

WУДК 62-1/-9; 535-31

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПЕЧАТИ ОБЪЕКТОВ С МИКРОННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

Петров Александр Кириллович, alpetrov57@gmail.com, канд. физ.-мат. наук, Физический факультет, МГУ имени М.В.Ломоносова; ИФМНиИТ БФУ им.И.Канта.

По мере развития основных направлений аддитивных технологий на макроуровне, предлагаемая парадигма создания объектов находит применение и при создании микроизделий. Так, начиная с 1997 года, когда использование эффекта двухфотонного поглощения было предложено в качестве основы для нового метода печати с субмикронным разрешением, за последние два десятилетия было разработано более десятка различных технологий, позволяющие создавать микрообъекты как из металлов, так и полимерных композиций.

Ключевые слова: аддитивные технологии, микропечать, фотополимеризация, лазерно индуцированный транспорт, электроосаждение индуцированное электронным или ионным пучком, электродинамическая печать, электроосаждение локально распределенных ионов в жидкости, прямая лазерная печать, электроспиннинг с использованием расплава.

As the main directions of additive technologies develop at the macro level, the proposed paradigm for creating objects finds itself in the creation of micro-products. Since 1997, when the use of the two-photon absorption effect was proposed as the basis for a new method of printing with submicron resolution, over the last two decades, more than a dozen different technologies have been

developed that allow creating microobjects from both metals and polymer compositions.

Key words: additive technologies, microprinting, photopolymerization, LIFT, FEBID, EHDP, FluidFM, SICM, LA DIW, MEW

ВВЕДЕНИЕ

Аддитивное (adding - добавление) производство (АП) – обобщающий термин для комплекса технологий, позволяющих создавать объекты сложной формы путем добавления материала (как правило, послойно). По сравнению традиционными методами, в которых формирования детали производится за счёт удаления (subtraction – вычитание) материала из массива заготовки, аддитивные технологии обладают целым рядом преимуществ. В качестве основных стоит выделить, возможность создания объектов практически произвольного дизайна, не ориентируясь на технологические ограничения существующих методов, а также за меньшее время и с меньшим количеством технологических этапов. АП позволило уже создать такие инновационные продукты как персонализированные импланты, более эффективные системы охлаждения или авиационные и автомобильные компоненты с бионическим дизайном, ведущим к повышенной прочности и снижению веса, и другие [1,2]. В настоящее время продолжаются активные исследования и в других направлениях, таких как биопечать органов [3], строительство [4], интеграция сенсоров и электроники [5], а также производство материалов, способных менять свою форму в зависимости от внешних условий [6,7].

Конечно, возможность создавать объекты любой формы за сравнительно короткое время крайне привлекательна и для фундаментальных приложений. Так различные техники трехмерной печати уже используются в области метаматериалов [8-9], нанофотоники [10-14],

биомедицины [15-17], микрофлюидики [18-23], микрооптики [24-27], магнитного хранения данных [28] и прочих.

Среди наиболее распространенных, можно сказать, классических методов трехмерной печати в настоящее время стоит выделить FDM, SLA/DLP/CLIP, SLS, SLM, EBM, а также различные струйные (jet - струя) методы (NPJ, MJ, VJ и DOD). Несмотря на то, что эти методы вносят основной вклад в коммерциализацию АП на макроуровне, на микронном и субмикронном диапазонах они становятся неприменимы. По этой причине в последние два десятилетия, начиная с изобретения трехмерной печати методом двухфотонной полимеризации в 1997 году [29], появляются все новые и новые методы, призванные решить те или иные технологические ограничения.

АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ С МИКРОННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

Для того, чтобы ограничить круг описываемых технологий, стоит вначале конкретизировать, что именно мы понимаем под аддитивными технологиями с микронным разрешением. Во-первых, чтобы отделить аддитивные методы от 2D литографии, уточним, что под послойным добавлением материала мы понимаем случаи, когда речь идет о двух и более слоях. Также примем, что аддитивные технологии должны быть способны создавать объекты с аспектным соотношением не менее двух. Для определения геометрической свободы метода стоит учитывать способность технологии печатать нависающие структуры с углами 45 и 90° относительно нормали к рабочей плоскости, а также возможность одновременной печати отдельно стоящих структур. В то время как первое требование позволяет печатать нависающие объекты, такие как спираль, второе – печатать изолированные воксели (объемный пиксель – элементарный объем печати), что необходимо при изготовлении сложных переплетенных объектов.

При этом под аддитивными технологиями мы понимаем только одноступенчатые процессы, что исключает из рассмотрения все процессы послойного синтеза с использованием масок. В качестве примера последних может выступить LIGA (Lithography, Electroplating, and Molding), где двумерные слои, изготовленные посредством фотолитографии и последующего электроосаждения накладываются друг на друга, образуя трехмерный объект [30]. Этому же требованию не удовлетворяет многослойная мягкая литография [31-33].

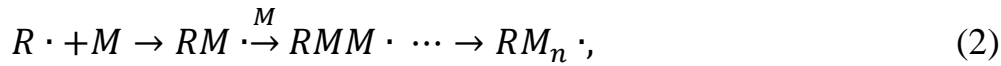
Наконец, под аддитивными технологиями микронного разрешения мы понимаем те из них, что способны создавать объекты с разрешением менее 10мкм. Последнее требование исключает из рассмотрения такие методы как локализованное электрохимическое осаждение (LECD) [34-39] и химическое осаждение из газовой фазы с помощью лазера (LA CVD) [40-43], а также традиционные SLS/SLM [44-45] (предельное разрешение данных методов приближается к десяткам микрон).

В итоге для рассмотрения остается немногим более десятка методов, которые удовлетворяют вышеперечисленным критериям (таблица 1). Описывая перечисленные методы, мы будем рассматривать: состав экспериментальной установки и принципы работы, доступную для печати геометрию, разрешение и шероховатость поверхности напечатанных объектов, используемые материалы и возможные применения.

ДВУХФОТОННАЯ ПОЛИМЕРИЗАЦИЯ

Двухфотонная полимеризация – это фотохимический процесс, инициируемый фемтосекундным лазерным пучком, сфокусированным в объеме фоторезиста с помощью объектива с большой числовой апертурой.

Процесс фотополимеризации может быть описан с помощью уравнений (1-3) [46]:



В основе метода лежит процесс двухфотонного поглощения – нелинейного процесса, при котором электрон в молекуле или атоме в результате поглощения двух фотонов внешнего излучения переходит из одного связанного состояния в другое. При этом разность энергий между состояниями электрона равна сумме энергий двух фотонов. Преимуществом данной технологии является тот факт, что, поглощая на удвоенной частоте, фотополимер остается прозрачным для основного излучения, что позволяет печатать трехмерные объекты сквозь уже напечатанные слои. Дополнительно стоит отметить, что полимеризация происходит лишь в объеме, где концентрация образовавшихся свободных радикалов превышает определенную критическую величину, связанную с наличием в объеме полимера гасителей реакции. Оптическая нелинейность в совокупности с пороговостью процесса ведут к возможности печати 3D-объектов с разрешением лучше дифракционного предела. Аспектное соотношение элементарного объема печати может варьироваться от 1:1 до 4:1 в зависимости от числовой апертуры используемого объектива и мощности излучения [47].

Наиболее распространенные схемы установки приведены на рис.1 [29,46,48]. В качестве источника излучения обычно используется титан-сапфировый лазер с перестраиваемой длиной волны от 760 до 840нм. Для перемещения луча используют либо трех осевую пьезоэлектрическую подвижку, либо одноосевую подвижку для движения вдоль оси z вместе с

двух координатным гальванометрическим зеркалом, обеспечивающим перемещением луча в плоскости $xу$. Включение-выключение засветки осуществляется с помощью акустооптического модулятора, отклоняющего луч.

Данный метод позволяет печатать полимерные объекты с разрешением до 100нм [49-55] в поперечном направлении с высоким качеством поверхности (до 2,5нм [56]), плотной внутренней структурой и полной геометрической свободой.

Альтернативным вариантом реализации технологии двух фотонной полимеризации является использование фотоувствительного раствора с ионами металла. В этом случае лазерное облучение инициирует реакцию локализованного фотохимического восстановления. Необходимые для реакции электроны обычно возбуждаются в соседствующих молекулах красителей, откуда перемещаются в область протекания реакции. Восстановление ионов металла ведет к их осаждению и росту металлических кристаллов. Данный метод в литературе носит название лазерного фотовосстановления [57]. В этом случае разрешение и качество поверхности значительно ниже (120 и 20нм соответственно), однако исследования по улучшению данных значений активно продолжаются.

