

Полный цикл изготовления уникальных для российского рынка СВЧ-изделий

Визит на производство компании «СДС Электроникс»

Ю. Ковалевский

Компания «СДС Электроникс» специализируется на разработке и производстве пассивных СВЧ-компонентов, в том числе для поверхностного монтажа. О данных изделиях, их особенностях и преимуществах было рассказано в интервью, которое недавно дал нашему журналу стратегический директор компании Дмитрий Семёнов*. В прошлом году предприятие дополнило свой технологический маршрут процессами формирования проводящего рисунка на керамических подложках, тем самым фактически замкнув производственный цикл данных компонентов: сейчас на предприятии реализован весь маршрут, кроме механообработки. Однако до последнего времени производственные площадки компании были разбросаны по разным городам, что усложняло логистику и удлиняло сроки производства.

Сейчас предприятие реализует проект, результатом которого станет концентрация всех операций на единой площадке в Санкт-Петербурге, что позволит не только быстрее изготавливать СВЧ-компоненты разработки «СДС Электроникс», но и откроет новые возможности для дальнейшего расширения производства. Мы побывали на данной площадке, где представители компании показали нам оборудование и рассказали, какими особенностями обладает это производство.

ЧТО ПРЕДСТАВЛЯЮТ СОБОЙ ПАССИВНЫЕ СВЧ-КОМПОНЕНТЫ ДЛЯ ПОВЕРХНОСТНОГО МОНТАЖА

Экскурсия по производству, которую для нас проводили стратегический директор ООО «СДС Электроникс» Дмитрий Семёнов и технический директор предприятия Сергей Сковородников, началась непосредственно с нового участка, который был изначально организован в мае 2022 года в Москве, а ныне перемещен на санкт-петербургскую площадку и теперь расположен на одном этаже с другими участками производства предприятия. На данном участке выполняется формирование проводящего рисунка на керамических подложках.

Микрополосковые схемы, выполненные в виде подложек из различных типов керамики, таких как феррит или поликор, с проводящим рисунком с одной стороны и металлизацией, подключенной к общей шине (земле), – с другой, широко применяются в СВЧ-компонентах, производимых компанией «СДС Электроникс», в том числе в ее «визитных карточках» – пассивных СВЧ-компонентах

для поверхностного монтажа. В данном исполнении предприятие серийно выпускает циркуляторы, а также изготавливает другие компоненты по ТЗ заказчика, в том числе с интегрированными в них дополнительными компонентами, такими как фильтры, индуктивности, конденсаторы и т. п. В циркуляторах также применяются мощные постоянные магниты.

Эти компоненты полностью адаптированы к технологии поверхностного монтажа, что позволяет монтировать их в едином цикле с другими SMD-компонентами на печатные платы, исключая ручные операции и тем самым повышая производительность и повторяемость сборки. С точки зрения сборочных операций данные изделия близки к микросхемам в корпусе LGA или BGA. Контактные площадки или шариковые выводы компонента расположены с нижней стороны керамической подложки. Функцию корпуса выполняет экран, который, помимо экранирования, обеспечивает жесткость конструкции.

Благодаря малому количеству составных частей данные компоненты обладают высокой технологичностью, позволяющей в значительной мере автоматизировать их изготовление, а также повышенной надежностью.

* См.: ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2023. № 3. С. 14–20.



Дмитрий Семёнов

МИКРОПОЛОСКОВЫЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ ПОДЛОЖКИ – ЭТО МИКРОЭЛЕКТРОНИКА?

«Керамические подложки – одна из ключевых составляющих наших СВЧ-компонентов, – отметил Дмитрий Семёнов. – Технология их производства подобна производству полупроводниковых кристаллов в обычных микросхемах, поэтому мы между собой их часто называем кристаллами».

