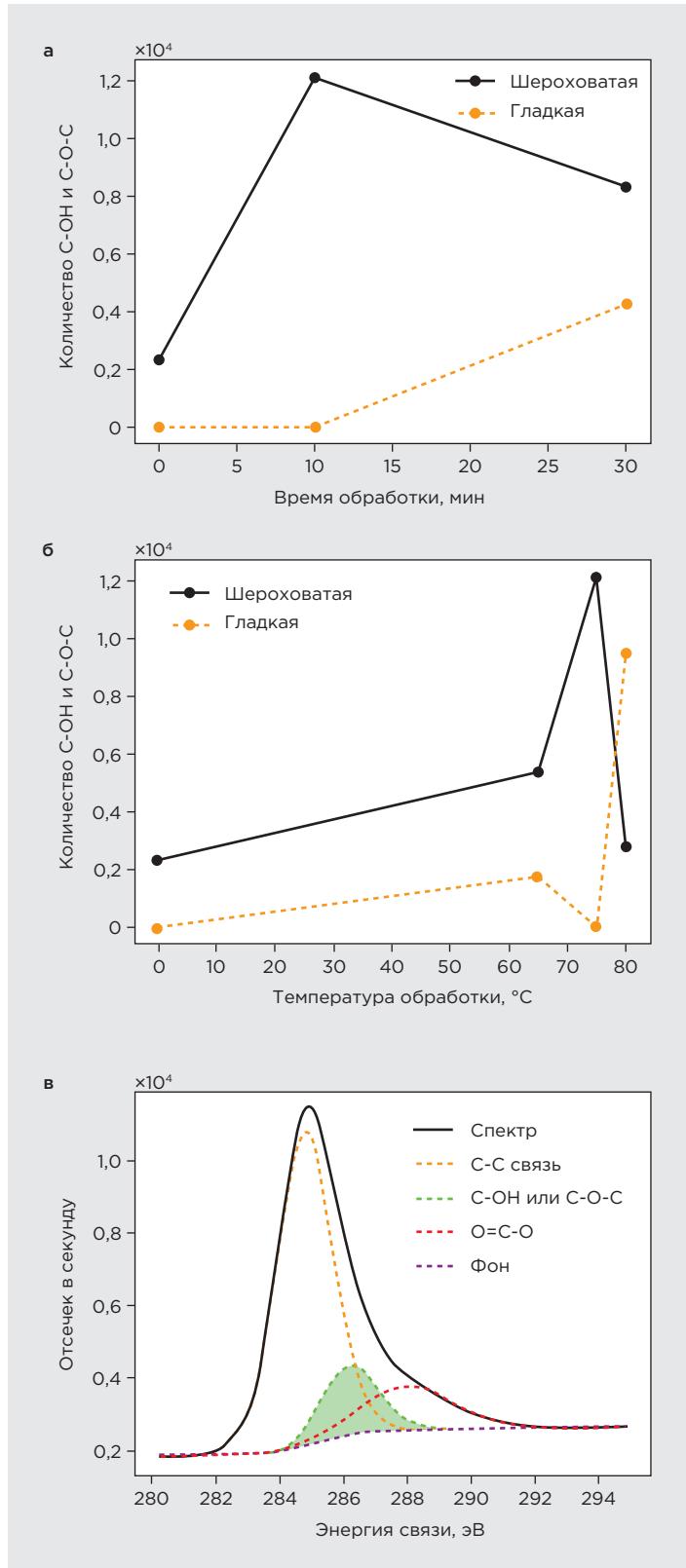
Зависимость прочности сдвига от времени обработки в растворе Пиранья. Были использованы алмазные подложки трех видов с различной исходной шероховатостью. Алмазная подложка с наибольшей исходной шероховатостью (4,48 нм, обозначена синим цветом) демонстрирует возрастающий тренд прочности сцепления по мере увеличения времени обработки. Однако подложки с меньшей исходной шероховатостью показывают нисходящий тренд (диапазон шероховатости 0,9–2 нм, обозначена зеленым цветом) или неспособность к сцеплению (1,31 нм, обозначена желтым цветом).

имела диаметр 0,4 мм и соответствующую глубину анализа в диапазоне 3–5 нм. Узкое мультиплексное сканирование пиков C1s, O1s, S2p3 и Si2p с высоким разрешением было получено с энергией прохождения 23,5 эВ и разрешением 0,2 эВ при угле разбега 45 градусов. На РИС 3 схематично показан возможный механизм прямого связывания алмазов.



3

Схема возможного механизма бондинга алмазов. Шероховатые поверхности обеспечивают большую площадь покрытия –OH-группами, что повышает успех бондинга



4

Количество поверхностных C-OH-групп в зависимости от времени и температуры обработки в растворе Пиранья, а также детальный рентгеновский спектр поверхности необработанного алмаза, обработанного в растворе Пиранья в течение 10 минут при температуре 75 °C: (а) Температура обработки фиксирована, а продолжительность времени является переменной; (б) Время обработки является фиксированным, а температура – переменной; (в) При сканировании методом количественного спектроскопического анализа поверхности были выделены три пика, где зеленая область спектра представляет количество групп C-OH или C-O-C

Результаты рентгенофазового анализа, представленные на РИС 4, подтверждают этот механизм, иллюстрируя изменение содержания C-OH-групп в зависимости от времени обработки и температуры. Наблюдается, что на шероховатых поверхностях, как правило, содержится большее количество C-OH-групп по сравнению с гладкими поверхностями. Спектры на РИС 4в показывают согласованные пики области C1s из спектра XPS образца алмаза, обработанного раствором Пиранья в течение 10 мин при 75 °C. Соответствующие пики относятся к связям C-C, OjC-O и C-OH или C-O-C (пики C-OH и C-O-C, обозначенные зеленой областью, не могут быть различимы с помощью XPS42). Кроме того, на РИС 4а представлена линейная диаграмма, иллюстрирующая изменение количества связей C-OH или C-O-C при различной продолжительности обработки, сравниваящая шероховатую и гладкую поверхности алмазных подложек. У этих подложек одна сторона отполирована до шероховатости менее 2 нм. Перед обработкой в растворе шероховатая поверхность показывает наличие связей C-OH или C-O-C, в то время как на гладкой поверхности в этой области нет сигнала. Этот сигнал может быть связан с наличием собственных связей C-O-C на шероховатой поверхности. После обработки в растворе Пиранья алмазные поверхности заканчиваются вновь образовавшимися группами -OH. Чтобы уменьшить влияние шероховатости поверхности на обнаруживаемые химические группы, мы ориентируемся на данные по гладким сторонам, поскольку они имеют схожие значения шероховатости около 2 нм. Анализ данных по гладкой поверхности показывает, что количество -OH-групп увеличивается с увеличением времени обработки. Кроме того, температура раствора Пиранья существенно влияет на образование -OH-групп. Обработка при температуре 80 °C более эффективна для стимулирования образования -OH-групп. Таким образом, время обработки в растворе Пиранья и температура являются двумя доминирующими факторами активации поверхности. На шероховатых поверхностях, как правило, легче образуются группы -OH. На РИС 4б показано изменение количества -OH групп, образующихся при обработке в растворе Пиранья, в зависимости от температуры обработки, что указывает на предпочтительность ванны Пиранья при 75 °C как оптимального условия с учетом как эффективности, так и практических соображений. На РИС 4в показан пример деконволюционного спектра шероховатой поверхности алмаза, обработанной в растворе Пиранья в течение 10 минут при температуре 75 °C. В спектре видны пики C-C, C-OH (или C-O-C) и O=C=O, причем группы C-OH обеспечивают источник для прямой связи. Для подтверждения выводов целесообразно сравнить данные рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (XPS) с измерениями прочности связи. Количество -OH-групп напрямую влияет на прочность соединения. Таким образом, сопоставление результатов количественного определения -OH-групп

с прочностью соединения при различных условиях обработки является дополнительным подтверждением.

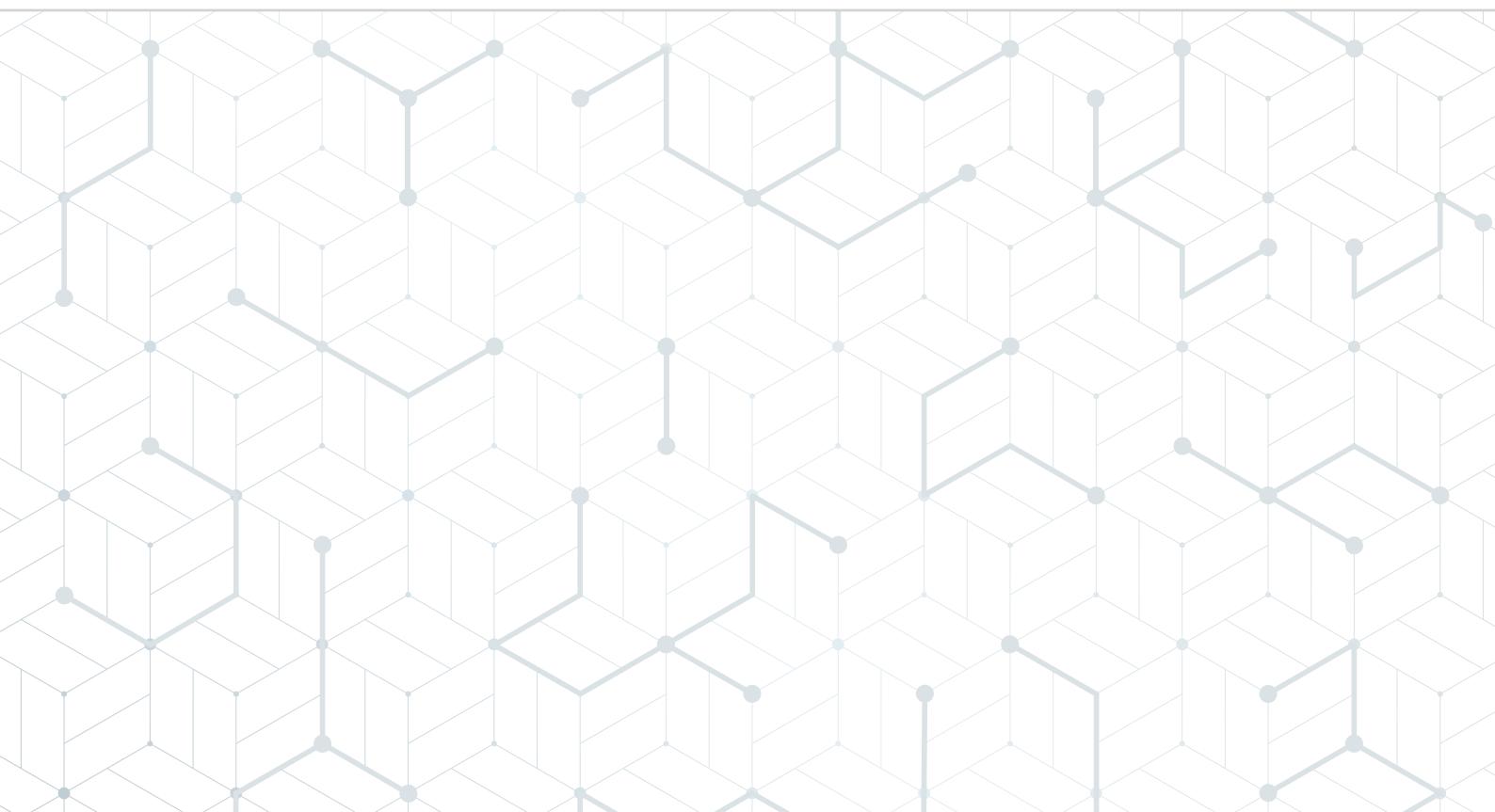
Результаты рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (XPS) и измерения на прочность соединения позволяют предположить, что как шероховатость поверхности, так и образование –OH-групп имеют решающее значение для прочности бондинга. В то время как повышенная шероховатость способствует образованию большего количества –OH групп, что приводит к более прочным связям, чрезмерно гладкие поверхности могут не обладать достаточным количеством реакционноспособных центров для эффективного сцепления. Перед обработкой шероховатые поверхности алмаза покрыты присущими группами C–C и C–OH и/или C–O–C, тогда как гладкие поверхности покрыты только присущими группами C–C; группы C–O–C или C–OH на гладких поверхностях отсутствуют из-за меньшего количества центров. При обработке поверхности алмаза раствором Пиранья в результате реакций дегидратации образуются гидроксильные (C–OH) группы. С одной стороны, на шероховатой поверхности больше свободных участков для образования –OH-групп из-за большей площади поверхности. С другой стороны, присущие группы C–O–C, имеющие то же валентное состояние, что и C–OH, служат дополнительным источником для образования C–OH групп. Это приводит к значительно более интенсивному образованию групп –OH на шероховатых поверхностях по сравнению с гладкими поверхностями. На заключительном этапе химическая реакция между большим количеством –OH групп на изначально шероховатой поверхности алмаза и поверхностями SiO₂ формирует прочную связь между двумя подложками.

Оптимизация гидрофильного бондинга алмаза: путь к масштабируемым подложкам для квантовых устройств

В заключение был продемонстрирован прямой гидрофильный бондинг монокристаллических алмазных пластин (100) толщиной 50 мкм с подложками SiO₂/Si, выращенными методом PECVD, в низкотемпературных и атмосферных условиях. Это позволило создать структуры «алмаз-на-диэлектрике» (DOI), пригодные для передовых квантовых и электронных устройств. Результаты показывают, что шероховатость поверхности в диапазоне 2-5 нм и химический состав имеют решающее значение для прочного соединения. В частности, на относительно шероховатых поверхностях алмазов (с шероховатостью около 4,48 нм) после обработки в растворе Пиранья образуется больше гидроксильных (–OH) групп из-за большей площади поверхности и присутствия собственных C–O–C групп, что приводит к более прочному химическому соединению на границе раздела. Путем оптимизации условий обработки раствором Пиранья и шероховатости поверхности в указанном диапазоне был достигнут выход соединения 90 % и максимальная прочность на сдвиг 9,6 МПа. Данный метод прямого склеивания решает задачу создания масштабируемых DOI-подложек, открывая путь для крупномасштабной интеграции алмазных систем. ▀

В статье использованы материалы:

1. «Hydrophilic direct bonding of (100) diamond and deposited SiO₂ substrates» by Tianyin Chen, Jeffrel Hermias, Salahuddin Nur and Ryoichi Ishihara

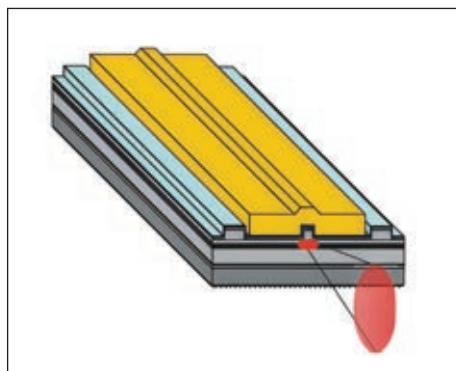


Влияние условий формирования лазерных граней на надежность полупроводниковых лазеров с гребневой конструкцией волновода

Текст: Алексей Симонов

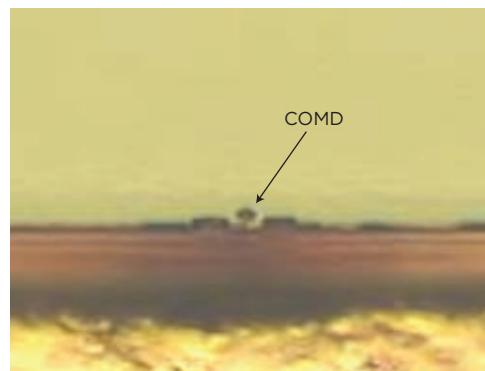
”

Полупроводниковые лазеры находят применение в самых разных областях – от телекоммуникаций и медицины до промышленной обработки материалов и систем наведения. Их надежность и долговечность во многом зависят от качества формирования рабочих граней, особенно в полупроводниковых лазерах с гребневой конструкцией волновода на основе GaAs. Дело в том, что именно на гранях происходит выход лазерного излучения, и любые дефекты или нестабильности в этой области могут привести к катастрофическим повреждениям, снижению мощности и преждевременному выходу устройства из строя. Поэтому контроль процесса формирования и пассивации зеркальных граней становится ключевым фактором, определяющим не только производительность, но и жизненный цикл лазерных диодов.



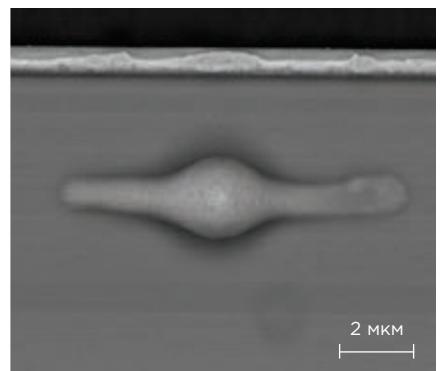
1

Схематичное изображение RWL-лазера



2

Примеры катастрофических повреждений оптических зеркал: (а) область COMD шириной 3 мкм, (б) SEM-изображение COMD-области шириной 10 мкм



Лазерные диоды на основе GaAs с торцевым излучением относятся к числу наиболее эффективных лазерных источников, доступных в настоящее время, что привело к широкому распространению лазерных линеек (laser bars, LB) для накачки и обработки материалов. Высокая эффективность полупроводниковых лазеров с торцевым излучением на основе GaAs также крайне полезна для будущих применений в LiDAR. В последние годы были приложены значительные усилия для повышения максимальной выходной мощности и эффективности полупроводниковых лазеров, что позволило достичь мощности свыше 1 кВт от одиночных лазерных линеек шириной 1 см, работающих в спектральном диапазоне 780 ÷ 970 нм. Новые приложения, использующие квантовые явления, такие как конденсация Бозе-Эйнштейна, требуют миниатюрных источников света высокой яркости и, следовательно, зависят от стабилизированных по длине волны полупроводниковых лазеров с гребневой конструкцией волновода (ridge waveguide lasers, RWL) на основе GaAs. Общим для этих приложений является потребность в высокой надежности при постоянно растущих выходных мощностях. Схематичное изображение единичного RWL-лазера показано на РИС 1.

Что влияет на надёжность лазерных линеек и как ее повысить

Помимо постепенной деградации выходной мощности во время работы сильное оптическое повреждение (catastrophic optical damage, COD) может разрушать лазерный и ограничивать его надежность. Одним из основных механизмов COD для полупроводниковых лазеров при таких высоких уровнях мощности является катастрофическое повреждение оптических зеркал (COMD). Пример COMD показан на РИС 2 а-б. За последние десятилетия были разработаны многочисленные решения для повышения стабильности лазерных зеркал. К ним относятся такие методы, как:

- скалывание и последующий in-situ процесс пассивации с применением аморфного кремния (E2-process);

- перемешивание квантовых ям;
- скалывание и формирование лазерных торцевых граней в вакууме с последующей пассивацией ZnSe;
- очистка граней атомарным водородом после скалывания на атмосфере с дальнейшей эпитаксиальной ZnSe-пассивацией.

При использовании последних двух методов возможно достижение времени наработки на отказ свыше 20 000 часов для RWL-лазеров с длиной волны 980 нм, работающих при мощности 1 Вт, и свыше 4 000 часов при мощности 2 Вт, т. е. близко к пределу теплового насыщения (thermal rollover limit, TRL). Эти выходные мощности соответствуют пиковым плотностям мощности на зеркале лазеров в диапазоне от 20 МВт/см² до 40 МВт/см².

Несмотря на хорошие достигнутые результаты, желательно дальнейшее повышение стабильности зеркал. Одним из возможных факторов, влияющих на стабильность зеркал при процессе ZnSe-пассивации, является неполное удаление оксидного слоя с (Al,Ga)As волноводов и внешних слоев (cladding layer). К сожалению, слой AlO_x невозможно полностью удалить с зеркала с помощью очистки атомарным водородом. Одним из методов удаления может быть дополнительная бомбардировка и очистка поверхности (sputter cleaning). Однако это вносит дефекты в лазерное зеркало. Зеркало, полностью свободное от оксидов и других дефектов, может быть получено только путем скола в сверхвысоком вакууме (ultra-high vacuum, UHV) с последующим эпитаксиальным ростом пассивирующего слоя ZnSe без экспозиции на атмосферу. В статье исследована стабильность лазерных зеркал, сколотых в UHV и пассивированных ZnSe, и проведено сравнение полученных результатов с лазерами, грани которых были сколоты на атмосфере, очищены атомарным водородом и далее пассивированы ZnSe.

К сожалению, невозможно проверить пределы метода пассивации с очисткой атомарным водородом

или возможное улучшение при использовании метода скальвания в UHV для RWL-лазеров с длиной волны 980 нм. Это связано с тем, что выходная оптическая мощность разработанных RWL-лазеров с длиной волны 980 нм ограничена значением 2 Вт из-за предела теплового насыщения, а время наработки свыше 4 000 часов с такой выходной мощностью уже достижимо при использовании скальвания на воздухе в комбинации с очисткой водородом и последующей ZnSe-пассивацией. Таким образом, невозможно увеличить выходную мощность, а измерения более длительного времени жизни также непрактичны. Чтобы преодолеть это ограничение, использовались RWL-лазеры, более подверженные COMD. Было обнаружено, что RWL с длиной волны 1 064 нм с двойными и тройными квантовыми ямами выходят из строя раньше во время испытаний на долговечность из-за COMD. В связи с этим в данном сравнительном исследовании использовались RWL-лазеры с длинами волн 980 нм и 1 064 нм соответственно.

Методы формирования и пассивации лазерных граней

Все лазеры с гребневой конструкцией волновода имели длину 3,9 мм и ширину 5 мкм. RWL-лазеры с длинами волн 980 нм и 1 064 нм с двойной квантовой ямой (double quantum well, DQW) основаны на асимметричной конструкции широкого оптического резонатора (asymmetric large optical cavity, ASLOC) шириной 4,8 мкм, тогда как RWL-лазеры с длиной волны 1 064 нм с тройной квантовой ямой (triple quantum well, TQW) основаны на симметричной конструкции сверхширокого оптического резонатора (symmetric super large optical cavity, SLOC) шириной 3,6 мкм. Структура SLOC имеет приблизительно в три раза более высокий коэффициент удержания (confinement factor) по сравнению со структурой ASLOC.

Для пассивации лазерных зеркал использовались два подхода. При первом лазерные грани скальвались на воздухе, далее укладывались в стек и специальную кассету и загружались в систему молекулярно-лучевой эпитаксии со сверхвысоким вакуумом (МЛЭ, UHV-MBE), где оксид удалялся с поверхности зеркал при помощи системы обработки в атомарном водороде. Для данного метода использовалась система Veeco Gen 20A. Время экспозиции сколотых лазерных линеек на атмосферу поддерживалось ниже 3 часов. После очистки на поверхности зеркал выращивался пассивирующий эпитаксиальный слой ZnSe при заданной температуре 225 °C. При втором подходе лазерные грани сразу скальвались в специальной системе UHV-MBE (система от SVTA), а пассивация ZnSe на зеркалах выполнялась без экспозиции на атмосферу при заданной температуре 250 °C. Далее эти два метода будем называть *водородная очистка* и *UHV-скальвание* соответственно. После процесса пассивации на зеркала наносились оптические покрытия для получения коэффициентов отражения 1,5 % и

96 % для переднего и заднего зеркал соответственно. Для слабо отражающего переднего зеркала использовался слой Al_2O_3 , тогда как для сильно отражающего заднего зеркала применялись пары слоев $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ и $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$.

Обработанные лазерные линеики разделялись на чипы, содержащие один RWL-лазер. Далее эти чипы припаивались р-стороной вниз на теплоотводы CuW и С-крепления, которые используются для оптической характеризации и измерений времени жизни. Измерения проводились в режиме непрерывной генерации (continuous wave, CW) при 25 °C.

