

Современные возможности печати трехмерных объектов в микромасштабе

Аддитивные технологии изготовления трехмерных объектов, также известные как 3D-печать, продолжают интенсифицироваться, а спектр их применений постоянно расширяется. Одним из основных направлений развития 3D-печати является увеличение разрешающей способности — точности воспроизведения объекта по заданной модели, что открывает новые возможности для миниатюризации изделий. Один из перспективных методов, реализующих 3D-печать с точностью порядка 1 мкм, — гальваническое осаждение элементов объемного изображения (вокселей) в жидкой фазе, которое выполняется с помощью микрофлюидного дозатора.

Олег Симонов

simonov.oleg@mail.ru

Применение 3D-печати в электронике и СВЧ-технике

Сокращение времени и экономических затрат на изготовление прототипов — одно из ключевых требований при разработке изделий электронной и радиоэлектронной техники. Данное требование послужило стимулом активного применения аддитивных технологий в этой области. Оборудование, которое при этом используется, как правило, реализует методы экструзии, отверждения фотополимеров и лазерного спекания порошковых материалов, ставшие уже традиционными и хорошо отработанными для 3D-печати.

Появление на рынке 3D-принтеров, специально предназначенных для прототипирования многослой-

ных печатных плат (МПП), по мнению специалистов стало революционным событием в индустрии [1, 2]. Отмечены преимущества экструзивного метода послойного нанесения (Fused Deposition Modeling, или FDM), который позволяет создавать как токопроводящие, так и изолирующие элементы МПП. Для отверждения послойно нанесенных материалов используется инфракрасное излучение для спекания пасты, формирующей токопроводящие структуры, и ультрафиолетовое излучение для полимеризации изолирующих слоев.

Перспективные разработки в области СВЧ-техники часто сталкиваются с трудоемкостью изготовления волноводов и других элементов стандартными методами механообработки, причем из-за сложности конструкции элемента СВЧ-тракта во многих случаях невозможно выполнить его в виде цельной детали. Технологии 3D-печати, такие как прямое лазерное спекание металла (Direct Metal Laser Sintering, или DMLS) и селективное лазерное спекание (Selective Laser Sintering, или SLS), открывают широчайшие возможности создания сложных конструктивных элементов [3]. Полученные электрические характеристики и механическая прочность были признаны удовлетворительными для многих применений. Отсутствие щелей в элементах СВЧ-тракта при использовании 3D-печати является ключевым преимуществом по сравнению со сборными конструкциями, выполненными с помощью механообработки.

Учитывая общие тенденции развития аддитивных технологий, следует ожидать увеличения числа их возможных применений в области электроники за счет развития методов FDM, DMLS, SLS и других, в направлении появления новых материалов с улучшенными свойствами, а также совершенствования оборудования.

Традиционные методы 3D-печати позволяют добиться точности разрешения на уровне десятков микрон. Однако, несмотря на впечатляющие успехи, при создании более мелких объектов с характерным