Сергей Сковородников добавил: «Применяемое здесь оборудование пришло именно из микроэлектроники. Однако производство керамических подложек можно выделить в отдельный тип производства, потому что оно обладает рядом принципиальных отличий и от микроэлектроники, и от изготовления печатных плат и коммутационных оснований. Эти отличия требуют применения особых технологических подходов, а иногда и доработки оборудования. Можно сказать, мы берем существующее оборудование и дорабатываем его под наш технологический процесс. И это характерно не только для нас: у всех производителей СВЧ-компонентов в мире те же проблемы. Другое дело, что в России такого опыта ни у кого не было, и нам приходится всё это делать самим».

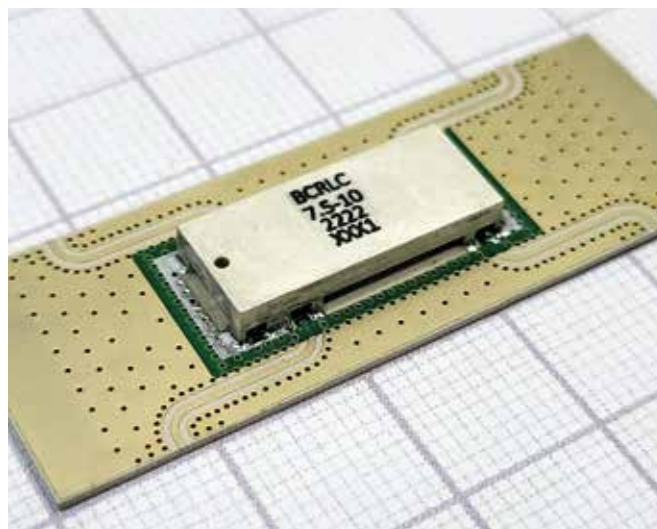
До мая 2022 года изготовление керамических подложек для компонентов предприятия выполнялось на производствах партнеров. Однако не только конструкция, но и в большой степени технология разрабатывались специалистами «СДС Электроникс».

«Мы говорили нашим партнерам, какие материалы должны использоваться, в какой последовательности наноситься, какими должны быть толщины



Сергей Сковородников

слоев и т. п., – рассказал Дмитрий Семёнов. – Поскольку наши структуры весьма специфические, производители часто не знали, как можно получить их на имеющемся оборудовании. Поэтому нам приходилось, по сути, вносить коррективы в их техпроцессы, участвовать в подборе режимов. Благодаря этому мы приобрели значительный опыт в постановке этих технологий, и к тому моменту, когда мы окончательно решили создать свой участок



Сдвоенный циркулятор для поверхностного монтажа производства «СДС Электроникс», установленный на СВЧ-плату

изготовления подложек, у нас уже было четкое понимание, какое оборудование нам нужно».

Идея организации данного участка появилась сравнительно давно, но основным импульсом к ее реализации, по словам представителей предприятия, послужило то, что весной 2022 года стали возникать проблемы со сроками исполнения заказов на внешних производствах. Загрузка предприятий возросла, а для изготовления внешних заказов на линиях, где производились также и изделия для их собственных нужд, данные линии нужно было перенастраивать, что приводило к дополнительным потерям времени, которых можно было бы избежать при наличии собственного производства. В мае 2022 года данный участок был организован на московской площадке. Отработка техпроцесса заняла порядка полугода, поскольку нужно было адаптировать уже имеющуюся технологию под новое оборудование, несколько отличавшееся от того, которое использовалось на производствах предприятий-партнеров. Затем была выпущена установочная партия, которая показала готовность технологии к серийному производству, и было принято решение переместить участок ближе к остальному производству компании. Таким образом был заполнен пробел в маршруте изготовления СВЧ-компонентов «СДС Электроникс», и на данный момент весь цикл их производства реализован на собственных мощностях компании, за исключением механообработки для изготовления деталей корпусов.

УЧАСТОК ФОРМИРОВАНИЯ ПРОВОДЯЩЕГО РИСУНКА НА НОВОМ МЕСТЕ

Новое помещение – чистое, организованное по так называемому коридорному принципу, при котором проход между рабочими местами имеет класс чистоты от 7 ИСО до 6 ИСО, а на самих рабочих местах созданы зоны с классом 5 ИСО. Такой подход позволяет, с одной стороны, упростить организацию чистого помещения большого объема, в частности отказавшись от вытяжного пола, а с другой – обеспечить необходимую чистоту там, где это необходимо для выполнения конкретных операций.