Измерение характеристик получаемых образцов

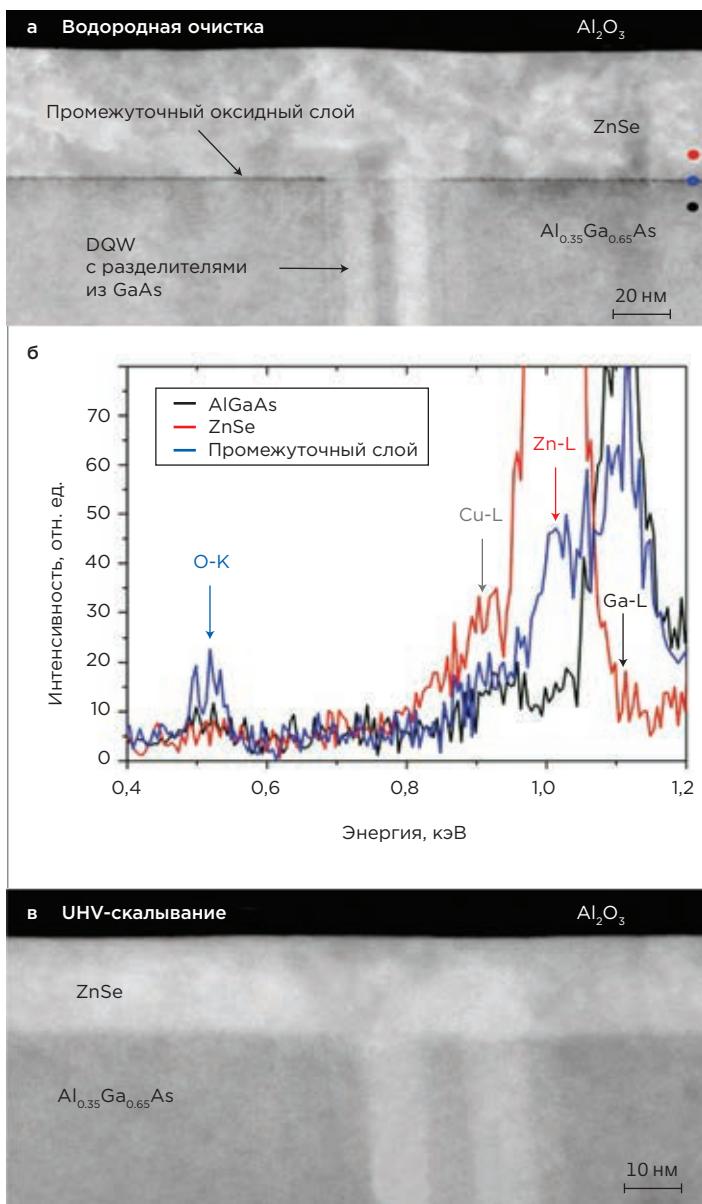
Структурные исследования лазерных диодов проводились с использованием сканирующей просвечивающей электронной микроскопии (scanning transmission electron microscopy, STEM, установка JEOL-2200FS) и анализа рентгеновской дифракции высокого разрешения (high-resolution X-ray diffraction, HR-XRD). Для подготовки тонких поперечных сколов и исследования пассивированных лазерных зеркал применялась технология фокусированного ионного пучка (focused ion beam, FIB). Визуализация структуры слоев и композиционной однородности интерфейсов между слоем пассивации ZnSe и сколотыми лазерными зеркалами проводилась с помощью STEM-визуализации в режиме кольцевого темного поля под большими углами (high angle annular dark-field STEM, HAADF STEM), тогда как спектроскопия энергодисперсионного рентгеновского излучения (energy dispersive X-ray spectroscopy, EDX) применялась для выявления химических элементов, составляющих эти интерфейсы. Дополнительно картины дифракции электронов на выбранной области (selected area electron diffraction, SAED) регистрировались с использованием параллельного электронного пучка в различных точках слоев ZnSe, эпитаксиально выращенных на лазерном зеркале.

Рентгеновская дифракция высокого разрешения выполнялась на коммерческой системе Rigaku SmartLab, работающей при 9 кВт. За параболическим зеркалом Гёбеля для выделения линии $\text{Cu}-\text{K}\alpha_1$ ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$) и коллимации полезного пучка до менее 0.008° использовался кристалл 2 x Ge(220) с канальным срезом. Для регистрации 20-ω сканов и двумерных карт обратного пространства использовался двумерный детектор (HyPix 3000).

Сравнение эффективности двух методов: результаты и выводы

Для анализа влияния метода скальвания и пассивации на лазерные линеики рассмотрим поперечные сколы образцов RWL-лазеров, полученных обоими методами, при помощи STEM.

На РИС 3а показано HAADF STEM-изображение лазерного зеркала над областью двойной квантовой



3

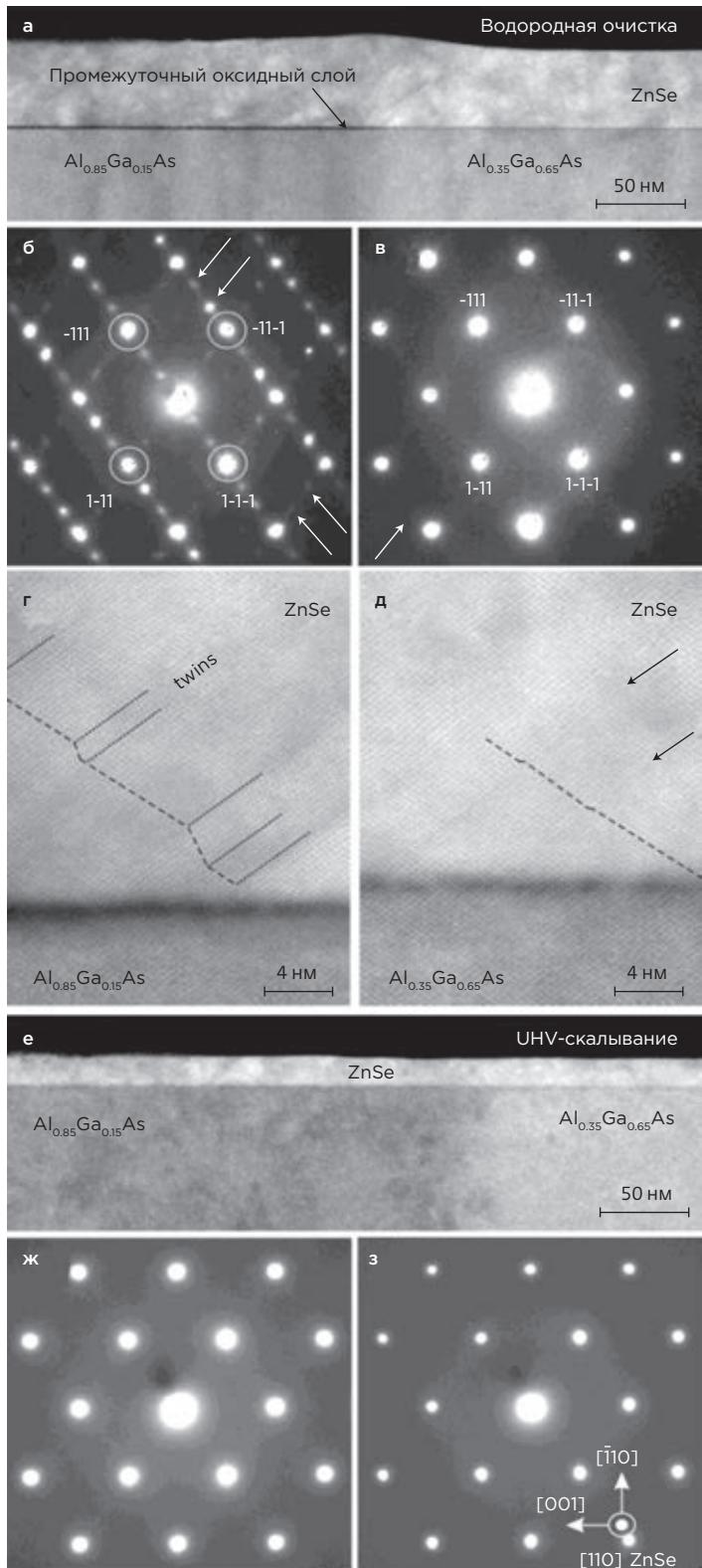
HAADF STEM-изображение лазерных зеркал над областью двойной квантовой ямы, сформированных при помощи: водородной очистки (а) и UHV-скавливания (в). EDX-измерения (б) в различных областях, отмеченных тремя цветными точками на (а)

ям для образца, сколотого на атмосфере и очищенным атомарным водородом. Это изображение демонстрирует контраст по атомному номеру (Z-контраст). На границе раздела между слоем ZnSe и $(\text{Al},\text{Ga})\text{As}$ виден тонкий темный слой. Такой слой может быть обусловлен тонким оксидным слоем. Для проверки этого предположения были выполнены EDX-измерения в различных областях, отмеченных тремя цветными точками на РИС 3а, б. Пик Cu, отмеченный на графике, обусловлен использованием специальных медных колец при STEM-сканировании. Пик, соответствующий кислороду, действительно был обнаружен на границе раздела, что доказывает, что темный слой вызван оксидом на границе раздела. Оксид отсутствует между InGaAs квантовыми ямами и слоем ZnSe, а также между разделителями

(spacers) из GaAs и слоем ZnSe. При этом оксидный слой отчетливо виден между слоем ZnSe и волноводными слоями $(\text{Al},\text{Ga})\text{As}$. Данный анализ показывает, что поверхности InGaAs и GaAs могут быть успешно очищены от естественного оксида. Присутствие оксида на поверхности $(\text{Al},\text{Ga})\text{As}$ вызвано образованием оксида алюминия на $(\text{Al},\text{Ga})\text{As}$, который не может быть эффективно удален при очистке атомарным водородом. В отличие от этого образца зеркало, сформированное путем UHV-скавливания и in-situ пассивации слоем ZnSe без экспозиции на атмосферу, на поверхности слоя $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ демонстрирует иную структуру, РИС 3в. Оксидный слой между $(\text{Al},\text{Ga})\text{As}$ и ZnSe отсутствует.

Поскольку оксидный слой образуется при контакте поверхности $(\text{Al},\text{Ga})\text{As}$ с воздухом, было исследовано влияние содержания алюминия на толщину оксидного слоя и качество слоя ZnSe, выращенного поверх него. Поэтому были получены STEM-изображения и SAED-картины в области грани, захватывающие как внешний (cladding) p-слой $\text{Al}_{0.85}\text{Ga}_{0.15}\text{As}$, так и волноводный слой $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$. На РИС 4а представлено HAADF STEM-изображение слоя ZnSe, полученного на грани с водородной очисткой. Отмечено, что остаточная толщина оксида больше на $\text{Al}_{0.85}\text{Ga}_{0.15}\text{As}$ по сравнению с $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$. Это согласуется с более высоким содержанием Al в cladding-слое и, следовательно, более сильным окислением. Более того, поверхность ZnSe оказывается более шероховатой на $\text{Al}_{0.85}\text{Ga}_{0.15}\text{As}$ по сравнению с поверхностью ZnSe на $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$.

Для исследования структурных различий пассивирующих слоев ZnSe, выращенных на слоях $(\text{Al},\text{Ga})\text{As}$ с разным содержанием Al, были получены картины дифракции электронов в областях $\text{Al}_{0.85}\text{Ga}_{0.15}\text{As}$ и $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$, показанные на РИС 4б и в соответственно. Яркие дифракционные пятна, соответствующие кубической структуре типа цинковой обманки (сфалерита), четко видны вдоль оси [110] и были соответствующим образом промаркированы. Между этими яркими дифракционными пятнами видны строго упорядоченные пятна с меньшей интенсивностью, которые показаны белыми стрелками. Появление и расположение этих дополнительных дифракционных пятен характерно для областей кристалла, отраженных на плоскостях [111] структуры цинковой обманки, что указывает на то, что слой ZnSe на поверхности $\text{Al}_{0.85}\text{Ga}_{0.15}\text{As}$ содержит двойники (twins). Такие микродвойники вместе с дефектами упаковки (stacking faults) наблюдались ранее в исследованиях роста слоев ZnSe на подложках GaAs. SAED-картина для ZnSe на $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ не показывает никаких признаков двойников. Это свидетельствует о том, что плотность двойников снижается на слоях $(\text{Al},\text{Ga})\text{As}$ с уменьшенным содержанием алюминия и меньшим количеством AlO_x на границе раздела ZnSe/ $(\text{Al},\text{Ga})\text{As}$. Тем не менее, на SAED-картине для $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ видны слабые полосы, указанные стрелкой на РИС 4в, что указывает на кристаллические де-



4

STEM-изображения и SAED-картины слоя ZnSe в области cladding-слоя и волноводного слоя при использовании метода водородной очистки (а-д) и UHV-скалывания (е-з). SAED-картины слоя ZnSe на слое $\text{Al}_{0.85}\text{Ga}_{0.15}\text{As}$ показаны на рис 4б и ж, а на слое $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ – на рис 4в и з соответственно

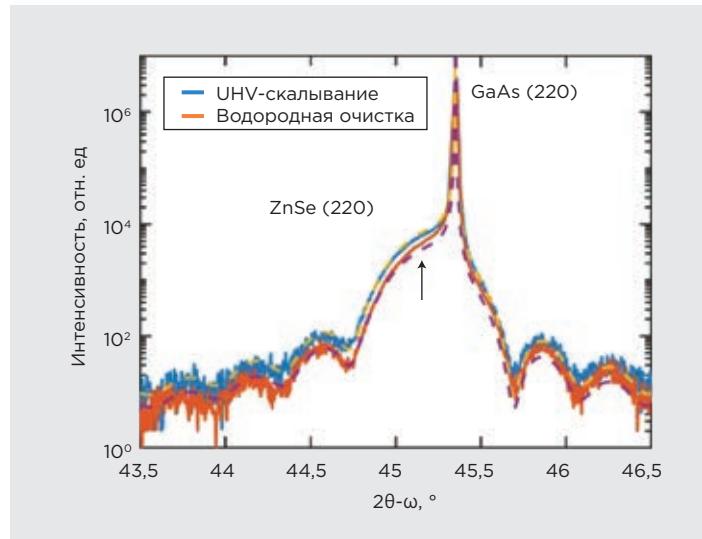
фекты, такие как дефекты упаковки. Действительно, HAADF STEM-визуализация при более высоких разрешениях (рис 4г и д) выявила оба типа дефектов,

предполагаемых из анализа SAED: двойники в ZnSe, выращенном на сильно окисленном $\text{Al}_{0.85}\text{Ga}_{0.15}\text{As}$ и дефекты упаковки на плоскостях [111]-ZnSe в ZnSe, выращенном на менее окисленной поверхности $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$. Эти наблюдения указывают на то, что кристаллическое качество слоев ZnSe сильно зависит от химического состава и кристаллического качества поверхности (Al,Ga)As.

Рассматривая STEM-изображение и соответствующие SAED-картины для in-situ ZnSe-пассивации, полученной после UHV-скалывания, можно наблюдать явные различия, отображенные на рис 4е-з. Во-первых, не наблюдается слоя оксида между поверхностями (Al,Ga)As и ZnSe, даже для cladding-слоя с содержанием алюминия 85 %. Во-вторых, дополнительные дифракционные пятна, соответствующие двойникам, не наблюдались ни на одной из SAED-картин, что демонстрирует, что UHV-скалывание приводит к образованию пассивирующих слоев ZnSe, свободных от двойников. Таким образом, STEM-исследования подтверждают, что скалывание в условиях сверхвысокого вакуума приводит к улучшению качества слоев ZnSe на поверхности (Al,Ga)As, а также к уменьшению дефектов на границе раздела по сравнению со сколом на атмосфере с последующей очисткой атомарным водородом.

Дополнительная информация о структурных свойствах слоев ZnSe была получена с помощью рентгеновской дифракции высокого разрешения (HR-XRD). Необходимо отметить, что эти измерения исследовали свойства слоя ZnSe на грани подложки GaAs, а не на слоях (Al,Ga)As лазерного диода. Это связано с тем, что размер пучка установки HR-XRD больше толщины подложки и, следовательно, не может исследовать сам лазерный диод. Хотя это и не является прямым исследованием кристаллической структуры ZnSe на лазерном диоде, это все же может помочь исследовать качество пассивации ZnSe, особенно над областями квантовых ям, которые обычно свободны от Al. На рис 5 сравниваются HR-XRD 2θ -ш сканы вблизи отражения GaAs (220) для слоев ZnSe, выращенных обоими методами пассивации. Оба измерения показывают четкие пики подложки и пленки, а также осцилляции толщины (thickness fringes) из-за конечной толщины слоя ZnSe.

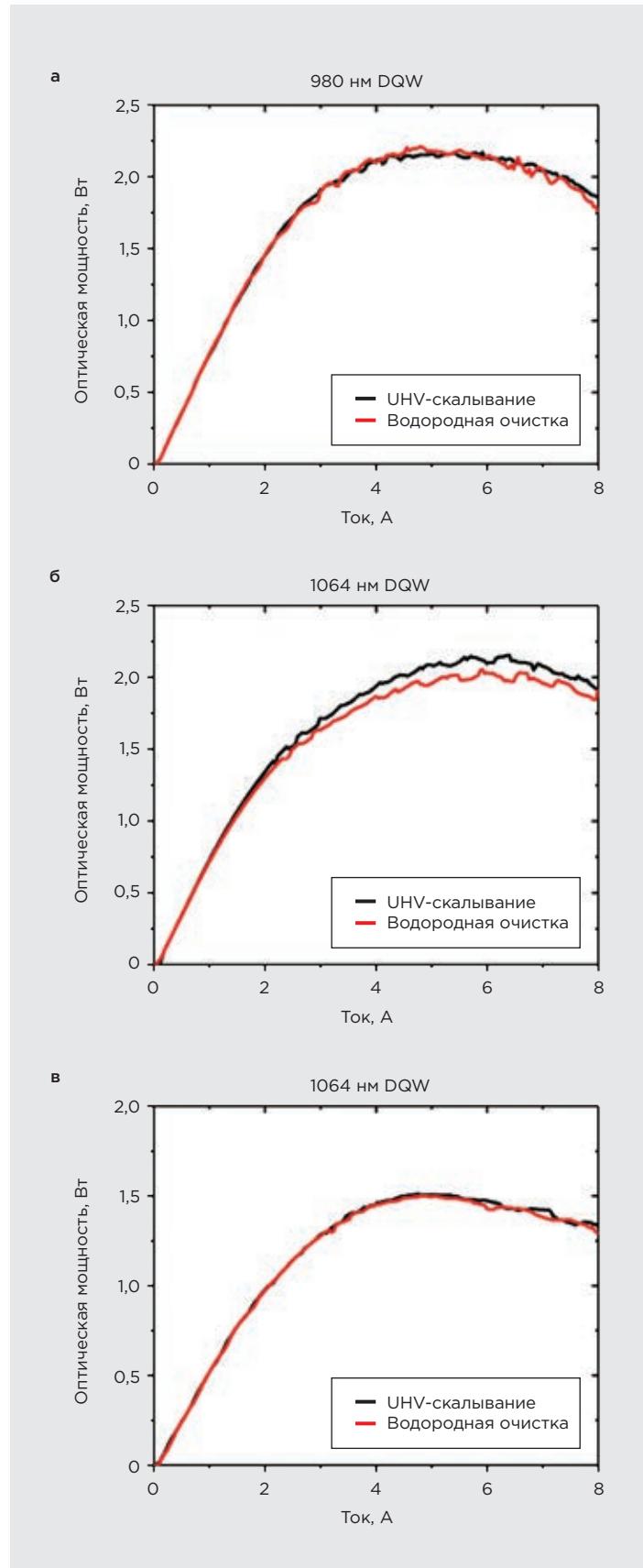
Из расчетов с использованием теории динамической рентгеновской дифракции, аппроксимированных к экспериментальным данным, толщина слоя ZnSe была определена равной 24,5 нм, а параметр решетки ZnSe (110) – равным 4,016 Å. Параметр решетки на 0,2 % больше объемного значения ZnSe, что согласуется с 0,26 % сжатия решетки в связи с несоответствием решетки по отношению к GaAs и хорошо согласуется с данными предыдущих исследовательских работ. Это доказывает, что оба метода позволяют получать слои ZnSe с высоким



5

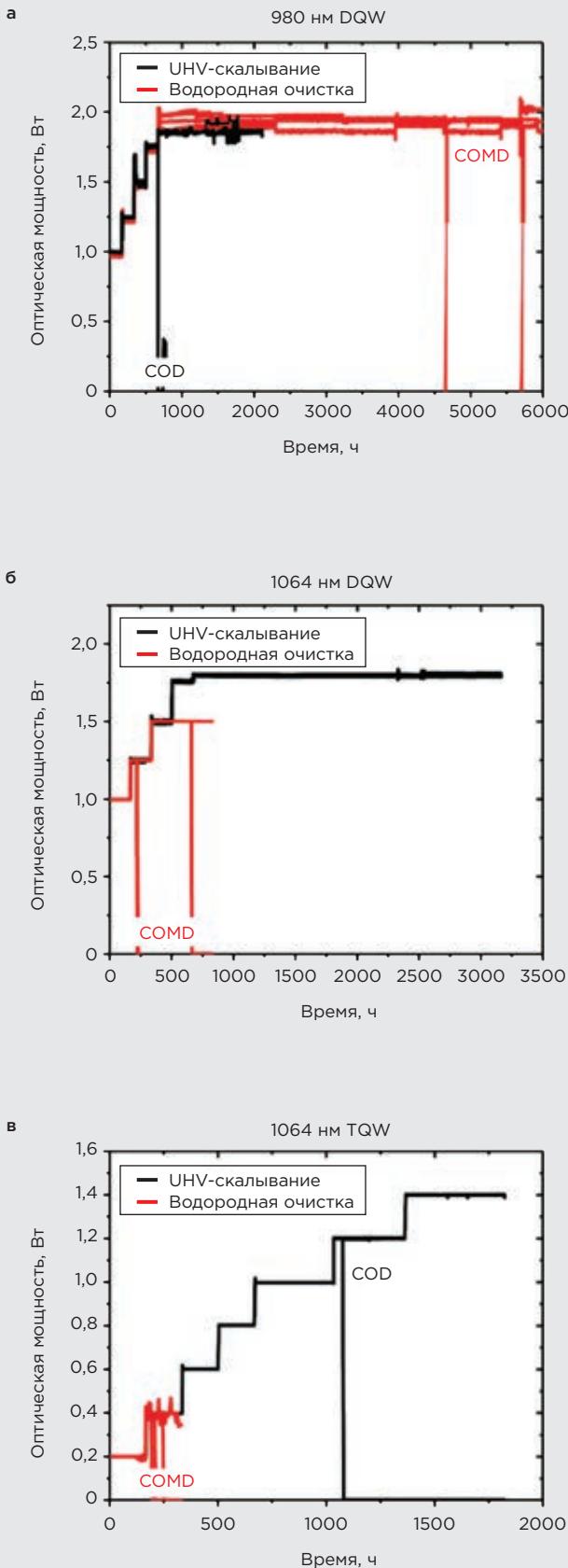
HR-XRD $2\theta-\omega$ сканы слоев ZnSe, сформированных при помощи UHV-скалывания и водородной очистки. Пунктирные линии представляют результаты моделирования. Стрелка указывает на разницу между данными и моделированием

качеством структур. Тем не менее, наблюдалось два различия. Во-первых, интенсивность дифракционного пика ZnSe выше для образца, изготовленного методом UHV-скалывания. Во-вторых, аппроксимация данных для образца, изготовленного методом UHV-скалывания, практически точно совпадает с экспериментальными данными, указывая на то, что полученные экспериментальные данные хорошо описываются моделью однородного слоя ZnSe на GaAs. Для образца, полученного методом очистки в водороде, аппроксимация данных не столь хороша, и кривые измерений и модели частично расходятся, что показано стрелкой на графике. Это может указывать на то, что слой ZnSe содержит некоторые дефекты, что снижает его качество. Присутствие дефектов упаковки и микродвойников, доказанное SAED-анализом на обработанных лазерных структурах, может быть возможной причиной данных отличий. Возможными причинами дефектов в слое ZnSe, выращенном после очистки водородом, являются неполная очистка поверхности, нестехиометрическая поверхность GaAs после очистки, присутствие загрязнений, таких как Si на поверхности, или факторы, связанные с методом роста. Для точного определения источника необходимы дальнейшие исследования. Таким образом, HR-XRD указывает на то, что ZnSe, выращенный на GaAs после UHV-скалывания, имеет более высокое структурное качество, чем слои ZnSe, выращенные на GaAs после очистки атомарным водородом. Для ZnSe, выращенного на слоях AlGaAs, разница в структурном качестве между двумя методами возрастает из-за более сильного окисления поверхности AlGaAs по сравнению с GaAs и присутствия AlO_x на границе раздела AlGaAs/ZnSe



6

Зависимость оптической мощности от тока для трёх типов исследуемых RWL-лазеров: (а) RWL с двойной квантовой ямой и длиной волны 980 нм, (б) RWL с двойной квантовой ямой и длиной волны 1064 нм, (в) RWL с тройной квантовой ямой и длиной волны 1064 нм. Максимальная мощность всех RWL ограничена пределом теплового насыщения, независимо от метода пассивации



7

Тестирование жизненного цикла RWL-лазеров: (а) RWL с DQW и длиной волны 980 нм, (б) RWL с DQW и длиной волны 1 064 нм, (в) RWL с TQW и длиной волны 1 064 нм

после очистки водородом. Предполагается, что именно наличие AlO_x является ключевым дефектом, влияющим на время жизни конечного устройства.

Теперь обратимся к оптоэлектронным характеристикам RWL-лазеров.

На РИС 6 показаны типичные зависимости мощности от тока для RWL, использованных в этом исследовании. Катастрофического повреждения оптических зеркал (COMD) не наблюдается вплоть до токов 8 А для всех RWL-лазеров, независимо от техники пассивации. Это значение соответствует максимальной плотности тока 4,1 кА/см², что, в свою очередь, соответствует значениям выше предела теплового насыщения. Наблюдается, что RWL-лазеры с двойной квантовой ямой, излучающие на 980 и 1 064 нм, имеют максимальную выходную мощность немного выше 2 Вт, в то время как максимальная выходная мощность для TQW RWL-лазеров ограничена приблизительно 1,5 Вт, что указывает на сниженную эффективность этого типа RWL-лазеров. Во всех случаях максимальная плотность мощности на зеркале превышает 40 МВт/см², что будет обсуждаться более подробно позже. Сниженная эффективность TQW RWL-лазеров вызвана большим внутренним поглощением в структуре SLOC по сравнению со структурой ASLOC из-за более толстых слоев (Al,Ga)As p-типа в структуре SLOC, а также большим растеканием тока для SLOC RWL по сравнению с ASLOC RWL из-за большей остаточной толщины слоя в протравленных канавках, формирующих гребневую структуру.