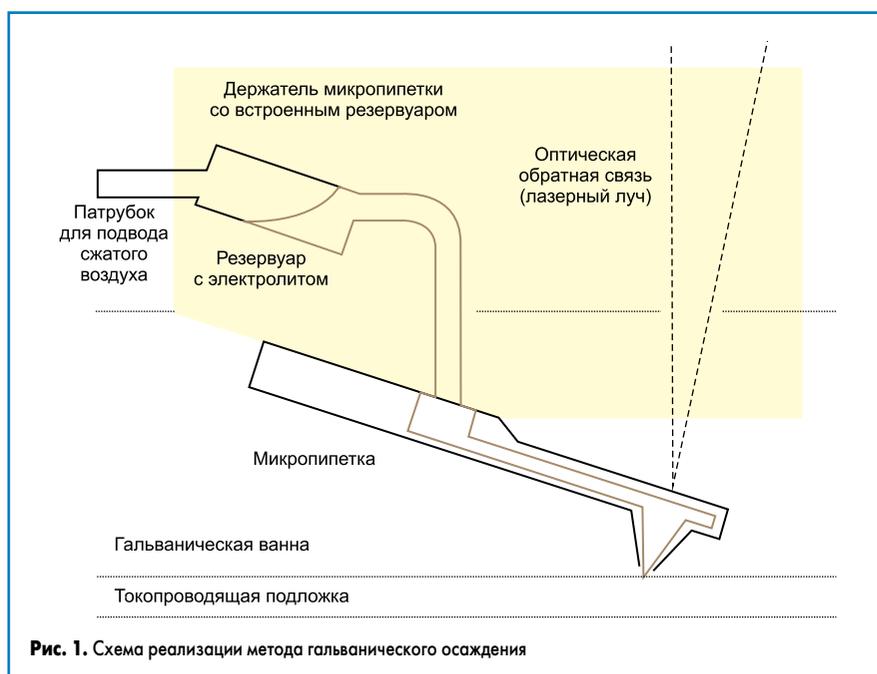


Рис. 1. Схема реализации метода гальванического осаждения

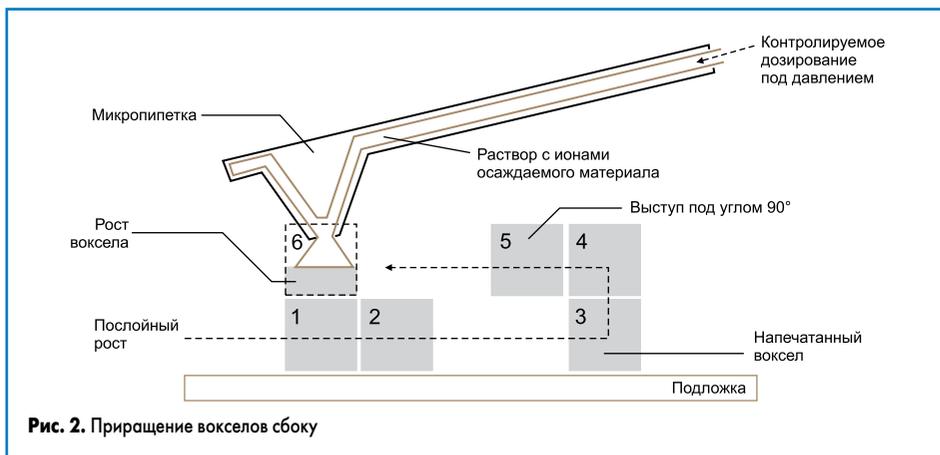


Рис. 2. Приращение воксела сбоку

размером порядка нескольких микрон и менее становится очевидным принципиальное ограничение, связанное с невозможностью получать структуры с разрешением меньше, чем характерный размер исходных частиц материала, например гранул металлического порошка или капель жидкости, используемых в вышеупомянутых методах. Для преодоления этого ограничения и внедрения 3D-печати в производство микроэлектронных компонентов с характерными размерами структуры 100 нм – 10 мкм необходимо применение технологий, основанных на других принципах. В частности, имеются перспективы распространения метода гальванического осаждения наноразмерных частиц в жидкой фазе.

Особенности создания трехмерных объектов в микромасштабе на основе гальванического осаждения

Локальное гальваническое осаждение на токопроводящую подложку, расположенную в ванне с электролитом в качестве одного из электродов, возможно при условии, если материал будет подаваться в точно заданную область и в точно контролируемом объеме, не превышающем размер зоны локального осаждения. На рис. 1 представлена общая схема реализации данного метода.

Дозирующее устройство представляет собой микропипетку, перемещающуюся вдоль поверхности подложки в сканирующем режиме. Подача электролитического раствора, содержащего ионы осаждаемого материала, происходит из резервуара, встроенного в держатель микропипетки, под давлением сжатого воздуха. Дозирование ионов происходит в тех точках, где необходимо провести осаждение. В области наконечника микропипетки формируется элементарная составляющая объемного изображения, называемая вокселом (volumetric pixel), по аналогии с пикселем двухмерного изображения.