Как и положено чистому помещению, вход в него организован через буферную зону. Сам участок разделен на две части с помощью шторы из ПВХ-панелей. В одной части выполняются химические, гальванические операции, напыление пленок и ионно-плазменная обработка, а в другой – операции нанесения, экспонирования и прочей обработки фоторезиста. Во второй части помещения класс чистоты выше. Здесь применяется исключительное освещение фоторезиста красное освещение. Помещение разделено шторой, а не сплошной стеной, потому что, как нам объяснили сотрудники предприятия, это позволяет избежать перепада давлений между частями помещения, который может вызывать затягивание пыли из менее чистой части в более чистую.

На участок керамические подложки приходят в виде групповых заготовок, и уже здесь проявляется первое существенное отличие от кристалльного производства. Групповая заготовка не круглая, как полупроводниковая пластина, а прямоугольная. Кроме того, если полупроводниковые пластины имеют строго стандартизированные размеры, то размеры групповой керамической заготовки могут быть, вообще говоря, любыми – с тем лишь ограничением, что ее габариты не должны превышать максимальных, с которыми может работать оборудование. Но это условие проблем не создает: как правило, заготовки сравнительно небольших размеров. Так, наиболее распространенные заготовки имеют форму квадрата со стороной 2”.

Для перемещения заготовок между операциями, как и на кристалльных производствах, используются контейнеры. Непосредственно над зоной загрузки и выгрузки заготовок расположен источник ламинарного потока воздуха. Однако, учитывая нестандартную форму и толщину групповых заготовок, контейнеры здесь тоже специализированные.

ТЕХПРОЦЕСС ФОРМИРОВАНИЯ РИСУНКА

Первая операция – очистка заготовки. Она может выполняться либо химическим методом, либо в вакуумной установке путем ионно-плазменной очистки в зависимости от типа групповых заготовок. Затем начинается, собственно, формирование проводящего рисунка с помощью фотолитографии.

При этом могут применяться разные техпроцессы, включающие несколько этапов напыления, наращивания и травления в различной последовательности, в зависимости от того, какой результат необходимо получить. Но в любом случае сначала производится напыление металлического слоя по всей поверхности заготовки с обеих сторон. Обычно металлизация с нижней стороны выполняет функцию слоя земли микрополосковой структуры, а с верхней стороны заготовки формируется рисунок, обеспечивающий необходимую функциональность изделия. Сплошная металлизация с верхней стороны нужна для последующего выполнения гальванических операций.

Металлическая структура, формируемая на данном этапе, играет ключевую роль в обеспечении адгезии проводящего рисунка к керамическому основанию. И здесь проявляется вторая особенность техпроцесса – необходимость применения конкретных материалов промежуточных и основных слоев, которые могут отличаться от тех, которые используются в «классической» микроэлектронике.

«Качество адгезии – очень важный параметр для наших изделий, – рассказал Сергей Сковородников. – У нас токо-несущие слои в то же время являются конструктивными.

В отличие от микроэлектроники, где кристалл крепится к корпусу, затем аккуратно разваривается, заливается или закрывается крышкой, причем с контролем отсутствия влаги в корпусе, чтобы кристалл не деградировал, у СВЧ-подложек, учитывая их дальнейшее применение, структуры должны быть несущими: они непосредственно привариваются или припаиваются к несущим конструкциям и должны выдерживать соответствующие нагрузки».

Кроме того, плохая адгезия может косвенно влиять на электрические характеристики компонента. Она может вызывать увеличенный подтрав и, как следствие, локальные отслоения. Вероятность отслоения также повышается из-за нагрева проводников при работе на больших мощностях – из-за разности коэффициентов теплового расширения металла и керамики. Локальные отслоения проводников могут приводить к изменению СВЧ-характеристик, что, в частности, может вызывать «звон» линии передачи.