Надёжность и срок службы

После первоначальной характеризации на всех типах RWL были проведены измерения срока службы для исследования стабильности зеркал во время работы лазера в непрерывном режиме. Для испытания срока службы выходная мощность постепенно увеличивалась до значений, близких к пределу теплового насыщения. Сравнение результатов измерений для обоих типов методов пассивации показано на РИС 7. Начиная с RWL-лазеров с длиной волны 980 нм, отмечено, что устройства, изготовленные с помощью двух методов пассивации, могут работать с выходной мощностью выше 1,75 Вт более 2 000 часов, как отмечено на РИС 7а. Для лазеров, пассивированных после UHV-скалывания, наблюдается единственный отказ при увеличении мощности выше 1,75 Вт. Поскольку на грани этого RWL-лазера после отказа не обнаружено никаких повреждений, катастрофическое оптическое повреждение (COMD) было исключено как причина отказа, и событие классифицировалось как COD (оптическое повреждение). После достижения значений в 2 000 часов без повреждения зеркал испытания RWL, пассивированных после UHV-скалывания, были прекращены. Для RWL-лазеров с длиной волны 1 064 нм (РИС 7б и в) наблюдалось, что максимальная выходная мощность устройств, пассивированных

после водородной очистки, снизилась по сравнению с лазерами с длиной волны 980 нм: для DQW-лазеров выходная мощность составила около 1,5 Вт, а для TQW-лазеров – не более 0,4 Вт. Возможной причиной этого снижения является дополнительная деформация из-за повышенного содержания индия в квантовых ямах (QW) в случае 1 064 нм. Это приводит к усиленной релаксации кристаллической решетки QW на грани и, как следствие, к увеличению поглощения, снижающего стабильность грани. Для структуры SLOC с тройной квантовой ямой (TQW) этот эффект должен быть более выраженным по сравнению с DQW из-за дополнительной квантовой ямы и большего коэффициента удержания.

Для RWL-лазеров, пассивированных после UHV-скалывания, COMD не наблюдалось вплоть до предела теплового насыщения. Это демонстрирует, что стабильность граней, пассивированных после UHV-скалывания, выше, чем при водородной очистке. В частности, для 1 064 нм RWL с TQW стабильность грани более чем в три раза выше. Кроме того, для этого типа RWL наблюдается внутреннее повреждение при 1,2 Вт (COD), что указывает на значительную деградацию активной области.

Испытания на срок службы показали, что RWL-лазеры с квантовыми ямами на основе InGaAs с in-situ пассивацией после скальвания в UHV обладают увеличенным сроком службы и могут работать на более высоких мощностях по сравнению с RWL, скальваемыми на воздухе и очищаемыми атомарным водородом. Тот факт, что начальные ватт-амперные характеристики (BAX) схожи, указывает на то, что деградация граней у RWL, изготовленных с помощью UHV-скалывания, снижена. Это объясняется уменьшенной плотностью дефектов на границе раздела и улучшенным структурным качеством ZnSe, полученным при UHV-скалывании, это подтверждается исследованиями TEM и XRD. Однако точный физический механизм деградации остается неясным. Из предыдущих работ известно, что термические напряжения могут приводить к обмену Ga и Zn на границе ZnSe/GaAs. Поскольку Zn действует как акцептор в InGaAs и (Al,Ga)As, это увеличивает оптическое поглощение в приграничной области и в конечном итоге снижает предел COMD. Начальное содержание Zn в слоях InGaAs/(Al,Ga)As должно быть схожим для обоих методов пассивации, что объясняет сходство BAX. Кроме того, такой процесс диффузии может усиливаться из-за дефектов на границе ZnSe/InGaAs (или (Al,Ga)As), объясняя ускоренную деградацию RWL, пассивированных после водородной очистки. Поскольку области квантовых ям для обоих методов пассивации схожи, предполагается, что дефекты на поверхности (Al,Ga)As играют важную роль в деградации RWL. Учитывая возможный вклад Zn в деградацию граней, важно отметить, что диффузия Zn сильно

зависит от количества точечных дефектов (междоузельных атомов Ga_i), которые обычно образуются при росте III-V слоев n-типа. Оптимизация роста III-V структур с учетом этого фактора может дополнительно улучшить стабильность граней. Альтернативой может стать использование зеркальных слоев Zn(Se,S), которые демонстрируют большую стабильность.

На основе измерений бокового ближнего поля и расчетного профиля моды была определена плотность мощности на лазерных гранях. Максимальные плотности мощности для RWL-лазеров с длиной волны 1 064 нм составили 58 МВт/см² (DQW) и 42 МВт/см² (TQW), а для RWL-лазеров с длиной волны 980 нм – 42 МВт/см². Эти значения значительно превышают пиковые плотности мощности, достижимые для широкоапертурных излучателей. Учитывая улучшение срока службы RWL при UHV-скалывании, можно ожидать аналогичного эффекта для широкоапертурных излучателей, однако это требует дальнейших исследований.

Итоги применения скальвания граней в сверхвысоком вакууме для формирования лазерных граней

Представленные результаты демонстрируют, что стабильность зеркал полупроводниковых лазеров с ZnSe-пассивацией улучшается за счет скальвания граней лазеров в условиях сверхвысокого вакуума (UHV) вместо скальвания на атмосфере с последующей очисткой атомарным водородом. Это позволяет предположить, что дефекты на границе раздела ограничивают стабильность зеркал ZnSe-пассивированных лазеров. Продемонстрированный длительный жизненный цикл RWL-лазера с длиной волны 1 064 нм является ключевым фактором для будущих квантовых технологий. Более того, ожидается, что это улучшение может также проявиться для других типов лазеров, таких как широкоапертурные эмиттеры, или лазеров, работающих на других длинах волн, и, таким образом, расширить возможные области применения полупроводниковых лазеров. Развитие автоматизации UHV-систем для формирования, обработки и in-situ пассивации лазерных линеек позволит повысить производительность метода UHV-скалывания, сохранив описанные выше преимущества, что выведет производство RWL-лазеров на качественно новый уровень. □

Использованные источники

1. J.E. Boschker, et al., Stability of ZnSe-passivated laser facets cleaved in air and in ultra-high vacuum. 2021 27th International Semiconductor Laser Conference (ISLC). IEEE, 2021.
2. P. Ressel, U. Spengler, A. Mogilatenko, A. Knigge, and G. Tränkle Ferdinand-Braun-Institut Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik Symposium «Optical Coatings for Laser Applications», Buchs, CH, 2019

КАЧЕСТВО

От меди к графену: Как меняется сердце беспилотника

Текст: Станислав Коваленко

”

Беспилотные летательные аппараты – от игрушечных квадрокоптеров до тяжёлых разведывательных дронов – уже стали частью нашей повседневности. Чем легче, мощнее и умнее дрон, тем эффективнее он может выполнять задачи: доставлять грузы, вести наблюдение, участвовать в спасательных или других операциях. Главный элемент этой техники – электродвигатель. Именно от него зависит, как долго летательный аппарат пробудет в воздухе, какую нагрузку поднимет, с какой точностью выполнит маневр. И сегодня перед инженерами стоит непростая задача – сделать это «сердце» компактнее, легче и эффективнее. Для этого приходится буквально пересматривать основы – от выбора материалов до принципов конструкции.

Почему медь – уже не предел

В обычных моторах используют обмотки из меди – металл с отличной проводимостью, проверенный временем. Но у меди есть ограничения, особенно когда речь идёт о сверхкомпактных и высокооборотистых двигателях. Чем тоньше провод, тем выше сопротивление, а значит – больше нагрев и меньше КПД. Сложность еще в том, что в дроне просто нет места для массивных систем охлаждения.

На этом этапе на сцену выходят новые материалы – прежде всего, нанопровода и графен.

Нанопровода и графен: революция в обмотке

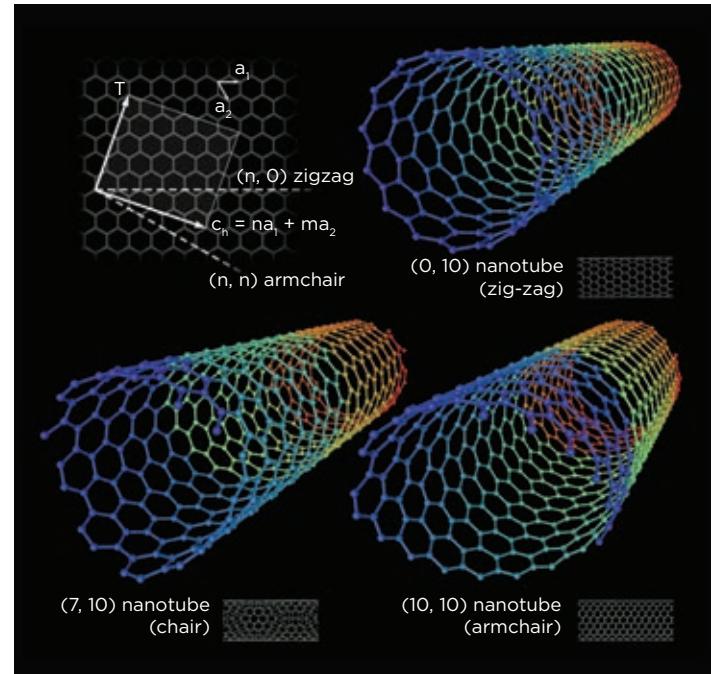
Нанопровода из меди и серебра и углеродные нанотрубки позволяют создать более тонкие обмотки, которые легче и лучше отводят тепло. Такие провода могут быть в десятки раз тоньше человеческого волоса и при этом не теряют проводящих свойств (рис 1). Это открывает возможности для производства микродвигателей весом в несколько граммов. Такие проводники легче адаптируются к автоматизированным методам укладки и намотки, что особенно важно при серийном производстве компонентов для малых и средних БПЛА (рис 2).

На первый взгляд кажется логичным, что из-за очень малого диаметра нанопровода должны обладать высоким сопротивлением и сильно нагреваться, однако на практике это не совсем так.

Причины, по которым нанопровода имеют низкое сопротивление:

1. Квантовый проводящий режим. При диаметре провода, сопоставимом с длиной свободного пробега электрона (в металлах – десятки нанометров), электроны перестают сталкиваться с решёткой и двигаются почти без рассеяния. Это называется баллистическим транспортом. В этом режиме сопротивление практически не зависит от длины провода – только от контактов и квантовых ограничений.
2. Skin effect. В обычных проводах на высоких частотах ток течёт только по поверхности провода. В нанопроводах, наоборот, весь объём провода участвует в проводимости, что улучшает эффективность при переменном токе.
3. Чистота и кристалличность. Нанопровода часто выращиваются как монокристаллы – без дефектов и границ зёрен. Это резко снижает сопротивление по сравнению с обычной многозернистой медной проволокой.
4. Материалы и композиты. Часто используют не только медь или серебро, но и покрытия (например, графеновая оболочка), которые обеспечивают сверхвысокую проводимость при минимальном сечении.

Графен, в свою очередь, представляет собой одноатомный слой углерода, расположенного в виде гексагональной решётки. Его необычайная прочность и высокая электропроводность делают его идеальным материалом для при-



1

Углеродные нанотрубки, существующие формы и типы



2

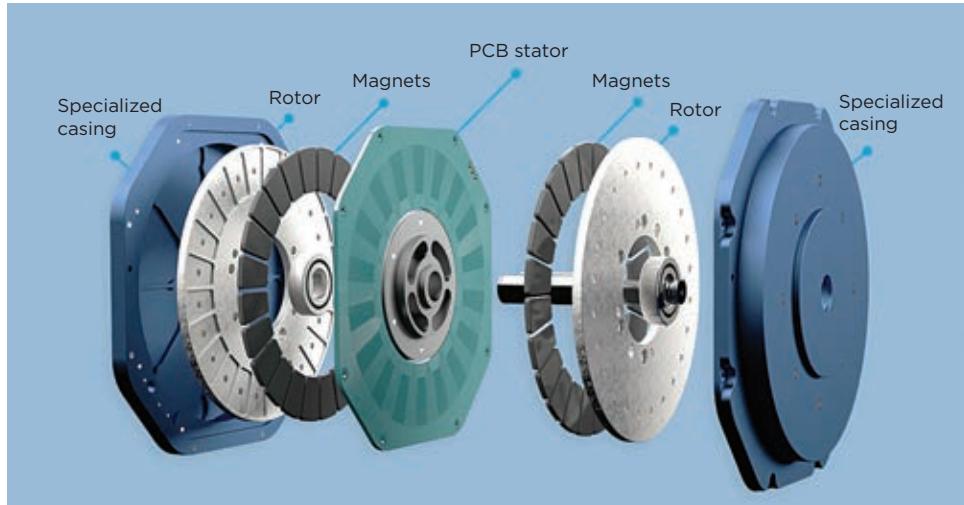
Статор с обмоткой, изготовленной из углеродных нанотрубок

менения в электроприводах. В условиях, где каждый грамм и каждый микрометр пространства имеют значение, графен может обеспечить качественный скачок в эффективности и надёжности.

Уже ведутся эксперименты по созданию гибких графеновых обмоток, которые можно интегрировать в криволинейные поверхности. Это позволит создавать электродвигатели, повторяющие форму корпуса дрона и тем самым повысить аэродинамическую эффективность.

Печатные и планарные двигатели

Помимо новых материалов, инженеры осваивают и новые формы моторов. Один из трендов – так называемые печатные двигатели (PCB «Printed Circuit Board» motors), где обмотки выполняются прямо на печатной плате (рис 3).



3

Технология сборки двигателя с обмотками на печатной плате



4

Общий вид «Печатного двигателя»

Вместо традиционных катушек из намотанной медной проволоки токопроводящие дорожки формируются в виде плоских спиралей или замкнутых петель на слоях платы. Магниты ротора взаимодействуют с этими дорожками, создавая врачающий момент. Такие моторы легче, компактнее и дешевле в массовом производстве (рис. 4). А ещё они легко встраиваются в корпус дрона, не занимая лишнего объёма.

Печатные двигатели находят применение не только в миниатюрных дронах, но и в специализированных устройствах, например, в автономных зондах и аграрных мини-БПЛА, где требуется высокая повторяемость и малая цена производства.

Планарные (линейные) двигатели – ещё одно интересное направление. В них ротор и статор расположены в одной плоскости, как два тонких диска (рис. 5). Такие конструкции особенно удобны для интеграции в плоские элементы БПЛА, например в крылья или фюзеляж. Они уменьшают высоту и вес устройства и, что важно, повышают устойчивость к вибрациям. Такие двигатели проще охлаждать, поскольку вся активная поверхность доступна воздуху или охлаждающим элементам.

Современные планарные моторы могут использоваться в модульных конструкциях, где каждый элемент

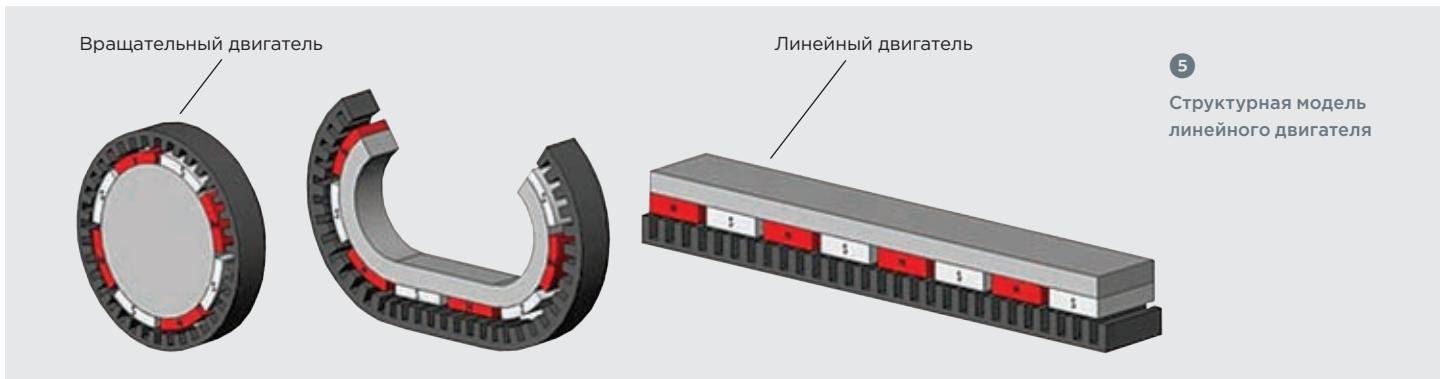
крыла или корпуса дрона является автономной силовой установкой. Это позволяет создавать адаптивные летательные платформы с распределённой тягой.

Учимся у природы

Конструкторы дронов всё чаще смотрят на природу как на источник инженерных решений. Например, полёт насекомых вдохновил людей на создание вибрационных микродвигателей, которые не вращаются, а совершают колебательные движения. Такие приводы особенно полезны в миниатюрных разведывательных дронах, где важны тишина, плавность и экономичность.

Также разрабатываются электромеханизмы, имитирующие работу птичьих мышц, позволяющие дрону менять форму крыла в зависимости от условий полёта. В таких системах двигатель работает не как источник постоянной тяги, а как привод к элементам трансформации формы, обеспечивая адаптацию к ветровым потокам и выполнению сложных манёвров в ограниченном пространстве.

Использование биоинспирированных решений (от англ.: bioinspired solutions) даёт преимущество не только в массе и размере, но и в способности к маскировке. Например, дроны, имитирующие поведение и форму насекомых, зна-



5

Структурная модель линейного двигателя

чительно труднее обнаружить с помощью обычных радиолокационных или визуальных средств.

Умный мотор: сенсоры, ИИ и адаптивность

Будущее двигателя – это не просто мотор, который крутит винт. Это интеллектуальный модуль, связанный с другими системами дрона. В таких моторах уже сегодня встроены датчики температуры, вибрации, оборотов, перегрузки. На основе полученных от этих датчиков данных система управления может в реальном времени корректировать работу двигателя: уменьшать нагрузку, изменять режим охлаждения, предупреждать об износе.

Дополнительно такие моторы могут обладать возможностью самодиагностики. Например, при обнаружении нестабильной работы обмотки или перегрева двигатель может автоматически перейти в экономичный режим, изменить частоту вращения или перераспределить нагрузку между другими двигателями.

Благодаря интеграции с ИИ такие моторы становятся частью киберфизической системы: они способны прогнозировать ресурс, адаптироваться к условиям полёта (высота, влажность, плотность воздуха), а в будущем – даже общаться между собой для оптимизации групповой динамики роя дронов.

Текущие ограничения

Несмотря на многообещающие технологии, путь к массовому внедрению новых двигателей непрост. Проблемы те же, что и всегда:

- высокая стоимость графена и нанопроводов;
- сложности в производстве сверхтонких компонентов;
- отсутствие стандартов и испытательных методик;
- потребность в переподготовке инженеров и операторов.

Кроме того, новые типы двигателей требуют новых подходов к проектированию всей системы дрона – от программного обеспечения до логики обслуживания. Например, графеновые обмотки могут быть несовместимы с традиционными методами пайки или защиты от влаги. А интеллектуальные моторы требуют отдельной калибровки и программирования.

Но эти трудности – временные. Развитие рынка дронов в различных сферах требует новых решений. А значит, технологии будут развиваться, удешевляться и масштабироваться. Уже сейчас в мире существует множество научных программ, направленных на развитие массового производства графеновых и нанопроводниковых компонентов.

Выводы

Электродвигатели для БПЛА находятся на пороге революции. Новые материалы, конструкции и подходы позволяют создавать моторы, о которых 10 лет назад писали только в научной фантастике. Графен, печатные обмотки, интеллектуальное управление – всё это делает дроны легче, умнее и выносливее.

«Сердце беспилотника» действительно меняется – и с каждым витком провода, каждым атомом графена мы приближаемся к дронам нового поколения. Будущее уже началось, и оно движется тише, быстрее и дальше, чем когда-либо прежде. Следующим шагом может стать полная интеграция силовой установки в конструкцию крыла, создание самоисцеляющихся обмоток и даже применение квантовых материалов для управления потоком энергии.

От меди к графену – это не просто переход к новым материалам. Это переход к новому мышлению в инженерии, где граница между механикой, электроникой и программированием постепенно стирается.

И, возможно, в ближайшем будущем электродвигатель станет не просто частью дрона – а его разумным ядром.

Несмотря на то, что многие из описанных выше технологий всё ещё находятся на этапе лабораторных исследований или ограниченного применения, компания «Остек-ЭТК» внимательно следит за развитием перспективных направлений в области двигателестроения, тестирует новые образцы оборудования и технологий, а также поддерживает контакт с разработчиками и поставщиками. Наши специалисты регулярно принимают участие в международных выставках, посвящённых данной тематике, а также проходят обучение непосредственно на заводах, занимающихся разработкой и производством оборудования для полного цикла изготовления электродвигателей. Мы готовы не только поставлять современное проверенное оборудование, но и адаптировать под задачи наших клиентов передовые решения, которые ещё вчера казались частью далёкого будущего. 

Использованные источники

1. Революционный CNT-мотор без металлических обмоток <https://link.springer.com/article/10.1007/s42114-025-01302-4>
2. Как графен может повысить эффективность электродвигателей <https://www.powermotion-tech.com/technologies/motors/article/21282671/how-graphene-could-improve-the-efficiency-of-electric-motors>
3. Graphene electric motor <https://patents.google.com/patent/KR101758103B1/en>
4. Обнаружение неисправностей дронов на основе вибрации с использованием искусственного интеллекта https://www.researchgate.net/publication/359604419_Vibration-Based_Fault_Detection_in_Drone_using_Artificial_Intelligence
5. Композитные материалы на основе нитей для 3D-печатных деталей дронов <https://www.mdpi.com/1996-1944/18/11/2465>
6. High-Speed Coreless Axial-Flux Permanent-Magnet Motor With Printed Circuit Board Winding https://www.researchgate.net/publication/327900449_High-Speed_Coreless_Axial-Flux_Permanent-Magnet_Motor_With_Printed_Circuit_Board_Winding

Обнаружение дефектов на кристалле микросхемы или печатных платах методом термоэмиссионной микроскопии

Текст: Сергей Максимов,
Артем Азарченков

”

Миниатюризация электроники до наноразмеров и рост сложности микросхем делают поиск микроскопических дефектов (короткие замыкания, утечки тока, дефекты оксидов) критической задачей для надежности устройств. Традиционные методы диагностики зачастую не справляются с требованиями к чувствительности, скорости или бесконтактности. Термоэмиссионная микроскопия (ТЭМ) выделяется среди методов неразрушающего контроля способностью бесконтактно выявлять мельчайшие тепловые аномалии (до 1 мК!), вызванные дефектами, без какой-либо подготовки поверхности – как с лицевой, так и с тыльной стороны кристалла. Эта комбинация высокой тепловой чувствительности и оперативности делает ТЭМ незаменимым инструментом для современной микроэлектроники.

В статье рассмотрены принципы работы ТЭМ, ее ключевые преимущества перед альтернативами (жидкокристаллический анализ, флуоресцентная микротермография) и практическое применение для диагностики дефектов кристаллов и плат.

В основе работы термоэмиссионного микроскопа лежит технология синхронной термографии (СТГ) или же LOCK-IN THERMOGRAPHY(LIT). Первое упоминание о ней было отмечено в 80-х годах прошлого столетия, но особую популярность технология получила в 90-е годы, когда перед группой ученых из института физики микроструктур имени Макса Планка была поставлена задача получить изображение малых токов утечки в кремниевых солнечных элементах. В рамках этих работ был разработан метод «Динамическая прецизионная контактная термография», на тот момент это была единственная термографическая система с пределом обнаружение ниже 100К (рис ①).

Метод был рабочий, но совершенно непрактичный, поскольку система работала в режиме механического контакта, а время измерения исчислялось несколькими часами. С появлением в конце 1990-х годов высокочувствительных термокамер открылся путь для создания высокочувствительных термографических систем на основе ИК-излучения – он же термоэмиссионный микроскоп.

Работы над созданием термоэмиссионного микроскопа велись для исследования элементов солнечных панелей, но термоэмиссионная микроскопия нашла применение и для тестирования интегральных схем (IC), определения характеристик полупроводниковых пластин и отображения дефектов целостности оксида затвора (GOI) в МОП-устройствах.

Основные ограничения термоэмиссионных микроскопов – это пространственное разрешение, которое ограничено длиной волны используемого ИК-излучения и составляет около 2 мкм. Но, несмотря на это, метод имеет ключевое преимущество перед другими популярными тепловыми методами, такими как жидкокристаллический анализ (рис ②) и флуоресцентная микротепловая визуализация (рис ③), – это простота использования без какой-либо подготовки поверхности как с фронтальной, так и задней поверхности полупроводникового элемента.

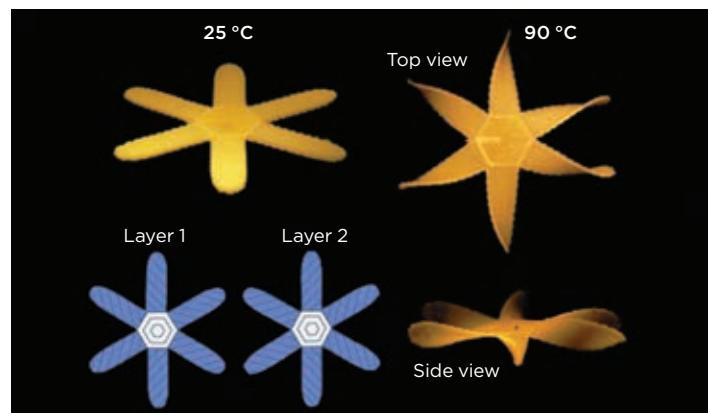
В последнее время в области термоэмиссионной микроскопии произошло значительное техническое усовершенствование, связанное с применением синхронной термографии, что позволило практически в сотню раз повысить предел обнаружения локальных колебаний температуры. В современных системах эта цифра варьируется не выше 1 мК, что приводит к значительному снижению предела обнаружения локальных источников тепла 100 мкВт. Несмотря на низкое пространственное разрешение система очень чувствительна и позволяет получить информацию о локальном источнике тепла с высокой точностью положения.

