

02 (64) сентябрь 2026

ВЕКТОР

ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ
Научно-практический журнал

ТЕХНОЛОГИИ

Дмитрий Суханов

8

ПРОЦЕСС
ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО
ОСАЖДЕНИЯ ДЛЯ СКВОЗНЫХ
МЕЖСОЕДИНЕНИЙ (TSV) –
КЛЮЧ К РАЗВИТИЮ
ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ

КАЧЕСТВО

Денис Поцелуев

60

ПРОВЕРЕНО ВРЕМЕНЕМ, НО ВРЕМЯ
ПРОВЕРЯЕТ СНОВА: ЭЛТРИН У1 И НОВЫЕ
СТАНДАРТЫ ВЛАГОЗАЩИТЫ

АКАДЕМИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ОСТЕК-СМТ

Александр Антонов

80

ИНДУСТРИЯ 5.0 – ПЕРЕОСМЫСЛЕНИЕ
ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОГРЕССА



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.

СОЛИУС — новое имя на рынке высококачественных паяльных материалов. Под этим брендом представлены сделанные нами паяльные пасты, флюсы и флюс-гели для надежных паяных соединений и стабильного технологического процесса. Каждый компонент исходного сырья проходит тщательный входной контроль, а каждая готовая партия — серьезный анализ. Чтобы вы получали привычно высокий результат независимо от условий и обстоятельств.

Сделано нами — сделано на совесть.



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



35 лет
создаём
будущее

Уважаемые читатели!



Номер, который вы держите в руках, – специальный, он приурочен к ведущему межотраслевому коммуникационному мероприятию – Российскому форуму «Микроэлектроника 2026».

Группа компаний Остек уже 35 лет содействует развитию отечественной электронной промышленности. И для нас особенно важно вновь быть партнером форума – представлять технологические решения на стендах, выступать в научных сессиях и деловой программе, создавать комфортную среду для профессионального общения в лаунж-зоне. И ещё – готовить особый номер нашего научно-практического журнала «Вектор высоких технологий», который будет доступен участникам и нашим постоянным подписчикам.

В этом выпуске мы представляем материалы по актуальным направлениям современного производства электроники: TSV и электрохимическое осаждение меди, без которого немыслима 3D-интеграция и HBM; DRIE-травление и заполнение канавок с высоким аспектным соотношением без пустот – основа надежных МЭМС-структур; ниобат лития на изоляторе – платформа для фотонных устройств, объединяющая электро-

оптику, акустооптику и нелинейную оптику; теплопроводность микронных плёнок – метод лазерной вспышки, позволяющий увидеть тепловой поток там, где традиционные подходы бес- сильны.

А также оборудование и материалы, без которых не обходится современное производство – от нового поколения отечественных флюсов и ультразвуковой сварки на разных частотах до тестирования полупроводниковых приборов и фасовки высоко- чистой химии в малую тару. Отдельная тема – применение ис- кусственного интеллекта в контроле дефектности кристального производства. И это лишь часть того, что мы собрали в спецвы- пуске.

Приходите на наши стенды, в лаунж-зону, на мероприятия с нашим участием. Включайтесь в обсуждения, задавайте вопросы, спорьте.

Читайте. Внедряйте. Думайте.

**Редакция журнала
«Вектор высоких технологий»**



MAX

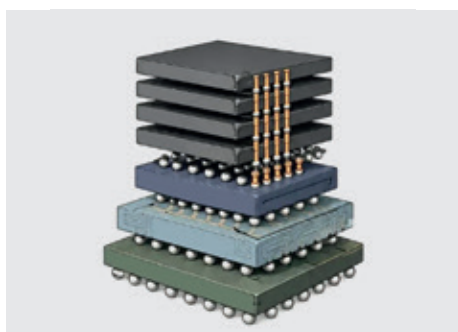


ВКонтакте

В НОМЕРЕ

НОВОСТИ

- 4 ТРЕТЬЯ ЕЖЕГОДНАЯ ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«ПРОИЗВОДСТВО МИРОВОГО УРОВНЯ-2027»
- 5 СОВМЕСТНАЯ ДЕМОНСТРАЦИЯ УСТАНОВКИ PURBEST
И РОССИЙСКИХ ЖИДКОСТЕЙ ГИДРОНОЛ В20
- 6 КОМПАНИЯ ОСТЕК-ИНТЕГРА: СЕРИЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО
ФЛЮСА СОЛИУС ВС-1010
- 6 КОМПАНИЯ ОСТЕК-ЭЛЕКТРО: КАК КОНТРОЛИРОВАТЬ
КАЧЕСТВО НА КАЖДОМ ЭТАПЕ



ТЕХНОЛОГИИ стр. 8

ТЕХНОЛОГИИ

**ПРОЦЕСС ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ
ДЛЯ СКВОЗНЫХ МЕЖСОЕДИНЕНИЙ (TSV) – КЛЮЧ
К РАЗВИТИЮ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ. . . . 8**

Автор: Дмитрий Суханов

**МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ КАНАВОК С ВЫСОКИМ
АСПЕКТНЫМ СООТНОШЕНИЕМ ДЛЯ ПОСЛЕДУЮЩЕГО
ЗАПОЛНЕНИЯ ПОЛИКРЕМНИЕМ БЕЗ ПУСТОТ 16**

Автор: Алексей Симонов

**КАКАЯ ЧАСТОТА ОПТИМАЛЬНА ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ
МИКРОСВАРКИ ПРОВОЛОЧНЫХ СОЕДИНЕНИЙ? 34**

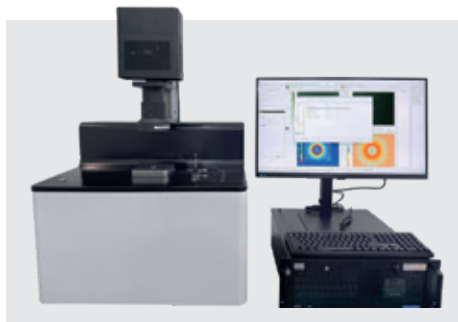
Автор: Сергей Воробьев

**ТЕПЛОВЫЕ ГОРИЗОНТЫ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ:
ТЕХНОЛОГИЯ HEAT FLOW SCOPE С LOCK-IN THERMOGRAPHY . . . 40**

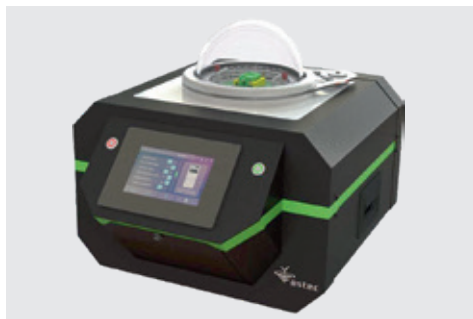
Автор: Сергей Максимов

**НИОБАТ ЛИТИЯ НА ИЗОЛЯТОРЕ: ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ
ПЛАТФОРМА ДЛЯ ФОТОННЫХ УСТРОЙСТВ 46**

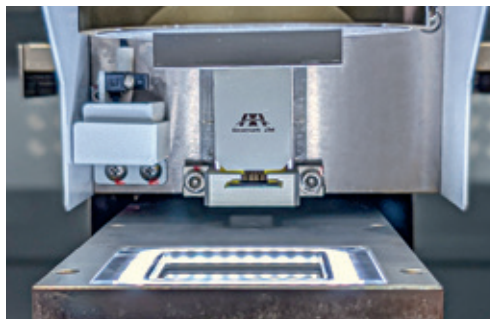
Автор: Артём Белых



ТЕХНОЛОГИИ стр. 40



КАЧЕСТВО стр. 76



АКАДЕМИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ОСТЕК-СМТ стр. 82

КАЧЕСТВО

НИЧТО НЕ ВЕЧНО ПОД СМОЛОЙ: НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ РОССИЙСКИХ ФЛЮСОВ. 52

Автор: Денис Поцелуев

ФАСОВКА ВЫСОКОЧИСТОЙ ХИМИИ ДЛЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ . . . 58

Автор: Александр Скупов

ПРОВЕРЕНО ВРЕМЕНЕМ, НО ВРЕМЯ ПРОВЕРЯЕТ СНОВА: ЭЛТРИН У1 И НОВЫЕ СТАНДАРТЫ ВЛАГОЗАЩИТЫ. 64

Автор: Денис Поцелуев

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В КОНТРОЛЕ ДЕФЕКТНОСТИ КРИСТАЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА . . . 70

Автор: Давид Францышин

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА. 76

Автор: Андрей Насонов

АКАДЕМИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ОСТЕК-СМТ

ИНДУСТРИЯ 5.0 – ПЕРЕОСМЫСЛЕНИЕ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОГРЕССА 80

Автор: Александр Антонов

АВТОМАТИЗАЦИЯ РЕМОНТНЫХ ОПЕРАЦИЙ 82

Автор: Виктор Орешков

АВТОМАТИЗАЦИЯ КОНВЕЙЕРНЫХ СИСТЕМ: КАК ОДНИМ НАЖАТИЕМ ПЕРЕНАСТРОИТЬ ВСЮ ЛИНИЮ? 85

Автор: Виктор Орешков

ОСОБЕННОСТИ ПАЙКИ В ПАРОВОЙ ФАЗЕ. ТЕХНОЛОГИЯ, О КОТОРОЙ СПОРЯТ ДО СИХ ПОР 86

Автор: Виктор Орешков

ПУСТОТЫ В ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ. ОБРАЗОВАНИЕ, КОНТРОЛЬ, СПОСОБЫ УМЕНЬШЕНИЯ 88

Автор: Юрий Поздеев

АВТОРЫ НОМЕРА

■ **Дмитрий Суханов**
Заместитель технического директора
по продуктам для полупроводниковых
производств
ООО «Остек-ЭК»
micro@ostec-group.ru

■ **Алексей Симонов**
Ведущий инженер
ООО «Остек-ЭК»
micro@ostec-group.ru

■ **Сергей Воробьёв**
Руководитель отдела микросборки
и корпусирования
ООО «Остек-ЭК»
www.ostec-micro.ru

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

■ **Артём Белых**
Ведущий инженер
ООО «Остек-ЭК»
micro@ostec-group.ru

■ **Денис Поцелуев**
Директор по продажам и маркетингу
ООО «Остек-Интегра»
materials@ostec-group.ru

■ **Александр Скупов**
Главный специалист отдела
технического сопровождения
ООО «Остек-Интегра»
materials@ostec-group.ru

■ **Давид Францышин**
Ведущий специалист
ООО «Остек-ЭК»
micro@ostec-group.ru

■ **Андрей Насонов**
Главный конструктор
ООО «Остек-Электро»
osteelectro@ostec-group.ru

■ **Александр Антонов**
Ведущий инженер отдела технической
поддержки
ООО «Остек-СМТ»
smt@ostec-group.ru

■ **Виктор Орешков**
Ведущий инженер отдела технической
поддержки
ООО «Остек-СМТ»
smt@ostec-group.ru

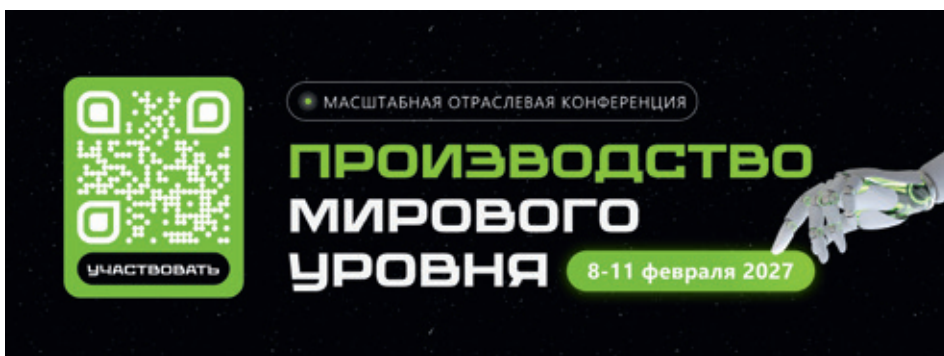
■ **Юрий Поздеев**
Главный специалист отдела
технической поддержки
ООО «Остек-СМТ»
smt@ostec-group.ru

ТРЕТЬЯ ЕЖЕГОДНАЯ ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ПРОИЗВОДСТВО МИРОВОГО УРОВНЯ-2027»

8–11 февраля 2027 года в «Охта Парке» (Ленинградская область) пройдет масштабное отраслевое мероприятие для технического менеджмента и первых лиц в сфере радиоэлектроники – конференция «Производство мирового уровня».

Главная общая цель организаторов и участников – создание профессиональной среды для роста отрасли, поиск рабочих механизмов развития в текущих экономических условиях и мировой обстановке, решение насущных кадровых проблем, обмен ценным теоретическим и практическим опытом.

Конференция «Производство мирового уровня» – площадка, где собираются ключевые лица приборостроительных предприятий: собственники, генеральные и технические директора, главные инженеры и руководители производств. Каждый доклад наполнен практическим опытом и неизменно сопровождается активным обсуждением реальных кейсов. Участники конференции получают возможность узнать из первых уст детали внедрения передовых технологий



и управленческих подходов на других предприятиях отрасли.

Команда организаторов конференции не только помогает участникам в их профессиональном росте, но и год от года расширяет границы самого мероприятия. На самой первой отечественной конференции «Производство мирового уровня», выступили три ключевых спикера, а кворум составил 40 участников-представителей производств РЭА. В прошлом году, в Иннополисе, конференцию посетили уже 140 участников, у которых была возможность послушать выступления 16 спикеров-практиков, а также совершить экскурсии на передовые заводы Татарстана. Мероприятие привлекло внимание государственного сектора – в конференции принял участие Роман Александрович Шайхутдинов, заместитель Премьер-министра

Республики Татарстан – и получило положительные отзывы от представителей отрасли радиоэлектроники.

«Производство мирового уровня-2027» сделает следующий большой шаг!

**Регистрация
на конференцию уже открыта!**
Мест для участников – 250.

Успейте подать заявку и присоединиться к одному из ключевых отраслевых событий года.

Список выступающих лиц и подробная программа мероприятия будут представлены на сайте

<https://pmu-conf.ru>

Построим производства мирового уровня в нашей стране вместе!

СОВМЕСТНАЯ ДЕМОНСТРАЦИЯ УСТАНОВКИ PURBEST И РОССИЙСКИХ ЖИДКОСТЕЙ ГИДРОНОЛ В20

В июле 2026 года компании Остек-СМТ и Остек-Интегра провели для представителей ведущих радиоэлектронных предприятий России совместную демонстрацию автоматизированной установки струйной отмывки PurBest, заправленной российской отмывочной жидкостью Гидронол В20. На площадке Остек-СМТ были представлены практические сценарии отмывки печатных узлов после пайки.

В ходе демонстрации специалисты выполнили отмывку реальных печатных узлов заказчиков с применением Гидронол В20, а затем провели оценку качества очистки с использованием тестового набора Гидронол КС. Заказчики смогли оценить эффективность комплексного решения «оборудование PurBest + российские отмывочные жидкости Гидронол» в условиях, максимально приближенных к их собственным производственным процессам.



По вопросам подбора оборудования для отмывки печатных узлов и выбора отмывочных жидкостей Гидронол обращайтесь к специалистам Остек-СМТ и Остек-Интегра по телефону +7 (495) 788-44-44 или по электронной почте:

- оборудование для производства электроники: smt@ostec-group.ru
- материалы для производства электроники: materials@ostec-group.ru

КОМПАНИЯ ОСТЕК-ИНТЕГРА: СЕРИЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО ФЛЮСА СОЛИУС ВС-1010

ООО «Остек-Интегра» объявляет о начале серийного производства нового водосмываемого флюса для пайки волной припоя Солиус ВС-1010.

Солиус ВС-1010 – универсальный высокоактивный флюс, обеспечивающий отличную паяемость на сложных для пайки узлах.

Ключевые преимущества:

- Водосмываемый – легко и эффективно удаляется с поверхности сборки
- Невоспламеняющийся состав



- Высокая активность для сложных узлов
- Широкое технологическое «окно»
- Совместимость с бессвинцовыми процессами и сплавами SnPb
- Тип флюса ORH1 по стандарту J-STD-004A

Флюс Солиус 1010 производится на мощностях компании Остек-Интегра под строгим контролем качества.

Для консультаций и заказа обращайтесь к специалистам компании:
+7 (495) 788-44-44, materials@ostec-group.ru.



КАК КОНТРОЛИРОВАТЬ КАЧЕСТВО НА КАЖДОМ ЭТАПЕ: ИТОГИ СЕМИНАРА КОМПАНИИ «ОСТЕК-ЭЛЕКТРО»

В июле 2026 года специалисты ООО «Остек-Электро» провели в Нижнем Новгороде практический семинар, посвященный актуальным вопросам тестирования, измерений и контроля в радиоэлектронной и электротехнической отраслях. Участниками встречи стали руководители и технические специалисты профильных предприятий.

Эксперты компании затронули ключевые аспекты контроля на каждом этапе создания электронной аппаратуры: от производства компонентов до сборки готовых блоков. Особое внимание было уделено проблемам, с которыми заказчики сталкиваются при контроле качества и выявлении дефектов, и способам их решения с помощью современных методов электрических измерений.

Программа мероприятия была разделена на тематические блоки. В первой части семинара обсуждались вопросы микроэлектроники и зондовых измерений. Спикеры представили российские реалии тестирования

параметров компонентов и продемонстрировали полностью отечественный комплекс ИУС-7Р.

Вторая часть была посвящена входному контролю параметров электронных компонентов (ЭКБ). Участники познакомились с новой линейкой приборов и установок, разработанных компанией Остек-Электро, в том числе с характеристикографом Л2-156, который был представлен вживую. Гости смогли не только увидеть оборудование в работе, но и задать вопросы разработчикам.

Отдельное внимание было уделено внутрисхемному контролю. Эксперты подчеркнули, что современные решения в этой области позволяют эффективно применять данный метод не только на традиционных участках монтажа, но и в лабораторных условиях, а также в ремонтных мастерских, что значительно расширяет возможности оперативной диагностики без демонтажа компонентов.

Кульминацией семинара стала практическая сессия, в рамках которой специалисты Остек-Электро провели демонстрационные измерения на образцах участников. В течение дня в зале демонстрировались в рабочем состоянии такие разработки компании, как:

- Характериограф Л2-156 (для полупроводниковых компонентов)
- Магнитоизмерительная установка «Магистус» Ш1-24
- Тестер ферритовых колец Ш1-23
- LC-метр Е7-35 (для конденсаторов и индуктивностей)
- Измеритель С и ESR Е7-53 (для конденсаторов)
- Термоэлектрическая платформа «Гамма»

Встречу завершили оживленные дискуссии и обсуждения перспектив развития методов электроконтроля. Участники особо отметили расширяющийся спектр проблем, возникающих при производстве современных электродвигателей, где критически важна проверка качества исходных материалов. Для таких задач специалисты ООО «Остек-Электро» предложили использовать измерительные решения компании, адаптированные под специфику электротехнических изделий. Участники высоко оценили возможность личного общения с разработчиками и практической работы с новейшим оборудованием.

По вопросам участия в мероприятиях компании обращайтесь по телефону: +7 (495) 788-44-44 (доб. 5474) или по электронной почте: ostelectro@ostec-group.ru

III ежегодная всероссийская конференция

ПРОИЗВОДСТВО МИРОВОГО УРОВНЯ – 2027

8–11 ФЕВРАЛЯ 2027 ГОДА
ЛЕНОБЛАСТЬ,
КУРОРТ ПРЕМИУМ-КЛАССА
«ОХТА ПАРК»

ПРОГРАММА

- ДЕНЬ 1** Пленарное заседание
и панельные дискуссии
- ДЕНЬ 2** Треки по темам:
экономика / технологии / кадры
- ДЕНЬ 3** Круглые столы
и мастер-классы

250+ **30+**
УЧАСТНИКОВ РЕГИОНОВ РФ

СПИКЕРЫ

Практики ведущих предприятий
радиоэлектронного комплекса России

СТОИМОСТЬ УЧАСТИЯ

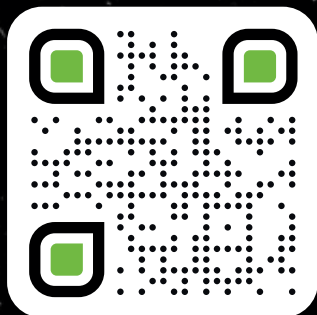
В пакет входит:

- Полный доступ к деловой программе
- Проживание на курорте «Охта Парк»
- Питание (завтрак, обед, ужин)
- Развлекательная программа
- Обратный трансфер

ОТЕЛЬ 3* **120 000 ₽**

ШАЛЕ 4* **140 000 ₽**

ОТЕЛЬ 5* **180 000 ₽**



КОЛИЧЕСТВО МЕСТ ОГРАНИЧЕНО

← Заполните форму, чтобы
принять участие

Сайт конференции

ptu-conf.ru

ПОСТРОИМ
ПРОИЗВОДСТВО
МИРОВОГО
УРОВНЯ

ТЕХНОЛОГИИ

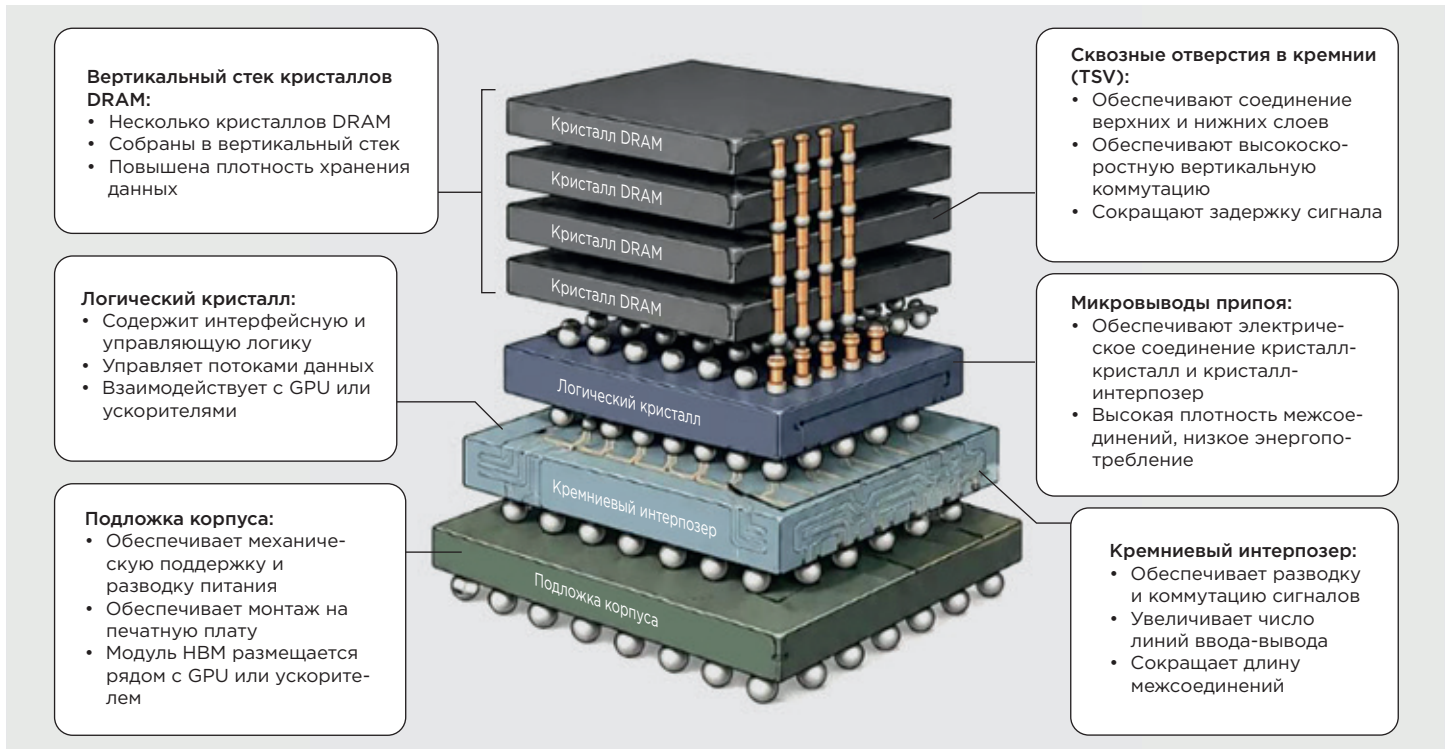
Процесс электро-химического осаждения для СКВОЗНЫХ межсоединений (TSV) –

ключ к развитию полупроводниковой промышленности

Текст: Дмитрий Суханов

”

Электрохимическое осаждение в сквозных кремниевых переходных отверстиях (TSV – through silicon via) является важнейшей технологией, обеспечивающей развитие передовых архитектур полупроводниковых изделий и современного корпусирования, включая 2,5D/3D-интеграцию, и устройств высокоскоростной памяти (HBM – high-bandwidth memory).



1

Вертикальное стеккирование кристаллов – HBM

Этот процесс включает в себя бездефектное заполнение микропереходных отверстий с высоким соотношением сторон, которые вертикально вытравлены в кремниевых подложках электрохимически осажденной медью (Cu). Полученные металлические переходные отверстия обеспечивают наиболее прямые вертикальные электрические пути между расположенными друг над другом кристаллами, значительно минимизируя длину межсоединений и паразитные эффекты.

Основные области применения сквозных межсоединений TSV

Технология TSV обеспечивает создание подлинных вертикальных 3D-межсоединений высокой плотности, тем самым преодолевая ограничения, присущие традиционным планарным 2D-архитектурам с проволочными межсоединениями и флип-чип монтажом кристаллов.

Стекирование HBM (High Bandwidth Memory)

Технология HBM обеспечивает существенное улучшение пропускной способности и емкости памяти за счет вертикального стеккирования нескольких слоев кристаллов DRAM (рис 1). Благодаря электрохимическому осаждению TSV в каждом слое пластины DRAM формируются десятки тысяч микроскопических медных межсоединений, что обеспечивает сверхбыструю передачу сигналов с низкой задержкой между вертикально расположенными кристаллами

памяти и базовым логическим кристаллом внизу. HBM = многослойный стек кристаллов DRAM + вертикальные TSV-межсоединения + интеграция на микронном уровне средствами современного корпусирования.

Основные элементы HBM:

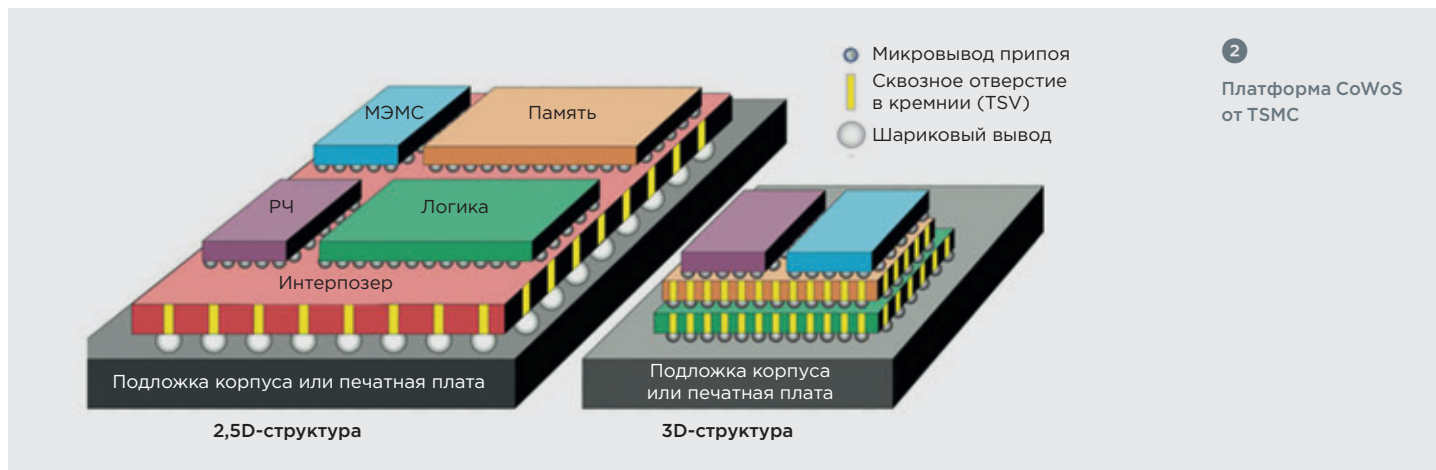
- вертикальный стек кристаллов DRAM;
- вертикальная коммутация через TSV;
- межсоединения на микровыводах припоя;
- логический кристалл;
- кремниевый интерпозер;
- подложка корпуса.

Почему конструкция HBM сложнее традиционной памяти:

- требуются высокоточное совмещение и бондинг нескольких слоев;
- требуется использование сложной технологии TSV;
- сложнее обеспечить требуемый тепловой режим;
- высокая стоимость передового корпусирования и изготовления интерпозера;
- высокие требования к согласованной работе памяти и логического кристалла.

Ключевые характеристики HBM:

- высокая пропускная способность;
- малая задержка;
- 3D-интеграция;
- передовое корпусирование.



2,5D/3D современное корпусирование (интерпозер)

Типичным примером является платформа CoWoS (Chip-on-Wafer-on-Substrate) от TSMC (рис 2), в которой высокопроизводительные логические устройства, включая графические процессоры (GPU) и центральные процессоры (CPU), совместно собираются со стеками HBM на кремниевой подложке, которая включает в себя сквозные межсоединения (TSV) для вертикальной трассировки высокой плотности.

Электрохимически осажденные межсоединения TSV внутри кремниевой подложки отвечают за вертикальную трассировку высокоскоростных сигналов от микросхем верхнего уровня вниз к нижележащей подложке корпуса.

КМОП-датчик изображения

Датчики изображения (CIS – CMOS Image Sensor), например используемые в камерах смартфонов. Благодаря вертикальному размещению на основе TSV, массив пик-

селей интегрируется непосредственно поверх схемы логической обработки (рис 3), что одновременно минимизирует площадь чипа датчика и ускоряет как обработку данных изображения, так и скорость считывания.

3D-система на кристалле (SoC) и гетерогенная интеграция

SoC (System-on-Chip) – вертикальная интеграция микросхем, изготовленных на различных технологических узлах и обладающих разнообразными функциональными возможностями, включая аналоговые, радиочастотные (РЧ) и логические устройства, в единый 3D-стек (рис 4).

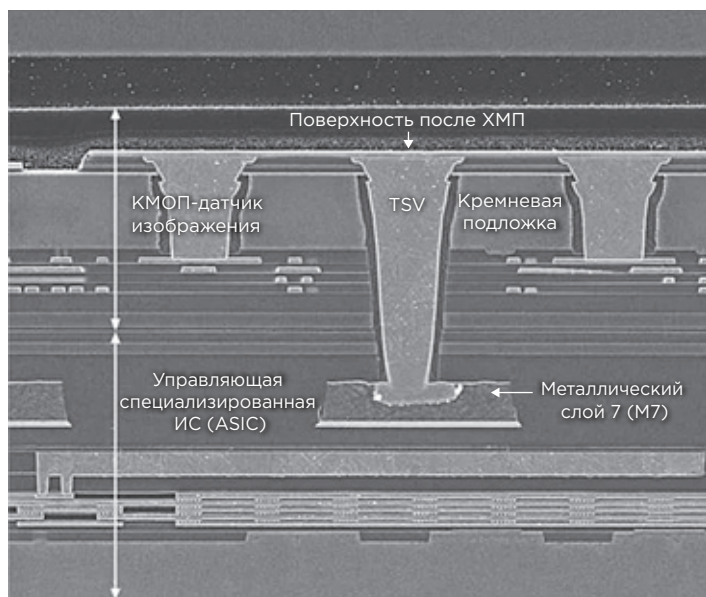
Технология TSV обеспечивает чрезвычайно низкое энергопотребление и сверхнизкую задержку при межсоединениях этих гетерогенных микросхем, позволяя осуществлять бесперебойную высокоскоростную связь между функционально различными кристаллами.

Анализ возможностей рынка

Объем мирового рынка технологии TSV в 2025 году оценивался в 3,1 млрд долларов США. Прогнозируется, что рынок вырастет с 3,8 млрд долларов в 2026 году до 10,5 млрд долларов в 2031 году и достигнет 23,7 млрд долларов США к 2035 году, что соответствует среднегодовому темпу роста (CAGR) в 22,5 % в прогнозируемый период с 2026 по 2035 год.

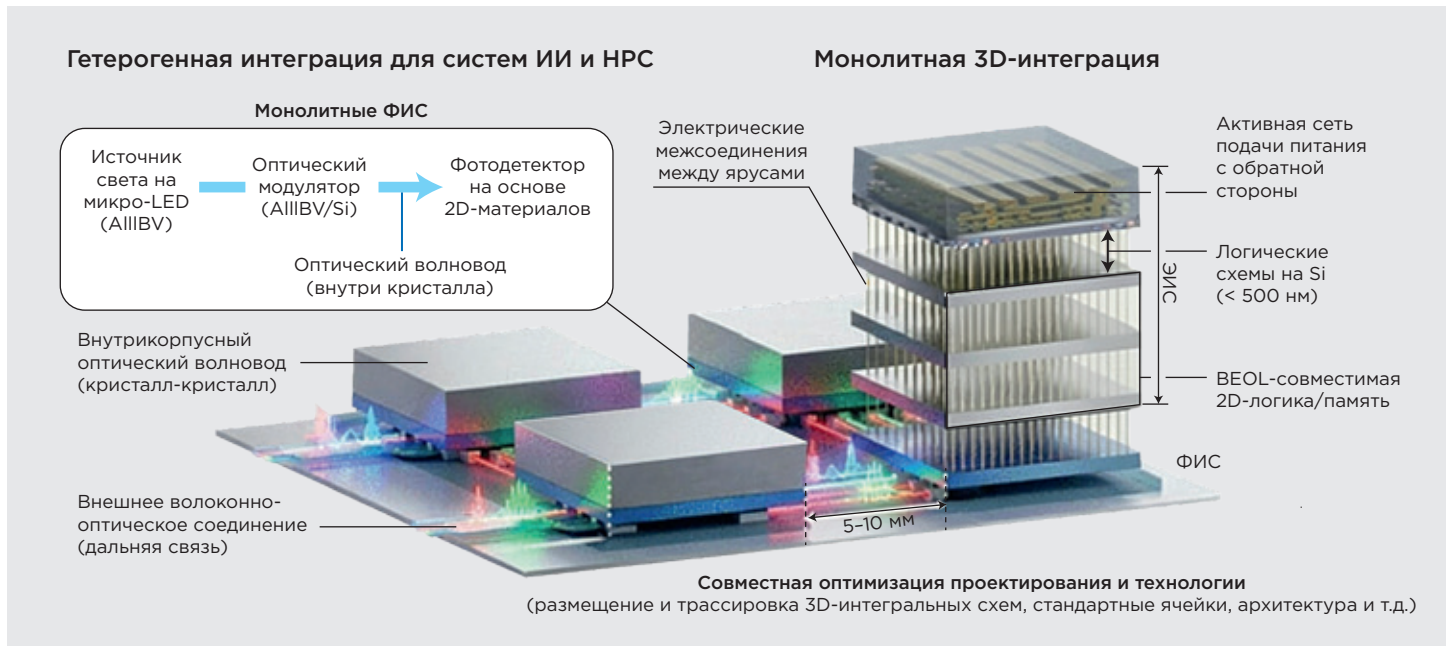
На долю ведущих игроков отрасли приходилось 47,6 % рынка в 2025 году. К ним относятся Applied Materials, TSMC, SK Hynix, ASE Group и Samsung Electronics.

Рынок химических реагентов для электролитического нанесения TSV отличается высокой концентрацией и чрезвычайно высокими технологическими барьерами. Три ведущих мировых игрока контролируют примерно 60 % рынка. Международная тройка (Merck, BASF, DuPont), опираясь на свои обширные патентные сети и партнерские отношения в рамках «железного треугольника» с производителями полупроводниковых пластин и оборудования, продолжает монополизировать наиболее прибыльные сегменты рынка, формируя классическую олигополию.



3

Структура CIS



4

Структура SoC

Однако под влиянием растущих опасений по поводу безопасности цепочки поставок локальные поставщики химической продукции для индустрии в Китае, такие как Shanghai Sinyang Semiconductor Materials и Aisenshi (ASEM), за последние годы совершили значительный прорыв, начав с нуля, и быстро выходят на рынок благодаря жесткой внутренней конкуренции за сертификацию и долю рынка.

Принцип электрохимического заполнения TSV – «восходящее суперзаполнение»

Диаметры сквозных межсоединений (TSV) обычно варьируются от нескольких микрон до нескольких десятков микрон, а глубина может достигать нескольких десятков или даже сотен микрон, что приводит к чрезвычайно высоким соотношениям сторон (обычно от 5:1 до 10:1, 15:1 или даже выше). При использовании традиционных процессов электрохимического осаждения металл осаждается в отверстиях межсоединения быстрее, чем на дне, вызывая преждевременное «схлопывание» отверстия у края и оставляя пустоты или швы внутри межсоединения – фатальный дефект. Поэтому в электрохимическом заполнении TSV используется механизм «восходящего сверхзаполнения». В чем же его суть? Ответ звучит просто и загадочно одновременно – синергетическое действие органических добавок (рис 5). Давайте попробуем разобраться в этой синергии.

Первая синергетическая составляющая – Супрессор

Обладает высокой молекулярной массой и преимущественно адсорбируется на поверхности пластины

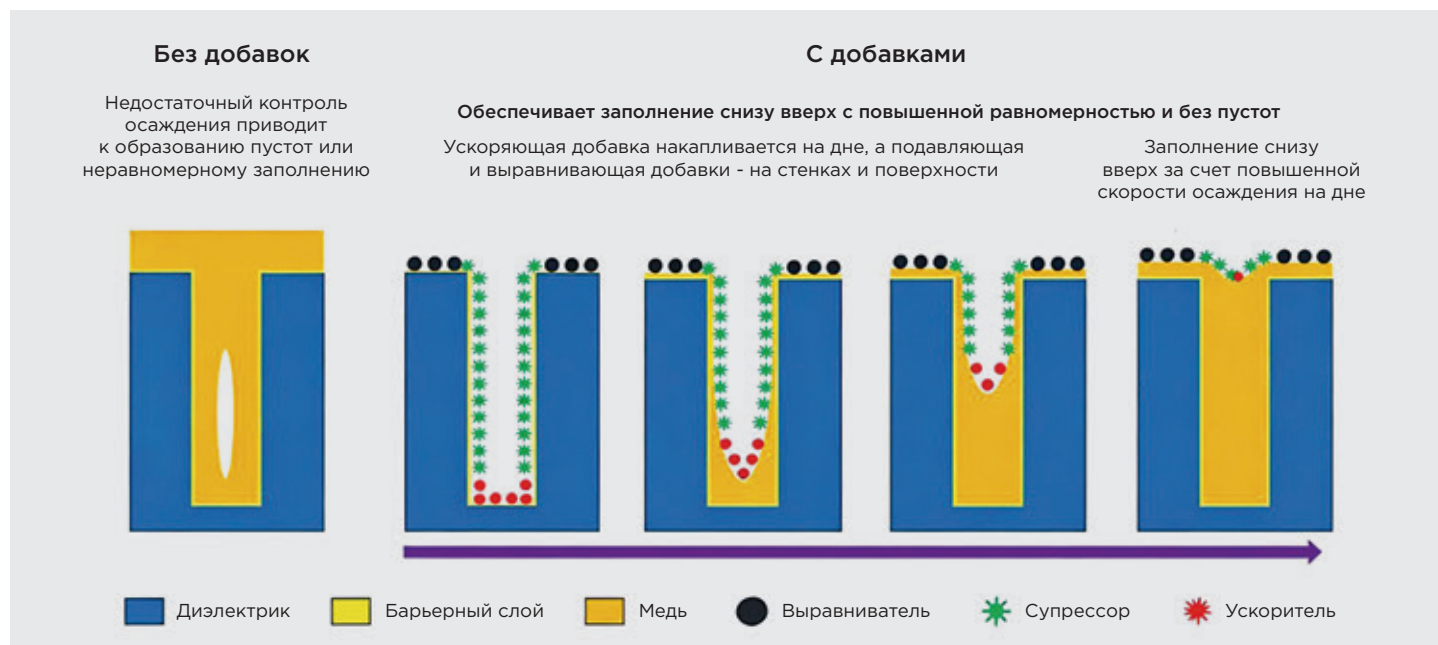
и в устье TSV, препятствуя осаждению ионов меди и подавляя чрезмерный рост в устье. В основе химического состава лежат высокомолекулярные полиэфирные поверхностно-активные вещества, такие как полиэтиленгликоль (ПЭГ), полипропиленгликоль (ППГ) или блок-сополимеры.

Как работает супрессор? Каков механизм его действия?

Супрессоры имеют большую молекулярную массу (обычно от тысяч до десятков тысяч дальтонов), что приводит к медленной диффузии в глубокие переходные отверстия. В присутствии ионов хлорида (Cl^-) в процессной камере супрессоры соадсорбируются с Cl^- , образуя плотный монослой высокоимпедансного барьера (блокирующий слой) на поверхности пластины и в устье переходного отверстия. Этот барьер значительно увеличивает перенапряжение для восстановления ионов меди (Cu^{2+}), сильно подавляя рост меди в устье отверстия и на поверхности. Из-за диффузионных ограничений концентрация супрессора на дне TSV относительно низка.

Вторая синергетическая составляющая – Ускоритель

Обладает малой молекулярной массой, что обеспечивает легкую диффузию и адсорбцию на дне переходного отверстия, а также его накопление там по мере уменьшения размера отверстия, что значительно ускоряет скорость осаждения меди на дне. В основе химического состава лежат серосодержащие малые органические молекулы. Наиболее классический пример – бис-(3-сульфопропил)-дисульфид (SPS) или 3-меркапто-1-пропансульфоновая кислота (MPS).



