

На правах рукописи



Старцев Виктор Андреевич

**ПРОЦЕССЫ МИКРОСБОРКИ
НА ГИБКОЙ ОРГАНИЧЕСКОЙ ПОДЛОЖКЕ
МЕТОДОМ КАПЛЕСТРУЙНОЙ ПЕЧАТИ**

Специальность 05.27.06 – Технология и оборудование для производства
полупроводников, материалов и приборов электронной техники

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ” им. В.И. Ульянова (Ленина)» на кафедре микро- и нанoeлектроники

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор **Лучинин Виктор Викторович**,
заведующий кафедрой микро- и нанoeлектроники, директор Инжинирингового центра микротехнологии и диагностики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ” им. В.И. Ульянова (Ленина)», г. Санкт-Петербург

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор **Тимошенко Сергей Петрович**,
директор Института нано- и микросистемной техники Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», г. Москва

кандидат технических наук, доцент **Лямин Андрей Николаевич**
доцент кафедры «Радиоэлектроника, телекоммуникации и нанотехнологии» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва

Ведущая организация: Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Радар ммс», г. Санкт-Петербург

Защита состоится “24” июня 2021 года в 10:00 на заседании диссертационного совета Д 212.238.04 на базе Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») по адресу: 197376, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ” им. В.И. Ульянова (Ленина)» и на сайте университета www.etu.ru в разделе «Подготовка кадров высшей квалификации» - «Объявление о защитах»

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 197376, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, д. 5.

Автореферат разослан “23” апреля 2021 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.238.04
кандидат технических наук


_____ Н.В. Пермяков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

В течение последнего десятилетия в рамках динамичного развития аддитивных технологий сформировалась самостоятельная ниша электроники – гибкая печатная электроника (ГПЭ). Многообразие и доступность высокотехнологичной продукции ГПЭ обеспечили формирование нового направления – Интернет вещей. В последнее время формируется ещё одно новое направление – Интернет людей. Оно ориентировано на создание инфокоммуникационного пространства с эффективным использованием биометрических данных и функциональных показателей человека для обеспечения персонализированной среды его жизнедеятельности.

Одной из перспективных наукоёмких ниш при реализации этих интернет-концепций является направление Носимая электроника. Миниатюрные устройства носимой электроники размещаются на одежде (обуви) либо на (в) теле человека. В связи со спецификой своего применения такие устройства должны быть конформными, малогабаритными, а также иметь минимальное энергопотребление и низкую стоимость. Необходимые конструктивно-функциональные параметры устройств конформной носимой электроники позволяет обеспечить технология каплеструйной печати, поскольку данный процесс является низкотемпературным и может быть реализован на гибких органических подложках малой толщины, а также при использовании трёхмерных подложек. Современной материаловедческой основой ГПЭ является широкая номенклатура базовых функциональных материалов, обеспечивающих формирование металлических, диэлектрических, магнитных, пьезоэлектрических, оптических и люминесцентных композиций.

Наряду со значительными усилиями, направленными на создание гибких конформных изделий исключительно печатными способами, существенный интерес представляют гетерогенная интеграция и формирование в рамках данных технологий гибридных микросборок, основанных на размещении бескорпусной компонентной базы на гибких коммутационных платах.

Значительный интерес представляет разработка интегрированной технологии формирования систем коммутации и монтажа компонентов на гибкой плате с применением унифицированной технологии каплеструйной печати. Данная технология является мультифункциональной с точки зрения материаловедческого базиса, гибкой и аддитивной, исходя из возможности прямого формирования рисунка без использования шаблона, включая создание многослойных органо-неорганических композиций. Несомненной новизной является расширение технологических возможностей использования каплеструйной печати для реализации процессов микросборки, в первую очередь – в связи с широким развитием технологий и конструкций, основанных на бескорпусной и утонённой электронной компонентной базе.

Целью работы являлась разработка и исследование технологии каплеструйной печати как базовой унифицированной технологии для обеспечения интеграции процессов формирования систем многослойной коммутации и микросборки электронных компонентов на гибких органических подложках.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

- разработка технологии каплеструйной печати проводящих и диэлектрических слоёв для создания систем многослойной коммутации;
- разработка процесса микросборки бескорпусных электронных компонентов на гибких печатных платах (включая контактирование к кристаллу) методами каплеструйной печати;
- разработка процесса монтажа корпусных электронных компонентов на платы, изготовленные с использованием каплеструйной технологии;
- создание функциональных модулей на базе разработанных процессов каплеструйной печати с интеграцией операций формирования гибких коммутационных плат и микросборки на них корпусных и бескорпусных электронных компонентов.

Объектами исследования являлись композиции токопроводящих и диэлектрических слоёв и процессы микросборки на гибких органических подложках, реализуемые по унифицированной технологии каплеструйной печати.

Методы исследования. Для характеристики полученных методом каплеструйной печати коммутационных слоёв и изготовленных гибридных сборок использовались методы электрических зондовых измерений, методы оптической профилометрии, а также методы растровой электронной микроскопии и рентгеновского микроанализа. Препарирование объектов осуществлялось остросфокусированным ионным пучком с помощью FIB-станции.