Современным воплощением прогресса в термоэмиссионной микроскопии стал микроскоп nanometric



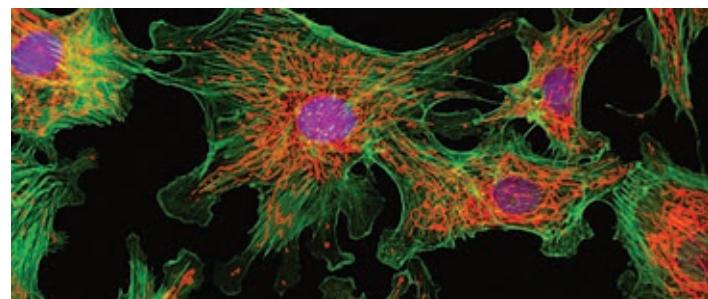
①

Контактный термограф



②

Метод жидкокристаллического анализа



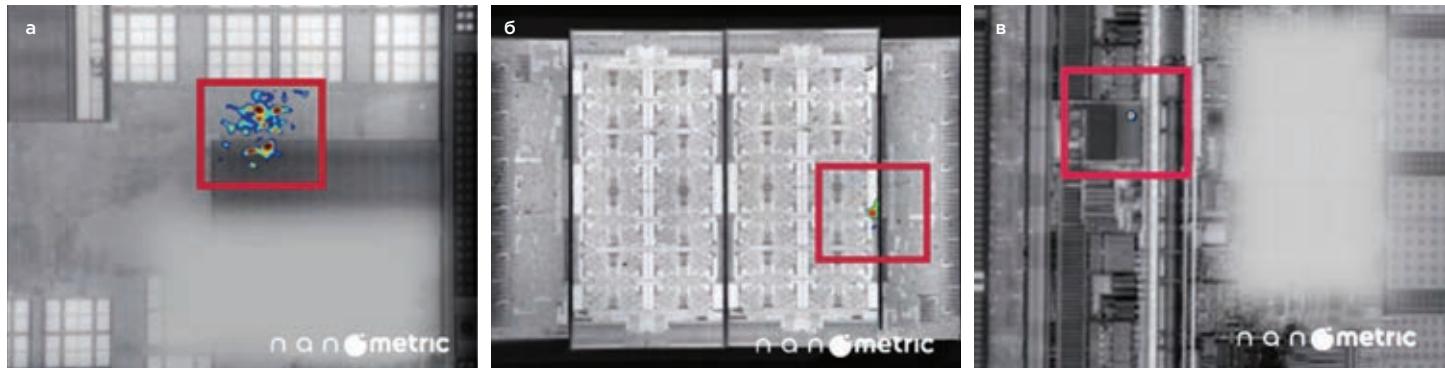
③

Метод флуоресцентной микротепловой визуализации



④

Термоэмиссионный микроскоп nanometric TemOn 100



5

Примеры изображений с термоэмиссионного микроскопа nanometric TemOn 100: а) Дефект 2,5D-корпусирования; б) Утечка тока на чипе; в) Короткое замыкание микросхемы процессора

TemOn 100 (рис. 4) – система, сочетающая передовые технологии СТГ с инновационными инженерными решениями. Этот прибор не только соответствует, но и превосходит ключевые требования к чувствительности и точности в исследовании микротепловых процессов.

Ключевые технические параметры прибора:

- Предел обнаружения температурных колебаний: <1 мК (в режиме синхронного детектирования).
- Минимальная обнаруживаемая мощность теплового источника: от 100 мкВт.
- Диапазон спектральной чувствительности: 3-5 мкм (оптимизирован под тепловое излучение кремниевых структур).
- Частота модуляции теплового сигнала: 0,1 Гц – 1 кГц (с возможностью точной настройки под исследуемый объект).
- Автоматическая термостабилизация: отклонение не более ±0,01 К для исключения дрейфа сигнала.

Преимущества перед аналогами:

- Высокая скорость измерений – в отличие от ранних контактных методов, требующих часов, TemOn 100 обеспечивает детектирование за секунды благодаря цифровой обработке сигнала в реальном времени.
- Универсальность применения – система работает без подготовки поверхности, сохраняя точность как при фронтальном, так и при тыльном сканировании полупроводниковых пластин (рис. 5).
- Улучшенное соотношение сигнал/шум – использование многослойного охлаждения матрицы и алгоритмов подавления фоновых помех повышает достоверность данных.
- Компактность и энергоэффективность – в отличие от громоздких ранних термографов TemOn 100 интегрирует все компоненты в единый корпус с низким энергопотреблением.

Альтернативной системой для диагностики полупроводниковых приборов выступает недавно вышедший на рынок фотонноэмиссионный микроскоп InGaAs 50 (рис. 6), который оснащен полностью автоматической системой перемещения, камерой InGaAs с интенсивным охлаждением, линзами микроскопа различного увеличения (до 100X) и режимом синхронного детектирования, что делает его пригодным для определения точек отказа в полупроводниковых приборах.

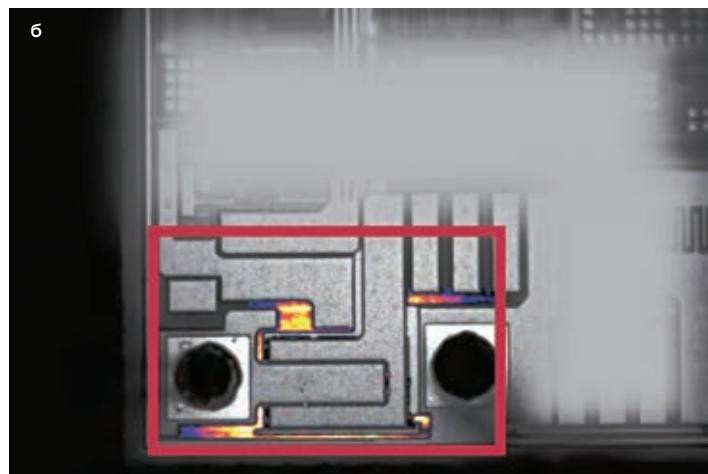
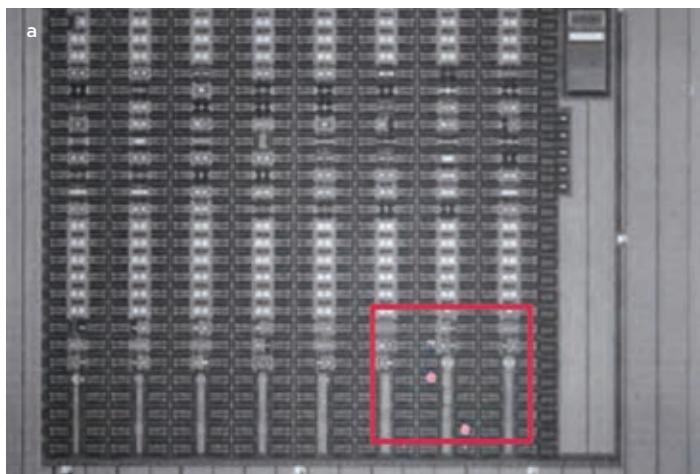
Фотонноэмиссионный микроскоп – это разновидность микроскопа, работающего по принципу регистрации фотонов, испускаемых исследуемым объектом при взаимодействии с возбуждающим пучком. Его физический принцип связан с фотонной эмиссией, возникающей вследствие электронных процессов на поверхности или внутри материала. Фотонная эмиссия несет информацию о локальных электронных и структурных свойствах поверхности (рис. 7).

Разрешающая способность фотонноэмиссионного микроскопа может достигать порядка 200-300 нанометров, что соответствует пределам оптической микроскопии и определяется длиной волны регистрируемого фотонного излучения и числовым апертурой оптической системы.



6

Фотонноэмиссионный микроскоп InGaAs 50



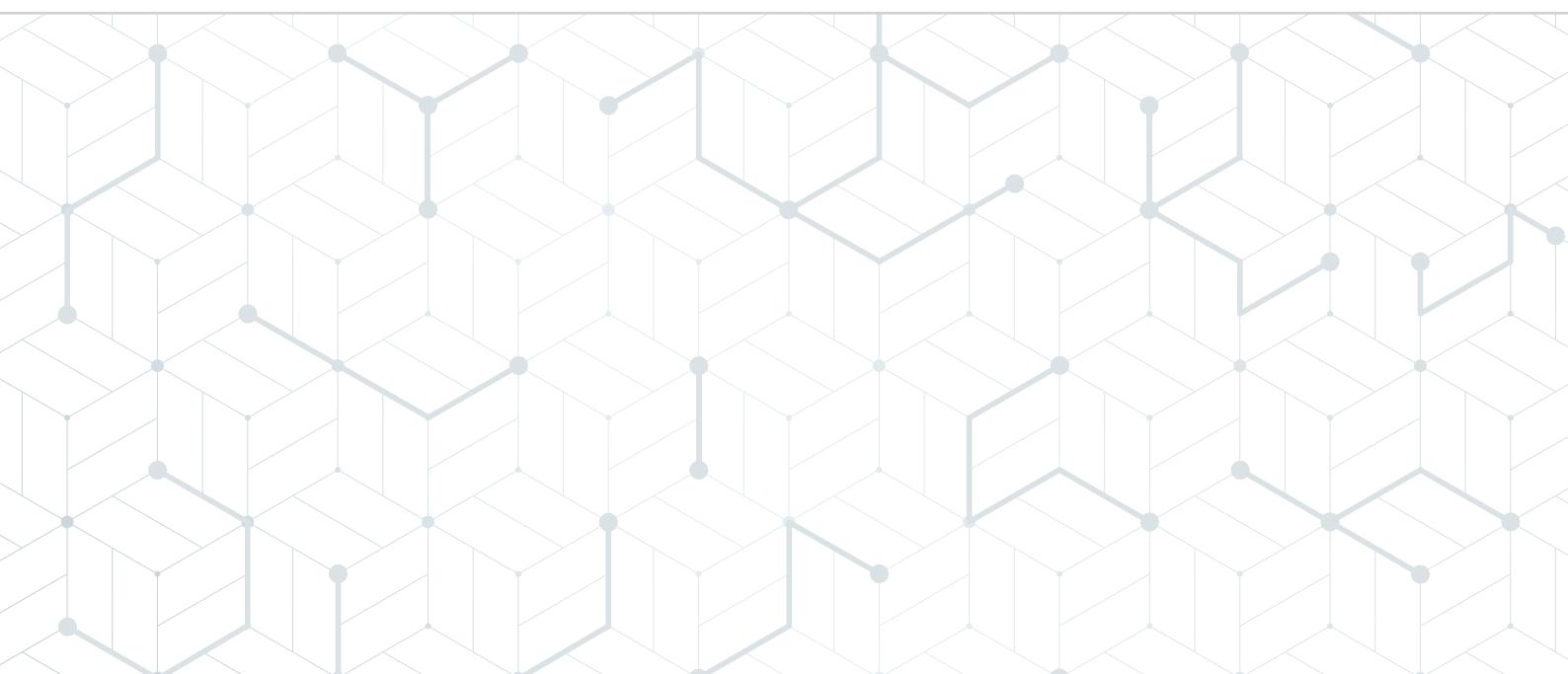
7

Локальные изображения с InGaAs 50: а) 5x; б) 20x

Перспективы развития данных систем заключаются в улучшении пространственного разрешения за счёт использования новых оптических схем, метаматериалов и плазмонных структур, что позволит приблизить разрешение к субмикронному уровню, а также даст возможность интеграции с другими методами микроскопии (например, сканирующей зондовой или электронно-лучевой), расширяя функционал и предоставляя комплексную информацию о структуре и свойствах материалов. ■

Учитывая пройденный путь – от первых экспериментов в 1980-х до современных высокочувствительных систем, способных детектировать перепады температур в доли милликельвина – можно

ожидать, что с дальнейшим развитием алгоритмов обработки данных и внедрением новых инженерных решений пространственное разрешение будет улучшено до субмикронного уровня (<1 мкм) для термоэмиссионной и нанометрового (<100 нм) для фотонноэмиссионной микроскопии. Комбинируя беспрецедентную чувствительность к теплу (TemOn 100) и высокое разрешение для фотонных процессов (InGaAs 50), эти методы формируют новый стандарт диагностики, обеспечивающий надежность следующего поколения электронных компонентов!



ОТ ПЕРВОГО ЛИЦА

ICL Техно: «Производим весь спектр вычислительной техники и гордимся ее качеством»

“

О технологических прорывах в производстве вычислительной техники, стратегии качества вместо гонки за низкой ценой и неожиданных уроках выхода врозницу редакции журнала рассказал Евгений Степанов, генеральный директор ICL Техно.

Техно – один из ведущих российских производителей вычислительной техники. Что именно вы производите сейчас и за счет чего сохраняете лидерство? На чем делаете акцент?

Мы производим практически весь спектр вычислительной техники: персональные компьютеры, ноутбуки, серверы, а также их производные – моноблоки, планшеты, тонкие клиенты и системы хранения данных. Кроме «коробочных» продуктов у нас есть программно-аппаратные комплексы, созданные под конкретные отрасли, – образование, здравоохранение, розничную торговлю и госорганизации.

Основной объем продаж и производства приходится на персональную технику. За прошлый год мы выпустили свыше 250 тысяч устройств. Лидерство сохраняем за счет широкого модельного ряда: например, у нас самый большой ассортимент ноутбуков среди российских производителей. В прошлом году первыми в реестре представили ноутбук с дискретной видеокартой. Для нас важно качество, надежность наших устройств. Много внимания уделяем повышению локализации. Разрабатываем собственные компоненты – материнские и дочерние платы, модули памяти, блоки питания, сетевые карты и Wi-Fi-адAPTERы. Это снижает импортозависимость – и нашу, и страны в целом.

Как изменился российский рынок техники за последние годы? Какие тренды вы наблюдаете?

Российский рынок техники стал более регулируемым, и это главный тренд. С каждым годом на нем появляется больше отечественной продукции, наличие рынка дает производителям уверенность в том, что можно развивать собственные производства, инвестировать в новые технологии.

Сейчас многие говорят о возвращении западных вендоров. Что вы об этом думаете?

Думаю, для западных компаний возвращение не будет простым процессом. Надеюсь, их будут стимулировать вкладывать средства в развитие российской промышленности – создание совместных предприятий, локализацию производства. Если их просто пустят на рынок без таких условий, мы вернемся к ситуации пятилетней давности, когда вендоры развивали производства в недружественных нам странах, а Россия оставалась лишь потребителем технологий.

В последние годы российская промышленность сталкивается с массой вызовов: санкции, логистические сложности, высокая ключевая ставка ЦБ. Как все это повлияло на Техно?

Последние три года действительно стали серьезным испытанием. Санкции радикально изменили правила игры – нам пришлось полностью перестраивать логистические цепочки и искать альтернативные способы расчетов с партнерами. Сроки закупки компонентов



Евгений Степанов, генеральный директор ICL Техно

увеличились в 2-3 раза: если раньше мы получали комплектующие максимум через 3 месяца, то теперь ждем 6-9 месяцев. Это потребовало принципиально нового подхода к закупкам. Нам пришлось внедрить продвинутые инструменты прогнозирования, ведь цена ошибки в горизонте 9 месяцев очень высока.

Но кризис стал и драйвером развития. Например:

- Запустили собственное производство электронных плат с высокотехнологичными линиями, которые нам поставила компания «Остек-СМТ».
- Начали разработку собственных BIOS, хотя раньше даже не думали о такой возможности.
- Создали внутреннюю систему обучения для быстрого повышения квалификации сотрудников.

Сегодня мы научились работать в этих условиях, хотя и мечтаем о снижении ставки ЦБ. Главное – не опускать руки и продолжать развивать собственные компетенции. Как показала практика, именно это, в конечном итоге, дает конкурентные преимущества.

У вас появился новый розничный бренд OSiO. Чем отличается работа в этом сегменте от B2B?

Розница – совершенно другая планета по сравнению с B2B. Когда мы запускали OSiO, сразу поняли – здесь работают другие законы. В B2B преобладает рациональный выбор, ключевую роль играют ТЗ и спецификации. В рознице покупатель выбирает эмоциями – внешний вид, тактильные ощущения и «вау-эффект» могут стать решающими для покупки. Если у одного ноутбука два USB-порта, а у другого еще и Type-C, то при сопоставимой цене именно дополнительный разъем может стать решающим аргументом.

Для OSiO мы создали отдельную линейку с акцентом на дизайн, сохранив при этом высочайший уровень

качества. Наши сотрудники, крайне взыскательные пользователи, сами покупают технику OSiO, и для нас это важный индикатор уровня нашей продукции. Интересно, что некоторые решения перекочевали и в наш B2B – бизнес-клиенты тоже оценили новый подход. Если в B2B-закупках мы конкурируем в основном с российскими производителями, то в рознице – с китайскими брендами и параллельным импортом. Здесь ценовая война жестче, а маркетинг агрессивнее. У китайских производителей деньги дешевле, рабочая сила доступнее, и дистрибуция на весь мир позволяет экономить на масштабе.

Мы пока только нащупываем B2C-рынок. Стартовали год назад с линейки ноутбуков, потом добавили моноблоки и мини-ПК. Но уже поняли главное: розница – лучший полигон, чтобы понять, что нужно делать в B2G и B2B, каким образом оптимизировать собственные процессы, как развиваться, куда двигаться, чтобы выиграть в конкурентной борьбе.

С китайскими производителями сложно конкурировать по цене. Что вы считаете своими ключевыми преимуществами?

Да, китайские производители работают на глобальный рынок с миллионными тиражами, участвовать в ценовых войнах с ними в текущих условиях совершенно бесперспективно. Вместо этого мы делаем ставку на качество, широкую продуктовую линейку и дизайн. Качество нашей продукции подтверждают самые требовательные заказчики. Что касается дизайна, мы стремимся создавать продукты, которые выигрывают по эстетике и эргономике, уделяем внимание каждой детали. Ну, и, конечно, важны гарантийное обслуживание, техническая поддержка, сервисные центры по всей стране, которые у нас уже есть.

Вы производите свою технику на собственном заводе под Казанью площадью 8 000 кв. м. Какие инструменты помогают оптимизировать процессы?

Мы уделяем огромное внимание качеству продукции. За два года благодаря новым испытательным стендам и лабораториям нам удалось вдвое сократить затраты на гарантийное обслуживание. Используем высокотехнологичное, максимально автоматизированное оборудование. Постоянно модернизируем не только технологические мощности, но и систему управления – развиваем российскую ERP-систему на платформе 1С, постоянно меняемся. И, конечно, вкладываемся в обучение и развитие персонала, профессиональный рост и мотивацию.

За последний год мы оптимизировали многие процессы, и по некоторым операциям нам удалось повысить скорость работы на 30–40 %. Это отличный показатель, но при этом мы знаем, как добиться еще более впечатляющих результатов.

Какое оборудование и услуги предоставила вам компания «Остек-СМТ»? Какие задачи помогли решить?

Компания «Остек-СМТ» поставила нам две полностью автоматизированные линии для поверхностного монтажа электронных плат, линию выводного монтажа. Это универсальное решение для производства передовой аппаратуры High-End класса. К нам часто приезжают гости – клиенты, партнеры, в том числе зарубежные – и все они подтверждают, что это самое современное оборудование, которое сегодня есть на рынке.

Производство включает станции нанесения паяльной пасты, установки компонентов, 12-зонную печь оплавления с точным температурным контролем и станции оптического контроля. Линии ориентированы на работу в условиях как серийного, так и многономенклатурного производства сложной аппаратуры с большим числом компонентов на плате. Благодаря высокой степени автоматизации производственная эффективность практически не зависит от человеческого фактора. Специалисты «Остек-СМТ» не только поставили оборудование, но и провели полную пусконаладку, обучили наш персонал работе с ним. Оборудование высокотехнологичное и требует определенной культуры обслуживания, поэтому обучение было очень важным этапом.

Благодаря этому проекту мы смогли резко увеличить глубину локализации – теперь ключевые электронные компоненты собираем сами. Линия гибкая, может эффективно работать даже с небольшими сериями в несколько сотен плат. Для нас это очень важно.

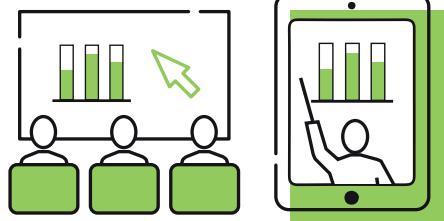
Каковы ваши дальнейшие планы по развитию производства?

Планы масштабные. Во-первых, продолжим расширять собственное производство электронных плат – будем увеличивать количество линий, продолжим закупать специализированное оборудование, оптимизировать процессы.

Во-вторых, активно развиваем наш дизайн-центр. Планируем усиливать компетенции в области собственных разработок, это касается как аппаратной части, так и программного обеспечения. Продолжим создавать новые продукты, в том числе не связанные напрямую с вычислительной техникой. Мы видим потребности наших заказчиков и рассматриваем смежные направления, где можем применить наши компетенции в радиоэлектронике. Безусловно, будем продолжать работу над качеством продукции.

Конечно, высокая ключевая ставка сдерживает развитие. При этом хочу отметить, что государство нас поддерживает. Например, Фонд развития промышленности выделил льготный заем, который очень помог в развитии нового производства. Несмотря на все внешние вызовы, мы смотрим в будущее с оптимизмом и готовы развиваться дальше. □

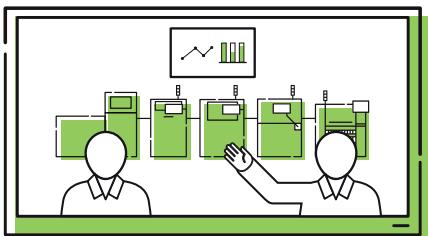
АКАДЕМИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ОСТЕК-СМТ



СЕМИНАРЫ
ОНЛАЙН И ОФЛАЙН



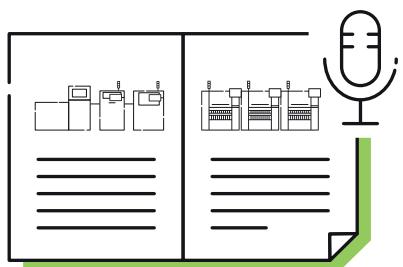
ПРОФИЛЬНЫЕ КАНАЛЫ
В СОЦИАЛЬНЫХ СЕТЯХ



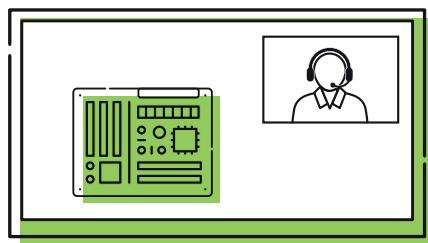
РЕПОРТАЖИ И КЕЙСЫ
С ПРОИЗВОДСТВ



ВИДЕООБЗОРЫ
РЕШЕНИЙ И ТЕХНОЛОГИЙ



ЭКСПЕРТНЫЕ
СТАТЬИ И ИНТЕРВЬЮ



ВИДЕОПРЕЗЕНТАЦИИ
И ВЕБИНАРЫ



Адаптивность промышленных кибер- физических систем

как ключевое качество успешного производства отечественной электроники

Текст: Александр Завалко

”

Почему дорогое импортное оборудование иногда проигрывает бывшим в употреблении, устаревшим азиатским аналогам эконом-класса? Как российские предприятия могут повысить гибкость своих кибер-физических систем, не вкладывая миллиарды в переоснащение? В статье рассмотрены ключевые проблемы отрасли и предложены практические решения – от сбора точных производственных данных до развития инженерной смекалки.

Качество российской электроники, как и многие другие бизнес-вопросы, регулируется рядом законодательных актов и нормативных документов (примеры [1-6] в списке литературы). Эти законы и регламенты направлены, в том числе, на обеспечение высокого уровня надежности и безопасности отечественной электроники. Они требуют проведения испытаний и сертификации продукции перед выпуском на рынок и контроля за соответствием установленным стандартам на всех этапах жизненного цикла изделия. Кроме многочисленных законов, конкуренция, в том числе с мировыми брендами, требует стабильного, управляемого качества российской продукции.

Конкурентный рынок вынуждает компании постоянно искать новые способы улучшения своей продукции. Чтобы выделяться среди конкурентов, производители внедряют новейшие технологии, разрабатывают уникальные функции и повышают эффективность производственных процессов. Это ведет к созданию более качественных продуктов, отвечающих современным требованиям потребителей. А для поддержания прибыльности компаниям приходится оптимизировать производство, улучшать производственные процессы и повышать производительность труда. Также на конкурентном рынке важна репутация бренда. Если продукт имеет низкое качество, покупатели быстро переключаются на продукцию конкурентов. Поэтому компании должны активно внедрять системы контроля качества на всех этапах производственного процесса, начиная от выбора сырья и заканчивая финальной проверкой готового изделия.

Вся изложенная выше логика здравого смысла начинает рушиться при живом общении с реальными коллегами действующих российских производств электроники.