Основными направлениями применения данной технологии являются микрофлюидика [18-23], биомиметика [58], нанофотоника [10-12], микрооптика [24-26] и метаматериалы [8].

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ ПЕЧАТЬ И ЭЛЕКТРОСПИННИНГ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАСПЛАВА

Электрогидродинамическая печать (EHDP) [59-61] основывается том же эффекте, что и электроспиннинг (рис.2) – расплав или раствор полимера

подается через сопло, которое находится под большим (от сотен вольт до нескольких киловольт) постоянным (или в некоторых случаях переменным) напряжением относительно проводящего, чаще всего заземленного, стола. Зарядание полимера приводит к взаимному отталкиванию внутри жидкости и, когда силы электрического взаимного отталкивания превышают силы поверхностного натяжения, жидкость формирует конус Тейлора, выстреливая в направлении подложки. По мере приближения жидкого полимера к подложке у струи развивались хаотические биения в виду электростатической неустойчивости [62-63]. Для того, чтобы адаптировать электроспиннинг для нужд трехмерной печати Сан и коллеги [64] значительно уменьшили расстояние между соплом и подложкой с нескольких сантиметров до нескольких миллиметров, а также снизили напряжение с нескольких киловольт до сотен вольт. Впоследствии было показано, что изменение скорости подачи полимера и величины прикладываемого напряжения оказывает значительное влияние на моду процесса и морфологию объектов (рис.3) [65]. В частности, было показано существование режима печати микрокапель с размерами 50нм [66].

В режиме микрокапель была продемонстрирована возможность печати полимерными чернилами с добавками золота, серебра, меди и кобальта [67-69], а также квантовыми точками [70]. При печати данным методом шероховатость поверхности составляет величину от десяти нанометров до нескольких сотен в зависимости от условий от размера капель, скорость печати – 1-10мкм/с. Стоит отметить существование у данного метода больших трудностей при печати нависающей геометрии – в качестве демонстрации возможностей были напечатаны наклонные столбы с углом к нормали до 56 градусов [67]. С печатью изолированных объектов данный метод проблем не испытывает.

Параллельно Браун предложил использовать в качестве материала термополимер, чья пониженная проводимость и повышенная вязкость позволили избежать электростатических нестабильностей [60]. Последний метод получил название электроспиннинга с использованием расплава или MEW (melt electrospinning writing). Метод печати расплавом позволил достичь разрешения до 600нм и шероховатостью 28нм [66]. Скорость печати может достигать 8см/с. Данный метод не может печатать нависающие структуры и изолированные объекты и в основном используется при печати клеточных скаффолдов.

ЛАЗЕРНАЯ ПРЯМАЯ ПЕЧАТЬ

В прямой лазерной печати концентрированные чернила с наночастицами серебра (с весовой долей 85%) выдавливаются из стеклянного сопла. На выходе чернила отжигаются пучком ИК-лазера. Схема установки представлена на рис.4. Основными компонентами являются стеклянная пипетка (обычно диаметром 1-10мкм) [71], насос, контролирующий поток чернил и подвижный стол. Сопла изготовлены из стеклянных капилляров с использованием лазерной системы, где местный нагрев под растягивающей нагрузкой приводит к конусообразному пластическому разрушению капилляра. Контроль нагрева и растяжения позволяет получать сопла требуемого размера.

Большое внимание в этой технологии уделяется изготовлению чернил с заданными вязкоупругими свойствам. Чернила должны обладать ярко выраженной псевдопластичностью, то есть уменьшением модуля сдвига на несколько порядков при приложении сдвигового напряжения (рис.4) [71]. При приложении избыточного напряжения псевдопластичная нить покидает сопло с жестким сердечником и сильно суженной жидкой оболочкой. В то время как твердое ядро обеспечивает сохранение формы,

жидкая оболочка способствует склеиванию отдельных слоев [72]. Подобный профиль «нити» позволяет печатать самоподдерживающиеся структуры, такие как арки или мосты, однако не позволяет печатать большие свободно стоящие геометрии. Последнее ограничение как раз может быть преодолено с помощью лазерного отжига на выходе из сопла. Большая разница коэффициентов теплопроводности отожженных и «сырых» чернил позволяют напечатанным элементам выступать в качестве теплоотвода, что предотвращает отжиг непосредственно на кончике сопла и, таким образом, препятствует его закупориванию. Также было показано, что, контролируя интенсивность лазерного излучения, данным методом можно печатать участки с различной проводимостью (вплоть до $5.2 \times 10^{-7} \Omega\text{м}$ без лазерного отжига или же до $5.4 \times 10^{-8} \Omega\text{м}$) [71].

Данный метод позволяет рисовать в пространстве произвольные объекты без использования поддержек с достаточно большой скоростью (до 1мм/с с использованием лазерного отжига и 200-500мкм/с – без него), достаточно высоким разрешением (до 600нм с лазерным отжигом и 2мкм – без него) и плотной микроструктурой [73]. В качестве материала в лазерной прямой печати до настоящего момента использовались только серебряные чернила. Данный метод использовался для создания гибких соединений для массива микроэлементов солнечных батарей, а также – для соединения пикселей 4x4 массива светодиодов.

ПРЯМОЙ ЛАЗЕРНО ИНДУЦИРОВАННЫЙ ТРАНСПОРТ

Техника прямого лазерно индуцированного транспорта для создания двумерных металлических структур с помощью абляции была представлена еще в 1986 году [74], однако применяться для создания трехмерных объектов стала относительно недавно [75-76]. Типичная схема экспериментальной установки приведена на рис.5 [76] и состоит из импульсного УФ-лазера, стекла с тонким слоем металла (донора) и

подложки. Обычно и стекло, и подложка помещаются на xyz-подвижный стол, в то время как лазерный луч неподвижен, однако существуют схемы, когда сканирование донора осуществляется с помощью поворотных зеркал [77]. Сфокусированное лазерное излучение проникает через стекло поглощается металлом и нагревает границу металл-стекло. Если температура на границе достаточно велика, то давление, возникшее на границе ввиду испарения различных включений стекла [78] (начиная с ОН-групп [79] и просветляющих агентов (оксида серы) [80] и, впоследствии, щелочей [81] и диоксида кремния [82] для случая натриево-известкового стекла) приводит к выбросу расплавленного металла по направлению к подложке. Расстояние между стеклом и подложкой составляет величину 10-200мкм при толщине пленки металла от двадцати до нескольких сотен нм. После печати вокселя подвижное стекло смещается в сторону, позволяя экспонировать неповрежденный участок донора для дальнейшей печати.

Данная технология способна создавать нависающие структуры с углами до 30 градусов, изолированные объекты, а также объекты одновременно из нескольких материалов [77]. Последнее позволяет печатать полые объекты путем последующего селективного плазменного травления поддерживающего материала. В то время как размеры единичных капель могут относиться к субмикронному диапазону [75], недостаточная точность в позиционировании вокселя приводит к тому, что наилучшее достигнутое в настоящий момент разрешение составляет 3мкм [76]. Шероховатость при этом составляет величину от 500нм до 2мкм, что вызвано последовательным отверждением капель и является одним из существенных недостатков данного метода. Скорость печати с помощью данной технологии определяется объемом капли и частотой её выброса. Недавно сообщалось о достижении частоты в 200Гц [76], что соответствует скорости вертикального роста в несколько десятков микрометров в секунду.

Данная технология нашла свое применение в микроэлектронике при печати соединений, а также слоистых структур проводник-изолятор [83-84].

ЛАЗЕРНОЕ ЭЛЕКТРОФОРЕТИЧЕСКОЕ ОСАЖДЕНИЕ

Данный метод заключается в оптическом удержании частиц в процессе электрофорезиса, что приводит к их осаждению в заданном объеме. Для этого лазерный пучок фокусируется в суспензии отрицательно заряженных наночастиц, а к раствору прикладывается постоянное электрическое поле стимулируя коагуляцию частиц друг с другом и последующее осаждение на положительно заряженной подложке. Перемещая лазерный луч, можно формировать объекты с заданным дизайном (рис.6-а) [85].

Схема эксперимента приведена на рис.6-б. В качестве источника излучения использовался непрерывный лазер с длиной волны 488нм и мощностью от 1.5 до 2.75мВт. Излучение фокусировалось в водный раствор с весовым содержанием 3нм-наночастиц золота 0.26%. Раствор размещался между двумя стеклами, покрытыми оксидом индия-титана (ИТО). Расстояние между электродами составляло 160мкм при напряженности электрического поля порядка 10кВ/метр. Сами электроды располагались на подвижном столе.