5

Принцип электрохимического заполнения TSV с применением специальных добавок

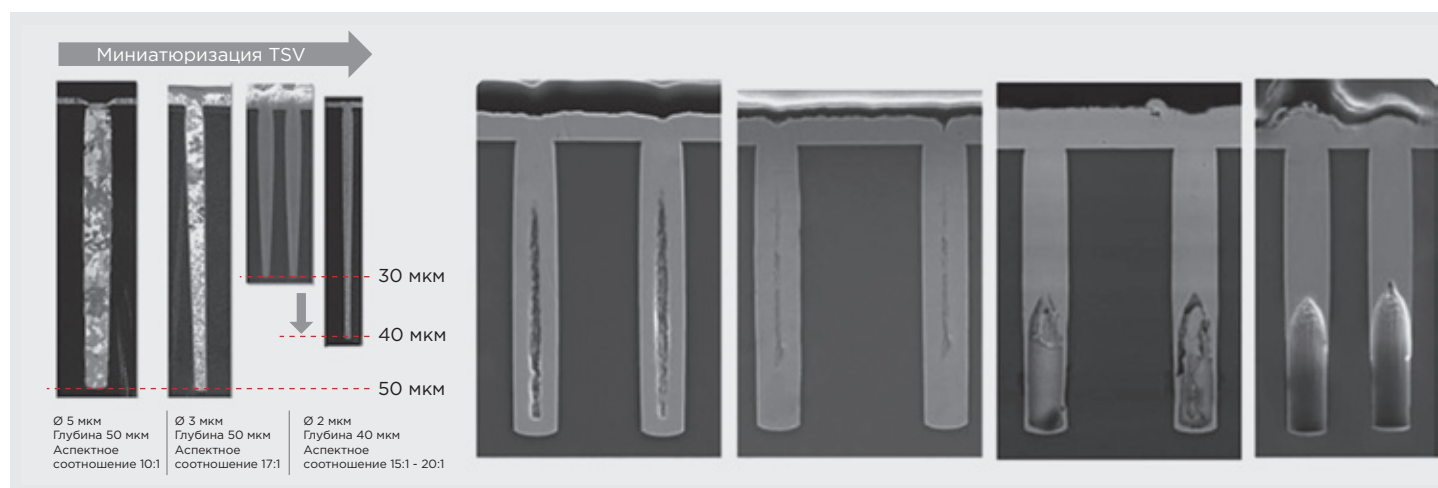
Как работает ускоритель? Каков механизм его действия?

Ускорители имеют малую молекулярную массу и могут быстро диффундировать ко дну TSV. Они снижают энергию активации осаждения меди и значительно катализируют восстановление меди, образуя промежуточные комплексы с Cu^{2+} . Ключевой механизм синергии – «уменьшение объема». На ранней стадии осаждения ускоритель равномерно адсорбируется внутри переходного отверстия. По мере заполнения снизу вверх внутренняя площадь поверхности переходного отверстия быстро уменьшается (выталкивая медь снизу вверх). Поскольку ускоритель обладает сильным адсорбционным сродством к меди, он не отслаивается, а пассивно «концентрируется» на дне. Высокая концентрация ускорителя с силой смещает супрессор

в этом месте, что приводит к резкому увеличению скорости роста меди в нижней части образца.

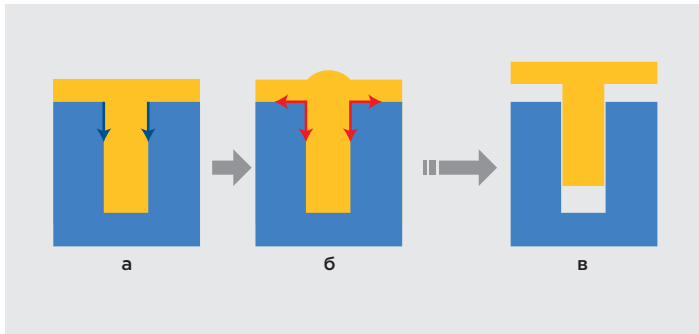
Третья синергетическая составляющая – Выравниватель

Дополнительный контроль поверхности и плоскостности предотвращает локальное перекрытие. Благодаря различиям в концентрации добавок скорость роста на дне TSV значительно превышает скорость роста в самом отверстии, обеспечивая полное отсутствие пустот, высокую плотность и идеальное заполнение медью. В основе химического состава лежат сильно катионные гетероциклические или азотсодержащие ароматические соединения, такие как Янус Грин В (JGB – Janus Green B), полиэтиленимин и производные имидазола.



6

Вызов со стороны аспектного соотношения сторон TSV



7

Вызов со стороны стресса и КТР в TSV со схемой развития дефекта «выталкивания» TSV: а) отслоение по вертикальной границе раздела при охлаждении; б) отслоение по горизонтальной границе раздела при нагреве; в) выталкивание TSV после многократного термоциклирования

Как работает выравниватель? Каков механизм его действия?

Выравниватель несет положительный заряд. Благодаря «эффекту острия» мы наблюдаем наиболее сильное электрическое поле на выступах или в устье TSV. Выравниватель преимущественно притягивается и сильно адсорбируется в устье TSV и его углах, где электрическое поле наиболее сильное. Ингибирующее действие выравнивателя более жесткое и сильное, чем у метастабильных супрессоров (ПЭГ). Они могут принудительно подавлять возможные «бугорки» или локальное перекрытие в устье TSV. Данный механизм ограничен диффузией. Выравниватель диффундирует в переходное отверстие, расходуясь или разрушаясь электрохимическим восстановлением. Поэтому его концентрация на дне переходного отверстия практически равна нулю. Это обеспечивает максимальное подавление потока в устье TSV, в то время как нижняя часть, ведомая ускорителем, стремительно поднимается вверх. Когда TSV полностью заполнено, выравниватель также обеспечивает равномерное покрытие поверхности, снижая последующие затраты на химико-механическую полировку (CMP).

Механизм действия добавок:

- Ускоритель – ускоряющая добавка: повышает скорость осаждения меди на дне и формирует заполнение снизу вверх.
- Супрессор – подавляющая добавка: подавляет осаждение на поверхности и стенках, формируя более тонкий слой меди.
- Выравниватель – выравнивающая добавка: способствует выравниванию поверхности и равномерному осаждению меди.

С какими техническими вызовами сталкивается технология электрохимического заполнения TSV?

По мере дальнейшего увеличения интеграции микросхем процесс электрохимического осаждения в TSV сталкивается со все более серьезными проблемами рис 6.

Более высокое аспектное соотношение сторон

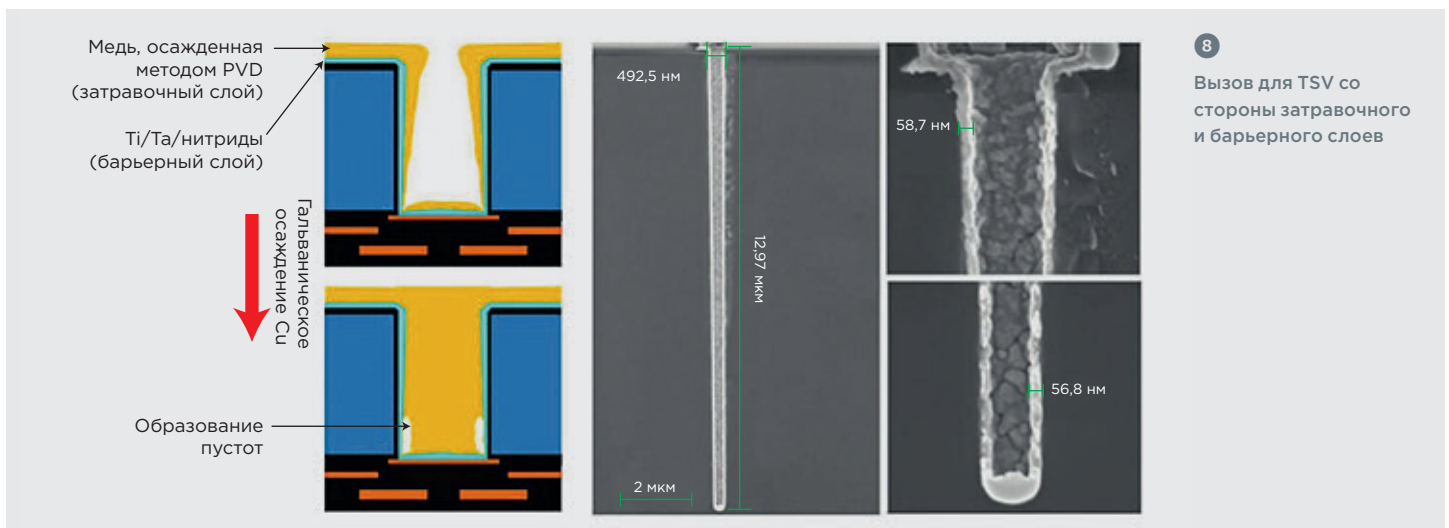
В TSV с высоким соотношением сторон конвекция становится неэффективной, и ионы меди полагаются исключительно на диффузионный перенос. Потребление в нижней части опережает восполнение, что приводит к резкому снижению скорости осаждения, преждевременному закрытию устья TSV и образованию центральных пустот.

Несоответствие стресса и коэффициента теплового расширения (КТР)

Медь имеет гораздо более высокий КТР (приблизительно $16,5 \times 10^{-6}/K$), чем кремний (приблизительно $2,6 \times 10^{-6}/K$). Во время термических циклов медные столбики создают огромное термическое напряжение – стресс, легко приводящий к деформации пластины, расслоению или разрушению кремниевой подложки рис 7.

Растрескивание затравочного и барьерного слоев

В процессе формирования барьерного и затравочного слоев используется метод PVD. В глубоких и узких переходных



8

Вызов для TSV со стороны затравочного и барьерного слоев



9

Полностью автоматическая высокопроизводительная установка электрохимического осаждения последнего поколения

отверстиях боковой затравочный слой становится чрезвычайно тонким и склонным к растрескиванию, что приводит к образованию боковых швов во время электрохимического осаждения (рис 8). Дефекты барьерного слоя позволяют меди диффундировать в кремниевую подложку, что впоследствии приведет к отказу чипа.

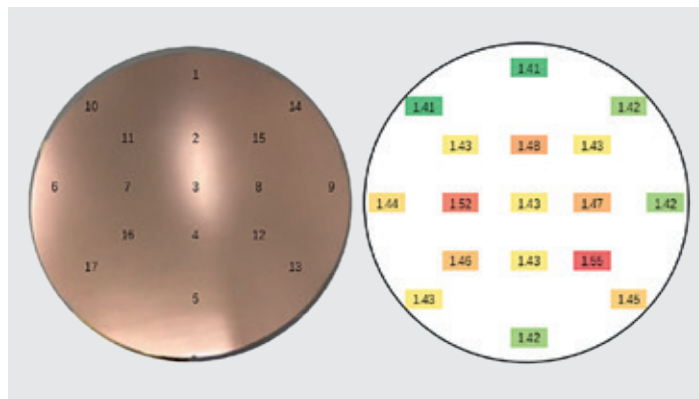
Эффективность и стоимость нанесения покрытий

Нанесение покрытий с высоким соотношением сторон может занимать несколько часов. Вопрос о том, как увеличить скорость осаждения и продлить срок службы процессной ванны без внесения дефектов, остается ключевым технологическим препятствием для поставщиков оборудования и материалов и является крайне существенным вызовом для технологии TSV.

Какое оно – современное оборудование для процессов TSV?

Современное оборудование для электрохимического осаждения должно обладать следующими функциями и особенностями рис 9:

- высокой точностью проведения процесса;
- высокой повторяемостью процессов;
- быть полностью автоматическим с режимом dry in – dry out;
- быть легко управляемым по всем параметрам, влияющим на точность и повторяемость процесса;
- обладать возможностями регистрировать и отслеживать все установленные параметры, связанные с процессом;



10

Результат измерения неравномерности толщины слоя меди на поверхности пластины с TSV (12"-пластина, 17 точек контроля, неравномерность 4,83%)

- обладать возможностью гибкого конфигурирования, опираясь на модульный принцип построения.

Однородность слоя меди на поверхности пластин с TSV

При работе с TSV вопрос равномерности слоя меди на поверхности пластины является крайне важным, и не учитывать данный факт при отработке процесса TSV – это большое заблуждение (рис 10). Для обеспечения наилучшей равномерности толщины слоя меди на поверхности пластины с TSV необходимо учитывать ряд особенностей в конструкции процессной ванны.

На самом деле – это не классическая ванна для гальванического процесса, а крайне сложная инженерная система.

Вот несколько ее основных особенностей:

- высокоточная многозонная регулируемая анодная система;
- разделение мембран анод-катод для точного контроля распределения плотности тока от края пластины до центра;
- защита контактного кольца на краю пластины в виде специальной конструкции герметизирующих проводящих материалов, что обеспечивает чрезвычайно низкое контактное сопротивление и полностью предотвращает утечку раствора электролита на обратную сторону пластины;
- подача раствора электролита на поверхность пластины фонтанным методом;
- вращение катодной головы с погружением в электролит;
- система подавления завихрений и пузырьков;
- и другое.

Возможности заполнения TSV

Рассмотрим технологические и технические возможности эксклюзивного партнера ООО «Остек-ЭК». Наш партнер использует ряд собственных запатентованных

Пластина Ø200 мм, TSV размером 1×5 мкм

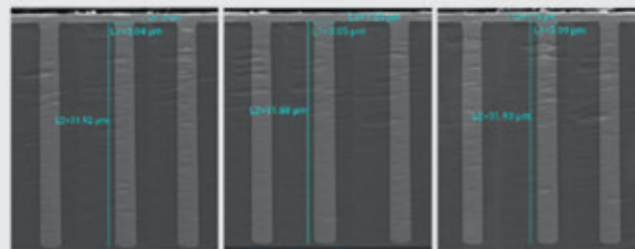
Центральная зона Промежуточная зона (середина радиуса) Краевая зона



Анализ поперечных сечений методом FIB в центральной, средней и краевой зонах пластины подтверждает заполнение TSV без пустот и иных дефектов

Пластина Ø300 мм, TSV размером 3×30 мкм

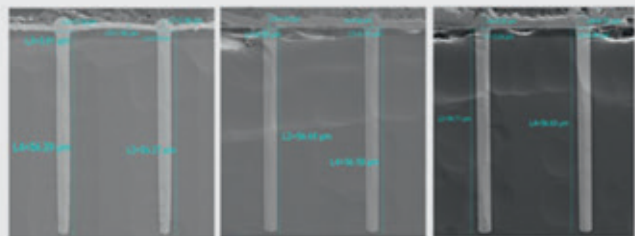
Центральная зона Промежуточная зона (середина радиуса) Краевая зона



Анализ поперечных сечений методом FIB в центральной, средней и краевой зонах пластины подтверждает заполнение TSV без пустот и иных дефектов

Пластина Ø300 мм, TSV размером 5×56 мкм

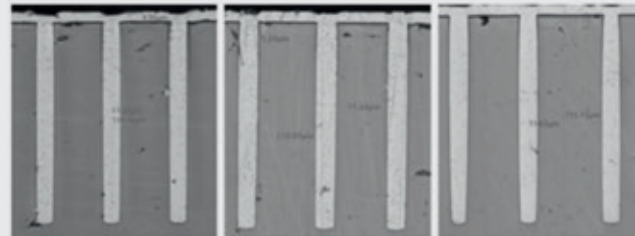
Центральная зона Промежуточная зона (середина радиуса) Краевая зона



Анализ поперечных сечений методом FIB в центральной, средней и краевой зонах пластины подтверждает заполнение TSV без пустот и иных дефектов

Пластина Ø300 мм, TSV размером 10×100 мкм

Центральная зона Промежуточная зона (середина радиуса) Краевая зона



Анализ поперечных сечений методом FIB в центральной, средней и краевой зонах пластины подтверждает заполнение TSV без пустот и иных дефектов

1 1

Возможности по заполнению TSV

технологий, которые гарантируют бездефектное заполнение межсоединений с размерами 1 × 5 мкм, 3 × 30 мкм, 5 × 56 мкм и 10 × 100 мкм на 8-дюймовых и 12-дюймовых пластинах, где 1, 3, 5, 10 мкм – это диаметр TSV, а 5, 30, 56, 100 мкм – глубина TSV соответственно РИС 11.

Революционная конструкция процессной камеры была разработана с учетом гидродинамических расчетов и расчетов распределения электрического поля в условиях циркуляции электролита.

Запатентованные механизмы фонтанного типа и поперечного перемешивания с помощью лопастей обеспечивают подачу раствора электролита на поверхность пластины с оптимальной вертикальной скоростью, полностью исключая «узкое место» диффузионного приповерхностного слоя у устьев TSV, что особенно важно при экстремальных соотношениях сторон.

Усовершенствованный модуль вакуумного предварительного смачивания и дегазации, который интегрирован в блок предварительной обработки с гибким регулированием давления воды и высоким вакуумом, создает процесс со 100 % удалением воздуха из TSV и микро-TSV перед их заполнением, обеспечивая полное смачивание TSV со сверхвысоким соотношением сторон вплоть до 12:1.

Благодаря модели интеграции процессов «оборудование + химия» наш партнер способствует решению различных проблем, связанных с процессом заполнения TSV, и продвижению безопасной производственной цепочки. Одновременное совершенствование оборудования и химических реагентов означает, что есть возможность не только предлагать решения по точечной замене, но и самостоятельно определять и калибровать стандарты процесса TSV следующего поколения на уровне ФАБа, предлагая полностью самоконтролируемую производственную основу для высокопроизводительных вычислительных чипов.

Что касается индивидуальных требований к микропереходным отверстиям, предлагаемых HBM или новыми 3D-проектами SoC, команда партнера может обеспечить быструю реакцию благодаря «круглосуточной поддержке и еженедельной итерации рецептов». Наше глубокое сотрудничество поможет ускорить темпы развития технологических процессов TSV и не только. 

Материалы, использованные в статье, подготовлены совместно с эксклюзивным партнером компании «Остек-ЭК», лидером на рынке процессов электрохимического осаждения. Более подробную информацию можно получить по электронной почте: micro@ostec-group.ru.

Метод формирования канавок с высоким аспектным соотношением

для последующего заполнения поликремнием без пустот

Текст: Алексей Симонов



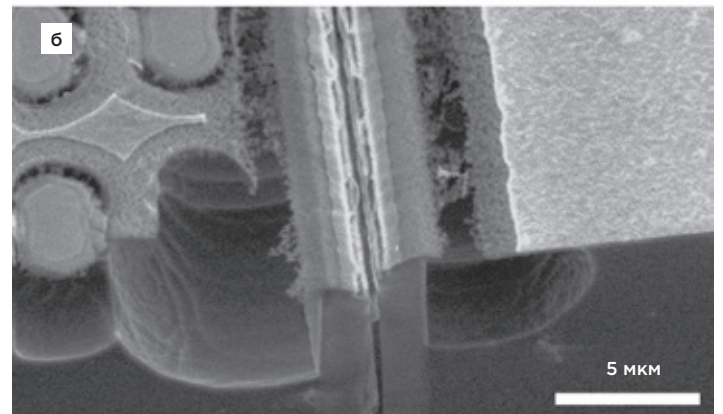
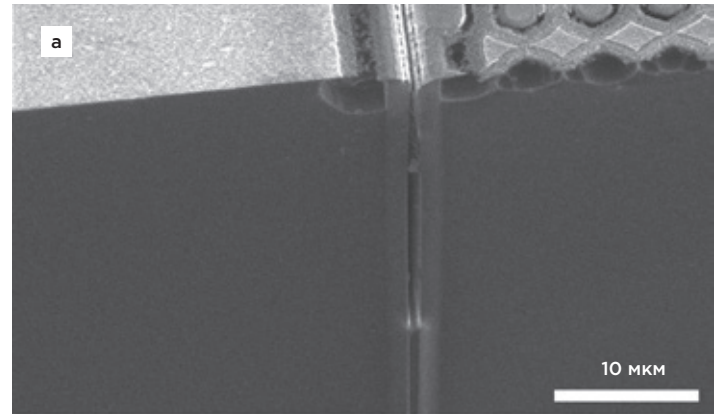
Сегодня объёмные МЭМС лежат в основе большинства современных инерциальных датчиков (акселерометров, гироскопов), RF-переключателей и тепловых датчиков, где механическое перемещение преобразуется в электрический сигнал. Технология формирования глубоких канавок с высоким аспектным отношением (BA, HAR) является одной из ключевых операций в маршруте изготовления таких объёмных МЭМС. Функциональное назначение канавок варьируется от диэлектрической или тепловой изоляции соседних структур до формирования полостей под подвижными частями, а также создания направляющих каналов в технологии скрытых проводящих слоёв (Buried Channel) и технологии поверхностных каналов с канавками вокруг сердечника (TASCT).

Технология изготовления таких структур сопряжена с двумя взаимосвязанными вызовами: достижение требуемой глубины (обычно 20-100 мкм) при ширине менее 2 мкм и последующее высококачественное заполнение данных структур без дефектов. Последовательность травления HAR-канавок, осаждения слоев внутри канавок и свойства используемых материалов определяют свойства изоляции и механические свойства заполненных канавок. При изготовлении структур HAR-канавок для задач изоляции требуются положительно сужающиеся боковые стенки канавок с углом наклона профиля боковой стенки $88^\circ \div 89^\circ$ для заполнения без пустот с использованием низкотемпературного химического осаждения из газовой фазы (LPCVD) таких материалов, как: нитрид кремния (Si_3N_4), диоксид кремния (SiO_2) и поликристаллический кремний (poly-Si) без значительного увеличения поверхностной топографии, т.е. без канавок (grooving) на поверхности пластины.

Процесс формирования канавок и надежность получаемых структур

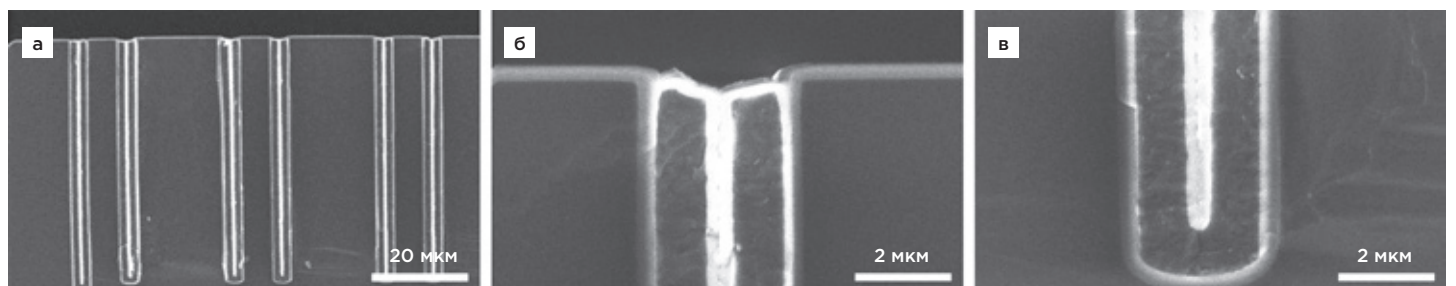
Положительно суживающиеся боковые стенки предотвращают образование так называемых полостей (keyholes/voids), то есть пустот между интерфейсами конформно осажденных слоев на противоположных сторонах канавки, генерируемых локальными вариациями ширины в этой канавке. Наличие полостей значительно снижает механическую прочность, стабильность и надежность структур МЭМС и усложняет последующую обработку. Осложнения при обработке возникают, например, когда слой LPCVD на поверхности пластины должен быть удален, а пустоты в канавках при этом открываются. Открытые полости затем могут повлиять на последующие этапы, такие как: фотолитография, осаждение тонких пленок и травление. На изображениях SEM (рис 1а, б) показано, что открытая канавка приводит к неоднородному нанесению слоя фоторезиста, что, в свою очередь, ведет к негативным последствиям во время этапа реактивного ионного травления (RIE) с использованием SF_6 в процессе TASCT. Эта неоднородность вызвана тем, что фоторезист «затягивается» в полости капиллярными силами.

Могут быть различные пути решения проблем с полостями. Например, в работе по изготовлению боковых



1 SEM-изображения, показывающие неудачное травление канала в процессе TASCT. На рисунке (а) представлен общий вид, а на рисунке (б) крупным планом показано нежелательное травление поверхности кремния на этапе RIE на основе SF_6 , вызванное неоднородным слоем фоторезиста вблизи канавки с открытой полостью

нагревательных элементов для жидкостных приложений путем использования заполненных без пустот каналов, изготовленных в процессе TASCT, был осажден термический окисел, далее каналы были заполнены поликремнием при помощи метода LPCVD. Пустоты были устранены путем удаления слоя poly-Si на поверхности пластины для открытия полостей и выполнения сухого термического окисления слоя poly-Si для полного заполнения отверстий, как показано на рис 2а-в. Однородность заполнения была определена профилем вытравленных каналов и диффу-



2 SEM-изображения в TASCT-структурах после заполнения пустот. Результат достигнут путем травления поликремния на поверхности пластины и закрытия полостей термическим окислением поликремния при температуре 1100°C . На рисунке (а) показан канал целиком, на рисунке (б) – крупный план в верхней части канала, а на рисунке (в) – крупный план в нижней части канала



3

Схематические изображения заполнения канавок с эффектом входа и без него, а также с различным наклоном боковых стенок. В случае (а–г) после заполнения образуется полость.

■ – кремний и ■ – материал заполнения (например, Si_3N_4 или poly-Si)

зией кислорода в уже образованный термический оксид (t-SiO_2).

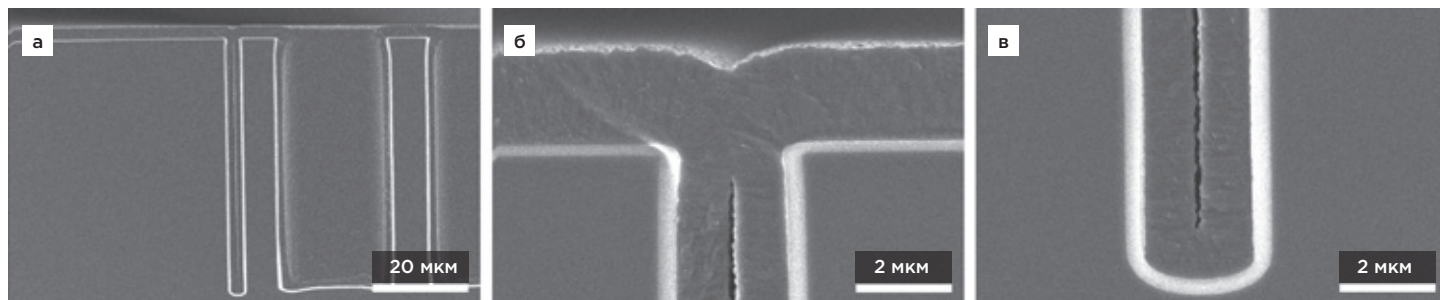
HAR-структуры каналов в приложениях МЭМС обычно имеют ширину в диапазоне от 1 до 500 мкм и вытравливаются в кремниевых пластинах или пластинах кремний-на-изоляторе (SOI) с помощью метода глубокого реактивного ионного травления (DRIE). Аспектное соотношение у вытравленных каналов часто достигает 30:1. Максимальная ширина заполненной канавки определяется характеристиками процесса заполнения (например, максимальная толщина слоя) и свойствами осажденных материалов (например, внутреннее напряжение). Эти требования вместе определяют, что угол профиля боковой стенки должен стремиться к вертикальному. Преимущества использования DRIE-процесса для травления кремния – это гибкость дизайна конечного устройства, контроль профиля по глубине канавки и небольшие критические размеры структур для изоляции, которые можно получить. Именно процессы Bosch-травления (с чередованием процессов травления и пассивации) чаще используются для формирования высокоаспектных каналов в кремнии.

Почему важна форма профиля канавки: откуда берётся «горлышко» и как с ним бороться?

На рис 3а–г показаны различные профили структур при DRIE-травлении, при которых могут образовываться полости в каналах. Наличие полостей при заполнении – это комбинация локального расширения в кремнии в структуре каналов размером несколько микрон под жесткой маской, так называемый эффект входа («entrance effect»), и формирования неправильного профиля боковой стенки на глубине канавки. Эффект входа – результат как травления жесткой маски, так и выбранной последова-

тельности и параметров шагов рецепта Bosch-травления. Неправильный профиль боковой стенки можно классифицировать как локальное расширение («bottling effect»; рис 3а), комбинацию эффекта входа с вертикальным профилем и недотравлением боковой стенки (рис 3б), отрицательный наклон боковой стенки (рис 3в) и комбинацию эффекта входа с положительно сужающимися боковыми стенками (рис 3г).

На рис 3д, е показаны два примера успешного заполнения канавок в результате положительно сужающегося профиля боковых стенок. На рис 3д показано идеальное травление без эффекта входа, а на рис 3е используется предварительный этап расширяющего травления HAR-структур, компенсирующий эффект входа. В исследованиях был проведён детальный анализ различных рецептов травления на основе Bosch-метода, направленный на выявление параметров и особенностей процесса, которые определяют профиль формируемых структур и возможность их последующего бездефектного заполнения. Результаты однозначно свидетельствуют о том, что использование единого фиксированного набора параметров на протяжении всего цикла травления HAR-канавок не позволяет в полной мере устранить такие характерные дефекты, как эффект входа (entrance effect) и локальное расширение по глубине канала (bottling effect). В частности, было показано, что именно эффект входа в большинстве случаев является основной причиной образования полостей после конформного осаждения материалов внутрь канавки. Примечательно, что даже при получении идеального вертикального профиля с углом наклона боковых стенок 90° после DRIE-травления (рис 4а) полость всё равно формировалась по всей длине канавки. Детальное рассмотрение на увеличенных изображениях (рис 4б, в) подтверждает, что ширина



4 SEM-изображения заполненных каналов в TASCT-структурах с образованием полости. HAR-канавка шириной 3 мкм была заполнена методом влажного термического окисления и LPCVD-осаждения поликремния. На изображении (а) показано, что полость присутствует по всей длине канала. На увеличенных изображениях (б) и (в) показано, что ширина полости была одинаковой сверху и снизу. Сухое термическое окисление может использоваться для заполнения полости, как показано на рис 2

этой полости оставалась постоянной как в верхней, так и в нижней части канавки, что однозначно указывает на локальный характер эффекта входа как на главный фактор, ответственный за возникновение дефекта. Таким образом, из совокупности представленных данных следует, что достижение контролируемого профиля боковой стенки и полное подавление эффекта входа при травлении HAR-каналов чрезвычайно затруднительно в рамках одного рецепта с неизменными параметрами на всех этапах процесса.

Было продемонстрировано, что путем использования жертвенного слоя поликремния, осажденного на поверхность пластины методом LPCVD, эффекта входа можно избежать. При таком подходе эффект входа образуется в слое поликремния, который удаляется перед заполнением. Требуемого вертикального или положительного профиля можно достичь путем изменения соотношения между временем цикла осаждения и временем цикла травления в двухэтапном рецепте Bosch-травления. Однако описанный подход к устранению эффекта входа использует дополнительные этапы обработки, такие как осаждение жертвенного слоя и формирование рисунка в нем, что усложняет полный процесс изготовления.

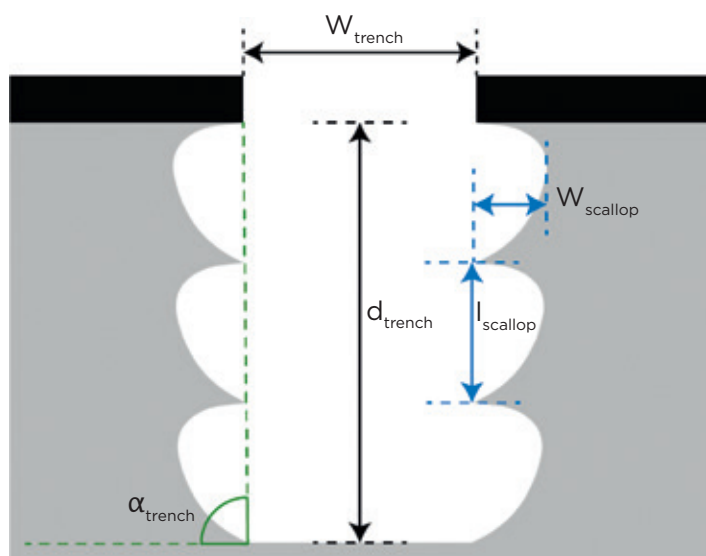
Иным подходом в предшествующих исследованиях было введение полуизотропного травления в SF_6 плазме после основного травления для увеличения входа канала в верхней части. После такой операции травления вход канавки расширялся на несколько микрон, следовательно, требовался более толстый слой для заполнения. Дополнительно трёхступенчатый процесс DRIE-травления был разработан для формирования положительно профиля при травлении. Этот метод использовал Bosch-процесс для травления HAR-каналов, последующее RIE-травление для регулирования положительного профиля и финальный этап полуизотропного травления для сглаживания профиля боковых стенок. Основной недостаток метода в том, что в одной камере используется различная химия для контроля ширины канала и его профиля. Такой метод чрезвычайно чувствителен к остаточным фторуглеводородам (FC) внутри канавки вследствие использования в процессе

Bosch-травления. Это может повлиять на однородность травления внутри канала и по поверхности пластины и требует избыточного осаждения для идеального заполнения или сделает успешное заполнение невозможным, так как максимальная толщина слоя определяется используемым оборудованием и материалами для заполнения. Скорость полуизотропного SF_6 -травления также чувствительна к аспектному соотношению и открытой площади кремния (т. н. эффект загрузки) и, следовательно, должна быть оптимизирована для каждой отдельной маски.

Процессы на основе метода Bosch менее чувствительны к эффекту загрузки, что делает их надежными процессами, которые в настоящее время часто используются при производстве МЭМС. Кроме того, такие процессы надежны, так как менее чувствительны к колебаниям температуры пластины. Современные системы глубокого травления (Deep RIE) способны выполнять многошаговые и/или многорецептные процессы Bosch-травления с высокой производительностью (например, скорость травления, профиль боковой стенки и селективность к маске) для травления HAR-каналов и других структур. Это реализуется путем точного контроля в режиме реального времени параметров генераторов индукционно-связанной плазмы (ICP) и генераторов смещения (LF, HF), регуляторов расхода газа (MFC), автоматической системы регулирования давления и других параметров. Правильно настроенный трёхступенчатый процесс Bosch-травления способен формировать сложные микро- и наноструктуры путем управления размерами неровностей профиля боковой стенки (scallop) за счет так называемого процесса DREM (осаждение, удаление, травление, повторение).

Как же эффективно решить проблему эффекта входа?

В исследовании рассмотрен комплексный подход к травлению положительно суживающихся HAR-каналов путем управления размерами scallop (т. е. высота и ширина) и их расположением на боковой стенке канавки. Схематичное изображение канавки со

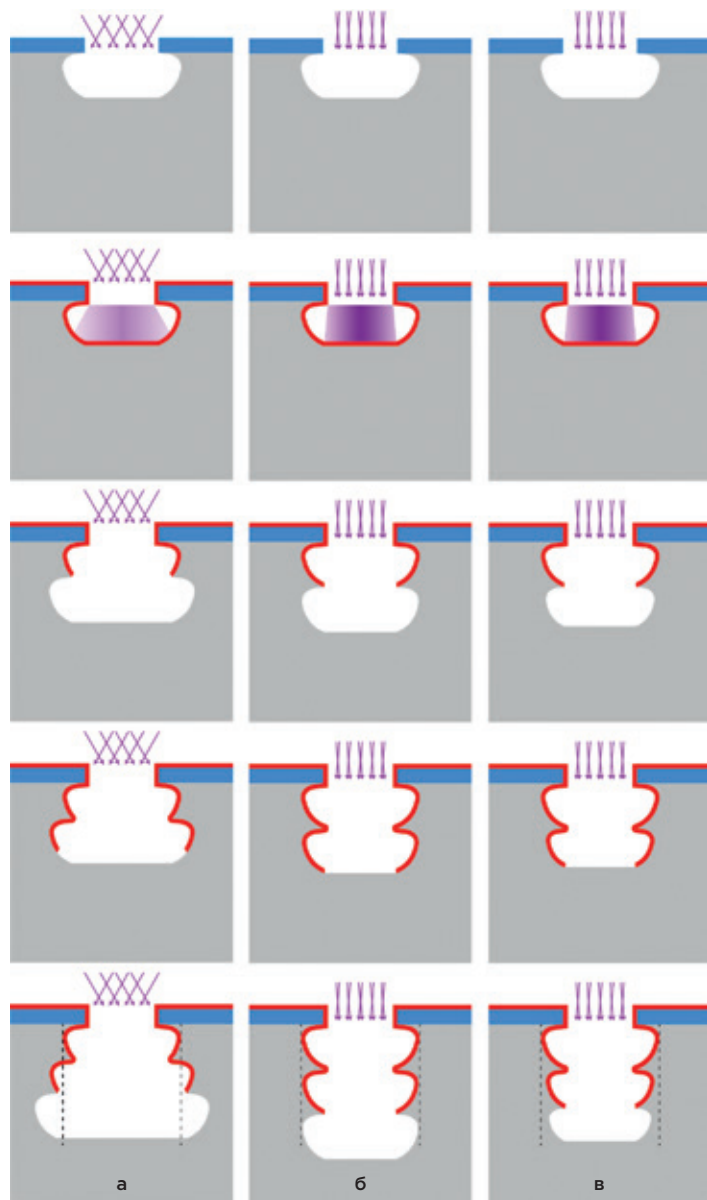


5

Схематичное изображение сформированной канавки с аспектным соотношением 2:1

scallop-структурами показано на рис 5. Размеры и расположение scallop были отрегулированы путем удаления пассивирующего слоя фторполимера (FC) на дне предыдущего scallop и этапа цикла нового травления, как показано в модели на рис 6 а-в. При травлении FC-слоя на дне scallop угловое распределение ионов (ion angular distribution function, IAD) и их энергия определяют эффективность удаления полимера. На этапе цикла травления кремний вытравливается полуизотропным образом с соотношением 2:1 между вертикальным и латеральным травлением. Латеральное травление, т. е. ширина scallop ($W_{scallop}$ на рис 5), создается в основном химическим потоком (изотропное травление), а вертикальное травление, т. е. высота scallop ($L_{scallop}$ на рис 5), — это использование как химического потока (изотропное травление), так и физического ионного потока (направленное травление). Соотношение этих потоков управляется потоком газа SF_6 , мощностью ICP-источника, мощностью смещения и давлением процесса. Продолжительность этих потоков обусловлена временем каждого этапа в цикле Bosch-травления. Показано, что путем настройки размеров scallop направленность угла профиля боковой стенки канавки может быть изменена. Полученные структуры scallop были исследованы для достижения оптимальной боковой стенки в процессе DRIE с углами профиля в диапазоне $88^\circ \div 89^\circ$ и последующего заполнения канавки.

На рис 6 а отрицательный профиль scallop создавался с помощью большого значения IAD (давление при травлении >30 мТорр) и постоянного времени цикла травления. На рис 6 б вертикальный профиль канавки создавался с использованием небольшого IAD (давление <10 мТорр) и постоянного времени травления. На рис 6 в положительный профиль канавки создавался



6

Формирование различного профиля канавки: (а) отрицательный профиль, (б) вертикальный профиль, (в) положительный профиль канавки.

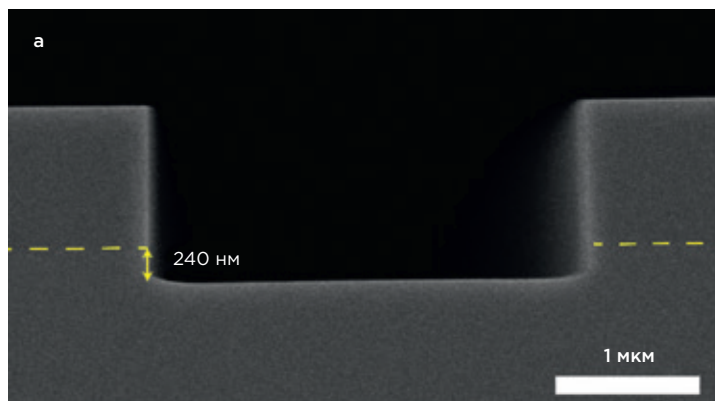
■ — кремний, ■ — жесткая маска ($t-SiO_2$), ■ — FC-пассивирующий слой. Фиолетовый цвет во втором ряду указывает на IAD в плазме (концентрация ионов самая высокая в центре канавки (почти перпендикулярно поверхности))

за счет использования относительно короткого и постоянного (или постепенно уменьшающегося) времени цикла травления и небольшого IAD.

Рассмотрим подробнее, как параметры процесса влияют на эффект входа и профиль формируемой канавки

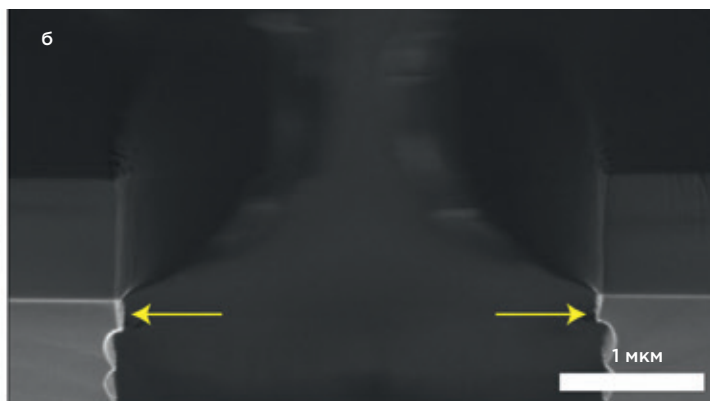
Травление входа канавки

Стандартный двухэтапный процесс на основе метода Bosch, состоящий из этапов осаждения и травления, часто начинается с осаждения FC-полимера. Данный полимер действует как защитный слой для жесткой маски



7

SEM-изображения эффекта «входа»: (а) перетрав 240 нм в Si в процессе RIE-травления и вскрытия окошка в жесткой маске t-SiO₂, (б) образование «горлышка» при травлении (показано стрелками)



и предотвращает образование большого scallop/под-трава непосредственно под маску. Недостаток начала процесса с шага осаждения – это создание небольшого перетрава кремния непосредственно под маской, как показано на SEM-изображении на рис 7а. Происхождение этого перетрава или эффекта входа канала в двух-этапных рецептах Bosch-травления объясняется удалением слоя FC-полимера с использованием физического потока ионов F⁺ и SF₅⁺ в плазме SF₆, которые также вытравливают кремний. Это направленное травление достигается в рецепте путем применения увеличенной мощности смещения во время цикла травления, например, для 30 % времени цикла травления.

В случаях, когда используется жесткая маска из термического оксида кремния (t-SiO₂), образование перетрава в кремнии может быть усилено избыточным травлением этого слоя t-SiO₂ (рис 7б) с использованием направленного метода RIE на основе химии CHF₃/O₂. Во время этого травления боковая стенка перетравленного кремния покрывается FC-полимером и защищает кремний во время первого травления scallop, если не выполняется удаление жесткой маски перед процессом HAR-DRIE.