По завершении формирования воксела наконечник микропипетки отклоняется вверх, что приводит к угловому отклонению лазерного луча, падающего на верхнюю сторону наконечника, который имеет зеркальную поверхность. Отклонение луча определяется фотодетектором, и сигнал от него запускает команду в системе управления на перемещение микропипетки в следующее положение.

Гальваническое наращивание происходит послойно. По завершении каждого слоя микропипетка поднимается на один шаг, равный линейному размеру воксела. При размере воксела, равном 1 мкм, его объем равен 1 фл;

дозирование материала должно происходить с соответствующей точностью.

Характерно, что гальваническое осаждение не требует, чтобы каждый воксел верхнего слоя располагался строго над другим вокселом предыдущего слоя. Воксели также могут прирастать сбоку к другим вокселям своего уровня, что позволяет формировать балки, расположенные перпендикулярно либо под углом к вертикальной опоре (рис. 2).

На рис. 3 показаны примеры подобных навесных конструкций.

История развития метода микро-3D-печати

Первопроходцем в освоении вышеописанного метода стала швейцарская компания Cytosurge AG, основанная в 2009 году как spin-off на базе Швейцарской высшей технической школы Цюриха (ETH Zurich) [4]. Основные

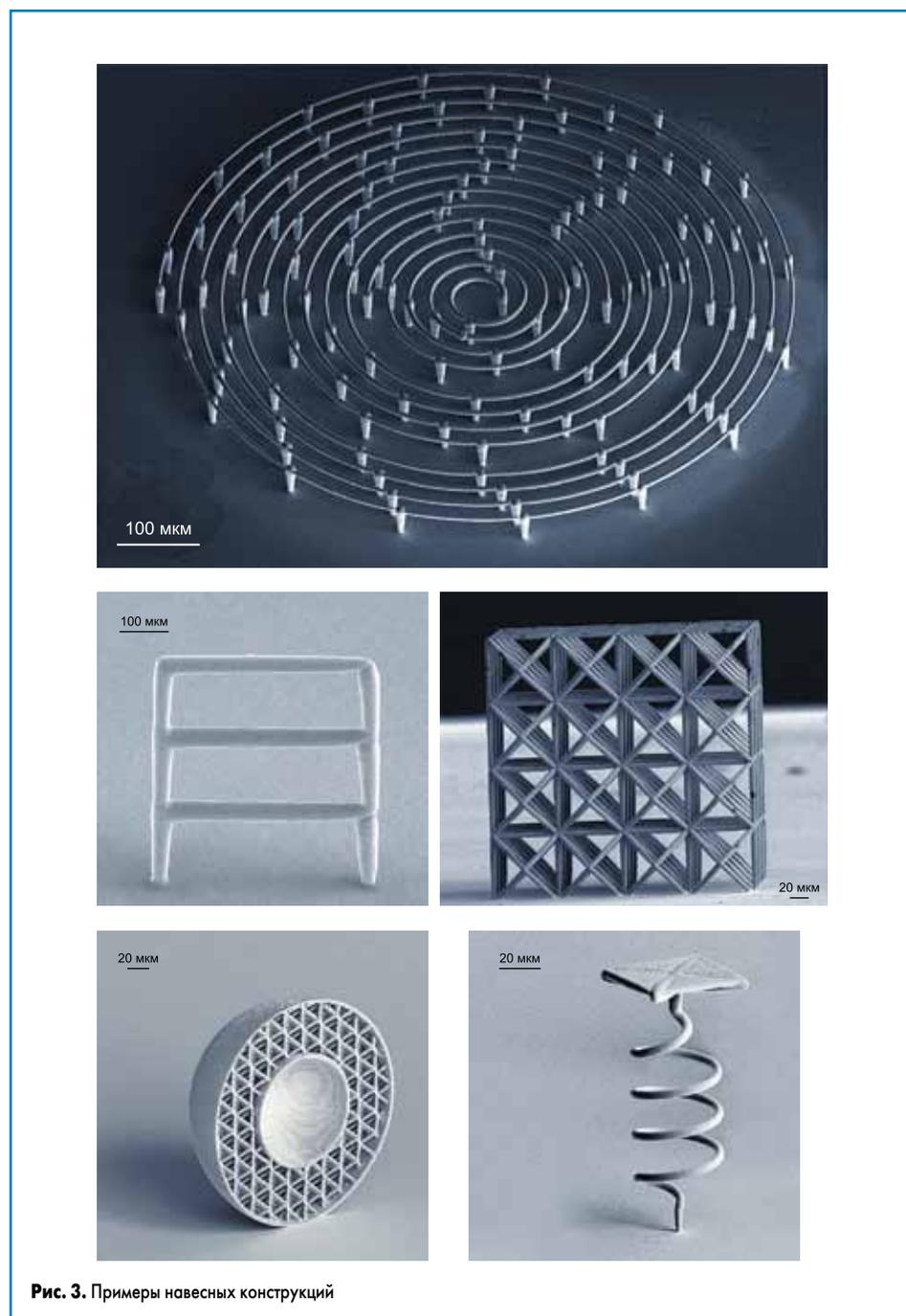


Рис. 3. Примеры навесных конструкций

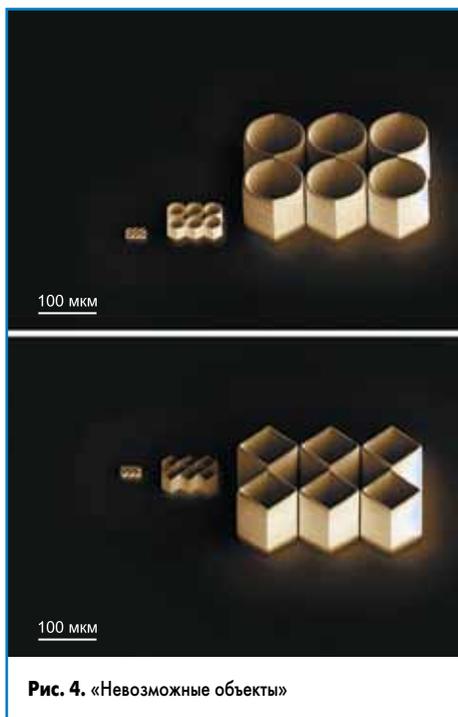


Рис. 4. «Невозможные объекты»

идеи были взяты из области сканирующей зондовой микроскопии, являющейся изначальной специализацией компании. Легко заметить, что микропипетка, перемещающаяся вдоль поверхности подложки, является ничем иным как кантилевером, подобным тем, что используются в зондовых микроскопах со встроенным микроканалом для подачи жидкости.