В виду того, что процесс печати происходит в растворе, у данного метода нет геометрических ограничений – с его помощью можно свободно печатать сложные нависающие и самопересекающиеся объекты. Тем не менее послойная печать с его помощью все еще не была продемонстрирована. Разрешение данного метода может варьироваться от 500нм до нескольких микрон и связано с примерным диаметром оптической перетяжки. Продемонстрированная скорость печати при этом составляет 670нм/с. Шероховатость поверхности авторами не измерялась, однако из фотографий сканирующей электронной микроскопии может быть оценена в

несколько десятков нм. В качестве материалов использовалось только золото, в будущем авторы планируют расширить спектр доступных материалов. Предполагается, что данный метод может быть использован при создании микро-оптики и различного рода биосборок.

МЕНИСКОВОЕ ЭЛЕКТРООСАЖДЕНИЕ

Принцип данного метода заключается в локализации процесса электроосаждения с помощью создания жидкой перетяжки (мениска) между проводящей подложкой и пипеткой, через которую подается электролит (рис.7) [86-89]. Для активации процесса электроосаждения на подложку подается отрицательный заряд, в то время как положительно заряженный электрод помещается в пипетку. Подбирая скорость перемещения пипетки таким образом, чтобы не происходило обрыва жидкого интерфейса, возможно создавать трехмерные объекты. В виду отсутствия обратной связи, авторы технологии подбирают величину скорости и скорость перемещения пипетки для того, чтобы производить печать нитью заданного диаметра.

Достижимое разрешение при печати составляет величину порядка 100нм, скорость – до 1мкм/с [88]. В качестве материалов были использованы медь и платина. После того, как авторы с помощью фокусированного ионного пучка вырезали на конце пипетки боковое отверстие, технология стала пригодна для печати нависающих структур. Тем не менее ввиду значительной сложности поддержания непрерывного жидкого интерфейса (на который оказывают влияния такие факторы как влажность окружающего воздуха, смачиваемость подложки и скорость перемещения [87-88]) между подложкой и соплом, метод все еще неприменим для печати изолированных вокселей и, как следствие, не может быть использован для печати переплетенных объектов. Тем не менее, данный метод был успешно применен при изготовлении кантилеверов с

высоким аспектным соотношением для коммерческого атомно-силового микроскопа [88], а также послужил основой для более совершенной технологии электроосаждения локально распределенных ионов в жидкости.

ЭЛЕКТРООСАЖДЕНИЕ ЛОКАЛЬНО-РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ИОНОВ В ЖИДКОСТИ

Данная технология существует в двух исполнениях – на основе полого атомно-силового (АСМ) и сканирующего ионного микроскопа. Схема установки на основе АСМ приведена на рис.8 [90]. В этой конфигурации полый зонд АСМ (FluidFM) используется в качестве локального источника ионов металлов в макрoхимической ячейке, заполненной поддерживающим электролитом. При приближении зонда к поверхности, имеющей достаточно высокий катодный потенциал, ионное восстановление приводит к электроосаждению на поверхность проводящей подложки, расположенной под соплом. Для обратной связи в данной технологии используется кантилевер АСМ. По мере электроосаждения напечатанный слой начинает задевать зонд, что можно определить по его отклонению.

В технологии электроосаждения локально-распределенных ионов в жидкости на основе сканирующего ионного микроскопа в качестве сопла используется двухканальная стеклянная пипетка (SICM) (рис.9) [91]. Один из каналов используется для доставки материала в область печати, другой – для определения по величине протекающего через него ионного тока положения сопла относительно поверхности или напечатанного объекта.

Отсутствие необходимости поддержания жидкого интерфейса, а также наличие обратной связи выгодно отличают данные подходы от предыдущего метода. Стоит отметить, что наличие обратной связи помимо прочего значительно снижает риск закупоривания канала. Описанная технология позволяют печатать как нависающие структуры, так и изолированные объекты. Одним из примеров, сочетающим в себе оба

геометрических элемента, является трехвитковая спираль, выполненная с помощью FluidFM. Разрешение FluidFM и SICM составили 800 и 400 нм соответственно для диаметров сопел 300 и 30 нм. Скорость печати при это варьируется от 20 до 100 нм/с. В качестве материалов для трехмерной печати до сих пор использовалась лишь медь, однако для двухмерной печати была продемонстрирована возможность использования также платины и медно-никелевого сплава [92].

ОСАЖДЕНИЕ ИНДУЦИРОВАННОЕ СФОКУСИРОВАННЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ИЛИ ИОННЫМ ПУЧКОМ

Печать индуцированная сфокусированным ионным или электронным пучком основана на эффекте диссоциации молекул прекурсоров под воздействием пучка заряженных частиц и их последующем осаждении на поверхность подложки. Стоит отметить, что взаимодействие между пучком и прекурсором главным образом косвенно. Попадание пучка высоких энергий на подложку создает вторичные электроны малой энергии, которые в свою очередь приводят к диссоциации и последующему осаждению нелетучих соединений. Схема установки приведена на рис.10 [102]. В случае использования электронного пучка установка состоит из растрового электронного микроскопа и системы подачи газа, в случае ионного – обычно установка содержит наравне с электронной колонной и системой подачи газа также и источник ионов. Помимо этого, разрабатываются системы с несколькими электронными колоннами [93-95].

Печать с помощью сфокусированного электронного или ионного пучка может осуществляться как на проводящей, так и диэлектрической поверхности с наилучшим среди всех существующих методов трехмерной печати разрешением - менее 10 нм [96-97]. Скорость печати составляет обычно несколько десятков нм/с, однако для некоторых структур может быть существенно выше (200 нм/с) [97-100]. В качестве материалов для

печати могут быть использованы как металлы, полупроводники так и органические структуры [101-102]. Несмотря на отсутствие у данной технологии обратной связи, благодаря разработанному программному обеспечению, способного с точностью до 10нм моделировать дизайн финального объекта, возможна печать достаточно сложных объектов (рис.9) [103]. Среди применений технологии можно выделить нанолитография, метаматериалы, фотонные кристаллы, восстановление литографических масок, магнитное хранение данных, наномасштабные тензодатчики и газовые сенсоры.

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Направление аддитивных технологий с микронным разрешением переживает бурный рост в последнее десятилетие. Большая часть существующих экспериментальных методов была разработана за последние пять лет и есть все основания предполагать, что данный процесс будет продолжаться и в будущем. Данные технологии позволяют создавать сложные трехмерные объекты с размерами от 100нм до нескольких миллиметров и разрешением до 10нм, используя широкий класс материалов (полимеры, композиты, металлы, диэлектрики). Наличие у многих методов механизма обратной связи или высокоточного программного обеспечения позволяет изготавливать объекты с заданной точностью, а также значительно снижает количество брака. Развитие существующих методов направлено на освоение новых материалов (в том числе на одновременную печать несколькими материалами), ускорения (часто за счет распараллеливания) процесса, улучшения разрешения и качества поверхности, а также печати новых более сложных структур.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Additive Manufacturing Technologies /I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker // Springer – 2015 – 2nd edition, New York.
- [2] Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints / M. K. Thompson, G. Moroni, T. Vaneker et al. // CIRP Annals - Manufacturing Technology – 2016 – Vol. 65 P. 737.
- [3] A 3D bioprinting system to produce human-scale tissue constructs with structural integrity / H.-W. Kang, S. J. Lee, I. K. Ko, C. Kengla, J. J. Yoo, A. Atala // Nat. Biotechnol. – 2016 – Vol. 34, P. 312.
- [4] Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing / F. Bos, R. Wolfs, Z. Ahmed, T. Salet // Virtual Phys. Prototyp. – 2016 – Vol. 11, P. 209.
- [5] A Review on Electromechanical Devices Fabricated by Additive Manufacturing / J. O'Donnell, M. Kim, H.-S. Yoon // J. Manuf. Sci. Eng. – 2016 – Vol. 139, P. 10801.
- [6] Biomimetic 4D printing / A. Sydney Gladman, E. A. Matsumoto, R. G. Nuzzo, L. Mahadevan, J. A. Lewis // Nat. Mater. – 2016 – Vol. 15, P. 413.
- [7] Additive manufacturing of biologically-inspired materials / A. R. Studart // Chem. Soc. Rev. – 2016 – Vol. 45, P. 359
- [8] Fabrication of optical negative-index metamaterials: recent advances and outlook / A. Boltasseva and V. M. Shalaev // Metamaterials – 2008 – Vol. 2, P. 1-17.
- [9] Three-dimensional nanohelices for chiral photonics / V. Tasco, M. Esposito, F. Todisco, A. Benedetti, M. Cuscunà, D. Sanvitto, A. Passaseo // Appl. Phys. A – 2016 – Vol. 122, P. 280
- [10] Nanoscale 3D Chiral Plasmonic Helices with Circular Dichroism at Visible Frequencies / M. Esposito et al. // ACS Photonics – 2014 – Vol. 17.