Ширина и длина первых профилей scallop в канавке контролируются последовательностями метода Bosch. На рис 8 показаны три вида профилей входа канавок и их влияние на последующее заполнение. Для рис 8а, б входы были вытравлены с использованием одного шага, основанного на изотропном или полуизотропном травлении соответственно, в результате чего получился либо широкий, либо глубокий профиль входа. При этом сравнительно глубокие бороздки на поверхности пластины отмечаются после заполнения этих каналов. Оба типа канавок неидеальны, так как они образуют бороздки, которые, например, повлияют на качество передачи рисунка при последующей фотолитографии. Форма входа на рис 8в показывает многоступенчатый подход, состоящий из двух полуизотропных этапов травления, в результате чего бороздка

после заполнения получается меньше. Следовательно, требования к нужному профилю входа для идеального заполнения канала без глубоких бороздок на поверхности пластины можно определить так:

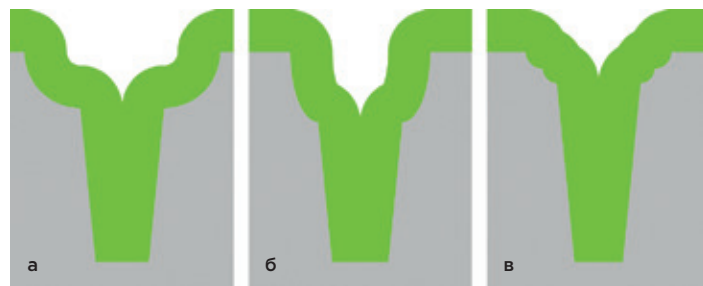
- вход канала должен иметь положительное сужение;
- уход линейных размеров (ширины канала) не должен превышать 1 мкм с обеих сторон канала;
- глубина не должна быть более 1 мкм.

Травление канала

Для объяснения того, как размеры scallop и углы профиля канала зависят от параметров травления, рассмотрим краткое описание всех трех варьируемых параметров процесса.

Давление процесса и ионное угловое распределение

Угол наклона профиля канала главным образом определяется ионным воздействием положительно заряженных ионов на дне канавки. Ионное воздействие определяет скорость травления и эффективность



8

Схематические изображения заполненных канавок с положительным наклоном и разными входами: (а) использование изотропного травления при высоком давлении (широкое входное окно), (б) полуизотропное травление при низком давлении с использованием физического травления (глубокое входное окно), (в) многоступенчатый процесс травления с двумя этапами изотропного травления при высоком давлении (более узкое и менее глубокое окно).

■ – кремний и ■ – материал заполнения (например, Si₃N₄)

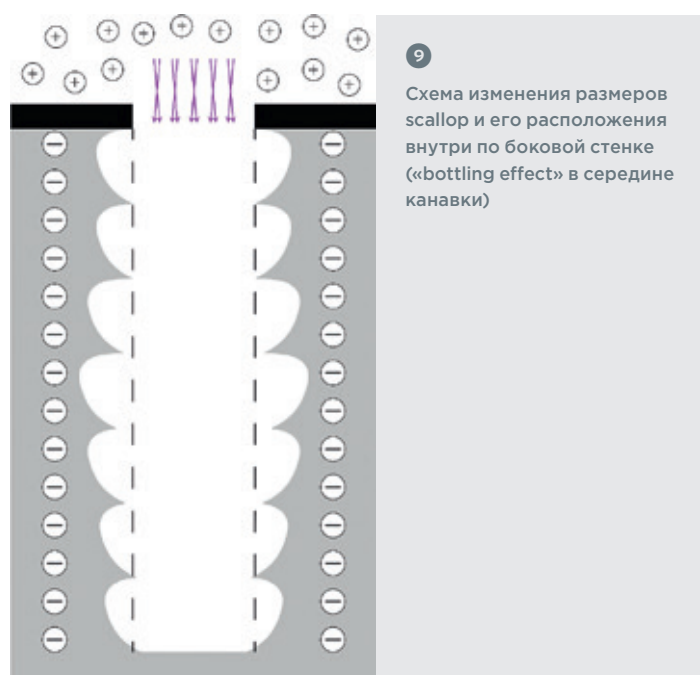
FC-полимера, а также место, где FC-полимер удаляется (рис 6). В плазме электрическое поле ускоряет ионы вдоль поверхности, создавая направленный поток частиц, который индуцирует направленное травление. Столкновение направленных к поверхности пластины частиц образует распределение по энергиям и углам. Функция углового распределения ионов (IADF) описывается как гауссово распределение. Функция углового распределения ионов сильно зависит от давления процесса. Рассеяние, вызванное столкновениями, значительно увеличивается при давлениях процесса более 10÷20 мТорр. Более высокие давления, следовательно, приводят к изменению соотношения латерального травления к вертикальному травлению, так как химический поток увеличивается. Направленность процесса травления также будет уменьшаться из-за увеличенного IAD. Большой IAD влияет на область внутри scallop, где слой FC-полимера будет удален перед травлением следующего scallop. Эффект давления на этапе цикла травления на размеры scallop анализируется путем задания давления на этапе травления как 16 мТорр (наименьшее достижимое давление с использованием всех остальных настроек), 30 мТорр и также 40 мТорр.

Мощность смещения и электростатическая сила притяжения

Мощность смещения и электростатическая сила притяжения (сила зеркального отображения, image force, IF) также влияют на размеры scallop. Процесс, проведенный со слишком низкой мощностью смещения, часто приводит к отрицательному сужению и/или локальному расширению (также называемому «bottling effect») в канавках (рис 9) из-за так называемого IF. Сила зеркального отображения, IF – сила притяжения, создаваемая отрицательным потенциалом проводящих боковых стенок канавки относительно плазмы. Сила притяжения положительно заряженных ионов обратно пропорциональна квадрату расстояния между ионом и этой боковой стенкой. Поэтому ионы, движущиеся относительно близко к боковой стенке, притягиваются с большей силой, что отклоняет ионы в сторону боковой стенки. Это увеличивает область на дне канавки, где будет травиться пассивирующий FC-слой. Как показано на рис 9, этот эффект приводит к локальному расширению где-то вдоль длины канавки, когда энергия ионов неравномерна по глубине. Увеличение мощности смещения увеличивает энергию поля, которое в сочетании с низким давлением процесса приводит к большему смещению траектории ионов в сторону поверхности пластины и делает их менее подверженными влиянию IF. Тогда травление становится более направленным в глубину. В данной работе смещение (CCP_{LF}) варьировалось между 22 Вт и 40 Вт.

Профиль канавки, время цикла и угловое распределение ионов

На рис 6 представлены модели, иллюстрирующие, каким образом размеры scallop и их расположение на бо-



ковой стенке определяют положение следующего scallop в канавке, а следовательно, и угол наклона профиля стенки канавки.

Из схематических изображений на рис 6а, б видно, что уменьшение IAD позволяет получить направленное травление. Как показано на рис 6в, время цикла травления определяет длину и ширину scallop-структур. Сокращение времени цикла травления приводит к уменьшению размеров scallop и формированию положительного сужения, что является необходимым условием для полного заполнения канавок методом LPCVD. В работе использовались времена циклов травления, равные 1,50; 1,75; 2,00; 2,50; 3,00 и 5,00 с. Путём регулировки рабочего давления и мощности смещения на этапе травления были дополнительно скорректированы IAD и энергия ионов для подавления эффектов силы зеркального отображения и образования дефектов в виде «черного кремния» (кремниевых микроглы).

Экспериментальные материалы и методы

Для экспериментов использовались кремниевые пластины диаметром 100 мм, толщиной 525 мкм, р-типа, легированные бором, удельным сопротивлением 5÷10 Ом·см, односторонне полированные.

Слой жесткой маски $t\text{-SiO}_2$ толщиной 1 мкм для DRIE-травления был выращен на поверхности с использованием печи TS6304 производства Amtech Tempres Systems. В жесткой маске был сформирован рисунок канавок шириной 3 мкм (общая загрузка по пластине 1,45 %) при использовании УФ-системы совмещения и экспонирования EVG620 и фоторезиста Olin OiR 907-17 толщиной 1,7 мкм. Фотошаблон был также покрыт 50 нм слоем DuPont™Teflon® для защиты от прилипания фотошаблона к фоторезисту

Т 1

Параметры процесса Bosch-травления

ПАРАМЕТР	ПОДЖИГ (STRIKE UP)	НАЧАЛЬНОЕ ОСАЖДЕНИЕ (PRE-DEPOSITION)	BOSCH-ПРОЦЕСС	
			ОСАЖДЕНИЕ	ТРАВЛЕНИЕ
Температура, °C	25	25	25	25
Давление He_BS, Торр	10	10	10	10
Время, с	5,0	5,0	2,4	3,0
Мощность ICP-генератора, Вт	1500	1500	1300	1600
Мощность генератора смещения (Bias CCR _{HF}), Вт	50	0	0	0
Мощность генератора смещения (Bias CCR _{LF}), Вт	0	0	0	22
Давление процесса, мТорр	20	40	25	40
Поток C ₄ F ₈ , ст. см ³	50	200	200	10
Поток SF ₆ , ст. см ³	0	10	10	200
Поток O ₂ , ст. см ³	50	0	0	0

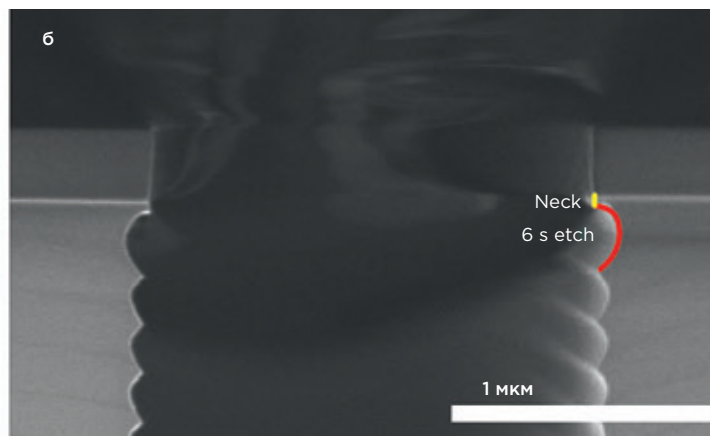
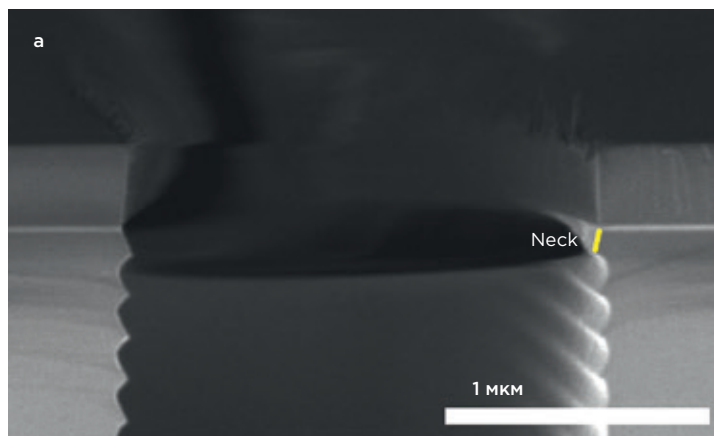
и обеспечения комбинированного использования вакуумного контакта и жесткого контакта, что, в свою очередь, позволило достигнуть профиля наклона маски 88°÷90° без повреждения слоя фоторезиста при контакте. После экспонирования резист был проявлен в проявителе OPD-4262, а жесткая маска была вытравлена путем анизотропного RIE-травления в смеси CHF₃/O₂ в системе Plasma-Therm 790 для формирования профиля ~90° в жесткой маске t-SiO₂, что важно для высококачественного травления HAR-структур. Использовался небольшой перетрав в кремний для обеспечения полного открытия всех канавок (рис 7). Фоторезист был удален с использованием 99 % HNO₃, после чего HAR-канавки были сформированы в ICP-системе для глубокого травления кремния PlasmaPro100 Estrelas от компании Oxford Instruments, оснащенной быстродействующими регуляторами расхода газов (Sensirion SFC4100) и позволяющей травить кремний со скоростью ~1÷2 мкм/мин, с использованием стандартного двухступенчатого Bosch-процесса для HAR-структур в МЭМС. После травления канавок было выполнено in-situ удаление FC-полимера. Оставшийся FC-полимер может привести к снижению адгезии слоя между кремнием и материалом заполнения и, таким образом, повлиять на механическую прочность устройства.

Во время Bosch-процесса температура подложодержателя поддерживалась на уровне 25 °C, давление гелия, подводимого к тыльной стороне пластины для эф-

фективного теплообмена, – на уровне 10 Торр, потоки газов оставались фиксированными (этап травления: SF₆/C₄F₈ 200 ст. см³ / 10 ст. см³; этап осаждения: SF₆/C₄F₈ 10 ст. см³ / 200 ст. см³). Для получения начала однородного травления первого отверстия был необходим дополнительный шаг поджига (Strike Up). Смещение CCR_{LF} было усилено в течение 30 % времени цикла травления для обеспечения удаления FC. Параметры рецепта приведены в Т 1.

Контроль полученных каналов и scallop-структур проводился путем анализа поперечного скола пластины при помощи сканирующей электронной микроскопии (SEM) JEOL JSM-7610F. Полученные структуры контролировались на предмет глубины и ширины канавки, угла наклона боковой стенки, ширины и высоты первых десяти scallop в верхней части канавки (рис 5).

Кроме того, исследовалось влияние параметров scallop и углов наклона профиля боковой стенки на процесс заполнения полученных структур. Заполнение проводилось путем осаждения многослойной структуры, состоящей из 400 нм слоя t-SiO₂, выращенного путем влажного термического окисления при 1150 °C в печи TS6304, и 2 мкм толстого слоя poly-Si с низким внутренним напряжением, осажденного методом LPCVD при 595 °C в печи Omega Junior (Amtech Tempress Systems). Слой t-SiO₂ обеспечивал хороший контраст при последующем SEM-контроле. Температура 1150 °C предотвращала заострения на углах (например, входа в канавку и концов scallop).



10

SEM-изображения входных отверстий, полученные с помощью этапа изотропного травления в течение 6 с: (а) без предварительного удаления FC-полимера после RIE-травления жесткой маски $t\text{-SiO}_2$, (б) с удалением FC-полимера

Достигнутые результаты и обсуждения

Рассмотрим оптимизацию процессов травления входа канавки, травления в глубину и заполнения канавок.

Травление входа канавки

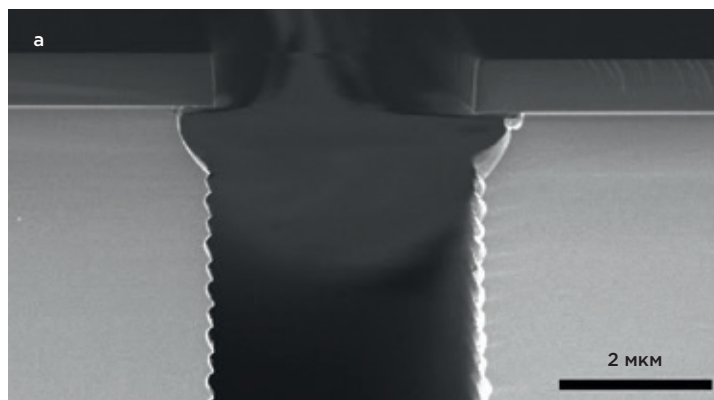
Как обозначено выше, ширина входа должна быть больше остальной ширины канавки и иметь положительный профиль боковых стенок. При этом вход не должен расширяться более чем на 1 мкм с обеих сторон канавки, а глубина не должна быть более 1 мкм.

Первый, наиболее прямолинейный подход к устранению горлышка на рис 7, – это замена этапа предварительного осаждения из Т1 этапом изотропного травления входа. Результат такого подхода показан на рис 10 и 11, время травления составляло 6, 10 и 20 с.

На рис 10а еще видно горлышко после 6-секундного этапа изотропного входного травления. Предполагалось, что оставшийся FC-полимер, образующийся из смеси CHF_3/O_2 -based в процессе RIE-травления жесткой маски $t\text{-SiO}_2$ предотвратит расширение входа. Далее был оптимизирован процесс удаления фоторезистивной

маски для включения шага удаления FC-полимера. После процесса RIE-травления жесткой маски пластины были очищены с использованием 30-минутной обработки в кислородной плазме в системе плазменной очистки TePla 300, жидкостной обработки в течение 2×5 минут в 99 % растворе HNO_3 , далее проведена быстрая отмывка в деионизованной воде, сушка в центрифуге и 30-секундное воздействие в парах фтористого водорода для удаления образованного SiO_x из-за окислительного поведения кислородной плазмы. На рис 10б показано SEM-изображение после 6-секундного входного травления канавки на очищенной пластине после удаления FC-полимера. Отмечен более широкий первый scallop, горлышко было минимизировано, но все еще присутствовало.

Более длительное время (10 и 20 секунд соответственно) для входного травления привело к устранению горлышка, как показано на рис 11а, б. Для обоих процессов FC-полимер был предварительно удален с жесткой маски. На рис 11а видно, что сложно управлять полуизотропной формой прямо под жесткой маской и она несимметрична с двух сторон канавки, что может привести к трудностям при



11

SEM-изображения входных отверстий, полученные с помощью этапа изотропного травления: (а) в течение 10 с, (б) в течение 20 с

Т 2

Параметры последовательностей травления входного отверстия канала

ШАГ	ДАВЛЕНИЕ, МТОРР	ВРЕМЯ ШАГА, С					
		ТЕСТ 1	ТЕСТ 2	ТЕСТ 3	ТЕСТ 4	ТЕСТ 5	ТЕСТ 6
Травление 1	40	5,0	5,0	2,5	2,5	2,5	2,5
Травление 2	100	5,0	2,0	2,0	1,0	2,0	1,5
Осаждение	25	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
Травление 3	40	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Травление 4	100	4,5	4,5	4,5	2,0	1,0	2,0

последующем заполнении канавки. Асимметричная форма была удалена (рис 1.1б) путем использования более длительного этапа изотропного травления. Использование таких входов для заполнения канавок без пустот возможно. Однако это создает довольно обширные бороздки на поверхности при заполнении канавок, как показано на рис 8а.

Для устранения этих ограничений был разработан многостадийный процесс травления входного отверстия канавки. Данный процесс состоит из двух последовательностей, каждая из которых состоит из двух дополнительных этапов травления и этапа осаждения между ними. Первый этап травления выполнялся при 40 мТорр и использовался для очистки области, которая будет вытравливаться, чтобы избежать задержек при последующем травлении при высоком давлении и увеличить однородность травления. Затем второе травление выполнялось при давлении 100 мТорр. При этом давлении химическая составляющая травления является доминирующей, и вытравливается контролируемый полуизотропный профиль входного отверстия. Этап осаждения используется для создания защитного слоя маски для защиты первого изотропного профиля и предотвращает его дополнительное расширение. Два последующих этапа травления при 40 мТорр и 100 мТорр выполняются для создания второго, но меньшего полуизотропного профиля, что приводит к суммарному V-образному профилю входного отверстия канавки. Формы этих двух полуизотропных профилей могут быть отрегулированы путем настройки времени травления всех четырех этапов травления.

На рис 1.2 показаны SEM-изображения оптимизации входного травления канавок. На каждом изображении обозначены времена четырех этапов травления. Начальные времена (рис 1.2 (1)) для этапов травления 1 и 2 (суммарно 10 с) и для этапов 3 и 4 (суммарно 5 с) были выбраны на основе результатов на рис 1.1а и соответствуют эксперименту 1 в Т 2. Далее времена были сокращены для получения оптимальной входной формы.

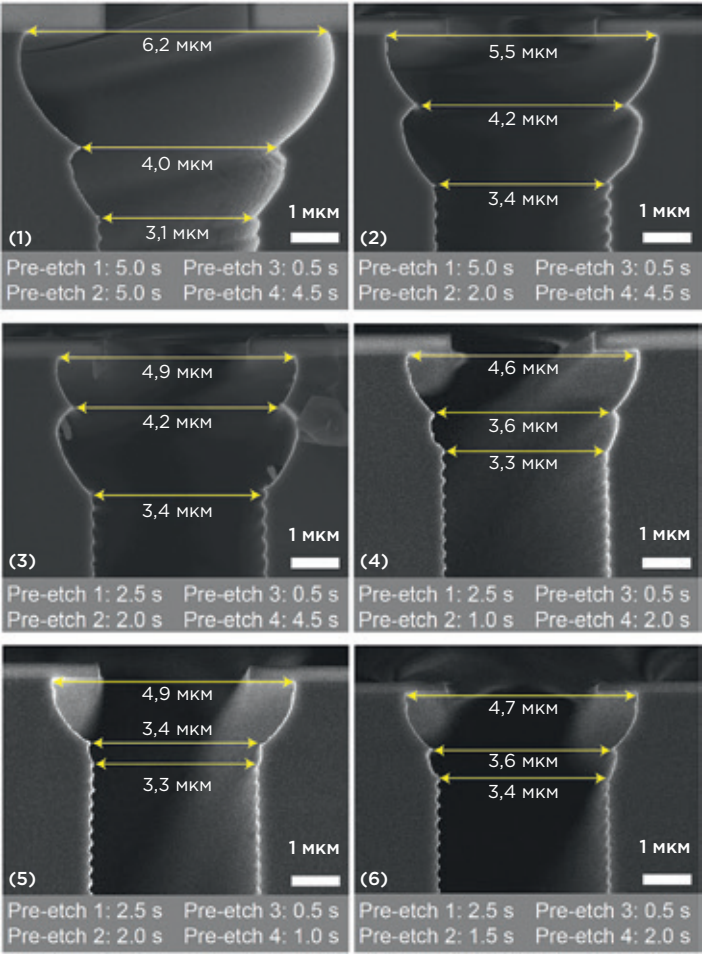
Все остальные параметры травления были такими же, как показано для Bosch-травления в Т 1. Шаг осаждения между этапом 1 (травление 2) и этапом 2 (травление 3) оставался неизменным во всех экспериментах и составлял 2,4 с. Номер на рис 1.2 соответствует номеру эксперимента из Т 2.

На рис 1.2 продемонстрировано, что размеры первых двух scallop могут быть настроены путем изменения времени этапов входного травления, и, следовательно, ширины потрава под жесткую маску. Параметры такой настройки зависят также от рисунка маски (т. е. от эффекта загрузки), что означает, что только один набор параметров может быть использован для одной заданной маски.

Как показано на рис 8, требуемый вход должен иметь положительный профиль, максимальная глубина и ширина не должны быть слишком значительными, так как это приведет к нежелательным бороздкам на поверхности после заполнения. На основе результатов, приведенных на рис 1.2, можно сделать вывод, что последовательности 4, 5 и 6 имеют почти аналогичные результаты. Однако последовательность 6 была использована для оптимального конформного заполнения канавок шириной 3 мкм, так как эта последовательность имела более плавный, но при этом немного более широкий переход от входной области к основной области канала.

Травление HAR-канала

Чтобы продемонстрировать применимость такого подхода травления на основе Bosch-метода для формирования положительно суживающихся каналов и их дальнейшего конформного заполнения, были сформированы каналы шириной 3 мкм и глубиной 15÷20 мкм (аспектное соотношение 5÷6:1) с углом наклона боковой стенки 88°÷89°. Входное отверстие и дальнейшее травление канала на глубину были сформированы в одном процессе. После четвертого этапа травления входного отверстия HAR-травление начиналось с цикла травления Bosch-процесса (Т 3).



1 2
Оптимизация последовательности травления входного отверстия

Т 3
Параметры процесса Bosch-травления с оптимизированными шагами для формирования входного отверстия

ПАРАМЕТР	ПОДЖИГ	ФОРМИРОВАНИЕ ВХОДА				BOSCH-ПРОЦЕСС	
		ТРАВЛЕНИЕ		ОСАЖДЕНИЕ	ТРАВЛЕНИЕ		ОСАЖДЕНИЕ
		1	2		3	4	
Температура, °C	25	25	25	25	25	25	25
Давление He_BS, Торр	10	10	10	10	10	10	10
Время, с	5,0	2,5	1,5	2,4	3,0	2,4	2,4
Мощность ICP, Вт	1500	1600	1600	1300	1600	1300	1600
Мощность CСР _{HF} , Вт	50	0	0	0	0	0	0
Мощность CСР _{LF} , Вт	0	22	22	0	22	0	0
Давление, мТорр	20	40	100	25	40	25	25
Поток C ₄ F ₈ , ст. см ³	50	10	10	200	10	200	200
Поток SF ₆ , ст. см ³	0	200	200	10	200	10	200
Поток O ₂ , ст. см ³	50	0	0	0	0	0	0

Предполагалось, что это создаст плавный переход от входной области к области канала, поэтому дополнительного осаждения FC-полимера не проводилось. Параметры шага полимеризации/осаждения Bosch-цикла оставались одинаковыми на протяжении всех экспериментов. Время цикла, давление процесса и мощность смещения (ССР_{LF}) во время цикла травления изменялись для оценки влияния на ширину и длину scallor и конусность профиля канавки. Полные параметры рецепта и варьируемых параметров приведены в Т 3 и 4.

Рассмотрим, как меняются scallor-структуры при варьировании условий травления

Графики на рис 1 3 а-в показывают результаты зависимости ширины и высоты scallor от мощности смещения (ССР_{LF}) – 22 и 40 Вт, времени цикла травления – 1,5 и 5,0 с и давлений – 16, 30 и 40 мТорр соответственно. На основе этих графиков можно выявить следующие зависимости между высотой и шириной scallor в зависимости от установок параметров:

- 16 мТорр, 22 и 40 Вт, циклы травления 1,5 и 5,0 с (рис 1 3 а):
При времени цикла травления 1,5 с высота scallor составила порядка 100 нм, а при 5,0 с – от 450 до 500 нм. Ширина scallor составила порядка 25÷30 нм и от 60 до 100 нм соответственно. Варьирование мощности смещения CСР_{LF} (22 и 40 Вт) не показало существенной разницы в высоте.

Т 4

Параметры шагов Bosch-травления для HAR-структур

ПАРАМЕТР	ЗНАЧЕНИЕ
A Время, с	1,5; 1,75; 2,0; 2,5; 3,0; 5,0
B Мощность CCP _{LF} , Вт	22; 40
C Давление процесса, мТорр	16; 30; 40

- 30 мТорр, 22 и 40 Вт, циклы травления 1,5 и 5,0 с (рис 1 3 б):

Похожий тренд наблюдался для высоты и ширины scallop при увеличении давления до 30 мТорр. Высота scallop после шага травления 1,5 с составила порядка 125 нм, а для шагов травления 5,0 с – 750 нм. Высота и ширина scallop существенно не зависели от изменения настроек CCP_{LF}. Это указывает на то, что более высокое давление 30 мТорр (или увеличенный химический поток) ответственно за наблюдаемую более высокую скорость травления кремния и увеличение размеров scallop, причем удаление защитного фторуглеродного полимера (FC) не ограничивало этот химический поток.

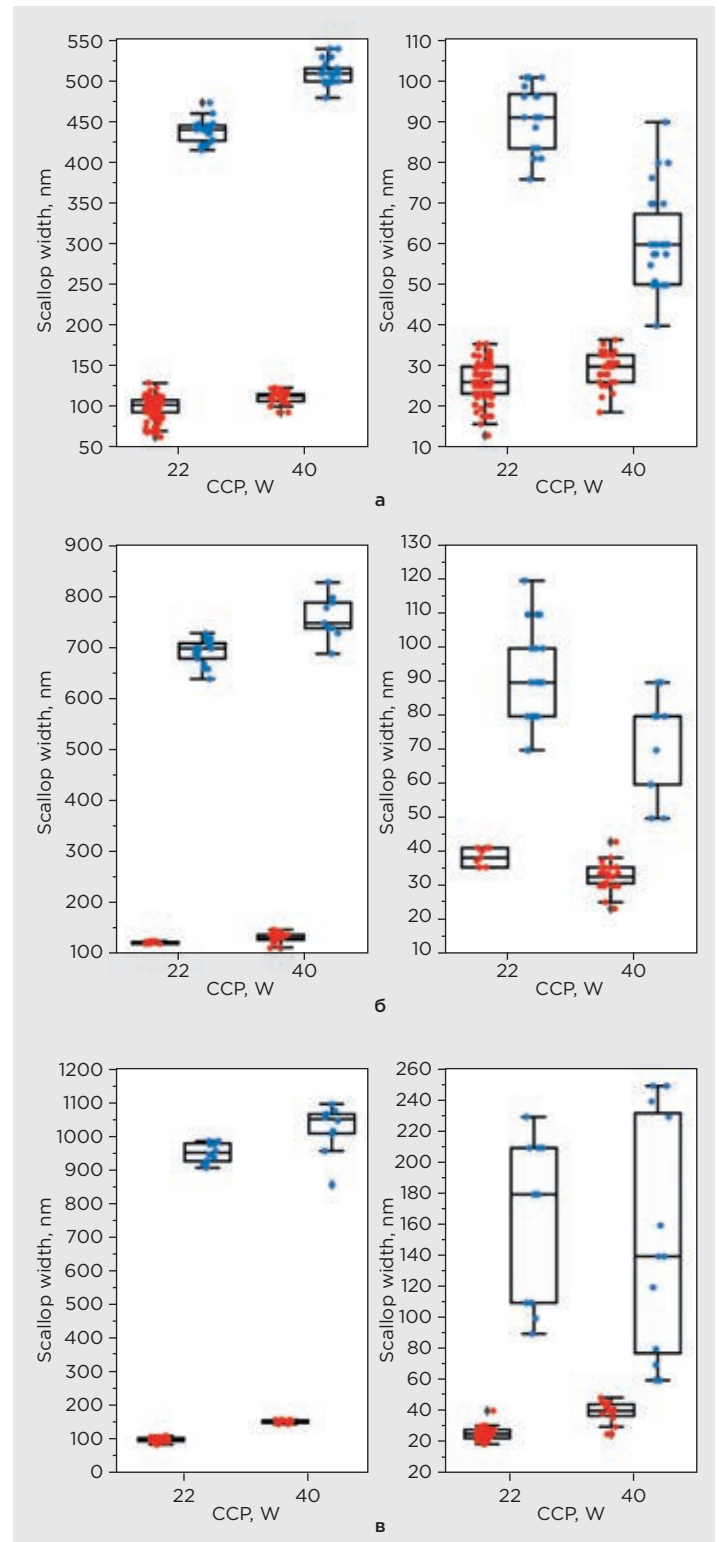
- 40 мТорр, 22 и 40 Вт, циклы травления 1,5 и 5,0 с (рис 1 3 в):

Дальнейшее увеличение давления до 40 мТорр повысило высоту scallop до 950 нм для циклов травления 5,0 с. Ширина в меньшей степени зависела от увеличения давления и составляла для циклов травления 5,0 с порядка 60÷240 нм. Для времени 1,5 с влияние давления было относительно небольшим, что привело к размерам, сопоставимым с полученными при давлениях 16 мТорр и 30 мТорр.

Резкое увеличение высоты scallop для времени циклов травления 5,0 с можно объяснить более высоким потоком химических (фторсодержащих) частиц. Физический (ионный) поток, регулируемый мощностью CCP_{LF} и IAD, не оказывает значительного влияния на высоту scallop как для времени цикла травления 1,5 с, так и для времени 5,0 с. Это говорит о том, что мощности CCP_{LF} в этом Bosch-травлении достаточно для удаления FC-полимера на дне канавки и обеспечения последующего травления scallop, и что мощность ICP-источника и/или поток SF₆ не ограничивают поток химических частиц.

Для циклов травления длиной 1,5 с в размерах scallop не было обнаружено больших различий при различных значениях давления и настройках CCP_{LF}, только время цикла влияло на финальные размеры.

Большие различия в длине и ширине протравленных scallop можно объяснить наличием физического вклада

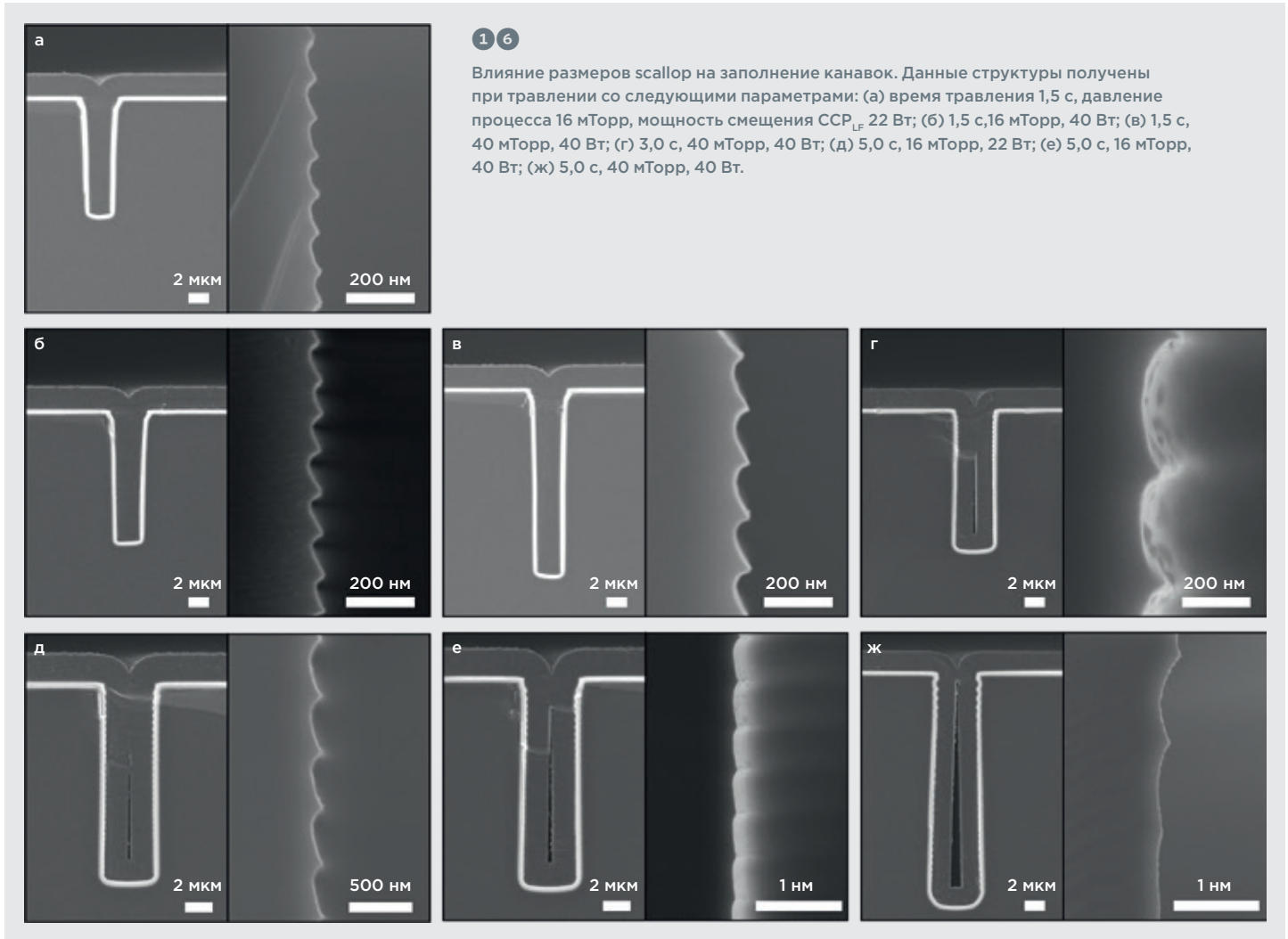


1 3

Зависимость высоты и ширины scallop (нм) от времени цикла травления, рабочего давления и мощности CCP_{LF} (22 и 40 Вт): (а) давление 16 мТорр, (б) давление 30 мТорр, (в) давление 40 мТорр,

■ – цикл травления 1,5 с; ■ – цикл травления 5,0

ионов (смещение CCP_{LF}) на дне канавки во время шагов цикла травления, что усиливало вертикальную направленность химической реакции с кремнием. Даже при более высоких давлениях воздействие потока ионов с более низкой энергией по-прежнему было достаточ-



пор, пока время цикла травления не превышало 2,5 с. При времени цикла травления менее 2,5 с боковые стенки канавки имели желаемое положительное сужение (конусность) от 88,5 до 89,5°. Высота scallop составляла порядка 100 нм, а ширина – порядка 30 нм.

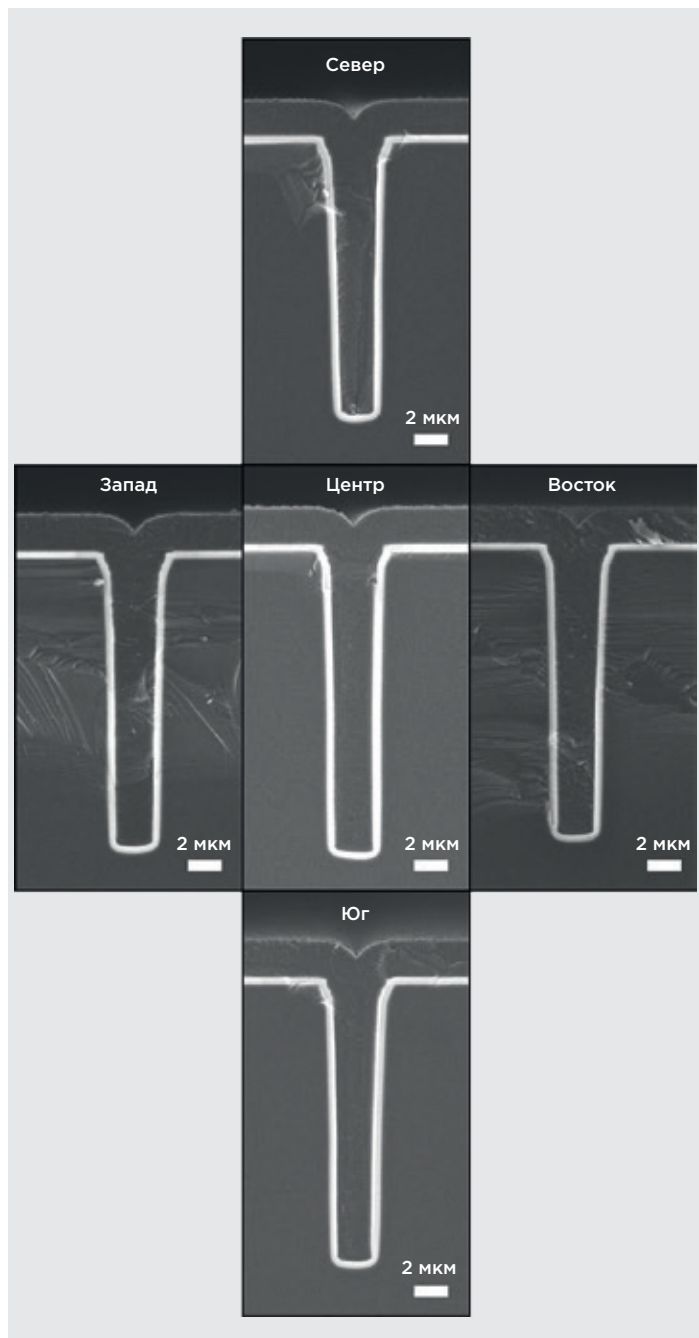
Из графиков на рис 1.5 а-б видно, что рабочее давление и мощность смещения не контролируют размеры scallop в данном рецепте. Для длительного (5,0 с) времени цикла травления наклон боковой стенки становится отрицательным (обратный конус), и на угол наклона не влияли давление и мощность; влиянию давления подвергалась только высота scallop. На рис 1.5 показано, что для времени цикла травления менее 2,5 с профиль боковой стенки канавки становится положительным и не зависит от рабочего давления в данном рецепте для канавок шириной 3 мкм. Это согласуется с результатами, показанными на рис 1.4.

Заполнение HAR-канавки

Канавки шириной 3 мкм и глубиной от 15 до 20 мкм были сформированы в Si-пластинах с ориентацией $\langle 100 \rangle$ с использованием указанных параметров рецепта Bosch-травления для создания различной высоты

scallop и углов наклона боковых стенок. Чтобы продемонстрировать влияние высоты scallop и угла профиля боковой стенки на последующее заполнение, эти канавки были заполнены многослойной структурой, как описано в разделе экспериментальных материалов и методов. Заполненные структуры представлены на рис 1.6 а-ж. На рис 1.6 слева показана полная канавка, протравленная с различными параметрами рецепта травления и заполненная многослойным стеклом из 400 нм t-SiO₂ и 2 мкм poly-Si, а справа – увеличенное изображение scallop до заполнения. Эти scallop структуры также использовались для построения графиков на рис 1.3-1.5.

На основе SEM-изображений на рис 1.6 можно сделать вывод о том, что время цикла травления 1,5 с приводит к относительно малым scallop для используемой маски (т.е. с учетом эффекта загрузки). Такое время цикла травления в сочетании с ограниченным химическим потоком и малым IAD делает профиль боковой стенки канавки вертикально направленным и положительным, как также показано на рис 6 (в). Влияние IF подавляется низким рабочим давлением и электрическим полем, создаваемым $ССР_{LF}$, что придает ионам достаточную



17

SEM-изображения поперечного сечения пластин для контроля однородности заполнения канавок по пластине

энергию для преодоления притяжения IF и обеспечивает удаление FC-полимера на дне канавки.

Увеличение времени цикла травления и давления процесса увеличивает вклад химической составляющей травления. В этом случае как мощность ICP, так и поток SF_6 на этапе травления должны быть достаточными для дизайна маски (эффекта загрузки). Это приводит к образованию более крупных scallop и изменению наклона боковой стенки канавки в сторону отрицательного, поскольку относительно длительное время цикла травления в сочетании с широким IAD позволяет удалить FC-полимер также и в более глубоких частях

scallop до начала этапа травления. Это локализует начальную точку следующей scallop глубже внутри предыдущей и приводит к отрицательному сужению, как проиллюстрировано на рис 6а.

Чтобы продемонстрировать однородность процесса травления и равномерность заполнения канавок по всей пластине, был проведен анализ поперечного скола в пяти точках пластины (центр, север, восток, юг и запад) с отступом от края 1 см. Процесс травления совпадал с параметрами из Т3, где время цикла травления (A) составляло 1,5 с, мощность CCP_{LF} (B) – 40 Вт, а рабочее давление (C) – 40 мТорр. Результаты этого исследования представлены на рис 17. Было достигнуто аспектное соотношение, равное 6.

Дополнительные технические замечания

В ходе работы были отмечено несколько технических аспектов, которые не вошли в основные результаты, но важны для практической реализации.