Такой кантилевер представляет собой микрофлюидное устройство, достаточно сложное в изготовлении. Технология его производства в целом аналогична той, что предусмотрена при создании микроэлектромеханических систем (МЭМС) — формирование жертвенного слоя внутри структуры с последующим его удалением с помощью изотропного травления. К наконечнику микропипетки предъявляются особенно высокие требования по точности воспроизведения отверстия, поскольку именно от этого зависит, насколько точно будут формироваться воксели трехмерного изображения. Развитие микрофлюидных технологий стало драйвером для микро-3D-печати; без него этот метод вряд ли смог бы возникнуть.

Первые практические наработки компании Cytosurge AG по использованию микрофлюидных дозаторов не имели отношения к 3D-печати, но нашли применение в такой, казалось бы, далекой сфере, как биомедицинские технологии. Ими стали исследовательские инструменты, позволяющие проводить транспортировку жидкостей через клеточную мембрану. Наконечник микропипетки способен проникать внутрь живой клетки и впрыскивать в нее малые объемы какого-либо вещества, например красителя, позволяющего отслеживать промаркированную клетку и дочерние клетки после ее деления. Наконечник также позволяет проводить экстракцию внутриклеточной жидкости обратным всасыванием для последующего ее анализа. Компания Cytosurge AG получила всемирную известность, поставляя свои системы в научно-ис-



Рис. 5. Воспроизведение статуи Давида

следовательские организации, специализирующиеся в области биологических наук.