- [11] Femtosecond laser-induced two-photon polymerization of inorganic–organic hybrid materials for applications in photonics / J. Serbin, A. Egbert, A. Ostendorf, B. Chichkov et.al. // *Optics letters* – 2003 – Vol. 28, P. 301-303.
- [12] Submicron diamond-lattice photonic crystals produced by two-photon laser nanofabrication / K. Kaneko, H.-B. Sun, X.-M. Duan, and S. Kawata // *Applied Physics Letters* – 2003 – Vol. 83, P. 2091.
- [13] Fabrication of woodpile structures by two-photon polymerization and investigation of their optical properties / J. Serbin, A. Ovsianikov, and B. Chichkov // *Optics express* – 2004 – Vol. 12, P. 5221-5228.
- [14] Two-dimensional photonic crystals produced by additive nanolithography with electron beam-induced deposition act as filters in the infrared / H. W. P. Koops, O. E. Hoinkis, M. E. W. Honsberg et al // *Microelectron. Eng.* – 2001 – Vol. 57–8, P. 995.
- [15] Two Photon Polymerization of Polymer–Ceramic Hybrid Materials for Transdermal Drug Delivery / A. Ovsianikov, B. Chichkov, P. Mente et al. // *International journal of applied ceramic technology* – 2007 – Vol. 4, P. 22-29.
- [16] Two-photon polymerization technique for microfabrication of CAD-designed 3D scaffolds from commercially available photosensitive materials / A. Ovsianikov, S. Schlie, A. Ngezahayo, A. Haverich, and B. N. Chichkov // *Journal of tissue engineering and regenerative medicine* – 2007 – Vol. 1, P. 443-449.
- [17] Two-component polymer scaffolds for controlled three-dimensional cell culture / F. Klein, B. Richter, T. Striebel et al. // *Advanced materials* – 2011 – Vol. 23, P. 1341-1345.
- [18] Femtosecond laser rapid prototyping of nanoshells and suspending components towards microfluidic devices / D. Wu, Q.-D. Chen, L.-G. Niu et al. // *Lab on a chip* – 2009 – Vol. 9, P. 2391-2394.

- [19] Rotation of microscopic propellers in laser tweezers / P. Galajda and P. Ormos // *Journal of Optics B: Quantum and Semiclassical Optics* – 2002 – Vol. 4, P. S78.
- [20] On the design and fabrication by two-photon polymerization of a readily assembled micro-valve / C. Schizas, V. Melissinaki, A. Gaidukeviciute et al. // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* – 2010 – Vol. 48, P. 435-441.
- [21] Integrated three-dimensional filter separates nanoscale from microscale elements in a microfluidic chip / L. Amato, Y. Gu, N. Bellini et al. // *Lab on a chip* – 2012 – Vol. 12, P. 1135-1142.
- [22] Optically driven micropump produced by three-dimensional two-photon microfabrication / S. Maruo and H. Inoue // *Applied Physics Letters* – 2006 – Vol. 89, P. 144101-144103.
- [23] Optically driven micropump with a twin spiral microrotor / S. Maruo, A. Takaura, and Y. Saito // *Optics express* – 2009 – Vol. 17, P. 18525-18532
- [24] Micro lens fabrication by means of femtosecond two photon photopolymerization / R. Guo, S. Xiao, X. Zhai, J et al. // *Optics express* – 2006 – Vol. 14, P. 810-816.
- [25] A femtosecond laser-induced two-photon photopolymerization technique for structuring microlenses / M. Malinauskas, H. Gilbergs, A. Žukauskas // *Journal of optics* – 2010 – Vol. 12, 035204.
- [26] Femtosecond laser polymerization of hybrid/integrated micro-optical elements and their characterization / M. Malinauskas, A. Žukauskas, V. Purlys et al. // *Journal of Optics* – 2010 – Vol. 12, P. 124010.
- [27] High numerical aperture microlens arrays of close packing / D.Wu, S.-Z.Wu, L.-G. Niu et al. // *Applied Physics Letters* – 2010 – Vol. 97, P. 031109.

- [28] Synthesis of Individually Tuned Nanomagnets for Nanomagnet Logic by Direct Write Focused Electron Beam Induced Deposition / E. Bertagnolli // ACS Nano - 2012, online version.
- [29] Three-dimensional microfabrication with two-photon-absorbed photopolymerization / S. Maruo, O. Nakamura, and S. Kawata // Opt. Lett. – 1997 - Vol. 22, P. 132–134.
- [30] LIGA and Its Applications / V. Saile, U. Wallrabe, O. Tabata, J. G. Korvink // Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA – 2008 – Weinheim, Germany.
- [31] Gold helix photonic metamaterial as broadband circular polarizer / J. K. Gansel, M. Thiel, M. S. Rill // Science – 2009 – Vol. 325, P. 1513.
- [32] Hybrid helical magnetic microrobots obtained by 3D template-assisted electrodeposition / M. A. Zeeshan, R. Grisch, E. Pellicer et al. // Small – 2014 – Vol. 10, P. 1284.
- [33] Ultra-strong architected Cu meso-lattices / X. Wendy Gu, J. R. Greer // Extrem. Mech. Lett. – 2015 – Vol 2, P. 7.
- [34] High resolution 3D microstructures made by localized electrochemical deposition of nickel / A. Jansson, G. Thornell, S. Johansson // J. Electrochem. Soc. – 2000 – Vol. 147, P. 1810.
- [35] Three-dimensional microfabrication by localized electrochemical deposition / J. D. Madden, I. W. Hunter // J. Microelectromech. Syst. – 1996 – Vol. 5, P. 24.
- [36] Microfabrication by localized electrochemical deposition: experimental investigation and theoretical modelling / R. A. Said // Nanotechnol. – 2004 – Vol. 15, P. 867.
- [37] Localized Electrochemical Deposition of Copper Monitored Using Real-Time X-ray Microradiography / S.-K. Seol, A.-R. Pyun, Y. Hwu et al. // Adv.Funct. Mater. – 2005 – Vol. 15, P. 934.

- [38] Localized electrochemical deposition of micrometer copper columns by pulse plating / J. C. Lin, T. K. Chang, J. H. Yang et al. // *Electrochim. Acta* – 2010 – Vol. 55, P. 1888.
- [39] Fabrication of 3D Microstructure by Localized Electrochemical Deposition with Image Feedback Distance Control and Five-Axis Motion Platform / Y. Ciou, Y. Hwang, J. Lin, Y. Tseng, // *ECS J. Solid State Sci. Technol.* – 2016 – Vol. 5, P. 425.
- [40] Laser rapid prototyping of photonic microstructures / M. C. Wanke, O. Lehmann, K. Müller, Q. Wen, M. Stuke // *Science* – 1997 – Vol. 275, P. 1284.
- [41] Laser chemical vapour deposition: Materials, modelling, and process control / C. Duty, D. Jean, W. J. Lackey // *Int. Mater. Rev.* – 2001 – Vol. 46, P. 271.
- [42] Growth of normally-immiscible materials (NIMs), binary alloys, and metallic fibers by hyperbaric laser chemical vapor deposition / J. L. Maxwell, M. R. Black, C. A. Chavez et al. // *Appl. Phys. A* – 2008 – Vol. 91, P. 507.
- [43] *Laser Processing and Chemistry* / D. Bäuerle // Springer – 2011 – 4th edition, Berlin Heidelberg.
- [44] Laser micro sintering: a new method to generate metal and ceramic parts of high resolution with sub-micrometer powder / H. Exner, M. Horn, A. Streek // *Virtual Phys. Prototyp.* – 2008 – Vol. 3, P. 3.
- [45] A review on 3D micro-additive manufacturing technologies / M. Vaezi, H. Seitz, S. Yang // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* – 2013, - Vol. 67, P. 1721.
- [46] A review on the processing accuracy of two-photon polymerization / X. Zhou, Y. Hou, and J. Lin // *AIP Adv.* – 2015 – Vol. 5.