Научная новизна:

В рамках единого унифицированного процесса каплеструйной печати реализованы две современные технологии:

- технология бесшаблонного аддитивного нанесения токопроводящих и диэлектрических слоёв и формирования их многослойных композиций;
- технология монтажа кристаллов электронных компонентов на гибкие органические носители.

Разработаны и исследованы следующие технологические процессы:

- процесс локальной мультислойной каплеструйной псевдопланаризации поверхности по периметру утонённого кристалла бескорпусного электронного компонента, размещённого на подложке, с последующей печатью коммутационных шин по поверхности полученной псевдопланарной многослойной композиции;

– процесс монтажа интегральных микросхем методом «перевернутого кристалла» с предварительным каплеструйным формированием на подложке комплементарного контактным системам микросхемы диэлектрического рельефа с высокоточным позиционированием её выводов относительно токоразводки на поверхности платы;

– процесс трансформации каплеструйной печатью периферийных выводов кристалла ИМС в новое коммутационное поле на зонально-изолированной поверхности кристалла в виде увеличенных контактных площадок и шин коммутации для последующего контактирования шариковыми выводами при реализации процесса монтажа по методу перевернутого кристалла.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Экспериментально установлено, что технология каплеструйной печати может быть использована для сборки бескорпусной элементной базы, что обеспечивается непосредственным формированием токоведущих коммутационных шин от контактных площадок утонённых кристаллов интегральных схем, размещённых на поверхности подложки, причём для исключения разрыва коммутации при их нанесении предварительно осуществляется псевдопланаризация поверхности в зоне границы раздела «боковая грань кристалла–поверхность подложки», что достигается последовательным каплеструйным нанесением по периметру кристалла совокупности диэлектрических слоёв с постепенным уменьшением толщины планаризирующего слоя по мере увеличения периметра зоны печати.

2. Экспериментально установлено, что точное совмещение контактных систем микросхемы в BGA-корпусе при её монтаже методом перевернутого кристалла на гибкий носитель достигается комплементарным вложением выводов микросхемы в предварительно сформированный на поверхности подложки каплеструйной печатью диэлектрический рельефный слой с топологией окон, обеспечивающих прецизионное взаимное позиционирование контактных систем микросхемы и токоразводки на подложке.

3. Экспериментально установлено, что при реализации процесса микросборки кристалла бескорпусной ИМС методом перевернутого кристалла повышение надёжности контактирования достигается трансформацией контактных систем с периферии кристалла на новое коммутационное поле, сформированное на поверхности кристалла методом каплеструйной печати диэлектрического слоя без покрытия исходных контактных систем с последующим формированием каплеструйной печатью на данном изолирующем слое системы контактных площадок для шариковых выводов, соединённых коммутационными шинами с периферийными контактами кристалла.

Обоснованность и достоверность полученных научных результатов подтверждается комплексом экспериментальных исследований процесса каплеструйной печати для формирования металлических и диэлектрических слоёв и многослойных систем коммутации, а также практическим использованием разработанных процессов для изготовления тестовых структур совокупности функциональных модулей и измерениями их параметров на современном высокоточном оборудовании.

Практическая значимость заключается в следующем:

- разработан процесс бесшаблонного формирования многоуровневых систем коммутации на гибких органических подложках на базе низкотемпературной технологии каплеструйной печати;

- на базе технологии каплеструйной печати разработан комплекс операций, обеспечивающих сборку утонённых кристаллов интегральных микросхем на ультратонкий гибкий носитель;

- разработана методика сборки BGA-компонентов на носители с коммутацией, сформированной методами печатной технологии, посредством комплементарного вложения выводов микросхемы в соответствующий рельефный слой на поверхности носителя;

- предложен способ модификации кристаллов, трансформацией внешних контактных площадок по периферии кристалла в аналоги контактных систем BGA-компонентов для сборки методом «перевернутого кристалла».

- на базе технологии каплеструйной печати в рамках интеграции и унификации процессов формирования токоразводки и монтажа кристаллов на гибких сверхтонких носителях сформирован комплекс конформно интегрируемых унифицированных функциональных модулей для сенсорно-информационных платформ.

Реализация и внедрение результатов исследований:

Результаты работы использованы при выполнении ряда НИОКР, в частности, «Юрта-ПАС» и «Юрта-АН», а также внедрены в ООО «ИЦ Гибкая печатная электроника и фотоника» и в учебный процесс при подготовке магистров по направлению 11.04.04 «Электроника и нанoeлектроника» в СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Апробация результатов исследования.

Основные результаты диссертации докладывались на научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ «ЛЭТИ» и научно-технических семинарах организации Заказчика с апреля 2017 г. по апрель 2020 г.

Публикации.

Основные результаты по теме на диссертации изложены в 5 печатных работах, из которых 4 опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК,

1 – в других журналах. В стадии рассмотрения находится заявка на патент России.

Личный вклад соискателя.

Автор лично разрабатывал способы монтажа компонентов на гибкую плату и проводил комплексный анализ полученных экспериментальных данных. Лично участвовал в создании тестовых образцов: производил печать функциональных слоёв, разрабатывал базовое программное обеспечение для печати и сборки модулей. В работах, выполненных в соавторстве, автор активно участвовал в выборе используемых методов и интерпретации результатов.