Дальнейшим развитием технологии микродозирования в компании Cytosurge AG стали разработки в области 2D-печати. Прямая прорисовка токопроводящих дорожек на поверхности подложки с помощью нанесения нанопорошковых материалов в жидкой фазе сделала возможным отказ от использования фотолитографии, вакуумного напыления и травления при изготовлении контактной металлизации. Разумеется, скорость этого процесса довольно низкая, так как токопроводящий материал нужно наносить попиксельно, и о внедрении его в массовое производство не может идти речи. Однако для исследовательских разработок в микроэлектронике, где нет критических требований к производительности, данный метод оказался весьма полезным, поскольку позволил заметно сократить количество операций на технологическом маршруте, и экономически оправданным, так как избавил от необходимости применять технологическую линию в составе нескольких дорогостоящих установок. Переход к построению трехмерных изображений стал логическим продолжением в развитии вышеуказанного метода.

Первые трехмерные структуры, полученные с помощью микро-3D-печати, были довольно простыми, как, например, массивы из вертикальных колонок, а их поверхность имела шероховатость в микромасштабе. Последующее совершенствование данной технологии показало, что не существует никаких принципиальных ограничений по форме напечатанных трехмерных объектов. К тому же удалось добиться существенного улучшения гладкости их поверхности.

Впечатляющие успехи были достигнуты в микро-3D-печати так называемых невозможных объектов — особого класса трехмерных структур, открытых японским математиком, профессором Sugihara Kokichi, одни

и те же участки которых обладают в разных проекциях либо скругленной, либо прямоугольной формой (рис. 4) [5, 6].

Кульминационным событием в опытно-конструкторских разработках стало воспроизведение точной копии знаменитой статуи Давида работы скульптора Микеланджело высотой менее 1 мм (рис. 5) [7].

В 2019 году структурное подразделение, занимавшееся разработкой технологии 3D-печати, выделилось из состава Cytosurge AG в качестве самостоятельной фирмы Exaddon, которая начала поставки первой коммерческой модели микро-3D-принтера Ceres с объемным разрешением порядка 0,1 мкм³ (при использовании меди в качестве материала).

Не останавливаясь на достигнутом, специалисты Exaddon прилагают усилия к дальнейшему совершенствованию своего продукта как в направлении увеличения скорости печати, так и повышения ее разрешающей способности, что позволит создавать более мелкие объемные структуры субмикронного масштаба. Уже заявлено о принципиальной возможности печатать объекты с разрешением менее 100 нм.

Современный микро-3D-принтер Ceres

Микро-3D-принтер модели Ceres стал результатом нескольких лет конструктивных разработок в компании Cytosurge AG (впоследствии в Exaddon). Данная модель имеет компактное исполнение и состоит из отдельных модулей.

Рабочий модуль включает электролитическую ванну, в которой происходит печать микроструктур, дозирующее устройство в виде микропипетки, систему его перемещения по трем координатным осям, систему оптической обратной связи для детектирования отклонения наконечника микропипетки при завершении формирования воксела и перево-



Рис. 6. Рабочее место оператора

да его в следующую позицию. Рабочий модуль также оснащен камерой высокого разрешения, позволяющей наблюдать полученные структуры внутри него. Для защиты от внешних вибраций рабочий модуль располагается на антивибрационном столе.

Система управления размещена на колесной стойке в пространстве под антивибрационным столом. Пользовательский интерфейс организован на основе персонального компьютера со специализированным программным обеспечением. ПК вместе с монитором расположены на отдельной стойке, являющейся рабочим местом оператора (рис. 6).