- [47] Voxel shapes in two-photon microfabrication / R. J. DeVoe, H. Kalweit, C. A. Leatherdale, and T. R. Williams // P Soc Photo-Opt Ins – 2003 – Vol. 4797, P. 310-316.
- [48] Contour offset algorithm (COA) in nano replication printing (nRP) for fabricating nano-precision features / T. W. Lim et al. // Microelectronic Engineering – 2005 – Vol. 77, P. 382
- [49] Three-dimensional optical laser lithography beyond the diffraction limit / J. Fischer, M. Wegener // Laser Photon. Rev. – 2013 – Vol. 7, P. 22.
- [50] Finer features for functional microdevices / S. Kawata, H. B. Sun, T. Tanaka, and K. Takada // Nature – 2001 – Vol. 412, P. 697-698.
- [51] Femtosecond laser-induced two-photon polymerization of inorganic–organic hybrid materials for applications in photonics / J. Serbin, A. Egbert, A. Ostendorf, B. Chichkov et.al. // Optics letters – 2003 – Vol. 28, P. 301-303.
- [52] Two photon induced polymerization of organic-inorganic hybrid biomaterials for microstructured medical devices / A. Doraiswamy, C. Jin, R. J. Narayan // Acta biomaterialia – 2006 – Vol. 2, P. 267-275.
- [53] Two Photon Polymerization of Polymer–Ceramic Hybrid Materials for Transdermal Drug Delivery / A. Ovsianikov, B. Chichkov, P. Mente et al. // International journal of applied ceramic technology – 2007 – Vol. 4, P. 22-29.
- [54] Three-dimensional fabrication of metallic nanostructures over large areas by two-photon polymerization / F. Formanek, N. Takeyasu, T. Tanaka et al. // Optics express – 2006 – Vol. 14, P. 800-809.
- [55] Development of functional sub-100 nm structures with 3D two-photon polymerization technique and optical methods for characterization/ V. F. Paz, M. Emons, K. Obata et al. // Journal of Laser Applications – 2010 – Vol. 24, P. 042004.

- [56] High numerical aperture microlens arrays of close packing / D.Wu, S.-Z.Wu, L.-G. Niu et al. // *Applied Physics Letters* – 2010 – Vol. 97, P. 031109.
- [57] 3D metallic nanostructure fabrication by surfactant-assisted multiphoton-induced reduction / Y. Y. Cao, N. Takeyasu, T. Tanaka et al. // *Small* – 2009 – Vol. 5, P. 1144–1148.
- [58] Three-Dimensional Biomimetic Patterning in Hydrogels to Guide Cellular Organization / P. Kang, M. Liao, M. R. Wester et al. // *Adv. Mater.* – 2012 – Vol. 24, P. 2344–2348.
- [59] Micro/nanoscale electrohydrodynamic printing: from 2D to 3D / B. Zhang, J. He, X. Li, F. Xu, and D. Li // *Nanoscale* – 2016 – Vol. 8, P. 15376–15388.
- [60] Direct writing by way of melt electrospinning / T. D. Brown, P. D. Dalton, and D. W. Hutmacher // *Adv. Mater.* – 2011 – Vol. 23, P. 5651–5657.
- [61] Structuring of micro line conductor using electro-hydrodynamic printing of a silver nanoparticle suspension / D. Y. Lee, E. S. Hwang, T. U. Yu et al. // *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.* – 2006 – Vol. 82, P. 671–674.
- [62] Electrospinning: A whipping fluid jet generates submicron polymer fibers / Y. M. Shin, M. M. Hohman, M. P. Brenner, G. C. Rutledge // *Appl. Phys. Lett.* – 2001 Vol. 78, P.1149.
- [63] Bending instability of electrically charged liquid jets of polymer solutions in electrospinning / D. H. Reneker, A. L. Yarin, H. Fong, S. Koombhongse // *J. Appl. Phys.* – 2000 – Vol. 87, P. 4531.
- [64] Near-Field Electrospinning / S. DaoHeng et al. // *Nano Lett* – 2006 – Vol. 6, P. 839-842.
- [65] Breakup of electrified jets / R. T. Collins, M. T. Harris and O. A. Basaran // *J. Fluid. Mech.* – 2007 – Vol. 588, P. 75-129.

- [66] Additive manufacturing of scaffolds with sub-micron filaments via melt electrospinning writing / Gernot Hochleitner, Tomasz Jüngst, Toby D Brown // *Biofabrication* – 2015 – Vol. 7, P. 035002
- [67] Direct printing of nanostructures by electrostatic autofocussing of ink nanodroplets / P. Galliker, J. Schneider, H. Eghlidi et al. // *Nat. Commun.* – 2012 – Vol. 3, P. 890.
- [68] Electrohydrodynamic NanoDrip Printing of High Aspect Ratio Metal Grid Transparent Electrodes / J. Schneider, P. Rohner, D. Thureja et al. // *Adv. Funct. Mater.* – 2016 – Vol. 26, P. 833-840.
- [69] High-Resolution Printing of 3D Structures Using an Electrohydrodynamic Inkjet with Multiple Functional Inks / B. W. An, K. Kim, H. Lee et al. // *Adv. Mater.* – 2015 – Vol. 27, P. 4322-4328.
- [70] High-resolution patterns of quantum dots formed by electrohydrodynamic jet printing for light-emitting diodes / B. H. Kim, M. S. Onses, J. B. Lim et al. // *Nano Lett* – 2015 – Vol. 15, P. 969-973.
- [71] Omnidirectional printing of flexible, stretchable, and spanning silver microelectrodes / B. Y. Ahn, E. B. Duoss, M. J. Motala // *Science* – 2009 – Vol. 323, P. 1590.
- [72] Direct Ink Writing of Three-Dimensional Ceramic Structures / J. A. Lewis, J. E. Smay, J. Stuecker, J. Cesarano // *J. Am. Ceram. Soc.* – 2006 – Vol. 89, P. 3599.
- [73] Laser-assisted direct ink writing of planar and 3D metal architectures / M. A. Skylar-Scott, S. Gunasekaran, J. A. Lewis // *Proc. Natl. Acad. Sci.* – 2016 – Vol. 113, P. 6137.
- [74] Metal deposition from a supported metal film using an excimer laser / J. Bohandy, B. F. Kim, and F. J. Adrian // *J. Appl. Phys.* – 1986 – Vol. 60, P. 1538.

- [75] Laser fabrication of 2D and 3D metal nanoparticle structures and arrays / A. I. Kuznetsov, R. Kiyan, B. N. Chichkov // *Opt. Express* – 2010 – Vol. 18, P. 21198.
- [76] Laser 3D Micro Manufacturing / A. Piqué, R. C. Y. Auyeung, H. Kim, N. A. Charipar, and S. A. Mathews // *J. Phys. D. Appl. Phys.* – 2016 – Vol. 49, P. 223001.
- [77] You have free access to this content Laser Transfer: Laser Transfer of Metals and Metal Alloys for Digital Microfabrication of 3D Objects / M. Zenou, A. Sa'ar, Z. Kotler // *Small* – 2015 – Vol. 11, P. 4082.
- [78] Physical model for the laser induced forward transfer process / T. C. Röder and J. R. Köhler // *Appl. Phys. Lett.* – 2012 – Vol. 100.
- [79] Fictive temperature dependence of subcritical crack growth rate of normal glass and anomalous glass / A. Koike and M. J. Tomozawa // *Non-Cryst. Solids* – 2006 – Vol. 352, P. 5522.
- [80] Sulfate decomposition and sodium oxide activity in soda-limesilica glass melts / R. G. C. Beerkens // *J. Am. Ceram. Soc.* – 2003 – Vol. 86, P. 1893.
- [81] Differences between surface and bulk properties of glass melts. ... and influence of volatilization on composition and other physical properties / A. Kucuk, A. G. Clare, and L. E. Jones // *J. Non-Cryst. Solids* – 2000 – Vol. 261, P. 28.
- [82] The high-temperature oxidation, reduction, and volatilization reactions of silicon and silicon carbide / E. A. Gulbransen and S. A. Jansson // *Oxid. Met.* – 1972 – Vol. 4, P. 181.
- [83] Three-dimensional printing of interconnects by laser direct-write of silver nanopastes / H Kim, M Duocastella, N A Charipar et al. // *Appl. Phys. A: Mater. Sci. Process.* – 2013 – Vol. 113.