Структура и объем диссертации.

Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, перечня сокращений и списка источников, включающего 101 наименование. Основной материал диссертации изложен на 128 страницах, в том числе содержит 81 рисунок и 24 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** отражена актуальность рассматриваемой темы, сформулированы цель и задачи работы.

В первой главе произведен обзор литературных данных по актуальным способам монтажа ЭКБ, в том числе – на гибкие носители. Рассмотрены особенности работы с утонёнными кристаллами компонентов и их монтажа на различные носители. Обоснован выбор технологии каплеструйной печати для решения задач гетерогенной интеграции.

Во второй главе рассмотрены основные принципы каплеструйной печати, исследованы процессы получения токопроводящих (коммутационных) и диэлектрических (изолирующих) слоёв каплеструйной печатью, рассмотрены параметры получаемых структур, связанные с характерными особенностями материалов и способом их нанесения.

Для анализа и экспериментального исследования было выбрано четыре типа нанокompозитов на основе наночастиц серебра различного диаметра, помещённых в различных пропорциях в растворители для обеспечения возможности каплеструйного нанесения (Таблица 1). Выбранные материалы были рассмотрены с точки зрения совместимости с разрабатываемой технологией каплеструйной печати коммутационных слоёв на органических подложках. Итоговый выбор нанокompозита осуществлялся на основе комплексного исследования процесса каплеобразования и анализа топологических параметров формируемых слоёв с учётом ограничений, накладываемых низкотемпературным материалом подложки –

полиэтиленнафталатом (ПЭН), температура размягчения которого составляет 150 °С.

Таблица 1 – Параметры рассматриваемых токопроводящих материалов.

Параметры	Чернила 1	Чернила 2	Чернила 3	Чернила 4
Растворитель	монометил эфир трипропилен гликоль	монометил эфир триэтилен гликоль	монометил эфир триэтилен гликоль	2фенокси- этанол, пирролидон
Массовая доля металла, %	50	50	50	19
Размер частицы, нм	50–70 90–115	50–85 90–120	50–80 90–120	100
Вязкость, сПз	24	34	37	12-18
Параметры отжига	230 °С, 60 мин	150 °С, 30 мин	150 °С, 30 мин	150 °С, 30 мин
Поверхностное сопротивление слоя	22 мОм/□ (1...5 мкм)	30 мОм/□ (3.5 мкм)	20 мОм/□ (4 мкм)	<100 мОм/□ (1 мкм)

В процессе исследования было определено требуемое значение удерживающего давления, произведено варьирование параметров импульса (для задания оптимальной формы управляющего сигнала), изучено влияние температуры подложки и печатающей головки на растекание структуры и каплеобразование, изучено влияние разрешения и других параметров печати на сплошность формируемого слоя, а также возникающие дефекты. Кроме того была выполнена профилометрия (Рисунок 1, *а*) многослойных структур и измерено сопротивление для композиций с различным количеством печатных токопроводящих слоёв (Рисунок 1, *б*)

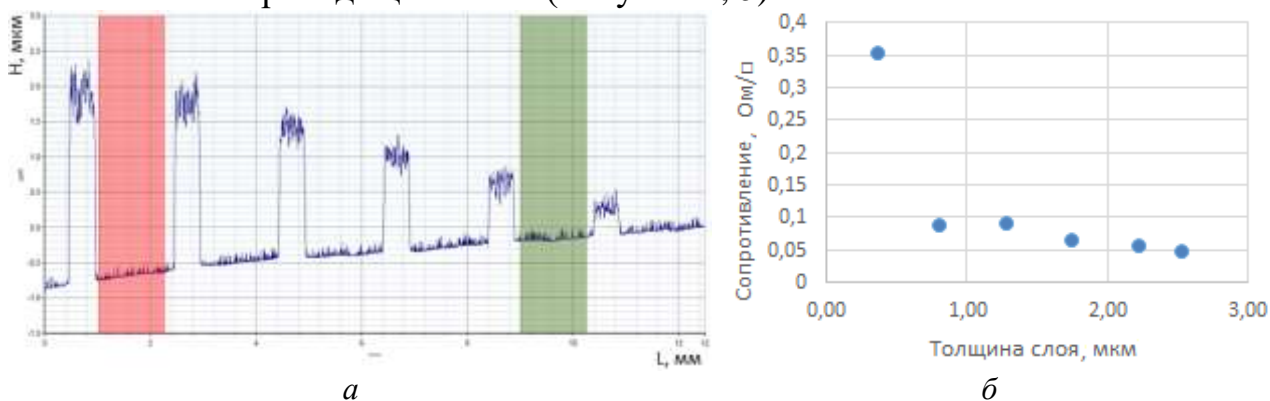


Рисунок 1 – Профилометрия многослойных структур (*а*) и зависимость сопротивления токопроводящего слоя от его толщины (*б*)

Аналогичное исследование было проведено для процесса нанесения органического диэлектрика, используемого для формирования межслойной изоляции. По результатам этих исследований были даны рекомендации по печати многослойной коммутации каплеструйным методом. Технологические параметры оборудования, используемые при

формировании гибких печатных плат для создания гибридных микросборок в рамках данной работы приведены в Таблице 2.