«Для обеспечения адгезии необходимо наносить на подложку подслои из определенного материала.



Универсальная магнетронная установка серии «Ника-2012», в которой выполняются ионно-плазменная обработка и напыление слоев металлизации



Свечение плазмы в камере магнетронной установки

Считается, что хорошим материалом адгезионного подслоя, например, на поликоровой подложке является цинк, но и его нельзя напылить просто так. Его необходимо наносить в определенной среде и с определенными режимами», – пояснил Сергей Сквородников.

Напыление выполняется в магнетронной установке, которая закрывает все соответствующие потребности применяемых на данный момент технологических процессов и обеспечивает формирование слоев с хорошей адгезией и высоким качеством состава. Но в дальнейшем на участке планируется разместить



Контроль толщины слоя с помощью интерференционной установки. Слева – металлографический микроскоп, также применяемый для контроля полученных структур на подложках

вторую – термическую – установку. Она будет играть роль резервной, а также применяться тогда, когда требования к слоям не столь высоки, но нужно получить их быстро: термическая установка позволит напылять буквально за минуту слои, которые при той же толщине в магнетронной системе наносятся за два часа.

«В простейшем случае, когда нам нужна небольшая толщина проводящего рисунка, он выполняется примерно так же, как на односторонних печатных платах: сначала формируется сплошная металлизация, затем производится гальваническое наращивание, наносится фоторезист, экспонируется, проявляется, вскрывая места между проводниками, и производится травление пробельных мест, – рассказал Сергей Сковородников. – Если же нам нужны „высокие“ проводники, то сначала на сплошную металлизацию наносится фоторезист, и окна в нем формируются там, где должны быть проводники. Далее выполняется наращивание на несколько большую высоту, фоторезист снимается и выполняется травление всего металла, включая и пробельные места, и проводники. Поскольку толщина металла в пробельных местах очень мала, проводники также стравливаются совсем немного. Такой подход позволяет избежать существенно бокового подтравки, и проводники в сечении получаются практически прямоугольными. В СВЧ-технике это очень важно».

Необходимость создания проводников большого сечения – еще одна особенность, которую приходится учитывать предприятию при проектировании своих техпроцессов. «В силовых компонентах требуются элементы рисунка большого размера, чтобы они выдерживали достаточно высокие токи, но требования к точности их геометрии не очень жесткие. В компонентах, где требуется высокая точность топологии, например в цифровых ИМС, мощность не очень большая, поэтому нет необходимости в элементах больших размеров. В наших же компонентах мощности могут быть очень высокими – до 100 Вт и более, а точность геометрии напрямую влияет на качество передачи СВЧ-сигнала: даже небольшое отклонение в ширине может приводить к чувствительному изменению волнового сопротивления линии. То есть мы имеем дело со сравнительно большими элементами – размером в сотни микрометров и даже единицы миллиметров, но отклонения их геометрии лежат в пределах десятков или единиц микрометров. Это одна из причин, почему СВЧ-компоненты имеет смысл считать отдельной категорией, отличной и от печатных плат, и от микроэлектронных изделий», – объяснил Сергей Сковородников.

Как рассказали представители предприятия, при напылении слоев большой толщины, необходимой в производимых компанией компонентах, порой приходится даже выходить за пределы, определенные техническими характеристиками оборудования.

Для травления металлизации применяется как химический процесс, так и ионно-плазменный, который выполняется в той же вакуумной установке, что и напыление пленок. Первый значительно более быстрый, но всегда приводит к образованию подтравов, второй существенно медленнее (для того чтобы удалить слой толщиной 1 мкм, нужно несколько часов, тогда как при химическом процессе для этого требуется несколько секунд или даже долей секунды), но он позволяет получать более ровные вертикальные стенки проводников. Химические процессы производятся в настольной емкости с ручным погружением, а для гальванических операций применяется небольшая настольная линия. Как рассказали представители предприятия, объемы производства на данный момент не требуют больших автоматизированных линий химической и гальванической обработки.