- [84] Three-dimensional printing of interconnects by laser direct-write of silver nanopastes / J Wang, R Auyeung, H Kim et al. // *Adv. Mater.* – 2010 – Vol. 22 P. 4462–6.
- [85] Three-dimensional microfabrication using local electrophoresis deposition and a laser trapping technique / T. Takai, H. Nakao, and F. Iwata // *Opt. Express* – 2014 – Vol. 22, P. 28109.
- [86] Probe-based electrochemical fabrication of freestanding Cu nanowire array / A. P. Suryavanshi, M.-F. Yu // *Appl. Phys. Lett.* – 2006 – Vol. 88, P. 83103.
- [87] Electrochemical fountain pen nanofabrication of vertically grown platinum nanowires / A. P. Suryavanshi, M.-F. Yu // *Nanotechnol.* – 2007 – Vol. 18, P. 105305.
- [88] Multi-physics simulation of metal printing at micro/nanoscale using meniscus-confined electrodeposition: Effect of environmental humidity / J. Hu, M.-F. Yu // *Science* – 2010 – Vol. 329, P. 313.
- [89] Electrodeposition-based 3D Printing of Metallic Microarchitectures with Controlled Internal Structures / S. K. Seol, D. Kim, S. Lee // *Small* – 2015 – Vol. 11, P. 3896.
- [90] Local surface modification via confined electrochemical deposition with FluidFM / L. Hirt et al. // *RSC Adv.* – 2015 – Vol. 5, P. 84517–84522.
- [91] Write-Read 3D Patterning with a Dual-Channel Nanopipette / D. Momotenko, A. Page, M. Adobes-Vidal, P. R. Unwin // *ACS Nano* – 2016 – Vol. 10, P. 8871.
- [92] Mechanism for the photoreduction of poly(vinylpyrrolidone) to HAuCl₄ and the dominating saturable absorption of Au colloids / G. Fan, Y. Han, S. Luo et al. // *Phys. Chem. Chem. Phys.* – 2016 – Vol. 18, P. 8993

- [93] Throughput enhancement technique for MAPPER maskless lithography / M. J. Wieland, H. Derks, H. Gupta et al. // Proc. SPIE 7637 Altern. Lithogr. Technol. II – 2010 – P. 76371Z.
- [94] Multibeam scanning electron microscope: Experimental results / A. Mohammadi-Gheidari, C. W. Hagen, P. Kruit // J. Vac. Sci. Technol. B Microelectron. Nanom. Struct. – 2010 – Vol. 28, P. C6G5.
- [95] Parallel electron-beam-induced deposition using a multi-beam scanning electron microscope / P. C. Post, A. Mohammadi-Gheidari, C. W. Hagen, P. Kruit // J. Vac. Sci. Technol. B Microelectron. Nanom. Struct. – 2011- Vol. 29, P. 06F310.
- [96] Application of transmission electron microscopes to nanometre-sized fabrication by means of electron beam-induced deposition / M. Shimojo, K. Mitsuishi, M. Tanaka, M. Han, K. Furuya // J. Microsc. – 2004 – Vol. 214, P. 76.
- [97] Approaching the Resolution Limit of Nanometer-Scale Electron Beam-Induced Deposition / W. F. Van Dorp, B. Van Someren, C. W. Hagen et al. // Nano Lett. – 2005 – Vol. 5, P. 1303.
- [98] Focused electron beam induced deposition of gold / P. Hoffmann, I. Utke, F. Cicoira et al. // J. Vac. Sci. Technol. B Microelectron. Nanom. Struct. – 2000 – Vol. 18, P. 3168.
- [99] Periodic structure formation by focused electron-beam-induced deposition / T. Bret, I. Utke, C. Gaillard, P. Hoffmann // J. Vac. Sci. Technol. B Microelectron. Nanom. Struct. – 2004 – Vol. 22, 2504.
- [100] Electron range effects in focused electron beam induced deposition of 3D nanostructures / T. Bret, I. Utke, P. Hoffmann, M. Abourida et al. // Microelectron. Eng. – 2006 – Vol. 83, P. 1482
- [101] Creating pure nanostructures from electron-beam-induced deposition using purification techniques: a technology perspective / A. Botman, J. J. L. Mulders, C. W. Hagen // Nanotechnol. – 2009 – Vol. 20, P. 372001

- [102] Additive Manufacturing of Metal Structures at the Micrometer Scale / L. Hirt, A. Reiser, R. Spolenak, and T. Zambelli // *Adv. Mater.* – 2017 – Vol. 201604211, P. 1604211.
- [103] Simulation-Guided 3D Nanomanufacturing via Focused Electron Beam Induced Deposition / J. D. Fowlkes, R. Winkler, B. B. Lewis et al. // *ACS Nano* – 2016, online version.

Таблица 1. Основные аддитивные технологии с микронным разрешением и их свойства.

Название технологии	материалы	рабочая область	разрешение	шероховатость	скорость
Двухфотонная полимеризация (2PP)	полимеры	xyz: 2мм;	100нм [1-6]	4нм [15]	1-100мкм/с
Лазерное фотовосстановление	Металлы и композиты Ag, Au, Cu; Ag в PVK; Ag в PSS; Au и Cu в PMMA	xy: единицы мм; z: десятки мкм в зависимости от материала	180нм [7]	20нм	1-100мкм/с
Электрогидродинамическая печать (EHD)	Au, Ag, Cu, Co в полимерной матрице; воск	xy: мм; z: десятки мкм в зависимости от проводимости	55нм [8]	10нм	1-10мкм/с
Электроспиннинг с использованием расплава (MEW)	PCL, POx, PLA	xy: см; z: 1мм (50 слоев)	600нм [9]	28нм [9]	до 5м/мин [10]
Лазерная прямая печать (LA DIW)	Металл содержащие чернила	xy: мм; z: мм	600нм [11]	~100нм [11]	0.5-2мм/с
Прямой лазерно индуцированный транспорт (LIFT)	Металлы Cu, Ag, V, Cr, Ti, Ge, Sn, W, Pd, Al, Au, Ni, Zn, Pt, Au-Sn, Ge-Sn [12]	xyz: мм	xy: 3мкм [14] z: 1мкм	0.5-2мкм	200Гц частота выброса капель
Лазерное электрофоретическое осаждение	Au, другие металлы возможны	xyz: зависит от оптических свойств суспензии	более 500нм	100нм	менее 670нм/с
Гальванизация локально распределенных ионов в жидкости (FluidFM/SICM)	Cu, Pt, Ni	xyz: без видимых ограничений	более 400нм	сотни нм	20-500нм/с
Менисковое электроосаждение	Cu, Pt, Ag	xyz: без видимых ограничений	100нм	~10нм	менее 1мкм/с
Осаждение индуцированное сфокусированным электронным или ионным пучком	Al, Au, Co, Cr, Cu, Fe, Ga, Ge, Ir, Mn, Mo, Ni, Os, Pb, Pd, Pt, Rh, Ru, Si, Sn, Ti, W, Pt-Si, Co-Si, Co-Pt, Fe-Si	xyz: область сканирования – обычно десятки мкм	10нм	2нм	0,5-200нм/с

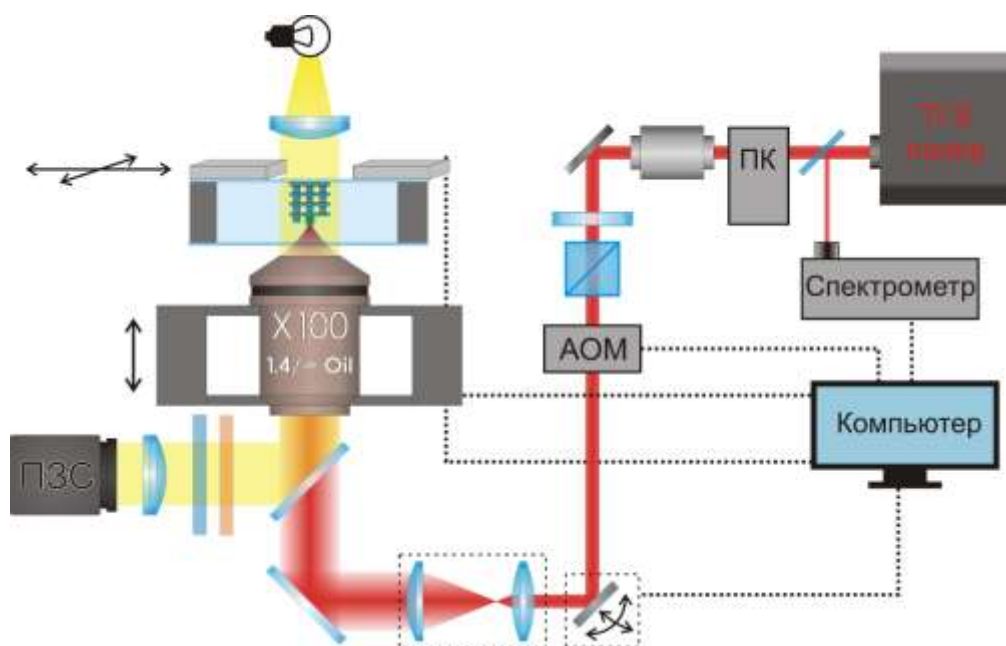


Рис.1. Схема экспериментальной установки для печати объектов методом двухфотонной полимеризации.