Фундаментальных причин низкого и нестабильного качества много, вот пять самых популярных:

- 1. Недостаток инвестиций в научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы (НИОКР).** Развитие современной электроники требует значительных вложений в фундаментальные и прикладные исследования, а также в разработку новых технологий. Недостаточное финансирование НИОКР ограничивает возможности российских компаний по созданию инновационных продуктов и технологий.
- 2. Отставание в области микроэлектроники.** Микроэлектронные компоненты являются основой большинства современных электронных устройств. Россия значительно отстает от мировых лидеров в этой сфере, что затрудняет создание конкурентоспособных и качественных продуктов.
- 3. Проблемы с производственными мощностями и инфраструктурой.** Некоторые российские предприятия используют устаревшее оборудование и технологии, что снижает эффективность производства и качество конечной продукции. Новейшие технологии труднодоступны из-за санкций.
- 4. Низкий уровень локализации производства.**



1

Низкоавтоматизированная сборка смартфонов во Вьетнаме

Многие компоненты и материалы импортируются из-за рубежа, что делает отечественную промышленность зависимой от внешних поставщиков. Это увеличивает стоимость продукции и снижает устойчивость к колебаниям на мировом рынке.

- 5. Недостаточная квалификация кадров.** В отрасли электроники требуется высококвалифицированный персонал, обладающий современными знаниями и навыками. Недостаток таких специалистов или их низкая мотивация может негативно сказываться на качестве продукции.

И это мы еще не упомянули о высокой ставке ЦБ, дефиците отечественного технологического оборудования, нерыночных факторах конкуренции и многом другом.

Теоретически правильные алгоритмы и «кайдзэн» советы в России выдержать особенно тяжело. Почему так? Потому что качество продукции на выходе зависит от огромного количества факторов, на многие из которых мы не можем повлиять. Всегда приятно читать советы в духе «не нравится поставщик компонентов, материалов или оборудования? – смените его!». А что делать, если стоимость и сроки замены неподъемны для ресурсов бизнеса?

Компания «Остек-СМТ» уже четвертый десяток лет сфокусирована на автоматизации и роботизации российского приборостроения. Поэтому давайте погрузимся в актуальную тему оснащения производств электроники современным технологическим оборудованием, таким, как: линии поверхностного и штыревого монтажа, участки отмычки, лакировки, входного, оптического, неразрушающего, рентгеновского контроля и т. д. Теоретически понятно, что стабильное и высокое качество электронных изделий недостижимо при использовании оборудования устаревшего, изношенного, не обеспечивающего нужные технологическую точность и окно технологического процесса.

Парадоксально, но и тут реальность начинает «править» теорию. Есть примеры заводов, оснащенных дорогостоящим «недружественным» оборудованием из Японии, Германии, Швейцарии, которые проигрывают конкуренцию



2

Foxconn собирает в Индии смартфоны на снятых с производства моделях установщиков

производствам, использующим устаревшее, бывшее в употреблении, азиатское оборудование эконом-класса (рис 1 и 2).

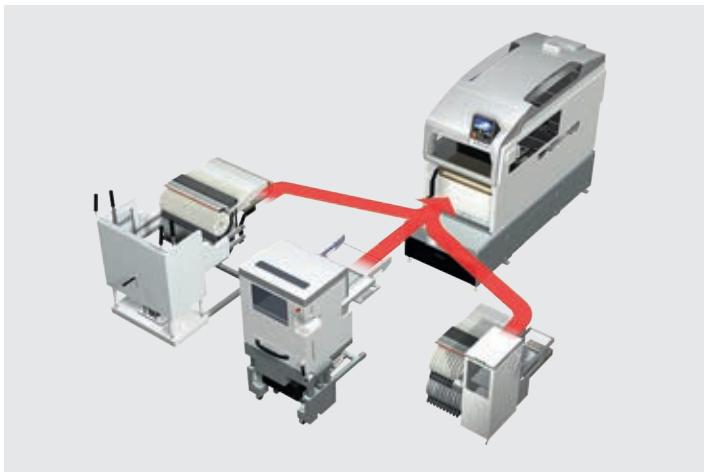
Как такое возможно? [7, 8] Дело в том, что характеристики оборудования – очень важный, но не единственный фактор конкурентоспособности предприятия. Общеизвестна теория бочки Либиха или закон ограничивающего фактора, когда критический фактор определяет уровень всей системы [9].

Если оборудование не лимитирует уровень качества, то не будет никакого экономического эффекта от дальнейшего улучшения его точности, производительности и т. п. Аналогичная идея лежит в основе общеизвестной теории ограничений Голдратта [10].

Вроде бы все банально, логично и недостойно упоминания. Однако есть место волшебству и в цехах сборки электроники. Регулярно там происходит известный с детства фокус превращения «кареты в тыкву». А именно, оборудование, еще вчера соответствовавшее производственным задачам, сегодня уже не может собрать новые изделия или новые объемы заказов. Станки перестают соответствовать требованиям актуальных задач производства, а значит становятся некачественными. Качество – степень соответствия совокупности присущих характеристик объекта требованиям, как известно из стандартов [11, 12, 13].

Изменились задачи и требования производства, изменились и критерии качества, предъявляемые к оборудованию. И как по мановению волшебной палочки высококачественное дорогостоящее оборудование в один миг вдруг становится некачественным. Например, возникла задача монтировать слишком крупные для станков микросхемы, разъемы или коробление и размеры плат «вдруг» превысили возможности монтажного оборудования.

Произошло «моральное устаревание» – основной риск утраты ценности для технологического оборудования в приборостроении. Средний возраст технологическо-



3

Модульная японская система установки SMD-компонентов

го оборудования в обрабатывающей промышленности России – 12-13 лет [14], типичный срок морального старения станков в электронике – 5-10 лет. Поэтому вопросы эффективного применения существующего или планируемого к закупке оборудования особенно для нас актуальны.

Для борьбы с «моральным устареванием» и формирования «технологического запаса» производители оборудования уже более 20 лет разрабатывают модульные системы (рис 3).

В таком технологическом оборудовании предусмотрена замена устаревших модулей, блоков, камер технического зрения, установочных головок на новые, отвечающие современным требованиям. Отдельный блок дешевле целого станка, и производитель рискует уменьшить объем своих будущих продаж. Кроме того, модульные системы объективно дороже в разработке, испытаниях и производстве. Требуется устойчивый бизнес с долгосрочным расчетом и планированием всего жизненного цикла станка. Поэтому модульные станки дороже, занимают свою нишу «не эконом класса» и не смогли захватить весь рынок промышленного оборудования.



4

Пример «универсального 4-в-1» принтера трафаретной печати



5

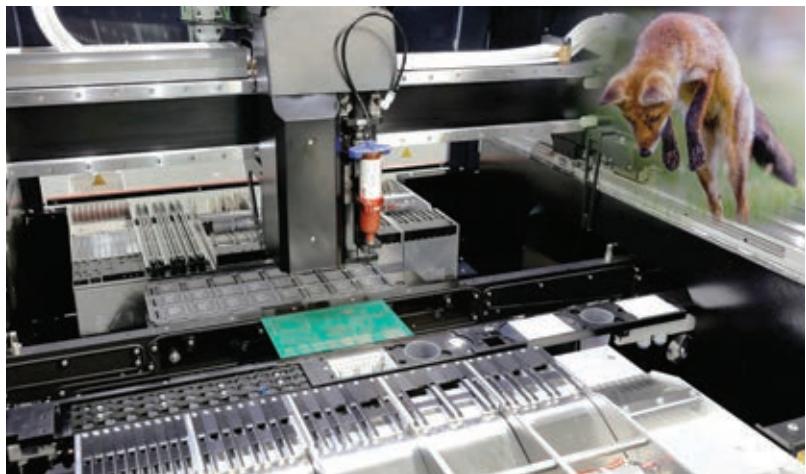
Идеальное ГМО-животное глазами потребителя и универсальный станок ЛИСА

Также стоит отметить наличие функциональных модулей в оборудовании, способных выполнять «смежные» технологические операции и обходиться без покупки дополнительных специальных станков. Для примера рассмотрим операцию трафаретной печати паяльной пасты. Уже давно производители автоматических принтеров предлагают встроенные модули очистки трафарета, дозирования клея, системы проверки качества нанесения пасты при помощи реперных камер (рис 4).

Естественно, встроенные блоки и модули по функциональным, точностным характеристикам и производительности уступают специализированному оборудованию. Однако для заказчиков оборудования настолько велик соблазн купить универсальный станок «на все случаи жизни», что нередки случаи, когда техническое задание на закупку оборудования (принтера трафаретной печати) получается путем суммирования технических заданий отдельных специализированных станков (установок отмычки, дозирования материалов, автоматической инспекции паяльной пасты). Наглядно эти давние человеческие желания и потребности отображаются в известном образе идеального домашнего животного (рис 5).

Как известно, генетический инжиниринг такого ГМО для сельского хозяйства еще не завершен. Хотя давно известны свиньи, дающие не только мясо, сало, кожу, щетину, но и шерсть [15]. В сборке электроники ситуация аналогична. Идеального оборудования еще не разработано, но уже известны примеры универсальных сборочных центров. Такие центры способны в одном цикле прецизионно нанести пасту и клей, проверить качество доз, установить широкий диапазон электронных компонентов [16]. При этом, самым универсальным и распространенным сборочно-монтажным центром в отечественном приборостроении продолжает оставаться радиомонтажник высокого разряда.

Не будем проводить анализ плюсов и минусов построения производства электроники на основе коллектива радиомонтажников высокого разряда. Очевидно,



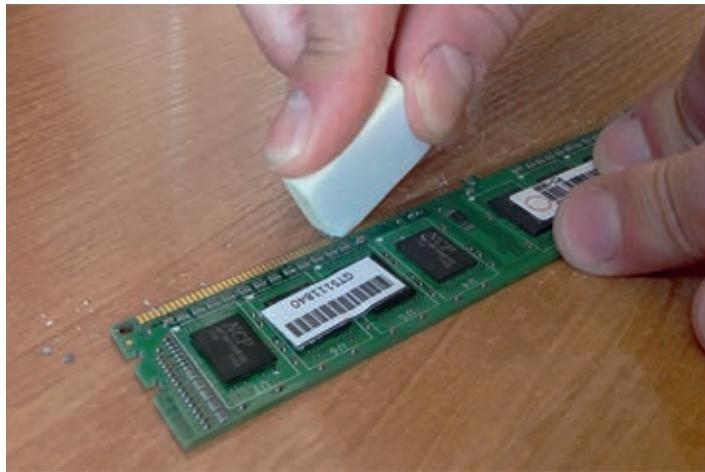
что этот подход устарел еще в XX веке и не перспективен, хотя роль человеческого фактора остается ключевой и сейчас.

Другой способ создания адаптивных производств состоит в улучшении систем организации и управления станочным парком. Например, всем известны Scrum, Lean, фреймворки AGILE, часто встречающийся в разработке электроники, и ПО [17]. Давайте сделаем цех ver. 1.0, потом 2.0, потом 3.0 и т. д. При планировании в горизонте 5 + лет этот подход жизнеспособен. Вполне реально запустить первую очередь, первый этап производства за пару лет и потом модернизировать, поэтапно масштабировать сборочные мощности на основе «спринтов» длительностью в полгода-год. Такая скорость изменений связана не только со сроками поставок и внедрения станков, но и подготовкой помещений, гибкостью изменения бизнес-процессов, скоростью найма и обучения персонала. Однако такая длительность «спринтов» в месяцы и годы не может никого устроить. Это слишком долго даже для российской электроники.

Альтернативным подходом является развитие гибкой производственной системы (ГПС, англ. Flexible Manufacturing System, FMS) [18]. В ее фундаменте заложено две идеи: адаптивность (гибкость) управления и адаптивность (многофункциональность) оборудования.

Выделяют две категории ГПС:

- Первая категория – гибкость маршрутизации, она охватывает способность системы изменяться для производства новых типов продукции, а также способность изменять порядок операций, выполняемых над деталью.
- Вторая категория – гибкость оборудования, которая заключается в возможности использования нескольких машин для выполнения одной и той же операции с деталью, а также в способности системы воспринимать масштабные изменения, например, изменения объема, мощности или производительности.



6

Ластик помогает очистить реперы и контакты плат от налета

В любом случае, в основе ГПС – кибер-физическая система, построенная на автоматическом оборудовании и программном обеспечении. В России мы видим сложности в доступности современного технологического оборудования, готового работать в режиме обмена данными машина-машина M2M в рамках промышленного интернета вещей (ИоТ). Также есть объективные сложности в создании и распространении адаптивного управления бизнес-процессами при помощи ПО класса MES и ERP [19].

Общемировой задачей развития ГПС первой категории является разработка и проверка качественных математических моделей, способных давать устойчивые результаты на низкокачественных, неточных данных (о прогнозах продаж, об уровне дефектности, о реальной трудоемкости продукции, слишком малые выборки данных и т. д.). Стоит процитировать учебник: «Многие явления описываются такими математическими моделями, разработка теории которых находится пока в начальной стадии и о решении которых мало что известно» [20]. Современные технологические процессы сборки электроники относятся к таким явлениям. Даже технологически линейный поверхностный монтаж (всего три ключевые последовательные операции) все еще вызывает объективные сложности при математическом моделировании. Отечественные исследователи отличаются глубоким фундаментальным подходом, но ограничены в своем доступе к качественным экспериментальным данным автоматизированных производств высокотехнологичной электроники. Поэтому стоит обратить внимание на иностранные источники, например, на узкоспециализированный учебник расчета трудоемкости сборки печатных узлов.

Интересно отметить, что адаптивность оборудования сильно затрудняет создание и точность математического моделирования. Например, один и тот же станок может применять установочные головки с 12 захватами для чипов и с двумя захватами для разъемов. Это повышает реальную производительность сборки, но ухудшает точность расчетов в математической модели: «Specifically,

the machine uses a 12-head nozzle for small components and a 2-head nozzle for larger components. The interplay between these heads can result in inaccurate cycle time estimations» [21]. И в любой, самой удачной и математически устойчивой модели работает общеизвестная формула сложения погрешностей. Даже в самом простом случае независимых параметров с нормальным распределением.

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n (\sigma_{p_i} x_i)^2} = \sqrt{(\sigma_{p_1} x_1)^2 + (\sigma_{p_2} x_2)^2 + \dots + (\sigma_{p_n} x_n)^2}$$

Погрешность (σ распределения) расчетного времени производства как среднеквадратичное стандартных распределений от независимых параметров X_i

Суть формулы – никакие вычислительные методы из независимых параметров с погрешностью в 20-100 % не могут сделать достоверный расчет времени производства с целевой погрешностью в 10 %.

Кроме методик расчета трудоемкости и производительности существуют методы моделирования выхода годных [22], оптимизации производственного графика при помощи сетевых графов и, конечно же, многообещающего «искусственного интеллекта» [23]. В любом случае, малые выборки, погрешности данных, нестабильный человеческий фактор и отсутствие надежных математических моделей для технологического оборудования не позволяют надеяться на активное и легкое развитие ГПС первой категории в России.

Самым верным и обоснованным шагом в этой ситуации является внедрение сравнительно бюджетных систем сбора объективных данных о работе производства. Давно известны системы сбора данных как с промышленных роботов, так и с мест ручных операций. Наша компания развивает для этих задач свои продукты УЛ и УРМ уже много лет [24].

Вторая категория ГПС опирается на адаптивность технологического оборудования. Подход «модульных» системы и станков «комбайнов», выполняющих несколько операций в одном корпусе, мы уже описали выше. Стоит также упомянуть усилия по разработке отечественных адаптивных платформ технологического оборудования для ГПС [25]. Как мы видим, адаптивное оборудование для сборки электроники либо дорого и «недружественно», либо технологически ограничено, либо еще не вышло из разработок на уровень серийных моделей.

В этой ситуации самое время напомнить об инженерной смекалке и технологической оснастке. Адаптивность производства во многом определяется не величиной инвестиций в оборудование, а инженерным и системным мышлением. Например, для улучшения распознавания реперов на платах часто используют оптические системы с многоуровневой RGBW-подсветкой. Для очистки контактов разъемов рекомендуется специальное оборудование струйной отмычки. Стоит это миллионы рублей. Иногда тот же эффект дает канцелярский ластик (рис 6).



7

Футбольные поля оснастки для выпуска мелких серий на EMS-производстве мирового уровня

Важность оснастки давно оценили передовые китайские производители (рис 7).

Итак, адаптивность промышленных кибер-физических систем является ключевым качеством устойчивости и успеха производства отечественной электроники. Она лежит в основе развития будущих гибких производственных систем (ГПС).

В статье приведен обзор методов повышения технологической адаптивности для существующих и проектируемых сборочных производств. Специалисты «Остек-СМТ» рекомендуют два наиболее доступных способа – сбор достоверных количественных производственных данных и развитие оснастки, технологической смекалки. Это послужит основой будущих ГПС первой и второй категорий.

Использованная литература

1. Федеральный закон № 184-ФЗ «О техническом регулировании».
2. Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 004/2011 «О безопасности низковольтного оборудования».
3. Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 020/2011 «Электромагнитная совместимость технических средств».
4. ГОСТ Р МЭК 60950-1-2014 «Безопасность оборудования информационных технологий». ФЗ № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности»
5. Постановление Правительства РФ № 982 «Об утверждении единого перечня продукции, подлежащей обязательной сертификации, и единого перечня продукции, подтверждение соответствия которой осуществляется в форме принятия декларации о соответствии».
6. СанПиН 2.2.4.3359-16 «Гигиенические требования к физическим факторам на рабочих местах».
7. <https://bigasia.ru/vo-vetname-mozhet-poyavitsya-sobstvennoe-proizvodstvo-smartfonov/>
8. <https://www.bloomberg.com/news/articles/2024-01-08/foxconn-arm-in-india-is-set-to-lose-its-country-head-foulger>
9. https://ru.wikipedia.org/wiki/Закон_ограничивающего_фактора
10. Eliyahu M. Goldratt, Jeff Cox. *The Goal: A Process of Ongoing Improvement*. (1984). *North River Press; 2nd Rev edition (1992). ISBN 0-88427-061-0
11. ГОСТ Р ИСО 9000-2015: «Качество – степень соответствия совокупности присущих характеристик объекта требованиям».
12. ИСО 8402-86: «Качество – совокупность свойств и характеристик продукции или услуги, которые придают им способность удовлетворять обусловленные или предполагаемые потребности потребителя».
13. ГОСТ 15467-79: «Качество – совокупность свойств продукции, обусловливающих её пригодность удовлетворять определённые потребности в соответствии с её назначением».
14. <https://rosstat.gov.ru/search?q=износ+оборудования>
15. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Мангалица>
16. «Универсальные сборочные центры» ЭЛЕКТРОНИКА НТБ №9 2019 г. https://www.electronics.ru/files/article_pdf/7/article_7854_356.pdf
17. Agile-манифест <https://agilemanifesto.org/iso/ru/manifesto.html>
18. https://en.wikipedia.org/wiki/Flexible_manufacturing_system
19. Бакаев А.А., Шалыгин А.А. Адаптивное управление бизнес-процессами промышленного предприятия // Форпост науки 2024 Том 18, № 1 С. 4–11.
20. Математическое моделирование : учеб. пособие / Г. С. Хакимзянов, Л.Б. Чубаров, П.В. Воронина; Новосиб. гос. ун-т. – Новосибирск: РИЦ НГУ, 2014. — 263 с. ISBN 978-5-4437-0074-8
21. Стр 47 University of Twente Improving production time estimation for a PCBA manufacturer https://essay.utwente.nl/104238/1/Scholten_MA_BMS.pdf
22. Decision Support System to Predict the Manufacturing Yield of Printed Circuit Board Assembly Lines Felipe Helo
23. <https://www.researchgate.net/publication/387139502>
24. «Умное» производство гражданской продукции. Стр 43 ВВТ № 5 2020 https://www.arttool.ru/upload/iblock/7a2/vvt_5_50.pdf
25. Афанасьев М.Я., Грибовский А.А. Концепция адаптивной платформы технологического оборудования // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58. № 4. С. 268–272.

Технология рентгеновского контроля

Текст: Павел Алейников

”

Рентгеновская инспекция качества – надежный метод проверки и своевременного обнаружения дефектов на производствах электроники. Рассмотрим ряд особенностей технологии рентгеновского контроля качества и, в частности, вопросы, возникающие при работе с материалами, обладающими высокой плотностью, а также при обработке и хранении данных цифрового рентгеновского контроля.



1

Параметры образца, влияющие на поток прошедшего излучения

Рентгеновское излучение – это излучение электромагнитного спектра определенной энергии, такое же, как свет или радиоволна. Основное промышленное применение рентгеновского излучения – неразрушающий контроль продукции, который возможен благодаря свойству этого излучения проникать сквозь изучаемый объект, поглощаясь в нем с той или иной степенью.

Контроль материалов с высокой плотностью

Чтобы уверенно контролировать материалы с высокой плотностью, необходима высокая энергия рентгеновского излучения. Она достигается за счет увеличения высокого напряжения и тока самой трубки, ведь после взаимодействия с мишенью пучок электронов от катода преобразуется в рентгеновское излучение. Но далеко не весь. По самым аккуратным оценкам в современных рентгеновских трубках энергия пучка электронов преобразуется в энергию рентгеновского излучения в соотношении 100:1. То есть 99 % энергии, попавшей на мишень, переходит в тепловую энергию, и лишь 1 % преобразуется в полезное рентгеновское излучение.

В таких условиях инженерам приходится прикладывать все возможные усилия для создания конструкции мишени с максимальной степенью теплопроводности. Ведь если сфокусировать большую мощность на малом диаметре фокусного пятна, возникает риск прогорания мишени и выхода всей рентгеновской трубы из строя. Таким образом, проверка небольших объектов, содержащих материалы с высокой поглощающей способностью, ограничена либо малой мощностью

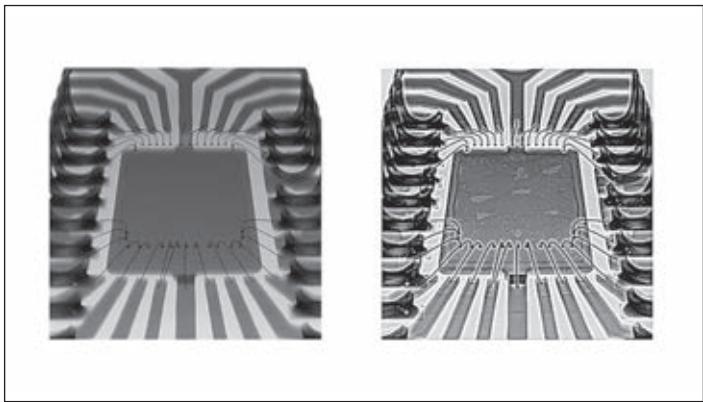
(почти полное отсутствие проникновения, что приводит к зашумленным изображениям или длительному времени получения изображения), либо разрешением (увеличение площади фокусного пятна с увеличением мощности, что приводит к размытию изображения).

Проблему теплопроводности классической мишени в этом случае решили при помощи комбинации материалов: вольфрама – как основы мишени и алмаза в качестве теплопроводящего элемента. При этом алмаз химически осаждается из газовой фазы, то есть подложка из вольфрама помещается в алмазные пары, вступает с ними во взаимную реакцию, и в итоге на поверхности подложки формируется слой необходимой толщины. Такие вольфрамовые подложки с алмазным покрытием собирают в своеобразные сэндвичи с последовательными слоями вольфрама и алмаза. И именно из такого материала производят мишени для рентгеновских трубок.

Эта технология позволила увеличить мощность пучка на заданном диаметре фокусного пятна до двух раз по сравнению с классическими вольфрамовыми мишениями. И именно вольфрам-алмазные мишени сейчас установлены в большинстве рентгеновских трубок, используемых на современных производствах электроники.

Хранение данных цифрового рентгеновского контроля

Переход на цифровой рентгеновский контроль позволил избавиться от недостатков пленочной технологии. Из технологического процесса исключены



2

Слева – необработанное рентгеновское изображение. Оно включает всю необходимую информацию и должно долговременно храниться в архиве. Справа – изображение с применением фильтра яркости и контрастности. Оно удобно для визуальной оценки и разбраковки, но не может использоваться для долговременного хранения

проявка и ожидание итогового результата, работа с цифровым изображением упростила поиск дефектов, а архив изображений больше не требует отдельного помещения.

Вместе с этим возник вопрос о стандартизированной обработке и хранении цифровых рентгеновских снимков. Рассмотрим основные принципы работы с данными цифрового рентгеновского контроля на основе международных стандартов и опыта из смежных областей неразрушающего рентгеновского контроля.

Результат цифрового рентгеновского исследования образца отображается в виде изображения на экране монитора и графиков распределения по толщине и плотности материала. Чувствительность цифрового детектора позволяет получить на одном изображении информацию по всему диапазону просвечиваемых толщин изделия и, применяя последующую настройку, исследовать интересующий участок. Необходимо сохранить оригинал изображения, а подбор яркости и контрастности для улучшения визуализации производить отдельно.

Это требуется для сохранения возможности переоценки результатов контроля в дальнейшем с применением другого набора фильтров обработки изображения.

Для стандартизации типа файла оригинального цифрового рентгеновского изображения при проведении неразрушающего контроля был разработан формат DICONDE. Стандарт ASTM E 2339 также определяет формат DICONDE как универсальный для хранения и передачи данных. В нем описаны возможные атрибуты файла.dcm, содержащего оригинал рентгеновского снимка и необходимую информацию о параметрах контроля. Разработан на основе хорошо зарекомендовавшей себя системы DICOM, которая используется в медицинском секторе.