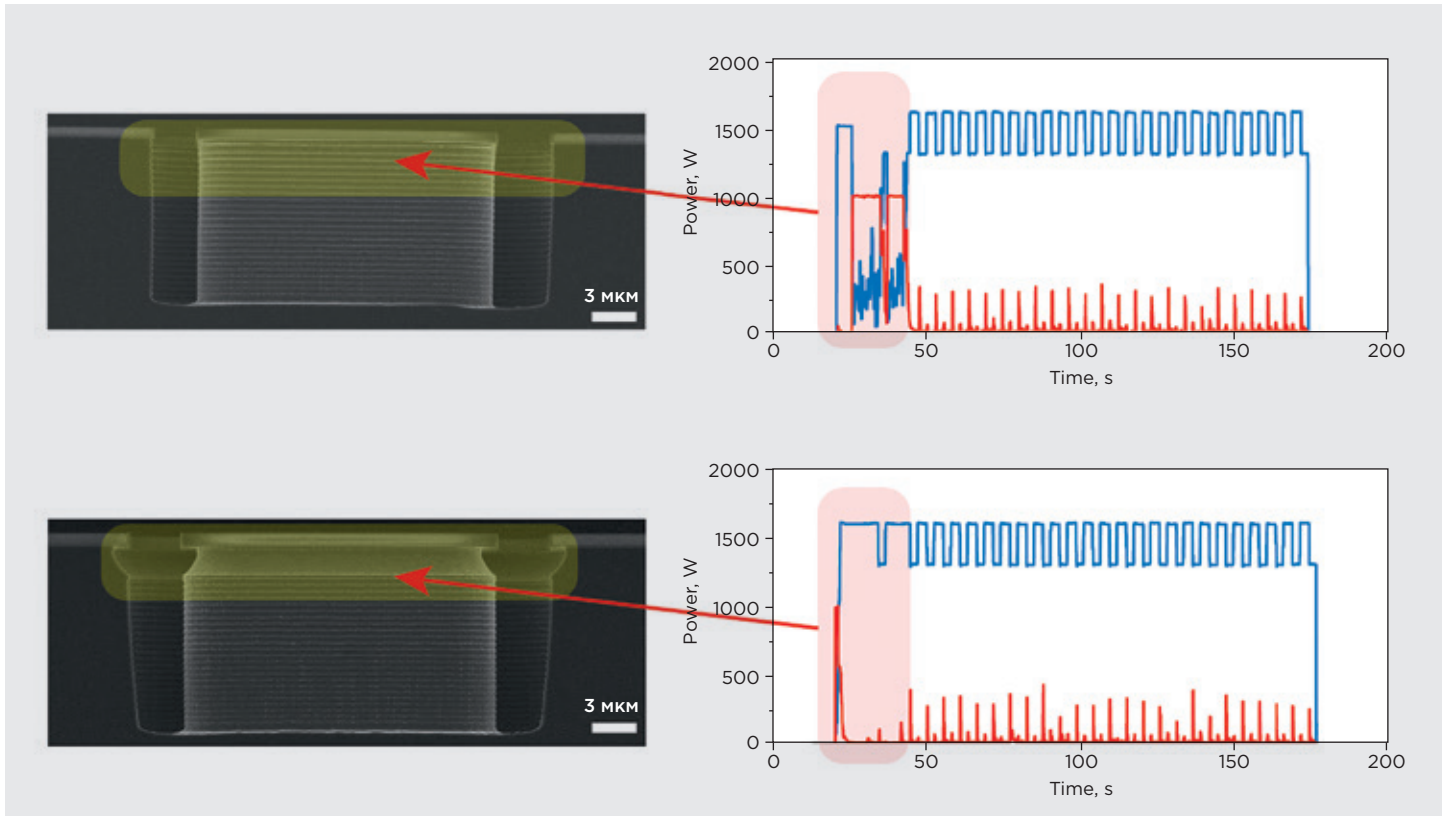
Согласование ICP-источника

В данной работе изучалось формирование scallop на боковой стенке канавки. Эти структуры были созданы с использованием рецепта на основе метода Bosch-травления и могут быть использованы для настройки угла наклона боковой стенки HAR-канавок до требуемых значений от 88 до 89°.

Изменение стандартного двухстадийного рецепта Bosch-травления (Т1) на разработанную последовательность травления входного отверстия и дальнейшее травление канавки (Т3) при первых отработках приводило к невоспроизводимым результатам на этапе травления входного отверстия. Проблему удалось выявить только при изучении журналов работы (log-files) использованной системы DRIE. Автоматический блок согласования ICP-источника испытывал трудности с согласованием импеданса плазмы SF_6 , что приводило к высокой отраженной мощности. Влияние согласования во время шага поджига и перехода к последующим шагам на результат травления показано на рис 18а, б. Данный момент также рекомендуется учитывать и проверять при оптимизации процесса травления HAR-канавок.

Ограничения двухстадийного Bosch-процесса

Стандартный двухстадийный рецепт на основе Bosch-травления может быть применен для корректировки угла профиля боковой стенки. Однако двухстадийная архитектура усложняет настройку рецепта, поскольку в таких рецептах удаление FC-полимера и полуизотропное травление структур scallop выполняются в одном и том же процессе, т. е. в цикле травления. Для лучшего контроля формы и размеров scallop эти два этапа следует разделять и назначать им собственные параметры процесса. Удаление FC-полимера требует других настроек, чем формирование scallop – предпочтительно



1 8

SEM-изображения специальных тестовых структур с соответствующими графиками, отображающими подаваемую и отраженную ICP-мощность во время процесса

Мощность ICP: ■ – подаваемая; ■ – отраженная

выполнять его при низких давлениях для уменьшения IAD и при более высоких мощностях CCP_{LF} для увеличения физического потока ионов и, следовательно, увеличения направленности. Наиболее подходящим для этого процессом на основе Bosch-метода является так называемый процесс DREM. В DREM-процессе удаление FC-полимера реализуется отдельным этапом процесса между циклом осаждения и циклом травления. Это делает DREM идеальным методом для применений, связанных с заполнением HAR-канавок без образования пустот (keyhole). Однако не все системы DRIE оснащены такой архитектурой рецептов, и перенос стандартного двухстадийного процесса на трехстадийный DREM процесс требует некоторой оптимизации.

Еще одним улучшением рецепта для формирования HAR-структур методом DRIE может быть плавное изменение параметров процесса во время травления, как это реализовано в оборудовании для травления компании Surface Technology Systems Ltd. Постепенное изменение параметров позволяет регулировать химический поток (например, изменяя время и давление) во время травления и, следовательно, более точно корректировать scallop. Однако это зависит от программного интерфейса установки. Используемая система PlasmaPro100 Estrelas не имеет такой возможности.

Эффект силы зеркального отображения (IF)

В экспериментах IF-эффекты наблюдались при мощностях $CCP_{LF} < 20$ Вт в сочетании с давлением 30 и 40 мТорр при травлении. Эти результаты исключены из данного исследования, так как приводили к образованию пустот. В финальных сформированных канавках, которые были после заполнены, эффекты IF не встречались, что указывает на достаточность энергии ионов, создаваемой CCP_{LF} .

Постепенное изменение параметров в процессе травления

Последнее замечание можно сделать по поводу схематической модели, представленной на рис 6. В этих схемах не были учтены два эффекта. Во-первых, не учтено возможное влияние IF (рис 9). Во-вторых, с увеличением аспектного соотношения изменяется соотношение химического и физического потоков. Это будет последовательно уменьшать размер scallop, если фиксированный набор параметров процесса используется для всего процесса HAR DRIE. Это изменение размеров scallop, вызванное аспектным соотношением, также не учитывается. Оба эффекта можно было бы преодолеть путем плавного изменения параметров процесса, после чего может быть получен более управляемый Bosch-травления.

Итоги разработки процесса формирования HAR-канавки с ее последующим заполнением без пустот

Подводя итог, можно отметить, что в ходе данной работы последовательно разобраны два ключевых аспекта, необходимых для получения бездефектного заполнения высокоаспектных канавок.

Прежде всего – это правильная форма входного отверстия канавки. Показано, что образование так называемого «горлышка» является следствием двух факторов: перетрава жёсткой маски при формировании рисунка и сама архитектура используемого Bosch-процесса. Используя предложенный многоступенчатый подход, состоящий из двух пар изотропных этапов травления с этапом осаждения между ними, получается суживающаяся входная область, которая устраняет образование пустот при заполнении канавок.

Второе – изменение размеров scallop для управления углом наклона боковой стенки канавки. Было показано, что решающую роль здесь играет высота scallop, которая определяется прежде всего временем цикла травления в Bosch-процессе. Сокращая время шагов, возможно получить мелкие scallop-структуры и положительное сужение стенок, что идеально подходит для достижения полного заполнения многослойной структурой $t\text{-SiO}_2$ и poly-Si .

Важно, что предложенный метод – это комбинированный процесс, который не требует дополнительных

этапов предварительной обработки, связанных с жертвенными слоями, что существенно упрощает технологический маршрут. Метод позволяет выполнять только один процесс для одной маски/топологии (с известным эффектом загрузки), что делает этот подход интересным как для научных применений, так и для производства. С практической точки зрения это означает значительное повышение воспроизводимости и снижение стоимости производства МЭМС-устройств. Устранение внутренних пустот гарантирует высокую механическую прочность изоляционных структур, стабильность электрических характеристик и устойчивость к внешним воздействиям, открывая новые возможности для создания надёжных датчиков и сенсоров следующего поколения. ▢

Использованная литература

1. Henk-Willem Veltkamp; Yves L. Janssens; Meint J. de Boer; Yiyuan Zhao; Remco J. Wiegerink; Niels R. Tas; Joost C. Lötters. Method for Keyhole-Free High-Aspect-Ratio Trench Refill by LPCVD. *Micromachines*, 2021.
2. Zhu, Y.; Yan, G.; Wang, C.; Yang, Z.; Fan, J.; Zhou, J., Wang, Y. Fabrication of Ultra Deep Electrical Isolation Trenches with High Aspect Ratio Using DRIE and Dielectric Refill. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2005.
3. Zhu, Y.; Yan, G.; Fan, J.; Liu, X.; Li, Z.; Wang, Y. Fabrication of keyhole-free ultra-deep high-aspect-ratio isolation trench and its applications. *J. Micromech. Microeng.*, 2005, 15, 636–642.



520

первоклассных
специалистов
в штате

2500

реализованных
комплексных
проектов

25 000

единиц
инсталлированного
оборудования

**Остек-ЭК –
первый
поставщик,
о котором
вы думаете,**



**...когда требуется оборудование
для микроэлектронного производства**

Умеем внедрять технологии независимо от того,
что происходит в современном мире.

Оборудование

- для микросборки и корпусирования;
- для полупроводникового кристалльного производства.



Остек-ЭК

Оборудование и сервис
для микроэлектронных производств

ostec-micro.ru | micro@ostec-group.ru | +7 (495) 788-44-42

Какая частота ОПТИМАЛЬНА для ультразвуковой микросварки проволочных соединений?

Текст: Сергей Воробьев

”

В промышленной практике для ультразвуковой сварки проволочных соединений в настоящее время используются частоты от 40 до 160 кГц, тогда как в экспериментальных целях рассматриваются значения в диапазоне от 25 до 300 кГц. Как правило, разварка толстой алюминиевой проволоки или ленты осуществляется на более низких частотах – от 40 до 80 кГц, в то время как для тонкой алюминиевой или золотой проволоки применяются методы «клин-клин» или «шарик-клин» на частотах от 100 до 140 кГц.

В статье рассмотрены особенности и ограничения различных частотных режимов ультразвуковой микросварки.

Повышенные частоты позволяют сокращать продолжительность сварки и формировать соединения на более чувствительных поверхностях, однако характеризуются более узким окном технологических параметров. В основном это связано с меньшими амплитудами колебаний на конце рабочего инструмента при высоких частотах. Основным преимуществом использования повышенных частот для микросварки является возможность формирования высокого качества соединения при меньшей деформации проволоки, что дополнительно создает более прочную и надежную контактную зону («пятую») соединения.

С другой стороны, для сварки на шероховатых поверхностях предпочтительны более низкие частоты: за счет большей амплитуды колебаний инструмент эффективнее сглаживает микронеровности перед формированием соединения. Однако при этом повышается риск повреждения соединения после его формирования.

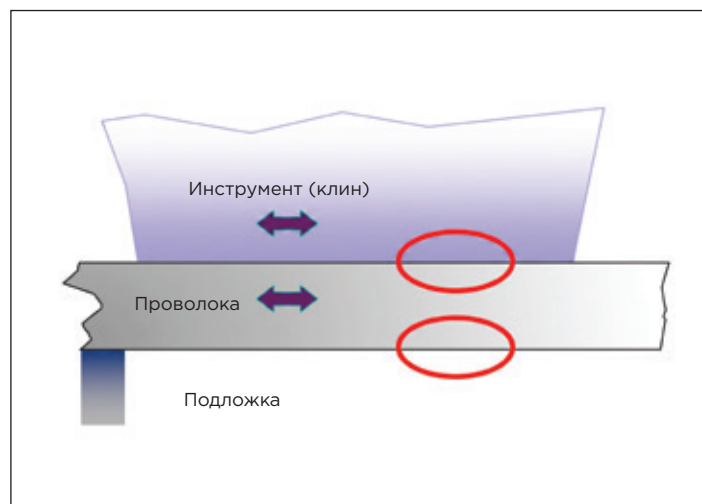
Что происходит в процессе стандартного формирования соединения?

Рассмотрим физические процессы, происходящие на различных стадиях формирования сварного соединения. На рис 1–3 схематично представлены типовые этапы сварки «клин-клин», однако это описание справедливо и для метода «шарик-клин».

После установления контакта рабочего инструмента с проволокой и прижатия ее к поверхности инициируется ультразвуковое (УЗ) воздействие. Амплитуда колебаний составляет от 1 до 2 мкм при сварке тонкой проволокой или примерно 3–5 мкм при сварке толстой проволокой.

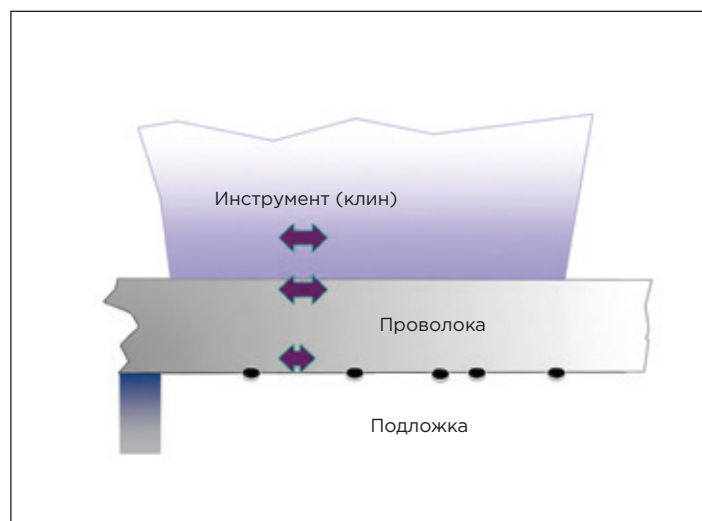
Ключевым аспектом является то, что проволока и инструмент движутся как единое целое, и, следовательно, проволока как бы скребет по поверхности контактной площадки. Для надежной реализации этого процесса сцепление инструмента с проволокой должно быть значительно выше, чем сцепление проволоки с поверхностью площадки после этапа касания. Обычно это обеспечивается матовой поверхностью рабочего инструмента, которая под действием прикладываемого усилия, задаваемого в настройках оборудования, формирует микрорельеф на верхней поверхности проволоки. При разварке золотой проволокой методом «клин-клин» рабочая поверхность инструмента (клина) обычно имеет поперечную канавку для обеспечения лучшего сцепления с проволокой.

В течение первых нескольких миллисекунд УЗ-воздействия проволока совершает микроперемещения относительно контактной площадки, что приводит к удалению загрязнений и поверхностных оксидных слоев. При этом на атомарном уровне



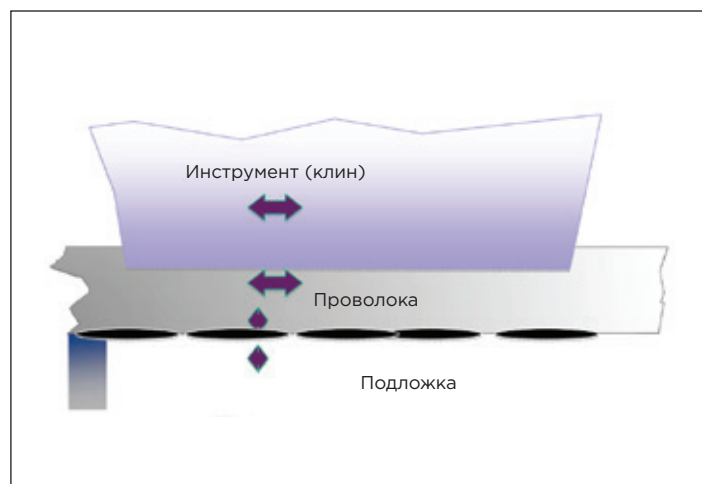
1

Этап 1 – очистка поверхности



2

Этап 2 – образование первых «островков» соединения



3

Этап 3 – формирование полноценного соединения

кристаллические решетки металлов проволоки и площадки обнажаются и начинают контактировать друг с другом.

Если проволока и контактная площадка алюминиевые, то такой механизм очистки работает максимально эффективно. Алюминий всегда покрыт тонким и при этом твердым оксидным слоем. При ультразвуковом воздействии этот слой разрушается, а его микрочастицы выполняют роль абразивного порошка, который помогает очень быстро очистить зону контакта и обеспечить прямой контакт чистых металлических поверхностей. Благодаря малой толщине оксидного слоя общее количество продуктов износа остается незначительным. Описанный механизм является одной из причин возможности микросварки алюминиевой проволокой при комнатной температуре без дополнительной термической активации (в отличие от золотой проволоки).

При непосредственном контакте атомных решеток начинают возникать интерметаллические связи на атомарном уровне, в результате чего образуются небольшие зародыши («островки») соединения (показаны на рис 2 в виде маленьких черных овалов). Эти островки меняют поведение проволоки: она перестает двигаться как жесткое целое, где верхняя и нижняя поверхности движутся синхронно. Напротив, нижняя поверхность становится все более неподвижной, в то время как верхняя поверхность все еще движется: проволока подвергается неупругой деформации и наклепу (возникающие при этом деформационное упрочнение, образование дислокаций и другие эффекты здесь не рассматриваются).

Важно отметить, что движение внутри объема проволоки приводит преимущественно к пластической, а не к упругой деформации, поскольку разница амплитуд примерно в 1 мкм на толщине объема 25–30 мкм (типичный диаметр проволоки) значительно превышает предел упругости алюминия.

На рис 1–3 размеры двойных стрелок пропорциональны значениям результирующей амплитуды на различных границах раздела. По мере формирования все большего количества островков соединения амплитуда на нижней стороне проволоки уменьшается относительно верхней стороны по сравнению с начальным этапом. Амплитуда на верхней стороне проволоки и рабочей поверхности инструмента также уменьшается из-за демпфирующего действия процесса формирования соединения.

По мере продолжения УЗ-воздействия островки соединения становятся все больше (в идеальном случае заполняют всю область контакта между проволокой и контактной площадкой), и, следовательно, относительное движение между нижней стороной проволоки и контактной площадкой пре-

кращается. Фактически, эти поверхности теперь движутся синхронно, и контактная площадка начинает колебаться, хотя и с гораздо меньшей амплитудой, как показано на рис 3.

В ходе процесса увеличения площади соединения инструмент вдавливается в проволоку и деформирует ее, уменьшая высоту и, соответственно, увеличивая ширину. Эта деформация по оси Z отслеживается оборудованием для микросварки (обычно с разрешением по времени) и служит надежным критерием качества – как конечная деформация по истечении запрограммированного времени сварки, так и динамика изменения этого параметра. В современном оборудовании для микросварки кривая деформации обычно используется для управления контуром обратной связи, который уменьшает или увеличивает мощность УЗ-воздействия, если деформация опережает или отстает от запрограммированной стандартной кривой. Такой контроль позволяет автоматически точно настраивать процесс для предотвращения недостаточного или избыточного формирования соединения.

Время сварки обычно программируется таким образом, чтобы УЗ-воздействие продолжалось дольше, чем требуется для полного формирования соединения. Дополнительное время УЗ-воздействия называется периодом «отпуска» («tempering»), в течение которого происходит проработка зоны соединения без дальнейшей вертикальной деформации проволоки.

На рис 3 видно, что колебания на третьем этапе распространяются по всей системе, но с большей амплитудой на инструменте и верхней поверхности проволоки и с меньшей амплитудой на нижней поверхности и контактной площадке. Важно еще раз отметить, что инструмент и поверхность проволоки движутся синхронно, а нижняя поверхность проволоки и контактная площадка также движутся вместе. Градиент амплитуды по сечению проволоки вызывает холодную деформацию (наклеп) объема металла. Это считается критически важным для обеспечения диффузии дислокаций, возникающих при сварке, в более обширную зону границы раздела, что благотворно сказывается на сроке службы соединения.

Заметим, что в статье не упоминались зона плавления на границе раздела, равно как и повышение температуры из-за трения, возникающего между проволокой и контактной площадкой. Действительно, множество исследований было направлено на выявление и количественную оценку повышения температуры на границе раздела во время сварки, но результаты оказались весьма неоднозначными. Попытки найти доказательства существования зон расплава, даже очень малых, на микрошлифах границы раздела были еще менее успешными. Следо-

вательно, можно сделать вывод, что какими бы ни были возможные тепловые эффекты, они, вероятно, очень малы. Интересный факт: алюминиевую проволоку успешно приваривали при температуре жидкого азота – если бы температура имела какое-либо существенное влияние, оно непременно проявилось бы при столь экстремальных условиях.

Поведение материалов при сварке на разных частотах

В ходе предыдущего обсуждения частота УЗ не упоминалась. На практике используются частоты от 40 до 160 кГц с явным преобладанием более низких частот около 60 кГц для сварки толстой проволокой и более высоких частот (100 и 140 кГц) для сварки тонкой проволокой – как для метода «клин-клин», так и для «шарик-клин».

Ранее в отрасли широко обсуждалась возможность микросварки на более высоких частотах – вплоть до 300 кГц. Это считалось перспективным, особенно для сварки золотой проволокой методом «шарик-клин», поскольку предполагалось, что процесс будет возможен при комнатной или близкой к ней температуре. Хотя определенные успехи были достигнуты, главным недостатком оставалась значительно меньшая ширина окна технологических параметров и, следовательно, потери в надежности превышали выигрыш в стоимости. Сегодня эта тема практически не поднимается.

Однако до сих пор обсуждаются преимущества и недостатки различных частот сварки. Начнем с того, что более высокая УЗ-частота, разумеется, сокращает время, необходимое для сварки. Это связано с тем, что для качественного формирования соединения требуется определенное количество колебаний (или трущих движений) – порядка 1000–3000 (при типичном времени сварки 20 мс на частоте 100 кГц). При более высокой УЗ-частоте такое количество трущих движений выполняется за пропорционально меньшее время. Хотя это и оказывает

некоторое влияние на производительность процесса, само время сварки составляет не более половины общего времени цикла, и поэтому его влияние невелико.

Что более важно на практике – на более высокой УЗ-частоте для успешного формирования соединения достаточно меньших амплитуд колебаний. Однако это не означает, что более высокие частоты автоматически генерируют меньшие амплитуды, так как это исключительно вопрос настроек параметров. Кроме того, на более высокой УЗ-частоте скорость движения кончика инструмента (и все связанные с ним движения) будет выше. Рассмотрим эти два аспекта последовательно.

Бóльшие амплитуды движения помогают сглаживать более шероховатые поверхности, но при этом сопряжены с более высоким риском повреждения чувствительных поверхностей. Поэтому контактные площадки с большой шероховатостью (созданные по толсто пленочной технологии) часто лучше планаризируются при воздействии бóльших амплитуд на более низкой УЗ-частоте порядка 60 кГц. С другой стороны, для микросварки к очень тонким, чувствительным или гладким контактными площадкам, таким как металлизация ПАВ-фильтров толщиной всего 40 нм алюминия, предпочтительнее использовать более высокую частоту (например, 140 кГц). Частота 100 кГц является своего рода «золотой серединой», которая хорошо подходит для большинства задач, и большинство промышленных установок для сварки тонкой проволокой поставляются с преобразователями, работающими на данной частоте. При более высоких УЗ-частотах кончик инструмента и все остальные «участники» процесса движутся с более высокой скоростью (при синусоидальных колебаниях максимальная скорость движения пропорциональна частоте).

Большинство свариваемых материалов, включая сварочную проволоку, при высоких УЗ-частотах проявляют свойства, характерные для более твер-

Т 1

Типовые частоты УЗ-колебаний для различных технологий микросварки (в кГц)

МЕТОД	ЧАСТОТА				
	40	60	100	120	140
«Шарик-клин», золотая проволока		+	+++	+	+
«Клин-клин»		+	+++	+	++
Толстая проволока	+	+++	+	++	

Т 2

Рекомендации по частоте УЗ-колебаний в зависимости от задачи

ЗАДАЧА	РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЧАСТОТА
Разварка на мягкие или гибкие подложки	Высокая
Разварка кристаллов, установленных на мягкий клей	Высокая
Разварка на поверхность с большой шероховатостью	Низкая
Разварка на тонкий слой металлизации	Высокая
Разварка на слой металлизации с высокой твердостью	Высокая
Уменьшение диаметра проволоки	Увеличение частоты

дых или жестких материалов на низких частотах. С практической точки зрения это выглядит так, как будто УЗ-колебания проникают в объем материала менее глубоко. Поэтому для мягких базовых материалов, таких как полиимидная (каптоновая) пленка, для микросварки предпочтительна более высокая частота УЗ-колебаний.

То же самое справедливо для некоторых кристаллов датчиков или ПАВ-фильтров, которые, будучи сами по себе твердыми, монтируются на мягкие или очень мягкие силиконовые клеи для обеспечения механической развязки. По общепринятым представлениям разварка на них должна быть невозможна, но при правильной настройке параметров и работе на более высокой частоте процесс микросварки оказывается стабильным и надежным.

С другой стороны, проволока для микросварки обычно ведет себя как более мягкая при низких частотах и, следовательно, легче деформируется и адаптируется к поверхности контактной площадки, что повышает качество соединений при разварке на упомянутые выше шероховатые поверхности толстых пленок. Сложившиеся на практике предпочтения по применяемым частотам УЗ-колебаний при микросварке представлены в Т 1.

Еще одним довольно важным преимуществом более высоких УЗ-частот является то, что при прочих равных условиях качественное соединение достигается уже при меньшей деформации проволоки. Это согласуется с наблюдением, что на более высокой УЗ-частоте проволока ведет себя так, как если бы она была тверже. Соединение с меньшей деформацией всегда предпочтительнее соединения с идентичной прочностью на сдвиг, но большей деформацией, поскольку пята соединения будет менее повреждена, что приводит к превосходным долгосрочным характеристикам и сроку службы. Это также подтверждается наблюдением, что, по крайней мере для алю-

миниевых проволок, значения усилия отрыва при испытании на разрыв (pull-test) уменьшаются с увеличением деформации проволоки.

Однако еще одним общим наблюдением относительно более высоких УЗ-частот является то, что окно технологических параметров обычно уже, чем для более низких частот. Это может проявляться в большей или меньшей степени и должно тщательно сопоставляться с преимуществами. Поэтому рекомендуется по возможности применять оборудование, работающее на разных УЗ-частотах. В Т 2 даны рекомендации по применению тех или иных частот УЗ-колебаний в зависимости от задачи.

В некоторых современных моделях установок микросварки для переключения частоты требуется заменить только УЗ-преобразователь (поскольку преобразователь должен иметь механический резонанс на желаемой частоте и, следовательно, механически отличается от преобразователя, работающего на другой частоте). Применяемые в оборудовании УЗ-генераторы обычно цифровые, что дает возможность свободно задавать нужную частоту. Смена рабочей УЗ-частоты, как правило, может быть достаточно легко выполнена инженером по оборудованию.

В самых общих чертах: следует использовать частоту настолько высокую, насколько это возможно, и настолько низкую, насколько это необходимо. Повышенные частоты позволяют сократить время сварки и выполнять соединения на более чувствительных поверхностях, но характеризуются более узким окном параметров. Шероховатые поверхности часто лучше свариваются на более низких частотах. □

Используемая литература

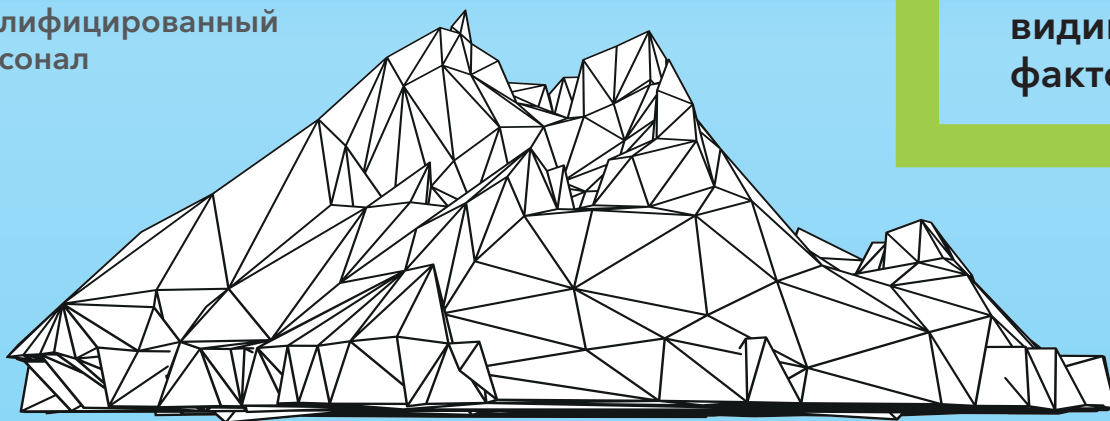
1. Sedlmair J., Farassat F., Schlicht F. Which Frequency Is Best for Wirebonding? // IMAPSource Proceedings, 2011. V. 2011. No. 1. P. 000571–000581.

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

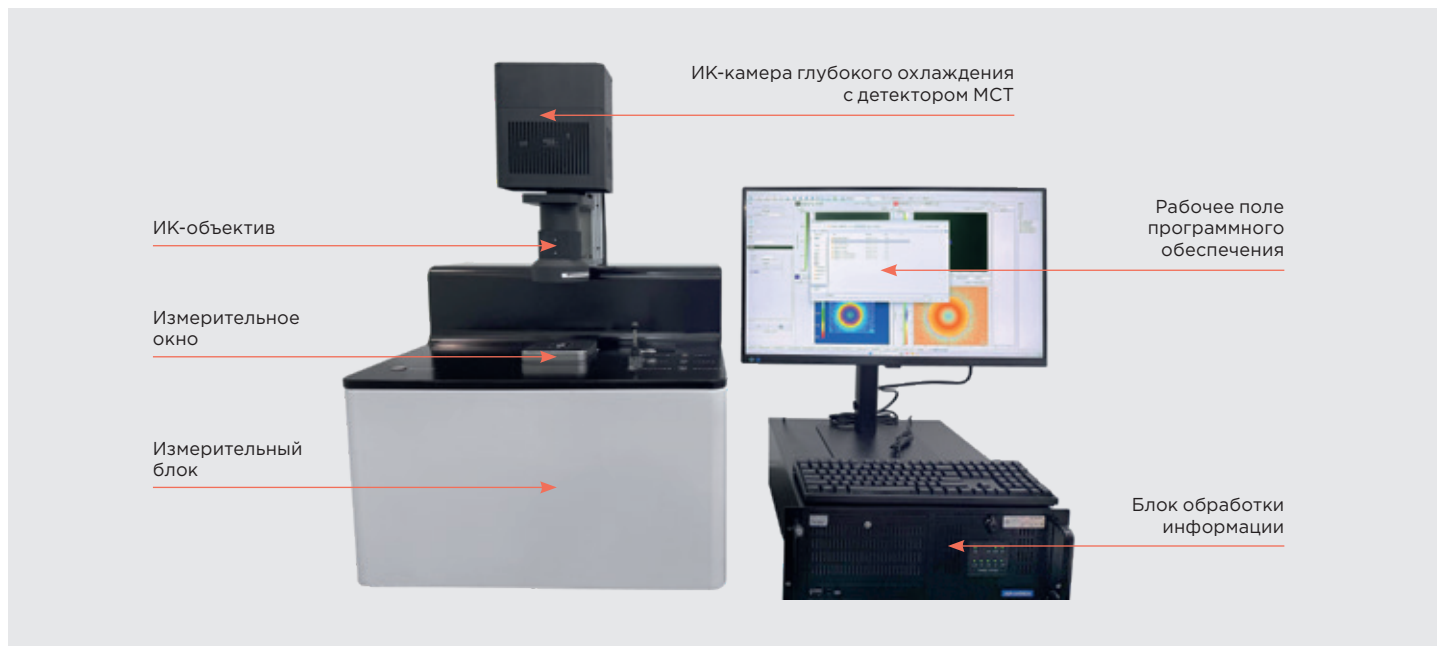
Тепловые горизонты микро- электроники:

технология Heat Flow Scope с Lock-in Thermography

Текст: Сергей Максимов

”

В мире микроэлектроники, где размеры транзисторов исчисляются нанометрами, а быстродействие процессоров упирается в проблему отвода тепла, управление температурой стало одной из главных инженерных задач. Если отводить тепло от работающего чипа недостаточно эффективно, его производительность падает, срок службы сокращается, а в критических случаях устройство просто выходит из строя.



1
Прибор HFS-50 – новая система измерения теплопроводности микронных пленок, общий вид

Но как измерить теплопроводность материала, толщина которого исчисляется микрометрами, а структура может быть анизотропной, то есть проводить тепло по-разному в разных направлениях? Традиционные методы здесь часто бессильны: они либо требуют контакта с образцом, либо дают усреднённое значение, либо просто не обладают достаточной чувствительностью.

Как заглянуть внутрь материала и увидеть, как именно он проводит тепло? Ответ на этот вопрос дает прибор HFS-50 – новая система измерения теплопроводности микронных пленок (рис 1). HFS-50 объединяет лазерное излучение и синхронную тепловизионную визуализацию (Lock-in Thermography), позволяя буквально «увидеть», как тепло распространяется по материалу, и получить количественные данные с беспрецедентной точностью.

Физические основы: от макро- к микромиру

Прежде чем погрузиться в технические детали, вспомним основы. Способность материала проводить тепло описывается двумя взаимосвязанными величинами.

Теплопроводность k (thermal conductivity), измеряется в Вт/(м·К), – это способность материала переносить тепловую энергию при наличии градиента температуры. Она подчиняется закону Фурье:

$$q = -k \nabla T \quad (1)$$

где q – плотность теплового потока (Вт/м²),
а ∇T – градиент температуры.

Чем выше теплопроводность, тем эффективнее материал отводит тепло.

Однако для динамических процессов, таких как распространение теплового импульса, более важна другая характеристика – температуропроводность α (thermal diffusivity), измеряется в м²/с. Она показывает, как быстро тепловой фронт распространяется по материалу, и определяется через теплопроводность, плотность ρ и удельную теплоёмкость c_p :

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (2)$$

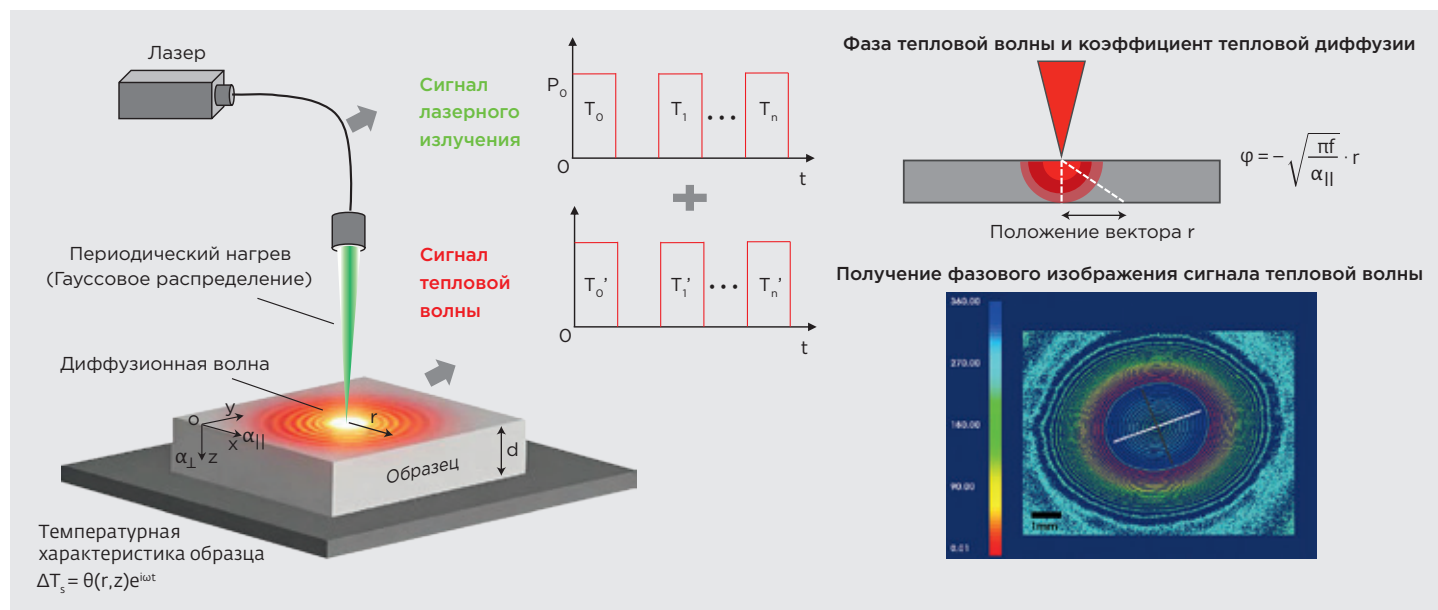
Именно температуропроводность является ключевым параметром, который измеряет прибор HFS-50, позволяя затем рассчитать и теплопроводность, если известны плотность и теплоёмкость материала.

Как работает HFS-50: лазер, камера и математика

В основе системы HFS-50 лежит метод лазерной вспышки (laser flash method) в его самой совершенной форме (рис 2). Этот метод был впервые предложен Паркером с соавторами в 1961 году и с тех пор стал стандартом для измерения температуропроводности твёрдых тел. Классическая идея проста: короткий импульс лазера нагревает лицевую поверхность образца, а инфракрасный детектор измеряет рост температуры на тыльной стороне. По времени, за которое температура достигает половины своего максимального значения ($t_{1/2}$), рассчитывается температуропроводность:

$$\alpha = 0,1388 \cdot \frac{d^2}{t_{1/2}} \quad (3)$$

где d – толщина образца.



2

Схема работы прибора HFS-50

Однако у классического метода есть ограничения. Для тонких пленок (толщиной в несколько микрометров) тепловой сигнал становится чрезвычайно слабым, а тепловые потери в окружающую среду – значительными. Здесь на сцену выходит синхронное детектирование (lock-in thermography) – технология, которая и составляет ядро HFS-50 (рис 3).

Принцип синхронного детектирования

Вместо одиночного импульса HFS-50 использует модулированный лазерный луч: мощность лазера периодически меняется с заданной частотой f . Поверхность образца нагревается и остывает в том же ритме. Инфракрасная камера синхронно с лазером фиксирует объем теплового потока – последовательность кадров, отражающих колебания температуры на поверхности. Далее вступает в действие цифровой lock-in-алгоритм. Он выделяет из сигнала только тот компонент, который меняется с частотой модуляции лазера, и отфильтровывает всё остальное – фоновый шум, тепловые помехи, дрейф температуры. Это позволяет регистрировать температурные изменения, которые в тысячи раз меньше, чем способен различить обычный тепловизор. Согласно спецификациям Nanometric чувствительность HFS-50 после синхронной обработки достигает 0,1 милликельвина, то есть одной десяти-тысячной градуса.

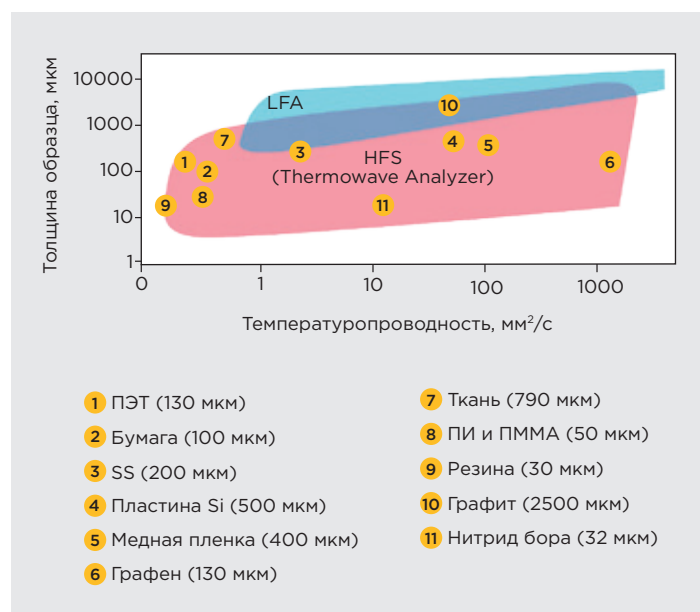
Математика тепловой волны: от амплитуды к диффузии

Как же из измеренного распределения температуры получить численное значение температуропроводности? Здесь требуется немного теории.