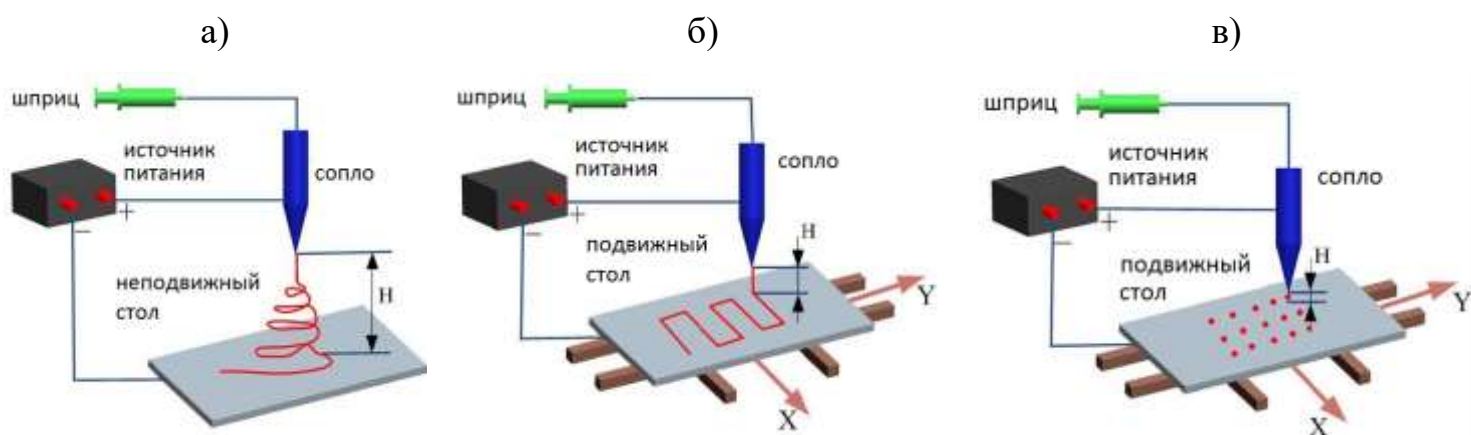


Рис.2. Схема экспериментальной установки для печати объектов методом электродинамической печати и основные режимы работы устройства: а) традиционный электроспиннинг, расстояние между соплом и подложкой (H) варьируется от нескольких до десятков см; б) EHDP в непрерывном режиме (H от 500мкм до 3мм); в) EHDP в режиме микрокапель.

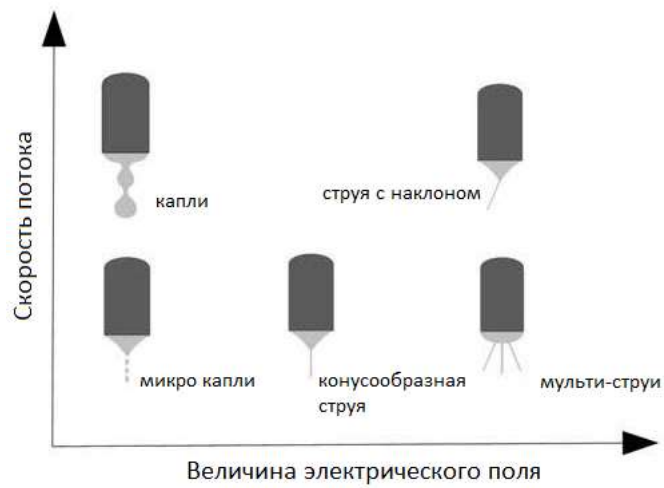


Рис.3. Режимы электрогидродинамической печати в зависимости от скорости потока и величины электрического поля.

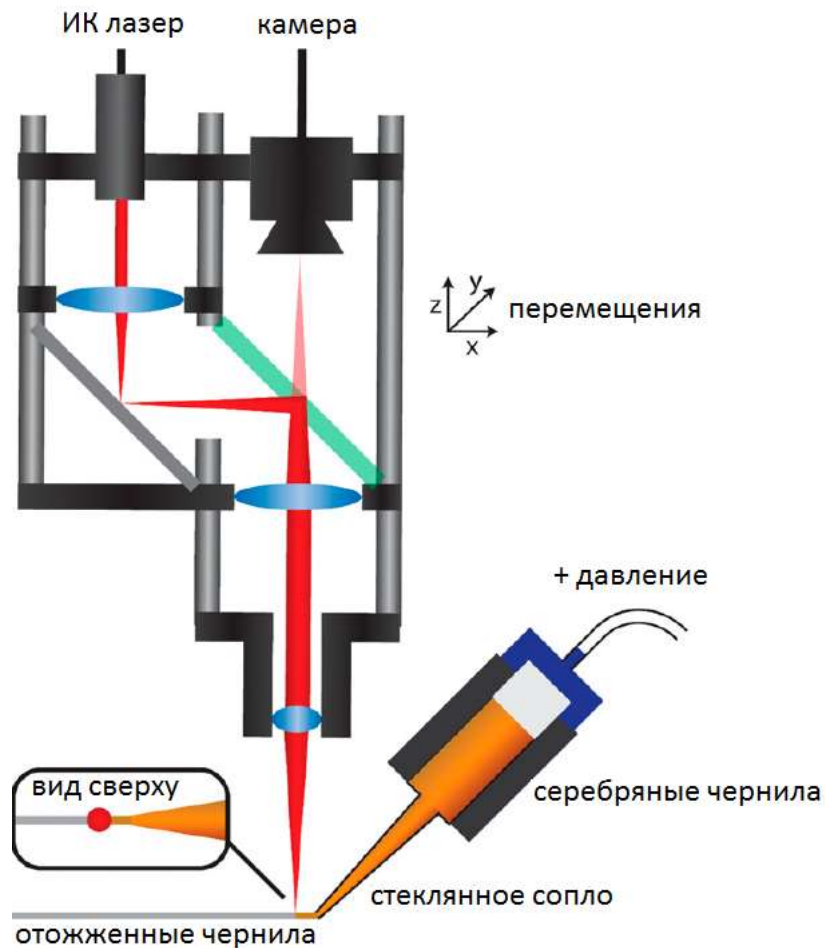


Рис.4. Схема установки прямой лазерной печати.

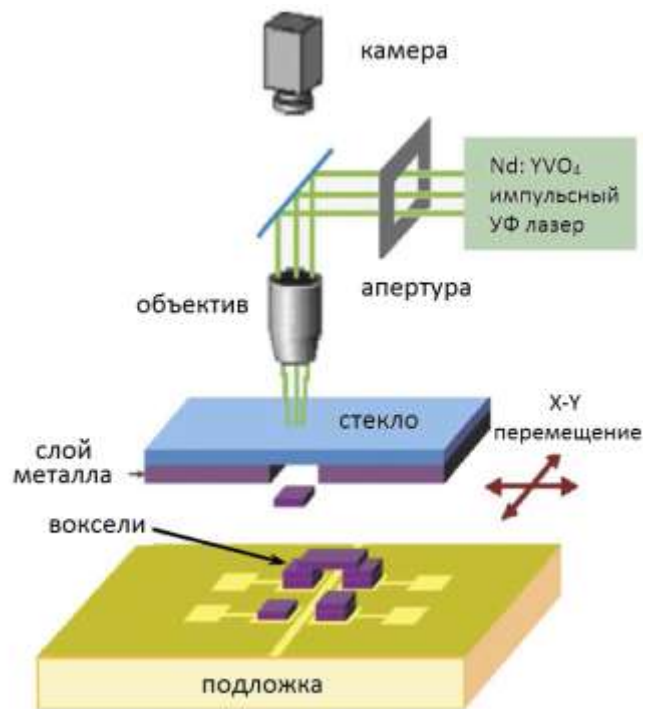


Рис.5. Схема экспериментальной установки для печати объектов методом прямого лазерно индуцированного транспорта.