По сути, это система, позволяющая сохранять изображения вместе с контекстом, содержащим всю необходимую техническую информацию, а также данные о месте, дате, времени и авторе изображения. Данную информацию можно включать в любой генерируемый отчет, а ее нахождение в базе данных вместе с изображением означает, что к ней можно будет применять запросы по различным критериям.

Для просмотра и редактирования файла можно использовать как программное обеспечение установки рентгеновского контроля, так и стороннее программное обеспечение, в том числе бесплатное.

Физически хранение файлов может быть реализовано на жестких дисках рабочей станции установки, внешней системе хранения данных или общей системе архивации и хранения данных предприятия. Одним из примеров стандартов хранения цифровых файлов является ГОСТ Р/ISO/TR 18492. На его основе можно организовать надежное хранение цифровых рентгеновских снимков в формате DICONDE в течение долгого времени.

Тема неразрушающего контроля довольно обширна и может быть проработана с учетом специфики предприятия. Специалисты компании «Остек-Умные технологии» помогут с организацией участка рентгеновского контроля на вашем производстве. □





ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ КУХНЯ

ГОТОВИМ ПОЛЕЗНЫЙ КОНТЕНТ

Новый подкаст по актуальным и острым
темам отрасли радиоэлектроники

Подпишись!

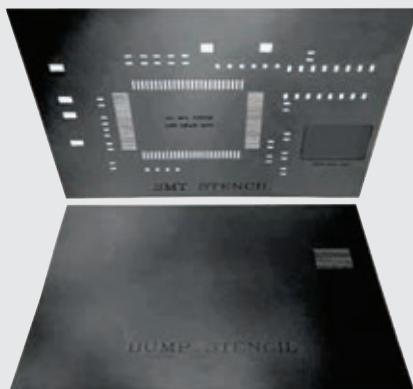


Нанесение паяльной пасты методом трафаретной печати

Текст: Геннадий Егоров,
Александр Романов

”

В статье представлен емкий и полезный обзор о технологии нанесения паяльной пасты методом трафаретной печати. Рассмотрены ключевые аспекты при использовании трафаретов, материалы и методы их изготовления, а также даны рекомендации по работе методом трафаретной печати.



1

Примеры трафаретов

О качестве трафаретной печати

Качество нанесения паяльной пасты имеет существенное влияние как на установку компонентов, так и на пайку изделия. Нанесение пасты методом трафаретной печати позволяет получить повторяемые, регулируемые по дозе (толщина трафарета) отпечатки паяльной пасты. Этот метод наиболее пригоден для автоматизации процесса поверхностного монтажа при серийном и массовом производстве электроники.

Чем определяется конечный результат нанесения паяльной пасты, что влияет на качество?

Качество трафаретной печати определяется пятью группами факторов:

- Оборудованием: точность автомата трафаретной печати, состояние ракелей, параметры трафарета – от этого зависит равномерность нанесения пасты и чистота поверхности трафарета после печати.
- Технологическими параметрами: температура, усилие, скорость движения и угол наклона ракеля должны быть строго выдержаны – малейшие отклонения приводят к дефектам: недостатку пасты или её размазыванию из-за слишком большого количества.
- Используемыми материалами: паяльная паста, материалы для очистки трафаретов напрямую влияют на результат.
- Параметрами окружающей среды: температура и влажность должны оставаться стабильными; даже небольшие колебания могут изменить поведение пасты при печати.
- Компетенциями и квалификацией персонала – последний, но не менее важный фактор!

Критерий оценки качества трафаретной печати – отсутствие паяльной пасты на верхней поверхности трафарета после прохода ракеля.

Как выбрать размер отверстий трафарета?

На выбор толщины трафарета и конструкции отверстий оказывают влияние различные факторы: тип электрон-

ных компонентов, размеры контактных площадок, тип паяльной пасты и др.

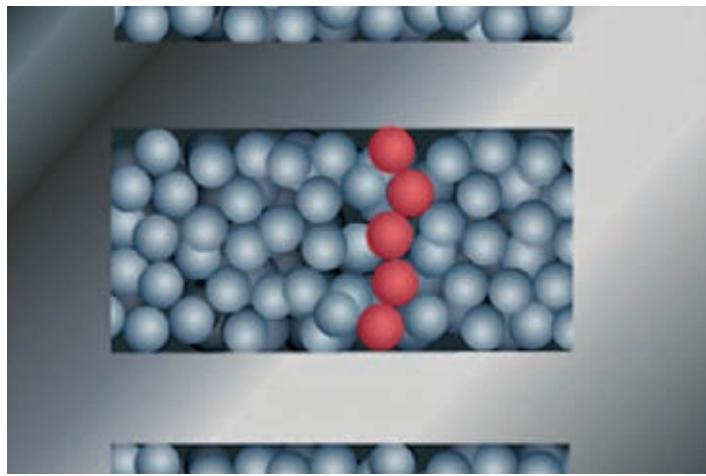
Правило трех шариков является простой формулой для определения толщины и минимальной ширины отверстий трафарета в зависимости от размеров частиц припоя, входящих в состав паяльной пасты. Оно гласит: максимальная толщина трафарета должна быть близка трем максимальным диаметрам частиц припоя, входящих в состав паяльной пасты. Минимальная ширина отверстия трафарета тоже должна быть равна трем максимальным диаметрам шариков припоя.

Однако с точки зрения обеспечения высокой надежности паяных соединений, хорошей и стабильной формы отпечатков паяльной пасты в независимости от метода изготовления трафарета предпочтительная ширина отверстий трафарета должна быть не меньше пяти диаметров частиц припоя (рис 2) – **правило пяти шариков**.

Одно из основных правил конструирования отверстий трафарета заключается в том, что размер отверстий должен быть уменьшен по сравнению с размерами контактных площадок. Для большинства применений рекомендуется использовать трафареты толщиной 125-200 мкм. Трафареты толщиной меньше 100 мкм применять не рекомендуется, т. к. они легко деформируются при многократном проходе ракеля.

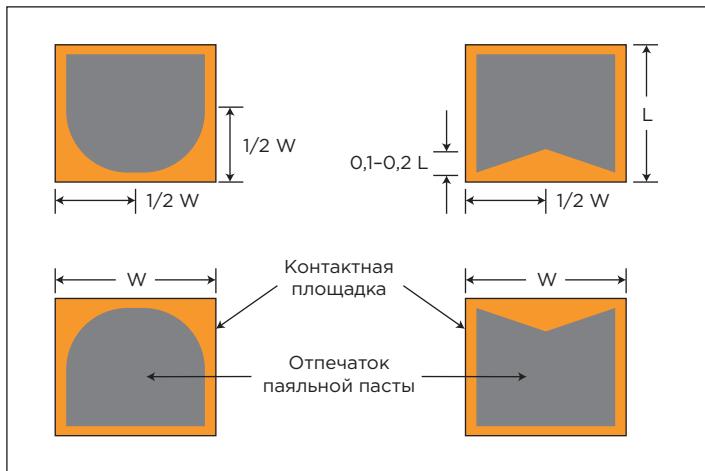
Общее правило для интегральных микросхем: размер отверстий трафарета должен быть на 0,1 мм меньше размера контактных площадок, но не меньше $\frac{1}{2}$ шага выводов компонента. Рекомендуемый размер отверстий трафарета должен составлять 75-90 % от размера контактной площадки. Для снижения вероятности образования шариков припоя за счет выдавливания паяльной пасты за пределы контактных площадок при установке чип-компонентов может использоваться специальная конструкция отверстий трафарета (рис 3).

Рассуждения и рекомендации основаны на требованиях международного стандарта IPC-7525 «Руководство по конструированию трафаретов».



2

Предпочтительная минимальная ширина отверстия трафарета



3

Конструкция отверстий трафарета для предотвращения образования шариков припоя

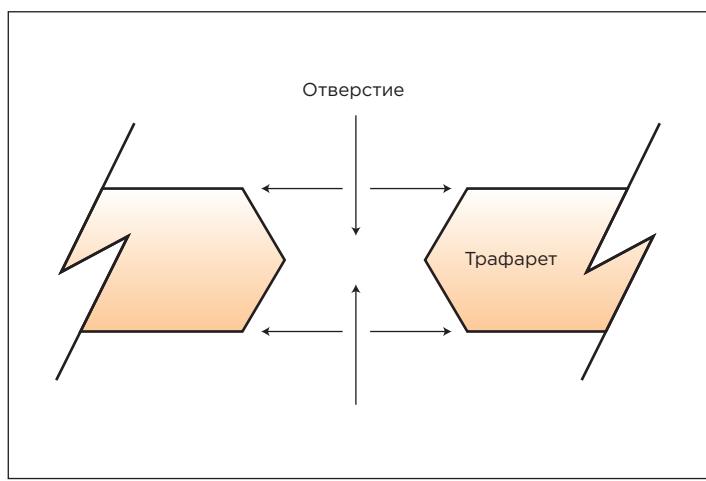
Основные материалы и методы изготовления трафаретов. Где лучшее качество нанесения пасты?

В настоящее время для нанесения паяльной пасты используют трафареты, изготовленные из металлической фольги. Наиболее часто применяют следующие материалы: нержавеющая сталь, никель, медь, латунь или бериллиевая бронза.

Есть три основных метода изготовления трафаретов:

- метод химического травления;
- метод лазерной резки;
- метод гальванопластики.

Метод химического травления – недорогой метод изготовления трафаретов, в основе которого лежит процесс двустороннего травления (рис 4). Возникновение бокового раствора в процессе травления ограничивает возможность нанесения паяльной пасты на контактные площадки компонентов с малым шагом ($\leq 0,65$ мм). Минимальный размер отверстия трафарета составляет $0,1$ мм + 50 % толщины трафарета.



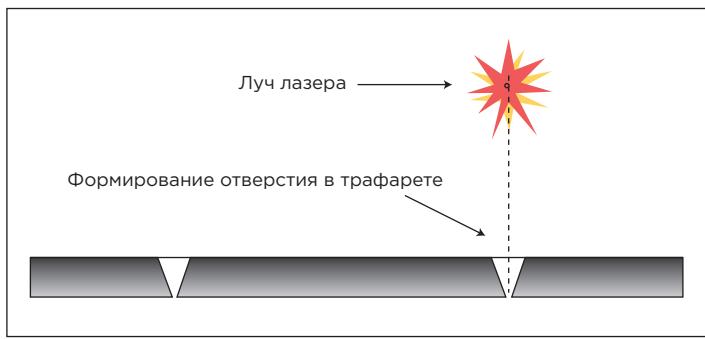
4

Сечение трафарета, изготовленного методом химического травления. Боковой раствор

Метод лазерной резки позволяет получить точный рисунок с практически любым шагом, но имеет более высокую стоимость изготовления. Трафареты изготавливаются из нержавеющей стали (рис 5).

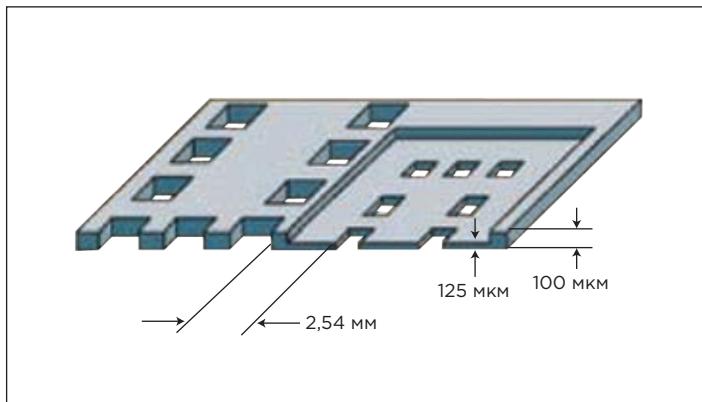
Для улучшения качества нанесения паяльной пасты, особенно под компоненты с малым шагом, необходимо выполнить обработку поверхности трафарета для удаления заусенцев после лазерной резки и обработку отверстий для лучшего прохождения паяльной пасты. Для уменьшения вероятности размазывания паяльной пасты по поверхности трафарета рекомендуется подвергать трафарет дополнительной обработке, делая более шероховатой сторону, контактирующую с ракелем, чтобы паяльная паста катилась по трафарету в виде валика. Применение лазерной резки в сочетании с методом химического травления позволяет изготавливать гибридные трафареты для нанесения разного количества пасты, например, для стандартных компонентов и под компоненты с малым шагом (рис 6), а также для нанесения пасты в отверстия для монтажа штырьковых компонентов на паяльную пасту. Минимальный размер отверстий трафарета может быть равен толщине трафарета.

Метод гальванопластики позволяет получить очень точный рисунок отверстий трафарета и уменьшить веро-



5

Сечение трафарета, изготовленного методом химического травления. Боковой раствор



6

Гибридный трафарет



7

Соотношение между площадью стенок трафарета и площадью контактной площадки

ятность образования перемычек и загрязнения трафарета с нижней стороны в процессе работы. Основной материал при изготовлении – никель. Однако из-за очень высокой стоимости изготовления метод гальванопластики не получил широкого распространения в нашей стране.

Среди всех типов трафаретов лучшее качество отпечатков пасты получается на трафаретах, изготовленных гальванопластикой или резкой лазером с последующим электрополированием.

Рекомендации по конструированию трафаретов

Правильно спроектированный трафарет – главное условие получения качественных результатов при проведении процесса трафаретной печати.

Ключевые конструктивные параметры трафаретов:

- **Соотношение между площадью стенок трафарета и контактной площадкой.** Общее правило для обеспечения качественного нанесения паяльной пасты: отношение ширины отверстия (L) трафарета к толщине (e) должно составлять не менее 1,5, а отношение площади контактной площадки к площади стенок отверстия трафарета не менее 0,66 (рис 7). Если площадь контакта паяльной пасты с контактной площадкой печатной платы больше площади контакта пасты со стенками апертуры трафарета, то адгезия паяльной пасты к контактной площадке будет выше. Это обеспечит качественную форму отпечатка.
- **Форма стенок отверстий трафарета.** Для уменьшения прилипания паяльной пасты к стенкам трафарета рекомендуется делать углы отверстий в трафарете скругленными (рис 8).
- **Финишная обработка стенок трафарета.** Как уже отмечалось, обработка отверстий после изготовления трафарета улучшает результаты трафаретной печати.

Рекомендации, которые позволяют спроектировать и изготовить трафарет для получения наилучшего качества отпечатков паяльной пасты:

- При работе с чип-компонентами рекомендуется уменьшение на 10-20 % апертуры трафарета по от-

ношению к размерам контактной площадки – это позволяет значительно уменьшить эффект образования шариков припоя между контактными площадками.

- В случае микросхем с малым шагом (для апертур от 0,5 мм) рекомендуется уменьшение апертуры трафарета на 5-15 % по отношению к размерам контактной площадки – это поможет минимизировать возникновение перемычек между выводами.
- Рекомендуется обеспечить отношение ширины апертуры к толщине трафарета 1,5!

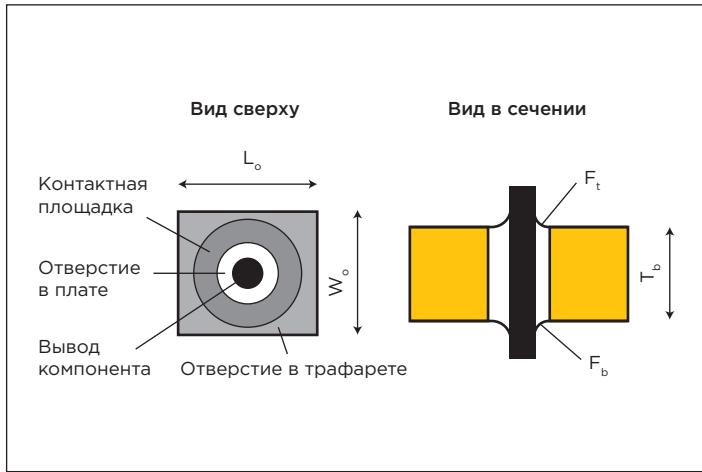
Качественный отпечаток паяльной пасты получается, когда сила адгезии паяльной пасты к контактной площадке печатной платы превышает адгезию к стенкам апертуры трафарета. Основной параметр, позволяющий определить возможность получения качественных отпечатков паяльной пасты, – это «отношение площадей». Если площадь контакта паяльной пасты с контактной площадкой печатной платы больше площади контакта пасты со стенками апертуры трафарета, то адгезия паяльной пасты к контактной площадке будет выше. Это обеспечит качественную форму отпечатка.

Существует закономерность – чем тоньше трафарет, тем качественнее может быть форма отпечатка. Но при очень тонком трафарете количество пасты может быть



8

Скругленные углы отверстий трафарета



9

Вид сверху и вид в сечении монтажного отверстия с выводом компонента. L_o – длина отверстия трафарета, W_o – ширина отверстия трафарета, F_t , F_b – требуемый объём галтели сверху и снизу, T_b – толщина ПП

недостаточным для получения качественной пайки, поэтому важно найти баланс.

Чем меньше размеры апертур, тем более ярко будет выражено влияние параметра «отношение площадей» на качество трафаретной печати паяльной пасты. Любое отношение площадей $\geq 0,66$ должно давать качественный результат; если полученное отношение площадей меньше, то постоянство качественной печати не гарантируется.

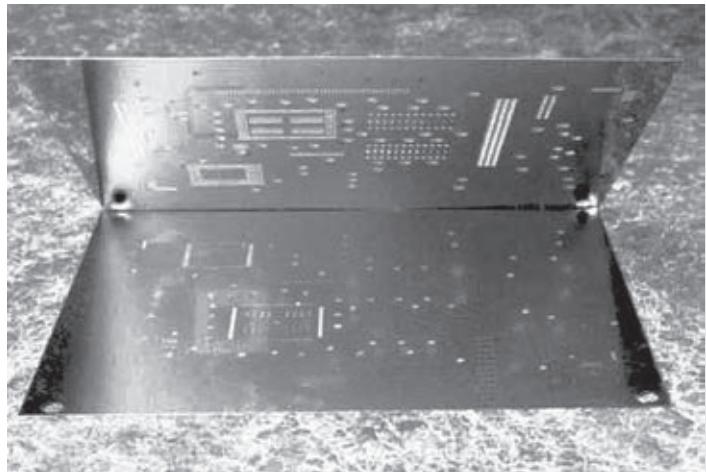
Трафареты для смешанной технологии

Хотя переход от выводных компонентов к поверхностно-монтируемым (ПМК) происходит повсеместно, есть печатные узлы, содержащие компоненты обоих видов. Заинтересованность в установке и пайке оплавлением выводных компонентов вместе с ПМК предъявляет особые требования к процессу нанесения паяльной пасты – трафарет должен обеспечить нанесение объема пасты, достаточного для заполнения отверстий и образования качественной галтели с обеих сторон печатной платы (ПП). Какой трафарет в таком случае использовать?

Три варианта конструкции трафарета помогут справиться с поставленной задачей:

- трафареты фиксированной толщины с увеличенными отверстиями;
- ступенчатые трафареты с увеличенными отверстиями;
- трафареты для нанесения пасты в два прохода.

Трафареты фиксированной толщины с увеличенными отверстиями. Размеры отверстий трафарета, предназначенные для нанесения пасты под выводные компоненты, увеличены. Это позволяет наносить паяльную пасту в отверстие ПП, на контактную площадку и на окружающую паяльную маску. Во время пайки оплавлением припой стягивается обратно с паяльной маски для заполнения отверстия и формирования верхней и нижней галтелей.



10

Трафарет для нанесения пасты в два этапа

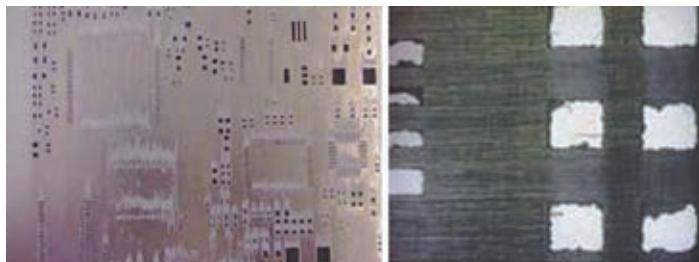
Ступенчатые трафареты с увеличенными отверстиями.

Некоторые печатные узлы с выводными компонентами имеют слишком высокую плотность монтажа, не позволяющую нанести достаточно большое количество пасты через трафарет фиксированной толщины. Так как отверстия трафарета не могут быть больше увеличены, единственный способ обеспечить нанесение большего объема пасты – повысить толщину трафарета. Как правило, это означает, что необходимо использовать ступенчатый трафарет, особенно в случае наличия на плате ПМК с малым шагом выводов. Если используется металлический ракель, необходимо обеспечить зазор в 3 мм, чтобы позволить ракелю повторять изменение высоты.

Трафареты для нанесения пасты в два этапа.

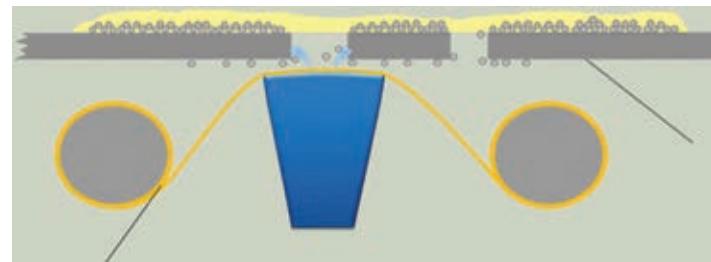
Некоторые печатные узлы имеют выводные компоненты с малыми размерами выводов и большими отверстиями или высокую плотность монтажа при большой толщине ПП. В любом из этих случаев первые два типа трафаретов не позволяют нанести достаточно большое количество пасты в отверстия. Необходимую возможность предоставляют трафареты для нанесения пасты в два прохода (РИС 10)! В данном методе обычный трафарет толщиной 150 мкм используют для нанесения пасты на контактные площадки под ПМК. Сразу после этого через трафарет большой толщины происходит нанесение пасты под выводные компоненты. Толщина трафарета может быть велика настолько, насколько требуется, но типичное значение лежит в пределах 400–760 мкм.

При разработке конструкции трафарета не стоит ограничиваться только трафаретами фиксированной толщины. Ступенчатые трафареты – это эффективное средство достижения нанесения надлежащего количества пасты при пайке оплавлением печатных узлов, содержащих небольшое количество выводных компонентов, а также компонентов СВГА. При пайке оплавлением выводных компонентов, требующих нанесения большего количества пасты, могут применяться трафареты для нанесения пасты в два прохода.



1 1

Примеры, когда необходима полная очистка трафаретов



1 2

Очистка трафарета снизу

Очистка трафаретов

При нанесении паяльной пасты или клея методом трафаретной печати происходит постепенное загрязнение трафарета – мелкие частицы припоя пропадают под трафарет под давлением ракеля, а в процессе печати могут закупориваться апертуры. Загрязнение нижней стороны трафарета будет оказывать существенное влияние на качество трафаретной печати. Остатки клея, попадающие на контактные площадки, ухудшают их смачиваемость припоеем. Остатки паяльной пасты приводят к образованию перемычек, шариков припоя в процессе пайки и других дефектов. Чтобы исключить влияние перечисленных факторов и обеспечить высокое качество трафаретной печати, рекомендуется производить регулярную очистку трафарета с нижней стороны в процессе трафаретной печати. Когда, как и чем это можно сделать?

Полную отмытку трафаретов от остатков паяльной пасты или клея необходимо производить при смене трафарета или паяльной пасты, при окончании работы с конкретным трафаретом перед его хранением и, естественно, при сильном загрязнении (рис 1 1).

Регулярную очистку трафаретов снизу (рис 1 2) необходимо производить с использованием специальных промывочных жидкостей и безворсовой бумаги. Подоб-

ная чистка выполняется вручную или в специальном оборудовании для струйной и ультразвуковой отмычки трафаретов, а также при помощи специальных устройств, установленных в автоматах трафаретной печати, и специальных промывочных жидкостей.

Применение простых растворителей, например, изопропилового спирта C_3H_8O (IPA) для очистки трафаретов не позволяет достичь качественного результата (рис 1 3)! В свою очередь, специализированные промывочные жидкости не растворяют паяльную пасту, а проникают под неё, убирая адгезию к трафарету для легкого удаления загрязнения. Используйте только специальную бумагу для протирки трафаретов, так как материалы, не предназначенные для этого, оставляют пыль, нити или ворсинки, которые могут привести к различным дефектам в процессе пайки! □

Любые вопросы, касающиеся метода трафаретной печати, вы можете задать специалистам Остек-Умные технологии. Будем рады помочь!