Когда модулированный лазерный луч фокусируется на поверхности образца, он генерирует тепловую волну, которая распространяется от точки нагрева. В идеальных условиях (отсутствие тепловых потерь) амплитуда колебаний температуры T и её фаза Ψ зависят от расстояния r до источника нагрева следующим образом:

$$\ln T(r) \propto -r \sqrt{\frac{\pi f}{\alpha}} \quad (4)$$

$$\Psi(r) \propto -r \sqrt{\frac{\pi f}{\alpha}} \quad (5)$$



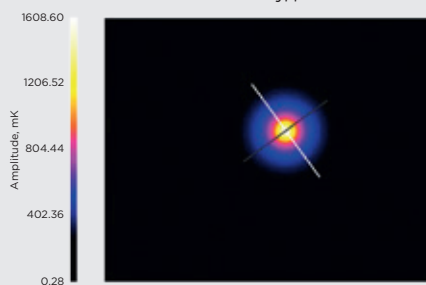
3

Сравнение методов LFA и HSF

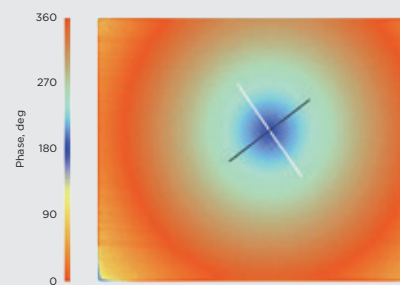
Схема циклического лазерного нагрева образца



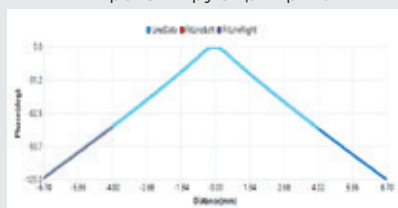
Амплитуда



Фаза



Аппроксимирующая кривая



Основные параметры измерения			
Образец	Монокристаллический кремний	Измерение	600 циклов
Режим работы	Широкоугольный режим съемки/ вакуум/углеродная пленка/ток 4000 мА	Lock-in	2.5 Гц
Мощность лазера	2 Вт	Толщина	400 мкм

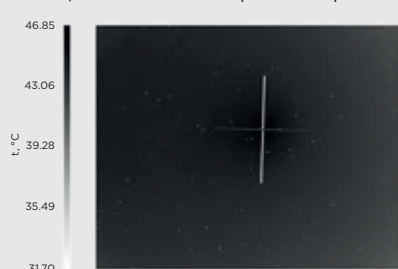
Результат измерения

№	t, °C	F, Гц	Ориентация	Теплопроводность, мм²/с	Точность, мм²/с
1	22(RT)	2.5	Распределение температуры по оси X	80.25	±0.35
2	22(RT)	2.5	Распределение температуры по оси Y	79.85	±1.45

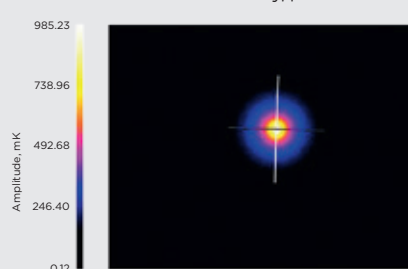
4а

Исследование монокристаллического кремния

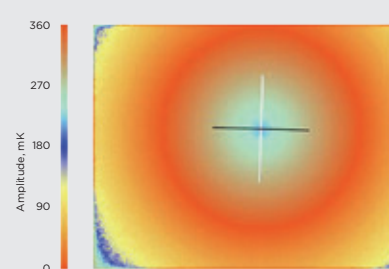
Схема циклического лазерного нагрева образца



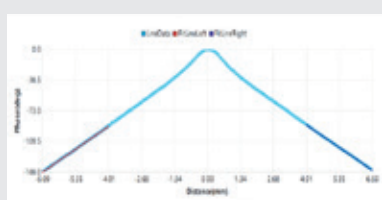
Амплитуда



Фаза



Аппроксимирующая кривая



Основные параметры измерения			
Образец	Медная пластина с алмазным напылением	Измерение	2000 циклов
Режим работы	Широкоугольный режим съемки/ вакуум/углеродная пленка/ток 7500 мА	Lock-in	12.5 Гц
Мощность лазера	2 Вт	Толщина	500 мкм

Результат измерения

№	t, °C	F, Гц	Ориентация	Теплопроводность, мм²/с	Точность, мм²/с
1	22,0	12.5	Распределение температуры по оси X	315	±3
2	22,0	12.5	Распределение температуры по оси Y	231.5	±5.5

4б

Медная пластина с алмазным напылением

Оба параметра – и логарифм амплитуды, и фаза – линейно убывают с расстоянием, причём одинаковый наклон этой зависимости определяется как:

$$m = \sqrt{\frac{\pi f}{\alpha}} \quad (6)$$

Отсюда температуропроводность выражается через измеренный наклон m :

$$\alpha = \sqrt{\frac{\pi f}{m^2}} \quad (7)$$

Этот подход, известный как «метод наклона» (slope method), является одним из ключевых алгоритмов, реализованных в программном обеспечении прибора HFS-50.

Однако как показывают исследования, для тонких пленок линейность амплитуды и фазы нарушается из-за тепловых потерь в окружающий воздух. Именно поэтому система HFS-50 проводит измерения в вакуумной камере, обеспечивая высокую точность измерений.

Поверхностная температура тонкой пластины толщиной L в отсутствие потерь описывается выражением:

$$T(r) = \frac{P}{4\pi K L} K_0(qr) \quad (8)$$

где P – мощность лазерного луча, K – теплопроводность, $q = \sqrt{i\omega/\alpha}$ – волновой вектор тепловой волны ($\omega = 2\pi f$), а K_0 – функция Кельвина (модифицированная функция Бесселя второго рода нулевого порядка).

Эта формула лежит в основе математической модели, которая позволяет прибору HFS-50 не просто измерять температуропроводность, но и строить подробные тепловые карты распределения.

От цифр к изображениям: визуализация теплового потока

Главное преимущество системы HFS-50 перед традиционными методами – наглядность. Результатом измерения является не одно число, а полноценная тепловая карта поверхности образца, на которой отображены:

- амплитудное распределение – показывает, насколько сильно нагревается каждый участок поверхности;
- фазовое распределение – показывает, с какой задержкой тепловая волна достигает каждой точки.

Анализируя эти карты, можно определить анизотропию теплопроводности, то есть выявить направления, вдоль которых тепло распространяется быстрее или медленнее. Это критически важно для композитных материалов, например, на основе гексагонального нитрида бора, используемых в

качестве термоинтерфейсов (TIM). В одном направлении такой материал может проводить тепло в разы эффективнее, чем в перпендикулярном, и система HFS-50 позволяет это увидеть буквально на одном изображении.

Программное обеспечение прибора автоматически строит графики аппроксимации, выделяет оси лёгкой и трудной теплопроводности и рассчитывает коэффициенты диффузии как в плоскости пленки (in-plane), так и перпендикулярно ей (through-plane).

Ключевые технические характеристики:

- диапазон температур: от RT до 300° C;
- чувствительность после синхронной обработки: до 0,1 мК (милликельвина);
- источник излучения: лазер, 532 нм, 1 Вт;
- размер фокусированного пятна: 200 мкм;
- измеряемый параметр: температуропроводность микронных пленок;
- диапазон коэффициента температуропроводности: 0,1 – 120 мм²/с;
- толщина образца: 10 – 1500 мкм;
- условия измерения: вакуумная камера для исключения тепловых потерь;
- время измерения: несколько минут;
- тип измерения: бесконтактный, неразрушающий;
- выходные данные: тепловые карты (амплитуда и фаза), графики аппроксимации, численные значения коэффициентов диффузии.

Область применения

Система HFS-50 находит применение везде, где требуется точная и наглядная характеристика тепловых свойств тонких материалов (рис 4а, 4б):

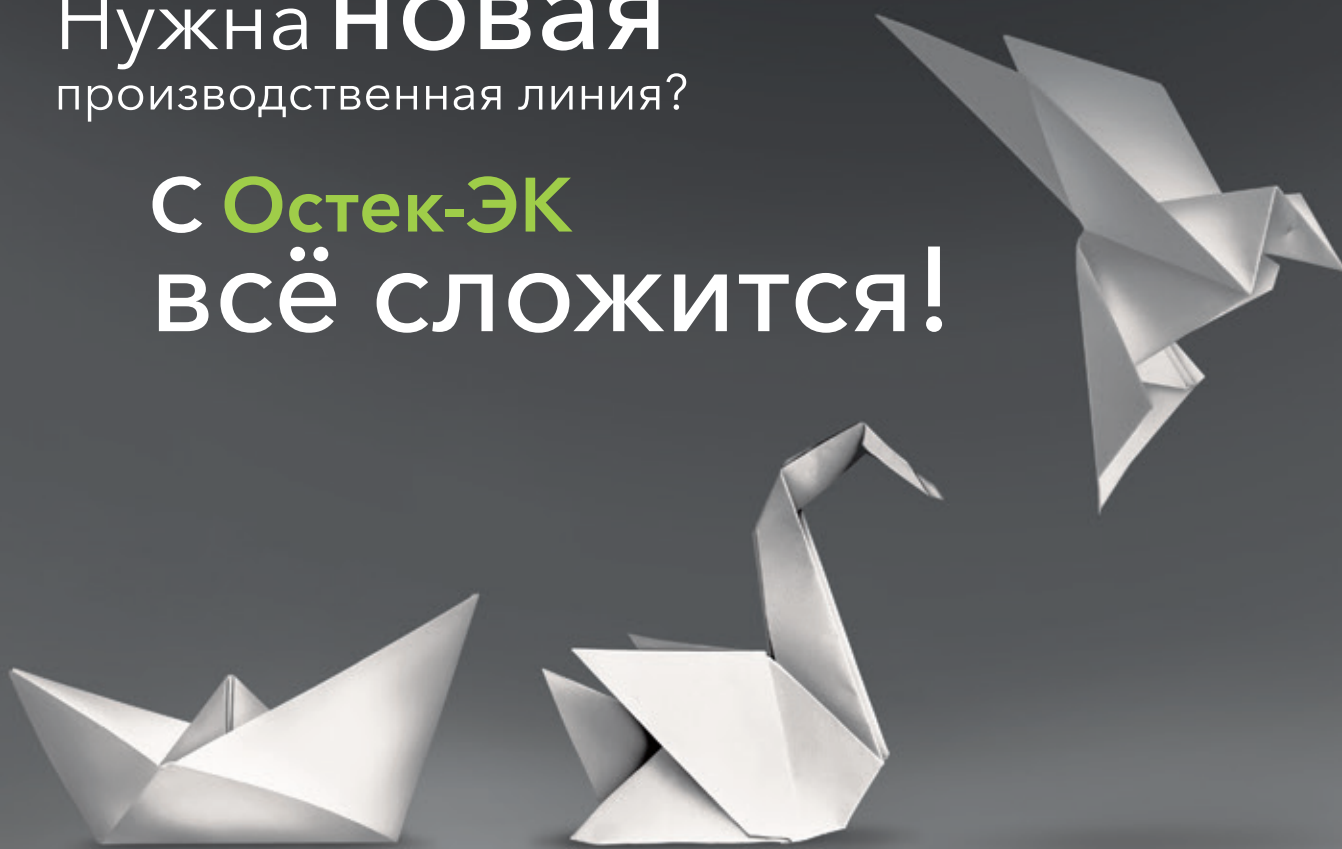
- производство полупроводников – контроль теплопроводности тонких плёнок и подложек;
- силовая электроника – измерение свойств термоинтерфейсных материалов (TIM) для отвода тепла от мощных IGBT- и GaN-транзисторов;
- светодиодная техника – оптимизация теплоотвода от чипов LED;
- научные исследования – изучение новых композитных и наноструктурированных материалов с уникальными тепловыми свойствами.

Закключение: взгляд в будущее

Система HFS-50 от Nanometric – это пример того, как сочетание передовой физики (лазерная вспышка + lock-in-детектирование), точного приборостроения (высокочувствительная ИК-камера + вакуумная камера) и интеллектуального ПО (автоматический анализ тепловых карт) решает конкретную и острую проблему микроэлектроники. Прибор позволяет не просто измерить теплопроводность, а увидеть тепловой поток, понять его структуру и анизотропию, ускоряя разработку более эффективных и надёжных систем охлаждения. ▢

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 установленного
оборудования

>60
сервисных инженеров,
опыт ведущих
инженеров - 20 лет

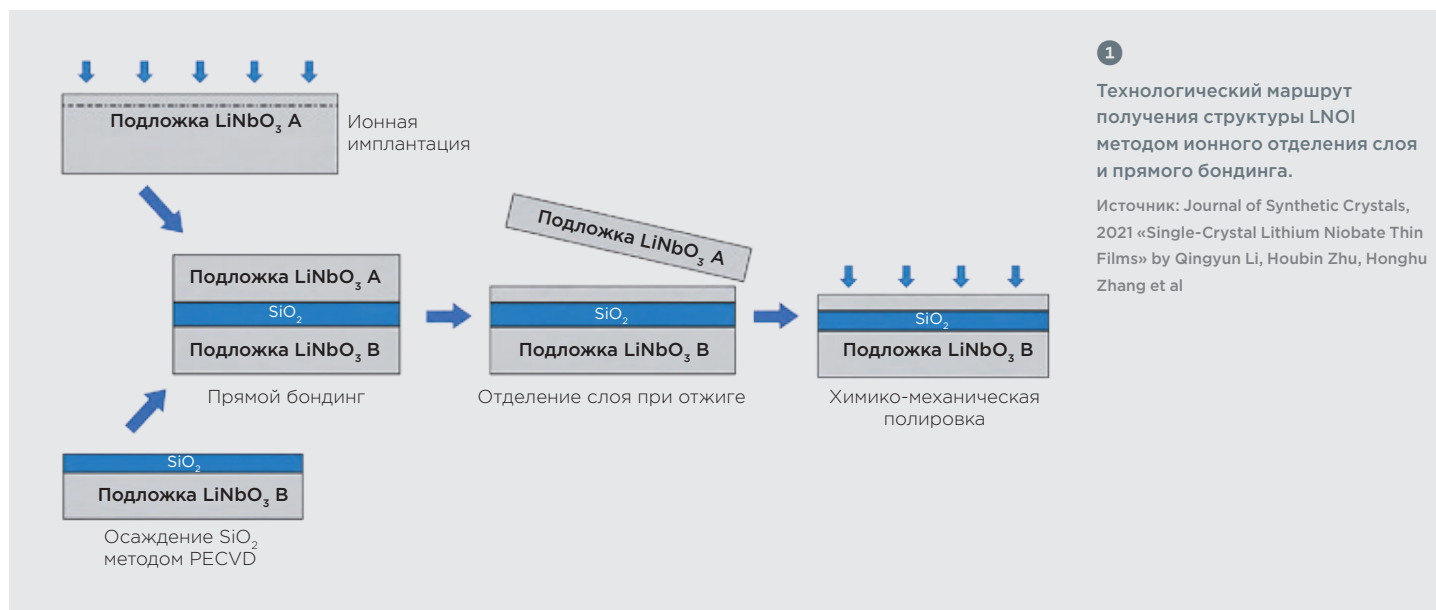
Ниобат лития на изоляторе:

технологическая платформа для фотонных устройств

Текст: Артём Белых

”

Переход от объёмного LiNbO_3 к тонкой монокристаллической плёнке на изолирующем слое позволил уменьшить размеры волноводных элементов и реализовать на одной платформе устройства различного назначения. Платформа «ниобат лития на изоляторе» объединяет пассивные элементы, электрооптические модуляторы, нелинейно-оптические и акустооптические устройства в составе многофункциональных фотонных интегральных схем.



Первые фотонные устройства на основе ниобата лития изготавливали с использованием объёмных кристаллов LiNbO_3 , сочетавших электрооптические, акустооптические и нелинейно-оптические свойства. Такие устройства получили широкое применение в модуляторах, фильтрах и преобразователях частоты, однако слабая локализация оптического поля ограничивала их миниатюризацию. Переход к тонкой монокристаллической плёнке LiNbO_3 на изолирующем слое привёл к созданию структур «ниобат лития на изоляторе» (lithium niobate on insulator, LNOI), ставших основой компактных волноводных устройств.

Получение самой плёнки было только первым шагом. Дальнейшее развитие платформы потребовало увеличения диаметра пластин, повышения однородности и воспроизводимости структур, масштабирования группового изготовления и интеграции LiNbO_3 с кремниевыми и нитрид-кремниевыми фотонными структурами. Решение этих задач обеспечило переход от получения отдельных тонких плёнок к воспроизводимому изготовлению и интеграции функциональных фотонных устройств.

Развитие технологии LNOI

До появления LNOI волноводы формировали в приповерхностной области объёмного LiNbO_3 диффузией титана, протонным обменом или ионной имплантацией. Контраст показателей преломления между волноводной областью и основным объёмом материала оставался сравнительно низким. Поэтому оптическое поле удерживалось в области толщиной порядка 10 мкм, а волноводы требовали больших радиусов изгиба, что ограничивало миниатюризацию фотонных схем.

В структурах LNOI тонкая плёнка LiNbO_3 располагается на изолирующем слое с более низким показателем преломления. Высокий контраст на границе материалов обеспечивает сильную локализацию оптической моды и позволяет формировать волноводы с субмикронными размерами поперечного сечения. Для получения тонкой плёнки

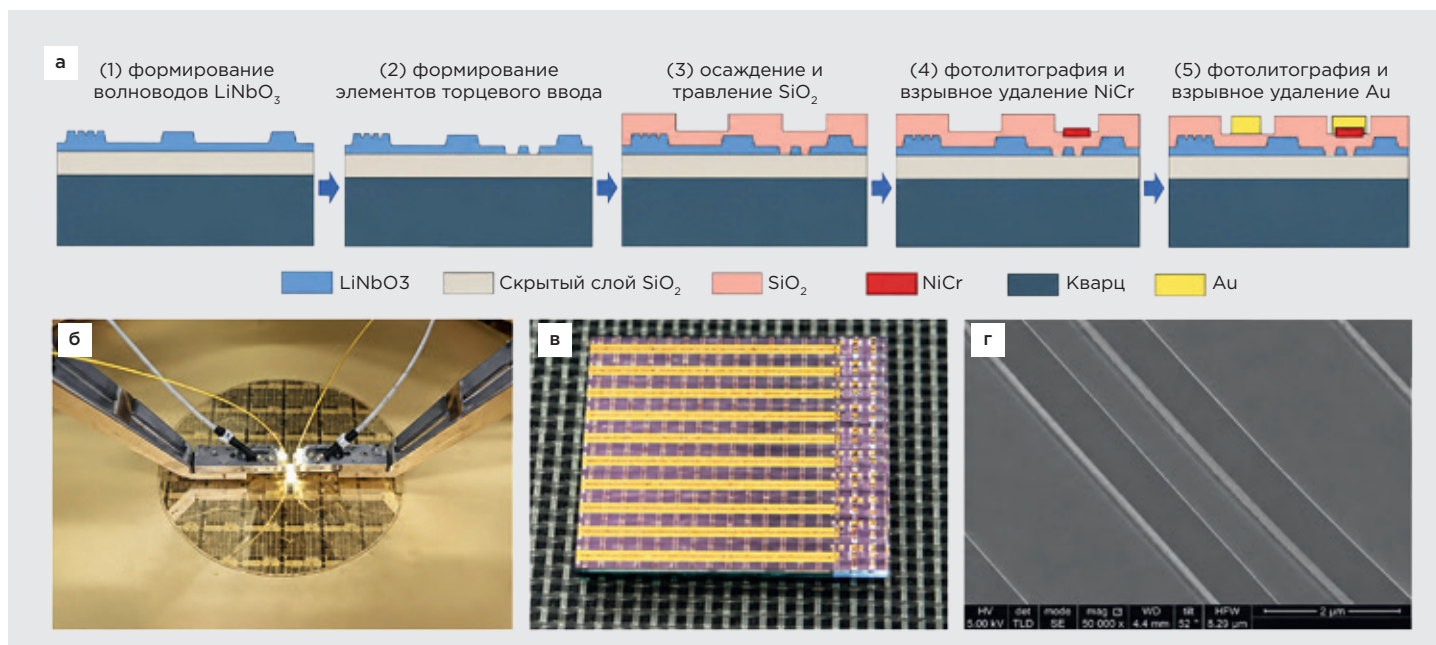
с характеристиками, близкими к объёмному LiNbO_3 , слой отделяли от монокристаллической донорной пластины и переносили на другую подложку.

Технологической основой такого переноса стала последовательность операций, известная как Smart Cut. Технология отделения монокристаллического слоя LiNbO_3 после ионной имплантации появилась в конце 1990-х годов. В 2000-х были получены субмикронные плёнки с характеристиками, близкими к объёмному материалу, включая структуры с чередованием доменов противоположной поляризации.

Ранние варианты переноса плёнки предусматривали применение полимерного адгезионного слоя, однако его температурная стойкость ограничивала отжиг после ионной имплантации. Переход к промежуточному слою SiO_2 и прямому бондингу позволил проводить высокотемпературный отжиг, необходимый для восстановления кристаллической решётки.

Технологический маршрут (схематично представлен на рис 1) включает ионную имплантацию, прямой бондинг, термообработку и химико-механическую полировку. В приповерхностный слой донорной пластины имплантируют ионы гелия, а вторую пластину покрывают слоем SiO_2 и полируют. Подготовленные поверхности соединяют при комнатной температуре. Во время отжига имплантированные ионы образуют газовые скопления и микрополости, объединение которых приводит к отделению тонкого слоя LiNbO_3 . Последующий отжиг восстанавливает повреждённую при имплантации кристаллическую решётку, а химико-механическая полировка удаляет приповерхностный повреждённый слой и снижает шероховатость плёнки.

В одной из реализаций этот маршрут применили для получения 100-мм структур LNOI на кремниевой подложке. Исследования подтвердили чёткую границу между LiNbO_3 и SiO_2 и высокую степень кристаллического совершенства плёнки. После полировки шероховатость составляла менее 0,5 нм, погрешность контроля тол-



2

Групповой технологический процесс изготовления волноводов и электрооптических модуляторов на 100-мм пластине LNOI: а) последовательность операций; б) измерение параметров изделий на пластине; в) сформированный кристалл; г) СЭМ-изображение волноводов

Источник: Light: Advanced Manufacturing, 2025 «Volume Manufacturing of Thin-Film Lithium Niobate Modulators with Bandwidth > 110 GHz Based on 4-Inch Wafer with a Quartz Handle» by Yang Liu, Zihan Zhou, Peiqi Zhou et al

щины – менее 20 нм, а её неравномерность по площади пластины – менее 5 %. Эти результаты показали возможность воспроизводимого формирования структур по всей площади пластины.

При изготовлении пластин LNOI диаметром 150 мм использовали плёнку LiNbO_3 X-среза толщиной около 600 нм на слое SiO_2 и кремниевой подложке. При этом удалось сохранить высокую степень кристаллического совершенства плёнки. Пластины большего диаметра позволяют использовать высокоточное промышленное фотолитографическое оборудование и создают предпосылки для серийного изготовления устройств.

Волноводные элементы и электрооптические модуляторы на платформе LNOI

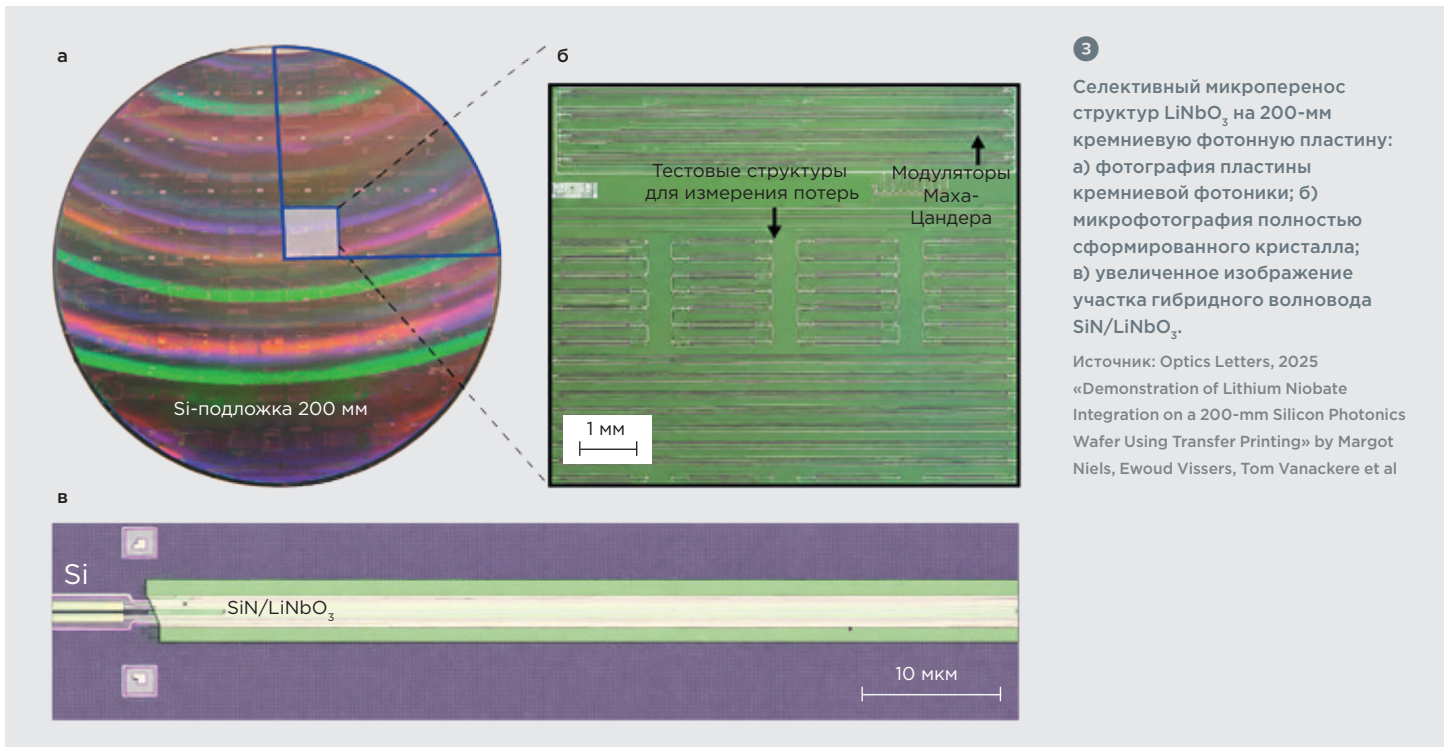
Волноводы составляют основу фотонной интегральной схемы – они направляют оптический сигнал и связывают её функциональные элементы. Высокий контраст показателей преломления в структурах LNOI обеспечивает сильную локализацию оптической моды, позволяя уменьшать поперечные размеры волноводов и радиусы их изгиба. На единой волноводной основе формируют пассивные маршрутизирующие элементы, резонаторы, электрооптические модуляторы, нелинейно-оптические и акустооптические секции. Волноводы LNOI получают протонным обменом, формированием нагружающей полосы либо непосредственным структурированием слоя LiNbO_3 – плазменным травлением или химико-механической полировкой. Непосредственное структурирование

позволяет формировать волноводы с сильной локализацией оптической моды и низкими потерями при распространении.

Помимо прямых и изогнутых участков, пассивная часть схемы включает делители, фильтры, элементы ввода-вывода и резонаторы. Для сопряжения с оптическим волокном применяют решёточные элементы и торцевые преобразователи размера моды. Решёточный ввод удобен для контроля устройств непосредственно на пластине, однако его эффективность зависит от поляризации. При торцевом сопряжении потери снижают согласованием модовых полей волновода и волокна. Микрокольцевые и микродисковые резонаторы обеспечивают частотную селекцию и усиливают электрооптическое, нелинейно-оптическое и акустооптическое взаимодействия.

Функциональные возможности волноводной схемы расширяют электрооптические модуляторы, в которых электрическое поле изменяет оптические свойства LiNbO_3 . К основным типам относятся фазовые модуляторы, модуляторы Маха-Цендера и резонаторные модуляторы.

Высокочастотные модуляторы на основе тонкоплёночного LiNbO_3 преимущественно изготавливали электронно-лучевой литографией, производительность которой ограничивала групповое изготовление. Переход к проекционной фотолитографии позволил в рамках одного процесса формировать на пластине волноводы, элементы ввода-вывода, тестовые структуры и модуляторы. В одной из реализаций использовали 100-мм пластину с тонкой плёнкой LiNbO_3 X-среза на кварцевой подложке. Низкие диэлектрические потери кварца уменьшали затухание



СВЧ-сигнала, а сегментированные электроды бегущей волны обеспечивали согласование скоростей оптического и СВЧ-сигналов. Полученные модуляторы имели полосу более 110 ГГц и полуволновое напряжение менее 3 В. Выход годных устройств составил 50 %, а после корпусирования полоса сохранялась на уровне 95 ГГц. Последовательность операций и результаты группового изготовления волноводов и электрооптических модуляторов на 100-мм пластине LNOI представлены на рис 2.

Интеграция LiNbO_3 с кремниевой фотоникой

Однако сама платформа LNOI не обеспечивает всех функций, необходимых фотонной интегральной схеме. Ниобат лития химически стоек и плохо поддаётся травлению, а его диэлектрические свойства затрудняют создание источников излучения с электрической накачкой и фотодетекторов. Эти ограничения компенсирует гетерогенная интеграция с кремнием и нитридом кремния. Кремниевые и нитрид-кремниевые структуры выполняют ввод, маршрутизацию, разделение и фильтрацию оптического сигнала, а участки LiNbO_3 обеспечивают электрооптическую модуляцию и нелинейно-оптическое преобразование.

При сплошном бондинге слой LiNbO_3 объединяется с кремниевой фотонной схемой по всей площади пластины. Такая архитектура обеспечивает переход оптической моды между кремниевыми волноводами и участками LiNbO_3 , позволяя распределить функции схемы между двумя материалами. Вместе с тем LiNbO_3 приходится размещать и в областях, где его функциональные свойства не используются, а сам материал – включать в основной технологический процесс кремниевой фотоники.

Более гибкую архитектуру обеспечивает селективный микроперенос участков тонкоплёночного LiNbO_3 . Пассивную схему предварительно изготавливают на 200-мм пластине Si/SiN, после чего участки LiNbO_3 переносят только в активные секции. В одной из реализаций селективного микропереноса был изготовлен гибридный модулятор Маха-Цандера, в котором кремниевые и нитрид-кремниевые структуры обеспечивали ввод и маршрутизацию сигнала, а секции SiN/LiNbO_3 – электрооптическую модуляцию. Для устройства длиной 7 мм были получены полуволновое напряжение 4 В и полоса более 70 ГГц. Пластина после селективного микропереноса, полностью сформированный кристалл и участок гибридного волновода SiN/LiNbO_3 показаны на рис 3.

В той же работе на промышленную 200-мм кремниевую пластину перенесли более 200 структур LiNbO_3 . Выход годных составил 99 %, а точность совмещения – около 1 мкм. Эти результаты продемонстрировали возможность параллельного переноса электрооптических секций LiNbO_3 на заранее изготовленную пассивную кремниевую схему без изменения её основного технологического маршрута.

Нелинейно-оптические устройства: контроль рабочей длины волны

Нелинейно-оптические устройства преобразуют частоту оптического излучения и позволяют получать новые спектральные составляющие. В тонкоплёночном LiNbO_3 нелинейный отклик второго порядка лежит в основе генерации второй гармоники, суммарной и разностной частот, а также спонтанного параметрического преобразования с понижением частоты. Для повышения эффективности преобразования в волноводах формируют пространствен-

ное чередование доменов с противоположными направлениями поляризации. Оно периодически изменяет знак нелинейного коэффициента и тем самым компенсирует фазовое рассогласование взаимодействующих оптических волн.

Для таких устройств принципиальны эффективность преобразования и точность задания рабочей длины волны. Она определяется толщиной плёнки, шириной волновода, глубиной травления и шагом чередования доменов. При групповом изготовлении технологические отклонения этих параметров могут смещать рабочую длину волны от заданного значения. Если доменную структуру формируют до травления волновода, шаг чередования доменов рассчитывают по номинальным размерам. Более точный подход предусматривает сначала изготовление волновода и контроль его фактической геометрии, после чего рассчитывают шаг чередования доменов и формируют доменную структуру.

В одной из работ толщину плёнки и глубину травления контролировали методом эллипсометрии, а геометрию волновода уточняли с помощью атомно-силовой микроскопии. Полученные данные вместе с результатами измерений тестовых структур использовали для калибровки расчётной модели. Учёт фактической геометрии и калибровка расчётной модели позволили получить 73 % устройств с рабочей длиной волны в диапазоне ± 5 нм относительно целевого значения. Последующая термооптическая подстройка увеличила эту долю до 96 %. Ограничением такого порядка операций оставалась неполная инверсия доменов в гребне волновода при некоторых конфигурациях электродов.

Акустооптические устройства на платформе LNOI и бриллюэновская фотоника

В акустооптических устройствах акустическая волна изменяет показатель преломления LiNbO_3 . Для локализации акустической энергии применяют подвесные мембраны, однако их изготовление усложняет конструкцию устройства. Альтернативой служат структуры на сапфировой подложке с высокой скоростью распространения акустических волн, позволяющие уменьшить утечку акустической энергии без формирования мембраны.

Отдельное направление развития акустооптической платформы – интегральная бриллюэновская фотоника. Её основу составляет вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна (stimulated Brillouin scattering, SBS), которое обеспечивает избирательное усиление и обработку спектральных составляющих сигнала. В волноводах на основе тонкоплёночного LiNbO_3 реализованы режимы SBS с поверхностными и объёмными акустическими волнами. Первый режим обеспечивает узкополосное взаимодействие, а второй – более широкополосное, что расширяет возможности фильтрации оптических и радиочастотных сигналов.

Интегральные бриллюэновские схемы строят на волноводах LiNbO_3 , рисунок которых задают проекционной

фотолитографией, а рельеф формируют травлением слоя на часть его толщины. Такая волноводная структура позволяет объединять на одном кристалле электрооптические модуляторы, кольцевые резонаторы и протяжённые SBS-секции.

В одной из реализаций поверхность LiNbO_3 в бриллюэновских секциях оставляли открытой, что усиливало взаимодействие поверхностной акустической волны с оптической модой. На участки, предназначенные для электрооптических модуляторов и перестраиваемых резонаторов, наносили слой SiO_2 . Такая архитектура позволила реализовать бриллюэновское усиление и генерацию.

Одно из направлений применения интегральной бриллюэновской платформы – СВЧ-фотонные процессоры. В них модулятор преобразует СВЧ-сигнал в оптическую форму, резонаторы задают формат модуляции, а SBS-секция избирательно усиливает выбранные боковые полосы. На этой основе реализуют полосовую и режекторную фильтрации, а также истинную временную задержку. Таким образом, интегральная бриллюэновская платформа объединяет функции усиления, генерации и перестраиваемой обработки сигналов.

Заключение

Переход к тонким монокристаллическим плёнкам LiNbO_3 сформировал масштабируемую платформу интегральной фотоники. Сильная локализация оптической моды обеспечила миниатюризацию, а увеличение диаметра пластин, групповые методы изготовления и гетерогенная интеграция расширили функциональные возможности устройств. Ключевыми условиями перехода от единичных экспериментальных образцов к воспроизводимому групповому изготовлению остаются однородность структур по площади пластины, выход годных и воспроизводимость характеристик. 

Использованная литература

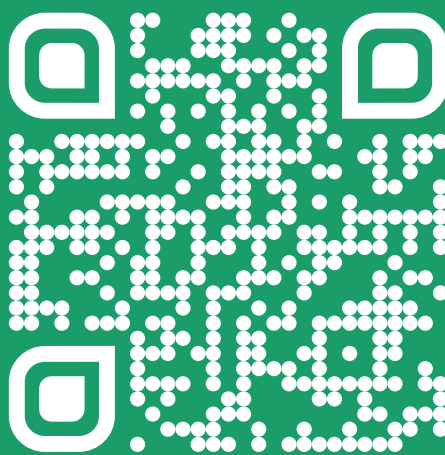
1. «Single-Crystal Lithium Niobate Thin Films» by Qingyun Li, Houbin Zhu, Honghu Zhang et al., Journal of Synthetic Crystals, 2021, Vol. 50, № 4, pp. 716–723.
2. «Volume Manufacturing of Thin-Film Lithium Niobate Modulators with Bandwidth > 110 GHz Based on 4-Inch Wafer with a Quartz Handle» by Yang Liu, Zihan Zhou, Peiqi Zhou et al., Light: Advanced Manufacturing, 2025, Vol. 6, Article 47.
3. «Demonstration of Lithium Niobate Integration on a 200-mm Silicon Photonics Wafer Using Transfer Printing» by Margot Niels, Ewoud Vissers, Tom Vanackere et al., Optics Letters, 2025, Vol. 50, № 15, pp. 4678–4681.
4. «Wavelength-Accurate and Wafer-Scale Process for Nonlinear Frequency Mixers in Thin-Film Lithium Niobate» by C. J. Xin, Shengyuan Lu, Jiayu Yang et al., Communications Physics, 2025, Vol. 8, Article 136.
5. «Integrated Brillouin Photonics in Thin-Film Lithium Niobate» by Kaixuan Ye, Hanke Feng, Randy te Morsche et al., Science Advances, 2025, Vol. 11, Article eadv4022.



ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ Кухня

ГОТОВИМ ПОЛЕЗНЫЙ КОНТЕНТ

Подкаст по актуальным и острым темам
отрасли радиоэлектроники



Подпишись!

КАЧЕСТВО

Ничто не вечно ПОД СМОЛОЙ: новое поколение российских флюсов

Текст: Денис Поцелуев

”

В нашей стране запускаются в космос передовые аппараты низкоорбитальной группировки, разрабатываются собственные процессоры, производится вычислительная техника и телекомоборудование – и при этом паяются платы флюсами, рецептуры которых не менялись с советских времен. Непропаи, остатки на плате, коррозия под компонентами – за всем этим нередко стоит не брак монтажника, а неправильно подобранный или попросту устаревший материал.

В статье мы разберем, что изменилось и что теперь имеется в распоряжении технолога.

Наследие прошлого

Если спросить технолога сборочного производства, как происходит выбор флюса, ответ, скорее всего, будет предсказуемым: «Работаем с тем, что есть». Большинство отечественных флюсов, которые сегодня применяются в производстве РЭА, были разработаны в 1970–80-х годах. ЛТИ-120, ФКСп, ФКТ, ФКЭт (рис 1) – все эти марки зафиксированы в отраслевом стандарте ОСТ 4Г 0.033.200, который создавался под задачи и компонентную базу совершенно другой эпохи. Они хорошо знакомы технологам, доступны, бюджетны и, главное, легитимны: внесены в отраслевую документацию, что критически важно для предприятий ОПК. Казалось бы, зачем что-то менять?

Проблема канифольных флюсов не в том, что они плохие. Проблема в том, что современное производство ушло далеко вперед, а инструментарий технолога – нет. Канифоль – натуральное вещество, ее химический состав варьируется от партии к партии: меняется активность, скорость растекания, количество остатков. Для серийного производства такая нестабильность – серьезный риск воспроизводимости техпроцесса. Липкие остатки притягивают пыль и влагу, быстро загрязняют отмывочные жидкости, а для бессвинцовых сплавов и современных финишных покрытий – ENIG, OSP, ImSn – активности флюсов, созданных по рецептурам 40-летней давности, зачастую попросту недостаточно.

Импорт: был и нет

До 2022 года многие производители РЭА работали с ведущими зарубежными компаниями (Indium Corporation, Kester, AIM, Henkel и др.), выпускающими широкий ассортимент современных флюсов под любой техпроцесс. Сегодня прямые поставки прекратились или существенно сократились. С переходом на параллельный импорт поставки флюсов стали ждать месяцами: сроки выросли с 4–6 недель до 4–6 месяцев, цены – в 2–3 раза. Строить производственную программу на таком фундаменте невозможно.

Несколько российских производителей выпускают флюсы для РЭА, но их ассортимент, как правило, ограничен базовыми канифольными составами. Полноценных не требующих отмывки флюсов, флюсов для пайки волной и селективной пайки, флюсов на водной основе, флюс-



1

Отечественные флюсы ФКСп и ЛТИ-120

гелей для ремонта – всего этого на отечественном рынке практически нет. Получается тупиковая ситуация: вернуться к устаревшей канифоли – значит жертвовать качеством. Покупать импорт – значит зависеть от нестабильных поставок. Третьего варианта долгое время не было...

Что нужно современному производству

Для технолога-практика объяснять очевидное – лишнее. Поэтому коротко, в таблицах, приведем информацию о типовых техпроцессах с применением флюса и ключевых требованиях (Т 1, 2).

Линейка флюсов «Солиус»: под каждую задачу – свое решение

Мы, как производственная компания, разрабатывали линейку флюсов Солиус (рис 2), отталкиваясь именно от задач производства, а не от желания заполнить каталог. Поэтому у каждой группы флюсов – четкая область применения и нет дублирования. Флюсы серии ФН предназначены для автоматизированных процессов пайки волной на различных основах с широким технологическим окном активации.

Серия ФВ – составы на водной основе, не содержащие летучих органических соединений (ЛОС): негорючие,

Т 1

Типовые техпроцессы с применением флюса

ТЕХПРОЦЕСС	ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ФЛЮСА
Пайка волной (в т. ч. в среде азота)	Стабильность в флюсователе на протяжении смены; воспроизводимость от платы к плате; совместимость с бессвинцовыми сплавами
Селективная пайка	Локальное нанесение; минимальные остатки вне зоны пайки; высокая точность активации
Ручная пайка и ремонт	Удобная форма (гель, аппликатор); точечное дозирование; отсутствие растекания на соседние компоненты

Т 2

Основные требования к флюсам

ТРЕБОВАНИЕ К ФЛЮСУ	КОГДА КРИТИЧНО
Минимальные остатки / не требующий отмывки	Малые зазоры под компонентами, эксплуатация при повышенной влажности
Водосмываемость	Обязательная отмывка по техпроцессу, контроль качества отмывки
Высокая активность	Окисленные выводы, никелевые и палладиевые покрытия, бессвинцовые сплавы
Инертность к меди	Наличие на плате открытых медных выводов или компонентов
Длинное окно активации	Крупные серверные и телекоммуникационные платы с высокой тепловой массой

экологически безопасные, не требующие специальных условий хранения. Серия ФК – канифольные флюсы нового поколения для специальных задач. Также в ассортименте имеются водосмываемые флюсы ВС. Флюс-гели ФГ и аппликаторы ФР – для ручной пайки, ремонта и доработки. Обобщенные данные по линейке флюсов Солиус с краткими характеристиками приведены в Т 3.

Ключевые флюсы линейки Солиус имеют сертификат СТ-1 и включены в Реестр российской промышленной продукции, что подтверждает отечественное происхождение и открывает возможность для применения в рамках государственных контрактов.

Замена без боли: функциональные аналоги зарубежных флюсов

Один из главных барьеров при смене флюса – страх перед переналадкой. Технолог, который годами работал с одним составом, знает его характеристики и особенности применения наизусть. Менять такой флюс – значит заново

проходить цикл отработки параметров, рисковать браком и тратить время на квалификацию. Это реальная проблема, и мы ее понимаем.