Один из сложнейших элементов с точки зрения их формирования, которые встречаются в изделиях компании, – элементы замедляющих систем. Эти структуры представляют собой в сечении гребенку на проводнике, причем расстояние между зубьями составляет порядка 10–20 мкм, что существенно меньше расстояния до соседних металлических элементов. При химическом травлении металл



Настольная линия гальванической обработки. На переднем плане слева видна оснастка для погружения заготовок

между зубьев вытравливается значительно быстрее, и пока удаляется металл с пробельных мест, начинается травление уже самих зубьев гребенок. Тем не менее для изготовления этих структур применяется травление именно химическим методом, но с определенными доработками и при определенных режимах, позволяющих снизить указанный негативный эффект. Подробности данной «настройки» процесса представители компании раскрывать не стали – это ноу-хау предприятия.

Определенного ноу-хау требует и процесс нанесения фоторезиста. Связано это с тем, что, с одной стороны, заготовки имеют прямоугольную форму, а с другой – на равномерность толщины покрытия накладываются достаточно жесткие требования. В производстве используется жидкий фоторезист, который наносится методом центрифугирования, и обеспечение равномерности слоя на углах заготовки требует точного подбора материала и режимов нанесения.

На производстве применяются резисты, используемые в микроэлектронике, а не в изготовлении печатных

плат. Причины у такого выбора несколько. В частности, данные резисты обеспечивают лучшую равномерность толщины пленки, а также позволяют выполнять ионно-плазменное травление.

Для работы с фоторезистами на участке установлено ламинарное укрытие (бокс) от компании «Ламинарные системы», которое не только создает чистую зону класса 5 ИСО, но и обеспечивает эффективное удаление отработанного воздуха. Воздух, забираемый вытяжкой из рабочей зоны, удаляется через ULPA-фильтр и в рабочую зону уже не возвращается, что обеспечивает защиту персонала от газообразных вредных веществ. Такие системы используются в том числе в химической и фармацевтической промышленности.

После того как проводящий рисунок сформирован и на него нанесено металлическое защитное покрытие, заготовка покрывается паяльной маской, которая наносится на том же оборудовании, что и фоторезисты. «Это тоже довольно необычное для СВЧ-подложек решение, – отметил Дмитрий Семёнов. – Обычно всё заканчивается металлическим покрытием, как правило золотым, которое обеспечивает защиту проводников и, в дальнейшем, качественное формирование паяных и сварных соединений. Но в наших компонентах электрический контакт с керамической подложкой осуществляется с помощью припойных шариков. Эта технология похожа на flip-chip. Когда эти шарики напаиваются на подложку, в отсутствие



Ламинарное укрытие, в котором производится работа с фоторезистом



Нанесение резиста центрифугированием



Установка совмещения и экспонирования ЭМ-576АМР

паяльной маски припой мгновенно растекается по всему проводнику, потому что у золота очень хорошая смачиваемость припоем».

Для визуального контроля полученного рисунка на участке оборудовано рабочее место с цифровой камерой, позволяющей осматривать изделия при большом увеличении.



Визуальный контроль полученного проводящего рисунка



Выполнение совмещения и экспонирования

РАЗДЕЛЕНИЕ ЗАГОТОВОК И ФОРМИРОВАНИЕ ШАРИКОВЫХ ВЫВОДОВ

После нанесения паяльной маски на групповые заготовки наклеивается пленка-спутник, и далее они отправляются на другой участок, где выполняется их разделение на отдельные подложки. И эта операция также обладает рядом особенностей. Во-первых, толщина керамических заготовок варьируется в широких пределах – от десятых до единиц миллиметра, а сам материал достаточно жесткий и хрупкий. Во-вторых, форма подложек может быть разной: прямоугольной, круглой и более сложной. Поэтому разделение выполняется не дисковой резкой, а фрезерованием. Круглые же подложки, которые достаточно широко применяются в изделиях предприятия, вырезаются алмазной коронкой, для чего используется отдельная установка.