В таблице 1 представлены некоторые ключевые характеристики модели Ceres.

В таблице 2 указаны параметры 3D-печати, характерные для использования меди в каче-

стве материала. Для других металлов эти параметры могут отличаться.

Модель Ceres не требует подключения вакуума, сжатого воздуха и других газовых линий. Процесс печати происходит при комнатной температуре. Нет необходимости в изоляции рабочей камеры от атмосферы помещения, но нужно учитывать, что в качестве электролита в гальванической ванне применяется кислота, и следует применять меры предосторожности, обычные при работе с едкими химическими реагентами, включая вытяжную вентиляцию в помещении и использование индивидуальных средств защиты.

Области применения микро-3D-печати

Появление микро-3D-принтера стало революционным прорывом, открывшим невозможные ранее перспективы. В некотором смысле он опередил свое время, поскольку разработчики микроэлектронных устройств до этого момента не задумывались о подобных возможностях, оставаясь в рамках ограничений, связанных с планарными технологиями. Теперь же стало доступным напечатать трехмерную катушку индуктивности на микросхеме или же создать массив бампов без использования фотолитографии и вакуумного напыления.

В качестве применения необходимо упомянуть электронные устройства, работающие в терагерцевом диапазоне. Ранее производители сталкивались с проблемой искажения их частот-

ных характеристик, связанной с использованием ультразвуковой микросварки как традиционного метода создания проволочных переключателей внутри микросхемы, что становилось все более критично по мере увеличения частоты. Микро-3D-печать дает возможность выращивать проволочные переключатели на контактных площадках полупроводникового кристалла без применения УЗ-сварки, что устраняет проблему.

Имеются обширные возможности для использования микро-3D-печати при разработке новых поколений МЭМС, микрофлюидных и других устройств. Однако существенное ограничение по производительности, присущее данному методу, пока что позволяет говорить лишь о создании прототипов, уникальных изделий либо о малых партиях.

Поскольку метод гальванического осаждения подходит только для металлов, обладающих высокой электропроводностью, печать объектов из диэлектрических материалов с помощью данного метода принципиально невозможна. Для того чтобы печатать комбинированные структуры, состоящие из проводящих и изолирующих слоев, нужны иные методы. Развитие этих методов, основанных на прецизионном дозировании материала, откроет перспективы для более широкого применения микро-3D-печати в научно-исследовательских разработках и промышленном производстве.

Литература

1. Хесин С. 3D-принтер DragonFly — революция в изготовлении многослойных печатных плат // Вектор высоких технологий. 2018. № 4.
2. Боброва Ю., Мануков Д. 3D-печать в производстве печатных плат // Электроника НТБ. 2019. № 7.
3. Ермаков А., Калиничев В., Нисан А., Потапов Г, Фролова Е. Опыт 3D-печати элементов волноводных СВЧ-трактов и рупорных антенн диапазона 8,5–31 ГГц // Вектор высоких технологий. 2019. № 1.
4. www.cytosurge.com/
5. www.isc.meiji.ac.jp/~kokichis/Welcomее.html
6. Kircher M. M. This Optical Illusion Turns Rectangles Into Circles and Hurts My Brain // Select All, New York Magazine. July 1, 2016.
7. www.exaddon.com/blog/our-blog-1/post/a-metal-version-of-michelangelos-david-made-in-microscale-by-additive-manufacturing-4

Таблица 1. Характеристики модели Ceres

Размер рабочей камеры	100×70×50 мм
Скорость перемещения	200 мкм/с
Точность позиционирования по осям X, Y	±250 нм
Точность позиционирования по оси Z	±5 нм
Используемые материалы	Cu, Au, Pt, Ag и др.

Таблица 2. Параметры 3D-печати для меди

Объем объекта	0,1~2 000 000 мкм ³
Скорость печати	до 4 мкм/с
Линейное разрешение	0,6~12 мкм
Аспектное отношение	100:1