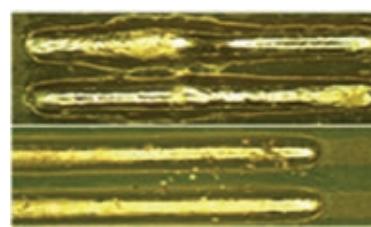
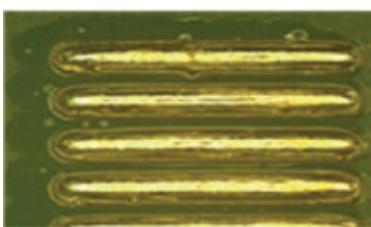
СПЕЦИАЛЬНАЯ ЖИДКОСТЬ

IPA

Влияние на отпечаток паяльной пасты



Влияние на паяное соединение



1 3

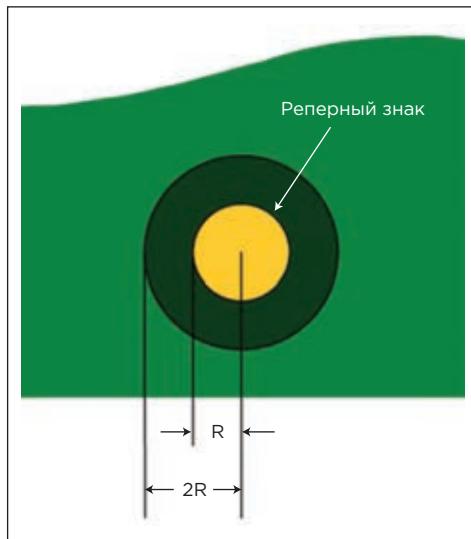
Сравнение результатов пайки после попадания в паяльную пасту изопропилового спирта (IPA) и специальных промывочных жидкостей

Особенности проектирования печатных плат, предназначенных для монтажа на автоматизированных линиях

Текст: Юрий Поздеев

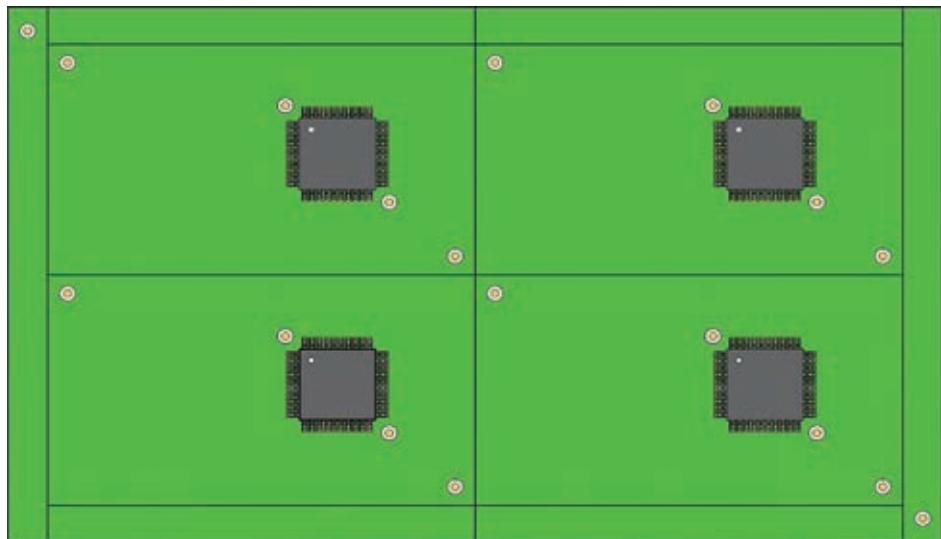
”

В отличие от пайки печатных плат (ПП) вручную пайка на автоматизированных линиях имеет некоторые особенности. От того, как спроектирована ПП, напрямую зависит, насколько качественным и повторяемым будет монтаж компонентов на ней. Дефекты печатного узла (ПУ) проявляются из-за ошибок конструкторов ПП, дефектов компонентов, технологических дефектов. Рассмотрим некоторые практические приёмы проектирования ПП, позволяющие упростить технологический процесс изготовления ПУ.



1

Реперный знак



2

Технологические поля на мультизаготовке

Классификация дефектов ПУ

Дефекты, возникающие в процессе монтажа ПП и приводящие к неработоспособности печатного узла, можно классифицировать так:

- дефекты, обусловленные ошибками конструкторов;
- дефекты компонентов;
- дефекты, обусловленные несоблюдением технологии поверхностного монтажа.

Для качественного конструирования ПП важно учитывать рекомендации на основе стандартов IPC-2222, IPC-7351, IPC-A-610. Стандарт IPC-2222 описывает конструирование жёстких печатных плат: для ПП, содержащих поверхностно-монтажные компоненты, и требования к контактным площадкам. Стандарт IPC-A-610 описывает критерии приёмки электронных сборок.

Наиболее распространённые ошибки конструкторов ПП:

- несоблюдение общих правил конструирования;
- нарушение геометрии контактной площадки, недопустимый диаметр для ТНТ-компонентов;
- недопустимая ширина проводников, подходящих к контактной площадке;
- недопустимые способы соединения контактной площадки с медными полигонами, с переходными отверстиями, с монтажными отверстиями ТНТ-элементов;
- переходные отверстия сделаны в контактной площадке, разный диаметр переходных отверстий;
- для корпусов BGA: несоблюдение правил проектирования контактных площадок, переходных отверстий, полигонов;
- неверное проектирование слоя паяльной маски. Оставление переходных отверстий, не защищённых паяльной маской.

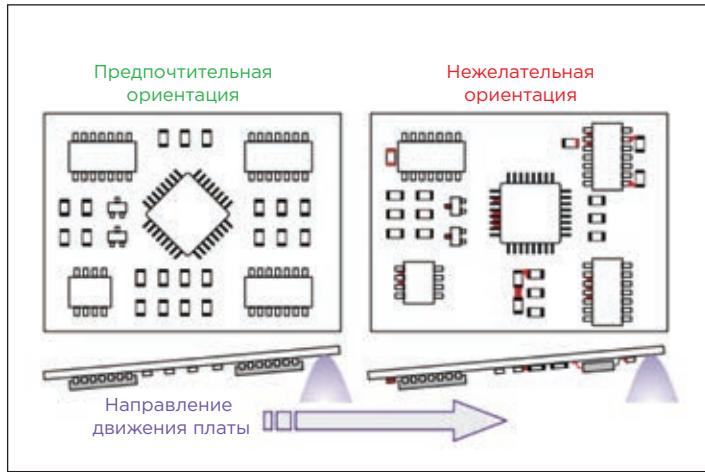
Общие рекомендации по проектированию топологии для исключения или минимизации причин дефектов, возникающих в процессе сборки ПП

Реперные метки и технологические поля

Реперные метки необходимы для определения положения ПП в зоне сборки техническим зренiem автоматического оборудования, привязки к ее координатной сетке, обеспечения требуемой технологической точности. Они должны располагаться по углам ПП и быть максимально удалены друг от друга. На рис 1 показан реперный знак с требуемыми пропорциями, R может быть равно 0,5-1 мм. Вокруг реперного знака необходимо вскрытие паяльной маски, как показано на рисунке.

Технологические поля – это отступы от краев ПП не менее 3 мм (лучше 5), на которых отсутствуют компоненты. Технологические поля необходимы для обеспечения перемещения ПП по конвейеру автоматической линии и фиксации в рабочих зонах установщиков компонентов. При высокой плотности компонентов технологические поля добавляются по краям ПП с последующим их удалением после процесса сборки. На рис 2 показана организация технологических полей и расположение реперных знаков на мультизаготовке.

Полигоны питания и «земли» рекомендуется располагать симметрично друг относительно друга на внутренних слоях ПП, они должны быть равномерно распределены по всей площади ПП. Чем больше слоёв имеет ПП, тем более важным является это требование. Печатный рисунок на сигнальных слоях также должен быть как можно более симметричным и равномерным по осям X и Y. Направление печатных проводников по слоям должно быть различным.



3

Направление движения ПП при пайке волной

Трассировка ПП без приоритета направлений является идеальной. Соблюдение этих правил исключает проблемы с отладкой температурного профиля пайки ПП, гарантирует качественную пайку ПП, а также позволяет избежать её коробления.

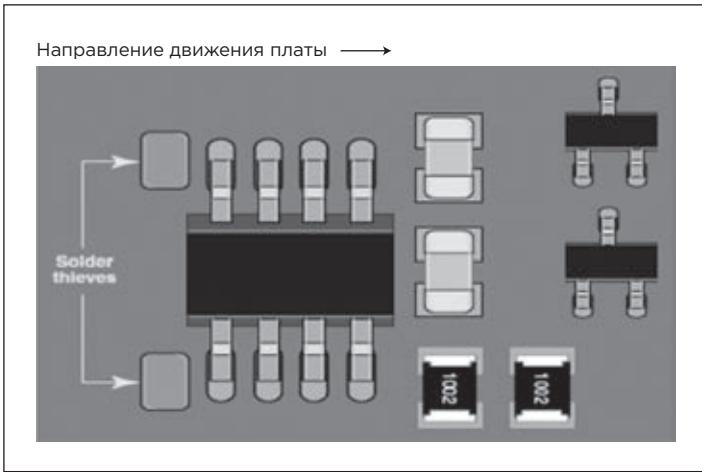
Если на ПП присутствуют ТНТ-компоненты, рекомендуется по возможности максимально отдалить монтажные отверстия таких компонентов от контактных площадок SMD-компонентов. Это связано с возможным перетеканием припоя с контактных площадок SMD-компонентов в монтажные отверстия ТНТ-компонентов.

Не рекомендуется размещать переходные отверстия под ЧИП-компонентами. Это может привести к короткому замыканию или образованию эффекта «надгробного камня».

По возможности в пределах одной ПП нужно подбирать компоненты, имеющие сходные термопрофили. Изделия разных производителей имеют различные термопрофили пайки, информация об этом приведена в описаниях на компоненты.

По возможности располагать тяжёлые компоненты с одной стороны ПП (компоненты в BGA-, LGA-корпусах, большие разъёмы и тяжёлые индуктивности). Следует соблюдать очерёдность пайки ПП: сначала паяется сторона ПП, содержащая лёгкие компоненты, затем сторона, содержащая тяжёлые компоненты. Если тяжелые компоненты расположены на двух сторонах ПП, то при пайке второй стороны они могут отвалиться от ПП или удержаться на ней с нарушением целостности паяных соединений.

При применении на ПП смешанного монтажа нужно разместить на одной стороне ПП SMD-компоненты, на другой стороне – ТНТ-компоненты. Рекомендуется размещать все полярные конденсаторы, ориентируя их «+» вправо или вниз. Блокировочные конденсаторы нужно размещать как можно ближе к выводам питания микросхем.



Особенности проектирования ПП, предназначенных для пайки волной

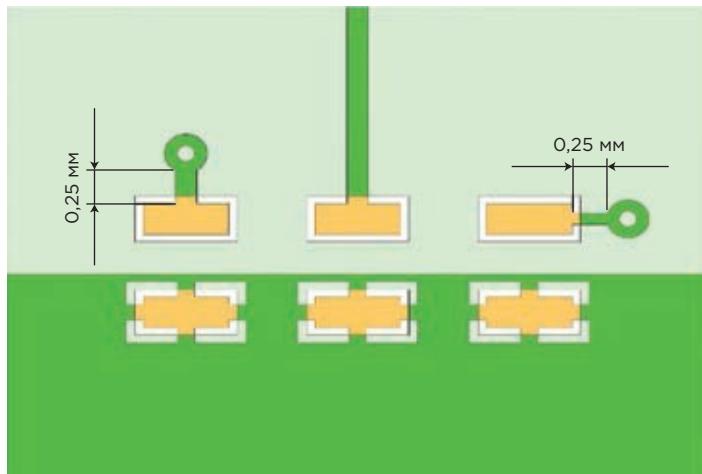
При проектировании таких ПП следует избегать расположения теплоёмких микросхем в одной области ПП. Для минимизации прогиба ПП и минимизации сложности настройки технологического оборудования рекомендуется располагать ПП так, чтобы волна проходила по длинной стороне. При этом ориентация выводов микросхем на ПП должна быть перпендикулярна направлению движения волны, чтобы в процессе пайки не образовывались мостики припоя (рис. 3).

Для уменьшения вероятности образования перемычек необходимо использовать ловушки припоя. Они могут быть выполнены в виде отдельных островков меди, представлять собой специальные увеличенные контактные площадки.

Комплект документации для монтажа компонентов на ПП должен содержать Gerber-файлы для изготовления ПП, BOM-файл с информацией о типах применяемых корпусов устанавливаемых компонентов, Pick-and-Place-файл с координатами центра каждого компонента относительно реперных знаков.

Проектирование контактных площадок компонентов

Подключение монтажных площадок к медному полигону необходимо выполнять через «тепловые барьеры» (тонкие проводники) для замедления процессов теплообмена между монтажной площадкой и медным полигоном. Использование «тепловых барьеров» играет важную роль в обеспечении бездефектной пайки волной, влияет на ремонтопригодность ПП. При этом при оплавлении паяльной пасты обеспечивается равномерный и одновременный прогрев контактных площадок. Не должно быть переходных metallизированных отверстий ПП на монтажных площадках. Площадки переходных отверстий не должны пересекаться или соприкасаться с монтажными площадками и должны соединяться посредством «тепловых барьеров». Также «тепловые барьеры» необходимо применять для



4

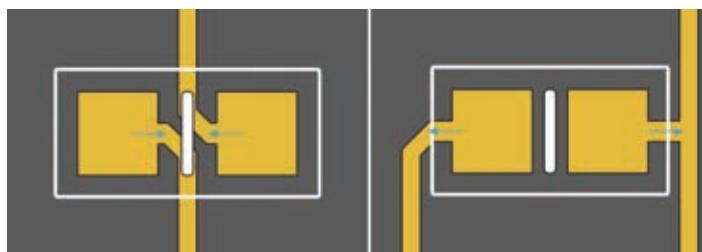
Применение «тепловых барьеров»

подключения к медным полигонам переходных отверстий, предназначенных для монтажа компонентов в отверстия (рис 4). Однако тепловые барьеры нельзя использовать на отверстиях для деталей, устанавливаемых с использованием технологии Press-Fit.

Рекомендуется, чтобы к контактной площадке подходил только один печатный проводник. При этом важно сохранять симметричность трассировки: проводники должны выходить с контактной площадки оба с внутренней или оба с внешней стороны (рис 5).

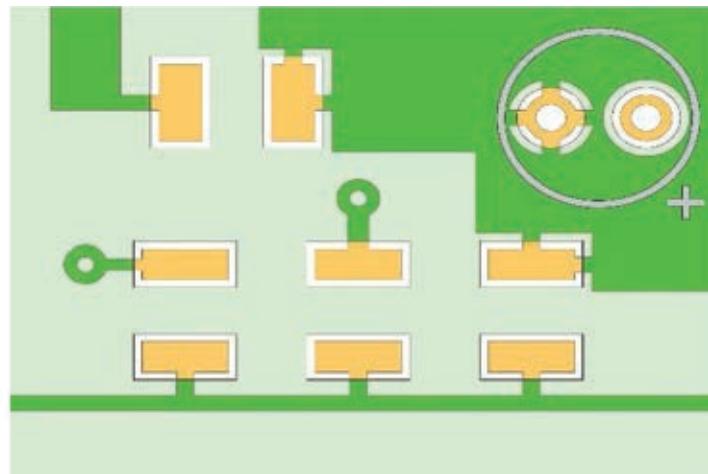
При подключении печатных проводников к контактной площадке следует соблюдать правило «трёх четвертей» – ширина подсоединяемого к контактной площадке проводника не должна быть более $\frac{3}{4}$ размера наименьшей грани контактной площадки. Не рекомендуется подключать проводник к вершине контактной площадки, т. к. в определённых обстоятельствах это может способствовать образованию дефектов.

Подключение контактных площадок одной цепи у близко расположенных компонентов необходимо выполнять через Ш-образное соединение. Прямое (Н-образное) соединение контактных площадок таких компонентов приводит к появлению дефектов пайки, таких как: «надгробный камень», холодное паяное соединение (непропай), смещение компонентов и усложнение оптического контроля (рис 6).



5

Симметричность трассировки печатных проводников в пределах одного ЧИП-компонентта

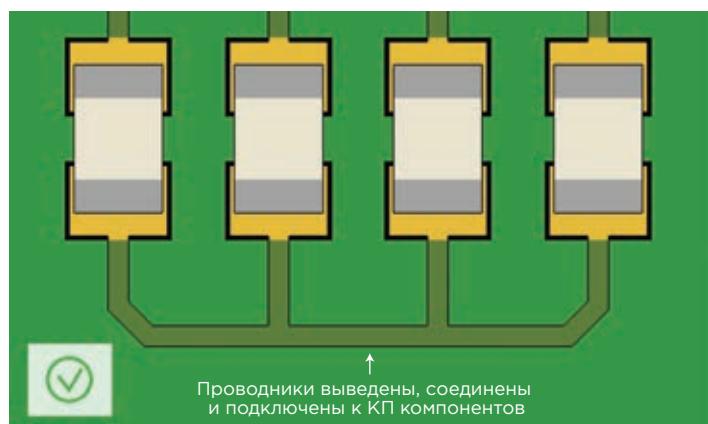


При трассировке SMD-компонентов для стоящих рядом компонентов одной цепи рекомендуется прокладывать проводники U-образно (рис 7).

Переходные отверстия ПП, которые не используются для монтажа в отверстия или контроля, рекомендуется закрывать паяльной маской. Это практически исключает вероятность образования перемычек, особенно под корпусами компонентов, а также проблемы, связанные с перераспределением припоя и образованием пустот в паяном соединении.

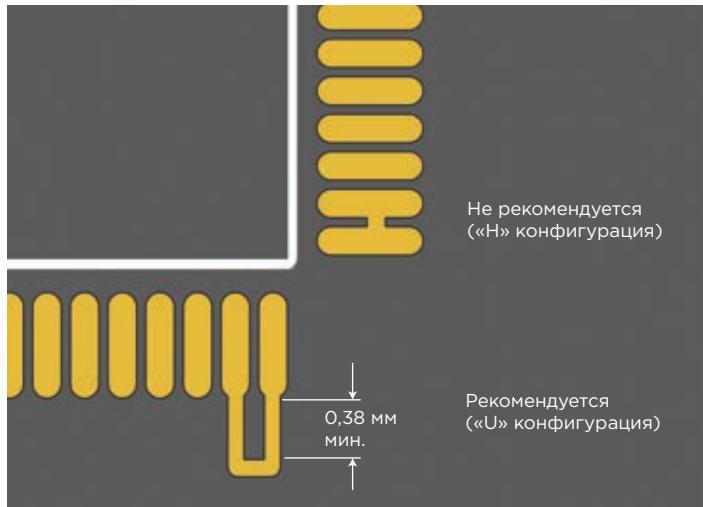
Чтобы избежать возникновение дефектов типа «надгробный камень», рекомендуется использовать одинаковую ширину дорожек, отходящих от контактных площадок, в пределах одного компонента. В случае применения увеличенной ширины дорожки с одной стороны компонента (к примеру, если вывод компонента служит локальным теплоотводом) следует ширину дорожки, отходящей от контактной площадки, выполнять с небольшим сужением.

Если силовая шина (полигон или широкая дорожка) соединяется с контактной площадкой компонента, нужно выполнить это соединение посредством двух (или трех) узких дорожек шириной не более 0,25 мм



6

Ш-образное соединение контактных площадок



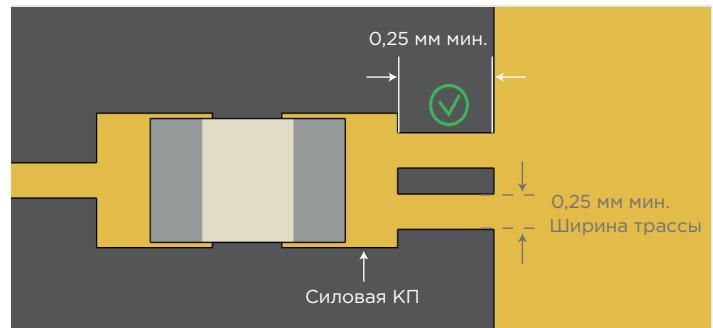
7

U-образный способ соединения контактных площадок

(рис 8). Это поможет избежать проблем ручного или автоматического монтажа компонентов на ПП, обеспечит ремонтопригодность.

Окна в паяльной маске

Паяльная маска – это предохранительный слой краски для защиты проводящего рисунка ПП, не предназначенный для пайки. Паяльная маска на ПП служит для предотвращения растекания припоя за пределы монтажных площадок, что обеспечивает пайку приемлемого качества. Паяльная маска не смачивается припоеем, защищает ПП от повреждений, вызванных протеканием окислительно-восстановительных реакций в паре медь-атмосферный кислород. Стандарт IPC-7093 рекомендует использовать контактные площадки, не ограниченные паяльной маской, причем «окно» в паяльной маске



8

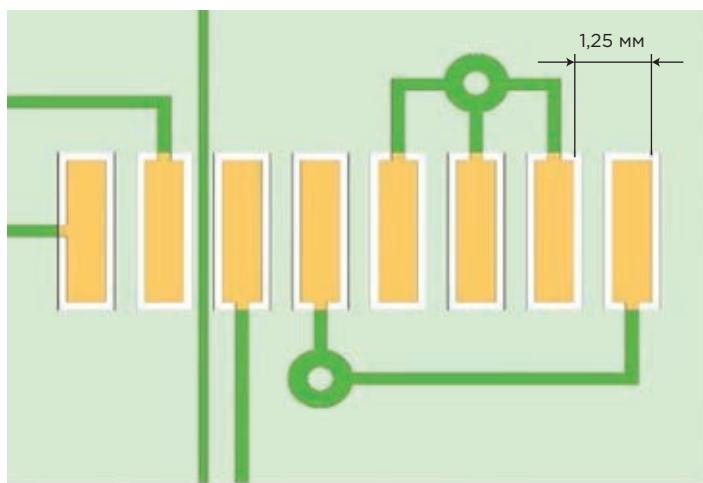
Соединение силовой шины с контактной площадкой

должно быть на 120-150 мкм больше контактной площадки.

Существуют определённые правила проектирования паяльной маски. Маска должна наноситься между контактными площадками для микросхем с шагом выводов 1,25 мм и больше. Отсутствие паяльной маски в данном случае будет способствовать образованию перемычки между выводами микросхемы. При небольшом шаге выводов (менее 0,65 мм) паяльную маску между выводами наносить не следует. В этом случае нанесённая полоска паяльной маски получается очень тонкой, ее легко разрушить при механическом воздействии (например, в процессе очистки ПП), что вызовет образование крошек. Это, в свою очередь, вызовет образование дефектов во время нанесения паяльной пасты и её оплавления (рис 9).

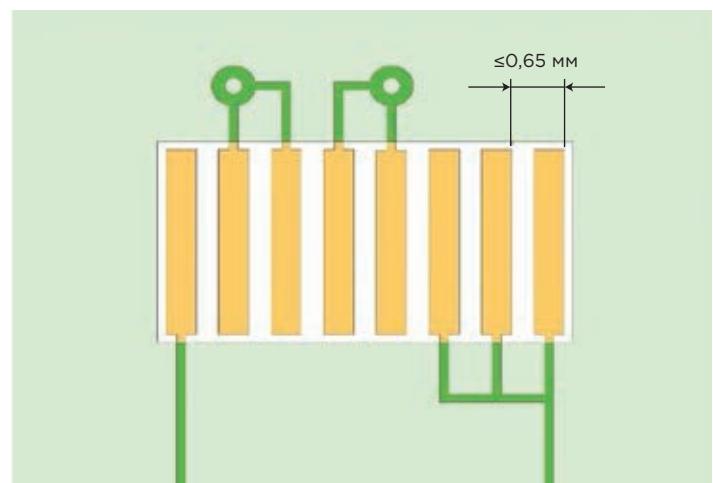
Микросхемы в корпусах BGA

Рекомендуется располагать компоненты BGA с одной стороны ПП. Если необходим монтаж компонентов BGA с двух сторон, то следует использовать технологию поддержки уже смонтированных компонентов с нижней



9

Правила нанесения паяльной маски для контактных площадок микросхем с разным шагом выводов: если шаг выводов $\geq 1,25$ мм и между контактными площадками есть возможность проложить печатный проводник, требуется нанесение маски. Если шаг выводов $\leq 0,65$ мм и между контактными площадками невозможно проложить печатный проводник, маску между выводами наносить не следует. Если на ПП необходимо установить компоненты в корпусах BGA с двух сторон, необходимо смещать их друг относительно друга для облегчения монтажа, контроля качества пайки и ремонта



Идеально	Плохо
Смещены	Зеркально
Простой рентген-контроль Простые способы ремонта Открытая противоположная сторона упрощает тестирование и отладку	Сложно найти дефекты на рентген-контроле Ремонт одного компонента может испортить второй

1 0

Размещение BGA-компонентов с обеих сторон ПП



1 1

Площадки BGA, оптимизированные для рентгеновского контроля

стороны во избежание отпадания компонентов от ПП под собственным весом. Желательно располагать компоненты BGA на двух сторонах ПП не одна над другой, а со смещением, так как в этом случае значительно упрощается рентгеновский контроль ПУ (рис 1 0).

Для упрощения контроля паяного соединения микросхем в корпусах BGA с ПП, рекомендуется использовать контактные площадки с такой формой, как показано на рис 1 1. В этом случае значительно увеличивается эффективность проверки, особенно в автоматическом режиме.

Типы упаковки компонентов

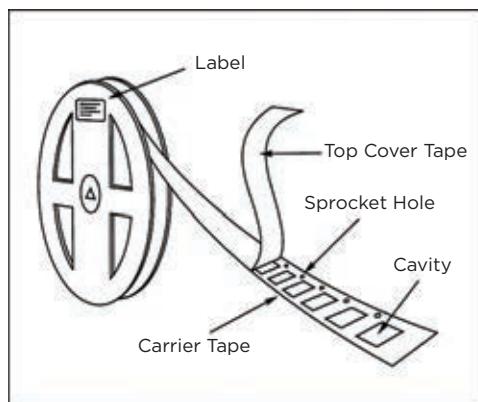
Для минимизации времени на переналадку автоматов установки компонентов необходимо оптимизировать количество типономиналов пассивных компонентов, применяемых на ПП. Можно ограничить схемотехников в использовании ряда Е24 против Е48 или Е96. В случае слишком большого количества типономиналов пассивных компонентов, применяемых на ПП, необходимо будет устанавливать большее количество питателей на автоматический установщик компонентов, либо дополнительно устанавливать компоненты вручную. И в том и другом случае это будет означать временные потери.