Эта же установка используется для вырезания больших отверстий в поликорковых пластинах для последующей установки в них ферритовых дисков с топологией (такая технология применяется в устройствах большой мощности для создания равномерного магнитного поля). «Для этого в поликоре необходимо вырезать отверстия диаметром более 3–5 мм с точностью ± 10 мкм. Это непростая задача, и для ее выполнения используется специализированное оборудование, – пояснил Сергей Сквородников. – Такое оборудование производится в России, но оно слишком дорогое. Поэтому данную установку мы сделали сами».

Разделенные заготовки остаются закрепленными на пленке-спутнике. Снятие керамических подложек с пленки-спутника осуществляется уже после формирования на них шариковых выводов.

Для формирования шариковых выводов в зависимости от серийности конкретного изделия используется как ручной, так и автоматический подход. При ручном подходе готовые припойные шарики устанавливаются на

флюс, после чего оплавляются. Эта операция выполняется на сборочном участке. Автоматическое формирование шариков производится на участке разделения заготовок с помощью прецизионной установки со шнековым дозатором. Данное оборудование наносит на подложки паяльную пасту, обеспечивая высокую точность дозирования, после чего паста также оплавляется, формируя шариковые выводы.

После разделения заготовок и формирования шариковых выводов производится отмывка изделий.

СБОРОЧНЫЙ УЧАСТОК

Сборочное производство появилось в «СДС Электроникс» задолго до участка формирования проводящего рисунка. Однако оно постоянно совершенствуется – в том числе с целью повышения уровня автоматизации и увеличения производительности.

Здесь выполняются паяные соединения и разварка подложек. Здесь производится корпусирование компонентов или, точнее, их сборка, поскольку данные компоненты не корпусируются в привычном для микроэлектроники смысле: корпус формируется из керамических подложек, оснований и экранов. Наконец, здесь на изделия наносится маркировка.

Для выполнения соединений методом разварки на участке присутствует соответствующая установка, но, по словам представителей предприятия, она используется не так часто: разварка применяется только в достаточно специфических мощных компонентах. Это такое же оборудование, как и то, которое используется при сборке обычных

микросхем и полупроводниковых приборов. Однако здесь тоже есть свои особенности.

«В микроэлектронике обычно разварка выполняется тонкой проволокой, – рассказал Сергей Сквородников. – Но для нас часто такой метод не подходит из-за больших токов, которые проволока просто не выдержит. При изготовлении силовых компонентов применяются металлические ленты, и по допустимой токовой нагрузке они нам подходят. Но, как и в случае элементов топологического рисунка, здесь мы сталкиваемся с низкой точностью изготовления таких лент, которой достаточно для силовых компонентов, но которая совершенно неприемлема для СВЧ-электроники. У нас лента может быть, например, шириной 1 мм с допуском ± 10 мкм. То есть даже в такой, казалось бы, простой операции, как разварка, мы сталкиваемся с необходимостью решать довольно-таки специфические задачи».

Для сборки компонентов на предприятии применяется уникальное оборудование: на основе отечественного автомата установки компонентов поверхностного монтажа SMD-TAXI совместно с разработчиком данного оборудования был создан станок, позволяющий монтировать на общее основание в том числе керамические подложки и постоянные магниты.

«Для установки магнитов мы вместе с производителем установщика разработали специальный питатель. Задача была не такой простой, как может показаться, потому что эти магниты очень сильные; нужно было обеспечить их надежное отделение друг от друга в питателе и сделать так, чтобы они не «прилипали» к металлическим деталям станка», – рассказал Дмитрий Семёнов.