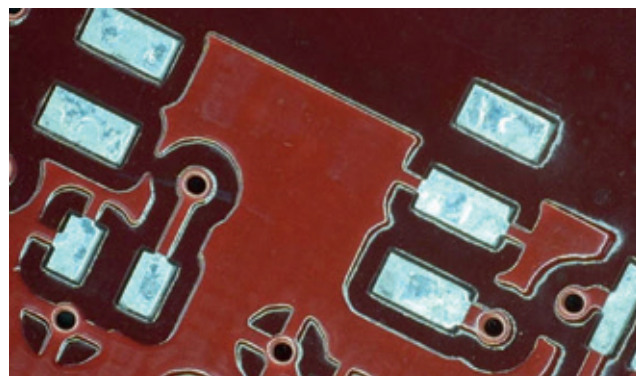
Именно поэтому часть флюсов Солиус разрабатывалась не с нуля, а как функциональные аналоги – составы, воспроизводящие ключевые технологические характеристики уже знакомых производствам материалов. Скрывать не будем – при разработке сделанных нами флюсов ориентировались на конкретные хорошо зарекомендовавшие себя в отечественном производстве зарубежные бренды и продукты. Не «похожий флюс», а продукт, прошедший сравнительное тестирование и подтвердивший совместимость с теми же процессами, оборудованием и финишными покрытиями. Что это означает на практике? Переход на функциональный аналог, как правило, не требует изменения техпроцесса. Параметры нанесения, температурные режимы, скорость конвейера – все остается прежним. Технолог получает знакомый технологический профиль материала, но



Т 3

Линейка паяльных флюсов Солиус производства компании Остек-Интегра

НАЗВАНИЕ	ТИП ФЛЮСА	ОСНОВА	КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ
ФН-9942	ORLO	Органическая спиртовая	Высокоактивный флюс, не требующий отмывки, для пайки волной, селективной и ручной пайки. Оставляет мало остатков после пайки
ФН-9945	ROLO	Канифольная спиртовая	Флюс, не требующий отмывки, для пайки волной и ручной пайки. Средние остатки
ФВ-7742	ORLO	Органическая водная	Флюс, не требующий отмывки, для пайки волной, селективной пайки. Более оптимален для бессвинцовой пайки из-за высокой температуры активации. Более безопасен для окружающей среды
ФК-1	ROLO	Канифольная спиртовая	Флюс, не требующий отмывки, для волновой пайки, с прозрачными остатками
ФВ-1	ORLO	Органическая водная	Флюс на водной основе, не требующий отмывки, для пайки волной, селективной пайки. Более оптимален для бессвинцовой пайки из-за высокой температуры активации и высокой активности. Более безопасен для окружающей среды
ФС-1	ORLO	Органическая спиртовая	Флюс, не требующий отмывки, для солнечной энергетики
ФВ-7743	ORLO	Органическая водная	Флюс на водной основе, без содержания летучих органических соединений. Имеет доработку в качестве ингибитора. Не реагирует с медью.
ФН-9943	ORLO	Органическая спиртовая	Высокоактивный флюс, не требующий отмывки, для пайки волной. Имеет доработку в качестве ингибитора. Не реагирует с медью
BC-1095	ORH1	Органическая спиртовая	Водосмываемый флюс для пайки волной припоя и ручной пайки (рис 3)
BC-2000	ORH1	Органическая спиртовая	Водосмываемый флюс для ручной пайки высокой активности
ФВ-3000	ORLO	Органическая водная	Флюс для селективной пайки на водной основе, не требующий отмывки. Более оптимален для бессвинцовой пайки из-за высокой температуры активации и высокой активности. Более безопасен для окружающей среды
ФК-1630	ROLO	Канифольная спиртовая	Не требующий отмывки флюс с малыми остатками для селективной пайки и ручной пайки с длительным временем сохранения активности. Рекомендуется для применения с большими платами при длительном процессе пайки
ФВ-5293	ORLO	Органическая водная	Флюс на водной основе, без содержания летучих органических соединений. Более оптимален для бессвинцовой пайки из-за высокой температуры активации и высокой активности. Более безопасен для окружающей среды
ФК-3900	ROLO	Канифольная спиртовая	Флюс, не требующий отмывки, для пайки волной, селективной пайки и ручной пайки с малыми остатками
ФК-3010	ROMO	Канифольная спиртовая	Флюс, не требующий отмывки, для пайки волной, селективной пайки и ручной пайки с малыми остатками. Применяется для окисленных компонентов, с которыми низкоактивные флюсы не справляются, а также в случаях, когда применение водосмываемых флюсов невозможно
BC-1010	ORH1	Органическая водная	Водосмываемый флюс для пайки волной припоя и ручной пайки. Более оптимален для бессвинцовой пайки из-за высокой температуры активации и высокой активности. Более безопасен для окружающей среды
ФГ-020Б	ROLO	Канифольная	Флюс-гель для ручного монтажа, для бессвинцовых сплавов, с прозрачными остатками
ФГ-018	ROLO	Канифольная	Липкий флюс-гель для ручного монтажа, для свинцовых сплавов, с средним количеством остатков



3

Нанесение и отмывка водосмываемого флюса Солиус 1095: а) нанесенный распылением флюс на пустую плату, проверка наличия нерастворимых остатков пройдена; б) плата после пайки и отмывки, Гидронол КФ не выявил остатки активаторов

уже от отечественного производителя: со стабильными поставками, предсказуемой ценой и коротким сроком доставки.

Стандартный маршрут перехода заключается в следующем:

1. Запрос и подбор. Заказчик описывает текущий материал и задачу, специалисты компании Остек-Интегра предлагают аналог из линейки Солиус.
2. Образцы для тестирования. Флюс передается на производство для самостоятельной оценки на реальных платах и реальном оборудовании.
3. Техническое сопровождение. При необходимости или по запросу заказчика специалист выезжает на производство или консультирует удаленно по настройке параметров.
4. Квалификация и внедрение. После успешного тестирования материал вводится в техпроцесс.

Никаких скрытых обязательств на этапе тестирования – только результат, который говорит сам за себя.

Линейка флюсов Солиус – не закрытый каталог с фиксированным ассортиментом. Работа над новыми составами ведется постоянно: часть задач продиктована рынком, а часть приходит напрямую от производств с конкретными технологическими вызовами. Сейчас в активной разработке – флюсы для селективной пайки и ряд флюсгелей для специальных применений.

Времена, когда технолог был вынужден выбирать между устаревшим отечественным флюсом и труднодоступным импортным, уходят. Российское производство паяльных материалов вышло на уровень, когда можно говорить не о замене, а о полноценной современной альтернативе – с широким ассортиментом, стабильным качеством и живым развитием. 

Если у вас есть задача, под которую вы пока не нашли подходящего флюса – расскажите о ней. Возможно, решение уже есть. А если нет – это повод обратиться к нам! materials@ostec-group.ru





НЕ ПОКАЗЫВАЕМ ФОКУСЫ, А ФОКУСИРУЕМСЯ НА СОБСТВЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Мы заботимся о том, чтобы все необходимые материалы и решения наилучшего качества всегда были в вашем распоряжении независимо от обстоятельств. В современных условиях лучшая основа для этого – собственное производство. Поэтому мы развиваем производственную программу, которая уже дает хорошие результаты. Сегодня она охватывает самые критичные продуктовые группы: отмывка, пайка и влагозащита. Часть материалов мы разработали и производим самостоятельно, часть – разрабатываем прямо сейчас, а некоторые товарные категории активно развиваем в партнерстве с зарубежными предприятиями.

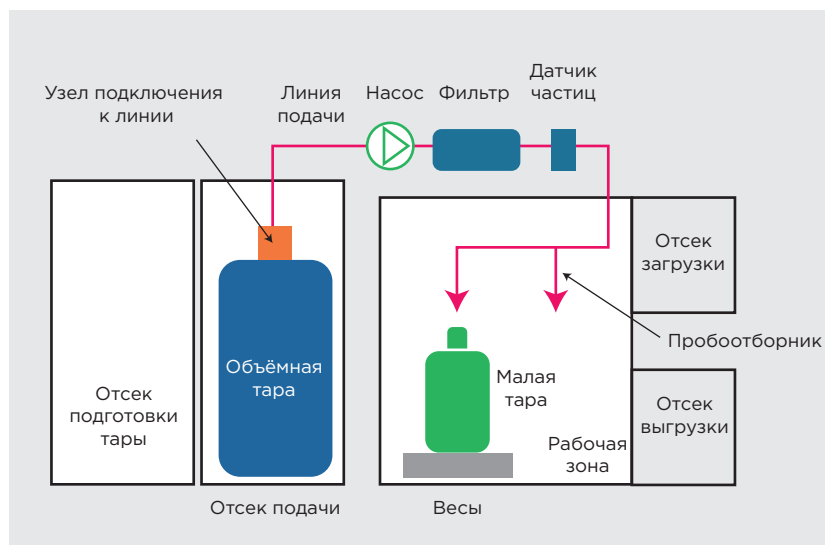
Мы знаем, что делаем. А значит, у вас в любом случае будет все то, что вам необходимо.

Фасовка ВЫСОКОЧИСТОЙ ХИМИИ для микроэлектроники

Текст: Александр Скупов

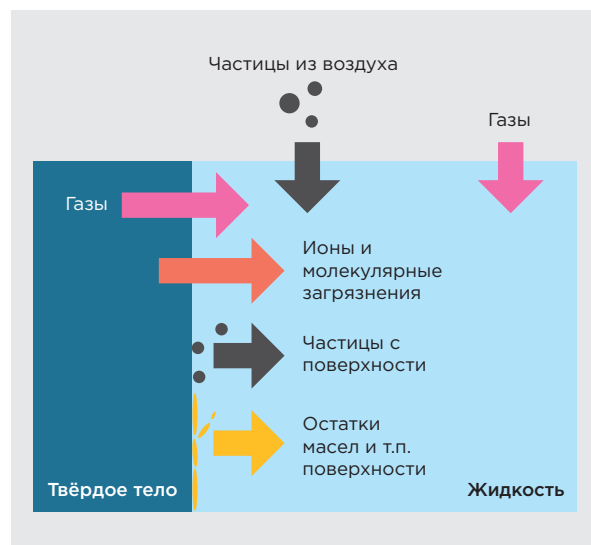
”

При производстве кристаллов интегральных микросхем и полупроводниковых приборов для очистки поверхности и травления слоёв активно применяются жидкостные процессы. Для них используется разнообразная химия – кислоты, основания, органические растворители, соли и пероксиды. Крупные предприятия потребляют данные продукты, упакованные в бочки и IBC-контейнеры. Но для мелкосерийного производства, для исследовательских организаций эта химия требуется в малой таре – бутылках и канистрах.



1

Устройство системы фасовки химии



2

Источники загрязнений в жидкой химии

В настоящее время единственными производителями полной номенклатуры высокочистой химии являются иностранные компании. Отечественные предприятия активно развивают локальное производство, но их номенклатура пока ограничена, поэтому спрос на импортную продукцию в малой таре сохраняется. При поставках такой продукции приходится сталкиваться с разнообразными проблемами, приводящими к её удорожанию для конечного заказчика или к принципиальной невозможности поставки. Химические вещества – это часто опасные грузы, для которых требуется оформление специальных разрешительных документов. Если вам требуется несколько разных позиций в малой таре, организовать их эффективную сборку в одну отправку непросто, т. к. часто вещества нельзя перевозить вместе из-за потенциальных рисков. Поэтому транспортные издержки существенным образом влияют на цену и срок поставки. Разумным способом уменьшения издержек является поставка крупных объёмов химической продукции для группы заказчиков и последующая фасовка в малую тару.

Чтобы поддержать отечественных производителей электроники, исследовательских институтов и лабораторий ВУЗов в компании Остек-Интегра запущено оборудование для фасовки высокочистой химии в малую тару. Для поддержания качества химии при выборе оборудования, тары, методик контроля качества требуется учитывать множество сложных факторов, о которых пойдёт речь в данной статье.

К чистоте химии для микроэлектроники – полупроводникового производства – предъявляются высокие требования. Основные контролируемые загрязнения: анионы, катионы, частицы, органические вещества в неорганической химии, вода в растворителях и некоторые специфические примеси, критичные для конкретных веществ (например, изомер β -PGMEA для PGMEA). Производители химии часто предлагают такие классы чистоты, как: VLSI, SLSI, XLSI или

аналогичные. Однако эта градация не универсальна, и конкретная спецификация по допустимым уровням загрязнений может существенно отличаться как между одним и тем же продуктом у разных производителей, так и между продуктами у одного производителя в рамках одного класса. Существует стандарт SEMI C1, который определяет требования к чистоте веществ, используемых для сертификации и анализа в производстве полупроводников. Однако этот стандарт также не определяет универсальных требований к чистоте. Для понимания разницы между классами чистоты химии для полупроводников можно воспользоваться **Т 1**. Универсальной мерой чистоты можно считать концентрацию катионных загрязнений – чем она меньше, тем меньше будут и концентрации прочих загрязнений.

Источники загрязнений

Принципиально важно знать все источники загрязнений, которые могут повлиять на качество продукта. Важен выбор правильных элементов системы фасовки, особых материалов и контроль чистоты на каждом этапе.

Устройство типичной системы фасовки представлено на рис. 1. При работе этой системы возможны следующие пути загрязнения химии (рис. 2):

- при подключении тары к системе;
- во время перекачивания по трубопроводам;
- при нахождении в новой таре.

Для предотвращения загрязнений при подключении тары необходимо обеспечить чистоту внешней поверхности тары с помощью отмычки и сушки в чистом газе. Открытие тары перед подключением к системе должно производиться в условиях чистых помещений. Класс чистоты помещений зависит от чистоты химии. Например, для высокого класса чистоты G5 (**Т 1**) нужно обеспечить класс чистоты воздуха рабочей зоны не хуже ISO5. Для снижения капитальных затрат и увеличения безопасности персонала система фасовки может быть построена внутри изолятора,

Т 1

Классы чистоты помещений в зависимости от чистоты химии

КЛАСС ЧИСТОТЫ	G1	G2	G3	G4	G5
Катионные загрязнения по единичному элементу	≤1 ppm	≤10 ppm	≤1 ppb	≤0,1 ppb (100 ppt)	≤10 ppt
Размер контролируемых частиц	≤1 мкм	≤0,5 мкм	≤0,5 мкм	≤0,2 мкм	–
Концентрация частиц	≤25 шт./мл	≤25 шт./мл	≤5 шт./мл	–	–
Приблизительный уровень техпроцесса	1,2 мкм	0,8–1,2 мкм	0,2–0,6 мкм	90–200 нм	<90 нм

позволяющего персоналу взаимодействовать с ней только через барьер либо с использованием роботизированных манипуляторов.

Загрязнение химии в процессе перекачивания по трубопроводам может быть физическим (частицы) и химическим (катионы, анионы, конкретные вещества). Частицы задерживаются специальным фильтром, который ставят максимально близко к выходу линии. Но важно минимизировать количество этих частиц, для чего все материалы, контактирующие с химией, должны обладать максимально гладкой и ровной поверхностью, все трубопроводы должны иметь плавные повороты, минимум стыков и переходов диаметров для обеспечения максимально ламинарного течения жидкостей. Желательно использовать насосы, минимизирующие вибрацию трубопроводов для снижения отрыва частиц. Размер пор фильтра зависит от класса чистоты химии. Для техпроцессов с минимальной топологической нормой до 90 мкм достаточно фильтровать химию через поры 0,1 мкм – это обеспечивает низкое содержание частиц, способных привести к формированию точечных дефектов на пластине. Для более тонких топологических норм применяют фильтры с порами диаметром десятки нанометров – это создаёт дополнительные сложности, связанные с тем, что скорость фильтрации значительно падает из-за их вязкости и недостаточной смачиваемости поверхности.

Ионные и молекулярные загрязнения химии происходят за счёт растворения в ней чужеродных веществ, а также за счёт постоянной диффузии из материала тары.

Растворимые вещества могут содержаться в любом виде на поверхности трубопроводов и внутренней поверхности тары. Эту причину загрязнений можно минимизировать предварительной промывкой. Некоторые химические вещества могут быть чувствительны к газам, содержащимся в атмосфере, например, к водяному пару, углекислому газу или кислороду. Поэтому для них необходимо создавать инертную газовую среду и контролировать критичные примеси.

Диффузия – процесс, при котором вещества способны перемещаться из материала (трубопровода, насоса, уплотнителя, тары и т. п.) под действием градиента концентраций. Другими словами, химия, где концентрация определённых веществ мала, экстрагирует их из материала,

где их концентрация выше. Это одна из самых сложных проблем, с которой сталкиваются при разработке химического оборудования. Для минимизации роли диффузии следует выбирать материалы с максимально низким содержанием загрязняющих веществ.

Выбор материалов

Стандартный индустриальный набор материалов – металл, пластик, стекло, керамика. Для высокочистой химии применение многих материалов ограничено из-за химической несовместимости или высокого риска загрязнений.

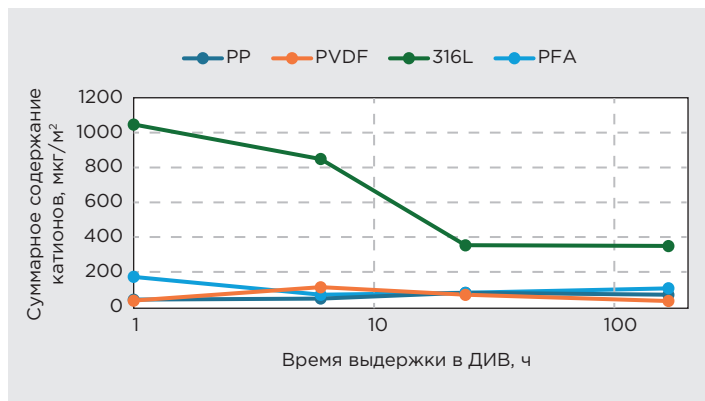
Стекло используется лишь для некоторых фоторезистов и органических веществ, при этом используют бутылки из специального стекла с низкой концентрацией ионов. Сегодня в мире существует тенденция к упаковке этих материалов в пластиковые бутылки, популярность стеклянной тары снижается. Высокочистый кварц, который можно классифицировать как стекло, применяется для упаковки некоторых веществ и очень широко – в конструкции машин для производства химии. Однако кварц используют только тогда, когда нет иной альтернативы, т. к. во многих приложениях из-за его хрупкости существенно повышаются риски безопасности.

Для хранения и транспортировки существенной части неорганической химии неприменим ни один из распространённых металлов и сплавов для трубопроводов. Даже для тех неорганических веществ, которые инертны по отношению к металлу, критично содержание катионов – оно ничтожно мало с точки зрения металлурга, но недопустимо велико с точки зрения технолога полупроводникового производства.

Для большей части номенклатуры химии в качестве безопасных и стабильных материалов применяются разнообразные пластики, главным образом полипропилен (PP), полиэтилен высокой плотности (HDPE) и разнообразные фторполимеры (PFA, PTFE, PVDF). При выборе пластика следует руководствоваться двумя факторами:

- химическая совместимость¹;
- чистота.

¹ Под химической совместимостью подразумевается отсутствие реакций с целевой химией, разбухания или увеличения хрупкости материала.



3

Экстракция катионов из различных материалов в деионизованной воде при 60 °C [2]

Для пластиков, контактирующих с высокочистой химией, важны следующие требования по чистоте:

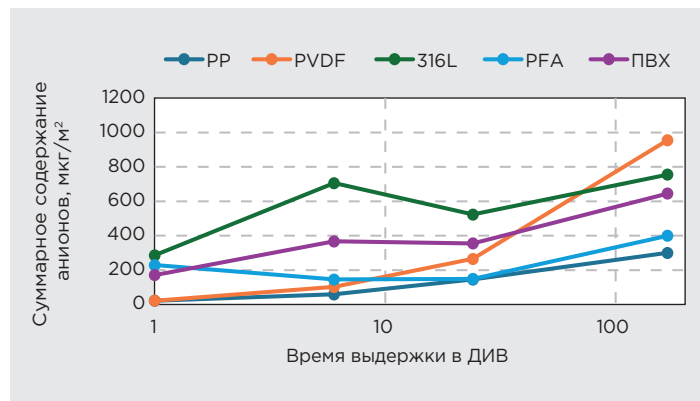
- низкое содержание катионов и анионов;
- низкое содержание золы;
- отсутствие каких-либо наполнителей;
- отсутствие пластификаторов и добавок;
- отсутствие остаточных смазок и масел, используемых при механической обработке и термоформовке.

Одна из основных проблем HDPE и PP – это ионы металлов, поскольку их главным источником в этих видах пластиков являются остатки катализаторов, применяемых для синтеза. Фторполимеры содержат меньше ионов металлов, поскольку существуют процессы их синтеза без использования металлических катализаторов, в этих пластиках катионные загрязнения появляются вследствие взаимодействия с незащищённой средой в процессе производства.

Наполнители и добавки не применяются для полимеров, предназначенных для контакта с высокочистой химией – используется максимально чистое первичное сырьё.

При формовке пластиков, которые предназначены для контакта с высокочистой химией, также используют специальные подходы, призванные минимизировать или полностью устранить использование смазок, применяют специальную отмывку уже изготовленных изделий в условиях чистых помещений.

Обычно трубопроводы, оснастка и насосы для контакта с высокочистой химией изготавливают из фторполимеров, что позволяет свести к абсолютному минимуму привнесение загрязнений. Для тары часто используется высокочистый HDPE, несмотря на его недостатки. Однако для химии с высочайшей степенью чистоты (например, 0,01 ppb по содержанию катионов) применяют фторполимеры или композитные ёмкости, где внутри оболочки из HDPE присутствует слой фторполимера. Особенности сырья, методов обработки и особенностей рынка малой тары для микроэлектронной химии создают множество трудностей при организации производства такой продукции. Как



4

Экстракция анионов из различных материалов в деионизованной воде при 60 °C [2]

следствие, в мире немного производителей, специализирующихся на изготовлении малой тары для химии полупроводниковой чистоты. Компания Остек-Интегра при выборе тары для фасовки протестировала продукцию нескольких производителей, в том числе отечественных. В настоящий момент для фасовки продуктов с чистотой по катионам на уровне 10 ppb мы используем импортную тару из HDPE только от одного производителя, решения которого оказались оптимальными для всей номенклатуры продукции. Продукция других производителей не позволяет обеспечить сохранение требуемой чистоты по отдельным катионам в течении требуемого срока годности.

На практике для определения пригодности всех материалов системы фасовки и тары для конкретной химии необходимо проводить тесты с длительным временем контакта, чтобы выбрать наиболее подходящий материал от конкретного производителя. На рис. 3 и 4 приведены примеры тестирования поливинилхлорида (PBX), PP, PVDF и нержавеющей стали на количество выделяемых ими ионов в ультрачистой деионизованной воде. Подобные тесты, но с целевой химией вместо воды, проводились и в компании Остек-Интегра при выборе материалов для трубопроводов, насосов и уплотнителей.

Особенности малой тары для фасовки

При фасовке химии в малую тару (по сравнению с большой) следует учитывать, что её отношение площади поверхности к объёму (S/V) мало. Это значит, что все механизмы загрязнений, связанные с взаимодействием между материалом тары и химией, будут для неё более значительны. Таким образом, для фасовки необходимо выбирать тару с гарантированно низким содержанием загрязняющих веществ и частиц.

Как отмечалось выше, некоторые вещества чувствительны к проникновению компонентов атмосферы сквозь стенки тары – кислород, углекислый газ, пары воды, пары некоторых органических веществ. Снова необходимо отметить, что для малой тары риск проникновения этих загрязнений существенно выше, чем для крупной. Это связано



5

Пример малой тары из высокочистого HDPE

не только с малым соотношением S/V , но и с меньшей толщиной стенки. Для чувствительных веществ применяется специальная тара с барьерными слоями внутри полимера, которые снижают скорость диффузии газов и таким образом продлевают срок годности продукта внутри.

Наши решения

В настоящее время в ООО «Остек-Интегра» функционирует оборудование фасовки неорганической химии для микроэлектроники в пилотном режиме. Это оборудование отвечает всем современным требованиям по обеспечению чистоты химии. Сегодня компания может предложить следующие позиции в малой таре, расфасованной из импортных поставок:

- безметалльные проявители: DEV-26A, DEV-24, DEV-319;
- кислоты: HCl, HF, H₂SO₄, H₃PO₄;
- прочие вещества: 25 % ТМАН, H₂O₂, сниматели фоторезиста и специализированные растворители с высокой температурой кипения.

Для всей химии обеспечено устойчивое поддержание катионных загрязнений на уровне не выше 10 ppb, частиц размером 0,3 мкм – не более 150 шт./мл, отсутствие перекрёстных загрязнений за счёт использования изолированных трубопроводов, насосов и внедрения специальных методик профилактической промывки. Для контроля качества привлекаются передовые лаборатории, способные обеспечить максимальную точность измерений.

В качестве тары используются канистры и бутылки из HDPE с тщательно контролируемым уровнем загрязнений и квалифицированные для контакта с химией полупроводниковой чистоты. Доступные объёмы тары: 0,5 л, 1 л, 4 л, 16 л, 20 л.

Химия, расфасованная в компании Остек-Интегра, прошла успешные испытания и независимый контроль чистоты у ряда заказчиков, некоторые продукты уже поставляются им на регулярной основе со стабильным качеством и в максимально сжатые сроки.



6

Пример тары из высокочистого PFA

Таким образом, исследовательские организации, образовательные центры и мелкосерийные производства могут существенно улучшить свои возможности по производству изделий микроэлектроники благодаря использованию высокочистой химии в малой таре, предложение которой в последние годы было ограничено.

Компания Остек-Интегра ведёт работу над модернизацией и дооснащением систем фасовки, чтобы расширить номенклатуру и увеличить чистоту веществ, предлагаемых в малой таре для закрытия растущих потребностей российских заказчиков. ▢

ООО «Остек-Интегра» приглашает к сотрудничеству все заинтересованные стороны: как конечных потребителей, так и производителей особо чистой химии для нужд микроэлектроники. На базе наших производственных процессов мы готовы оказать содействие в расфасовке особо чистой химии из бочек и ИВС-контейнеров в малую тару. На нашем складе в Москве всегда есть в наличии высокочистая химия в таре от 1 литра.

Использованная литература

1. <https://www.guochukeji.com/en/xinwenzixun/4947.html>
2. M.W. Johnson, A. Gildor, Understanding metal and ionic contamination in elevated temperature photovoltaic wet chemistries from chemical delivery systems, Entegris Inc., 6034 EU PVSEC 2010



С ТРИ КОРОБА НЕ ОБЕЩАЕМ, НО БОЛЬШОЙ СКЛАД МАТЕРИАЛОВ ЕСТЬ

У нас собственный склад технологических материалов для производства электроники и микроэлектроники. Склад обеспечивает четыре температурных диапазона хранения от -40 до +20 °С, хранение продукции шести классов опасности по ADR, все необходимые условия для хранения прекурсоров и материалов с повышенным содержанием драгоценных металлов. Мы строго контролируем сроки годности и внимательно следим за тем, чтобы на складе поддерживался стабильный запас основных технологических материалов.

Чтобы у вашего производства не было простоев, а у вас – проблем.

>50 тонн

материалов
всегда в наличии

>100

типов материалов
в складской программе

>50 м³

для хранения материалов
при специальных
температурных условиях

Проверено временем, но время проверяет снова:

Элтрин У1 и новые стандарты влагозащиты

Текст: Денис Поцелуев

”

Существуют материалы, которые используются в производстве дольше, чем организации, их разрабатывавшие и внедрявшие. Эпоксипуретановый лак УР-231 – один из таких. Он появился в советской электронике в конце 1970-х годов прошлого столетия, пережил распад отраслевых НИИ и смену поколений монтажных технологий: от выводного к планарному монтажу, от ручного нанесения к автоматизированным установкам селективного нанесения покрытия. Сотни технологических карт и конструкторских документов по сей день обозначают его как единственно допустимое покрытие – это заслуженное признание.

Однако электроника не стоит на месте. Плотность монтажа выросла в разы, BGA-корпуса и компоненты типоразмера 0201 и 01005 стали нормой, а не экзотикой. Производственные линии переходят на автоматизированное нанесение влагозащитных покрытий. Требования к подтвержденному российскому происхождению материалов, охране труда и воспроизводимости процессов растут год от года. В этом контексте закономерно возникает вопрос: насколько технология 1970-х годов отвечает реалиям производства 2020-х?

Цель этой статьи – честно разобраться в технологических преимуществах однокомпонентных уретановых лаков на примере Элтрин У1 (рис 1), а также понять, где технологические ограничения двухкомпонентных лаков становятся узким местом в производстве радиоэлектронной аппаратуры. Также мы рассмотрим результаты независимых сравнительных испытаний и опыт предприятий, уже проводящих апробацию современных однокомпонентных полиуретановых покрытий отечественного производства.

УР-231: ветеран на передовой

За более чем четыре десятилетия УР-231 прочно укрепился на российских производствах электроники. Материал упоминается в сотнях конструкторских документов и технологических карт, закреплён в ряде отраслевых стандартов.

Как известно, УР-231 имеет двухкомпонентную основу, что является как преимуществом, так и ограничивающим фактором в процессе производства. Явный плюс – быстрая полимеризация после смешивания основы и отвердителя. Даже при регламентном нанесении в 2-4 слоя и промежуточной сушке каждого слоя в течение 2 часов при температуре 65 °С лак на 100 % достигает заявленных свойств. В то время как ряд однокомпонентных полиуретановых покрытий при стандартных режимах сушки набирают свои свойства по экспоненте и проигрывают УР-231 по времени полной полимеризации. Однако нельзя сказать, что для многих производителей это является ограничением.

Вместе с тем двухкомпонентная природа УР-231 предопределяет некоторые производственные требования, которые в условиях мелкосерийного производства и ручного нанесения воспринимаются как рутина, но при переходе к промышленной автоматизации превращаются в системные ограничения. Давайте рассмотрим их подробнее.

- Для подготовки готового лака УР-231 к нанесению требуется точное дозирование и смешивание основы с отвердителем ДГУ в соотношении 100:18 по массе. Сохраняется высокое влияние человеческого фактора на точность соблюдения пропорций, отклонения в которой могут привести к нарушению конечных свойств продукта.
- Жизнеспособность готовой рабочей смеси – менее 5 часов. По истечении этого времени материал необходимо утилизировать, что приводит



1

Полиуретановый лак Элтрин У1

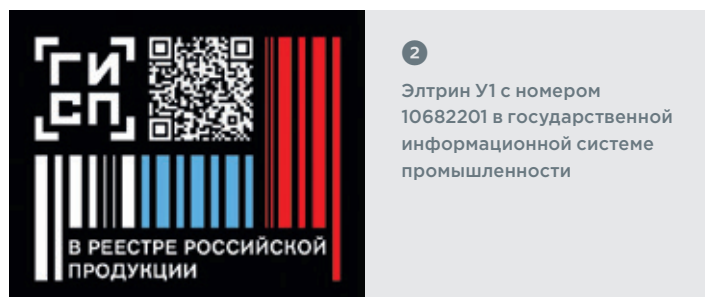
к неизбежным потерям.

- При переходе к автоматизированному нанесению наличие двухкомпонентной системы может быть критично и напрямую влиять на повторяемость результатов. Также надо учитывать, что оборудование для автоматизированного нанесения может требовать частых промывок, чтобы рабочая смесь не засыхала в магистральных и узлах подачи и смешивания материала.
- Для УР-231 характерна крайне низкая ремонтнопригодность, что создает серьезные проблемы в процессах ремонта и доработки печатных узлов. После полного отверждения лак можно удалить только механическим способом или агрессивными химическими составами, что часто приводит к повреждению печатной платы и компонентов. Для безопасного и эффективного механического удаления отвержденного лака можно применять технологию микроабразивного удаления влагозащитных покрытий¹, но не все предприятия имеют возможности для инвестиций в подобное оборудование. После полного отверждения УР-231 удаляется только механически либо размягчается в сильных растворителях. Оба способа несут риски: механическое воздействие опасно для компонентов с малым зазором до платы, растворители агрессивны к полимерным маскам и могут нарушить целостность защитных покрытий на контактных площадках.

Однокомпонентные полиуретановые покрытия: где прогресс ощутим

В последние 15-20 лет мировая тенденция в сегменте влагозащитных покрытий для электроники – переход

¹ Подробнее о технологии в журнале «Вектор высоких технологий» № 7 (12) 2014, статья «Абразив спешит на помощь»

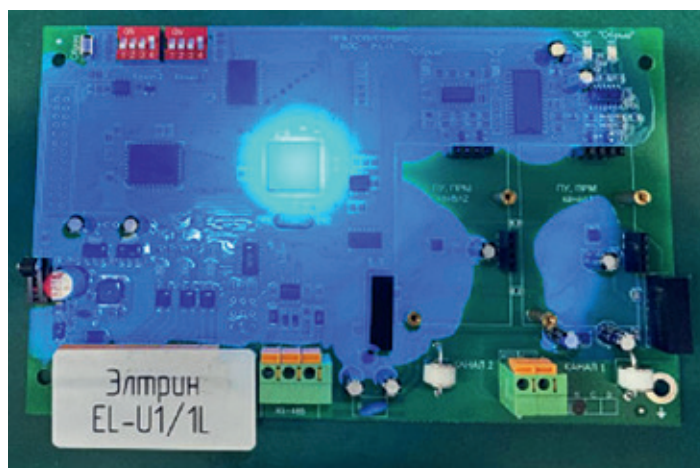


на однокомпонентные системы, совместимые с автоматизированным нанесением и УФ-контролем. Ключевые преимущества таких материалов, прежде всего, – технологические.

Среди отечественных материалов данного класса с подтвержденным российским происхождением по постановлению Правительства № 719 – однокомпонентный полиуретановый лак Элтрин У1 производства ООО «Остек-Интегра» (реестровый номер в системе российской промышленной продукции – 10682201, ТУ 20.30.22-006-37241715-2023) (рис 2).

На примере лака Элтрин У1 рассмотрим, какие технологические преимущества можно получить, применяя в производстве однокомпонентные полиуретановые влагозащитные покрытия².

- Отсутствие операции смешивания исключает ошибки дозирования и снимает ограничение по жизнеспособности рабочей смеси. Лак Элтрин У1 в герметично закрытой ёмкости и при соблюдении условий хранения сохраняет рабочие свойства на протяжении всего срока годности.
- Однокомпонентный состав и стабильная вязкость позволяют применять автоматизированные установки селективного нанесения без частых промывок магистралей.
- Наличие УФ-пигмента обеспечивает 100 % контроль покрытия под УФ-лампой, сильно упрощая нанесение и последующий контроль качества (рис 3).
- Рекомендуемое однослойное нанесение и время сушки на «отлип» (10–15 минут) значительно сокращают производственный цикл.
- Срок хранения Элтрин У1 – 24 месяца при соблюдении условий хранения, что снижает риски потерь приобретенной продукции при нестабильной загрузке производства.
- Для участков ручного нанесения, опытного производства и ремонтных служб принципиальным преимуществом является наличие аэрозольного формата поставки. Элтрин У1 выпускается также в виде аэрозольных баллонов, что открывает практические возможности, недоступные при



3
Ультрафиолетовые пигменты в Элтрин У1 позволяют контролировать качество нанесения и покрытия

работе с двухкомпонентными составами (рис 4).

- Удалять покрытия Элтрин У1 можно при помощи систем микроабразивного удаления влагозащитных покрытий или специального раствора для удаления полиуретановых лаков Элтрин С1.

Помимо технологичности полиуретановый лак Элтрин У1 обладает всеми свойствами и характеристиками, позволяющими осуществлять его прямое предназначение – защищать электронику от неблагоприятных воздействий окружающей среды. Квалификационные испытания проводились на базе собственной лаборатории отдела разработки и производства материалов ООО «Остек-Интегра» и специализированных аккредитованных научно-исследовательских центров: АНО СЦ «ЯрТЕСТ ЛКП и тары», АНО «НИЦ «Тест» и ФГБУ «ВНИИР». В 11 отражены сводные результаты испытаний. Подробный протокол квалификационных испытаний можно запросить у специалистов ООО «Остек-Интегра».



4
Полиуретановый лак Элтрин У1 в аэрозольных баллонах

² Выбор покрытия в любом случае определяется условиями конкретного производства и требованиями конструкторской документации

Т 1

Сводная таблица результатов испытаний полиуретанового лака Элтрин У1

№ п/п	ИССЛЕДУЕМОЕ СВОЙСТВО	МЕТОД ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ	РЕЗУЛЬТАТ ИСПЫТАНИЙ	МЕСТО ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ
1	Вязкость, сП	п. 6.2 ТУ	95	Лаборатория ООО «Остек- Интегра»
2	Вязкость по ВЗ-246/4, с		25	
3	Плотность при 20°C, г/см ³	ГОСТ 28513-90, п. 6.3 ТУ	0,95	
4	Время отверждения на отлип (при комнатной температуре), мин, не более	п. 6.12 ТУ	15	АНО «НИЦ «Тест»
5	Стойкость к действию тепла и холода (термический шок), °C	ГОСТ 13526-79, п. 6.4 ТУ	от -65 до +125°C	
6	Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом·м	ГОСТ 13526-79, п. 6.5 ТУ	$9,4 \cdot 10^{13}$	
7	Тангенс угла диэлектрических потерь	ГОСТ 13526-79, п. 6.5 ТУ	0,0163	Лаборатория ООО «Остек- Интегра»
8	Диэлектрическая проницаемость	п. 6.5 ТУ	3,28	
9	Электрическая прочность, кВ/мм	ГОСТ 13526 - 79, п. 6.7 ТУ	130	
10	Сопротивление изоляции, Ом	IPC-TM-650 2.6.3.3	$4,77 \cdot 10^7$	Лаборатория ООО «Остек- Интегра»
11		IPC-TM-650 2.6.3.7	$5,47 \cdot 10^9$	
12		п. 6.6 ТУ	$1,89 \cdot 10^{11}$	
13	Химическая стойкость	п. 6.8 ТУ	Хорошая см. табл.3	АНО СЦ «ЯрТЕСТ ЛКП и тары»
14	Стойкость к воздействию соляного тумана	ГОСТ 9.401-2018, П. 6.9 ТУ	Проходит (нет распространения коррозии от надреза)	
15	Адгезионная прочность, Н/см	ГОСТ 13526 - 79, п. 6.11 ТУ	3,1	Лаборатория ООО «Остек- Интегра»
16	Адгезионная прочность, баллы, не более	ГОСТ 15140-78	1	
17	Эластичность пленки при изгибе, мм, не более	ГОСТ 6806-2024	1	

Таким образом, на основании проведенных испытаний можно однозначно рекомендовать Элтрин У1 как надежное решение для защиты радиоэлектронных изделий от различных факторов и утверждать, что его свойства и характеристики соответствуют заявленным в документации.

Конфликт интересов или полное взаимопонимание: совместимость лаков Элтрин У1 и УР-231

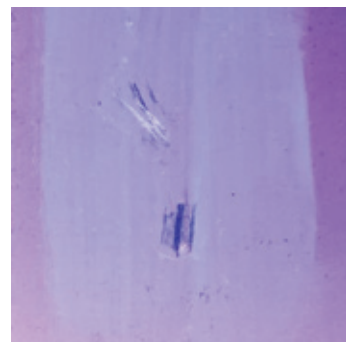
Один из ключевых практических вопросов: совместимы ли две системы покрытия – УР-231 и Элтрин У1 – при

смешанном применении или ремонте, требуется ли кардинальная перестройка существующих технологических процессов? Эта совместимость особенно ценна для предприятий, которые не могут мгновенно произвести замену материала, но стремятся к этому. Исследовательские работы, проведенные компанией Остек-Интегра, подтвердили полную взаимную совместимость: дефектов межслойного расслоения не выявлено, адгезионные свойства и устойчивость к термоудару сохранены (Т 2). Подробный протокол квалификационных испытаний можно запросить у специалистов ООО «Остек-Интегра».

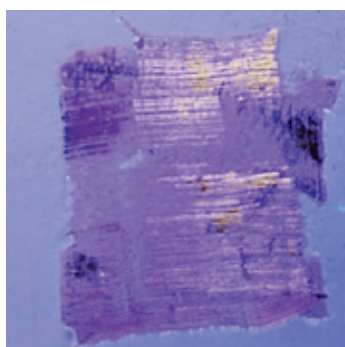
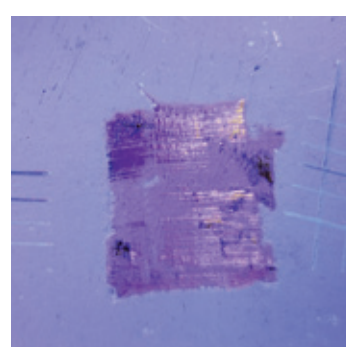
Т 2

Результаты испытаний на совместимость лаков Элтрин У1 и УР-231

Нанесение лака Элтрин У1 поверх покрытия УР-231

Поврежденное покрытие
УР-231 до нанесения лака
Элтрин У1Поврежденное покрытие
УР-231 после нанесения лака
Элтрин У1Поврежденное покрытие
УР-231 после нанесения лака
Элтрин У1 в УФ-свете

Нанесение лака УР-231 поверх покрытия Элтрин У1

Поврежденное покрытие
Элтрин У1 до нанесения
лака УР-231 в УФ-светеПоврежденное покрытие
Элтрин У1 после нанесения
лака УР-231Поврежденное покрытие
Элтрин У1 после нанесения
лака УР-231 в УФ-свете

Возможность использовать Элтрин У1 в качестве частичной замены УР-231 на отдельных участках производства позволяет постепенно оптимизировать процессы и оценить преимущества нового материала. Рекомендуемый подход внедрения Элтрин У1 – поэтапный: начать с отдельного участка или группы изделий, не требующих специальной климатической квалификации, освоить требования к подготовке поверхности, накопить статистику по дефектности и только затем распространять материал на критичные позиции с соответствующим обновлением КД. В Т 3 показаны сравнительные характеристики покрытий УР-231 и Элтрин У1

Работа в полях: опыт применения Элтрин У1 у российских заказчиков

Полиуретановый лак Элтрин У1 второй год успешно применяется на ведущих радиоэлектронных производствах разной отраслевой направленности: промышленная электроника, спецтехника, измерительное оборудование, аэрокосмические системы. Свыше 30 протоколов испытаний, полученных от заказчиков, подтверждают

применимость Элтрин У1 на производствах для широкого спектра задач и техпроцессов. Ряд предприятий провел свои независимые механо-климатические испытания по стандартам ГОСТ РВ 20.57.305, ГОСТ РВ 20.57.306, ГОСТ РВ 0020-57.306-2019, ГОСТ РВ 0020-57.310-2019, а именно:

- стойкость к воздействию синусоидальной вибрации в диапазоне частот от 10 до 60 Гц;
- стойкость к повышенной температуре среды (плюс 70 °С);
- стойкость к пониженной температуре среды (минус 50 °С);
- стойкость к повышенной влажности воздуха (95 %) при температуре плюс 55 °С;
- стойкость к изменению температуры среды (от минус 50 °С до плюс 70 °С);
- стойкость к воздействию атмосферных конденсированных осадков (иней и роса);
- стойкость к воздействию соляного (морского) тумана;
- стойкость к воздействию плесневых грибов.

ТЗ

Сравнительные характеристики покрытий УР-231 и Элтрин У1

ПАРАМЕТР	УР-231	ЭЛТРИН У1
Компонентность	Двухкомпонентный (смола Э-30 + ДГУ, 100:18)	Однокомпонентный
Жизнеспособность рабочей смеси	< 5 часов	В пределах срока годности (2 года)
Количество слоёв	2–4	1
Время сушки на «отлип»	~60 мин при 20 °С	10–15 мин 20 °С
Полная полимеризация	~12 ч при 65 °С (3 слоя)	24 ч при 90 °С / 30 дней при 20 °С
Работы с изделием без риска	После полного отверждения	Через 4–6 ч после нанесения
УФ-контроль нанесения	Невозможен (нет УФ-пигмента)	Возможен (350–400 нм)
Автоматизированное нанесение	Для селективного нанесения ограничено или невозможно	Любые варианты нанесения
Аэрозольный формат	Не предусмотрен	Доступен
Токсичность	ДГУ – I кл. опасности, ПДК 0,05 мг/м ³	Изоцианаты отсутствуют
Ремонтопригодность	Механически или ацетон	Специальный состав Элтрин С1
Температурный диапазон	–60 ... +120 °С	–65 ... +125 °С
Уд. объёмное сопротивление	≥ 1×10 ¹² Ом·м	≥ 2×10 ¹³ Ом·м
Стойкость к соляному туману / грибкам	Подтверждена (опыт эксплуатации)	Подтверждена испытаниями независимых лабораторий

Печатные узлы с нанесенным лаком Элтрин У1 выдержали испытания в полном объёме, прошли приёмосдаточные испытания, и в результате было принято положительное решение о внедрении лака в серийное производство. Ряд клиентов отметил в качестве преимущества сравнительно высокую толщину одного слоя лака Элтрин У1 при нанесении методом пневматического распыления (около 40 мкм) по сравнению с лаком УР-231 с отвердителем ДГУ, нанесённого таким же способом (около 21 мкм), без дополнительного разбавления лаков.