Таблица 2 – Технологические параметры оборудования при печати слоёв.

Параметры	Слои	
	Токопроводящие	Диэлектрические
Количество печатных слоёв	8 / 13	2
Напряжение импульса ВКЛ / ВЫКЛ, длительность импульса ВКЛ / ВЫКЛ	13 В / 6.5 В 3,2 мкс / 6,4 мкс	15.5 В / 7.8 В 3,2 мкс / 6,4 мкс
Подтягивающее давление	30 мбар	25 мбар
Температура печатающей головки	40 °С	50 °С
Разрешение печати	1441 кнд	1441 кнд
Скорость печати	30 мм/с	30 мм/с
Температура стола	80 °С	25 °С

С учётом возможности осуществлять межслоевую коммуникацию, используя сформированные в слое диэлектрика окна, полученная технология позволила создавать многослойные односторонние и двусторонние платы со следующими характеристиками:

- количество слоёв коммутации – до 8;
- минимальная ширина линии – 50 мкм;
- минимальный зазор между линиями – 50 мкм;
- минимальный диаметр формируемых окон – 200 мкм;
- поверхностное сопротивление токопроводящего слоя 40 мОм/□.

Из-за вариации параметров чернил, обусловленной их старением и неравномерностью растекания, может наблюдаться отклонение реальных параметров коммутационных линий, сформированных капле струйной печатью, от проектных значений (Таблица 3). Установлено, что при реализации коммутационных структур по технологии капле струйной печати в традиционный алгоритм проектирования и изготовления необходимо ввести этап физико-технологической коррекции тополого-геометрических параметров для обеспечения воспроизводимости требуемых номиналов электрических параметров в процессе печати.

Таблица 3 – Средние значения отклонения параметров печатных структур.

Сопротивление линий коммутации	От 10 мОм
Номинальное удельное значение	40 мОм/□
Разброс в пределах подложки	1 %
Разброс от подложки к подложке	25 %
Разброс параметров после коррекции	менее 10 %

Разработанная технология капле струйной печати токопроводящих и диэлектрических слоёв может быть эффективна и для реализации процессов микросборки корпусных и бескорпусных электронных компонентов. Рассмотренные далее в данной работе процессы приведены в Таблице 4.

Таблица 4 – Задачи, решаемые при помощи технологии каплеструйной печати для реализации процессов микросборки.

	Описание процесса	Задача, решаемая каплеструйной технологией
1	Монтаж утонённых кристаллов-чипов ИМС, в том числе – на гибкие органические подложки	<p>Фиксация компонента на поверхности подложки</p> <p>Псевдопланаризация поверхности послойной печатью диэлектрика по периметру кристалла на границе «кристалл–подложка».</p> <p>Заполнение окон в слое пассивации для вывода контактов микросхемы на плоскость поверхности пассивирующего слоя.</p> <p>Формирование многослойной гибкой коммутации с контактными площадками для монтажа компонентов обвязки</p> <p>Электрическое подсоединение контактных систем на кристалле к коммутационной плате</p>
2	Монтаж бескорпусных компонентов методом перевёрнутого кристалла	<p>Формирование многослойной гибкой коммутации с контактными площадками для монтажа</p> <p>Модификация контактных систем на кристалле для уменьшения требований к точности совмещения при осуществлении монтажа кристалла компонента на коммутационную плату.</p>
3	Монтаж компонентов с шариковыми выводами методом перевёрнутого кристалла на анизотропный клей	<p>Формирование многослойной гибкой коммутации с контактными площадками для монтажа</p> <p>Формирование диэлектрического рельефа на плате комплементарного выводам микросхемы для обеспечения прецизионного совмещения.</p>

Данные процессы подробно рассмотрены в последующих главах.

В третьей главе рассмотрены процессы монтажа бескорпусных электронных компонентов на гибкую печатную плату методами каплеструйной печати. Разработан процесс монтажа утонённого кристалла на гибкую плату, при котором обеспечивается гибкость получаемого изделия по всей площади, включая область размещения компонента. По результатам разработки технологии монтажа была зарегистрирована заявка № 2020135134 от 26.10.2020 на патент России «Способ изготовления микросборки бескорпусных электронных компонентов на гибких органических подложках».



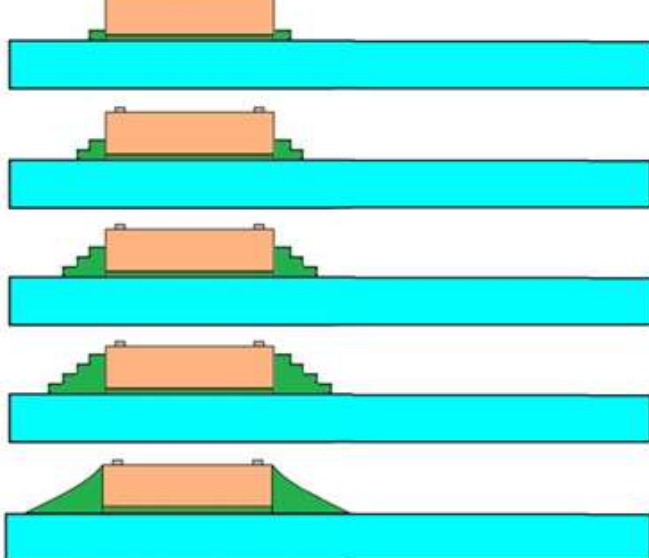
В предложенном способе компонент размещается на поверхности подложки, что обеспечивает большую площадь контакта монтируемого

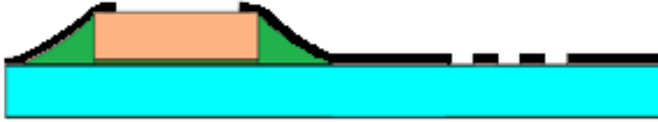


компонента и подложки и, а значит механическую прочность конструкции даже при использовании ультратонких подложек. Таким образом обеспечивается возможность создания ультратонких сборок.

Дополнительной особенностью процесса является возможность нанесения адгезива для фиксации компонента на поверхности подложки каплеструйной печатью, что позволяет осуществлять его прецизионное дозирование и унифицировать технологический процесс. При этом используется тот же материал, что и при формировании изолирующих слоёв многослойной коммутации, а УФ-засветка для его отверждения может производиться с обратной стороны ПЭН-подложки, которая прозрачна для УФ-излучения данной длины волны после размещения компонента.

Интеграция утонённого кристалла компонента в подложку производится псевдопланаризацией подложки в области границы «кристалл–подложка» печатью диэлектрических слоёв по периметру компонента с постепенным уменьшением толщины диэлектрического слоя по мере увеличения периметра зоны печати. При этом количество необходимых слоёв печати зависит от толщины кристалла электронного компонента. Данный процесс поэтапно отражён в Таблице 5, а пример готовой сборки приведён на Рисунке 2.

Таблица 5 – Этапы монтажа каплеструйной печатью утонённого кристалла на гибкую плату

	Наименование этапа	Схематическое изображение этапа
1	Нанесение адгезива	
2	Размещение кристалла на подложке (контактными площадками вверх)	
3	Псевдопланаризация поверхности печатью диэлектрических слоёв	

4	Печать токопроводящего слоя (нижний коммутационный слой с электрическим присоединением кристалла)	
5	Печать межслойной изоляции	
6	Печать последующих слоёв коммутационной платы	

После размещения и фиксации электронного компонента на подложке для обеспечения последующего доступа к контактным системам компонента и его конформного механического закрепления на подложке производится выравнивание перепада высот на границе компонента и подложки. Каплетруйной печатью наносятся слои диэлектрического материала вокруг кристалла компонента с постепенным увеличением периметра зоны печати. При этом за счёт перекрытия с предыдущим слоем происходит постепенное сглаживание ступеньки на границе компонента и подложки.

Для достижения максимальной толщины все выравнивающие слои наносятся с отверждением УФ-излучением после каждого прохода печати, а последний слой наносится с засветкой после окончания печати. При этом сглаживается рельеф поверхности за счёт увеличенного времени растекания чернил и образуется однородная гладкая поверхность, необходимая для формирования многослойной коммутации. Полученная псевдопланарная поверхность пригодна для печати металлизации, причём получаемые слои металла одновременно выполняют функцию токоразводки и обеспечивают электрическое присоединение выводов кристалла к коммутации.

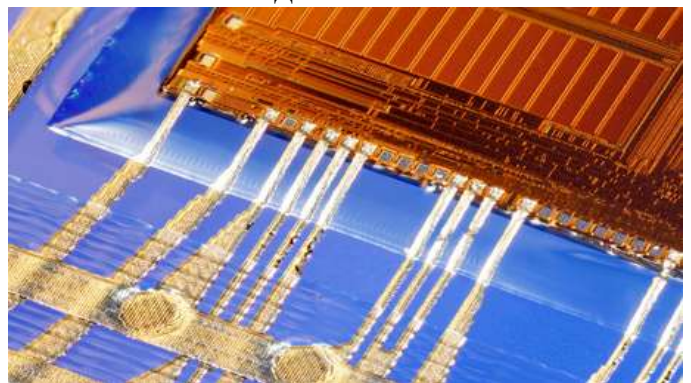


Рисунок 2 – Монтаж утонённого кристалла микросхемы памяти МХ25 методом каплетруйной печати

Ввиду особенностей слоёв, получаемых по технологии каплетруйной печати, данный способ пригоден исключительно для монтажа утонённых кристаллов электронных компонентов. Оптимальной является высота менее 50 мкм, а граница сегодняшних технологических возможностей наблюдается при толщинах кристалла порядка 100 мкм. С увеличением толщины кристалла увеличивается и количество планаризирующих слоёв, увеличивается площадь структуры и, следовательно, увеличивается сопротивление контактных линий. Кроме того, кристаллы электронных компонентов толщиной ~100 мкм практически теряют гибкость, что не позволяет говорить

о реализации основных преимуществ процесса. Например, кристалл микросхемы памяти MX25 толщиной 80 мкм не позволяет получить изгиб с радиусом менее 50 мм.

Необходимо учитывать морфологию поверхности кристалла. В оптимальном варианте контактные площадки кристалла расположены на одном уровне со слоем пассивации поверхности. В этом случае отсутствуют дополнительные изломы печатных линий, которые оказывают значительное влияние на сопротивление коммутационной шины. Если контактные площадки заглублены в слое пассивации, то при печати происходит перераспределение материала с образованием областей с пониженной толщиной структуры (Рисунок 3). Во избежание этого необходимо подготовить компонент к монтажу: заполнить образующиеся «колодцы» токопроводящим материалом, стравить излишнюю толщину слоя пассивации или иным образом устранить резкие перепады высот.

Помимо заполнения «колодца» контактной площадки к подготовительным операциям также относится выравнивание перепада высот по линии разделения кристаллов и печать разделительных диэлектрических барьеров между близко расположенными контактными площадками.

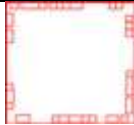




Рисунок 3 – Контактное печатное соединение к выводам ИМС:

а – вид печатных контактных линий сверху; *б* – РЭМ-изображение области контакта; *в* – FIB-срез соединения сфокусированным ионным пучком

В работе был предложен и использован процесс монтажа бескорпусных компонентов методом перевёрнутого кристалла. При этом на поверхности кристалла каплеустройным методом формируется диэлектрический подслой без покрытия контактных систем кристалла (Таблица 6), а затем на нём формируется коммутационное поле, аналогичное сетке шариковых выводов при использовании BGA-корпуса. Полученную после расстановки шариков припоя или формирования шариковых выводов иным способом структуру можно монтировать как микросхему в WLCSP-корпусе. Помимо увеличения размеров контактных структур (что снижает требования к точности совмещения), такая модификация кристалла бескорпусного компонента позволяет монтировать компоненты с утопленными выводами на анизотропный клей.

Таблица 6 – Последовательность процесса трансформации выводов

Технологический этап	Эскиз топологии
Печать слоя, ограничивающего растекание	
Печать диэлектрического буферного подслоя (заполнение поверхности кристалла диэлектрическим материалом)	
Печать коммутационного поля по диэлектрическому подслою	

Для ограничения растекания чернил формирование коммутационного поля проводится в 3 этапа. На первом этапе формируется барьерный диэлектрический слой по периметру контактных площадок. При этом отверждение слоя производится после каждого прохода печати для обеспечения минимального растекания. На втором этапе вся поверхность кристалла заполняется диэлектриком, а напечатанный на первом этапе барьерный слой препятствует затеканию материала на контактные площадки. В этом случае отверждение слоя производится по окончании процесса печати для получения гладкого слоя. На третьем этапе производится печать матрицы новых увеличенных выводов и коммутационных шин токопроводящими чернилами.

После размещения шариковых выводов на сформированных увеличенных контактных структурах можно осуществлять монтаж компонентов в WLCSP-корпусе, в том числе – рассматриваемый в следующей главе процесс монтажа с использованием капле струйно сформированного комплементарного диэлектрического рельефа на поверхности платы для финального прецизионного совмещения компонента и коммутационной платы.

В четвёртой главе приведены результаты исследования процессов создания гибридных сборок корпусных компонентов на гибких печатных платах, изготовленных капле струйной печатью.

Предложен способ сборки микросхем с шариковыми выводами (BGA- и WLCSP-корпуса) на гибких платах с прецизионным совмещением монтируемого компонента с подложкой формированием комплементарного рельефа на подложке капле струйной печатью диэлектрического слоя. Особенностью данного процесса

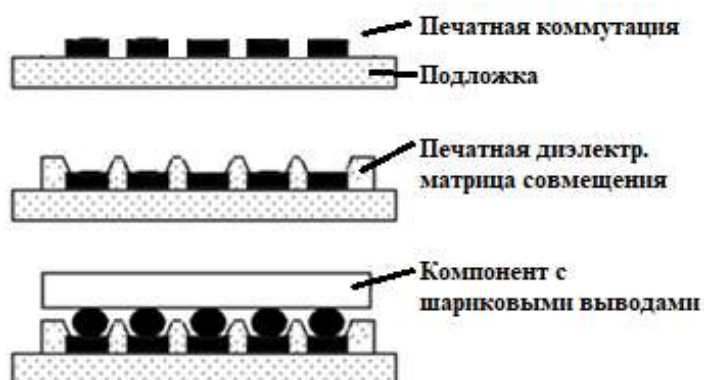


Рисунок 4 – Схематичное изображение процесса вложения

является упрощение алгоритма совмещения электронного компонента с коммутационной структурой на подложке при монтаже на анизотропный клей, поскольку в предложенном способе компонент позиционируется на плате за счёт его механического вложения в предварительно сформированный каплеструйной печатью диэлектрический рельеф, комплементарный его выводам (Рисунок 4).

Был апробирован способ низкотемпературной пайки компонентов на коммутационные структуры, изготовленные каплеструйной печатью. Для реализации пайки потребовалось вводить промежуточную технологическую операцию – химическое осаждение меди (Рисунок 5).

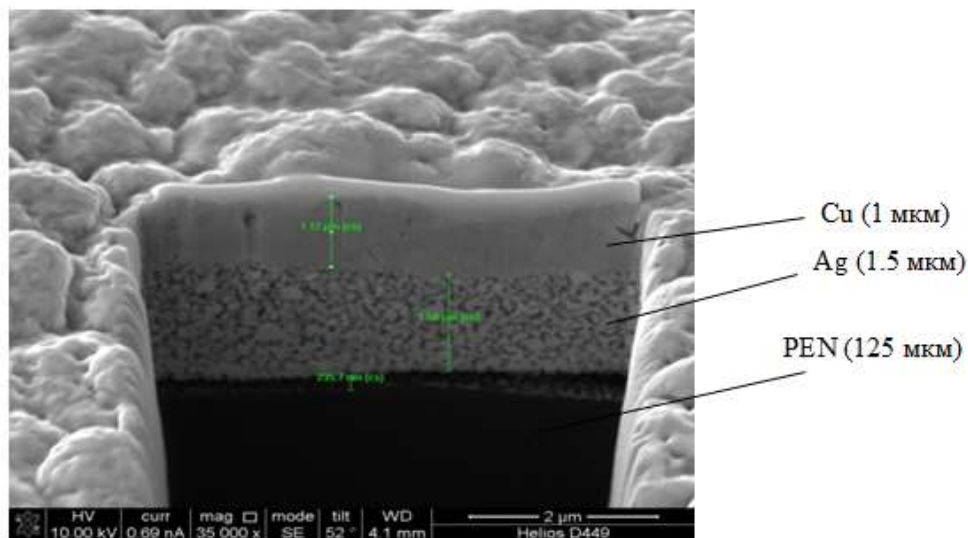


Рисунок 5 – Срез образца после омеднения серебряного слоя.

Несмотря на то, что паянное соединение не обладает гибкостью, а для обеспечения механической прочности в условиях монтажа на органические подложки необходима дополнительная заливка структуры компаундом, данный процесс имеет существенное значение, поскольку позволяет производить монтаж широкого спектра электронных компонентов в различных вариантах исполнения на коммутационные структуры, изготовленные с использованием каплеструйной печати. Помимо обеспечения возможности пайки, этап химического меднения позволяет наращивать толщину токоведущих шин, нанося дополнительно до 3 мкм меди поверх печатного слоя серебра, что позволяет значительно уменьшить сопротивление коммутационных линий.

Полученную после монтажа «омеднённую» плату необходимо изолировать от внешнего атмосферного воздействия для предотвращения окисления. Для этого её защищают полипараксилиленом, наносимым из газовой фазы.

В пятой главе описаны тестовые структуры функциональных модулей, разработанные и изготовленные с применением предложенных ранее технологий. Они представляют собой функциональные узлы устройств Интернета вещей и в определённых комбинациях позволяют реализовать

функционально сложные законченные устройства. Для демонстрации эффективности технологии каплеструйной печати были изготовлены следующие модули:

- модуль DC–DC преобразователя;
- модуль приёмника энергии;
- модуль беспроводного NFC-интерфейса (в двух вариантах);
- модуль обработки сигналов;
- модуль памяти.

Для создания модуля обработки сигналов и модуля памяти использовалась технология монтажа утонённых кристаллов каплеструйной печатью. Модуль беспроводного NFC-интерфейса реализован как в бескорпусном варианте, так и на базе низкопрофильной компонентной базы (WLCSP-корпус). Остальные модули (DC–DC преобразователь и приёмник энергии) изготавливались с использованием технологии низкотемпературной пайки. В случае применения бескорпусной элементной базы использовались как компоненты заранее подготовленные производителем, так и утонённые кристаллы стандартных компонентов, подготовка которых осуществлялась самостоятельно. При этом толщина заранее подготовленных компонентов (микроконтроллер Cypress и NFC-метка NHS3100) составляла 35 мкм, а толщина кристалла микросхемы флэш-памяти после утонения 80 мкм.

Изготовленные образцы (Рисунок 6) прошли комплекс испытаний. Исследовались гибкость получаемых структур, влияние климатических факторов (повышенная и пониженная температура среды и влажность воздуха), внешние вибрационные воздействия. В зависимости от назначения модуля проводилось разностороннее электрическое тестирование.

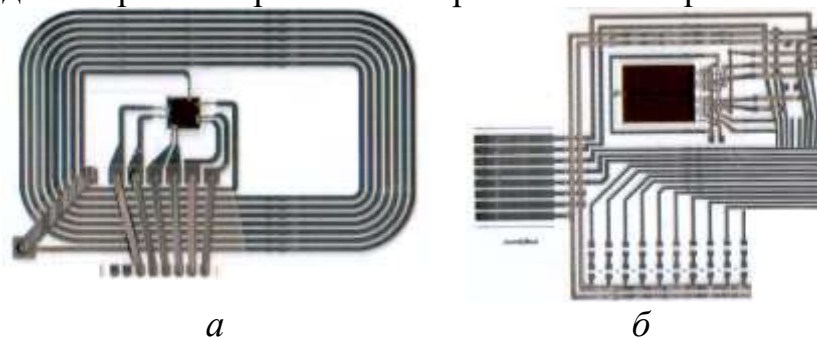


Рисунок 6 – Тестовые структуры модулей: *а* – NFC интерфейса; *б* – памяти

По результатам тестирования можно сделать следующие выводы:

- толщина получаемых гибких сборок варьируется от 170 мкм до 1 мм;
- модули, изготовленные на базе бескорпусных компонентов, обладают гибкостью в пределах радиусов изгиба до 100 мм;
- диапазон рабочих температур от -10°C до $+40^{\circ}\text{C}$;
- устойчивость к синусоидальной вибрации (25 ± 5) Гц.

Приведённые примеры показывают пригодность предложенных процессов для создания современных изделий электронной техники, в частности, сверхтонких гибких устройств интернета вещей.

В **заключении** подводятся общие итоги исследований, в том числе обобщается комплекс разработанных процессов на базе технологии каплеструйной печати (Таблица 7).

Таблица 7 – Разработанные процессы

Разработанный процесс	Достижимый результат	Изображение
Каплеструйная печать токопроводящих и диэлектрических слоёв и их многослойных композиций	Формирование многослойной коммутационной платы на гибкой подложке	
Локальная каплеструйная псевдопланаризация поверхности на границе «кристалл-подложка»	Микросборка утонённой ИМС и её контактирование к коммутационной структуре на гибкой подложке	
Каплеструйная печать на изолированной поверхности кристалла контактных систем, транслированных с периферии кристалла-чипа	Подготовка бескорпусного электронного компонента к размещению шариковых выводов с возможностью последующего монтажа аналогично компоненту в WLCSP-корпусе	
Каплеструйная печать диэлектрической матрицы совмещения, комплементарной выводам ИМС	Прецизионное совмещение шариковых выводов компонента с коммутацией на подложке при реализации процесса монтажа методом перевёрнутого кристалла	
Химическое осаждение меди на многослойную коммутацию, полученную каплеструйной печатью	Обеспечение надёжности соединения навесных компонентов с платой при реализации процесса низкотемпературной пайки	

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Показано, что каплеструйная печать может являться альтернативной технологией, позволяющей реализовать микросборку и контактирование бескорпусных и корпусных электронных компонентов на гибкой коммутационной плате, в том числе – изготовленной методом каплеструйной печати.

2. Разработаны технологии сборки и контактирования с использованием метода каплеструйной печати в том числе:

- технология локальной каплеструйной псевдопланаризации диэлектриком переходной зоны между контактными системами на кристалле-чипе ИМС и коммутационным полем на подложке;

– технология прецизионного совмещения контактных систем электронного компонента и подложки в методе перевёрнутого кристалла, каплеструйным формированием на подложке диэлектрической матрицы, комплементарной контактными системами компонента;

– технология трансляции периферийных контактных систем кристалла с формированием нового развитого коммутационного поля на поверхности кристалла.

3. Создано семейство гибких функциональных модулей, изготавливаемых на базе разработанных технологических процессов каплеструйной печати, в том числе модули DC–DC преобразователя, приёмника энергии, беспроводного NFC-интерфейса, обработки данных и памяти.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю д.т.н., профессору В. В. Лучинину, руководителю экспериментальных работ к.т.н. О. С. Бохову за научно-методическое обеспечение исследований и аспиранту И. В. Мандрику за помощь при реализации процесса каплеструйной печати, а также всем сотрудникам ИЦ ЦМИД так или иначе способствовавшим выполнению данной работы.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях рекомендованных ВАК:

1. Каплеструйная технология гибкой печатной электроники для изготовления пассивных элементов / П. В. Афанасьев, О. С. Бохов, И. В. Мандрик, В. А. Старцев // Нано- и микросистемная техника. 2017. Т. 19. № 8. с. 465–470.
2. Создание антенных печатных модулей каплеструйной технологией / Топталов С.И., Устинов Е.М., Афанасьев П.В., Бохов О.С., Мандрик И.В., Старцев В.А.// Нано- и микросистемная техника. 2017. Т.19. № 8. с. 470–475
3. Гибкая печатная конформная электроника. Отечественные компетенции и электронные компоненты / В. В. Лучинин, О. С. Бохов, П. В. Афанасьев, И. В. Мандрик, В. А. Старцев, А.В. Смирнов, В.А. Никонова // Наноиндустрия. 2019. №12. с. 342–350.
4. Конформно интегрируемая электронная компонентная база гибкой печатной электроники для Интернета людей. / В. В. Лучинин, О.С. Бохов, И.В. Мандрик, В.А. Старцев, А.В. Смирнов, П. В. Афанасьев, М.Г. Аньчков, А. В. Пудова, В.А. Никонова, С. Ю. Шевченко // Электроника: наука, технология, бизнес. 2020. № 5. с.82–88.

Прочие публикации:

5. Super inkjet technology machine development for additive 3D manufacturing. / O. Bochov, P. Afanasev, M. Grooten, H. Broekhuizen, V. Startsev, I. Mandrik, V. Nikonova, A. Smirnov // International scientific journal INDUSTRY 4.0 Issue 4, 2019, pp. 175–178.