По возможности выбирать оптимальный тип упаковки компонентов. Корректно написанная конструкторская документация должна включать в себя каталожные

номера (part numbers) всех компонентов с указанием типа упаковки, которая необходима для автоматизированной сборки. Существуют три вида упаковки компонентов:

- **Лента (Tape & Reel).** Используется для всех типов корпусов, в том числе и для большинства BGA-, LGA-корпусов. Является самым выгодным типом, так как требует минимального времени на перезарядку питателя и занимает меньше места по сравнению другими видами упаковки (рис 1 2).
- **Пеналы (Tube).** Используются для микросхем в корпусах QFN, SON, DFN, SOIC, DIP, имеют разные размеры и форму. По возможности нужно отказаться от использования пеналов (рис 1 3).
- **Паллеты (Tray).** Используются для крупных микросхем, BGA-, LGA-корпусов, разъёмов, иногда – для корпусов QFN и QFP. Такой тип упаковки стоит использовать, если перед установкой необходимо программирование некоторых компонентов (рис 1 4).

Для установки некоторых компонентов необходимо предусмотреть заглушки под вакуумный захват. В процессе монтажа специальные вакуумные насадки (nozzle) захватывают компоненты за центр масс. Если необходима вакуумная заглушка для разъема, то в документации должен быть указан каталожный номер с постфиксом, заканчивающимся на CLF. ■



1 2



1 3

Пенал



1 4

Паллеты

Отладка температурного профиля для пайки печатных плат в конвекционных конвейерных печах

Текст: Юрий Поздеев

”

Температурный профиль – это графическое отображение изменения температуры во времени в режиме пайки на поверхности печатной платы (ПП). В конвекционных конвейерных печах температурный профиль определяется температурой каждой зоны и движением ПП по конвейеру. Температурный профиль необходимо подбирать для каждого вида изделия. Процесс подбора – довольно кропотливый и требует множества итераций. Чем тщательнее подобран температурный профиль для конкретного изделия, тем более качественно осуществляется пайка печатного узла (ПУ), и тем более повторяемыми будут результаты пайки. В статье приведён общий алгоритм подбора температурного профиля и дан практический опыт, касающийся процесса отладки требуемого профиля, чтобы избежать распространённых ошибок в процессе освоения этой технологической процедуры.

Описание температурного профиля

Ступенчатый профиль применяется для группового оплавления оловянно-свинцовых паст, а линейный профиль – при пайке бессвинцовыми паяльными пастами. Ступенчатый и линейный профили пайки показаны на РИС 2.

Для удобства температурный профиль условно разделяют на четыре стадии (РИС 1).

Стадия предварительного нагрева необходима для снижения теплового удара по электронным компонентам и ПП. Коэффициенты теплового расширения различные у разных материалов, применяемых в ПУ, что приводит к разной скорости их прогрева. На этом этапе также происходит испарение растворителя из паяльной пасты.

Длительность стадии составляет 90–120 секунд. В это время происходит рост температуры от комнатной до 145–150 °C. Скорость изменения температуры для традиционного профиля пайки составляет 2,0–4,0 °C/сек. Скорость изменения температуры для линейного профиля пайки – 0,6–1,8 °C/сек. Если скорость изменения температуры слишком низка, то может происходить окисление контактных поверхностей и частиц припоя. Высокая скорость предварительного нагрева может приводить к повреждению компонентов, преждевременному высыханию паяльной пасты, разбрызгиванию шариков припоя, образованию перемычек. При увеличении скорости нарастания температуры могут выявиться проблемы, связанные с разностью коэффициентов расширения разных материалов (медь, текстолит, пластиковые корпуса, кремниевые кристаллы микросхем). Надо до-

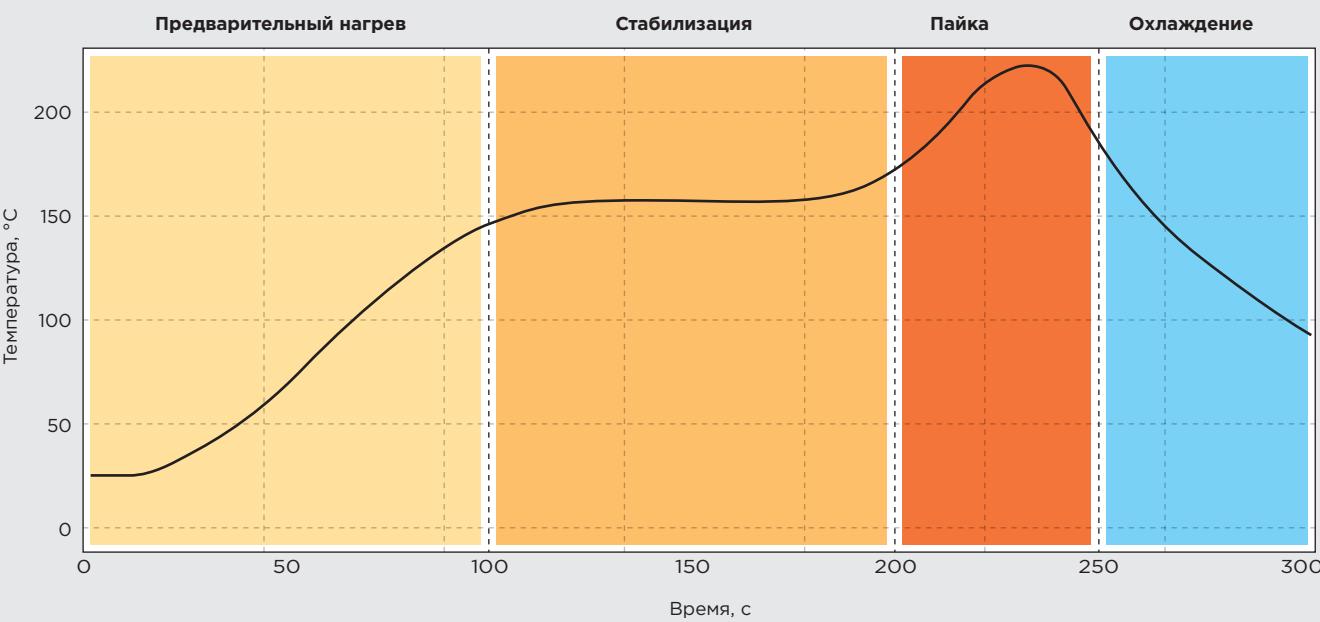
биться, чтобы перепады температур на границах различных компонентов были минимальными. Цель – максимально избежать термоударов и, соответственно, трещин, разрывов внутренних соединений, разварок кремниевого кристалла внутри микросхем.

Стадия стабилизации. Медленный рост температуры на поверхности ПП от 150 до 200 °C. Длительность стадии определяется теплоёмкостью ПП и электронных компонентов. Для традиционного профиля она составляет 90–150 секунд. Для нового типа профиля время стабилизации, равное 30 секундам, считается достаточным.

На этой стадии происходит активация флюса, содержащегося в паяльной пасте, а также стабилизация и выравнивание температуры по всей площади ПП.

Активация флюса. Флюс, активировавшись, должен выполнить работу по снятию окислов с шариков припоя в паяльной пасте с поверхностей монтажных площадок, с поверхностей выводов электронных компонентов. Активированный флюс должен снять окислы с шариков припоя паяльной пасты, с поверхностей монтажных площадок, с поверхностей паяемых выводов. К концу этой стадии флюсы, содержащиеся в паяльной пасте, полностью активируются, их активность теряется и снова начинается процесс окисления. Если превысить данное время, это приведёт к плохой паяемости, плохому растеканию, к перегреву припоя и, соответственно, к хрупкому соединению.

Максимальная стабилизация и выравнивание температуры. Разница температур в разных точках ПП, снятая различными термопарами, не должна превышать 10 °C. Если разница больше, то есть очень большая вероят-



ность получения неработоспособных ПУ. Разница выше 10 °C связана с некорректностью конструирования ПП. Также, если разница температур по разным углам корпуса BGA больше 10 °C, то качественно установить эту микросхему не получится и рекомендуется сразу же вносить корректизы в конструкцию ПП.

Стадия оплавления припоя. На этой стадии происходит расплавление шариков припоя в паяльной пасте, растекание припоя, образование соединения дорожек на плате с выводами компонентов. Максимальная температура на поверхности ПП на этой стадии должна быть на 20–40 °C выше температуры плавления паяльной пасты. Например, для наиболее распространенных свинецсодержащих сплавов Sn62/Pb36/Ag2 и Sn63/Pb37 температура пайки должна быть в пределах 205–225 °C. Низкая температура пайки (195–205 °C) обеспечивает слабую смачиваемость, особенно для компонентов с плохой паяемостью, поэтому температуру на стадии оплавления устанавливают немного выше – в пределах 215–225 °C при скорости повышения температуры 2–4 °C. Рекомендуемое время выше точки плавления составляет 30–60 секунд. Для массивных плат время выше точки плавления может быть увеличено до 90–100 секунд.

Высокая температура (240–250 °C) и время пайки (более 120 секунд) способствуют росту интерметаллического соединения, повышают риск выхода из строя электронных компонентов. Чрезмерный рост интерметаллического соединения увеличивает хрупкость паяного соединения и ухудшает его внешний вид.

Стадия охлаждения. Необходима для охлаждения собранного ПУ. Скорость остывания – это компромисс между производительностью и качеством соединений. Охлаждение рекомендуется проводить со скоростью 3–4 °C/сек. до температуры ниже 130 °C. Ниже 130 °C скорость охлаждения уже не влияет ни на качество паяных соединений, ни на электронные компоненты и может быть меньше. Длительность этой стадии до 1 минуты.

Слишком медленное охлаждение может приводить к интенсивному росту интерметаллических соединений, из-за которого паяные соединения становятся более твёрдыми, но хрупкими. В тоже время при высокой скорости охлаждения возможен термоудар по электронным компонентам, есть опасность просадок припоя и образования трещин паяных соединений.

Группы факторов, влияющих на формирование температурного профиля пайки оплавлением

Особенности применяемых электронных компонентов:

- габариты компонента;
- теплоёмкость материала компонента;
- температурные ограничения, если таковые указаны в спецификации на компонент.

Особенности конструкции монтируемых печатных плат (ПП):

- габариты ПП;
- материал ПП;
- теплоёмкость ПП, определяемая конструкцией ПП, количеством меди в слоях ПП.

Характеристики применяемой паяльной пасты:

- тип паяльной пасты, назначение (свинецсодержащая / бессвинцовая);
- тип применяемого флюса.

Особенности оборудования, предназначенного для пайки:

- количество зон в печи;
- наличие дополнительных модулей – вакуумный, азотный и т. д.

Процесс отладки температурного профиля

Конечной целью процесса отладки температурного профиля является:

- Обеспечение высокого качества и надёжности паяных соединений.
- Обеспечение сохранности и работоспособности собранного ПУ.
- Обеспечение повторяемости процесса оплавления и запланированный уровень качества выпускаемой продукции.

Задача состоит в том, чтобы, не нанеся термодидары на ПУ, разогреть ПУ до температуры активации флюса, когда удалены все окислы с шариков припоя, контактных площадок на ПП и с выводов компонентов, оплавить припой и безопасно охладить ПУ.

Методика измерений. После закрепления термопар на ПП нужно подключить их к термопрофайлеру и запустить его по конвейеру вместе с ПП.

Отладка температурного профиля – это процесс подбора температурных режимов разных зон печи оплавления в соответствии с характеристиками паяльной пасты и рекомендациями по пайке элемента. Производители электронных компонентов рекомендуют для своих изделий применять температурный профиль с определёнными характеристиками (табл.). Для каждого вида ПУ температурный профиль подбирается индивидуально.

Особенности профиля в конвекционных конвейерных печах. В среднем время нахождения ПП в печи должно быть 6 минут. Чем длиннее печь и больше зон, тем выше производительность печи.

Алгоритм отладки температурного профиля

Во-первых, исходя из требуемой производительности, определяем скорость конвейера. В процессе дальней-

Т 1

Параметры температурного профиля, рекомендуемые производителями электронных компонентов

КОМПАНИЯ-ПРОИЗВОДИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ	МАКСИМАЛЬНАЯ ТЕМПЕРАТУРА, °С	ВРЕМЯ ОПЛАВЛЕНИЯ, С Т>217 °С	РЕКОМЕНДУЕМАЯ СКОРОСТЬ °С/СЕК	
			НАРАСТАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ	СНИЖЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ
National Semiconductor /LLP	235 ... 240	35 ... 80	0,8 ... 1,2	1 ... 2
Xilinx CSP	255 ... 260	45 ... 120	1 ... 3	1 ... 3
Xilinx BGA	245 ... 250	45 ... 120	1 ... 3	1 ... 3
Xilinx Flip Chip	245 ... 250	45 ... 120	1 ... 3	1 ... 3
AMD BGA	240 ... 245	35 ... 80	0,8 ... 1,2	1 ... 2
Atmel	255 ... 260	35 ... 80	3	6
International Rectifier	255 ... 260	35 ... 80	3	6
Intersil	235 ... 240	35 ... 80	3	6
NIC MLCC	255 ... 270	60	2	2
Matsushita/Panasonic	235 ... 240	45 ... 120	1 ... 3	1 ... 3
ST Microelectronics	245 ... 250	45 ... 120	1 ... 3	1 ... 3

шей настройки термопрофиля скорость конвейера не меняется.

Во-вторых, производим настройку температуры нагревателей в каждой зоне, чтобы обеспечить требуемый профиль. Конвекционные печи на экране отображают температуру нагревателя или температуру воздуха, выходящего из нагревателя. Температура на нагревателях печи может быть выше температуры на поверхности монтируемого ПУ на 40 °С. Меняя температуру и скорость вентилятора, можно управлять реальной температурой на ПП, измеренной термопарами. Измеряя температуру на ПП с помощью термопар, вносим поправки на уменьшение или увеличение температур в разных зонах.

Для технологической отладки термопрофиля нужно иметь в запасе 2–3 ПП со смонтированными на них компонентами, на которых производится отладка профиля. Если нужно изготовить большую серию плат, себестоимость отладки термопрофиля нивелируется большим количеством ПУ. При небольших партиях ПУ стоимость отладки может оказаться критичной, учитывая, что стоимость отдельных компонентов может быть значительной. В этом случае можно использовать алгоритм отладки профиля на ПП без компонентов.

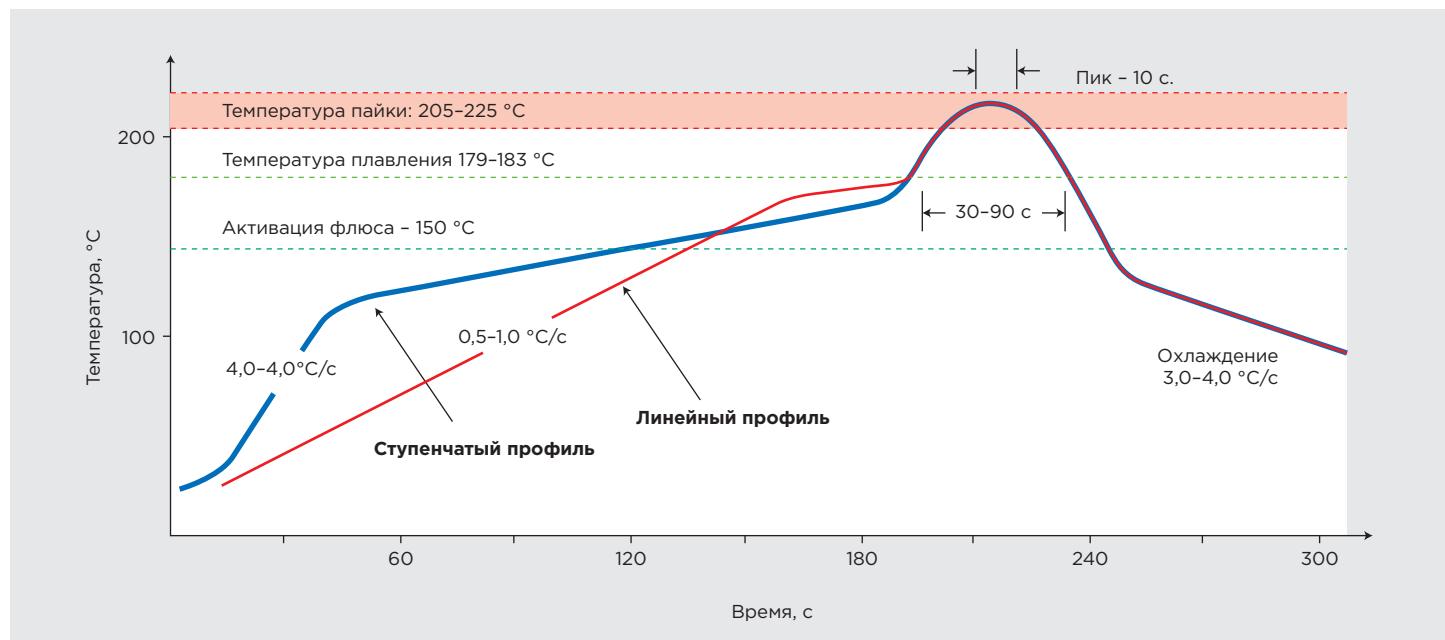
Отладка температурного профиля с учётом требований стандарта IPC-7801. В стандарте IPC-7801

«Стандарт управления процессом пачи оплавления» («Reflow Oven Process Control Standard») описан процесс отладки температурного профиля на ПП с установленными на ней электронными компонентами.

Отладка температурного профиля на ПП без компонентов. ПП с компонентами имеет теплоёмкость выше, чем у ПП без них. Нужно установить на ПП компоненты, которые вносят определённые правки в теплоёмкость ПП. Опыт показывает, что можно взять ПП, свободную от компонентов, отладить на ней профиль, а затем температуру в каждой зоне полученного профиля сделать на 10–20 % выше.

Крепление термопары к ПП

- Где крепить термопару. Для построения термопрофиля нужно иметь информацию об изменении температуры минимум в двух точках ПП: рядом с наиболее и наименее теплоёмкими местами ПП. Для получения лучшего результата места крепления термопар должны быть следующие:
 - › самый мелкий компонент на ПП;
 - › наиболее теплоёмкий компонент либо самый большой корпус BGA на ПП;
 - › область ПП, где отсутствуют полигоны меди;
 - › область ПП, где сплошные полигоны меди.



2

Ступенчатый (синий) профиль для свинецсодержащих припоев. Линейный (красный) температурный профиль – для бессвинцовых припоев. Если на одной ПП используются компоненты, требующие пайки и свинецсодержащими, и бессвинцовыми припоями, к подбору температурного профиля и режимов печи оплавления нужно относиться особенно внимательно

2. Как крепить термопару. Способов крепления термопары к ПП несколько: припайка специальным высокотемпературным припоем, приклейка с помощью высокотемпературного скотча, с помощью механически закрепляемых щупов. Крепление термопары с помощью высокотемпературного припоя наиболее предпочтительно, так как обладает наибольшей точностью. Надо учитывать, что термопара должна иметь непосредственный контакт с ПП. Если термопара не имеет контакта с ПП, а висит над ней, то она будет измерять температуру воздушного потока вблизи ПП, но не температуру самой ПП. Кроме крепления в точке контакта, термопару необходимо механически закрепить на ПП с помощью термоскотча или прикрутить проволочкой.

Приборы построения температурного профиля

Для построения температурного профиля применяют специальные устройства – термопрофайлеры. Термопрофайлер – это многоканальный прибор измерения температуры, к которому подключаются термопары. Прибор упакован в «термос» для увеличения срока его службы. Количество каналов измерения температуры у разных термопрофайлеров составляет от 4 до 8. Принцип работы заключается в измерении температуры в нескольких точках на ПП с помощью подключаемых к нему термопар. Термопрофайлеры бывают проводные, пропускае-

мые через печь вместе с целевой ПП; беспроводные, у которых информация на устройство обработки подаётся по беспроводному каналу. Также бывают термопрофайлеры, встроенные в печь оплавления; термопары к таким термопрофайлерам подключаются непосредственно через разъёмы, закреплённые на печи оплавления. В результате измерения строится кривая температурного профиля, где отображена информация по изменению температуры в определённых точках на поверхности ПП во времени (рис. 2). Кривая термопрофиля строится в реальном времени. Оператор (инженер) может проанализировать, сохранить полученные характеристики и отрегулировать настройки печи оплавления.

Окончательное построение температурного профиля технолог выполняет, исходя из конструкции ПП; характеристик применяемых электронных компонентов, температурных ограничений для них; типа применяемой паяльной пасты; особенностей печей оплавления, а также экспериментальных результатов подбора температурного профиля для данного ПУ.



ОТКРОЙТЕ ДЛЯ СЕБЯ НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ

С ЛИНЕЙКОЙ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОНИКИ STARTUP!

ПРОДУМАННЫЙ
КОМПЛЕКС РЕШЕНИЙ
И УСЛУГ
для широкого
спектра задач

возможность
дооснащения
производства
под новые задачи
и рост объемов

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ
ПОДДЕРЖКА
от ведущей
инжиниринговой
компании отрасли

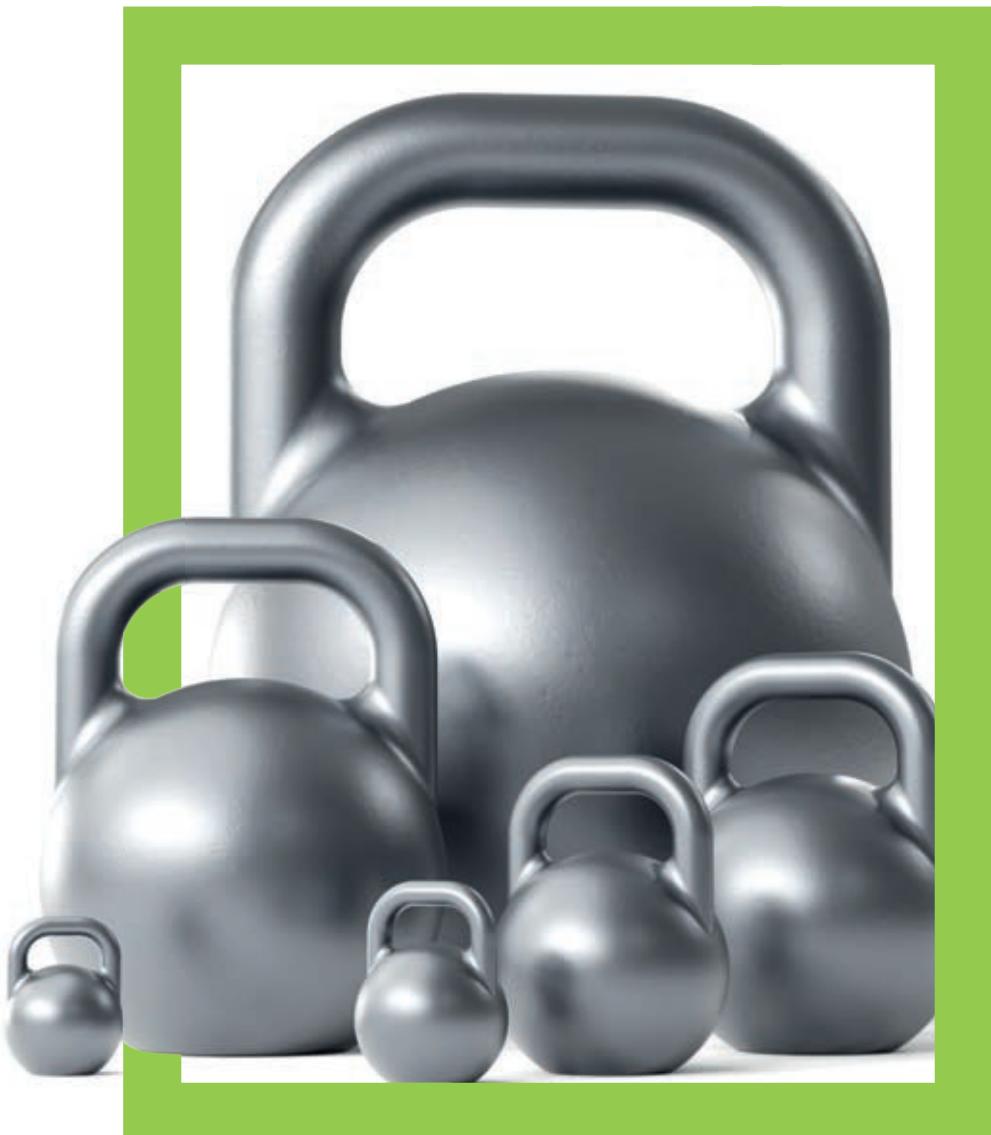
ДОСТУПНАЯ
СТОИМОСТЬ,
оптимальное
сочетание цены
и функциональности

Не упустите шанс повысить
эффективность вашего бизнеса!

Больше информации:
startup-smt.ru
8 (495) 788 44 41
Startup@ostec-group.ru



Нам по силам ваши возможности ● ● ●



Решения любого масштаба

Каждое предприятие имеет свои приоритетные цели, технологические задачи и уровень возможностей.

Опираясь на многолетний практический опыт и высокую квалификацию команды, мы тщательно прорабатываем каждую задачу и предлагаем действительно работающие решения под финансовые возможности и индивидуальные потребности производств.

Честно, открыто, профессионально.

ostec-group.ru | info@ostec-group.ru | +7 (495) 788-44-44