Заключение

Подводя итоги, можно утверждать, что УР-231 – материал с подтверждённой историей и чётко определёнными условиями применения. Там, где требуется квалификация, подкреплённая десятилетиями эксплуатационной статистики, он остаётся обоснованным выбором. Вместе с тем технологические ограничения двухкомпонентных систем – жёсткие требования к смешиванию, сложность автоматизации, отсутствие УФ-контроля, высокая токсичность отвердителя – превращаются в системные издержки по мере того, как производство движется в сторону автоматизированных линий и ужесточения требований охраны труда.

Практический опыт клиентов показывает: современные однокомпонентные полиуретановые покрытия отечественного производства успешно проходят производственную апробацию и демонстрируют технологические преимущества именно там, где УР-231 создаёт трудности. При этом оба материала совместимы, что позволяет организовать плавный переход без остановки производства.

Элтрин У1 – закономерный этап эволюции российских влагозащитных покрытий для электроники. Сочетание российского происхождения, современных технических характеристик и превосходной технологичности делает этот продукт оптимальным выбором для предприятий, стремящихся к модернизации производства и соответствию новым требованиям отрасли. Время традиционных решений уходит – эра современных технологичных материалов российского производства уже наступила. 

Для получения подробной информации о полиуретановом влагозащитном покрытии Элтрин У1 и по вопросам предоставления образцов и протоколов испытаний обращайтесь к компании-производителю ООО «Остек-Интегра» по электронной почте: materials@ostec-group.ru; по телефону: +7(495)788-44-44.

Использование искусственного интеллекта

в контроле дефектности кристального производства

Текст: Давид Францышин

”

В статье рассмотрена задача автоматической классификации дефектов кремниевых кристаллов отечественного производства. Предложен подход на основе дообучения открытых нейросетевых архитектур, адаптированный к условиям с нестабильностью топологических размеров. Разработанная методика позволяет существенно снизить уровень ложной отбраковки по сравнению с традиционными детерминированными алгоритмами автоматической оптической инспекции.

Введение

Научная новизна представленной разработки заключается в комплексном решении задачи классификации дефектов кремниевых кристаллов отечественного производства в условиях технологической нестабильности топологических размеров, обусловленной изотропным характером жидкостного травления. В отличие от широко распространённых анизотропных плазмохимических процессов, обеспечивающих строгую вертикальность стенок, жидкостное травление, традиционно применяемое на ряде российских предприятий для финишной обработки пластин и селективного вскрытия дефектов, неизбежно сопровождается боковым подтравливанием. Скорость этого процесса существенно зависит от кристаллографической ориентации, плотности дислокаций и локального распределения примесей, что приводит к стохастическому разбросу ширины канавок, радиусов скругления углов и общей геометрии рельефа. Вариации этих параметров могут достигать величин, соизмеримых с критическими размерами самих дефектов (например, микровключений или проколов оксидного слоя), создавая эффект «изотропного шума», который маскирует истинные нарушения кристаллической решётки.

Традиционные системы автоматической оптической инспекции (АОИ), построенные на детерминированных пороговых методах и классических алгоритмах машинного зрения, неприменимы в данных условиях. Их жёсткая привязка к эталонным шаблонам, полученным для идеализированных вертикальных профилей, не учитывает изотропное расширение травящих каналов и изменение контраста на скошенных стенках. Как следствие, закономерные технологические уширения и закругления, порождённые изотропией травителя, интерпретируются алгоритмом как катастрофические нарушения сплошности, что приводит к критически высокому уровню ложной отбраковки (False Positive Rate). По данным производственной статистики этот уровень достигает 95 %. Это вынуждает технологов возвращаться к ручной микроскопии, снижая пропускную способность линий и нивелируя преимущества автоматизации.

Предложенное решение базируется на дообучении (fine-tuning) открытых предобученных архитектур глубоких сверточных нейронных сетей (CNN) и визуальных трансформеров (ViT) с адаптацией к специфике дефектообразования при изотропном жидкостном травлении с плавающими топологическими нормами. Использование CNN позволяет эффективно захватывать локальные текстурные аномалии, возникающие из-за неравномерного бокового подтравливания (например, изменение шероховатости дна канавок), тогда как ViT благодаря механизму самовнимания (self-attention) дают возможность моделировать глобальные контекстные зависимости между удалёнными

областями кристалла, что критично для выявления протяжённых дислокаций и скрытых подповерхностных повреждений, которые могут проявляться в виде систематических искажений формы после травления. Применение единого пайплайна дообучения во фреймворке PyTorch с использованием библиотек предобученных весов (например, из torchvision и HuggingFace Transformers) обеспечивает не только перенос знаний с обширных датасетов естественных изображений на предметную область полупроводниковых материалов, но и оперативную перенастройку модели при смене типа травителя или партии кристаллов без необходимости полного переобучения с нуля. Такой подход позволяет разделить «изотропную добавку» к геометрии, которая является допустимой технологической особенностью, и подлинные дефекты кристаллической структуры, что значительно сокращает время внедрения разработки в производственный цикл российских фабрик и повышает достоверность автоматического контроля.

Подготовка данных для обучения

Эффективность глубоких нейросетевых моделей в значительной степени определяется качеством и репрезентативностью обучающей выборки. В рамках настоящего исследования исходный датасет формировался на основе фотографий поверхности кремниевых кристаллов, полученных с помощью автоматической оптической инспекции (АОИ) после этапа изотропного жидкостного травления. Разметка осуществлялась группой экспертов-технологов на следующие классы: «годный» (без критических нарушений структуры), «брак» (наличие дислокаций, микропроколов, включений или недопустимых геометрических искажений), а также «маркированные» (кристаллы, не прошедшие функциональный контроль параметров, помеченные маркером).

Анализ распределения классов выявил выраженный дисбаланс: количество образцов, отнесённых к классу «годный», превышало число экземпляров класса «брак» приблизительно в 5 раз. Такое соотношение является типичным для производственных данных, однако при обучении нейросетей оно приводит к смещению решающего правила в сторону доминирующего класса, снижая чувствительность модели к редким, но критически важным дефектам. Для устранения этого эффекта применён комплекс методов, включающий предварительную нормализацию входных данных, целенаправленную аугментацию и модификацию функции потерь с весовыми коэффициентами.

Взвешенная перекрестная энтропия (Weighted Cross-Entropy)

Взвешенная перекрестная энтропия (Weighted Cross-Entropy) – это модификация классической функции

потерь, которая позволяет придавать разную степень важности ошибкам для различных классов. Это один из самых популярных и действенных методов для борьбы с несбалансированным датасетом. Принцип его работы заключается в том, что каждому классу присваивается свой весовой коэффициент, обратно пропорциональный частоте, с которой этот класс встречается в датасете. Таким образом, каждый класс вносит одинаковый вклад в ошибку, которую мы пытаемся уменьшить во время обучения.

Аугментация данных

Параллельно с перевзвешиванием потерь применялся набор геометрических и фотометрических преобразований, генерируемых в реальном времени на этапе подачи батчей в сеть. Геометрическая аугментация включала случайные повороты на угол в диапазоне $[-5^\circ, 5^\circ]$, горизонтальные отражения, а также масштабирование с коэффициентом от 0,9 до 1,1 с последующим обрезанием до исходного размера. Фотометрические преобразования состояли в изменении яркости, контрастности и насыщенности в пределах $\pm 20\%$ от номинала. Выбор указанных операций обусловлен физической природой изотропного травления: вариации ориентации, размера и освещённости дефектов на снимках являются естественными следствиями технологического разброса, следовательно, подобные преобразования не нарушают семантику классов и повышают обобщающую способность модели. При этом преобразования применялись преимущественно к образцам класса «брак» с большей вероятностью, чем к «годным» (стратегия «смещения»), что позволяло искусственно сбалансировать представленность классов в каждом батче без потери информации о доминирующем классе.

Формирование обучающих, валидационных и тестовых выборок

Для объективной оценки обобщающей способности разработанного подхода исходный датасет был разделён на три непересекающихся подмножества в пропорции: 70 % – обучение, 15 % – валидация (для ранней остановки и проверки сходимости моделей), 15 % – тестовая выборка, не участвующая в процессе обучения. Разбиение выполнялось стратифицированным способом с сохранением исходного дисбаланса в каждом подмножестве, чтобы обеспечить корректность сравнительной оценки метрик на тестовом наборе. Данные валидационной и тестовой выборок аугментации не подвергались.

Предложенная схема подготовки данных позволяет минимизировать риск переобучения и гарантирует, что улучшение классификационных метрик достигается не за счёт искажения распределения, а за счёт эффективной адаптации предобученных архитектур к специфике дефектообразования при изотропном жидкостном травлении.

Примененные методы и модели

В рамках настоящего исследования использовался подход трансферного обучения на основе открытых предобученных моделей. Выбор архитектур был обусловлен необходимостью обеспечить устойчивость модели к вариациям геометрии, обусловленным изотропным жидкостным травлением, высокой различительной способностью, а также скоростью обработки изображения. Были отобраны четыре модели, охватывающие два основных семейства глубоких нейросетевых архитектур: свёрточные нейронные сети (CNN) – EfficientNet-B7, ResNeXt-101 ($32 \times 8d$), ResNet50 – и визуальный трансформер (ViT) – ViT_b_16. Такое сочетание позволило провести сравнительный анализ эффективности локально-ориентированных и глобально-контекстных подходов в предметной области полупроводниковой дефектоскопии.

Используемые модели

EfficientNet-B7 представляет собой масштабированную версию семейства EfficientNet, полученную путём совместного равномерного увеличения глубины, ширины и разрешения сети на основе составного коэффициента масштабирования. Основа архитектуры базируется на блоках MBConv (Mobile Inverted Bottleneck) с модулями сжатия-возбуждения (Squeeze-and-Excitation), которые адаптивно перекалибровывают каналные характеристики признаков карт. Выбор B7-версии обусловлен наибольшей репрезентативной способностью среди моделей данного семейства (ТОП-1 точность на ImageNet $\sim 84,3\%$) и эффективным использованием параметров, что критично при ограниченном объёме специализированных данных. Высокая глубина сети позволяет фиксировать тонкие текстурные аномалии, возникающие вследствие неравномерного бокового подтравливания.

ResNeXt-101 ($32 \times 8d$) – архитектура, развивающая идеи остаточных связей ResNet и агрегированных преобразований. Вместо глубоких и узких слоёв ResNeXt использует групповые свёртки (32 кардинальности) с шириной каждой группы 8 каналов, что увеличивает разнообразие признаков, извлекаемых на каждом этапе, без значительного роста вычислительной сложности. Глубина в 101 слой и агрегация множества параллельных путей делают данную модель особенно устойчивой к вариациям формы дефектов, характерных для изотропных процессов. Кроме того, использование групповых свёрток обеспечивает лучшую обобщающую способность при работе с высоким уровнем шума.

ResNet50 выбрана в качестве базовой архитектуры «золотого стандарта» для сравнения. Это классическая остаточная сеть с 50 слоями, состоящая из блоков с узкими (bottleneck) остаточными соединениями. Несмотря на меньшую сложность по сравнению с двумя предыдущими моделями ResNet50 остаётся эталоном в задачах медицинской и промышленной визуальной диагностики благодаря проверенной сходимости и лёгкости дообучения. Её использование позволило

Т 1

Характеристики обучения различных open-source моделей

НАЗВАНИЕ МОДЕЛИ	РАЗМЕР ДАТАСЕТА ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ	РАЗМЕР ДАТАСЕТА ДЛЯ ВАЛИДАЦИИ	ТОЧНОСТЬ ВАЛИДАЦИИ	ТОЧНОСТЬ ОБУЧЕНИЯ	ВРЕМЯ ОБУЧЕНИЯ	ВРЕМЯ ОБРАБОТКИ ПЛАСТИНЫ
EfficientNet-7	4098	459	96,1 %	98,94 %	21 час 30 минут	~16 минут 30 секунд
EfficientNet-7	900	120	~91 %	~97 %	~8 часов	~16 минут 30 секунд
ResNetXt-101 32x8d	900	120	~91 %	~91 %	~8 часов	~16 минут 30 секунд
ResNet50	900	120	~84 %	~84 %	~7 часов	~14 минут
ViT_b_16	900	120	70–75 %	70–75 %	~10 часов	~20 минут

оценить минимально необходимую глубину модели для достижения приемлемого качества классификации в условиях производственного дисбаланса.

ViT_b_16 (Vision Transformer base с размером патча 16×16 пикселей) представляет собой принципиально иной подход, основанный на механизме самовнимания (self-attention). В данной архитектуре изображение разбивается на непересекающиеся фрагменты (патчи), которые линейно проецируются в последовательность векторных представлений и подаются на вход трансформера. Благодаря механизму внимания ViT способен моделировать долгосрочные зависимости между удалёнными областями кристалла без ограничений, накладываемых локальностью свёрточных окон. Это свойство особенно ценно для выявления протяжённых дефектов, таких как системные дислокации, нарушающие кристаллическую решётку на масштабах, превышающих размер отдельных канавок травления.

В отличие от CNN ViT изначально не обладает встроенным инвариантом к трансляциям, однако предварительное обучение на больших датасетах (например, ImageNet-21k) позволяет трансформеру выучить обобщённые семантические представления. Для адаптации к изображениям датасета использовалась версия с патчем 16×16 , что обеспечивает баланс между детализацией и вычислительной эффективностью.

Адаптация и стратегия дообучения

Все модели использовались с весами, предварительно обученными на датасете ImageNet (или ImageNet-21k для ViT). Данный выбор обусловлен отсутствием открытых моделей, специфичных для полупроводниковой дефектоскопии, и успешным переносом низкоуровневых признаков (края, текстуры, формы) на целевую область. Для каждой архитек-

туры выполнялось дообучение (fine-tuning) в едином пайплайне фреймворка PyTorch.

Последний классификационный слой каждой сети заменялся на полносвязный слой с тремя выходами (соответствующими классам «годный», «брак» и «маркированный») и инициализировался случайными весами. После этого замораживались все слои, кроме слоев классификатора, и проводилось классическое обучение. Результаты обучения представлены в Т 1.

Разработка программного интерфейса для унификации этапов исследования и внедрения

В ходе выполнения работы выявлена устойчивая потребность со стороны отечественных производителей микроэлектроники в тиражировании предложенного подхода для смежных технологических задач, различающихся типами дефектов и условиями съёмки. Для снижения порога внедрения и обеспечения воспроизводимости экспериментов разработано специализированное прикладное программное обеспечение (ПО), реализующее сквозной пайплайн обработки данных: от разметки исходных изображений до инференса обученных моделей на контрольных выборках. Интерфейс построен на основе трёх функциональных модулей, соответствующих основным этапам работы с нейросетевыми классификаторами: обучение, подготовка датасета и прогнозирование. Архитектура приложения ориентирована на работу с библиотеками PyTorch и автоматическое использование вычислительных ресурсов GPU через CUDA при их наличии.

Модуль обучения моделей

Модуль обучения предоставляет пользователю возможность настройки ключевых параметров дообучения выбранной архитектуры. Предусмотрен выбор

одной из предварительно обученных моделей, рассмотренных в разделе «Примененные методы и модели», либо загрузка пользовательского файла весов в формате .pth для последующего продолжения обучения или тонкой настройки на новом датасете. Интерфейс позволяет задать пути к директориям с обучающей и валидационной выборками, а также управлять гиперпараметрами – размером батча, скоростью обучения, числом эпох и коэффициентом регуляризации – что непосредственно влияет на скорость сходимости и итоговое качество классификации. ПО автоматически детектирует доступные графические ускорители и перенаправляет вычисления на GPU, обеспечивая ускорение обучения без дополнительных действий со стороны оператора.

Модуль разметки и подготовки датасета

Для случаев, когда размеченный датасет отсутствует, предусмотрен отдельный модуль «Датасет», который позволяет выполнять первичную аннотацию изображений в интерактивном режиме. Пользователь загружает исходную неразмеченную папку с изображениями, задаёт имена классов, а затем последовательно просматривает каждое изображение и назначает ему соответствующую метку. Встроенный предпросмотр с масштабированием облегчает визуальный анализ мельчайших структурных особенностей, что особенно важно при работе с дефектами, различимыми только при высоком увеличении. По окончании разметки сформированная структура каталогов автоматически сохраняется в формате, совместимом с модулем обучения, что исключает необходимость ручного переноса файлов.

Модуль прогнозирования (инференс)

После завершения обучения или при наличии готовой модели может быть активирован модуль инференса, предназначенный для оценки классификационной способности на новых данных, не участвовавших ни в обучении, ни в валидации. Пользователь указывает путь к сохранённым весам модели и директорию с тестовыми изображениями, после чего система выполняет пакетную обработку с выводом предсказанных меток и доверительных вероятностей для каждого образца.

Разработанное ПО не только служит инструментальной базой для представленного исследования, но и может быть адаптировано под иные задачи оптического контроля в полупроводниковой промышленности благодаря модульной архитектуре и открытому интерфейсу добавления новых архитектур.

Заключение

Итоговая классификационная модель демонстрирует выделение трех целевых классов:

- «годный» – пригодные к дальнейшему использованию кристаллы;

- «брак» – кристаллы с критическими дефектами топологии;
- «маркированный» – экземпляры, не прошедшие функциональное тестирование.

На тестовой выборке достигнута общая точность (accuracy) 96,1 %, что подтверждает эффективность предложенного подхода для автоматизации контроля качества в условиях технологической нестабильности производства.

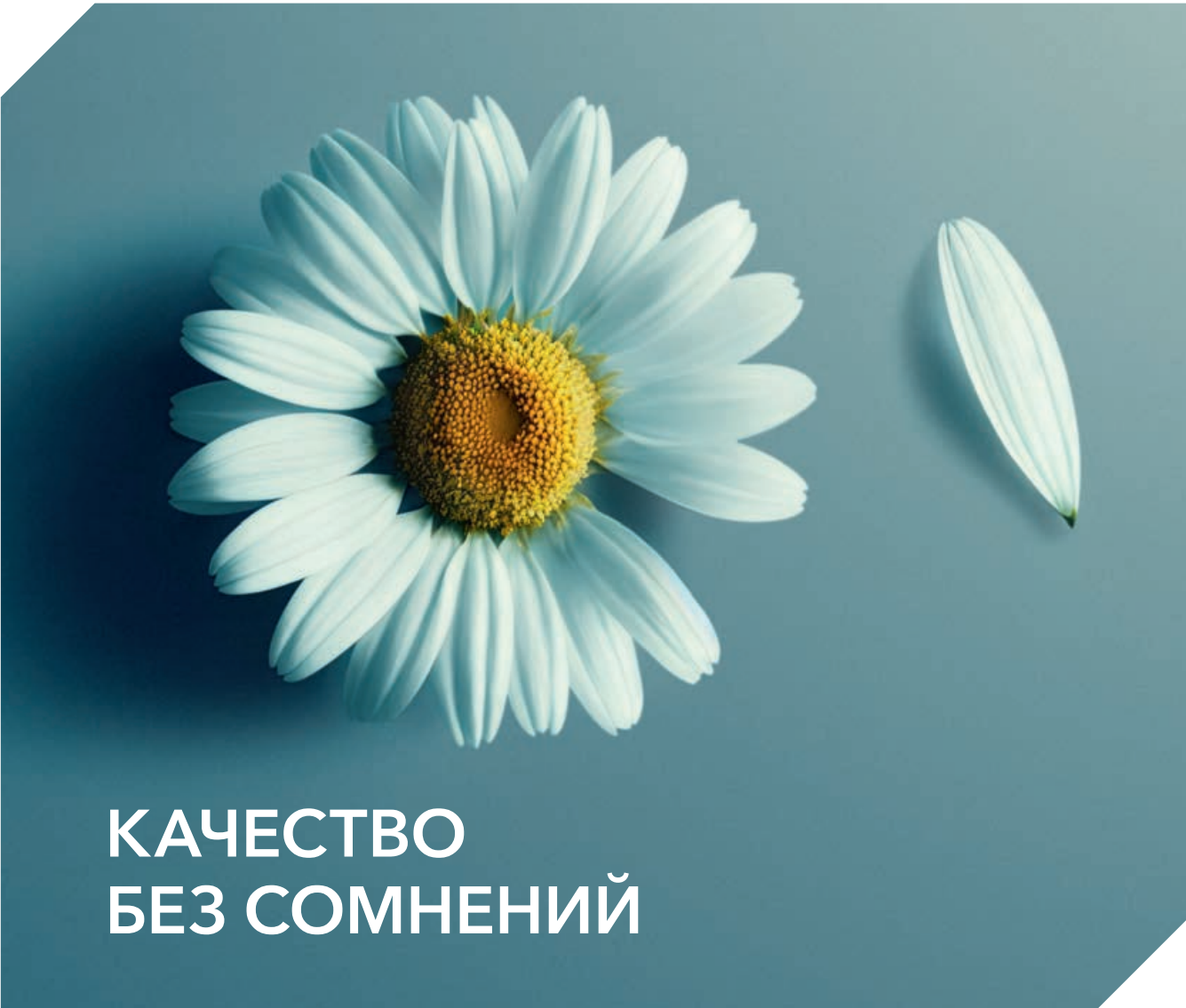
В совокупности представленные решения формируют новый подход к автоматизации оптического контроля в микроэлектронном производстве, интегрирующий методы трансферного обучения, продвинутые техники балансировки данных и функционально ориентированную классификацию.

Помимо методологической значимости представленная работа имеет выраженную прикладную ценность. Разработанное программное обеспечение с графическим интерфейсом позволяет оперативно переносить предложенный подход на новые производственные задачи без привлечения специалистов по машинному обучению, сокращая время внедрения с нескольких месяцев до нескольких дней. Модульная структура и автоматическое использование GPU делают его доступным для использования в условиях серийного производства, а встроенные средства разметки и валидации обеспечивают замкнутый цикл разработки: от сбора данных до промышленного развёртывания.

Внедрение подобных инструментов на российских предприятиях микроэлектроники может стать важным шагом к повышению выхода годных кристаллов и снижению доли ручного контроля, что подтверждается результатами экспериментов, описанными в следующем разделе. 

Использованная литература

1. Fu C.J., Chen H.L., Tseng H.Y. Application of artificial intelligence to improve chip defect detection using semiconductor equipment // Engineering Proceedings. 2025. Т. 98. №. 1. С. 26.
2. Patel D.V., Bonam R., Oberai A.A. Deep learning-based detection, classification, and localization of defects in semiconductor processes // Journal of Micro/nanolithography, MEMS, and MOEMS. 2020. Т. 19. №. 2. С. 024801–024801.
3. Чирков О.Н. и др. Оптимизации оценки качества полупроводниковых пластин с помощью нейротехнологий cnn // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2025. Т. 21. №. 1. С. 81–87.
4. Панфилова Е.В., Ибрагимов А.Р., Францшин Д.В. Нейросетевая модель для корректировки процесса исследования коллоидных нано-и микроструктур методом атомно-силовой микроскопии // НАНОИНДУСТРИЯ Учредители: АО «Рекламно-издательский центр» Техносфера». 2024. Т. 17. №. 6. С. 346–354.



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

Оборудование для тестирования полупроводни- ковых приборов в процессе производства

Текст: Андрей Насонов

”

Разумеется, в одной статье невозможно охватить все многообразие технических средств, которые используются при тестировании полупроводниковых приборов, – в зависимости от типов и назначения ПП применяются принципиально разные подходы и технологии. Рассмотрим случай, когда изготавливаются аналоговые компоненты, и тестирование осуществляется как зондовыми методами на пластине, так и в корпусированном виде.



1

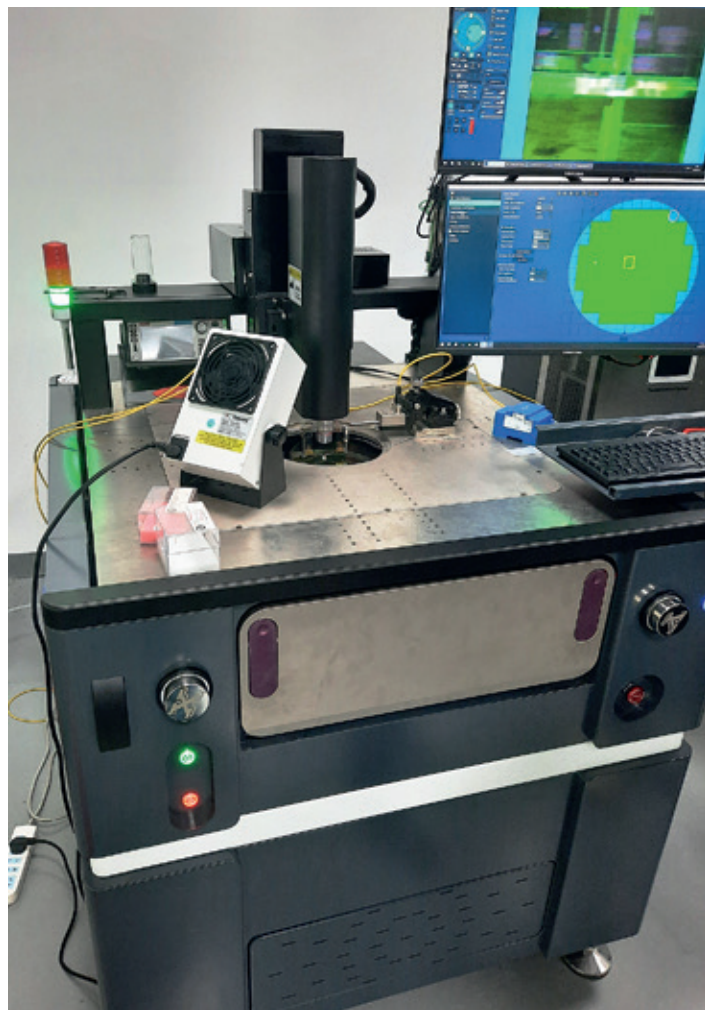
Комплекс Детерминал-ЗП

Технология производства аналоговых компонентов, в особенности прецизионных, может предусматривать использование подгонки параметров с помощью лазерной или электрической коррекции на пластине. Существенным фактором при выборе средств измерения для построения тестера является быстродействие. Именно от быстродействия средств измерения зависит производительность оборудования в целом. Время, которое потребуется для выполнения перемещений, для современной зондовой станции, как правило, не является определяющим. Время, необходимое на само измерение, может быть на порядок больше. Если необходимы измерения с высокой точностью, это тоже потребует дополнительных временных затрат. Именно необходимостью быстрых измерений обусловлено применение специальных приборов.

Конечно, практически любые измерительные задачи можно решить, применяя различные модули, например на платформе PXI или обычные измерительные приборы, но только в том случае, если быстродействие не нужно. Если исходить из реалий отечественной промышленности, то необходимы измерительные комплексы, которые могут работать как совместно с автоматическими зондовыми станциями, так и в составе рабочих мест для тестирования корпусированных компонентов. Программное обеспечение должно позволять быстро менять конфигурацию комплекса для перехода к тестированию другого компонента. Для нашей промышленности характерно наличие большой номенклатуры при относительно невысокой серийности. Поэтому такое понятие как «новое тестовое решение за дополнительные деньги» мало приемлемо. Простота перехода на другое изделие должна обеспечиваться за счет открытой архитектуры софта, что позволит самостоятельно менять конфигурацию без услуг разработчика системы.

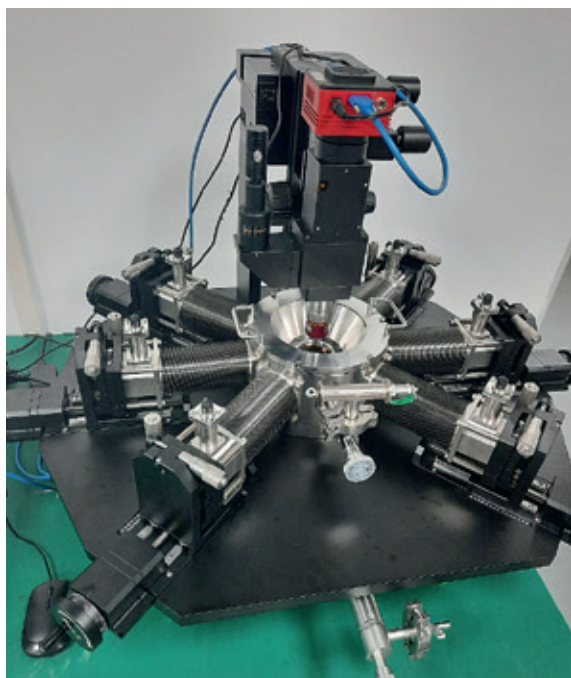
Для решения таких задач разработан комплекс Детерминал-ЗП, на рис 1 он представлен в варианте настольного рабочего места.

Комплекс состоит из набора источников измерителей. Базовыми для него являются: Б6-8, Б6-9 и Б6-20, их количество может варьироваться в зависимости от задачи. Источник-измеритель Б6-20 является высоковольтным и позволяет работать до уровня напряжения 2000 В. В состав комплекса входит коммутатор – базовый типа М24А42, но можно использовать любой из линейки коммутаторов, выпускаемых ООО «Остек-Электро». А также такие собственные разработки компании, как микроомметр Е6-42, измеритель LC Е7-35 и другие. Все эти приборы внесены в Госреестр средств измерений. Также возможно использование приборов других производителей. Кроме того, в состав комплекса может входить специализированная оснастка для подключения тестируемых компонентов. При поставке возможен заказ любых адаптерных устройств для подключения компонентов, они будут разработаны и изготовлены в составе комплекса.

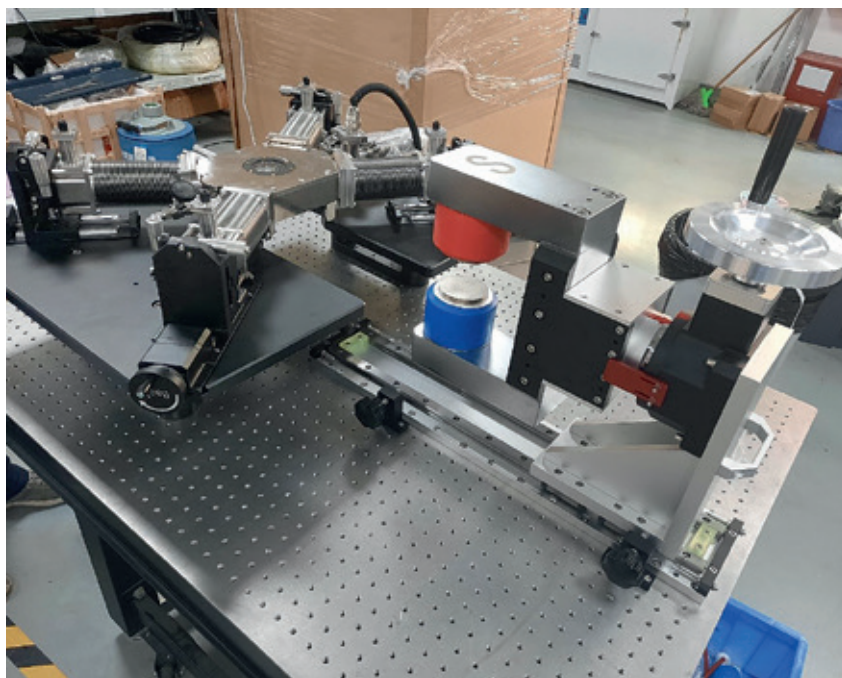


2

Полуавтоматическая зондовая станция



3
Криогенная зондовая станция



4
Зондовая станция с возможностью воздействия магнитным полем

Детерминал-3П также предназначен для совместной работы с зондовыми станциями. Неавтоматическая зондовая станция практически выполняет роль адаптера, и принципиальных отличий в работе комплекса практически нет. Если используется полуавтоматическая зондовая станция, то они работают совместно, и тестирование в пределах пластины идет в автоматическом режиме с фиксацией результатов и возможностью электрической коррекции, например подачи тока для пережигания переключателей.

Зондовые станции могут различаться как по уровню автоматизации, так и по наличию дополнительных возможностей, их варианты представлены на рис 2, 3 и 4.

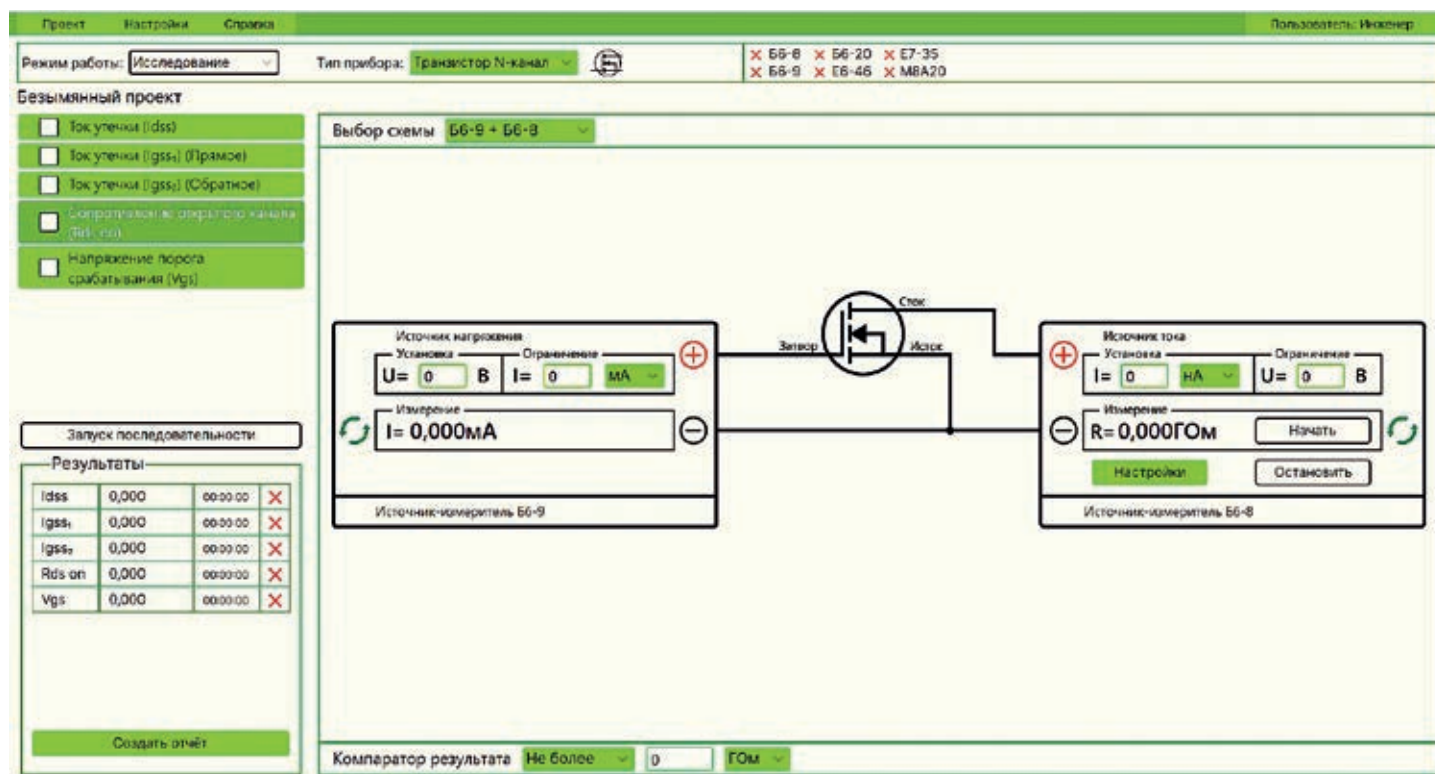
Если комплекс Детерминал-3П используется для работы с корпусированными компонентами, температурное воздействие может быть реализовано с использованием специальных термоэлектрических платформ разработки ООО «Остек-Электро». Они бывают трех модификаций: Альфа, Бета и Гамма.



5
Вакуумная термоэлектрическая платформа Альфа



6
Стенд для измерения ТКС резисторов



7

Интерфейс программы создания тестов

Вакуумная термоэлектрическая платформа Альфа обеспечивает диапазон температурного воздействия на тестируемый компонент от -65 до $+125$ °C, причем для локального охлаждения компонента до -60 °C достаточно 10 минут. На базе термоэлектрической платформы Гамма существуют готовые стенды для измерения ТКС резисторов и ТКЕ конденсаторов. Установка в автоматическом режиме измеряет сопротивление или емкость при различных температурах, строит график изменения параметра и рассчитывает коэффициент ТКС или ТКЕ. Точно также можно определять ТКС и ТКЕ, используя криогенную зондовую станцию.

Программное обеспечение Детерминал-3П позволяет пользователю самостоятельно создавать тесты на компоненты. Интерфейс интуитивно понятен и подробно описан в Руководстве оператора ЛДПА.411-12.00.000РЭ. Примеры приведены на рис 7.

В программе можно работать в двух режимах: в инженерном режиме доступна возможность менять режимы измерений; в режиме оператора такой возможности нет. И, разумеется, доступно создание отчетов в любом необходимом формате. 

Комплекс Детерминал 3П не является простой компиляцией измерительных приборов для решения локальной задачи. Это результат целенаправленной работы по созданию универсальной, полностью отечественной тестовой платформы с открытой архитектурой.

Индустрия 5.0 – переосмысление промышленного прогресса

Текст: Александр Антонов

Сегодня, пока мы все еще осознаем важность развития 4-й промышленной революции и постепенно ее внедряем, в мире уже начали говорить о следующем ее этапе – о так называемой 5-й промышленной революции или Индустрии 5.0. Известно, что для текущей промышленной революции характерна трансформация производственных процессов через масштабную автоматизацию, интеграцию цифровых технологий, развитие идеи интернета вещей (IoT) и применение искусственного интеллекта (AI). Ее цель – создание «умных заводов» (Smart Factories), на которых все этапы жизненного цикла продукции максимально автоматизированы и цифровизированы. В рамках развития Индустрии 4.0 в радиоэлектронной отрасли можно наблюдать не только стремительное развитие и внедрение различных инновационных программных решений – например, для ускорения подготовки производственных программ для оборудования, автоматизации контроля качества, аналитики собираемых с оборудования данных и пр. – но и появление нового класса оборудования, способного автоматизировать большинство технологических процессов, которые традиционного выполнялись человеком.

Уже доступен новый класс полностью автоматических принтеров и автоматов установки компонентов, способных без участия человека производить автоматическую переналадку при переходе на сборку нового изделия. Современные модели трафаретных принтеров способны в автоматическом режиме менять рамы трафаретов и производить автоматическое пополнение паяльной пасты по мере ее расхода. Аналогично, передовые модели автоматов установки компонентов могут не просто менять сборочную программу и режимы работы конвейера, но и без участия человека изменять конфигурацию баз питателей, произво-

дить автоматическое пополнение компонентов в процессе сборки.

Все эти достижения современной науки и техники выглядят интересно и перспективно, но что же тогда будет представлять собой переход на следующий этап – Индустрию 5.0?

Сам термин «Индустрия 5.0» пока еще не имеет официального статуса, но под ним подразумевается качественное переосмысление и эволюция подходов, развиваемых в рамках текущей Индустрии 4.0. Помимо т.н. «технологического апгрейда» предполагается осуществить переход к человекоцентричной, гибкой и устойчивой/резильентной промышленности. Главная особенность этой концепции в том, что новые технологии, такие как искусственный интеллект и робототехника, будут использоваться для расширения возможностей человека, а не для полного его исключения из производственного процесса. Предполагается, что новые технологии возьмут на себя всю рутину и монотонные задачи, освобождая человека для решения нестандартных и сложных задач, проявления креативности, поиска инноваций и принятия стратегических решений.

Уже сейчас ряд предприятий тестирует и постепенно внедряет подходы, построенные на тесном сотрудничестве человека и современных технологий: цифровых ассистентов и сервисов, коллаборативных и гуманоидных роботов, специализированного программного обеспечения, активно использующего искусственный интеллект и цифровых двойников для моделирования различных производственных процессов.

Появляются программные продукты и решения, способные моделировать технологические процессы уже не в рамках отдельного станка или операции, как например, моделирование процесса сборки на автомате установки



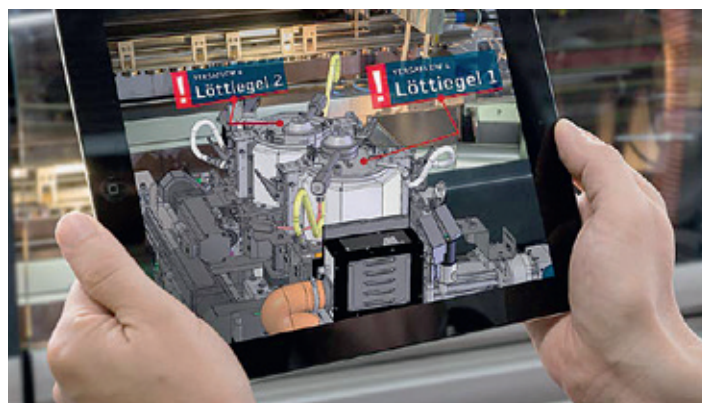
1

Пример моделирования логистических процессов и операций на цифровых двойниках

компонентов или моделирование температурного профиля пайки на базе математической модели паяемого изделия, а в рамках завода в целом. Таким образом, еще на этапе проектирования производственных помещений возможен прогон различных сценариев сборки изделий при различном размещении оборудования и сборочных линий для исключения «ошибок проектирования» и достижения максимально эффективной работы будущего предприятия. Зарубежные компании уже сейчас создают виртуальные копии заводов и моделируют логистические процессы и операции.

Параллельно с этим предполагается развитие новых человеко-машинных интерфейсов для повышения эффективности взаимодействия человека с современными технологиями. Примерами таких интерфейсов служат технологии виртуальной (VR) и дополненной реальности (AR). Виртуальная и/или дополненная реальность (н-р через планшет или специальную гарнитуру) уже сейчас повсюду используется не только для демонстраций, но и для ускорения обучения, моделирования различных процессов, планирования размещения оборудования, непосредственной работы с оборудованием и т. д. Дополненная реальность может успешно выполнять функции цифрового ассистента при ремонте и обслуживании оборудования. В этом случае на экран планшета или гарнитуры выводятся необходимые инструкции и подсказки вплоть до полной 3D-визуализации обслуживаемых узлов. Эти возможности позволяют быстрее выявить и локализовать проблемы и приступить к их устранению. Получив информацию о номере неисправной детали на экране, можно сразу же дать команду на ее оперативную закупку.