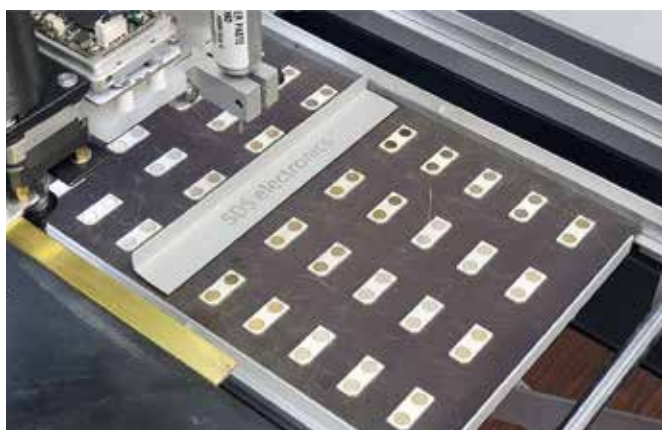
В питатель магниты загружаются из стопки. Выталкиваются они с помощью механизма, приводимого в движение монтажной головкой. Также данный автомат позволяет выполнять установку компонентов из россыпи с помощью системы технического зрения. Эта возможность используется в том числе для монтажа керамических



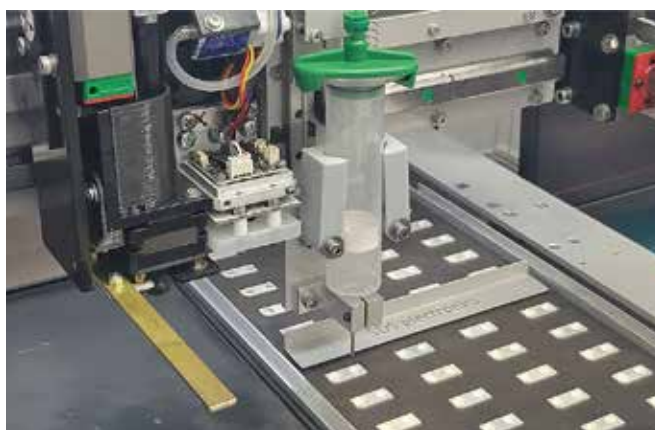
Установка разварки



Палеты с основаниями циркуляторов



Собранные компоненты в технологической оснастке



Нанесение клея с помощью дозатора, установленного на автомате



Установка лазерной маркировки в процессе работы

подложек. Кроме того, автомат был дополнительно оборудован дозатором, что позволяет выполнять нанесение клеев, паст и других материалов и монтаж компонентов в едином цикле.

На участке установлено два таких автомата. Вторая установка прибыла на предприятие относительно недавно и используется как резервная, а также для наращивания производительности участка в случае необходимости.

Крепление микрополосковых керамических подложек и других составляющих компонента на основании может выполняться различными способами, в том числе приклейкой или пайкой с помощью паяльной пасты. Пайка оплавлением выполняется в камерной печи, расположенной также на данном участке.

Маркировка на собранные компоненты наносится с помощью автоматической лазерной установки, расположенной также на данном участке.


Помимо сборочных операций, на участке выполняются межоперационный и финальный контроль, а также – при необходимости – ремонт.

С переносом участка формирования проводящего рисунка на керамических подложках на свою площадку в Санкт-Петербурге компания «СДС Электроникс» создала гибкое производство полного цикла по изготовлению ключевых составляющих СВЧ-компонентов для поверхностного монтажа и их сборке, в чем мы смогли убедиться, посетив данную площадку. Этот шаг не только снижает зависимость предприятия от сроков изготовления комплектующих на внешних производствах, упрощает логистику и, как следствие, приводит к сокращению сроков поставки продукции заказчиком, но и создает базу для дальнейшего масштабирования производства и повышения производительности. ●



ELECTRONICS

СВЧ КОМПОНЕНТЫ • РАЗРАБОТКА • ПРОИЗВОДСТВО

A photograph of a printed circuit board (PCB) populated with several surface-mount microwave components. The components are arranged in a grid pattern. Each component has markings such as 'SERIES 7.5-10' and 'D000 XXXX'. The image is overlaid with a semi-transparent dark grey rectangle containing white text. A large red diagonal shape is on the left side of the image.

**СВЧ КОМПОНЕНТЫ
ПРОИЗВОДСТВО
РАЗРАБОТКА
ПРИБОРЫ**

www.sds-e.net