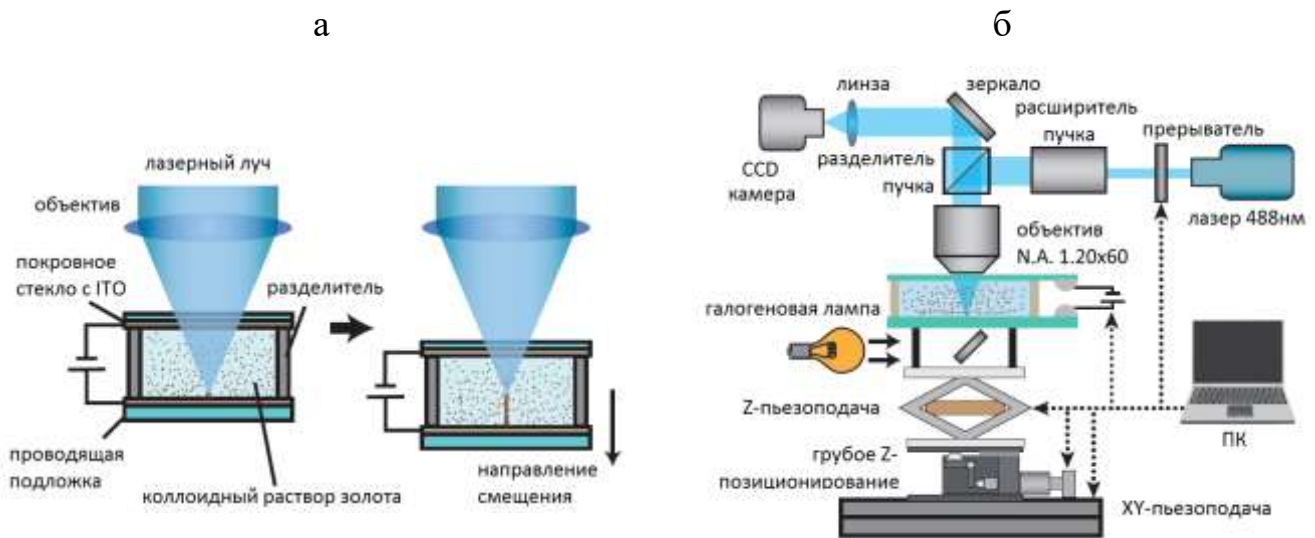


Рис.6. Принцип работы (а) и схема установки (б) для печати методом лазерного электрофоретического осаждения.

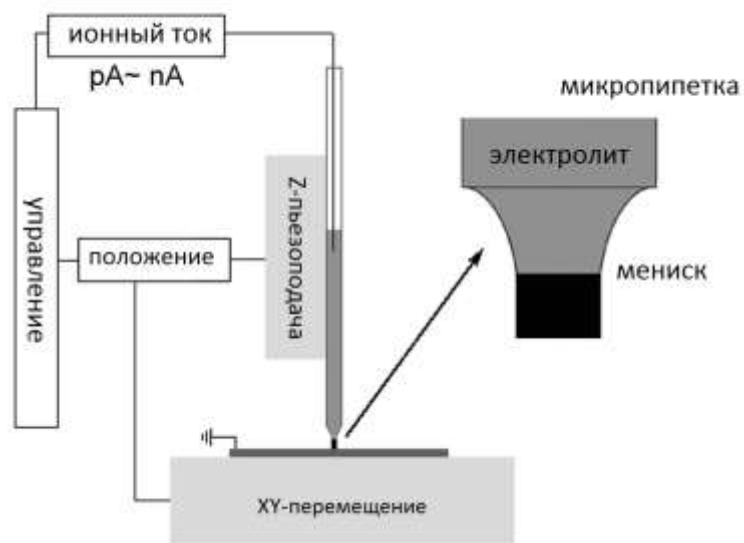


Рис.7. Схема установки для печати методом менискового осаждения.

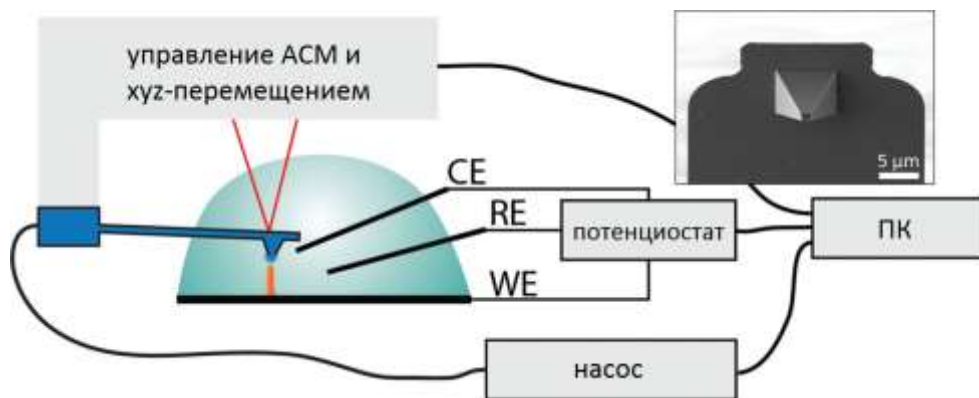


Рис.8 Схема установки для печати методом FluidFM. WE – первичный электрод, CE – вторичный электрод, RE – опорный электрод.

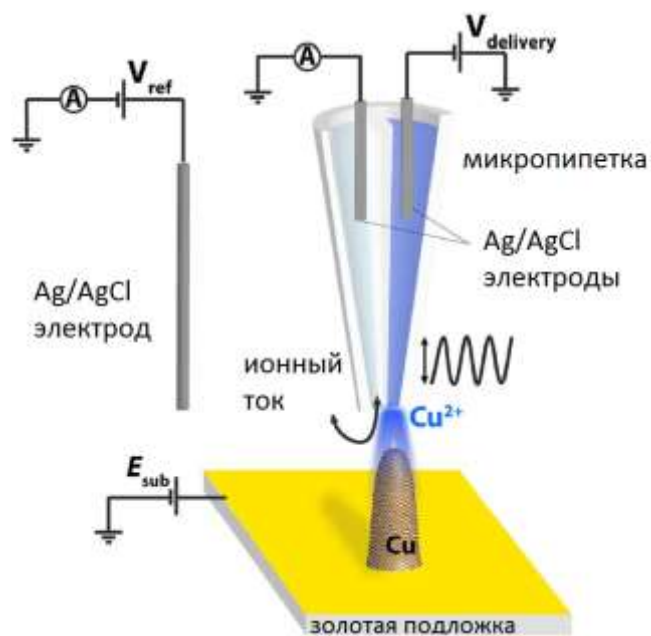


Рис.9. Схема установки для печати методом SICM.

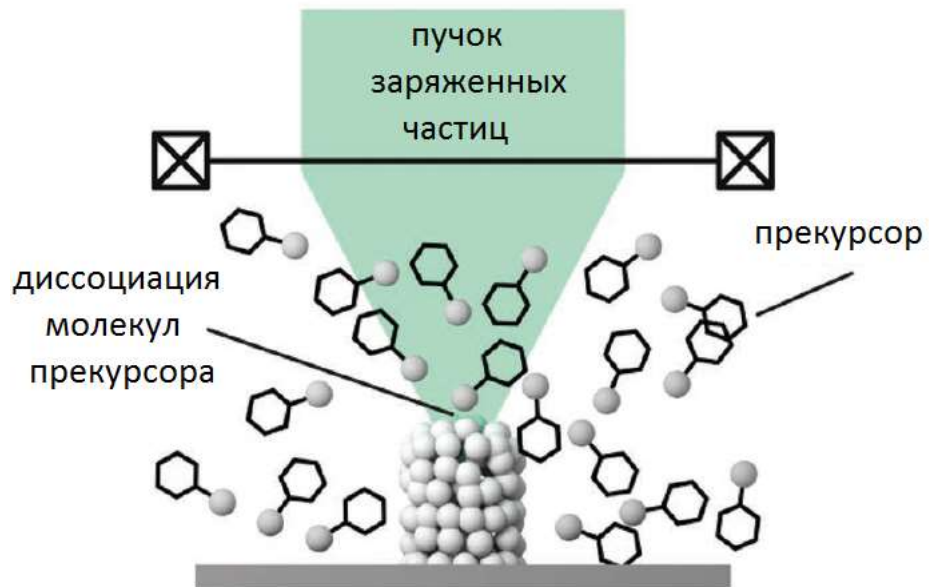


Рис. 10. Схема установки для печати методом осаждения, индуцированного сфокусированным электронным или ионным пучком.