Постепенно расширяется ассортимент коллаборативных роботов, заточенных под взаимодействие и совместную работу с человеком. Класс таких роботов оснащен специальными встроенными системами безопасности и обнаружения человека (н-р камерами, лидарами, тензодатчиками и пр.). К таким роботам можно отнести современных логистических роботов AMR (Autonomous Mobile Robot), способных автоматически изменять/оптимизировать маршруты перемещения при обнаружении различных препятствий. Активно ведется разработка гуманоидных

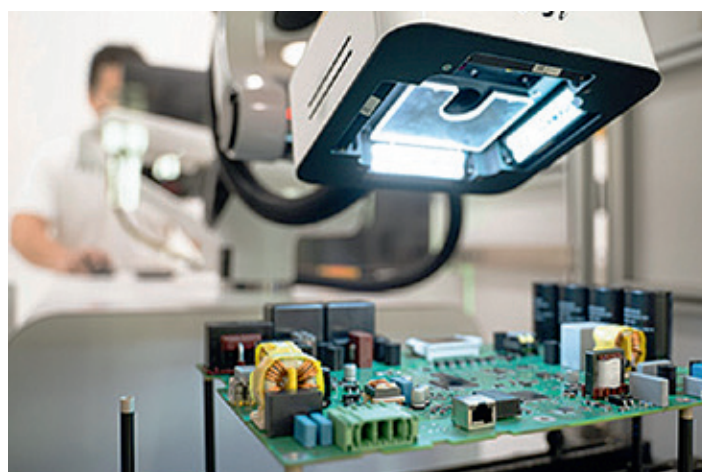


2

Пример простейшего использования дополненной реальности при обслуживании оборудования

роботов, способных воспроизводить действия человека и обучаться, наблюдая за действиями оператора. На рынке уже сейчас существуют различные модели коллаборативных роботов для совместной работы и автоматизации различных трудоемких операций (обработки, сборки, контроля и т. д.).

Таким образом, несмотря на то, что термин «Индустрия 5.0» пока еще официально не устоялся, уже сегодня можно разглядеть и представить возможные тренды развития данной концепции. Эти тренды — симбиоз человека и технологий, дальнейшее развитие ИИ, цифровые двойники целых заводов, VR/AR-ассистенты и коллаборативные роботы и роботы с динамической навигацией. Предполагается, что все это будет формировать человекоцентричную промышленность, где технологии будут усиливать креативность и стратегический потенциал работников, а не вытеснять их. Переход к Индустрии 5.0 обещает гибкость, устойчивость и резильентность, что особенно актуально для радиоэлектронной отрасли с ее, порой, сложными и запутанными процессами. Предприятия, которые будут постепенно внедрять новые принципы, обеспечат себе устойчивое лидерство в будущем. 



3

Пример использования коллаборативного робота для проведения оптического контроля на различных участках сборки

Автоматизация ремонтных операций

Текст: Виктор Орешков

В условиях стремительного развития радио-электронной промышленности, с появлением более высокотехнологичной и сложной радиоэлектронной аппаратуры, особенно в сферах телекоммуникаций, автомобильной электроники и производства компьютерной и мобильной техники, ручной ремонт печатных плат становится узким местом. Он сильно зависит от человеческого фактора, сопряжен с низкой повторяемостью и высокой трудоемкостью. Как минимизировать эти факторы?

Решением служит внедрение автоматизированных ремонтных центров, которые не только ускоряют процессы, но и повышают качество, снижая трудоемкость выполняемых операций.

От полуавтоматических до полностью автоматических систем

На рынке представлен широкий спектр оборудования – от полуавтоматических станций до высокотехнологичных полностью автоматических комплексов.



1

Полуавтоматический ремонтный центр



2

Автоматическое позиционирование при помощи системы технического зрения

Полуавтоматические ремонтные центры (рис 1) идеально подходят для ремонта плат малых и средних размеров и компонентов размером до 80 × 80 мм. Ключевые преимущества таких центров:

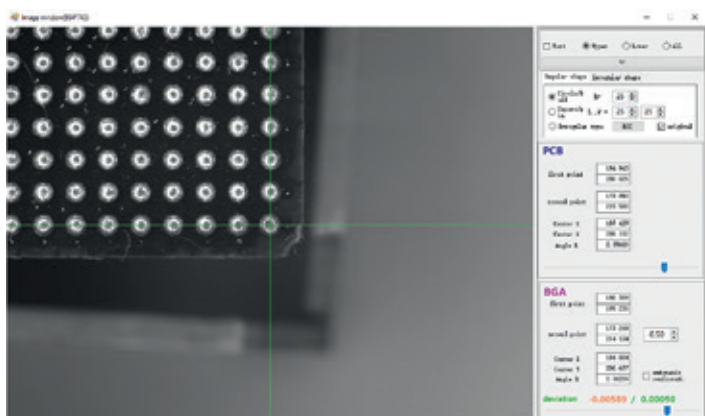
- **Гибкость и простота эксплуатации.** Встроенный промышленный компьютер с предустановленным ПО позволяет оперативно настраивать и корректировать температурные профили пайки в режиме реального времени.
- **Компактность.** При габаритах 1000 × 835 × 960 мм и массе всего 130 кг ремонтная станция легко помещается на рабочее место.
- **Автоматизация.** Ремонтная станция автоматически выполняет забор, монтаж и демонтаж компонентов с помощью вакуумного захвата, а также оснащена функцией быстрого оптического центрирования с точностью до $\pm 0,01$ мм.

Однако для производств, требующих максимальной автономности и точности и производящих крупногабаритные и теплоемкие печатные узлы, необходимы решения следующего уровня – полностью автоматические ремонтные центры.



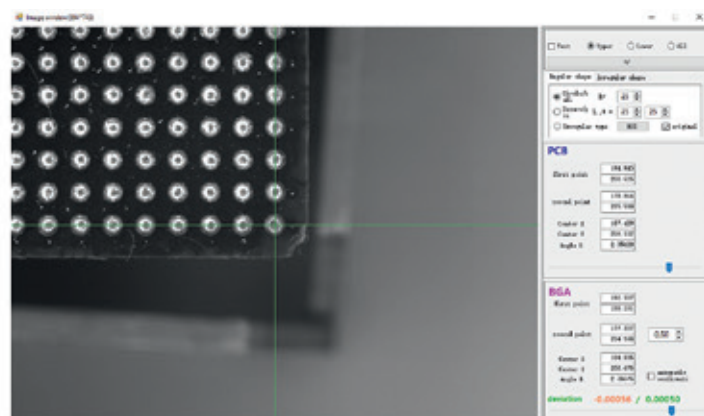
Их ключевые технологические преимущества:

- **Автоматическое позиционирование при помощи системы технического зрения.** Использование системы технического зрения обеспечивает повторяемую точность позиционирования до $\pm 0,01$ мм. Программное обеспечение автоматически корректирует угол поворота компонента, полностью исключая ошибки юстировки (рис 2, 3).
- **Промышленная надежность и точность.** Основа центра – промышленный компьютер и четырехкоординатная порталная конструкция (X/Y/Z/R), движущаяся по прецизионным шарико-винтовым передачам на гранитной станине. Такая конфигурация гарантирует сверхточное перемещение (рис 4).
- **Гибкая система нагрева.** Станция оснащена тремя независимо управляемыми зонами: верхний/нижний конвекционный нагрев для монтажа/демонтажа компонентов, нижний ИК-предварительный нагрев для равномерного прогрева всей платы (рис 5).



3

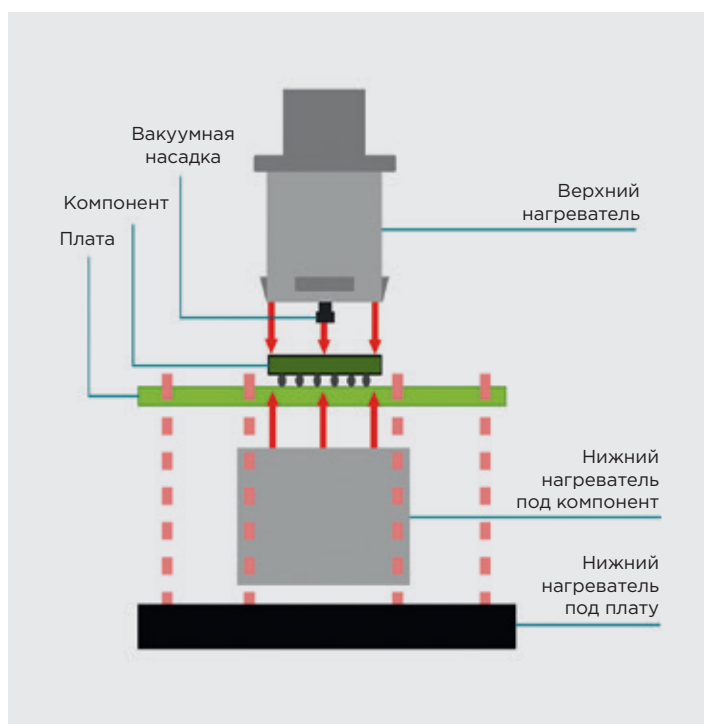
Изменение угла поворота компонента в ПО





4

Конструкция рабочей области



5

Структурная схема нагревателей

- **Интеграция в цифровую среду предприятия.** Ремонтный центр может быть подключен к MES-системам, что позволяет автоматически привязывать температурные профили пайки к серийному номеру изделия, обеспечивая полную прослеживаемость.
- **Защита компонентов и ПУ.** Встроенный деионизатор устраняет статическое электричество, защищая чувствительные компоненты от повреждения. ☒

Автоматизация ремонтных операций стала необходимостью для современных высокотехнологичных производств, а выбор между полуавтоматическим или полностью автоматическим ремонтным центром полностью зависит от задач, которые предстоит решать.

Автоматизация конвейерных систем:

как одним нажатием перенастроить всю линию?

Текст: Виктор Орешков

Эра ручных переналадок на производственных линиях уходит в прошлое. Сегодня автоматизация затрагивает не только основные технологические процессы, но и такой этап, как переналадка конвейерных систем. За счет увеличения скорости данной операции в значительной степени повышаются гибкость и эффективность производства.

Разберем три ключевых аспекта автоматизации конвейерных систем, итак...

■ Автоматизированное изменение ширины конвейера

В современных конвейерных системах достаточно просто ввести требуемое значение ширины прямо в интерфейсе ПЛК и нажать кнопку «СТАРТ».

Как это работает? Команда от ПЛК поступает на сервоприводы, которые приводят в движение подвижную рельсу конвейера. Они синхронно и точно перемещают рельсу на заданное расстояние, полностью исключая перекосы.

Выгода: сокращение времени переналадки до считанных секунд, абсолютная повторяемость и исключение человеческого фактора.

■ Синхронная переналадка всех конвейерных систем в линии: комплексный подход

В составе производственной линии, например в линии монтажа на поверхность, присутствует значительное количество различных конвейерных систем – загрузчики, соединительные конвейеры, буферы, разгрузчики и т. д. Изменять ширину на каждой единице отдельно – неэффективно.

Как это работает? Одно из устройств (например, загрузчик) назначается «мастер-устройством». Оператор задает новую ширину именно на нем, и нажатием всего лишь одной кнопки заданное значение ширины применяется ко всем конвейерным системам в составе линии.

Выгода: максимальное сокращение времени простоя линии при переходе на другое изделие.

■ Автоматизированное изменение ширины магазинов

Ручная переналадка ширины магазинов также занимает достаточное количество времени при переходе на новое изделие. Автоматизация данного процесса замыкает цикл автоматизации конвейерных систем.

Как это работает? Внутри загрузчика или разгрузчика есть специальный механизм, который автоматически подцепляется к подвижной стенке магазина. Получив команду от ПЛК, он перемещает эту стенку на заданное расстояние, тем самым изменяя ширину магазина.

Выгода: полное исключение ручного труда. Переналадка всех конвейерных систем в линии теперь может происходить в полностью автоматическом режиме.

Итог: автоматизация конвейерных систем – это реальный инструмент для повышения гибкости производства. Возможность перенастроить всю линию на новый продукт является колоссальным конкурентным преимуществом в условиях многономенклатурного производства. ▢

Особенности пайки в паровой фазе.

Технология, о которой спорят до сих пор

Текст: Виктор Орешков

Технология пайки в паровой фазе (конденсационная пайка) появилась одной из первых, потом была забыта, а сегодня переживает второе рождение. Причина – директивы RoHS, усложнение компонентов и эволюция собираемых изделий. В Европе технологию пайки в паровой фазе применяют давно, в России же к ней долго присматривались. Но когда интерес вспыхнул, встал вопрос: насколько маркетинг совпадает с реальностью? Опытные технологи знают – не все так гладко, как в брошюрах.

Разберем ключевые аргументы «за» и скрытые нюансы, которые появляются только в работе. Итак...

■ Аргумент 1: идеальная равномерность нагрева.

Кажется, что пар огибает любые компоненты, прогревая плату так, как того требует техпроцесс. Но современные конвекционные печи тоже дают минимальный разброс температур.

Нюанс: на дешевых установках разница температур по плате может достигать 20 °С. Так что равномерность в большей степени зависит не от технологии, а от класса оборудования.

■ Аргумент 2: перегрев невозможен.

Температура кипения теплоносителя фиксирована. Плата физически не нагреется выше.

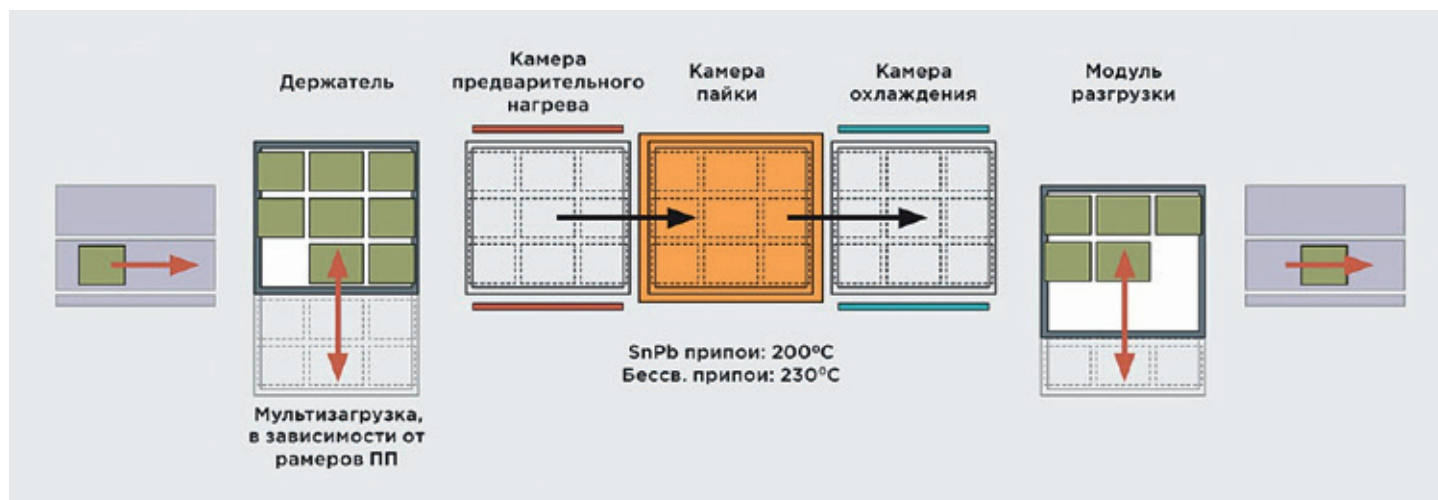
Нюанс: со временем легкие фракции испаряются, и точка кипения может уйти вверх на 5-7 °С. В некоторых случаях это может быть критично для компонентов. Проблема решается конструкцией печи с обратной связью, но она есть не у всех.

■ Аргумент 3: профиль настраивать не нужно, паяй все подряд.

Звучит как рай для многономенклатурного производства.

Реальность: многие забывают про этапы преднагрева, стабилизации и охлаждения, которые могут быть важны для компонентов, где критичен градиент температуры. В паровой фазе тепло передается очень быстро, разница во времени оплавления пасты в 0,2 секунды может вызвать дефект в виде «надгробного камня»

Итог: настраивать профиль все равно нужно, просто инструменты другие



1

Схема движения ПП по стадиям процесса

■ **Аргумент 4:** Вакуум убирает пустоты.

Это тренд. Вакуум якобы повышает надежность, удаляя поры.

Сложности:

- › исследования IPC показали – пустоты в BGA не всегда снижают надежность;
- › при перемещении платы с расплавленным припоем в вакуумную камеру температура часто проседает (до 40 °C), а потом узел снова подвергается нагреву. Это стресс для печатного узла;
- › увеличивается время нахождения припоя выше точки плавления, растет интерметаллидный слой, из-за чего соединение становится более хрупким.

Но как бы там ни было, конденсационная пайка – очень перспективная технология, которая будет эффективно работать в надежных руках. Низкое количество пустот, качественные паяные соединения, практически полная невозможность перегрева, равномерность распределения тепла, отсутствие расслоения печатных плат, эффективная теплопередача, а при этом еще и компактность и сравнительно невысокое энергопотребление. Но, повторюсь, очень многое зависит от оборудования, которое должно сводить к минимуму упомянутые побочные эффекты, а еще больше от человека, который работает с этим оборудованием. ▢

Пустоты в паяных соединениях.

Образование, контроль, способы уменьшения

Текст: Юрий Поздеев

Пустоты (voids) – это структурные дефекты внутри паяного соединения, представляющие собой полости, заполненные газами или остатками флюса. Пустоты ухудшают механическую прочность, теплопроводность и электрическую проводимость контакта. При термоциклировании они становятся центрами зарождения трещин, приводящих к разрушению паяного шва. Их наличие в большом количестве может повлечь за собой выход устройства из строя.

Пустоты в паяных соединениях возникают из-за застревания пузырьков газа в расплавленном припое во время его затвердевания. Согласно стандартам IPC-A-610 «Приемлемость электронных сборок» и IPC-7095 «Проектирование и сборка BGA» допустимый уровень пустот для большинства соединений составляет не более 25 % от площади контакта. Для силовой электроники этот порог может быть снижен до 10 %.

Виды пустот

На рис 1 показаны типичные размеры и расположение пустот различного вида в паяных соединениях BGA. Пустоты разных типов по-разному влияют на надежность паяных соединений.

- Макропустоты (1). Крупные полости (диаметр 100-300 мкм и более), возникающие в основном из-за активного газовыделения флюса, встречаются в паяных соединениях чаще всего. Как правило, не влияют на надежность паяных соединений, если не располагаются в межфазных областях, вдоль которых

обычно распространяются трещины. Пустоты такого типа критически снижают механическую прочность. Из-за их наличия при вибрациях и ударах устройства в основном происходит отрыв компонента.

- Планарные микропустоты (2). Мелкие поры (обычно диаметром от 25 до 60 мкм), располагающиеся приблизительно в одной плоскости, расположенной на поверхности раздела между площадками платы и припоем. Возникают из-за окисления, недостаточного смачивания или слишком быстрого охлаждения, также причиной их появления могут быть каверны в меди на площадках под слоем финишного покрытия ImAg. Такие пустоты не влияют на первоначальное качество изделия, но могут воздействовать на долговременную надежность паяных соединений.
- Пустоты усадки (3). Могут быть вызваны усадкой при отвердевании в основном сплавов SAC и других бессвинцовых припоев. Обычно находятся внутри паяного соединения, не появляясь вблизи поверхности контакта припоя с площадками платы. В большинстве случаев не влияют на надежность.
- Пустоты в микропереходах (4). Обусловлены наличием микропереходов в конструкции площадок платы. Крупные пустоты в микропереходах в случае их появления в паяных соединениях, расположенных в высоконагруженных областях корпуса, могут повлиять на надежность соединений.
- Микропустоты IMC (5). Возникают в интерметаллических соединениях (IMC), образующихся между

медью и припоями с высоким содержанием олова, включая SAC и оловянно-свинцовые припои. Микропустоты ИМС формируются не сразу после процесса пайки, а после высокотемпературного старения или во время термоциклирования паяных соединений. Эти пустоты могут повлиять на надежность паяных соединений, особенно в случаях образования хрупкого разрушения в слое ИМС при падении или механическом ударе.

- Пустоты в виде проколов (6). Располагаются внутри или сразу над слоем интерметаллидов. Появляются вследствие того, что реактивы, попавшие в проколы на медных контактных площадках платы при ее изготовлении, испаряются в процессе пайки оплавлением. Происходит это по причине отклонений в технологическом процессе нанесения меди у производителя плат. При большом их количестве могут повлиять на надежность паяных соединений.

Факторы, влияющие на образование пустот

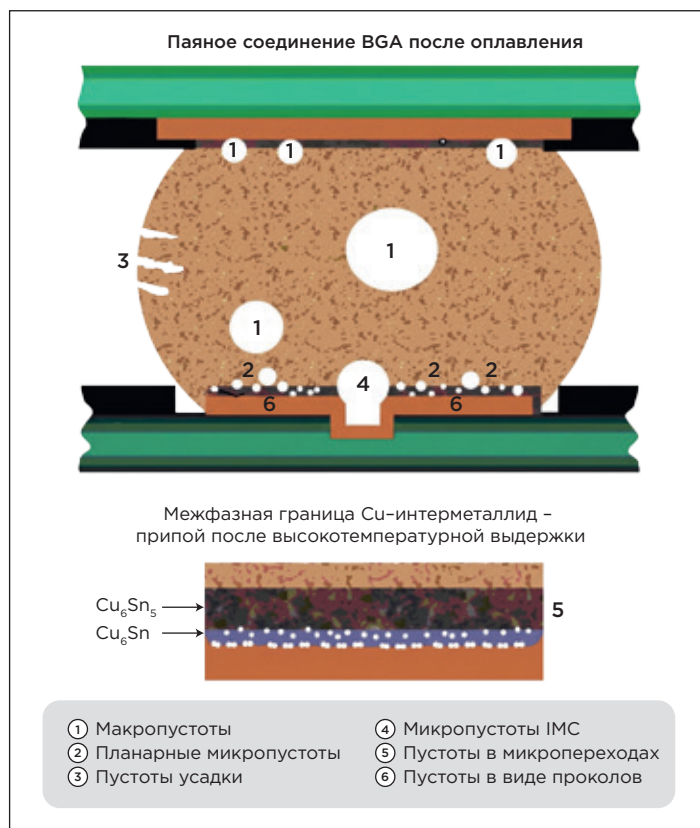
Из-за множества влияющих факторов процесс образования пустот не до конца изучен. Замечено, что недостаточное качество паяльных паст, их грубое раскатывание и заполнение отверстий трафарета могут стать причиной поглощения пузырьков воздуха. Это может привести к плохому осаждению паяльной пасты на печатной плате и дальнейшему образованию пустот при пайке оплавлением. Состав паяльной пасты, условия ее хранения и обращения с ней также влияют на образование пустот.

После нанесения паяльной пасты через трафарет следует установка компонентов с помощью установщиков компонентов. Компоненты вдавливаются в паяльную пасту с усилием, предварительно заданным монтажной головкой. Неправильно установленная сила прижима может привести к изменению формы ранее нанесенной паяльной пасты и, как следствие, к увеличению количества воздушных пузырьков внутри паяльной пасты.

После этого печатная плата с установленными компонентами поступает в конвекционную печь, где происходит оплавление паяльной пасты. Многие исследования показали, что образование пустот сильно зависит от параметров пайки, включая зону предварительного нагрева, пиковую температуру и время выдержки. Направление теплового потока и охлаждение также могут оказывать влияние на свойства и структуру получаемых паяных соединений и образование пустот.

Механизмы образования пустот

- Испарение растворителей флюса, находящихся в паяльной пасте. На стадии предварительного нагрева припоя из флюса выделяются летучие вещества, часть которых не успевает выйти из припоя при нагреве. Если припой застывает быстрее, чем эти вещества успевают выйти на поверхность, в объеме припоя остаётся пузырёк газа.



1

Виды пустот в паяных соединениях

- Выделение из флюса активаторов, продуктов реакции активаторов с окислами, содержащимися на поверхности контактных площадок печатной платы и на выводах компонентов. Эти вещества не успевают выйти из припоя до его застывания и остаются в паяном соединении. Наличие оксидов на выводах компонентов или контактных площадках препятствует смачиванию, поэтому эти оксиды подлежат удалению.
 - Усадка паяного соединения при охлаждении. При затвердевании припоя уменьшается в объеме, что может приводить к образованию пустот. Возникает преимущественно в центре паяного соединения (особенно в BGA) из-за разницы скоростей охлаждения краев и центра.
 - Захват воздуха. Пузырьки воздуха, находящиеся между сферическими частицами припоя, при оплавлении припоя не успевают выйти через флюс и оказываются запертыми внутри паяного соединения.
- Образованию пустот способствуют следующие факторы:
- Наличие окислов на контактных площадках.
 - Использование некачественной или неподходящей паяльной пасты.
 - Неправильный температурный профиль.
 - Большой объём паяльной пасты. Крупные паяные соединения, предполагающие нанесение на них большой массы припоя (например, центральные площадки QFN), затрудняют выход газов из паяльной пасты.



2

Факторы, влияющие на образование пустот в процессе пайки

Методики снижения образования пустот

Существует два подхода к сокращению количества пустот:

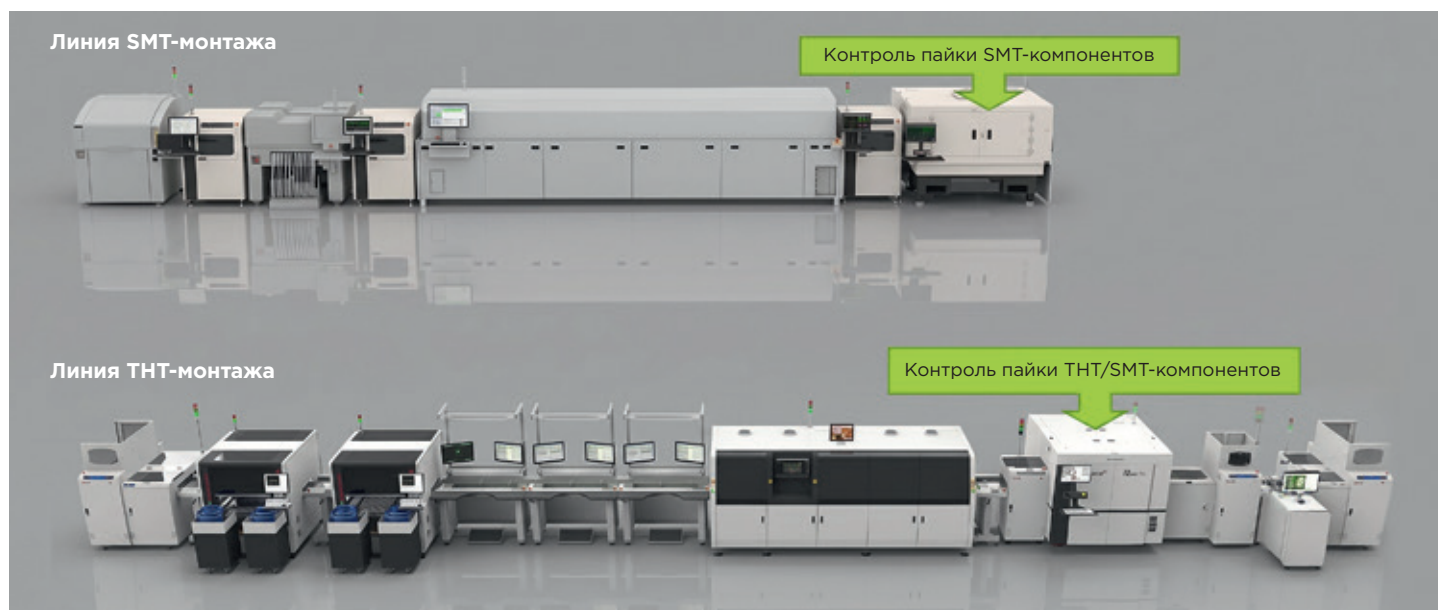
1. Уменьшение количества летучих соединений, выделяемых на стадии плавления припоя.
2. Способствование выходу образовавшихся летучих соединений.

Для снижения уровня пустот требуется комплексная настройка всей технологической линии.

- Состав паяльной пасты может значительно повлиять на присутствие пустот в паяном соединении. Необходимо использовать паяльные пасты с низким

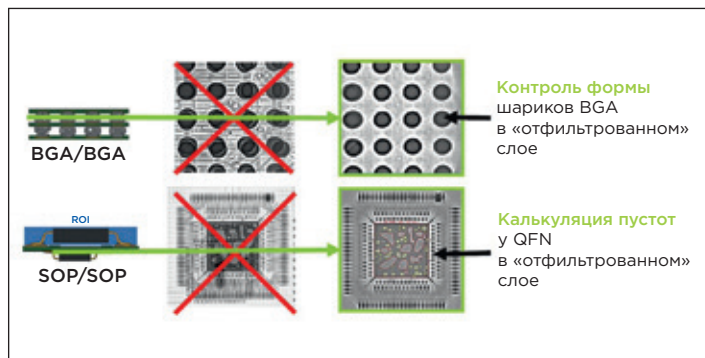
содержанием летучих веществ (Low-voiding-пасты), контролировать влажность печатных плат. Существуют специальные паяльные пасты с низким газовыделением, при испарении которого образуется малое количество пустот.

- Оптимизация температурного профиля плавления паяльной пасты также влияет на количество пустот в паяном соединении. Необходимо подобрать оптимальную длительность зоны стабилизации на термопрофиле. Чтобы, с одной стороны, произошла полная дегазация флюса, а с другой – при-



3

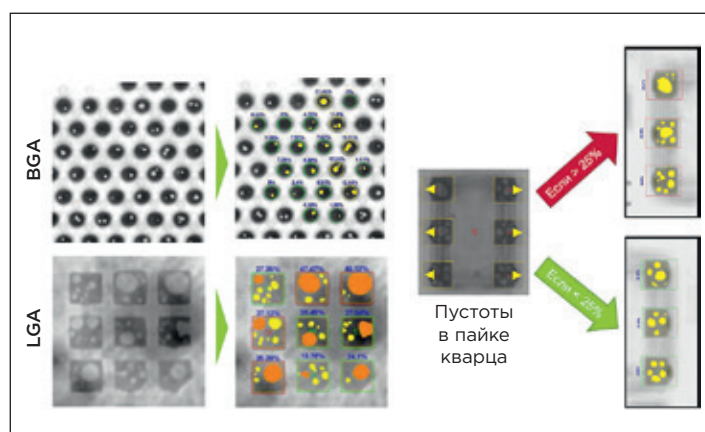
Системы автоматической рентгеновской инспекции (АРИ/АХИ) в составе линий поверхностного и штыревого монтажа



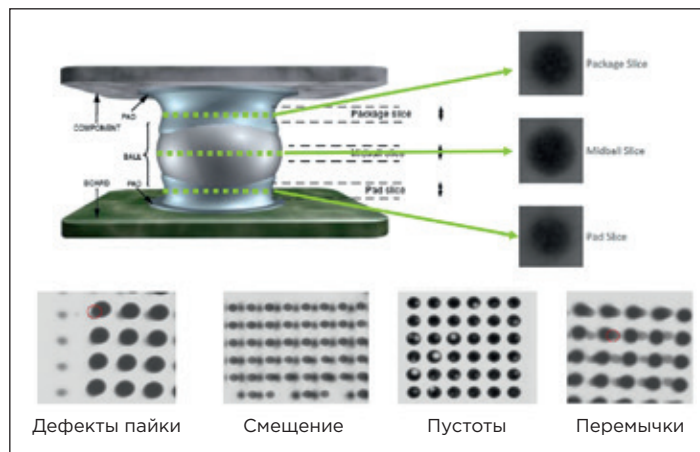
4
Послойный анализ в AXI

пой не начал окисляться. Оптимальный профиль должен обеспечивать плавный выход паров до момента расплавления припоя.

- Пайка в вакуумной среде. Это наиболее эффективный и радикальный метод уменьшения количества пустот. Снижение давления в камере в момент, когда припой находится в жидкой фазе, принудительно расширяет и выталкивает летучие компоненты флюса. Соединения становятся более плотными и надежными. Повышается смачиваемость поверхностей. Минимизируется количество пустот, повышается надёжность пайки и качество смачивания.
- Дизайн апертур трафарета. Для больших теплоотводящих площадок (QFN/D-PAK) рекомендуется использовать «сетчатый» дизайн нанесения пасты. Это создает пути для беспрепятственного выхода газов.
- На образование пустот действует шероховатость паяльной маски, влияющей на распределение флюса вокруг контактной площадки.
- Также для уменьшения количества пустот некоторые RnD-центры рекомендуют использовать прорези в термопадах – специальные газоотводные каналы.



6
Отбраковка по площади пустот



5
Послойный анализ паяных соединений

Инспекция пустот в паяном соединении

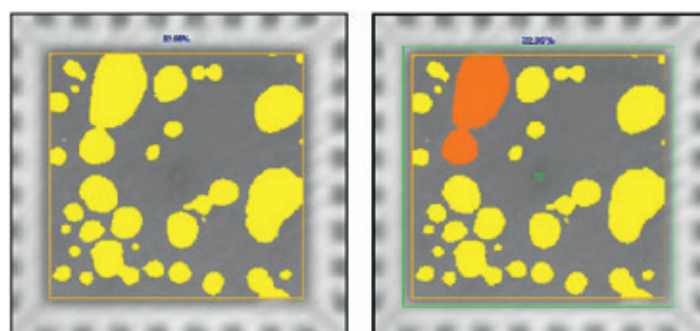
Для контроля качества скрытых паяных соединений широко применяется рентгеновская инспекция. Это контроль:

- скрытых паяных соединений;
- разварки кристалла внутри компонента;
- заполнения припоем переходных отверстий;
- соединений во внутренних слоях печатной платы.

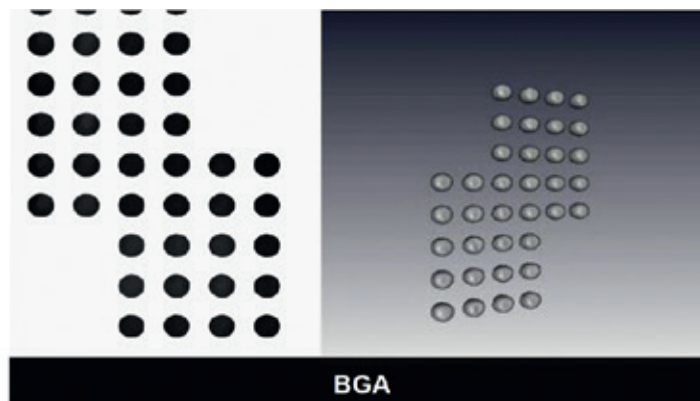
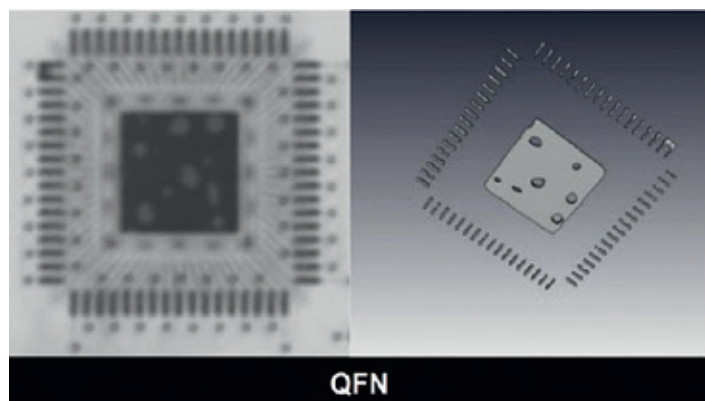
Пустоты в паяных соединениях можно исследовать как с помощью отдельно стоящего рентгена, так и с помощью систем автоматической рентгеновской инспекции (АРИ/АХИ) (рис 3).

Системы АХИ могут выявлять следующие виды дефектов: перемычки, избыток и недостаток припоя, смещение компонента, отсутствие пайки, пустоты в пайке и производить калькуляцию пустот; могут проводить послойный анализ паяных соединений, калькуляцию пустот в них. На рис 4 показан анализ определённого слоя соединений у микросхем BGA и QFN. В таких системах контроль шариков компонента BGA происходит по трем срезам: середина шарика, срез около корпуса компонента, срез возле печатной платы. Анализ выполняется на дефекты пайки, смещение, на пустоты и перемычки (рис 5).

В программном обеспечении систем АХИ для калькуляции пустот можно задать порог срабатывания:



7
Пустоты под корпусом QFN



8

3D-визуализация результатов исследований паяных соединений

что считать годной продукцией, а что браком. На рис 6 показан пример калькуляции пустот в паяных соединениях микросхем BGA и LGA. ПО вычисляет количество пустот в паяном соединении и определяет, годная это продукция или брак.

Есть возможность отбраковки компонента как по общему количеству пустот в паяном соединении, так и по одной индивидуальной пустоте. На рис 7 жёлтым цветом показано общее количество пустот на центральной площадке компонента QFN, оранжевым – измерение индивидуальной наибольшей пустоты.

Имеются разные алгоритмы определения пустот, в том числе и основанные на применении искусственного интеллекта. Такие алгоритмы хорошо работают в сложных случаях, когда невозможно чётко выделить пустоты стандартными методами.

Также есть возможность 3D-визуализации результатов. На рис 8 показаны изображения контактных поверхностей на плоскости и в объёме для микросхем QFN и BGA.

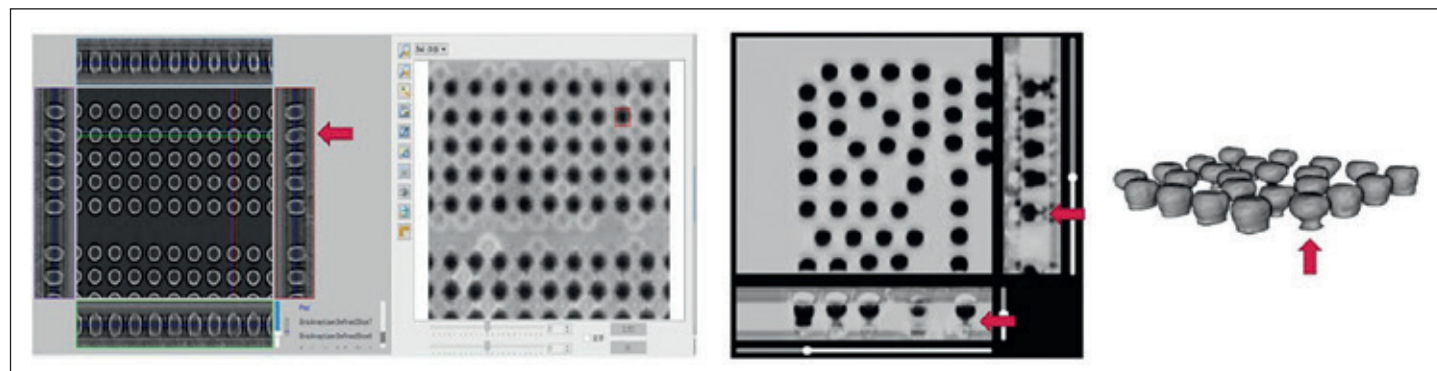
Также анализ срезов на 3D-реконструкции позволяет выявить дефекты пайки. Рис 9 иллюстрирует дефект «голова на подушке», который плохо различим на виде контактных площадок сверху.

Для контроля пустот в паяных соединениях кроме рентгена применяют следующие методы:

- Акустическая микроскопия (SAM). Эффективна для поиска пустот на границах раздела фаз и в корпусах микросхем, где классический рентген может давать низкий контраст.
- Металлографические шлифы. Разрушающий метод, используемый для калибровки оборудования и глубокого анализа структуры интерметаллидов. Метод подходит для изучения образца на содержание пустот с целью корректировки дальнейших действий. [N]

Использованная литература

1. Турецкий А. В., Пирогов А. А., Свиридова И. В., Хоршайлова М. В., Сёмка Э. В. Анализ влияния шероховатости паяльной маски и формы трафарета на образование пустот в паяных соединениях // Вестник кибернетики. 2024. Т. 23, № 3. С. 70-81. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2024-3-8>.
2. Кейт Суитман (Keith Sweatman), Такатоши Нишимура (Takatoshi Nishimura), Кеничиро Сугимото, (Kenichiro Sugimoto), Акира Кита (Akira Kita) Контроль над механизмами образования пустот при пайке оплавлением. Технологии в электронной промышленности, № 6'2016
3. IPC-7095A Design and Assembly Process Implementation for BGAs.
4. IPC-A-610 Acceptability of Electronic Assemblies



9

Дефект «Голова на подушке» в 3D



**СООБЩЕСТВО
ПРОИЗВОДИТЕЛЕННИКОВ
МИРОВОГО УРОВНЯ**



ПРИСОЕДИНЯЙТЕСЬ!

PMU-TEAM.RU



РОССИЙСКИЙ ФОРУМ
МИКРОЭЛЕКТРОНИКА 2026



ФЕДЕРАЛЬНАЯ
ТЕРРИТОРИЯ
«СИРИУС»

МИКРО ЭЛЕКТРОНИКА

27.09 — 03.10



Российский форум «Микроэлектроника» в 2024 году вошёл в план мероприятий Десятилетия науки и технологий, объявленного Указом Президента Российской Федерации в целях усиления роли науки и технологий в решении важнейших задач развития общества и страны

7

дней

3500+

участников

1000+

компаний

50

мероприятий
деловой программы

14

секций научной
конференции

1200+

докладчиков

160+

выставочных экспозиций

2000 м²

выставочных площадей

Форум «Микроэлектроника» – авторитетная площадка российской индустрии, где формируются стратегические векторы развития отечественной электронной компонентной базы и обсуждаются прорывные технологические решения в условиях новой индустриальной реальности. Мероприятие объединяет лидеров отрасли, представителей госкорпораций, инновационных стартапов и научно-исследовательских центров, создавая сообщество для выстраивания эффективных бизнес-партнёрств и коммерциализации передовых разработок.

На Форуме демонстрируются актуальные достижения в области микро- и радиоэлектроники, полупроводниковых технологий импортозамещения, задавая ориентиры для устойчивого роста российского высокотехнологичного сектора.



Регистрация



microelectronica.pro



Подписывайтесь и будьте в курсе
всех последних новостей!



VK Видео



Rutube

+ 7 495 641 57 17
microelectronica.pro
office@proconf.ru

Организаторы



НИИЭМ
ЭЛЕМЕНТ



ПРОГРЕСС
ЭЛЕМЕНТ

При поддержке



Минпромторг
России



МИНОБРАЗОВАНИЯ
РОССИИ

Генеральные партнёры



РОСАТОМ



ФОНД
ПЕРСПЕКТИВНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Стратегические партнёры



ЭЛЕМЕНТ
ГРУППА КОМПАНИЙ



Иновационный партнёр

МИЭТ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Образовательный партнёр



Партнёры



SOVTEST
ВАШ ПАРТНЕР ПО КАЧЕСТВУ



Партнёр детской программы



Оператор Форума



ПрофКонференции

Генеральный информационный партнёр



ТЕХНОСФЕРА
РЕКЛАМНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР