

Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации

Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники

В.И. Туев

**АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
ПРОИЗВОДСТВА УСТРОЙСТВ  
РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**

Учебное пособие

Томск  
2020

УДК 681.625(075.8)  
ББК 32.971.32-046.22я73  
Т816

**Рецензенты:**

**Нисан А.В.**, канд. техн. наук;  
**Демко А.И.**, канд. техн. наук

Одобрено на заседании Совета радиоконструкторского факультета  
Томского государственного университета систем управления  
и радиоэлектроники, протокол № 151 от 28.01.20.

**Туев, Василий Иванович**

Т816 Аддитивные технологии производства устройств радиоэлектроники: учеб. пособие / В.И. Туев. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2020. – 90 с.

Приведены основы технологии получения тонких пленок печатными методами. Дана классификация и краткое описание технологического оборудования для печати неорганическими и органическими растворами материалов (чернилами). Рассмотрены контактный способ нанесения чернил (плоттеры) и бесконтактные способы печати (капельный и аэрозольный принтеры). Описаны аддитивные технологии печати проводящих металлических слоев рисунка печатной платы, рассмотрены особенности печатных технологий изготовления устройств органической электроники.

Для студентов уровней бакалавриата и магистратуры, обучающихся по направлению «Конструирование и технология электронных средств». Пособие может быть полезно для студентов других радиотехнических направлений подготовки.

УДК 681.625(075.8)  
ББК 32.971.32-046.22я73

© Туев В.И., 2020  
© Томск. гос. ун-т систем упр.  
и радиоэлектроники, 2020

# Оглавление

Введение .....	4
<b>1 ПЕЧАТНЫЕ МЕТОДЫ НАНЕСЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ</b>	
1.1 Основы печатных технологий .....	6
1.2 Трафаретная печать в электронике .....	10
1.3 Струйная печать .....	11
1.4 Плоттерная печать .....	12
Вопросы для самоконтроля.....	13
<b>2 МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПРОВОДЯЩИХ ТОПОЛОГИЙ ПЕЧАТНЫМИ МЕТОДАМИ</b>	
2.1 Материалы оснований для печати .....	14
2.2 Подготовка оснований для печати проводников.....	16
2.3 Растворы материалов для печати (чернила).....	18
Вопросы для самоконтроля.....	23
<b>3 ПРИМЕНЕНИЕ БЕСКОНТАКТНОЙ СТРУЙНОЙ ПЕЧАТИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ</b>	
3.1 Устройства струйной печати .....	24
3.2 Изготовление нитевидного излучающего элемента методом струйной печати .....	38
Вопросы для самоконтроля.....	49
<b>4 ПРИМЕНЕНИЕ КОНТАКТНОЙ (ПЛОТТЕРНОЙ) ПЕЧАТИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ</b>	
4.1 Устройство контактной (плоттерной) печати .....	50
4.2 Применение способа плоттерной печати для изготовления нитевидного излучающего элемента .....	54
4.3 Органические светоизлучающие диоды, изготовленные плоттерным способом печати.....	61
4.4 Печать проводящего (металлического) слоя.....	73
Вопросы для самоконтроля.....	75
<b>5 АЭРОЗОЛЬНАЯ ПЕЧАТЬ</b>	
5.1 Общие сведения .....	76
5.2 Аэрозольный принтер для микроэлектроники .....	77
5.3 Результаты применения аэрозольного способа для печати элементов функциональной микроэлектроники .....	80
Вопросы для самоконтроля.....	84
Заключение .....	85
Литература .....	86

## Введение

Аддитивные технологии в машиностроении, электронике и других отраслях базируются на способе формирования изделия путем последовательного добавления материала к первому слою заготовки. Название происходит от английского термина add – добавлять, складывать, приплюсовывать. До недавнего времени более распространенными были субтрактивные технологии, при которых «лишний» материал удалялся с целью получения нужной формы детали.

В настоящем издании приведены основы аддитивных технологий в радиоэлектронике, уровень развития которых пока уступает уровню аддитивных технологий изготовления изделий из металлов и пластиков в машиностроении и приборостроении [1].

Развитие принтерной печати, появившейся как средство отображения текста и изображений на бумаге, в настоящее время идет по нескольким направлениям. Достаточно быстро по исторической шкале времени найдены новые области применения, что стимулировало разработку новых конструкций принтеров и технологий. От печатания полноцветных плоских 2D-изображений до создания реальных конструкций 3D – таков сегодняшний диапазон полезности принтерных технологий. Расширены также научно-технические, производственные и бытовые области применения принтерных методов решения разнообразных задач. Выделяя функциональное назначение как главный признак принтерных технологий, можно классифицировать их следующим образом:

- отображение информации в статическом виде на различных основаниях (бумага, полимерные пленки, керамика, металлы и т.п.);
- создание 3D-конструкций путем послойного «выращивания» изделия из наносимого материала;
- нанесение функциональных элементов на подложки путем формирования наноразмерных пленок полупроводников, металлов, диэлектриков, 2D-печать.

В настоящее время развитие всех трех видов принтерных технологий базируется на достижениях в области нанотехнологий и наноматериалов [2–3]. Это направление находится в стадии дина-

мичного развития, поэтому исследования и разработки в данной области нанотехнологий являются актуальной задачей.

Исследования в области принтерных технологий функциональной электроники осуществляют Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), Национальный исследовательский Томский государственный университет (НИ ТГУ), ОАО «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов» (НИИ ПП), ООО «АкКоЛаб», компания «Остек» и другие.

Проблема создания материалов для функциональной электроники с возможностью применения принтерных методов нанесения электролюминесцентных пленок решается в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте высокомолекулярных соединений (ИВМС) Российской академии наук, Институте проблем химической физики (ИПХФ), Черноголовка.

Цель учебного пособия – ознакомить студентов, обучающихся по радиотехническим и радиоконструкторским направлениям подготовки, с перспективными аддитивными технологиями производства радиоэлектронных средств. При подготовке пособия использованы апробированные на конференциях и опубликованные в рецензируемых изданиях научные материалы по научной специальности 05.12.04 «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения», полученные при проведении исследований в Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники в течение последних десяти лет [4–7].

Автор выражает благодарность аспирантам Шкарупо А.П., Юлаевой Ю.В. и Хомякову А.Ю., сотрудникам кафедры радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга и НИИ светодиодных технологий ТУСУРа за помощь в подготовке текста данного пособия.

---

# 1 ПЕЧАТНЫЕ МЕТОДЫ НАНЕСЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

---

## 1.1 Основы печатных технологий

В историческом плане печатные технологии получили развитие и применение в черчении, рисовании и полиграфии. Наиболее широко используемыми являются четыре способа полиграфической печати [8].

1. Высокая печать. Перенос чернил на основание осуществляется с печатной формы, на которой печатающие элементы расположены в одной плоскости и выше пробельных.

2. Глубокая печать. Передача изображения на подложку выполняется с печатной формы, на которой пробельные элементы расположены в одной плоскости, образуя непрерывную сетку, и выше печатающих элементов.

3. Плоская печать. Перенос растворов материалов на основание осуществляется с печатной плоской формы, на которой печатающие и пробельные элементы расположены в одной плоскости.

4. Трафаретная печать. Печатающие элементы представлены в слое трафарета в виде ячеек (сетка). Раствор материала проталкивается сквозь сетку с помощью ракеля. Трафаретная печать осуществляется касанием трафарета к основанию (шелкография) или без касания (струйная печать).

К полиграфическим способам печати можно добавить офисные и ручные, также предназначенные для нанесения тонких пленок красителя на основание, например шариковое дозирование, фотографии и профилограмма линии которого приведена на рисунке 1.1.

Ширина линии имеет ориентировочное значение 150 мкм, а профиль повторяет окружность пишущего шарика. Значение толщины наносимого материала чернил имеет значение 1,3–1,4 мкм. Острые «пики» – это не более чем зрительный обман, обусловленный различием масштабов по вертикали и горизонтали в 20 раз.

К полиграфическим способам печати относятся также плоттерные методы, широко использованные в двадцатом столетии для

черчения конструкторской документации с применением рейсфедеров (рисунок 1.2) [9, 10].

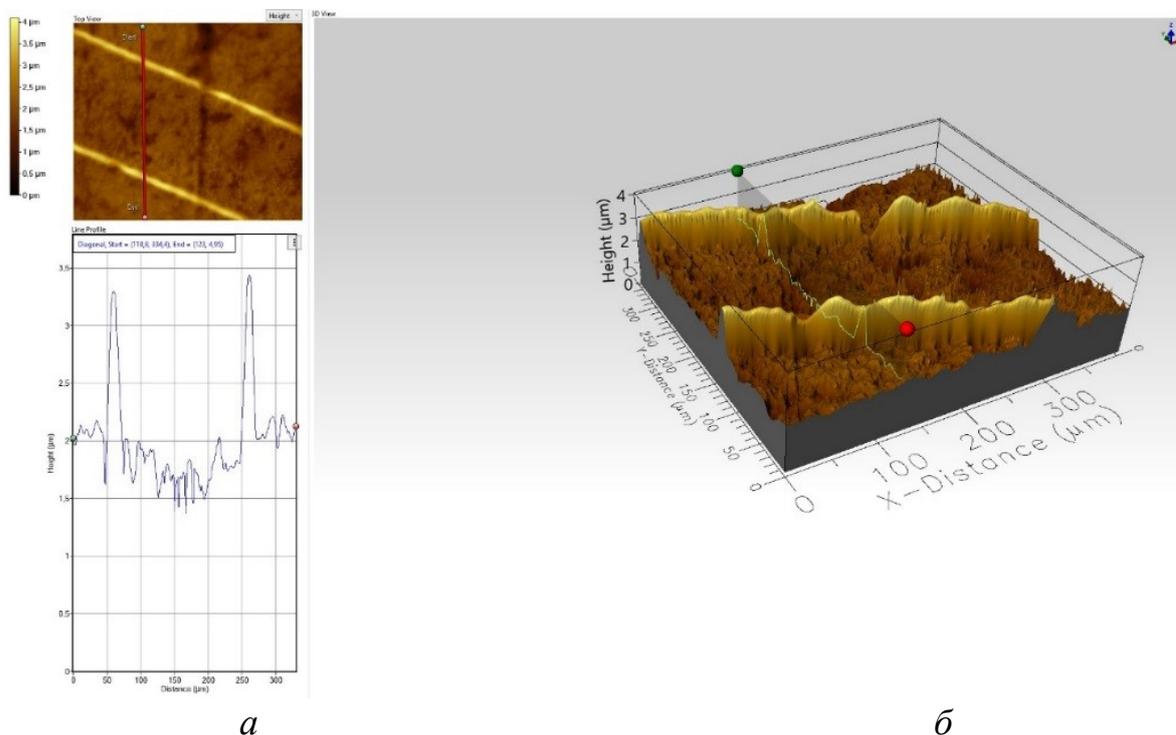


Рисунок 1.1 – Профилограмма (а) и фотография (б) линии, оставленной на бумаге шариковой ручкой



Рисунок 1.2 – Фотографии металлического (а) и стеклянных (б) рейсфедеров

Пишущий кончик рейсфедера погружали в емкость с чернилами на глубину 1–2 мм. Чернила под действием капиллярных сил заполняли пространство внутри рейсфедера на высоту 3–5 мм. После извлечения рейсфедера из емкости с чернилами кончик осушали ватным тампоном или делали пробные штрихи по поверхности, переносили к месту начала черчения линии, опускали до соприкосновения с бумагой и, перемещая рейсфедер без потери контакта с основанием, проводили линию, пока чернила не заканчивались

и линия не прерывалась. Искусство ручной технологии плоттерного нанесения заключалось в таком движении инструмента, при котором отсутствовали ненужные точки и расширения линии в момент первоначального соприкосновения рейсфедера с бумагой.

В результате использования любого из вышеназванных способов на основании образовывалась тонкая пленка наносимого материала (чернил).

Сходство полиграфической продукции и изделий микро- и нанoeлектроники заключается в их слоистой структуре. Действительно, страница с текстом создается в принтере путем нанесения слоя пигмента на бумажное основание и, например, печатная плата функционального узла электронного устройства есть основание (пусть не бумажное, а текстолитовое) с опять же нанесенными токопроводящими дорожками. Внутренняя структура электронных приборов также представляет собой «слоеный пирог». Для примера рассмотрим упрощенную структуру полевого транзистора с изолированным затвором (рисунок 1.3) [11].

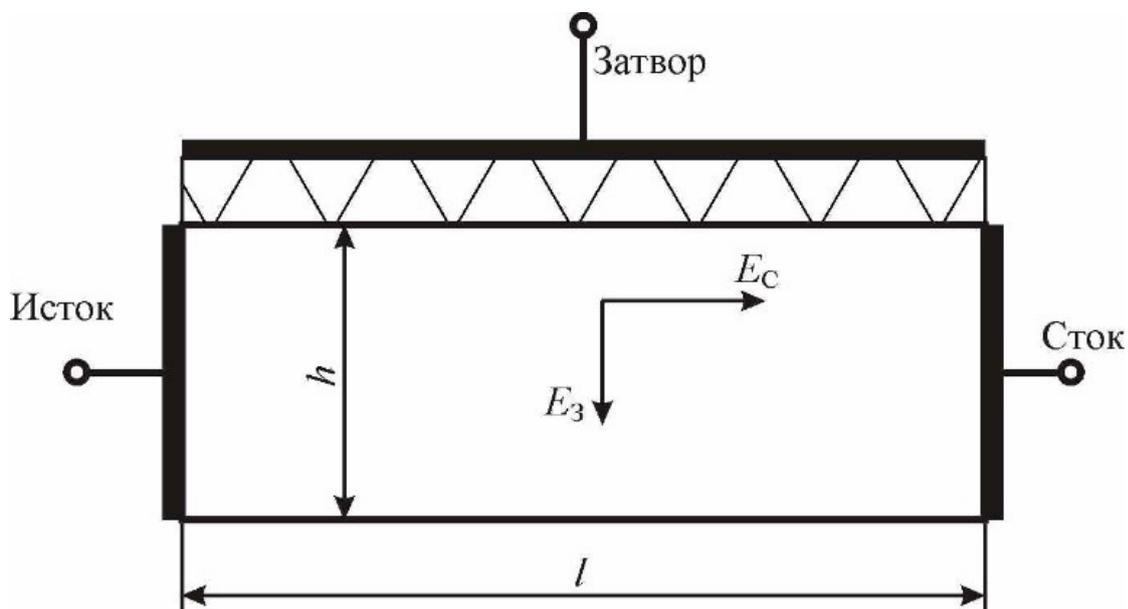


Рисунок 1.3 – Упрощенная структура полевого транзистора

Принцип работы полевого транзистора заключается в изменении высоты проводящей части канала в подзатворной области полевого транзистора высотой  $h$  и длиной  $l$  при изменении потенциала затвора. Подзатворная область, слой диэлектрика, металли-

ческий слой затвора – это тонкие пленки, что наводит на сравнение конструкции полевого транзистора с полиграфической продукцией.

На рисунке 1.4 представлена конструкция органического светоизлучающего диода [12]. Устройство нижнего излучения содержит последовательность слоев 1, 2 (21–23), 3 (31–33) и 5 для излучения света 4 по меньшей мере через частично прозрачный нижний электрод 12 (121–124) и через частично прозрачный материал основу 11.

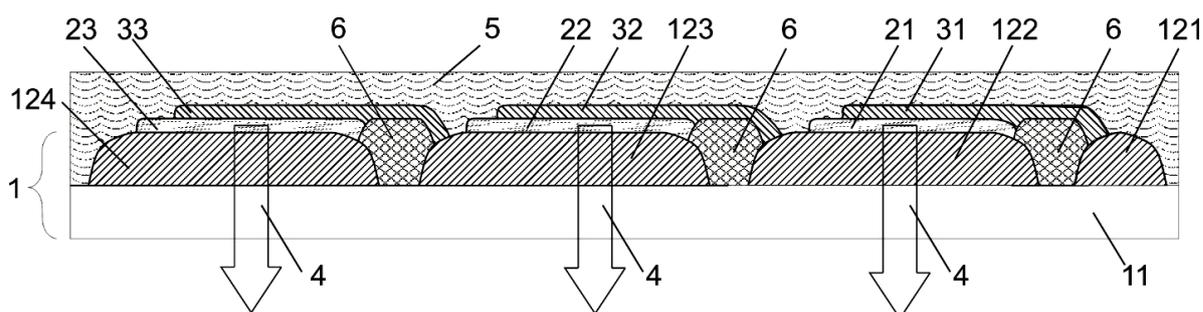


Рисунок 1.4 – Структура органического светоизлучающего диода

Нижний электрод 12, верхний электрод 3 и пакет 2 органических слоев покрыты защитным элементом 5, чтобы предохранить пакет 2 органических слоев от воздействий окружающей среды и таким образом обеспечить достаточный срок службы. Пакет 2 состоит из одного или более органических слоев, содержащих по меньшей мере один слой, излучающий свет (4) на нижнюю сторону органического электролюминесцентного устройства. Помимо светоизлучающего слоя, пакет 2 органических слоев может содержать транспортный слой электронов между светоизлучающим слоем и катодом и/или транспортный слой дырок между светоизлучающим слоем и анодом. Пакет слоев 2 может также содержать несколько светоизлучающих слоев, каждый из которых имеет свой спектр испускания. Типичная толщина органических слоев находится в интервале от 20 до 500 нм, что опять подтверждает слоистые свойства полупроводникового прибора.

Учитывая слоистые свойства как внутренней структуры электронных приборов, так и конструкции функциональных узлов, очень привлекательными представляются полиграфические

способы нанесения материалов в виде последовательности тонких пленок и в области создания электронной продукции.

Очевидно, что применение печатных технологий будет определяться наличием материалов, которые можно наносить в жидком состоянии, и способами их нанесения, которые должны обеспечивать требуемую толщину и неравномерность толщины пленок.

Ниже коротко рассмотрены технологии, пришедшие из области полиграфии и используемые в изготовлении электронных устройств.

## 1.2 Трафаретная печать в электронике

В производстве электронных изделий широкое применение получили способы трафаретной печати с касанием сетчатого или металлического трафарета к основанию. К технологическим операциям, осуществляемым с использованием шелкографии, относятся нанесение припойной пасты на контактные площадки компонентов поверхностного монтажа, формирование диэлектрических покрытий на поверхности электропроводящих материалов и проводниковых топологий на диэлектрических основаниях, нанесение позиционных обозначений элементов и т.д.

Качественные особенности трафаретной печати:

- сравнительно большая толщина слоя наносимого материала (10–50 мкм), определяемая толщиной материала трафаретного полотна;
- сравнительно невысокая плотность создаваемого рисунка (разрешение печати), определяемая шагом сетки или жесткостью металлического трафарета;
- сравнительно высокая вязкость раствора наносимого вещества, препятствующая затеканию под трафарет в процессе нанесения;
- возможность печати на гибкие основания.

## 1.3 Струйная печать

Струйная печать – это технология получения пленки при помощи микроскопических капель материала, распыляемого печатающей головкой принтера на подложку. На рисунке 1.5 приведена схема, поясняющая способ струйной печати [13].

В настоящее время наибольшее распространение получили три способа струйной печати: воздушно-пузырьковая, пьезоэлектрическая и термоструйная. Капли пико- и нанометровых объемов выталкиваются при соответствующем импульсе, генерируемом либо тепловыми, либо пьезоэлектрическими приводами, используемыми в головке струйной форсунки.

### Струйная технология печати

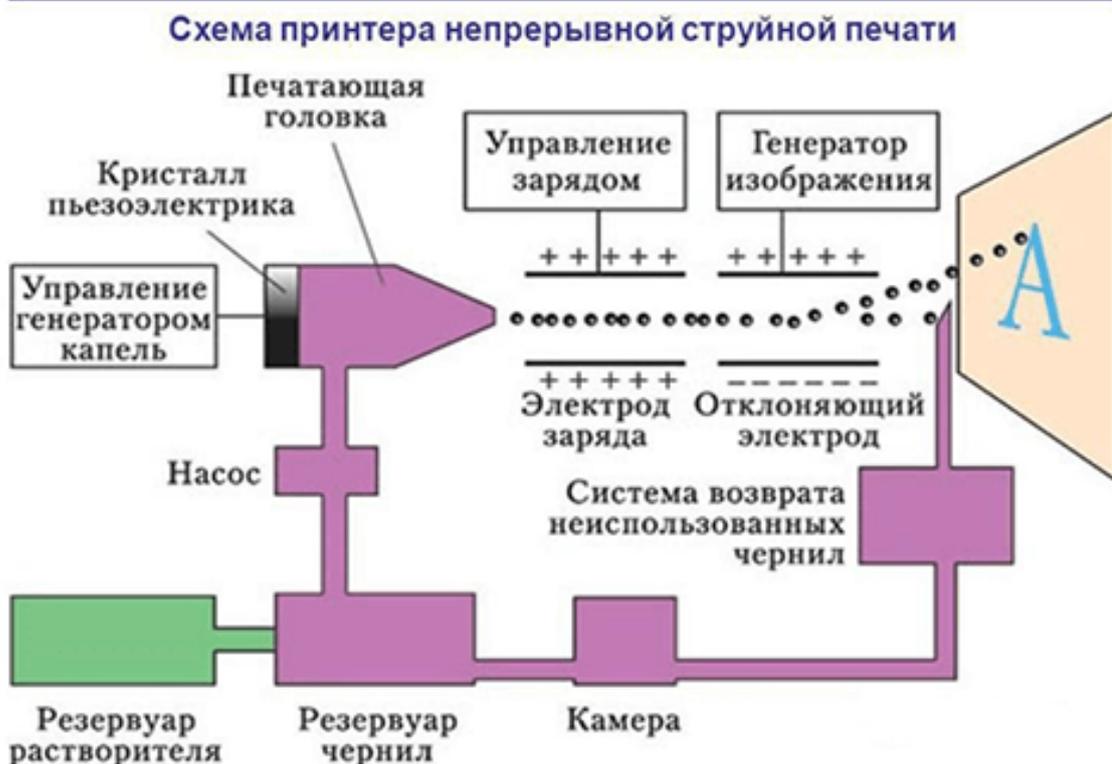


Рисунок 1.5 – Схема устройства струйной печати

Основные требования к чернилам для струйной печати – химическая стабильность, растворимость в обычных растворителях и возможность низкотемпературной обработки. Разработка коллоидного раствора для правильного выброса капель на целевую область путем сохранения приемлемого качества печатных слоев является

сложной задачей из-за скорости испарения растворителей и ориентации частиц.

Достоинства струйной печати:

- сравнительно низкая стоимость;
- возможность применения менее вязких по сравнению с трафаретной печатью чернил с существенно меньшим значением толщины получаемого слоя;
- возможность печати на гибкие основания.

## 1.4 Плоттерная печать

Печатающим элементом плоттерных принтеров является капилляр с жидкостью, который с помощью системы позиционирования перемещается над поверхностью подложки (рисунок 1.6) [14].

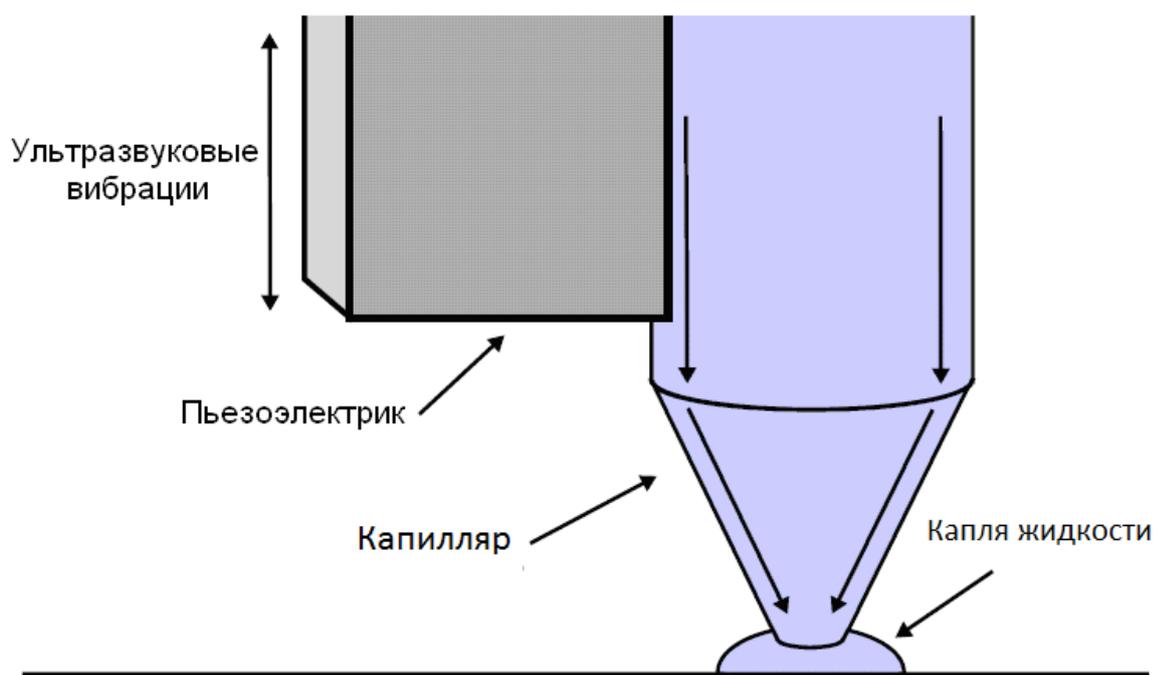


Рисунок 1.6 – Плоттерное нанесение жидкости

С нижней плоскости капилляра под действием силы тяжести и вибрации в направлении продольной оси свисает капля. В задачи системы позиционирования плоттерных принтеров входит обеспечение контакта мениска жидкости с поверхностью подложки и последующее перемещение капилляра по заданной траектории без

механического касания его нижней плоскости с подложкой. При этом в каждой точке траектории контакт самого капилляра с поверхностью подложки должен быть исключен. Хотя описанный способ нанесения известен как контактный, термин «контакт» следует понимать как соприкосновение мениска жидкости на нижней плоскости капилляра с поверхностью подложки.

## **Вопросы для самоконтроля**

1. Если перенос чернил на основание осуществляется с печатной формы, на которой печатающие элементы расположены в одной плоскости и выше пробельных, то это способ высокой или глубокой печати?

2. Если печатающие элементы созданы в слое трафарета в виде ячеек (сетка), а раствор материала проталкивается сквозь сетку с помощью ракеля, то это способ плоской или трафаретной печати?

3. В чем заключается единство конструктивных особенностей полиграфической продукции и изделий микро- и наноэлектроники?

4. Как соотносятся значения вязкости, предъявляемые к чернилам для струйной и для трафаретной печати?

5. При нанесении материалов контактным способом с применением плоттерных принтеров контакт с основанием осуществляется капилляром или мениском жидкости капилляра?

---

## 2 МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПРОВОДЯЩИХ ТОПОЛОГИЙ ПЕЧАТНЫМИ МЕТОДАМИ

---

### 2.1 Материалы оснований для печати

В качестве оснований для нанесения проводящих покрытий используются диэлектрические материалы, в число которых входят следующие группы [15].

#### **Материалы для стандартных односторонних, двусторонних и многослойных печатных плат**

Фольгированный стеклотекстолит FR4 с температурой стеклования<sup>1</sup> 135, 150 и 170 °С является наиболее распространенным материалом для производства односторонних и двухсторонних печатных плат. Толщина стеклотекстолита обычно варьирует от 0,5 до 3,0 мм.

Достоинства FR4: стабильность характеристик и размеров во времени, высокая устойчивость к воздействию неблагоприятных климатических факторов.

Во многих случаях, где требуются достаточно простые печатные платы (при производстве бытовой аппаратуры, различных датчиков, некоторых комплектующих к автомобилям и т.п.), превосходные свойства стеклотекстолита оказываются избыточными и на первый план выходят показатели технологичности и стоимости. В таких случаях обычно используют следующие материалы:

– ХРС, FR1, FR2 – фольгированные гетинаксы (основа из целлюлозной бумаги, пропитанной фенольной смолой), широко применяются при изготовлении печатных плат для бытовой электроники, аудио-, видеотехники, в автомобилестроении (расположены в порядке возрастания показателей свойств и, соответственно, цены). Пригодны для штамповки;

– СЕМ-1 – ламинат на основе композиции целлюлозной бумаги и стеклоткани с эпоксидной смолой. Пригоден для штамповки.

---

<sup>1</sup> Температура перехода полимерного материала из твердого и хрупкого состояния в мягкое и пластичное при изготовлении диэлектрического материала основания печатных плат.

## **Материалы для плат с повышенной теплоотдачей**

Платы с металлическим основанием находят широкое применение в устройствах с мощными светодиодами, в источниках питания, преобразователях тока, модулях управления двигателями и т.д.

Основанием платы служит металлическая пластина. Материал выбирается в зависимости от требуемых характеристик. Наиболее часто используются алюминиевые сплавы:

- АД, значение теплопроводности 220 Вт/мК, пластичен, недостатками являются невысокая механическая прочность и вязкость, что затрудняет механическую обработку контура печатных плат;
- АМг2.5, значение теплопроводности 140 Вт/мК, хорошо обрабатываются;
- АД33, значение теплопроводности 140 Вт/мК, применяется, когда требуется повышенная коррозионная стойкость, помимо этого обладает повышенной механической прочностью.

Перед нанесением проводниковых топологий поверхность металлического основания закрывают диэлектрическим материалом, например пастой ПДС-16, дающей диэлектрический слой с теплопроводностью до 130 Вт/мК [16].

## **Материалы для СВЧ печатных плат**

При производстве СВЧ печатных плат применяются специальные диэлектрические материалы, характеризующиеся повышенной (в сравнении со стандартным FR4) стабильностью значения диэлектрической проницаемости и низкими потерями в широком диапазоне рабочих частот (от единиц мегагерц до десятков гигагерц).

Спектр материалов для производства таких плат весьма широк: в качестве диэлектрика как в чистом виде, так и в различных комбинациях (для придания необходимых характеристик, например, термостабильности) применяют различные полимеры, керамику. В основном диэлектрик армируется стекловолокном различного плетения, что так же влияет на результирующие параметры материала. Неармированные материалы используются редко и, как правило, являются наиболее дорогостоящими и сложно обрабатываемыми (очень мягкие, либо очень хрупкие).

Многослойные конструкции СВЧ печатных плат выполняют как с применением только специализированных материалов, так и со стандартными материалами FR4. Например, с целью снижения стоимости диэлектрик СВЧ используют только для разделения одного или двух внешних сигнальных слоев, а для остальных применяют обычный FR4 (такие конструкции плат называются гибридными).

### **Материалы для гибких печатных плат**

Широко используемым материалом для производства гибких печатных плат является полиимид. Также применение находит полиэтилентерефталат – материал с более узким диапазоном рабочих температур и более посредственной геометрической стабильностью. К достоинствам этого материала относят химическую стойкость, низкое влагопоглощение, способность к низкотемпературной формовке.

### **Материалы для светопрозрачных плат**

При изготовлении печатными методами дисплеев, фотоэлементов, солнечных батарей, прозрачных нагревателей, сенсорных панелей используются стеклянные пластины с прозрачным токопроводящим покрытием оксида индия олова (ITO) с наиболее часто используемыми параметрами [17]:

- толщина 0,7; 1,1; 2,0 мм;
- сопротивление прозрачного токопроводящего слоя ITO 70–80 Ом/квadrat;
- коэффициент светопропускания в видимом диапазоне не менее 0,9.

## **2.2 Подготовка оснований для печати проводников**

Подготовка подложек включает следующие последовательно выполняемые операции [18, 19].

- Промывка в растворе  $\text{NH}_4\text{OH}$  (5 %), температура 50 °С, время 5 мин (рисунок 2.1).
- Промывка в ультразвуковой ванне. Раствор  $\text{NH}_4\text{OH}$  (5 %), температура 50 °С, время 5 мин (рисунок 2.2).

- Промывка дважды в дистиллированной воде.

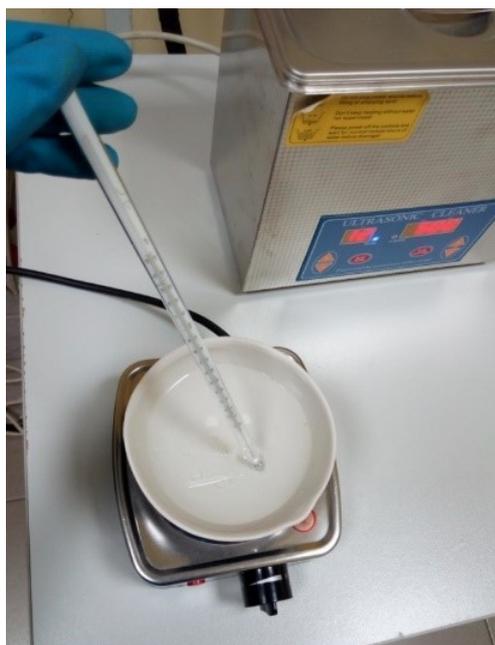


Рисунок 2.1 – Установка для промывки



Рисунок 2.2 – Установка для промывки в ультразвуковой ванне

- Промывка в течение 5 мин в растворе  $H_2O_2$  (5 %).
- Промывка дважды в дистиллированной воде.
- Промывка в течение 5 мин в растворе уксусной кислоты (5 %).
- Промывка дважды в дистиллированной воде.
- Высушивание на воздухе при комнатной температуре.
- Обработка поверхности кислородной плазмой для улучшения гидрофильных свойств основания (рисунок 2.3).



Рисунок 2.3– Установка плазменной очистки

## 2.3 Растворы материалов для печати (чернила)

Растворы для печати содержат частицы проводящего материала. Чернила отличаются химическим составом, размером и диаграммой распределения по размерам проводящих частиц, характеристиками и составом связующего материала. После нанесения на поверхность подложки чернила должны пройти термообработку, в результате которой происходит удаление или изменение свойств связующего материала. Распределение частиц по размерам и размер частиц влияют на плотность и структуру упаковки проводящих элементов проводника после термообработки, а значит, и на эффективную площадь проводящего сечения и паразитные сопротивления на границах «частица – остатки связующего материала». Размер частиц также влияет на температуру отжига для образования проводящего слоя: чем меньше размер частиц, тем при меньших температурах достигается спекание.

Далее представлены основные параметры и характеристики растворов материалов (чернил) производства российской фирмы «АкКоЛаб» [20] (рисунок 2.4) и корейской компании Advanced Nano Products.



Рисунок 2.4 – Растворы материалов производства компании «Акколаб»

### Серебряные наночернила

Состав дисперсии: наночастицы серебра (15–20 весовых %); этиленгликоль в качестве растворителя и стабилизатора. Также наночернила серебра содержат следовые количества цитрата натрия как стабилизатора, нитрата натрия, нитрата серебра, борной кислоты, деионизованной воды. На рисунке 2.5 представлена гистограмма распределения по диаметру частиц. Зависимость удельного сопротивления проводников от температуры спекания чернил иллюстрируется рисунком 2.6.

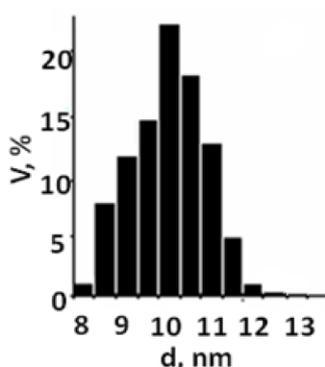


Рисунок 2.5 – Гистограмма распределения по диаметру частиц

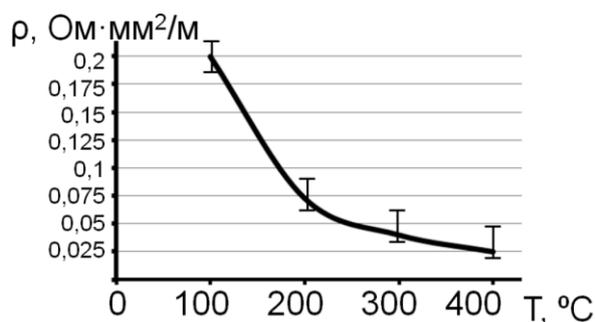


Рисунок 2.6 – Зависимость удельного сопротивления проводника от температуры спекания

### Чернила на основе наночастиц золота

Состав дисперсии:

- наночастицы золота (1–2 весовых %);
- этиленгликоль (растворитель и стабилизатор).

На рисунке 2.7 приведена гистограмма распределения по размерам частиц золота.

### Платиновые наночернила

Состав дисперсии:

- наночастицы платины (5–6 весовых %);
- поливинилпирролидон (стабилизатор);
- этиленгликоль (растворитель и стабилизатор).

На рисунке 2.8 приведена гистограмма распределения по размерам частиц платины.

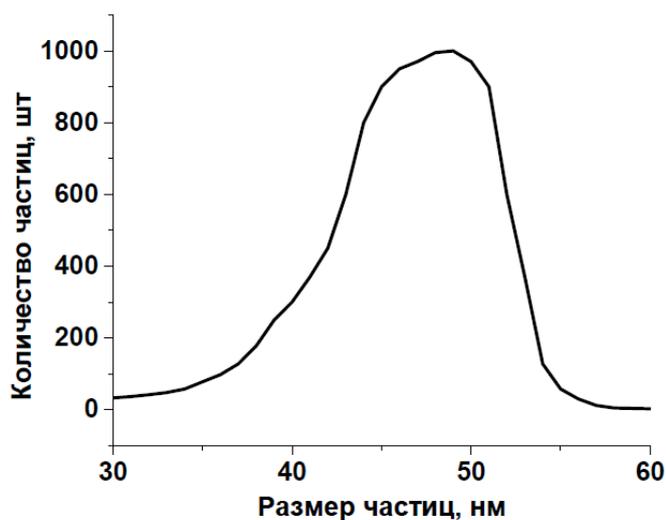


Рисунок 2.7 – Гистограмма распределения по диаметру частиц

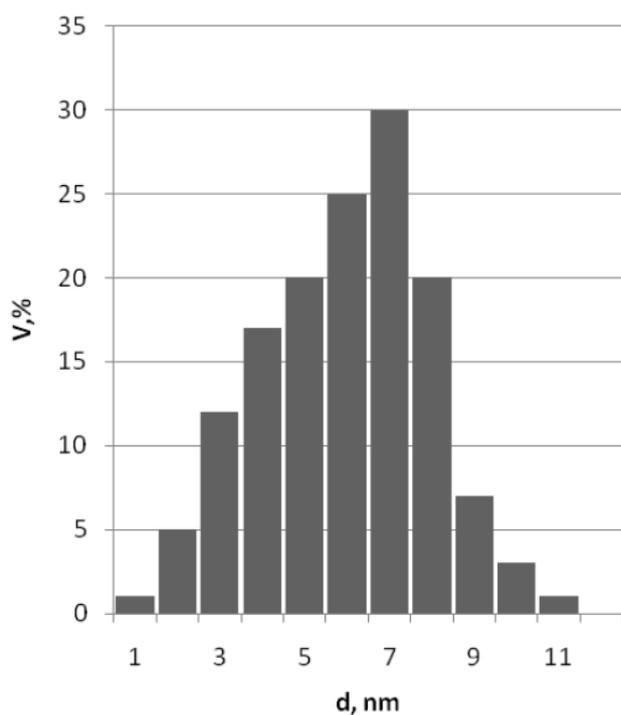


Рисунок 2.8 – Гистограмма распределения наночастиц платины по размерам

## Наночернила $\text{TiO}_2$

Состав функциональных чернил диоксида титана:

- растворенное вещество: координационные соединения титана;
- растворитель: н-бутанол;
- динамическая вязкость: от 3,28 мПа с  $T = 20,8^\circ\text{C}$ ;
- условная массовая доля диоксида титана: 2 весовых %;
- температура кристаллизации пленки со структурой анатаза: 300–500  $^\circ\text{C}$ .

На рисунке 2.9 приведены спектры пропускания тонких пленок диоксида титана, напечатанных на поверхности подложек различного типа (а – стекло, б – кварц, с – полиимид) [14].

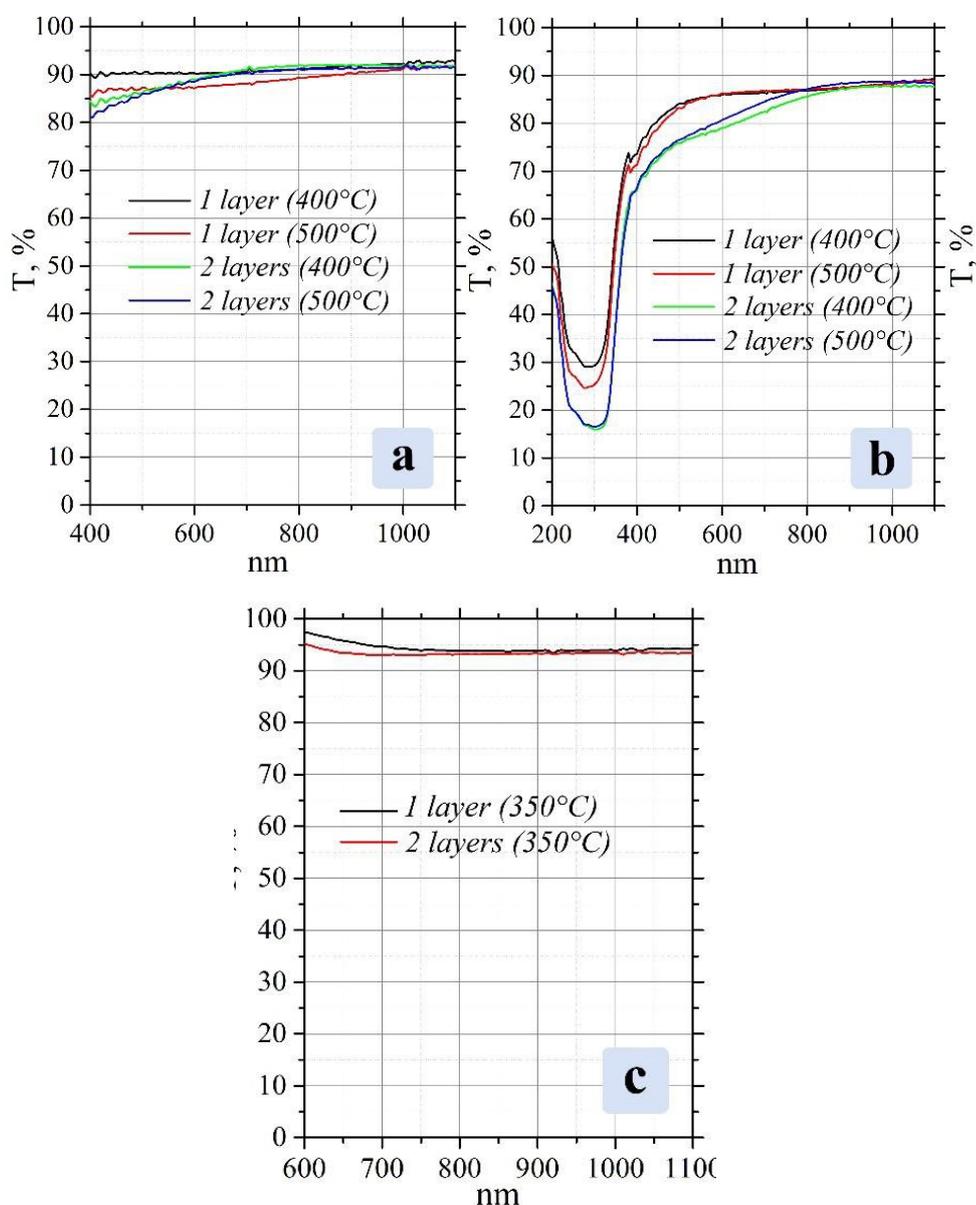


Рисунок 2.9 – Спектры пропускания тонких пленок  $\text{TiO}_2$  на подложках различного типа: а – стекло; б – кварц; с – полиимид

## Серебросодержащие чернила фирмы Advanced Nano Products

Advanced Nano Products – одна из лидирующих компаний Юго-Восточной Азии в разработке и производстве электропроводящих растворов материалов для печатной электроники, изготовления дисплеев, устройств фотовольтаики.

Технические параметры и характеристики серебросодержащих чернил фирмы (рисунок 2.10) приведены в таблице 2.1 [21].



Рисунок 2.10 – Фотография упаковки чернил

Таблица 2.1 – Параметры серебросодержащих чернил фирмы Advanced Nano Products

Параметр	Марка чернил				
	DGP 40LT-15C	DGP 40TE-20C	DGP 45HTG	DGH 55LT-25C	DGH 55-HTG
Содержание наполнителя, %	30 ~ 35			50 ~ 60	
Вязкость, сП	10~17			7~16	
Поверхностное натяжение	35~38			27~30	
Растворитель	Моноэтиловый эфир триэтиленгликоля			Тетрадекан	
Моющие растворители	Полярные растворители: этиловый спирт и т.д.			Неполярные растворители: ксилол, гексан, октан и т.д.	

## Окончание таблицы 2.1

Параметр	Марка чернил				
	DGP 40LT-15C	DGP 40TE-20C	DGP 45HTG	DGH 55LT-25C	DGH 55-HTG
Температура отверждения, °С	120~150	180~200	400~550	250	400~550
Удельное сопротивление, мкОм·см	11~12	5~9	2~3	2,4~3,0	2,0~2,5
Подложка	Пластиковые пленки	ITO, стекло		Пластиковые пленки	ITO, стекло

## Вопросы для самоконтроля

1. Назовите области использования фольгированных гетинаксов.
2. Назовите материалы, используемые для изготовления гибких печатных плат.
3. Для изменения каких свойств подложки используется плазменная очистка?
4. Каков диапазон температур спекания чернил?
5. Как зависит удельное сопротивление проводника от температуры спекания?

---

## 3 ПРИМЕНЕНИЕ БЕСКОНТАКТНОЙ СТРУЙНОЙ ПЕЧАТИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

---

### 3.1 Устройства струйной печати

#### Устройство струйной печати NEO Skate

Первый отечественный принтер для печати электроники NEO Skate [22] был разработан инновационной компанией «САН» (рисунок 3.1). Компания стала первым российским предприятием, создавшим чернила с высокой электропроводностью на основе серебра, пригодные для применения в печатной электронике с целью изготовления печатных RFID-меток и плат, сенсоров, электронной бумаги (E-ink), электролюминесцентных экранов, батарей, памяти, электрохромных дисплеев, фотоэлементов. Однако NEO Skate не имел коммерческого применения в силу слабой разработки технологии печати электронных компонентов и неполной комплектности предлагаемого оборудования.

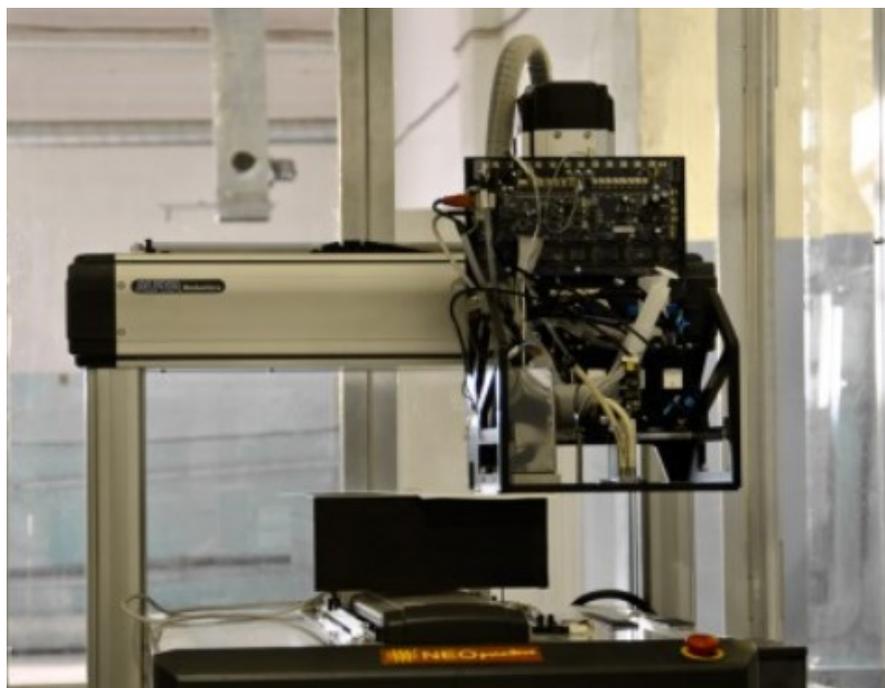


Рисунок 3.1 – Принтер NEO Skate компании «САН»  
с печатающей головкой Konica 512-14 pl

## Принтер семейства Dimatix DMP-2821

Более успешным явился проект принтеров Dimatix, созданных фирмой Fujifilm [23].

*Основные возможности принтера (рисунок 3.2) [23]:*

- XYZ-платформа струйной системы осаждения на плоских подложках;
- заполняемые пользователем пьезоэлектрические струйные картриджи и печатающие головки;
- встроенная система видеонаблюдения за впрыском капли;
- исходная камера для выравнивания основания и контроля;
- переменное разрешение печати и нанесения трафарета;
- управление с ПК через графический пользовательский интерфейс (GUI);
- широкий спектр совместимых жидкостей;
- подогрев вакуумного стола;
- станция мойки картриджей.



Рисунок 3.2 – Принтер семейства Dimatix DMP-2821

*Механические характеристики зоны печати:*

- 210×315 мм (8,27×12,4 дюйма) при подложке толщиной менее 0,5 мм;
- 210×260 мм (8,27×10,2 дюйма) при подложке толщиной 0,5–25 мм;
- точность позиционирования  $\pm 26$  мкм ( $\pm 0,001$  дюйма);

– фиксатор подложки: вакуумный стол с температурной регулировкой до 60 °С.

Габаритные размеры: 673×584×419 мм (26×23×16 дюймов).

Вес 43 кг.

*Возможности основной камеры:*

- выравнивает подложку, используя контрольные метки;
- размещает исходную или опорную точку центрирования в соответствии с размещением подложки;
- обеспечивает контроль и захват изображения нанесенного материала или капли;
- обеспечивает выравнивание картриджа при использовании нескольких картриджей;
- выравнивает размещение капли в ранее моделируемой подложке.

*Описание картриджа*

- пьезоэлектрическое струйное устройство с интегрированным резервуаром и нагревом;
- емкость до 1,5 мл;
- количество насадок 16, шаг 254 мкм, однорядные.
- объем капли 1 пл (DMC-11601) и 10 пл (DMC-11610) номинально.

*Печатная головка*

- тип SX3, SE3 и SE-DPN D-128/1 DPN и D-128/10 DPN;

*Компьютерное управление и программное обеспечение:*

- предварительно загруженные образцы шаблонов;
- шаблон просмотра;
- редакторы трафарета, сигнала пьезопривода, цикл очистки, настройки подложки.

*Заменяемые элементы*

- картридж с одноразовым резервуаром, заполняемым пользователем;
- сопло блока промокательной бумаги очистительной станции;
- насадка промокательного материала для очистки станции.

## **Принтер семейства Dimatix DMP-5000**

*Описание системы (рисунок 3.3):*

- XYZ-платформа струйной системы осаждения;

- заполняемые пользователем пьезоэлектрические струйные картриджи и печатающие головки;
- встроенная камера для наблюдения капли и система анализа впрыска;



Рисунок 3.3 – Принтер семейства Dimatix DMP-5000

- исходная камера для выравнивания основания и контроля;
- переменное разрешение печати;
- внесение исправлений с ПК через графический пользовательский интерфейс (GUI);
- широкий спектр совместимости жидкостей;
- подогрев вакуумного стола;
- станция обслуживания и мойки печатающей головки.

*Механическая система*

- Параметры печати:

область печати 500×500 мм;

основание до 30 мм толщиной;

система точности позиционирования ± 5 мкм;

стабильность позиционирования ± 1 мкм.

- Фиксатор подложки:

вакуумный стол;

регулировка температура до 60 °С.

Габаритные размеры 1,9×1,8×2,0 м.

Вес 2100 кг.

*Возможности основной камеры:*

- выравнивает подложку, используя контрольные метки;
- печатает исходную или опорную точку центрирования в соответствии с размещением подложки;
- содержит характеристику расположения и контроль;
- после печати обеспечивает контроль макета и захват изображения.

*Контейнер:*

- пьезоэлектрическое струйное устройство с интегрированным резервуаром и нагревом;
- емкость картриджа 1,5 мл;
- широкая совместимость материалов;
- количество насадок 16, шаг 254 мкм, однорядные;
- объем капли 1 пл (DMC-11601) и 10 пл (DMC-11610) номинально.

*Печатная головка:* SX3, SE3, SE-DPN, D-128/1 DPN и D-128/10 DPN.

*Компьютерное управление и прикладное программное обеспечение:*

- предварительно загруженные шаблоны образцов;
- шаблон просмотра;
- редакторы сигнала и цикла очистки.

*Заменяемые элементы:*

- картридж с одноразовым резервуаром, заполняемым пользователем;
- насадка промокательного материала для очистки станции.

## **Серия принтеров Ceradrop, CeraPrinter L-Series**

*Общие сведения (рисунок 3.4)*

CeraPrinter L-Series – это высокоточное оборудование нанесения чернил, ориентированное на печатную электронику. Оборудование позволяет разработать и проконтролировать все стадии печати. L-серия – это младшая модель в семействе CeraPrinter.

*Описание продукта*

CeraPrinter L-серии нацелен на развитие струйной печати в печатной электронике. С печатающей областью 305×305 мм CeraPrinter L-серии включает все современные функции струйного

принтера (автоматизированное переключение печатающей головки, анализ впрыска, повторное выравнивание, нагрев печатающей головки, автоматическая очистка, вакуумный прижим).



Рисунок 3.4 – Серия принтеров Ceradrop, CeraPrinter L-Series

CeraPrinter L-серии является простым струйным принтером с двумя печатающими головками, позволяет использовать разные материалы, а также выполнять печать двух материалов при любом дискретном разрешении с точностью  $\pm 2,5$  мкм. Система построена на легко заменяемых головках различных производителей, что обеспечивает высокую воспроизводимость процесса, точность струйной печати и широкую совместимость с материалами.

Принтер L-серии поставляется с полным пакетом программного обеспечения, обеспечивающего инновационные функции, такие как CeraSlice для разработки компонентов и определения заданий печати с интеграцией всех технологических параметров. Система также включает в себя программное обеспечение автоматизированного анализа струйной печати (DropAnalyzer), предоставляющее полный отчет о ее качестве. Эта информация может использоваться непосредственно оператором станка. Анализ компонентов принтера и программное обеспечение регулировки (FabAnalyzer) также предоставляется.

Принтер способен наносить широкий спектр чернил (на водной основе, масла, растворителей, УФ отверждаемые, биологиче-

ские жидкости), предназначенных для печатной электроники (проводящей, диэлектрической, магнитной, пьезоэлектрической, полупроводниковой, фотокаталитической и т.д.), на различные виды подложек, таких как пластик, бумага, стекло, керамика, кремний. Основные параметры принтера приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Основные параметры принтера L-серии

Наименование параметра	Значение
Тип файла	Step, DXF, Gerber, GDSII, Bitmap.
Редактирование работы	Напрямую со стандартного CAD-файла через CAD/CAM tool (CeraSlice)
Печать	Полностью настраиваемые параметры для каждой части или подчасти компонента
Разработка рабочего скрипта	Легкая и быстрая для каждого шага процесса печати (печать векторной графики, контроль засорения сопел, выравнивание, очистка печатающей головок и т.д.)
Моделирование процесса печати	Шаг за шагом, материал за материалом
Экспериментальное планирование (опция)	Автоматическое создание плана эксперимента по оптимизации процессов печати (полностью настраиваемое)
Настраиваемые предварительно загруженные модели (опция)	Квадратные транзисторы, круговые транзисторы, многослойные конденсаторы, катушки индуктивности и т.д.

Основные численные параметры принтера L-серии:

- размер предметного столика до 305×305 мм;
- толщина предметного столика до 10 мм;
- фиксация предметного столика – вакуумная система
- нагревание предметного столика до 60 °С с термоизоляцией (опция);
- габариты станка 1500×1400×1900 мм;
- вес 1200 кг;
- напряжения питания/ток – 1 фаза 230 VAC / 16 А;
- 3 фазы 400 VAC / 32 А.

*Опции:*

- встроенный рефлектометр для измерения толщины и 3D-реконструкции слоев;

- подогреваемый фиксатор с теплоизоляцией для избегания ухудшения механических характеристик;
- предварительно разработанная библиотека компонентов;
- автоматизированное создание проекта эксперимента.

### **Программное обеспечение CeraSlice**

Это эксклюзивное программное обеспечение CAD/CAM, ориентированное на изготовление компонентов струйным методом печати. Интерфейс программы приведен на рисунке 3.5.

Методология восходящего проектирования позволяет описывать в зависимости от материала и компонента параметры печати и характеристики для 2D и 3D нескольких элементов материала непосредственно из дизайнерских файлов (CAD-файлы). Все части компонентов могут иметь собственный неограниченный набор параметров, отвечающий всем требованиям устройства без каких-либо компромиссов.

Действительно, до сих пор не было логической связи между файлами дизайна компонента и созданием алгоритма печати. Чтобы сделать ссылку, пользователям приходилось применять старый формат изображения (TIFF, BMP и т.д.), используемый в графической области дизайна. Этот формат особенно подходит для производства компонентов.

Программное обеспечение CeraSlice является связующим звеном между дизайном компонента и созданием алгоритма печати. Дизайнер может использовать новейшие инструменты проектирования, в том числе функциональный CAD, для разработки компонентов, а также импортировать файлы проекта из его обычного программного обеспечения (DXF, STEP, Gerber, GDSII), чтобы использовать их в исходном виде.

Компонент печати дробится на множество частей, параметры печати для каждой части назначаются в зависимости от материала печати, диаметра наносимой капли, толщины слоя, желаемой структуры капли, стратегии заполнения. Программа позволяет очень тонко настроить печать для каждого параметра составной части.

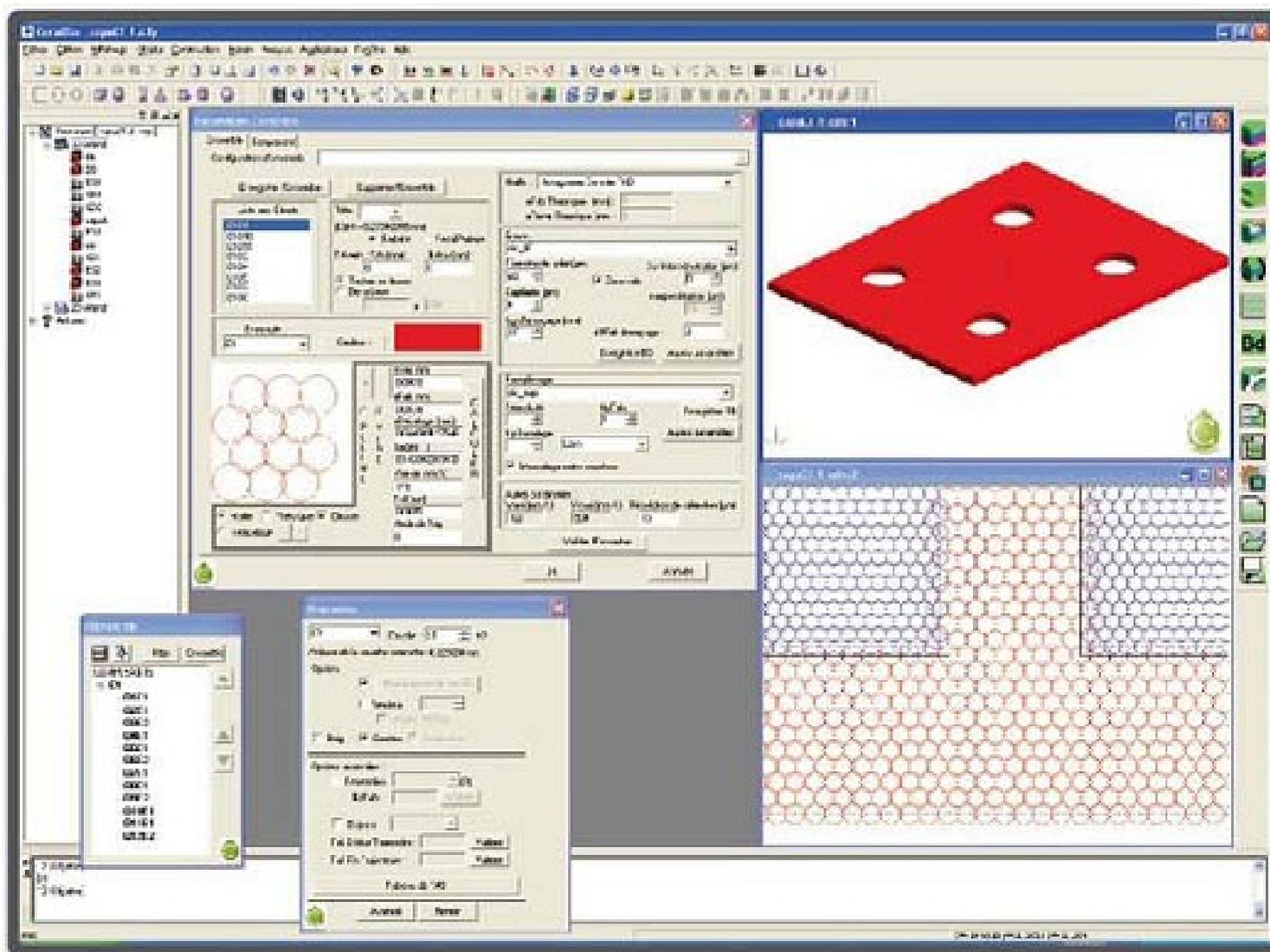


Рисунок 3.5 – Интерфейс программы CeraSlice

Количество частей не ограничивается, что позволяет пользователю запрограммировать все возможные конфигурации без каких-либо компромиссов.

Эксклюзивная методология восходящего проектирования с определением параметров позволяет разработчику запрограммировать все особенности устройства без необходимости каких-либо ограничений. Для примера на рисунке 3.6 приведена стадия моделирования слоя печати.

Кроме того, программа CeraSlice имеет функцию моделирования печати, которая позволяет пользователю графически визуализировать алгоритмы печати, разработанные этим методом. На данном этапе проектирования появляется возможность быстро идентифицировать потенциальные проблемы (плохо определенные зоны, негарантированное заполнение, несоблюдение формы и т.д.) и найти решение до запуска процесса печати, значительно сокращая время разработки. На рисунке 3.7 приведены примеры моделирования печати каплями с наложением границ.

*Дополнительные возможности:*

- импорт файлов формата DXF, STEP, Gerber, GDSII, BMP как опция через панель конвертирования;
- поправка на капиллярность (между трафаретной сеткой);
- возможность остановки действий между заданиями печати (для анализа, сушки и других операций);
- многослойное деление;
- применение различных материалов;
- неограниченное количество установленных параметров;
- моделирование заполнения.

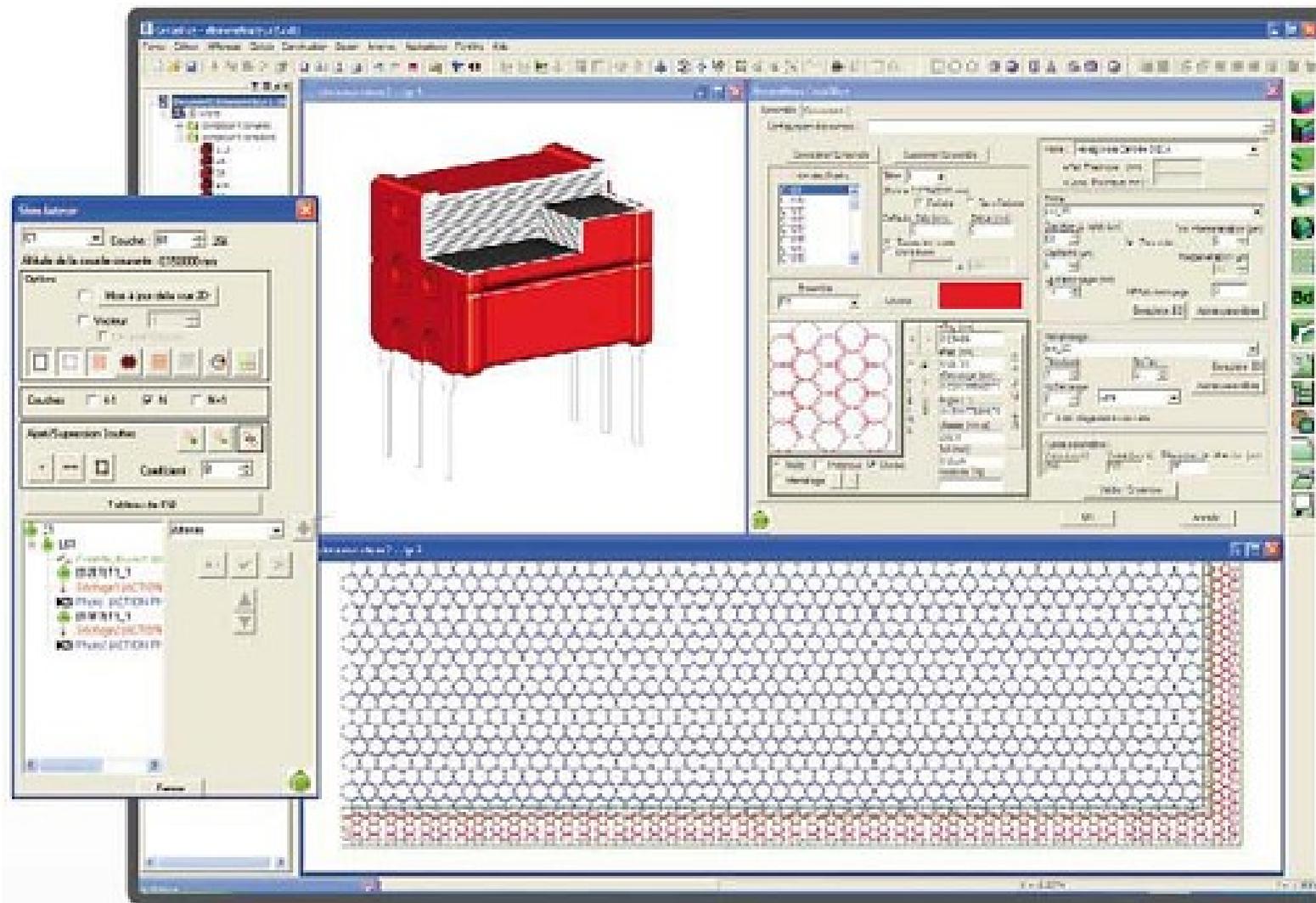


Рисунок 3.6 – Стадия моделирования слоя CeraSlice

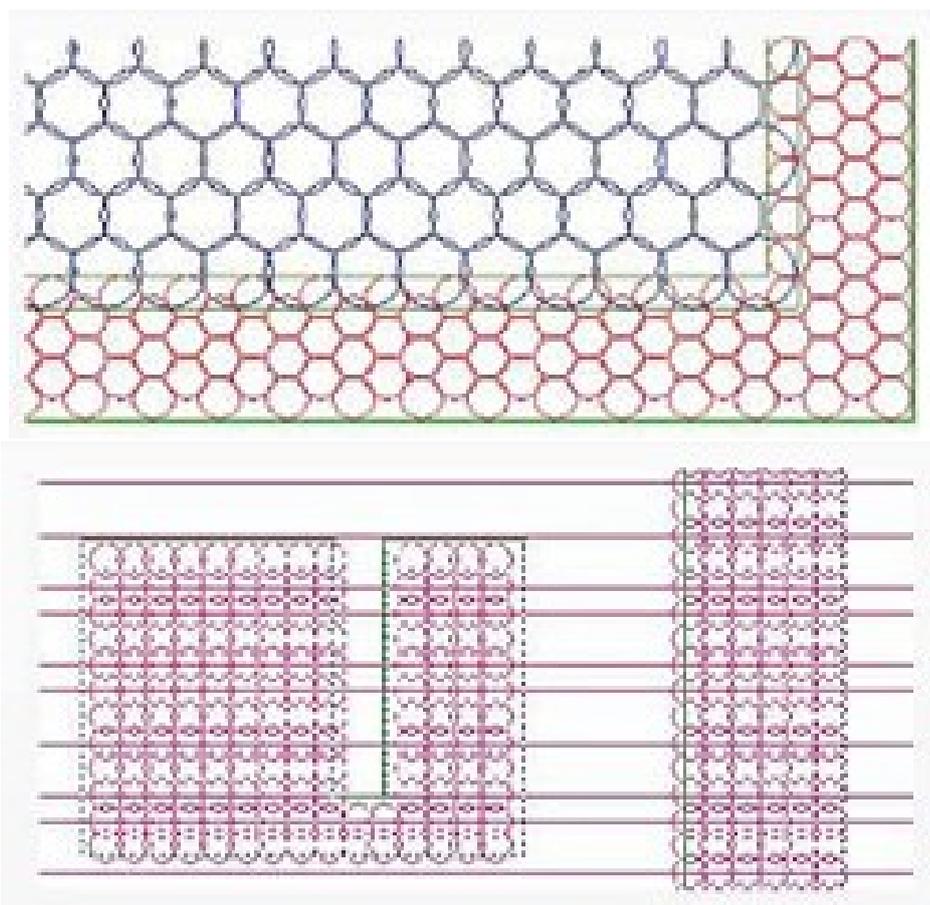


Рисунок 3.7 – Примеры моделирования CeraSlice

### Программно-аппаратный модуль DropAnalyzer

DropAnalyzer представляет собой модуль автоматизированного анализа струи. Все результаты отображаются в графической форме для быстрого анализа пользователем.

DropAnalyzer оснащен камерой и стробоскопической вспышкой, синхронизированной со струей, что позволяет ему автоматически получить всю информацию, необходимую для струйной характеристики: диаметр капель и скорость, угловое отклонение и обнаружения засоренного сопла. Приложение может быть использовано для полного отображения информации о печатающей головке независимо от количества активных сопел. Программное обеспечение создает указанное число измерений для повышения соответствия полученной информации потребностям. Оно также допускает статический и динамический сбор и обработку информации (рисунок 3.8).

DropAnalyzer представляет результаты в графической форме, включая среднее значение размера капли и его отклонение. Такой

подход позволяет пользователю видеть качество печати сразу, без анализа огромной таблицы данных. DropAnalyzer также создает полный отчет о струе в HTML-формате страницы, внесенной в реестр, которая показывает все параметры струи. Эти данные могут повторно использоваться для анализа стабильности технологического процесса (рисунок 3.9).

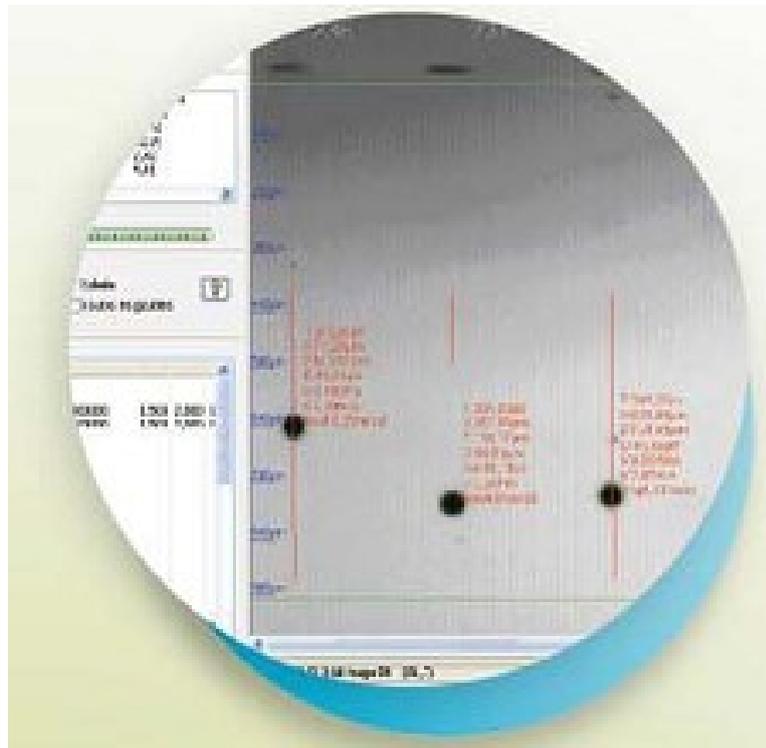


Рисунок 3.8 – DropAnalyzer: автоматический анализ

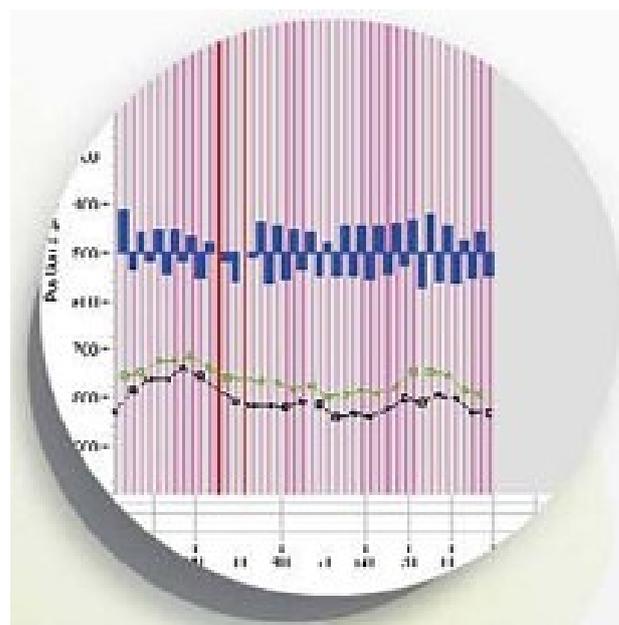


Рисунок 3.9 – Графическая форма DropAnalyzer

DropAnalyzer предоставляет возможность идентификации сопел, которые засорены, или имеющихся характеристик струи, находящихся за пределами заданных технических характеристик. В результате пользователь может устранить потенциальную проблему или просто отключить эти сопла. В последнем случае система создает новую карту печатающей головки (без дефектных форсунок) и передает ее на печатный драйвер. Следовательно, алгоритм печати автоматически адаптируется очевидным для пользователя образом (рисунок 3.10). Это значительно экономит время этапа разработки.

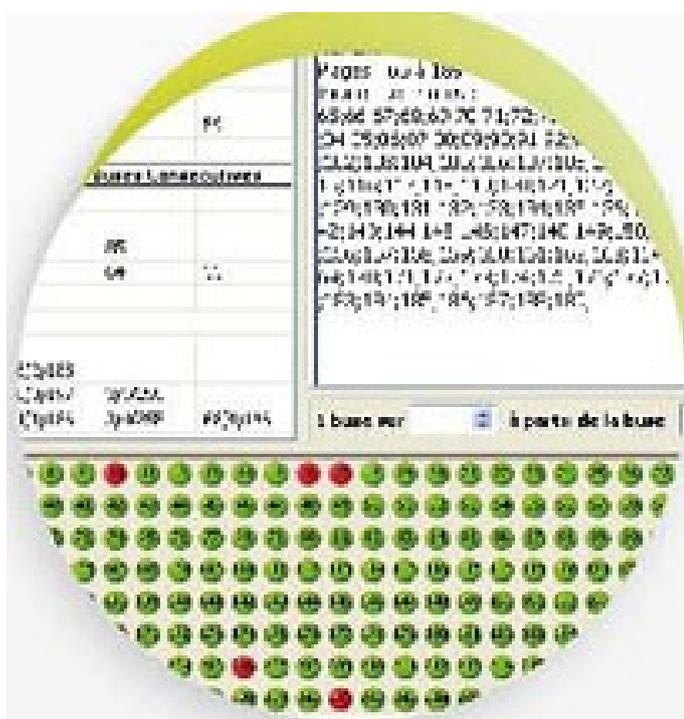


Рисунок 3.10 – Выбор сопел

*Основные особенности DropAnalyzer:*

- автоматическая последовательность;
- полный анализ печатной головки (сопло за соплом):
  - диаметра капли/величина;
  - скорости вылета капли;
  - углового отклонения капли;
  - средних размеров;
  - засоренных сопел;
  - сопел, выходящих за рамки технических требований;
- графическое отображение результатов.

## **Программное обеспечение FabAnalyzer**

FabAnalyzer – это программное обеспечение для анализа послепечатного осаждения. Оно используется для контроля нанесенных слоев с целью проверки качества осаждения или определения ключевых характеристик в процессе печати.

FabAnalyzer предоставляет большое количество информации о печати: диаметр нанесенных капель и расстояние между ними, геометрические соответствия компонентов и измерение толщины. Эта информация может быть использована в рамках проверки производственного процесса или контроля качества компонента после печати. Программное обеспечение также управляет дополнительным встроенным интерферометром для измерения толщины слоя (рисунок 3.11).

*Основные особенности:*

- автоматический захват изображения между векторами печати;
- регулярный сбор и обработка данных;
- автоматическое измерение дистанции и размеров площадки, толщины слоя.

## **3.2 Изготовление нитевидного излучающего элемента методом струйной печати**

Уникальная научная установка (УНУ) «Установка плоттерной печати чернилами с широким диапазоном вязкости» создана в Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники в результате проведенных фундаментальных и прикладных исследований по разработке методов нанесения наночернил на основе металлов и органических материалов, проведенных в 2012–2014 годах [19].

УНУ представляет комплекс, состоящий из двух платформ, одна из которых дозирует чернила при воздействии ультразвуковых колебаний на капилляр, а в другой реализовано импульсное изменение выталкивающего давления при цифровом управлении механизмом микродозирования.

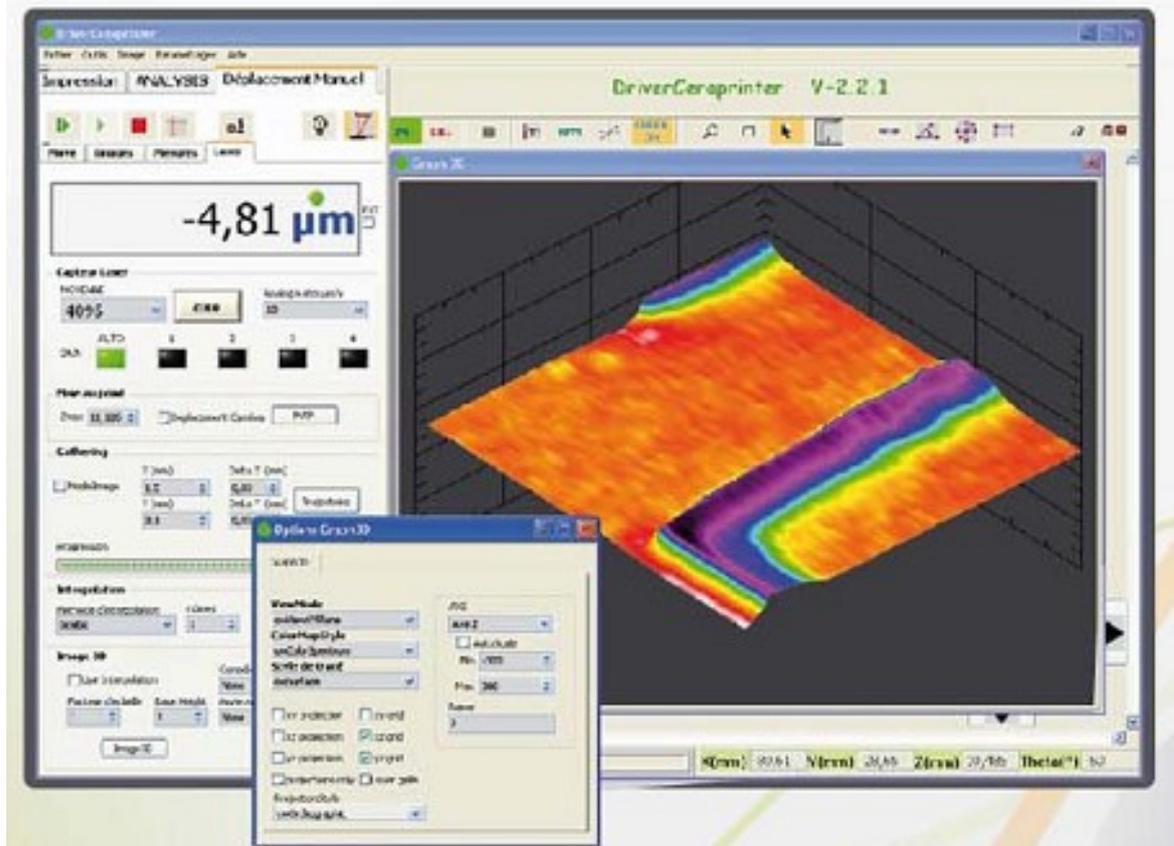
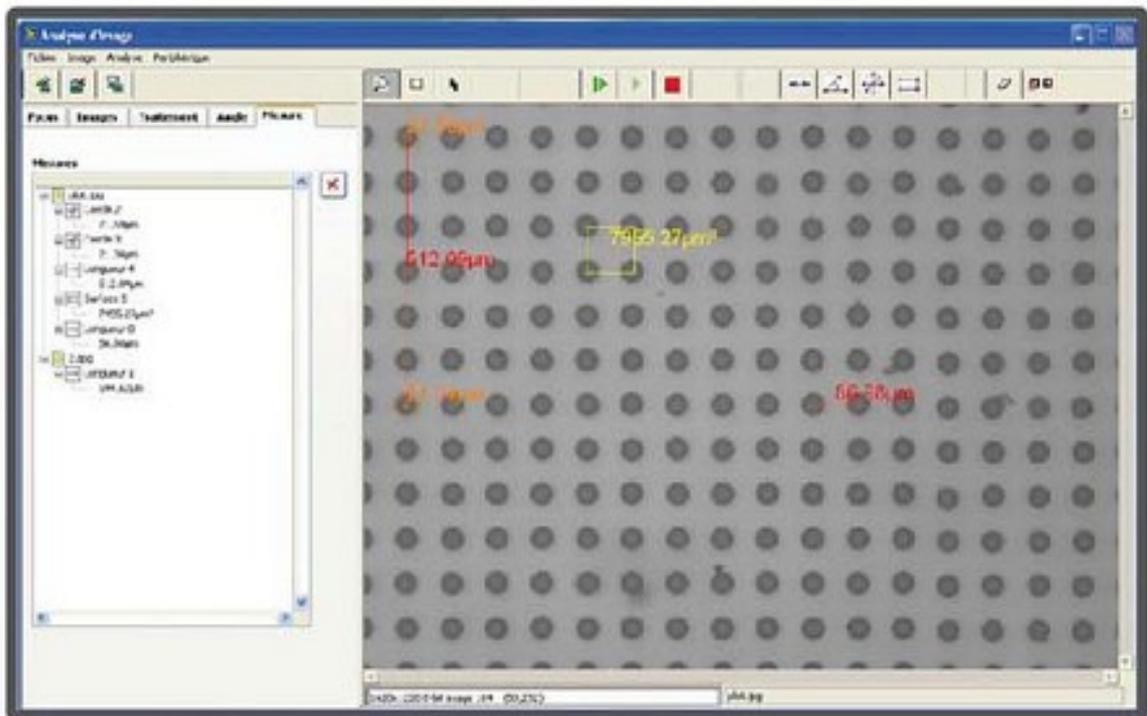


Рисунок 3.11 – Интерфейс FabAnalyzer

Обе платформы управляются специальными программами для ЭВМ, обеспечивающими следующие функции: микродозирование чернил; прецизионное перемещение капилляра, с помощью которого осуществляется нанесение чернил на подложку; контроль наполненности капилляров; полуавтоматическая заправка капилляров чернилами.

Технические характеристики, обеспечиваемые комплексом, приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Технические характеристики оборудования УНУ

Параметр	Значение
Тип чернил	Металлсодержащие, органические, растворенные диэлектрики
Диапазон размеров топологического элемента	5 – 200 мкм
Тип топологического элемента	Капля, линия, дуга, изгиб
Объем капли	$\geq 0,6$ пл
Разброс объема капли	$\leq 10\%$
Вязкость раствора	$\leq 450$ сПуаз
Рабочее поле	350×300 мм
Позиционирование по высоте	70 мм
Точность позиционирования	5 мкм
Автоматическая калибровка высоты поверхности	Да
Система технического зрения	Камера FireWire ® с цифровым видеозахватом
Компьютер	Apple iMac, IBM PC

УНУ используется для решения следующих задач:

- исследования зависимости сопротивления печатных проводников от количества слоев нанесения раствора материала;
- подтверждения возможности соединения электрических выводов кристалла с печатным проводником методом сварки;
- определения исходных установок устройства печати для получения заданных геометрических параметров проводников;
- определения возможности электрического соединения печатного проводника с металлическим наконечником основания;

– подтверждения возможности соединения электрических выводов кристалла с печатным проводником методом приклеивания электропроводящим клеем.

Исследование зависимости сопротивления печатных проводников от количества слоев нанесения раствора материала проведены при одно-, двух-, трех- и четырехслойном нанесении раствора материала [24]. Результат печати проводников на подложке представлен на рисунке 3.12. Первые однослойные токопроводящие дорожки по окончании печати приобрели металлический цвет, что указывает на их высыхание.

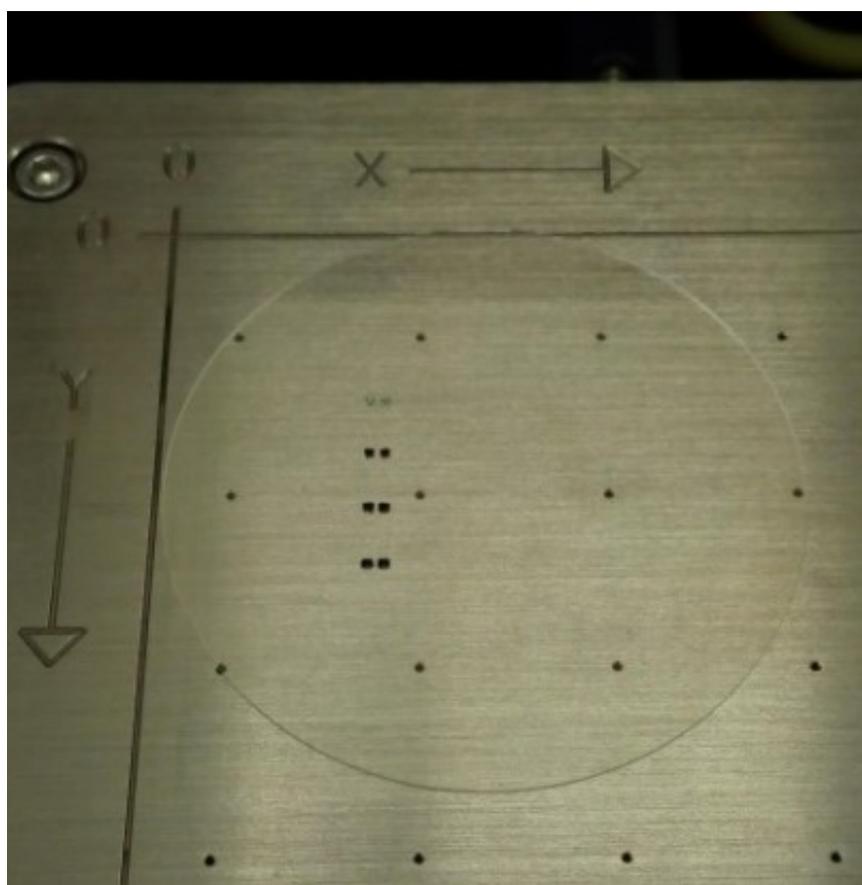


Рисунок 3.12 – Результат печати проводников на подложке

Образец высушивали в ИК конвекционной печи АПИК 1.0 (рисунок 3.13) при температуре 150 °С в течение 15 минут.

Сопротивление проводников определяли с помощью прибора Keithley 2410 1100V source meter. Результаты представлены в таблице 3.3.

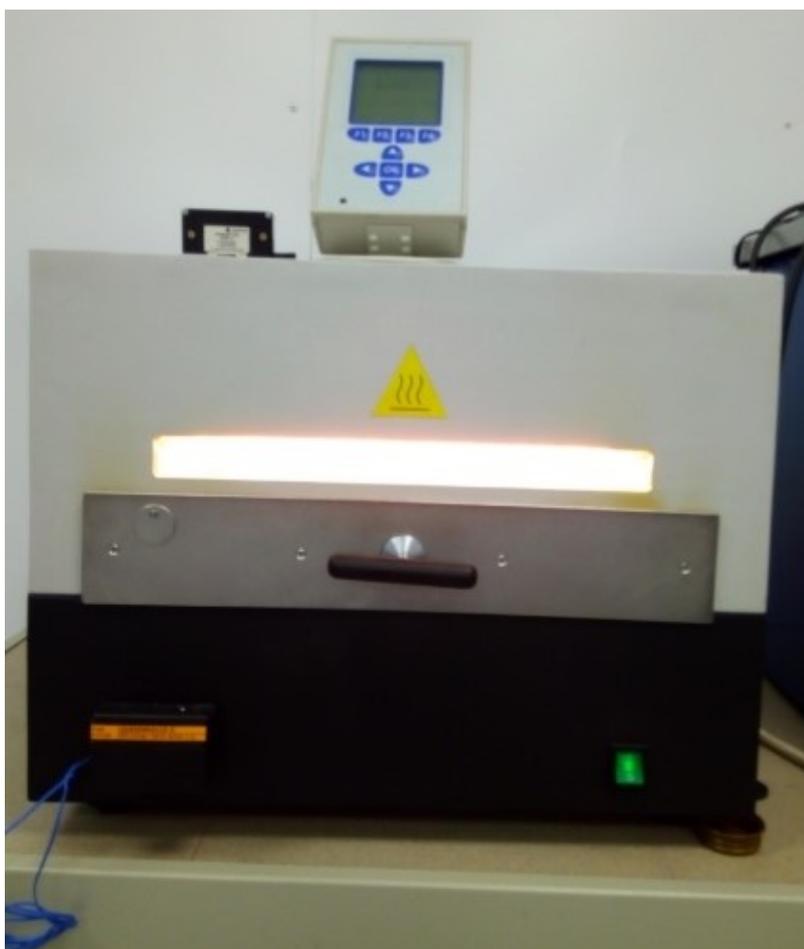


Рисунок 3.13 – ИК конвекционная печь АПИК 1.0

Таблица 3.3 – Результаты оценки сопротивления печатных проводников

Тип токопроводящей дорожки	Сопротивление, Ом
Однослойная	Не постоянное, больше 2
Двухслойная	2
Трехслойная	1,3
Четырехслойная	1,1

Фотография дорожек при четырехслойном нанесении приведена на рисунке 3.14 (здесь и далее фотографии приведены при увеличении в 40 раз).

Для подтверждения возможности соединения электрических выводов кристалла с печатным проводником методом сварки выполнены следующие действия: между контактами на клей Dow Corning OE-8001 приклеен кристалл Epistar EDI-EE0926F; кристалл

разварен микросваркой (рисунок 3.15) методом «шарик-клин» на установке iBOND 5000.

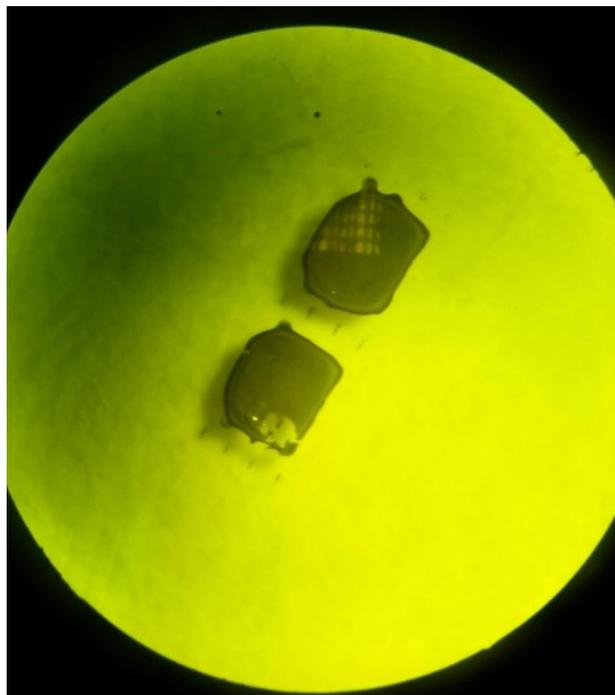


Рисунок 3.14 – Фотография дорожек

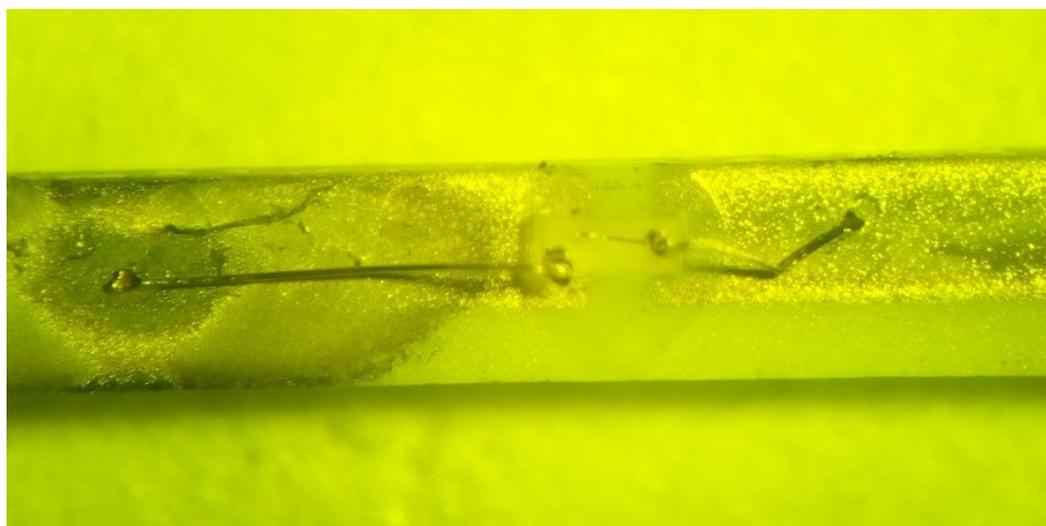


Рисунок 3.15 – Фотография кристалла, электрически соединенного с печатными проводниками металлической проволокой

Проверка качества электрического соединения кристалла проведено экспериментально. При подключении источника напряжения 2,65 В к печатным проводникам наблюдается свечение кристалла (рисунок 3.16), что подтверждает наличие электрического соединения.

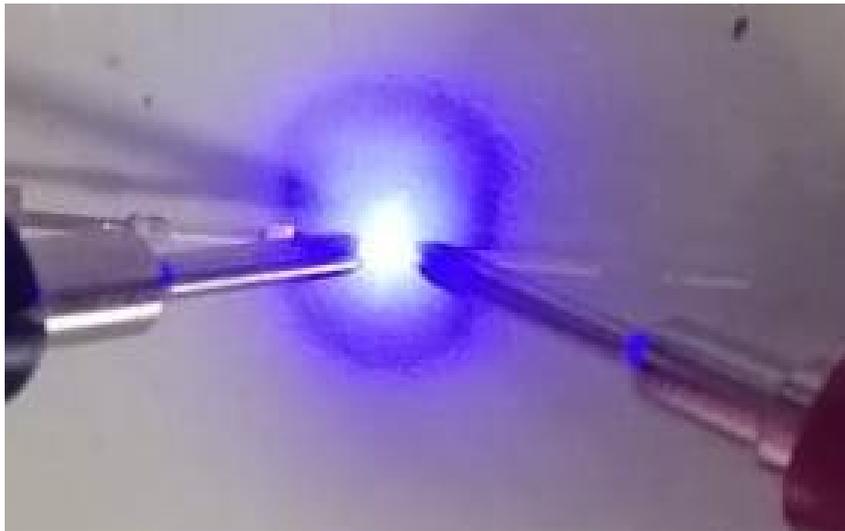


Рисунок 3.16 – Фотография светящегося кристалла, электрически соединенного с печатными проводниками металлической проволокой

### **Определение исходных установок устройства печати для получения заданных геометрических параметров проводников**

Нанесение проводников осуществлялось на покупную керамическую подложку с металлическими наконечниками по краям, фотография которой приведена на рисунке 3.17.

Топология проводников (заштрихованные участки, размеры указаны в микрометрах) приведена на рисунке 3.18. Размеры проводящих участков рассчитаны таким образом, чтобы крайние проводящие участки попадали на металлические наконечники подложки.



Рисунок 3.17 – Фотография керамической подложки с металлическими наконечниками по краям

Отжиг проводился при температуре 210 °С в течение 10 минут. Фотография участка топологии приведена на рисунке 3.19. Видны капли/мазки между токопроводящими участками, которые приводят к замыканию контактов.

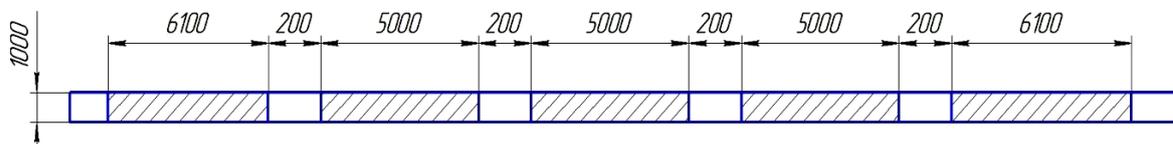


Рисунок 3.18 – Рисунок топологии проводников

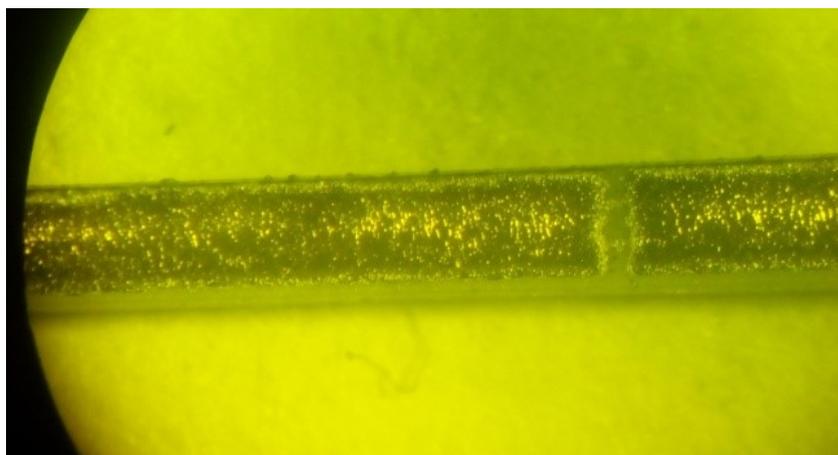


Рисунок 3.19 – Фотография участка топологии

Расстояние между напечатанными участками вместо задаваемых 200 мкм оказалось равным 150 мкм из-за растекания раствора наносимого материала. В последующих экспериментах шаблон печати был изменен: расстояние между участками задавалось 300 мкм (рисунок 3.20).

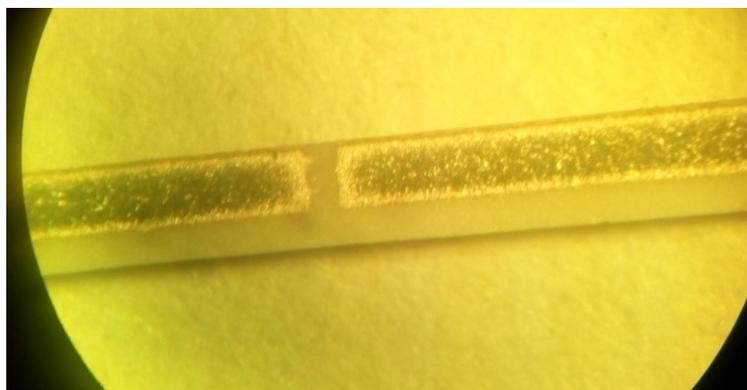


Рисунок 3.20 – Фотография напечатанной дорожки с расстоянием между участками по шаблону 300 мкм

Для определения возможности электрического соединения печатного проводника с металлическим наконечником основания проведено нанесение раствора проводящего материала на основание с одновременным переходом на металлический наконечник основания (рисунок 3.21).

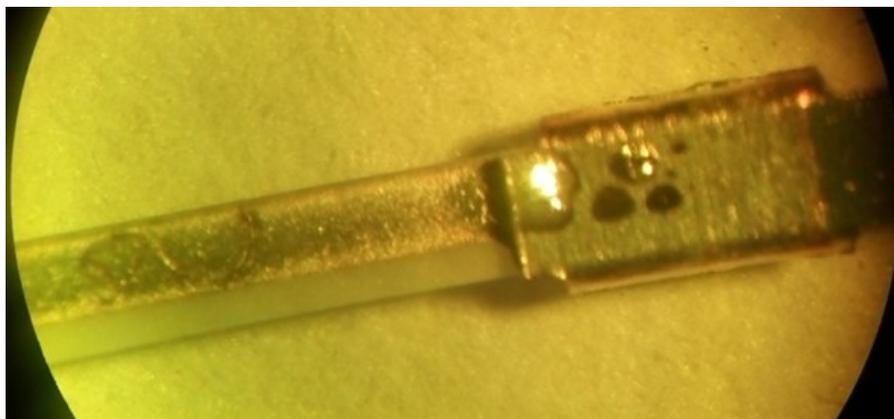


Рисунок 3.21 – Фотография напечатанной дорожки с переходом на металлический наконечник основания

**Подтверждение возможности соединения электрических выводов кристалла с печатными проводниками методом приклеивания электропроводящим клеем**

Кристалл flip-chip типа SZ8-Y11 приклеили с помощью электропроводящего клея, совместив электрические контакты кристалла с рисунком проводников на основании (рисунок 3.22).

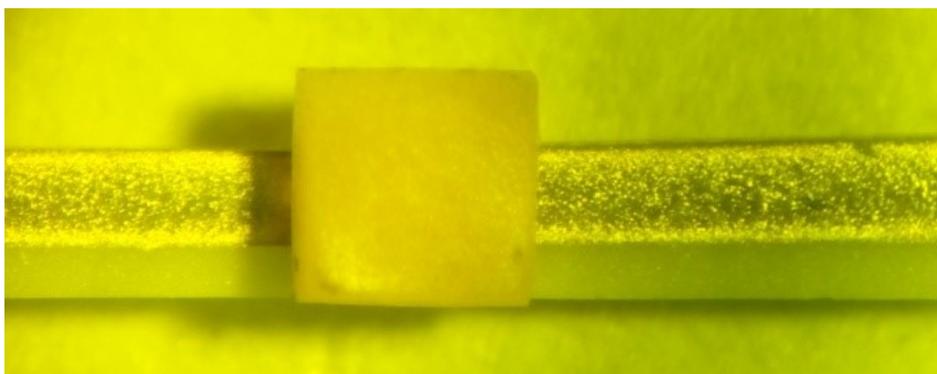


Рисунок 3.22 – Фотография приклеенного кристалла

Проверка качества электрического соединения кристалла проведена экспериментально. При подключении источника напряжения 2,5 В к печатным проводникам наблюдается свечение кристал-

ла (рисунок 3.23), что подтверждает наличие качественного электрического соединения.

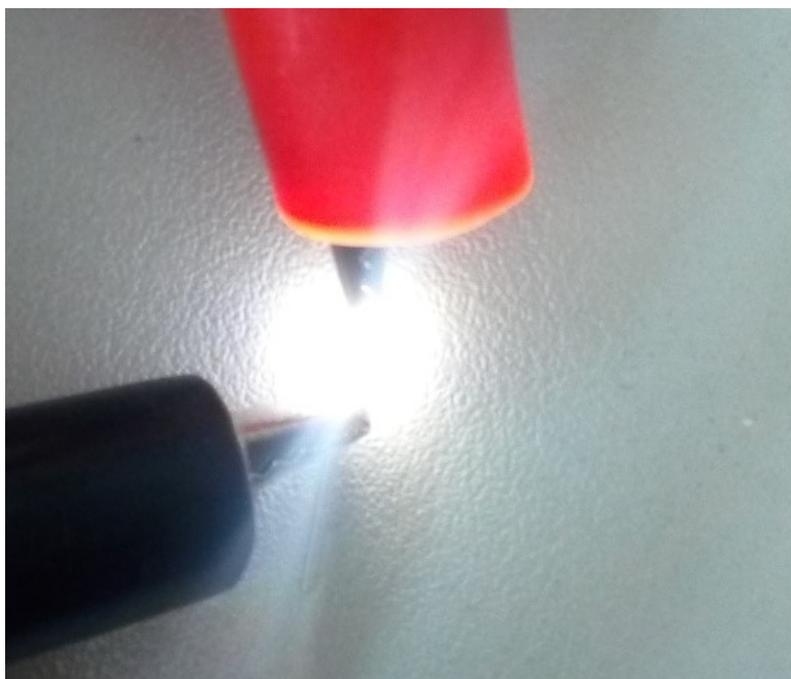


Рисунок 3.23 – Фотография светящегося кристалла

### **Оценка переходного сопротивления «печатный проводник – металлический контакт основания»**

Для проверки качества соединения печатного проводника на поверхности основания с металлическим наконечником проведено измерение вольт-амперной характеристики (ВАХ) токопроводящего участка и металлического контакта линейки (см. рисунок 3.21). Измерения проводили с помощью прибора Keithley 2410 1100V source meter. Результаты представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Результаты оценки переходного сопротивления «печатный проводник – металлический контакт основания»

Ток, мА	0,8	1,5	2,2	3	3,7	4,5	5,3	6	6,8	7,5
Напряжение, мВ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Графическая зависимость падения напряжения на переходе «печатный проводник – металлический контакт основания» от протекающего тока приведена на рисунке 3.24.

Среднее значение сопротивления  $R$  определяется по формуле

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{10} \frac{U_i}{I_i}}{10} = 1,328 \text{ Ом}, \quad (3.1)$$

где  $U_i, I_i$  – значения напряжения и тока при  $i$ -м измерении;  $i = 1, \dots, 10$  – порядковый номер измерения.

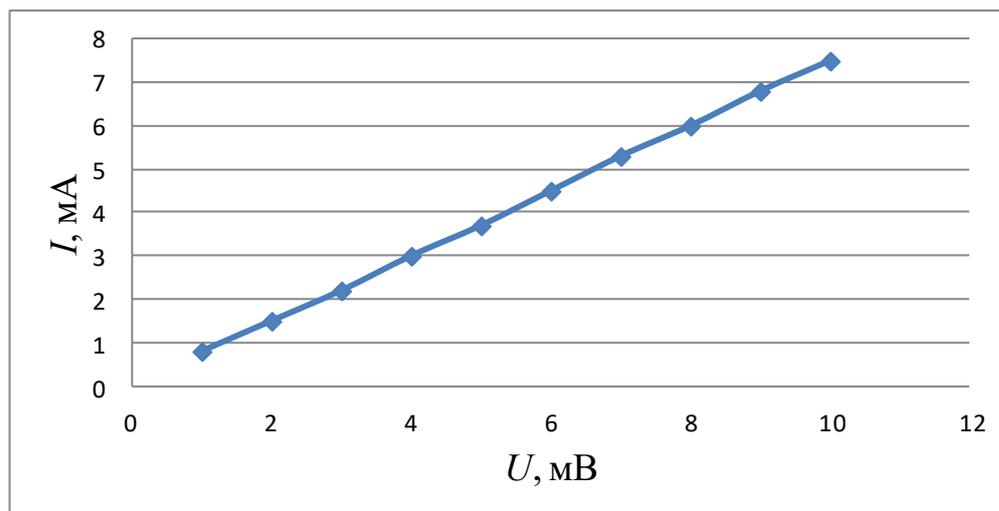


Рисунок 3.24 – Зависимость падения напряжения от протекающего тока на переходе «печатный проводник – металлический контакт основания»

Среднеквадратическое отклонение  $\nabla\delta$  определяется по формуле

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (R_i - R)^2}{10}} = 0,028 \text{ Ом}, \quad (3.2)$$

где  $R_i = \frac{U_i}{I_i}$  – значение сопротивления в  $i$ -м измерении.

Таким образом значение переходного сопротивления «печатный проводник – металлический контакт основания» составляет  $(1,328 \pm 0,028)$  Ом.

## Вопросы для самоконтроля

1. Возможно ли нанесение раствора проводящего материала на основание с одновременным переходом на металлические детали основания?

2. Возможно ли соединение микросваркой проволоки с напечатанной способом струйной печати дорожкой?

---

## 4 ПРИМЕНЕНИЕ КОНТАКТНОЙ (ПЛОТТЕРНОЙ) ПЕЧАТИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

---

### 4.1 Устройство контактной (плоттерной) печати

Печатающим элементом плоттеров является капилляр с жидкостью, работа которого основывается на физическом эффекте ультразвукового воздействия на раствор в капиллярном дозаторе. Этот эффект открыт академиком Е.Г. Коноваловым, а явление ультразвукового воздействия на жидкости в капиллярах внесено в Государственный реестр открытий СССР под № 109 с приоритетом от 31 мая 1961 г. Формула открытия: «Экспериментально установлено неизвестное ранее явление аномального увеличения (в десятки раз) скорости движения и высоты подъема жидкости в капиллярах при непосредственном воздействии ультразвука и возрастание их с повышением температуры».

Проявление капиллярного эффекта наглядно изображено на рисунке 4.1. Подъем столба жидкости зависит от диаметра капилляра и параметров жидкого вещества: вязкости, смачиваемости, удельной массы.

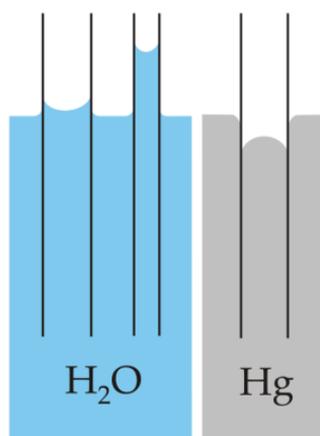


Рисунок 4.1 – Проявление капиллярного эффекта в зависимости от диаметра капилляра и параметров жидкого вещества

В [25] популярно описан ультразвуковой капиллярный эффект. Коновалов Е.Г. экспериментально обнаружил и доказал, что если

жидкость в капилляре совершает колебания под влиянием источника ультразвука, то капиллярный эффект резко возрастает: высота столба жидкости существенно увеличивается (до нескольких десятков раз), значительно возрастает скорость подъема. Установлено, что в данном случае жидкость толкают вверх не капиллярные силы, а стоячие ультразвуковые волны. Ультразвук в соответствии с законами образования стоячих волн сжимает столб жидкости и поднимает его вверх. Процесс идет до тех пор, пока напор, создаваемый ультразвуковыми волнами, не уравнивается весом столба жидкости.

Для определения эффективных частот накачки жидкости перед процессом нанесения измеряется частотная характеристика модуля входного импеданса электромеханической резонансной системы, состоящей из пьезоэлемента и капилляра, заполненного жидкостью. Вид такой характеристики приведен на рисунке 4.2.

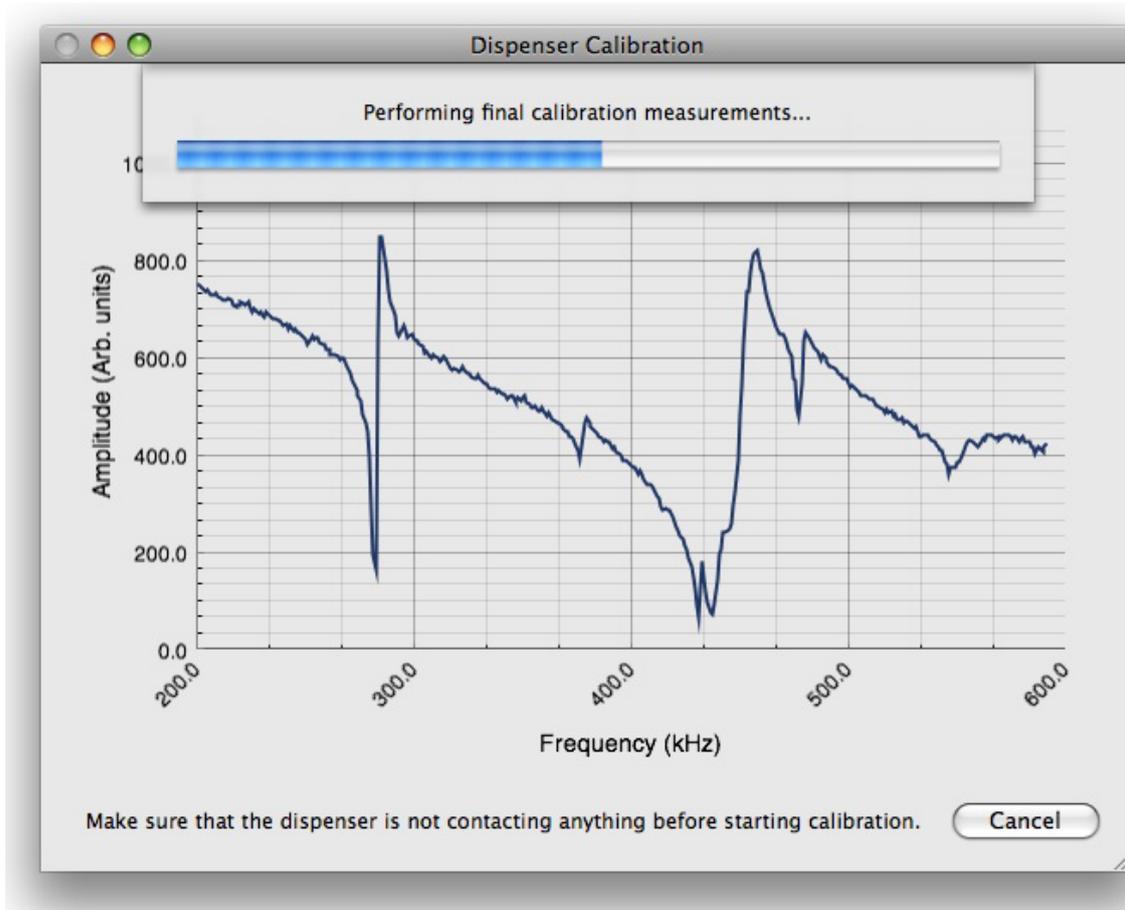


Рисунок 4.2 – Частотная характеристика импеданса пьезоэлемента

Впоследствии в процессе печати воздействие электрическим сигналом на пьезоэлемент осуществляется на частотах, соответствующих минимуму импеданса. Низкая резонансная частота соответствует продольному резонансу пьезоэлемента, более высокая – поперечному. При необходимости в процессе печати процедуру калибровки повторяют.

На рисунке 4.3 приведена фотография нанесения раствора при помощи плоттера Gix Microplotter II (рисунок 4.4), а в таблице 4.1 – его технические характеристики.

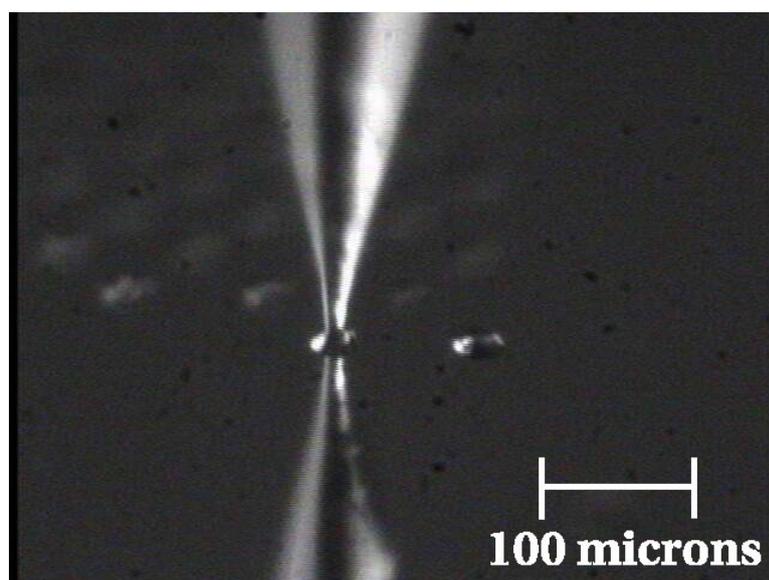


Рисунок 4.3 – Пример нанесения жидкости при помощи плоттера



Рисунок 4.4 – Плоттерная система печати Gix Microplotter II

Таблица 4.1 – Технические характеристики Microplotter GIX II

Параметр	Значение
Размер топологического элемента	5–200 мкм
Тип топологического элемента	Точка, линия, дуга, изгиб
Объем капли	$\geq 0,6$ пл
Разброс объема капли	$\leq 10$ %
Вязкость раствора	$\leq 450$ сПуаз
Рабочее поле	350×300 мм
Позиционирование по высоте	70 мм
Точность позиционирования	5 мкм
Автоматическая калибровка высоты поверхности	Да
Система технического зрения	Камера FireWire® с цифровым видеозахватом
Компьютер	Apple iMac
Программное обеспечение	SonoGuide и SonoDraw

Основным недостатком плоттеров, реализующих контактный способ нанесения материала, является изменение концентрации активного вещества в чернилах вследствие испарения растворителя. Это связано с тем, что печать осуществляется из открытого капиллярного дозатора (рисунок. 4.5), а забор чернил выполняется из открытой кюветы.

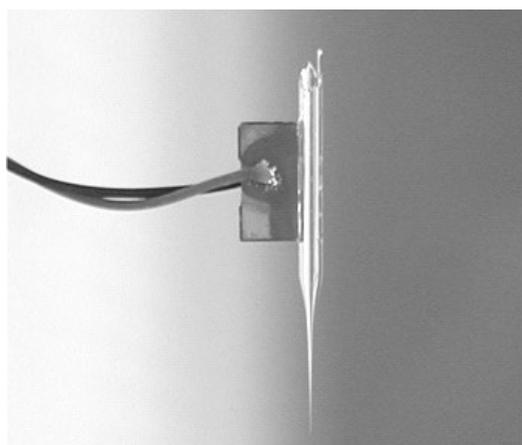


Рисунок 4.5 – Капиллярный дозатор плоттера

Ключевыми преимуществами контактного способа нанесения являются: высокая точность дозирования (от 0,6 пл), высокое разрешение (от 5 мкм) и детализация рисунка (диаметр точки от

5 мкм). К преимуществам также относится простота эксплуатации и высокая ремонтпригодность печатающей головки, отсутствие жестких требований к параметрам чернил.

## **4.2 Применение способа плоттерной печати для изготовления нитевидного излучающего элемента**

С использованием способа плоттерной печати проводящих покрытий решены следующие задачи [7]:

- исследована зависимость сопротивления печатных проводников от количества слоев нанесения раствора материала;
- определены исходные установки устройства печати для получения заданных геометрических параметров проводников;
- подтверждена возможность соединения электрических выводов кристалла полупроводникового элемента с печатным проводником методом приклеивания электропроводящим клеем.

Исследование зависимости сопротивления печатных проводников от количества слоев нанесения раствора материала проведено с использованием раствора материала SILVER NANO-INK (см. подраздел 2.3).

Печать выполнена на керамическом основании (см. рисунок 3.17). Керамическая подложка помещена в специальную оправку (напечатанную на 3D-принтере из пластика) (рисунок 4.6).



Рисунок 4.6 – Фотография керамического основания, помещённого в специальную подставку

Последовательность печати следующая:

- калибруется наклон (уровень) поверхности, на которой будет осуществляться печать;
- устанавливается картридж диспенсера, сторона диспенсера с надрезом аккуратно помещается на печатающую головку (рисунок 4.7);



Рисунок 4.7 – Фотография загрузки картриджа диспенсера

- вставляется кабель RJ-11 в адаптер RJ11. Как только новый дозатор будет подключен, на экране появится сообщение о его обнаружении;
- с помощью встроенной камеры прослеживается процесс печати (рисунок 4.8).

Для получения непрерывных линий печать проводилась в несколько проходов. На рисунке. 4.9 показана фотография напечатанных дорожек на керамическом основании.

Оценка толщины полученных токопроводящих участков проведена с использованием профилометра Profilm 3D. Для линии с количеством слоев 14 среднее значение толщины составило 1,55 мкм. Снимки профиля покрытия и характеристики представлены на рисунках 4.10–4.11.

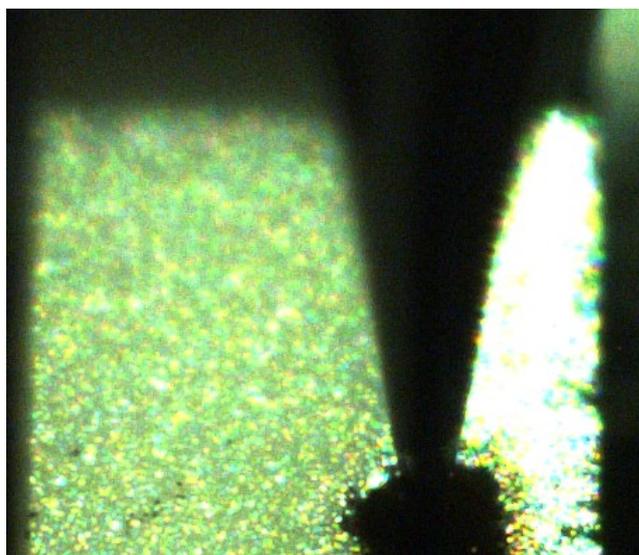


Рисунок 4.8 – Фотография капилляра в процессе печати



Рисунок 4.9 – Фотография напечатанных дорожек на керамическом основании

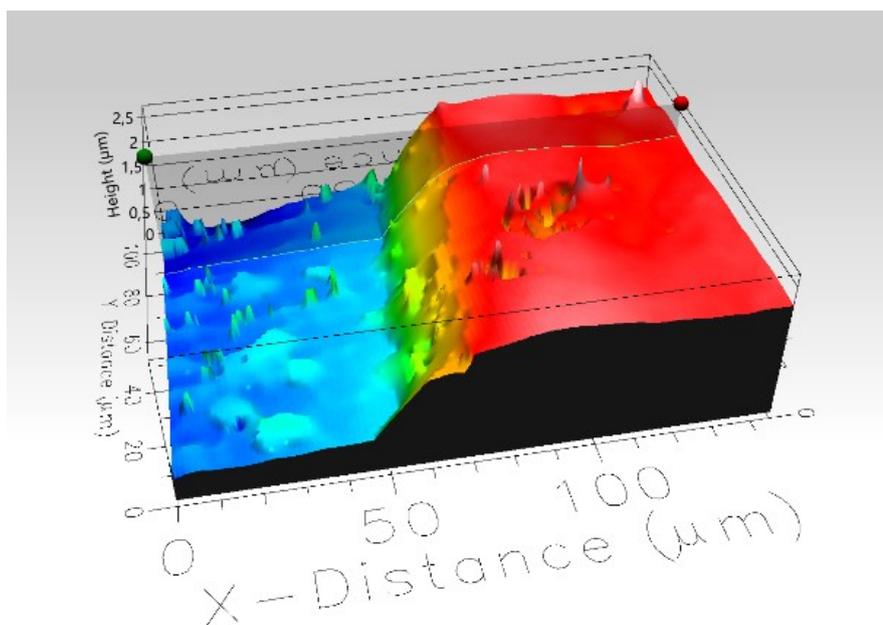


Рисунок 4.10 – 3D-изображение напечатанного слоя

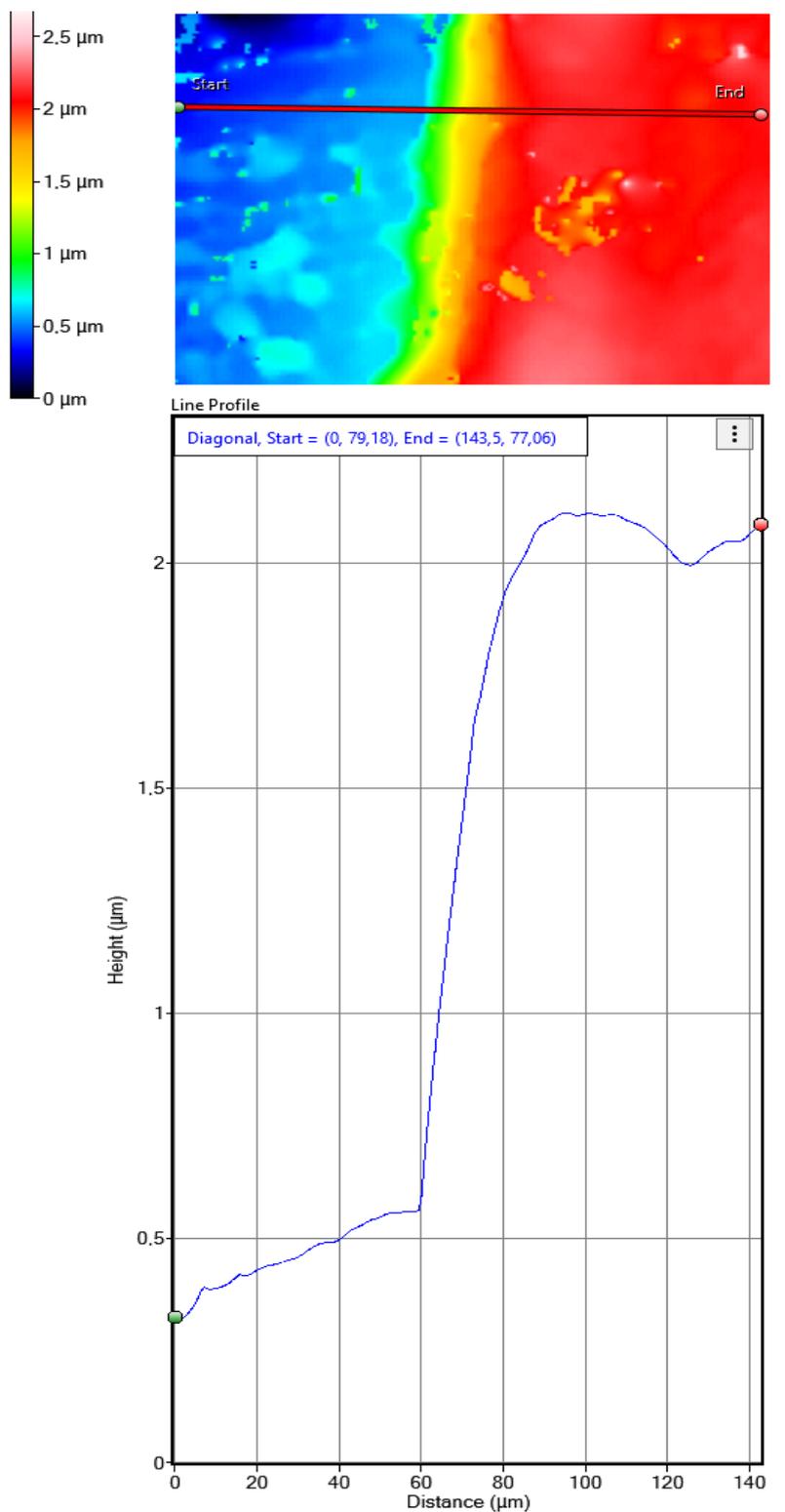


Рисунок 4.11 – Линия профиля

Для измерения сопротивления использовался высоковольтный калибратор-мультиметр Keithley 2410. Значения измеренного сопротивления и расчетного значения удельного электрического сопротивления приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Значения сопротивления для разного количества слоев

Количество слоев	Сопротивление, Ом	Длина, мм	Удельное электрическое сопротивление, Ом·м
3	37,7±0,1	1,2	48,7·10 <sup>-6</sup>
4	32±0,1	1,2	17,2·10 <sup>-6</sup>
5	16,9±0,1	1,2	21,8·10 <sup>-6</sup>
6	4,1±0,1	1,2	5,3·10 <sup>-6</sup>
8	3,4±0,1	1,2	4,4·10 <sup>-6</sup>
10	2,7±0,1	1,2	3,5·10 <sup>-6</sup>
12	1,1±0,1	1,2	1,4·10 <sup>-6</sup>
14	0,8±0,1	1,2	1,0·10 <sup>-6</sup>

### Результаты исследования макета светодиодного излучающего элемента, изготовленного способом плоттерной печати

На линейке напечатаны 9 токопроводящих участков размером 2677×1000 мкм, расстояние между токопроводящими контактами 200 мкм (рисунок 4.12).



Рисунок 4.12 – Топология токопроводящих участков

После печати проведен отжиг в сушильном шкафу ПЭ-0041 при температуре 210 °С в течение 20 минут (рисунок 4.13). Результаты печати представлены на рисунках 4.14–4.15 (увеличение под микроскопом в 4 и 2 раза).



Рисунок 4.13 – Фотографии подложки с нанесенными на нее чернилами

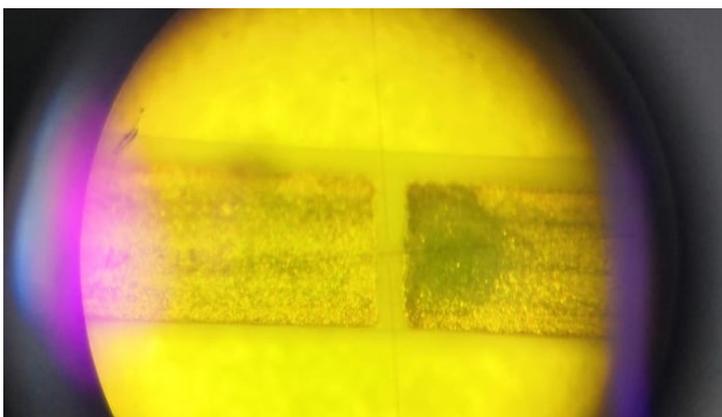
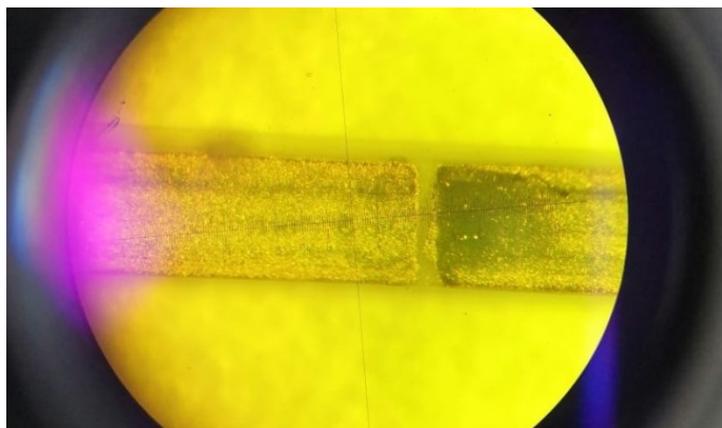


Рисунок 4.14 – Фотографии керамической подложки с нанесенными на нее чернилами. Ув. x4

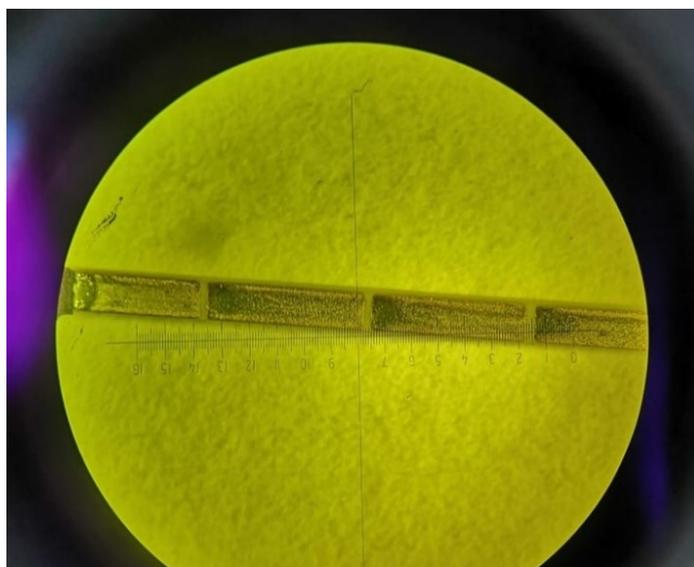


Рисунок 4.15 – Фотография керамической подложки с нанесенными на нее чернилами. Ув. x2

Фактическое расстояние между отрезками линии составило 180 мкм. Замыкания между отрезками отсутствуют.

Кристаллы flip-chip приклеены на керамическую подложку с помощью электропроводящего клея (рисунок 4.16).



Рисунок 4.16 – Фотография кристаллов flip-chip на керамической подложке

ВАХ светодиодной линейки измерена с применением высоковольтного калибратора-мультиметра Keithley 2410. Полученная зависимость тока  $I$  от приложенного напряжения  $U$  приведена на рисунке 4.17.

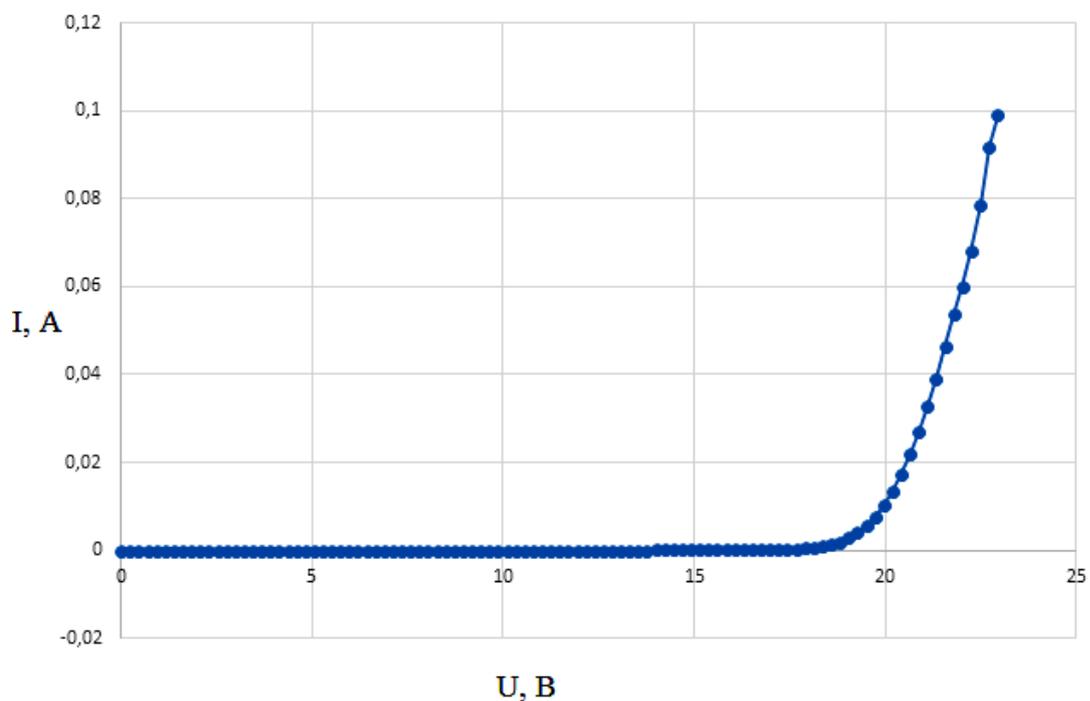


Рисунок 4.17 – Вольт-амперная характеристика линейки

## 4.3 Органические светоизлучающие диоды, изготовленные плоттерным способом печати

### Органические светоизлучающие диоды (ОСИД). Общие сведения

Типичный органический светодиод представляет собой тонкопленочное сэндвичеобразное устройство [26, 27]. В качестве анода в нем выступает тонкий слой оксида индия и олова (indium tin oxid – ITO), нанесенный на прозрачную стеклянную подложку (рисунок 4.18). Из-за малой толщины он хорошо пропускает свет, образующийся при прохождении электрического тока через светодиод.



Рисунок 4.18 – Базовая структура ОСИД:  
ETL (Electron Transport Layer) – слой с электронной проводимостью, HTL (Hole Transport Layer) – слой с дырочной проводимостью

Толщина ОСИД составляет порядка 150 нм, сам он состоит из электродов, между которыми находится слой электролюминесцентного (ЭЛ) органического материала – светоизлучающего полимера. К этому слою со стороны анода прилегает слой органического вещества с дырочной проводимостью HTL (Hole Transport Layer), а со стороны катода он контактирует со слоем органического соединения, обладающим хорошей электронной проводимостью, – слоем ETL (Electron Transport Layer) [22]. Назначение слоев HTL и ETL заключается в выравнивании подвижности

положительных и отрицательных зарядов для их последующей рекомбинации именно в излучающем слое. И наконец, последним слоем в этом «сэндвиче» является катод, состоящий из смеси магния с серебром и атомным соотношением 10:1. Вся система, помещенная в герметическую стеклянную оболочку, имеет толщину менее 500 нм. При прохождении электрического тока напряжением от 2,5 В электролюминесцентный материал излучает фотоны, которые через прозрачный анод выходят наружу. Поток света становится все более интенсивным по мере увеличения силы тока.

На рисунке 4.19 [27] представлена энергетическая диаграмма работы органического светоизлучающего диода. Транспорт электронов в светодиоде происходит через нижнюю свободную молекулярную орбиталь (LUMO – Lowest Unoccupied Molecular Orbital) электролюминесцентного материала, а транспорт дырок – через его высшую занятую молекулярную орбиталь (HOMO – Highest Occupied Molecular Orbital).

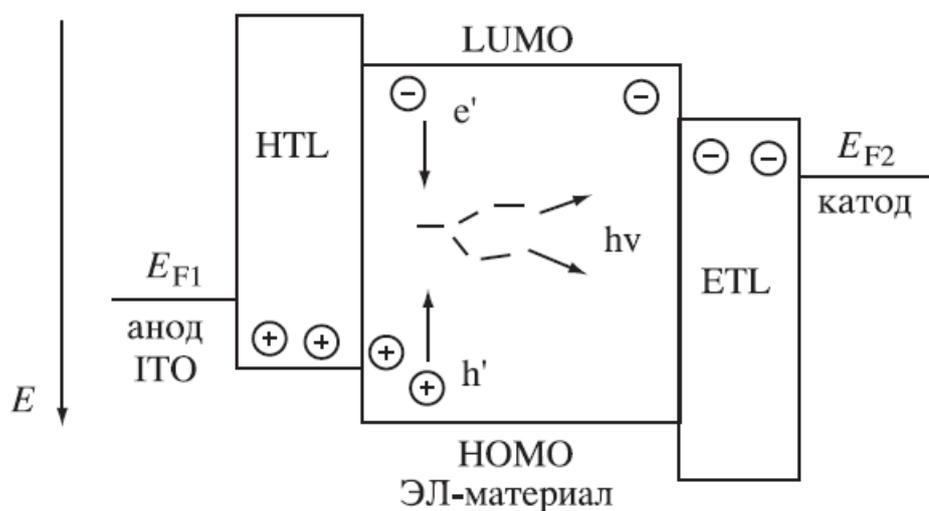


Рисунок 4.19 – Энергетическая диаграмма ОСИД

В результате рекомбинации электронов и дырок в рабочем слое светоизлучающее вещество переходит в возбужденное состояние, а излучательная дезактивация этого возбужденного состояния вызывает его люминесценцию, которая в виде света определенной длины волны излучается наружу через прозрачный анод. Длина волны образующегося излучения, а значит, и его цвет определяются величиной энергетической щели между HOMO и LUMO светоизлучающего вещества.

Одним из основных требований, предъявляемых к органическому полупроводнику в ОСИД, является соответствие работы выхода электронов положениям НОМО и LUMO светоизлучающего вещества активного слоя.

На рисунке 4.20 показан случай идеально подобранных по положению энергетических уровней материалов. В таком ОСИД текущие токи и квантовая эффективность определяются значениями подвижности носителей в активном слое и значением квантового выхода люминесценции электролюминесцентного материала.

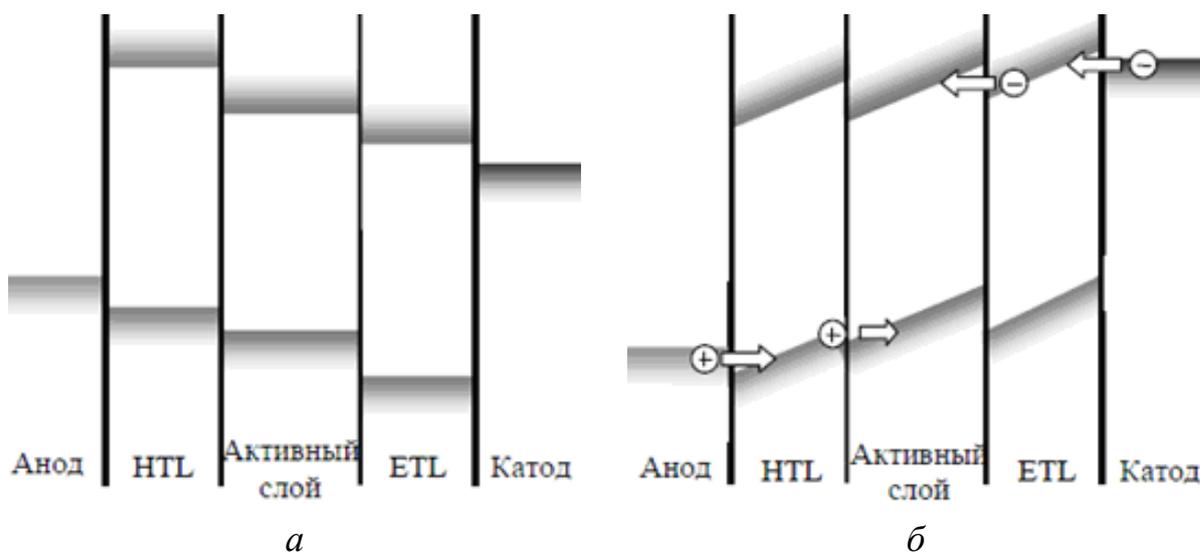


Рисунок 4.20 – Энергетическая схема слоев многослойного ОСИД:  
*а* – в выключенном режиме; *б* – в рабочем режиме

### **Конструкция макета органического светоизлучающего диода**

Многослойная структура ОСИД (см. рисунок 4.18) накладывает дополнительные технологические ограничения на используемые материалы, планируемые для нанесения печатными методами из жидкой фазы. Ограничения связаны с выбором растворителей для материалов двух последовательно наносимых слоев. Необходимо исключить растворение материалов первого нанесенного (нижнего) слоя в растворителе, используемом для нанесения второго слоя.

В связи с этим при разработке конструкции макета ОСИД количество печатных слоев ограничено двумя (рисунок 4.21). Первый слой – органическое вещество с дырочной проводимостью, в качестве которого выбран водорастворимый раствор поли (3,4-этилен-

диокситиофен) – полистирол сульфоната (PEDOT:PSS). Для второго (электролюминесцентного) слоя со свойствами электронной проводимости использован раствор полифлуорена в толуоле.

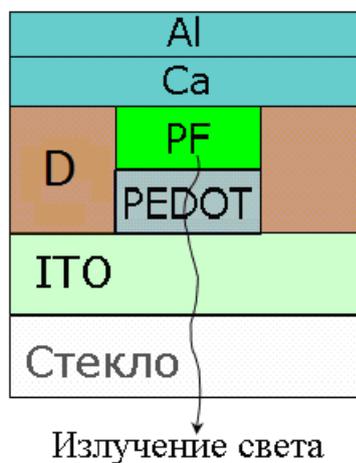


Рисунок 4.21 – Структура макета ОСИД:

- Al, Ca – металлические слои катодного электрода (материалы алюминий и кальций соответственно);
- D – слои диэлектрика; PF – излучающий слой (полифлуорен);
- PEDOT – дырочный транспортный слой (PEDOT:PSS);
- ITO – слой анодного электрода (оксид сплава индия и олова);
- стекло – подложка кварцевого стекла

PEDOT:PSS представляет собой полимерную смесь двух иономеров [28]. Один из компонентов в этой смеси состоит из сульфоната полистирола натрия (PSS), который представляет собой сульфированный полистирол. Часть сульфонильных групп депротонируются (дегидрируются) и несут отрицательный заряд. Другой компонент поли (3,4-этилендиокситиофен), или PEDOT, является сопряженным полимером, несет положительные заряды и основан на политиофене. Вместе заряженные макромолекулы образуют макромолекулярную соль, структурная формула которой иллюстрируется рисунком 4.22.

Полифлуорен является синтезированным химическим веществом, структурная формула которого показана на рисунке 4.23.

В качестве растворителя использовался толуол высокой степени чистоты. Подложки с напыленным ITO ( $\Omega=100 \text{ Ом}/\square$ ) и профилированным анодом (лазерная гравировка) отмывались в перекисно-аммиачном растворе в течение 30 минут, затем дважды в

бидистиллированной воде, после чего сушились в вакуумном шкафу при температуре 110 °С. Далее подложки обрабатывались кислородной плазмой.

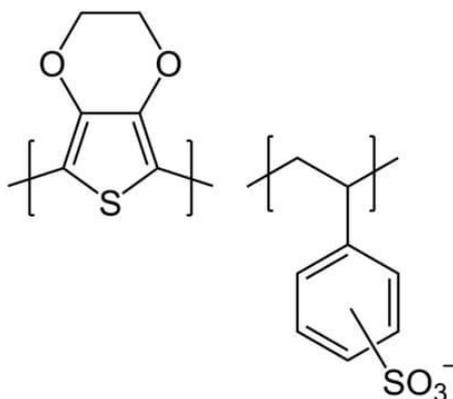


Рисунок 4.22 – Структурная формула поли(3,4-этилендиокситиофен) полистиролсульфоната

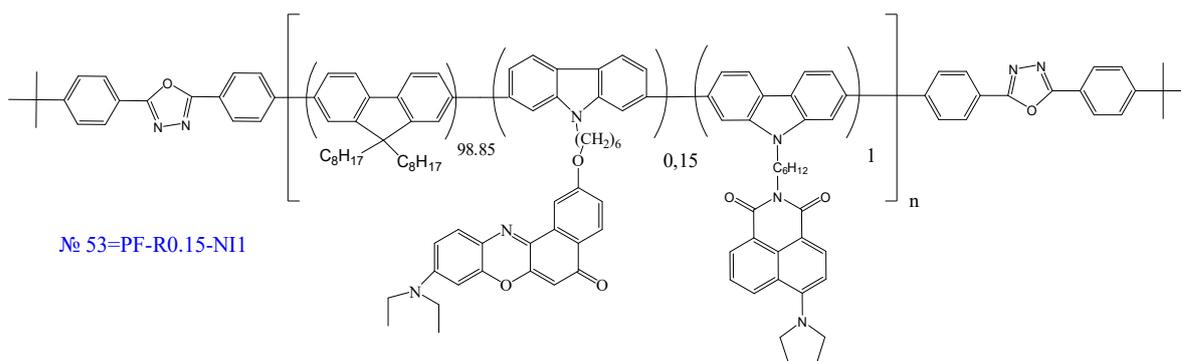


Рисунок 4.23 – Структурная формула полифлуорена

Требования к значениям толщины печатных слоев:

PF –  $60 \pm 10$  нм;

PEDOT –  $50 \pm 10$  нм.

С учетом предъявляемых требований разработана технология печати основных слоев ОСИД.

### Технология плоттерной печати

Принцип работы оборудования плоттерной печати описан в подразделе 4.1 и наглядно показан на рисунке. 4.24, где иллюстрируется нанесение линий капиллярным дозатором чернил на поверхность подложки. Особенность плоттерной печати заключается в том, что дозатор наносит жидкость при непосредственном контакте мениска капли с поверхностью подложки.

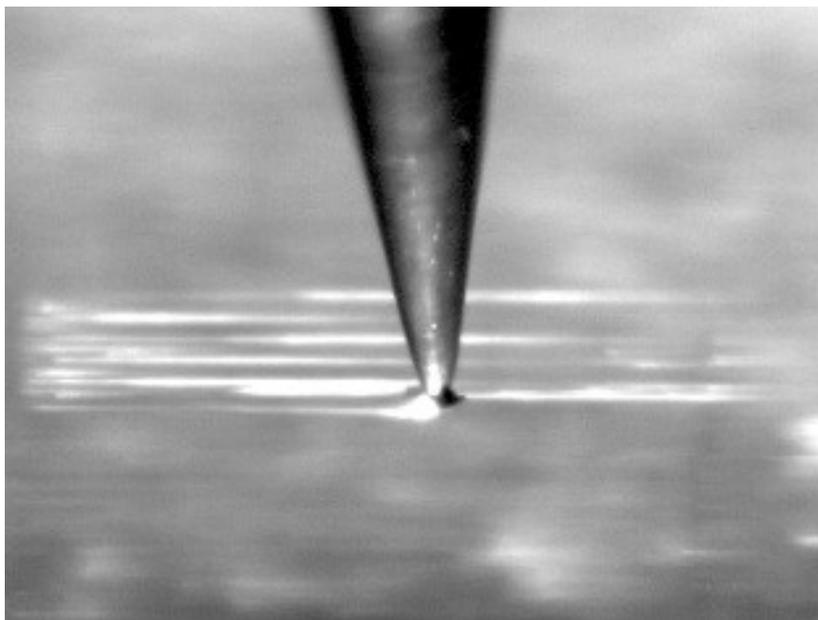
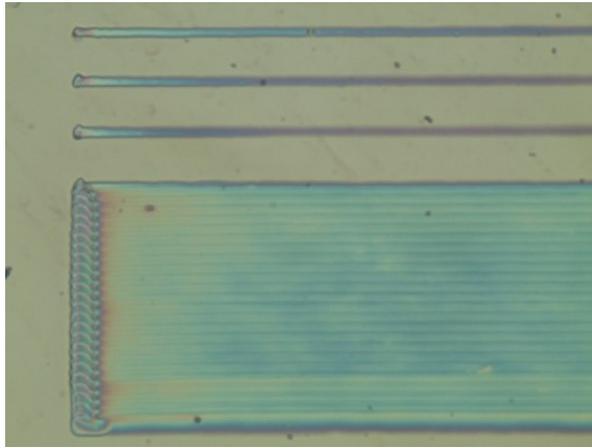


Рисунок 4.24 – Нанесение чернил на поверхность подложки капиллярным дозатором плоттера

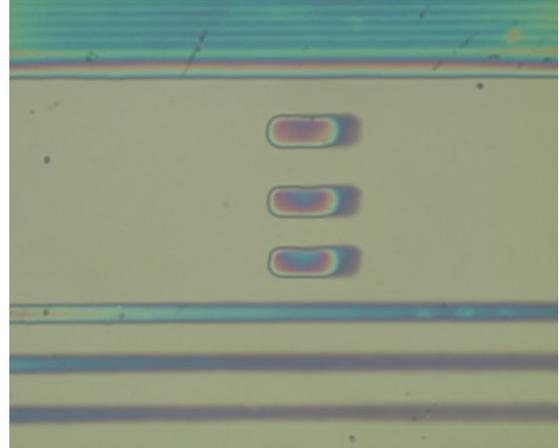
**Печать транспортного (дырочного) слоя.** В качестве чернил использовался PEDOT:PSS марки M121 (Ossila), подложка – кварцевое стекло марки S113 50×50×1,0 мм со слоем ITO 100 нм (Ossila). После нанесения слоя чернил подложка подвергалась отжигу в инфракрасной конвекционной печи «Аверон Тропик» при температуре 150 °С в течение 5 минут. На рисунке 4.25 представлены микрофотографии полученных пленок и профилограмма. На микрофотографии видно, что пленка непрерывна, обеспечивает заданную топологию. На профилограмме наблюдается неравномерность. Видно также, что плоттер обеспечивает повторяемость печати. Толщина пленки для одиночных линий и субпикселей составляет 80–90 нм, средняя толщина пленки полигона – 120 нм.

На рисунке 4.26 приведена профилограмма пленки PEDOT:PSS, полученной при скорости перемещения дозатора 100 мм/с и значении действующего напряжения на пьезоэлементе 1 В.

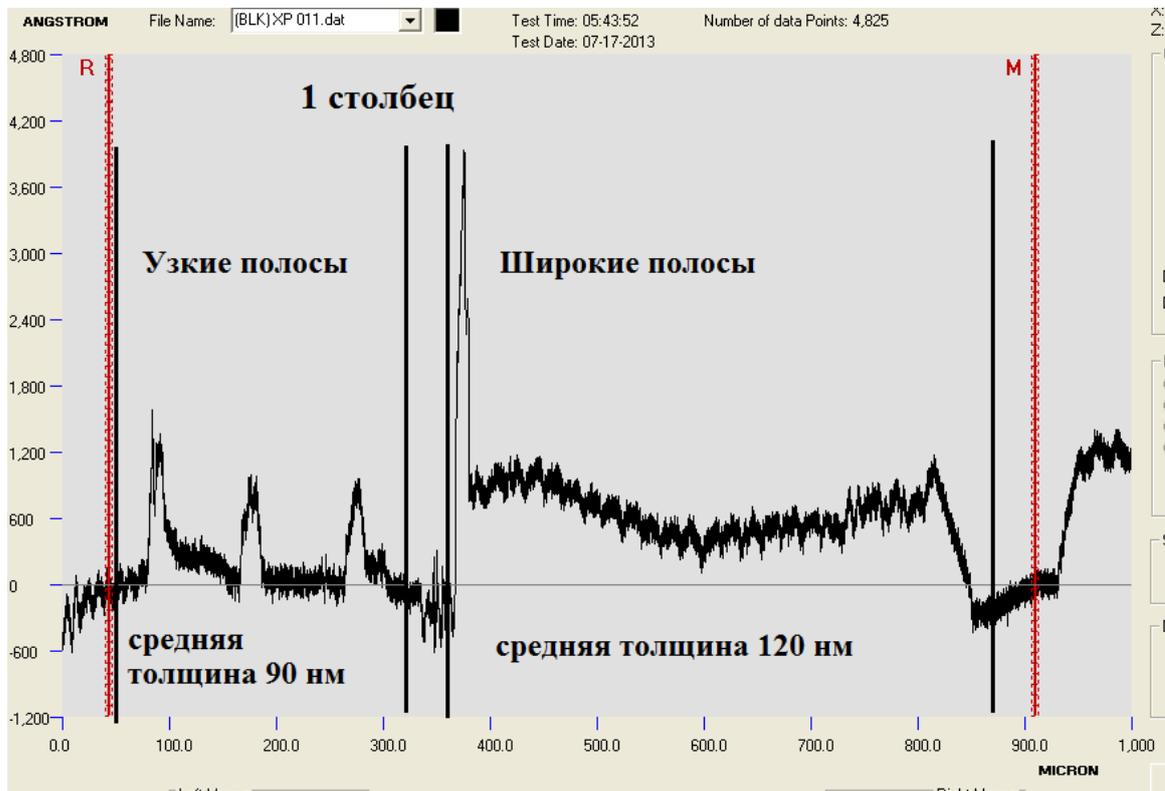
На рисунке 4.27 приведена профилограмма пленки для полигона, выполненного путем печати перекрывающихся линий с шагом 20 мкм на скорости 100 мм/с.



*a*



*б*



*в*

Рисунок 4.25 – Микрофотография напечатанного слоя:  
*a* – линии и полигон; *б* – полигоны, субпиксели, линии;  
*в* – профилограмма пленки линий и полигонов

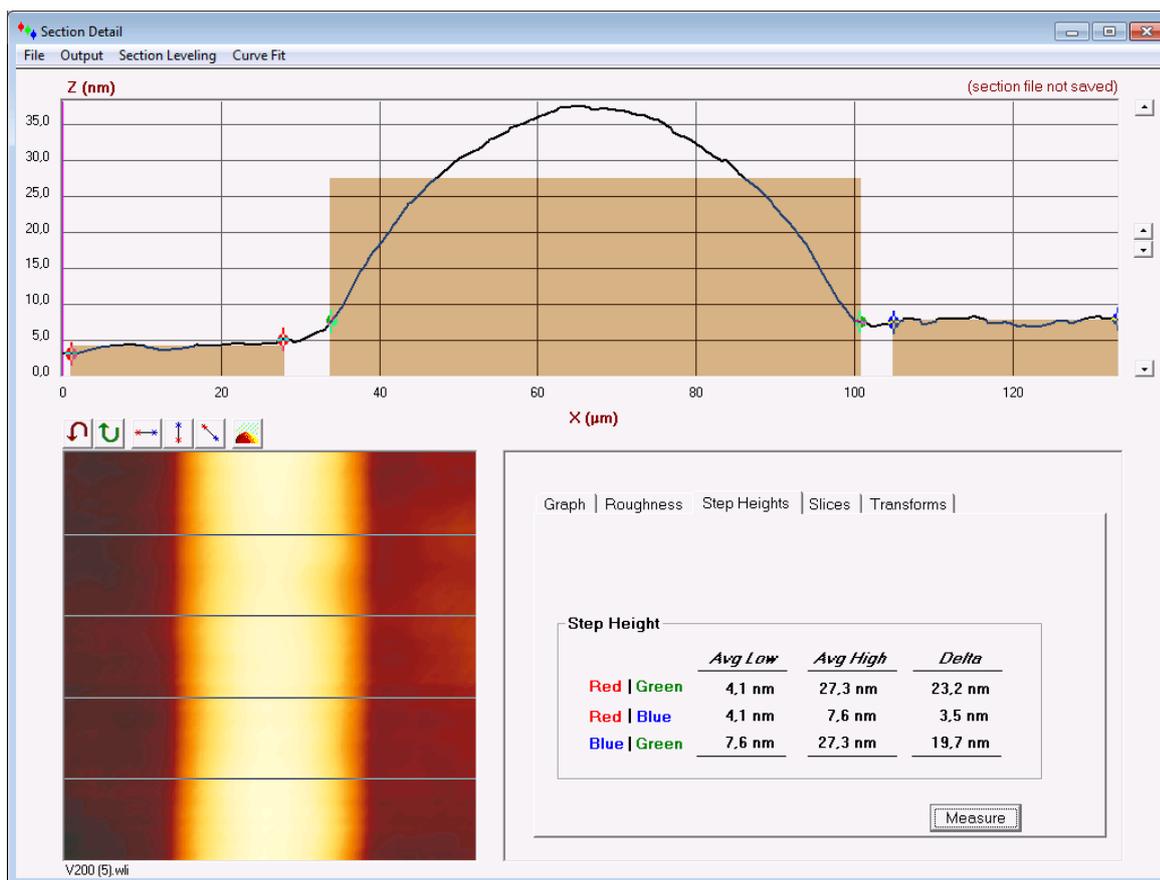


Рисунок 4.26 – Профилограмма пленки PEDOT:PSS (линия)

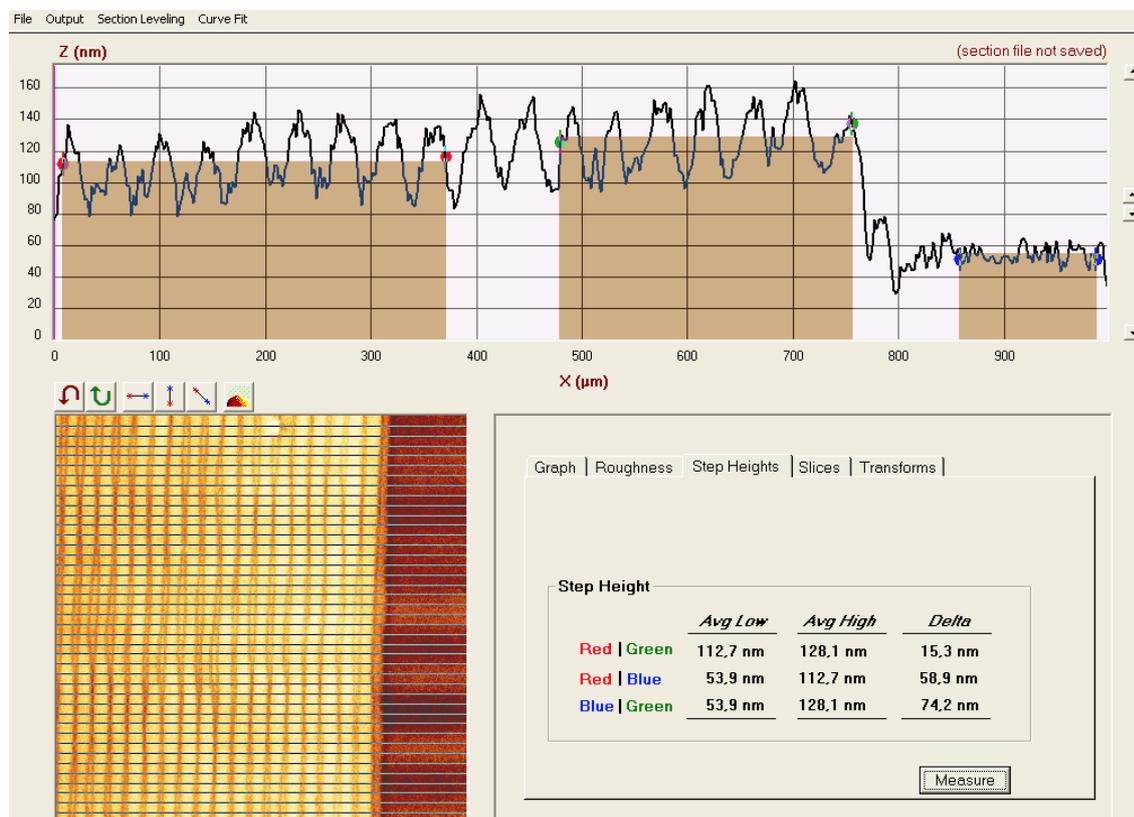


Рисунок 4.27 – Профилограмма пленки PEDOT:PSS (полигон)

Средняя толщина пленки PEDOT:PSS 60 нм. Полученные результаты говорят о хорошем приближении к требованиям по толщине транспортного слоя, предъявляемым при изготовлении органических светодиодов.

**Печать электролюминесцентного слоя.** Аналогично описанной технологии нанесения транспортного слоя проведены экспериментальные исследования по печати активных слоев. Печать выполнялась на поверхность подложки из кварцевого стекла с предварительно нанесенными слоями ITO и PEDOT:PSS.

На рисунке 4.28 приведена профилограмма пленки, полученной печатью раствором PF53 на скорости 300 мм/с при напряжении 1 В.

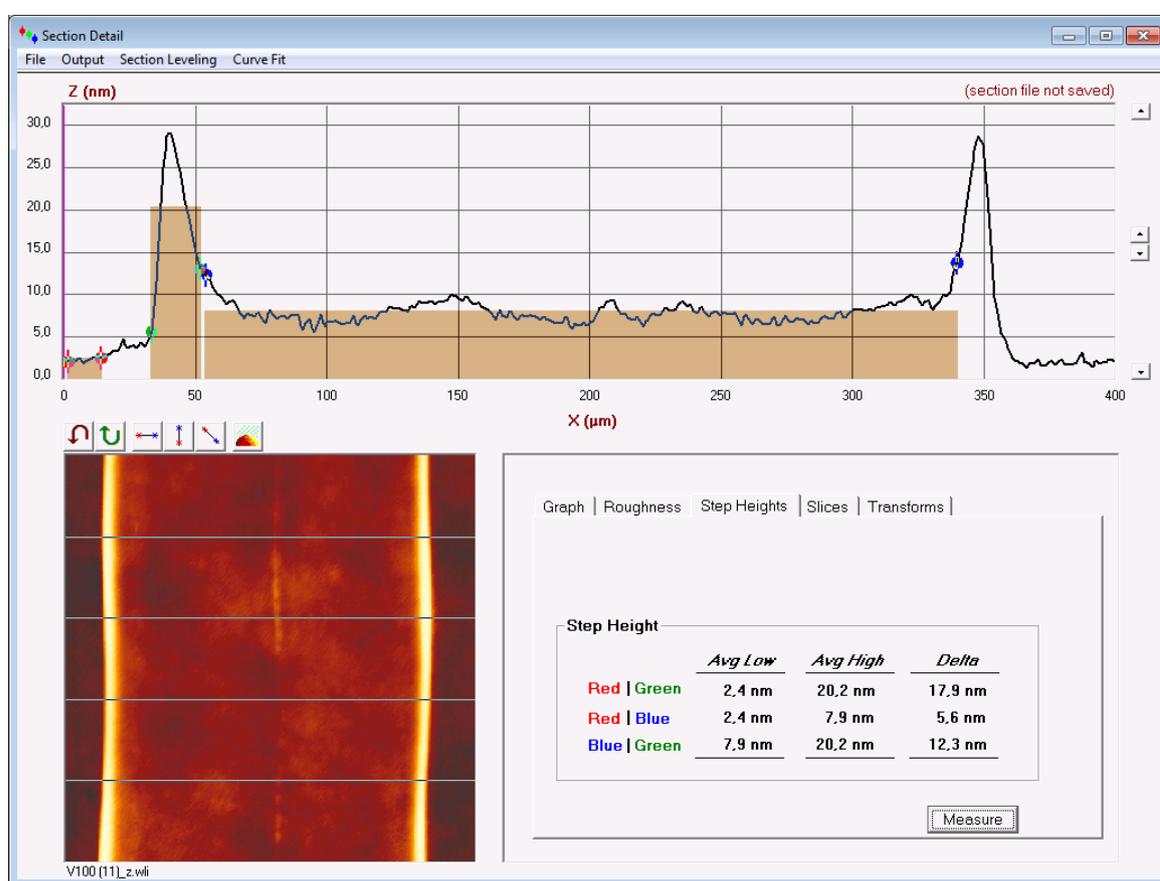


Рисунок 4.28 – Профилограмма пленки PF53

Ширина пленок во всем диапазоне напряжений и скоростей движения дозатора составляла  $320 \pm 20$  мкм при диаметре капилляра дозатора 60 мкм – это следствие высокой смачиваемости пленки PEDOT:PSS чернилами PF53.

На рисунке 4.29 приведены профилограммы пленок, полученных с использованием модифицированного раствора активного слоя: PF53 в смеси толуола и линейного алкибензола в соотношении 1:3. При концентрации PF53 10 мг/мл вязкость при температуре 20 °С составила 2,5 сП. Плотность раствора 0,9 г/мл.

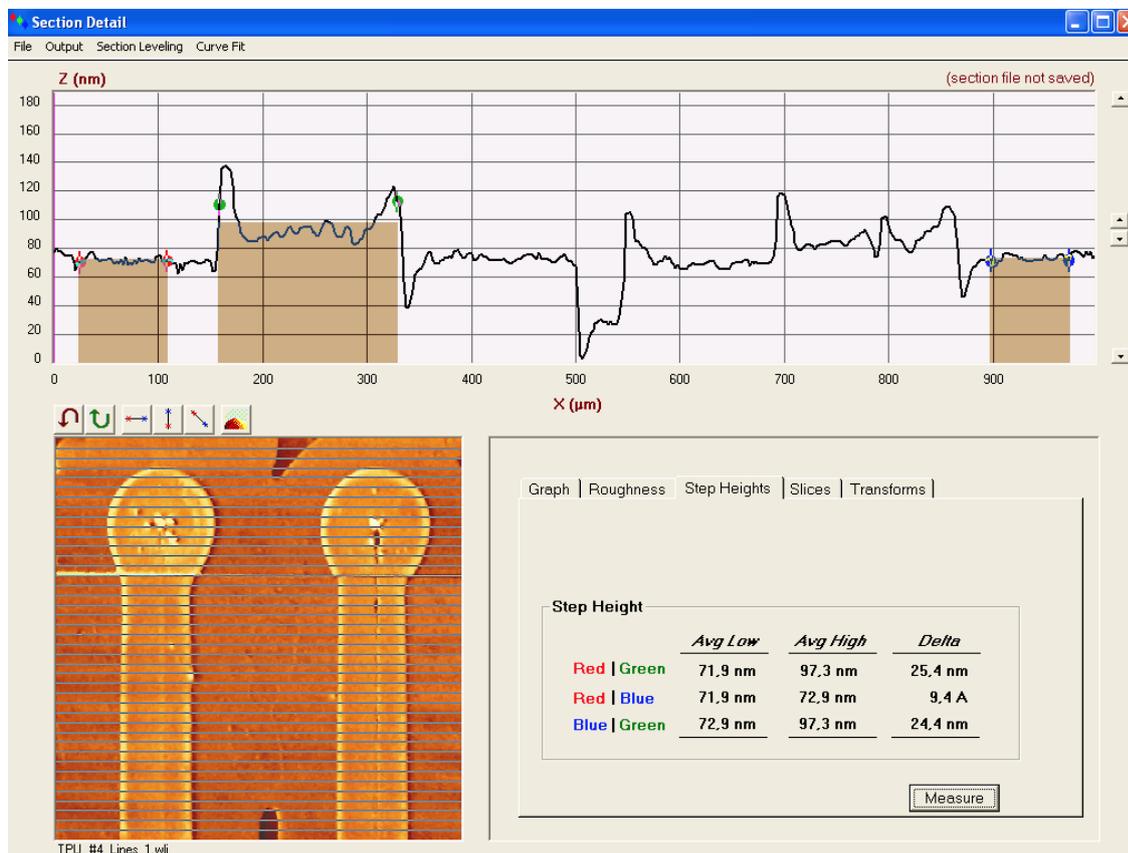


Рисунок 4.29 – Профилограмма пленок одиночных линий PF53 (модифицированный раствор)

Модификация растворителя позволила уменьшить относительную величину выбросов на краях пленки. При этом толщина пленки, измеренная вдоль продольной оси линии, увеличилась с 5–8 нм до 25 нм, а ширина уменьшилась до 175 мкм.

**Печать изолирующего слоя (диэлектрика).** Одним из ключевых вопросов в технологии производства светодиодных матриц и других функциональных устройств является обеспечение электрической изоляции между соседними участками, между анодными и катодными электродами, а также между соседними электродами одного потенциала. Получение изолирующих слоев может решаться традиционно, т.е. путем напыления тонких пленок диэлектриков

на различных стадиях. Перспективным представляется технологический процесс печати органических диэлектриков, тем более что он полностью совместим с остальными процессами печати органических материалов. Ниже приведены результаты экспериментов по печати изолирующих слоев на базе полиметилметакрилата растворами:

тип 1 – Poly(methyl methacrylate) в концентрации 7 мг/мл;

тип 2 – Poly[(propylmethacryl-heptaisobutyl-PSS)-co-(t-butyl methacrylate)] 15 % wt POSS в концентрации 7 мг/мл.

На рисунках 4.30 и 4.31 приведены профилограммы, измеренные для пленок одиночных линий, нанесенных с использованием растворов типов 1 и 2.

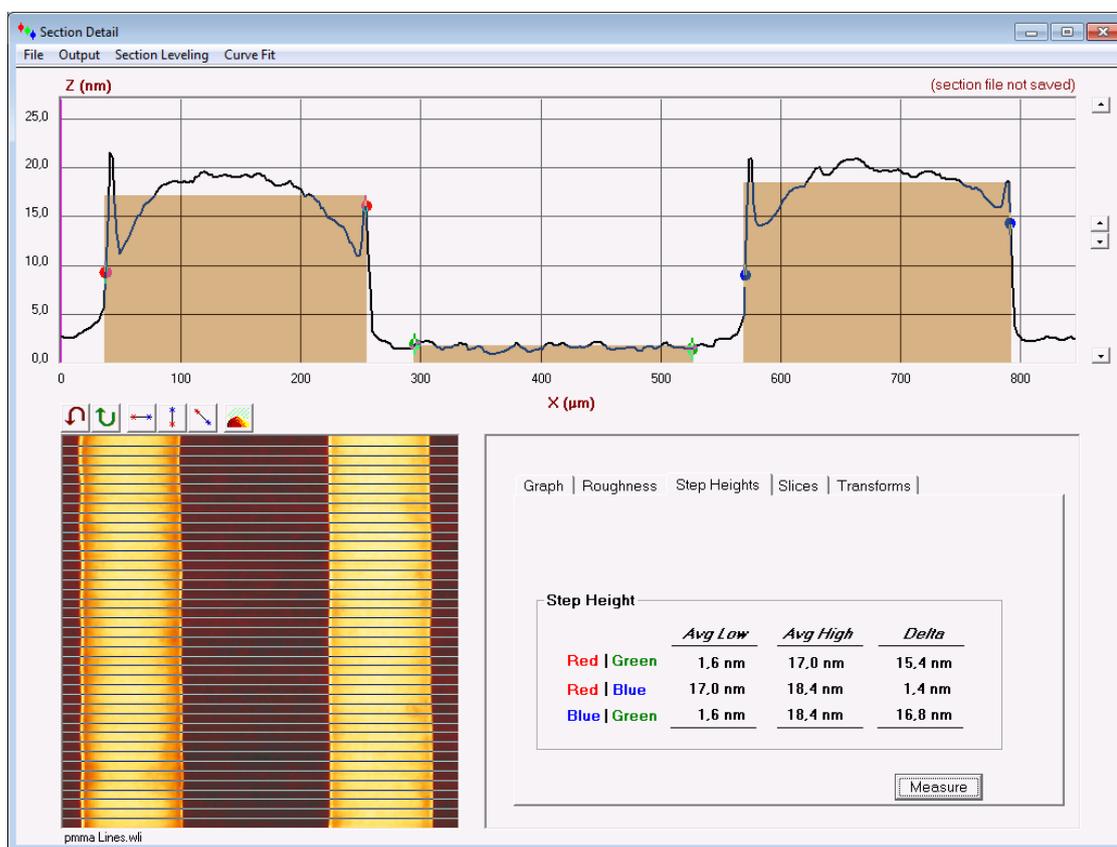


Рисунок 4.30 – Профилограмма пленок (линии), полученных печатью раствором типа 1

На рисунке 4.32 приведена профилограмма сплошной пленки, выполненной путем печати перекрывающихся линий с шагом 20 мкм раствором типа 2.

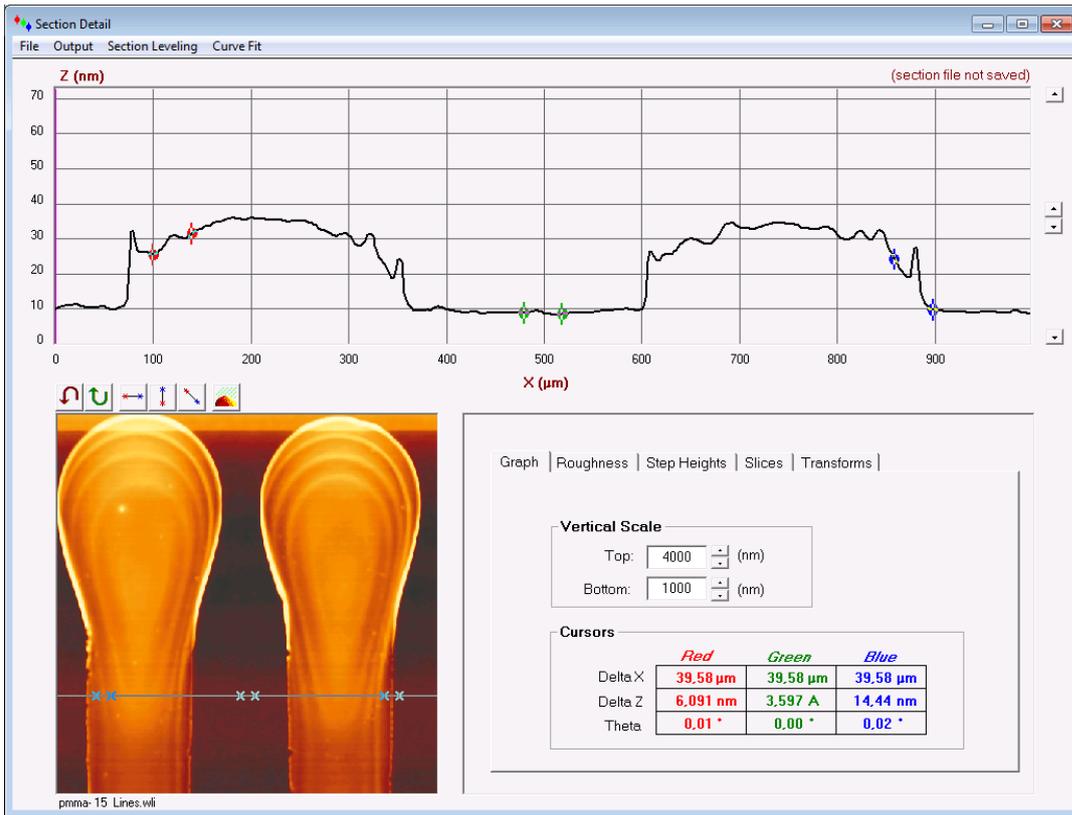


Рисунок 4.31 – Профилограмма пленок (линии),  
полученных печатью раствором типа 2

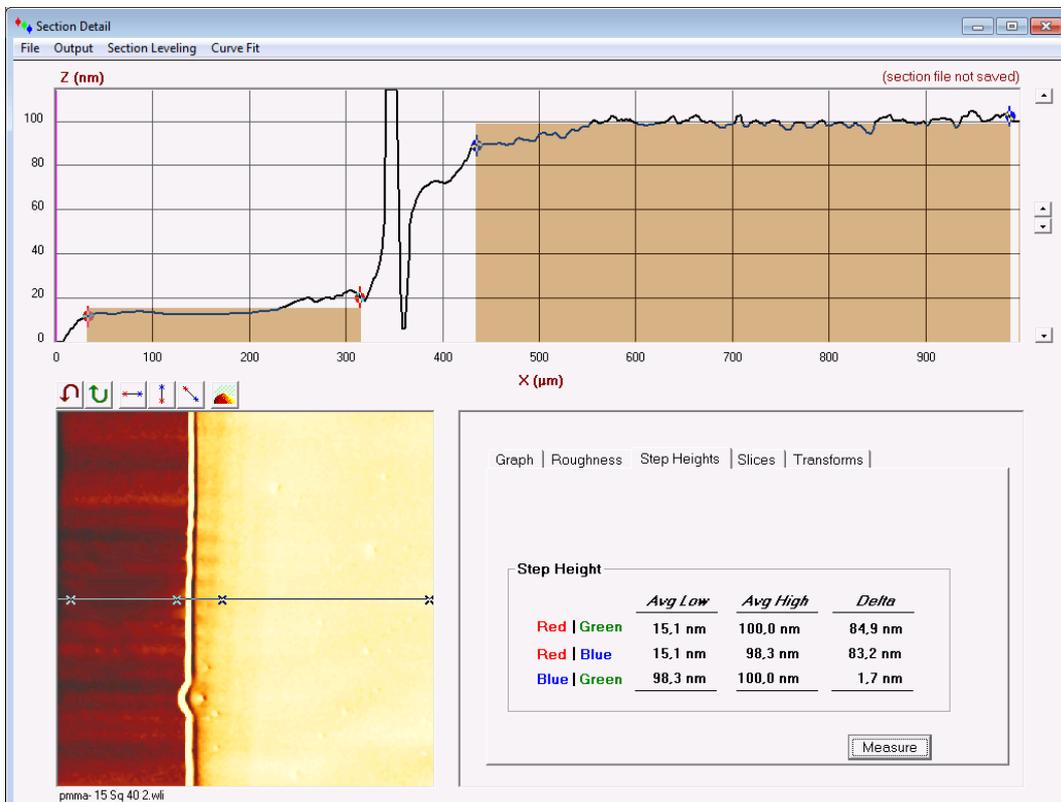


Рисунок 4.32 – Профилограмма сплошной пленки,  
полученной печатью раствором типа 2

Как видно из результатов измерений, применяемая технология печати позволяет не только получать отдельные линии шириной 250–300 мкм и толщиной 20–30 нм, но и обеспечивает однородную заливку поверхности (см. рисунок 4.32) с толщиной слоя 100 нм. Это позволяет прогнозировать использование операции печати диэлектрических слоев при производстве компонентов микро- и нанoeлектроники.

Для определения электрических характеристик полученных пленок изготовлены макеты тонкопленочных структур с топологическими размерами 2,54×5 мм, поперечное сечение которых приведено на рисунке 4.33.

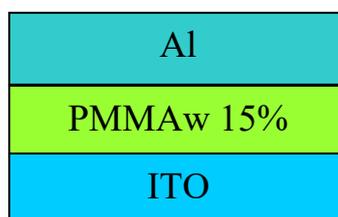


Рисунок 4.33 – Поперечное сечение структуры

Для изготовленных макетов измерены значения сопротивлений изоляции при значении постоянного напряжения 50, 100 и 200 В. Среднее значение сопротивления изоляции пленки PMMAw 15 % POSS составило 5 МОм. Толщина пленки диэлектрика PMMAw 15 % POSS 100 нм.

#### 4.4 Печать проводящего (металлического) слоя

Одной из форм применения печатной технологии при создании ОСИД-матриц и других элементов является получение проводящих дорожек с использованием серебросодержащих чернил. Проведено несколько экспериментов по нанесению слоя проводящих чернил марки ANP DGP 40TE-20C (см. таблицу 2.1).

На рисунках 4.34, 4.35 приведены профилограммы пленок одиночной линии и полигона, выполненного путем печати перекрывающихся линий с шагом 20 мкм.



Рисунок 4.34 – Профилограмма проводящей пленки линии

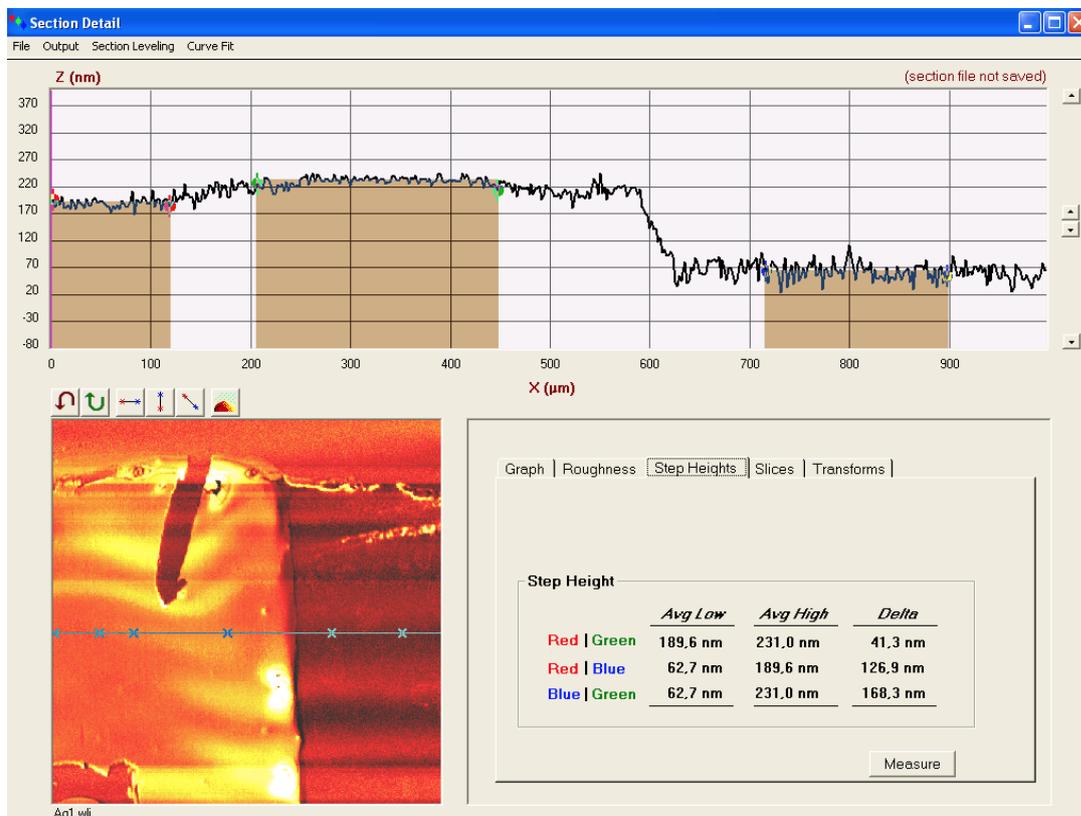


Рисунок 4.35 – Профилограмма проводящей пленки полигона

В результате экспериментальных исследований получены проводящие пленки толщиной 100 нм (для одиночных линий) и 168 нм (для сплошных полигонов). Сопротивление пленок 3–5 Ом/□.

Полученные проводящие пленки могут применяться в случаях:

- уменьшения контактного сопротивления в области подключения к анодным электродам ОСИД;
- уменьшения потерь тока в проводниках анода путем шунтирования прозрачного анодного электрода узким проводником (30 мкм и менее), имеющим меньшее сопротивление;
- обеспечения коммутации элементов катодных электродов, полностью либо частично заменяющих собой проводящие пленки алюминия.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Сформулируйте научное открытие ультразвукового капиллярного эффекта.
2. Перечислите слои базовой структуры органического светоизлучающего диода.
3. В чем заключается назначение слоев с дырочным и электронным типом проводимости в структуре органического светоизлучающего диода?
4. Какие ограничения связаны с выбором растворителей для материалов двух последовательно наносимых слоев?

---

## 5 АЭРОЗОЛЬНАЯ ПЕЧАТЬ

---

### 5.1 Общие сведения

В конце XVIII столетия запатентовано устройство распыления краски с применением сжатого воздуха [29]. Конструкция аэрозольного распылителя иллюстрируется рисунком 5.1 [30].

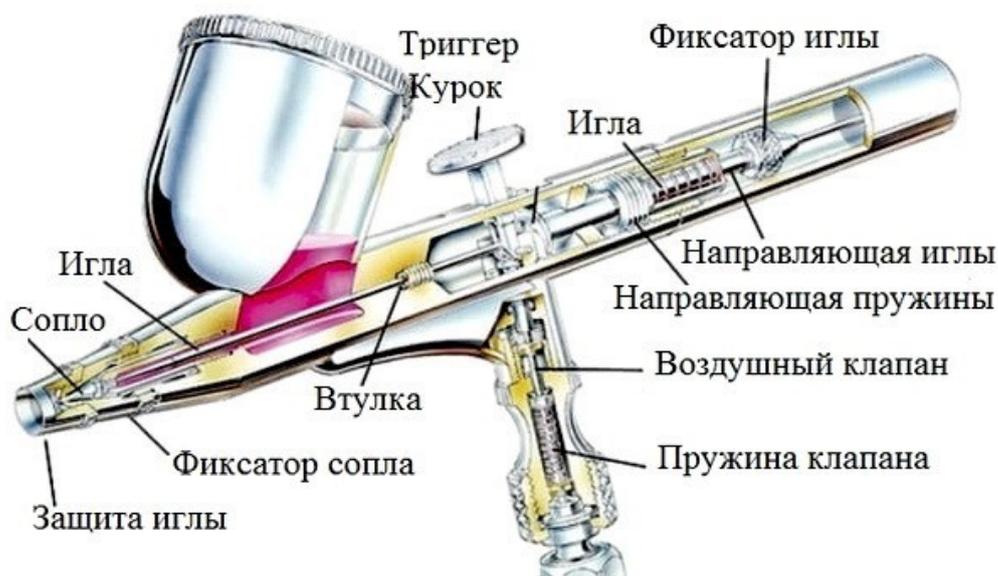


Рисунок 5.1 – Конструкция аэрозольного распылителя

Инструмент подсоединяется с помощью шланга высокого давления к компрессору. При нажатии на пусковой рычаг (триггер) осуществляется подача воздуха. Во время движения он захватывает краску, которая располагается в бачке распылителя. Смесь воздуха и краски выходит через сопло устройства, создавая факел. Распыляемые аэрографом частицы имеют микроскопическую дисперсию, благодаря чему слой краски ложится ровно, без шероховатостей и рельефа.

Инструмент предназначен для ручного использования и применяется для художественного оформления площадей больших размеров (единицы и десятки квадратных дециметров).

На принципе аэрозольного распыления наносимых материалов разработано устройство аэрозольной печати для микроэлектроники.

## 5.2 Аэрозольный принтер для микроэлектроники

Аэрозольная печать – метод аддитивного производства элементов и межсоединений, в котором мельчайшие капельки материала наносятся аэродинамически-сфокусированной струей на трехмерное основание селективно, без использования масок [31].

Преимущества технологии аэрозольной печати по сравнению с другими методами печати и фотолитографией – в большей свободе конструирования изделий, гибкости производства, отсутствии затрат на оснастку (трафареты, фотошаблоны), меньшем неблагоприятном воздействии на окружающую среду.

Упрощенная схема аэрозольного распылителя приведена на рисунке 5.2 [32].

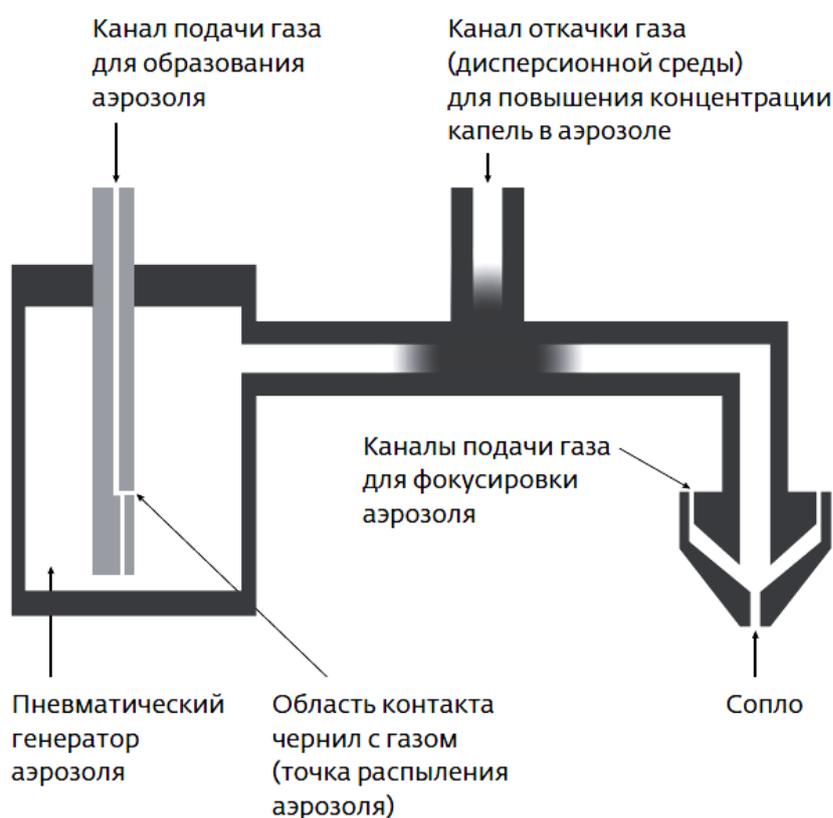


Рисунок 5.2 – Упрощенная схема аэрозольного распылителя

Наносимый материал (чернила) заправляется в генератор аэрозоля, причем в зависимости от чернил может использоваться пневматический или ультразвуковой генератор. Для заправки ультразвукового генератора достаточно небольшого объема чернил,

поэтому он может применяться для нанесения дорогих материалов, но диапазон вязкости чернил и максимальный диаметр твердых частиц существенно ограничены: вязкость от 0,7 до 30 сП, размер частиц не более 50 нм [33].

Пневматический генератор позволяет наносить материалы с широким диапазоном вязкости и с диаметром твердых частиц на порядок выше, но для его заправки требуется большее количество чернил: вязкость от 1 до 1000 сП, размер частиц – до 500 нм.

Для образования аэрозоля в пневматический генератор под давлением подается газ (азот или воздух), рост давления приводит к поднятию чернил по каналу, а при контакте газа с чернилами образуется аэрозоль. На выходе из генератора диаметр капле чернил в аэрозоле составляет 1–5 мкм, капли большего размера под действием силы тяжести осаждаются. Затем повышается концентрация капле чернил в аэрозоле: на коротком участке пути аэрозоля понижается давление, капли чернил по инерции минуют этот участок, но часть газа откачивается. На выходе из сопла аэрозоль фокусируется «покровным» газом. Наличие газа между струей аэрозоля и соплом позволяет минимизировать риск засорения. Струя аэрозоля остается сфокусированной на расстоянии вплоть до 5–15 мм от сопла, что позволяет наносить чернила на трехмерные основания.

Технически это реализуется путем перемещения печатающей головки по трем осям ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) и наклоном основания по двум осям. После нанесения чернил производится УФ-, ИК- или термическая сушка в зависимости от материалов чернил и основания.

Методом аэрозольной печати можно наносить различные материалы (рисунок 5.3) [34]. Для некоторых материалов приходится активировать поверхность основания, например, плазменной обработкой.

Таким образом, аэрозольная печать – метод нанесения широкого спектра функциональных материалов электроники (проводящих, полупроводниковых, диэлектрических, резистивных и др.), позволяющий, в отличие от других методов печати, изготовить элементы и межсоединения непосредственно на трехмерных основаниях развитой формы, а не только на плоских поверхностях.

На рисунке 5.4 представлен общий вид аэрозольного принтера Aerosol-Jet-5X-3D [35].

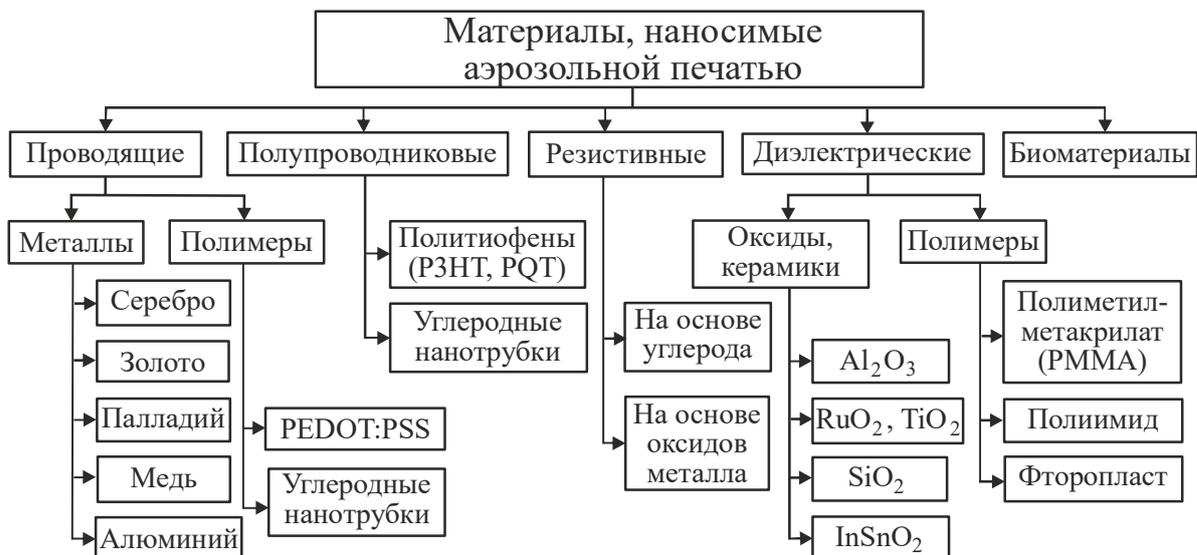


Рисунок 5.3 – Классификация материалов, наносимых аэрозольной печатью



Рисунок 5.4 – Общий вид аэрозольного принтера

Основные технические характеристики принтера:

- размеры рабочей камеры                      200×300×200 мм;
- толщина слоя                                      0,05–6 мкм;
- точность позиционирования                      ± 10 мкм (на 100 мм);

- повторяемость позиционирования  $\pm 2$  мкм
- минимальная ширина линии 10 мкм

Фотография потока аэрозоля представлена на рисунке 5.5 [30].

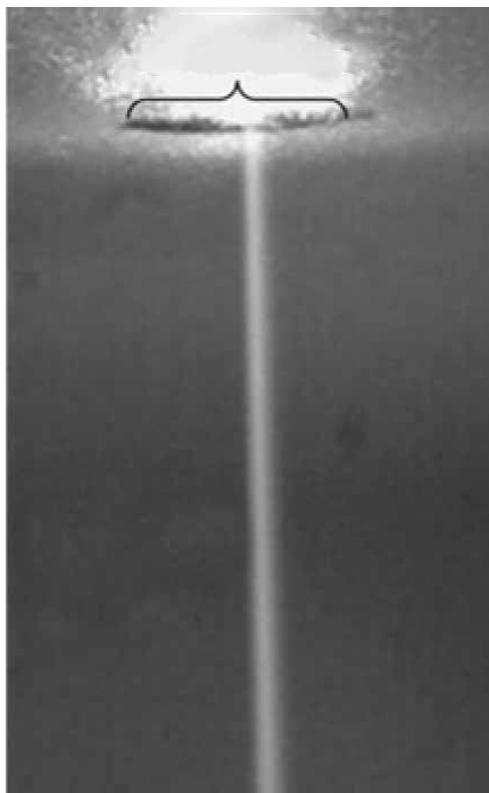


Рисунок 5.5 – Снимок потока аэрозоля из сопла (диаметр потока 15 мкм)

### **5.3 Результаты применения аэрозольного способа для печати элементов функциональной микроэлектроники**

В качестве примера на рисунке 5.6 приведена фотография датчика газа, изготовленного по технологии аэрозольной печати. Принцип работы датчика основан на том, что сопротивление протеина (темные прямоугольники на рисунке между «гребенкой») зависит от концентрации газа [27].

При использовании аэрозольной печати для изготовления проводящих топологий на диэлектрическом основании получены следующие экспериментальные результаты.

Нанесение проводникового рисунка в виде линий разной ширины и контактных площадок по краям осуществлялось ориги-

нальным композиционным материалом на основе сополимера винилхлорид-малеиновый ангидрид и нано- и микрочастиц серебра (70 мас.%) [36]. На рисунке 5.7 приведена фотография печатающей головки аэрозольного принтера в процессе нанесения проводниковых топологий.

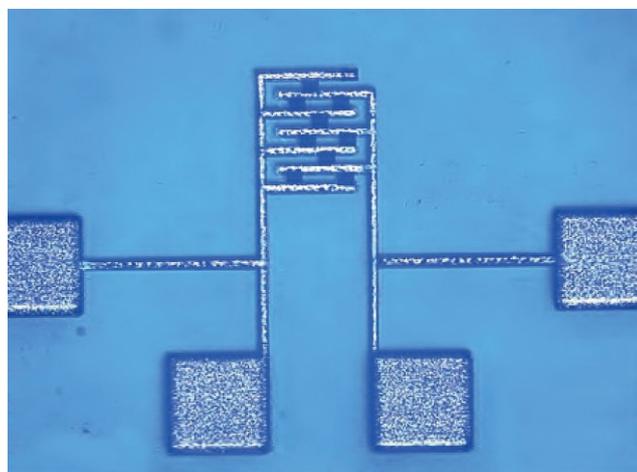


Рисунок 5.6 – Датчик газа, изготовленный по технологии аэрозольной печати



Рисунок 5.7 – Фотография печатающей головки аэрозольного принтера в процессе нанесения топологии

В качестве основания для аэрозольной печати проводящего материала использована алюминиевая подложка с нанесенным на ее поверхность методом шелкографии (подраздел 1.2) диэлектрическим слоем полимерного керамического материала [36].

Фотография макета печатной платы, проводящие топологии которого изготовлены способом аэрозольной печати, приведена на рисунке 5.8 (условная нумерация линий с 1 по 5 слева направо).

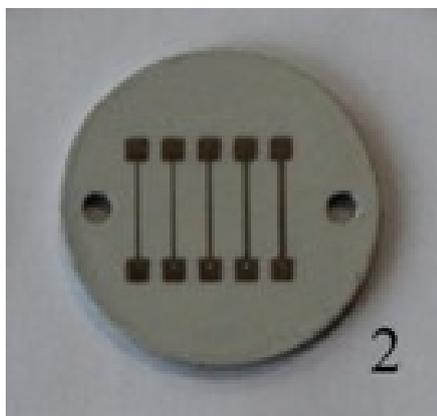


Рисунок 5.8 – Фотография макета печатной платы с нанесенным изоляционным покрытием и проводниковыми топологиями

Фотография линии с номером 4 приведена на рисунке 5.9 (увеличение в 100 раз).

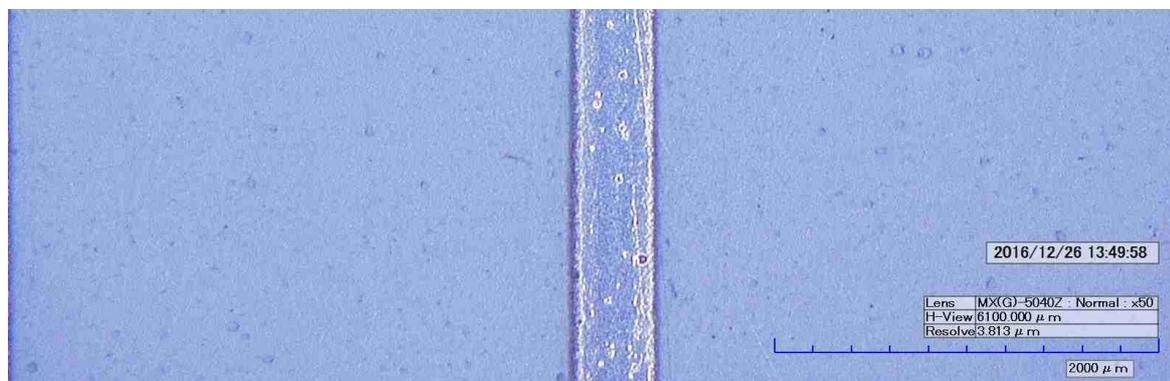


Рисунок 5.9 – Фотография линии 4 макета печатной платы

Измеренная профилограмма изоляционного покрытия, а также профиля и толщины проводниковой топологии макета печатной платы (см. рисунок 5.8) показан на рисунке 5.10. Толщина проводников 2,5–6 мкм при ширине по основанию 280–630 мкм. Измерения проведены контактным профилометром.

Действие профилометра основано на принципе определения неровностей измеряемой поверхности щупом (алмазной иглой) в процессе перемещения индуктивного датчика вдоль измеряемой

поверхности и последующего преобразования возникающих при этом механических колебаний щупа в цифровой сигнал.



Рисунок 5.10 – Профиль поверхности макета

В комплект поставки прибора входит индуктивный датчик с опорой на измеряемую поверхность. Датчик закрепляется в электромеханическом приводе, с помощью которого он перемещается по горизонтальной измеряемой поверхности. В вертикальном направлении для обеспечения контакта датчика с измеряемой деталью привод с датчиком устанавливается непосредственно на детали или на стойке, где также устанавливается измеряемая деталь. Питание датчика, управление приводом, формирование и обработка сигнала, а также измерительной информации осуществляется с помощью информационно-вычислительного блока, выполненного в виде платы, встраиваемой в компьютер, привод или в выносной блок компьютера.

Управление профилометром осуществляется с клавиатуры персонального компьютера. Данные с прибора обрабатываются посредством специального программного обеспечения, результат обработки включает расчет параметров шероховатости, вывод на экран профилограммы измеренного профиля и определение их геометрических параметров (линейные размеры, углы наклона).

В таблице 5.1 приведены результаты измерения удельного сопротивления проводников [36] двухконтактным и четырехконтактным методом.

Таблица 5.1 – Результаты измерения удельного сопротивления проводников двухконтактным и четырехконтактным методом

Номер линии	Ширина, мкм	Сопротивление, Ом (2W)	Сопротивление, Ом (4W)	Удельное сопротивление, Ом*м (2W)	Удельное сопротивление, Ом*м (4W)
1	287	4	3	$3,4 \cdot 10^{-7}$	$2,6 \cdot 10^{-7}$
2	347	2	1,58	$2,1 \cdot 10^{-7}$	$1,6 \cdot 10^{-7}$
3	447	1,4	1	$1,9 \cdot 10^{-7}$	$1,3 \cdot 10^{-7}$
4	550	1	0,7	$1,7 \cdot 10^{-7}$	$1,2 \cdot 10^{-7}$
5	629	0,8	0,55	$1,5 \cdot 10^{-7}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$

Таким образом, удельное электрическое сопротивление проводников, напечатанных аэрозольным способом, составляет  $(1-3,4) \cdot 10^{-7}$  Ом·м.

### Вопросы для самоконтроля

1. На каком расстоянии от сопла аэрозольного принтера поток чернил остается сфокусированным?
2. Назовите минимальное реально достижимое значение диаметра потока аэрозольного принтера.
3. Какой из способов создания аэрозоля менее критичен к вязкости исходного материала: пневматический или ультразвуковой?
4. Пневматический или ультразвуковой способ создания аэрозоля менее критичны к размерам частиц исходного материала?

## Заключение

Приведенные в пособии материалы отражают лишь основные закономерности аддитивных технологий в электронике, основанных на применении принтеров трех рассмотренных типов. Очевидно, что принтерные технологии, несмотря на существующие трудности их промышленного освоения, найдут свое место в радиоэлектронной промышленности. История освоения субтрактивной промышленной технологии печатных плат при изготовлении монтажных плат, берущая начало с 40-х годов прошлого века, убеждает в том, что пройдет совсем немного времени и принтерные методы будут отработаны на новом оборудовании с использованием новых люминесцентных, полупроводящих, проводящих и изоляционных материалов.

Автор надеется, что учебное пособие окажется полезным бакалаврам и магистрам радиотехнических направлений подготовки в освоении аддитивных способов производства радиоэлектронных средств.

## Литература

1. Каблов Е. Применение 3D-принтеров в промышленности. Аддитивные технологии: перспективы 3D-печати в промышленности / Е. Каблов // Атомный эксперт. – 2014. – № 5–6. – С. 56–61.

2. Витухновский А.Г. Органическая фотоника: успехи и разочарования / А.Г. Витухновский // УФН. – 2013. – Т. 183, № 6. – С. 653–657. – DOI: 10.3367/UFNr.0183.201306g.0653.

3. Алешин А.Н. Органическая оптоэлектроника на основе композитных (полимернеорганические наночастицы) материалов / А.Н. Алешин // УФН. – 2013. – Т. 183, № 6. – С. 657–664. – DOI: 10.3367/UFNr. 0183.201306i.0657.

4. Разработка базовой технологии изготовления особо плоских полноцветных ОСИД-дисплеев методом принтерной печати: отчет по ОКР «Органика» (промежуточ.): ЕГВА.467848.002 ПЗ / Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники ; Туев В.И. – Томск, 2012. – 99 с. – Инв. № 26.01/01-2013.

5. Исследование и разработка базовой технологии производства полимерных композиционных материалов с заданными деформационно-прочностными и теплофизическими характеристиками путем поверхностной и объемной модификации полимеров наполнителями, в том числе наноструктурированными: отчет по НИР «Полимер» «Исследование управляющих параметров, обеспечивающих заданные значения эффективных деформационно-прочностных и теплофизических характеристик композитного материала» (промежуточ.) / Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники ; Туев В.И. – Томск, 2015. – 303 с. – № ГР 114022010008. – Инв. № 24.02/03-2015.

6. Разработка энергосберегающей светодиодной лампы с конвекционным газовым охлаждением излучателей и сферическим светораспределением, адаптированной к традиционной технологии массового производства ламп накаливания: отчет по Соглашению о предоставлении субсидии от 05 июня 2014 г. № 14.577.21.0061 (промежуточ.) : в 2 т. / Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники ; Туев В.И. – Томск, 2015. – Т. 1 : Научно-технический отчет. – 49 с. – Т. 2 : Приложения. – 220 с. – № ГР 114100640084. – Инв. № 24.01/03-2015.

7. Разработка прототипов передовых технологических решений роботизированного интеллектуального производства электронной компонентной базы и энергоэффективных световых устройств: отчет по Соглашению о предоставлении субсидии от 26 сентября 2017 г. № 14.577.21.0266 (промежуточ.) / Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники ; Туев В.И. – Томск, 2019. – 726 с. – № ГР АААА-А17-117102750011-4. – Инв. № 24.05/03-2019.

8. Стефанов С. Полиграфия будущего с точки зрения настоящего: философские размышления полиграфиста [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://article.unipack.ru/44732/> (дата обращения: 20.03.2020).

9. Что такое рейсфедер, и как им пользоваться? Чертежный инструмент [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.syl.ru/article/462889/chto-takoe-reysfeder-i-kak-im-polzovatsya-chertejnyiy-instrument#image3161525> (дата обращения: 20.03.2020).

10. Стекланный рейсфедер [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://static.auction.ru/offer\\_images/2018/03/01/07/big/W/Wh39hINAqGv/stekljannye\\_chertezhnye\\_trubochki\\_stekljannye\\_rejsfedy.jpg](https://static.auction.ru/offer_images/2018/03/01/07/big/W/Wh39hINAqGv/stekljannye_chertezhnye_trubochki_stekljannye_rejsfedy.jpg) (дата обращения: 20.03.2020).

11. Туев В.И. Учет насыщения дрейфовой скорости носителей при аппроксимации вольт-амперных характеристик полевых транзисторов / В.И. Туев // Докл. Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2007. – № 1(15). – С. 51–56.

12. Пат. 2631015 Российская Федерация, МКИ 2015-1 H01L 51/52. Высоковольтное органическое люминесцентное устройство // Афонин К.Н., Куненко А.В., Олисовец А.Ю., Туев В.И. – № 2016117228 ; заявл. 29.04.2016 ; опубл. 15.09.2017, Бюл. № 26.

13. Струйная печать [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://printedelectronics.ru/ru/tekhnologii/tekhnologii-strujnaa-reshat.html> (дата обращения: 20.03.2020).

14. Развитие аддитивных принтерных технологий в электронике / В.И. Туев [и др.] ; под ред. проф. Н.Д. Малютина. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2015. – 70 с.

15. Производство и монтаж печатных плат [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.rezonit.ru/> (дата обращения: 20.03.2020).

16. Ivanov A.A. Ceramic Materials for the Low-Temperature Synthesis of Dielectric Coatings Used in Electronics, Led Devices and Spacecraft Control Systems / A.A. Ivanov, V.I. Tuev, A.A. Vilisov // Key Engineering Materials. – 2016. – Vol. 712. – P. 188–192. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.712.188.

17. Справочные данные по теплофизическим свойствам веществ в зависимости от температуры и давления [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://thermalinfo.ru/> (дата обращения: 20.03.2020).

18. Application of Ultrasonic Bonding in Leds and Led Lamps Production / K.N. Afonin, Y.V. Ryapolova, V.S. Soldatkin, V.I. Tuev // Journal of Nano- and Electronic Physics. – – Sumy: Sumy State University, 2015. – Vol. 7, No 4, Part 1. – P. 04029(2).

19. Научно-технологическая инфраструктура Российской Федерации: центры коллективного пользования научным оборудованием и уникальные научные установки. Установка плоттерной печати чернилами с широким диапазоном вязкости [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ckp-rf.ru/usu/506739/> (дата обращения: 20.03.2020).

20. Официальный сайт ООО «АкКоЛаб» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.akkolab.com/ru> (дата обращения: 20.03.2020).

21. Официальный сайт компании Advanced Nano Products Co., Ltd [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://anapro.com/eng/product/silver\\_inkjet\\_ink.html](http://anapro.com/eng/product/silver_inkjet_ink.html) (дата обращения: 20.03.2020).

22. Российский принтер, печатающий микроэлектронику [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://4pda.ru/2011/12/9/51237/> (дата обращения: 20.03.2020).

23. Официальный сайт компании Fujifilm [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.fujifilmusa.com/products/industrial\\_inkjet\\_printheads/](https://www.fujifilmusa.com/products/industrial_inkjet_printheads/) (дата обращения: 20.03.2020).

24. Inkjet-Printed Filament for LED Bulbs / К. Afonin, I. Banshchikova, V. Soldatkin, V. Tuev, A. Schkarupov, Yu. Yulaeva //

Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT). – 2019. – DOI: 10.1109/USBEREIT.2019.8736591.

25. Ультразвук [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://nplit.ru/books/item/f00/s00/z0000060/st061.shtml> (дата обращения: 20.03.2020).

26. Стахарный С. Перспективы органических светодиодов в системах освещения / С. Стахарный // Современная светотехника. – 2010. – № 3. – С. 23–30.

27. Молекулярный дизайн электролюминесцентных материалов для органических светоизлучающих диодов (OLEDs) / Г.А. Душенко, В.И. Минкин, И.Е. Михайлов, О.И. Михайлова, Д.А. Стариков // Вестник южного научного центра РАН. – 2010. – Т. 6, № 4. – С. 32–45. – Режим доступа: [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_16371629\\_14363992.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_16371629_14363992.pdf).

28. Потехин В. PEDOT:PSS или поли (3,4-этилендиокситиофен) полистиролсульфонат [Электронный ресурс] / В. Потехин. – Режим доступа: <https://втораяиндустриализация.рф/pedot-pss-ili-poli-3-4-etilendioksitiofen-polistirolsulfonat/> (дата обращения: 20.03.2020).

29. US474158A Air brush 1892-05-03 Charles Burdick.

30. Аэрограф. Виды и устройство. Работа и применение. Особенности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://tehpribory.ru/glavnaia/instrumenty/aerograf.html> (дата обращения: 20.03.2020).

31. Нисан А. Аэрозольная печать на трехмерные основания / А. Нисан, С. Бонапартов // Вектор высоких технологий. – 2014. – № 6 (11). – С. 2–6.

32. Нисан А. Аэрозольная печать: технология и варианты применения / А. Нисан, С. Бонапартов // Электроника, наука, технология, бизнес. – 2014. – № 8 (00140). – С. 112–116.

33. Optimizing aerosol jet printing of silver interconnects on polyimide film for embedded electronics applications / W. Verheecke, M. Van Dyck, F. Vogeler [et al.] // 8th International DAAAM Baltic Conference "INDUSTRIAL ENGINEERING", 19–21 April 2012, Tallinn, Estonia. – 2012. – P. 373–379.

34. Hedges M. 3D Aerosol Jet Printing – Adding Electronics Functionality to RP/RM / M. Hedges, A. Marin // DDMC Conference, 14–15.3.12, Berlin. – 2012.

35. Аэрозольный струйный 5х 3D принтер [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.engineering.com/AdvancedManufacturing/ArticleID/11963/Aerosol-Jet-5X-3D-Printer.aspx> (дата обращения: 20.03.2020).

36. Ivanov A.A. Silver-containing polymer composition used in spacecraft and semiconductor optoelectronics control systems and Citation / A. A. Ivanov, V. I. Tuev // AIP Conference Proceedings 1683, 020074 (2015). – DOI: 10.1063/1.4932764. – View online: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4932764>.

Учебное издание

**Туев Василий Иванович**

**АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА  
УСТРОЙСТВ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**

Учебное пособие