

3D-печать в электронике

Н. Толочко, д. ф.-м. н.¹, В. Ланин, д. т. н.²

УДК 621.382 | ВАК 05.27.06

Технологии 3D-печати находят применение в самых разных областях техники. С 1990-х годов их начали применять при изготовлении электронных устройств. Особенно заметное ускорение темпов распространения технологий 3D-печати в электронике наблюдается в последние 5–10 лет. В данной статье кратко рассматриваются разнообразные виды технологий 3D-печати, применяемые в электронике, и электронные устройства либо их отдельные компоненты, изготавливаемые с помощью этих технологий.

Технологии 3D-печати (аддитивные технологии) обладают уникальными возможностями быстро создавать изделия сложных форм, которые трудно или невозможно изготовить, применяя другие традиционные технологии. Особенность 3D-печати состоит в том, что процесс создания изделий происходит путем послойного построения непосредственно по их компьютерным 3D-моделям.

Большинство известных технологий 3D-печати возникли на рубеже 1980–90-х годов. В дальнейшем они постоянно совершенствовались; в основном их развитие шло по пути разработки 3D-принтеров с улучшенными техническими характеристиками и расширения спектра используемых для печати строительных материалов. В последние годы появился ряд новых технологий 3D-печати, и на сегодняшний день известно уже несколько десятков их разновидностей **3D-печати**, различающихся особенностями реализации процессов построения изделий, характеристиками 3D-принтеров, свойствами строительных материалов. Кроме того, они различаются фирменными названиями.

РАЗНОВИДНОСТИ ТЕХНОЛОГИЙ 3D-ПЕЧАТИ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ЭЛЕКТРОНИКЕ

В электронике применяются в основном классические технологии 3D-печати, которые, появившись в 1980–90-е годы, к настоящему времени достигли довольно высокой степени развития. К ним относятся следующие технологии (через слэш указаны используемые варианты их названий, в круглых скобках – процессы их реализации) [1]:

- Inkjet Printing, IJP/Multi-Jet Modeling, MJM/Poly-Jet («чернила» в виде жидкого фотополимера или расплавленного термопластичного полимера либо в виде суспензии впрыскиваются через сопло в место построения, где фотополимер и термопластичный

полимер, соответственно, отверждаются при облучении УФ-лампой или охлаждении, а твердые частицы суспензии агломерируются);

- Direct Ink Writing, DIW/Robocasting («чернила» в виде пастообразной суспензии выдавливаются из экструдера в место построения, где твердые частицы суспензии агломерируются);
- Binder Jetting, BJ/Binder Jet Printing, BJP/Powder Bed and Inkjet Printing/Drop-on-Powder Printing/3D-Printing, 3DP/Voxeljet (жидкое связующее впрыскивается через сопло на порошковый слой в место построения, где связывает частицы порошка);
- Fused Deposition Modeling, FDM/Fused Filament Fabrication, FFF (волокно из термопластичного полимера протягивается через подогреваемый экструдер, где расплавляется, а затем подается в место построения, где отверждается при охлаждении);
- Stereolithography Apparatus, SLA (слой жидкого фотополимера подвергается селективному отверждению под действием луча УФ-лазера);
- Digital Light Processing, DLP/ProjectionStereolithography, PSL/MOVINGlight (аналог SLA, отличается тем, что слой фотополимера подвергается отверждению при облучении УФ-проектором);
- Selective Laser Sintering, SLS (порошковый слой термопластичного полимера подвергается селективному спеканию под действием луча лазера).

В последние годы в электронике стали получать все большее распространение новые технологии 3D-печати, большинство которых пока еще находится в стадии исследования и разработки. К ним относятся:

- Aerosol Jet Printing, AJP (аналог IJP, отличается тем, что «чернила» в виде суспензии переводятся в состояние аэрозоля, который распыляется через сопло плотной струей, сфокусированной обволакивающим газом, в место построения, где твердые частицы аэрозоля агломерируются) [2, 3];
- Liquid Metal Printing, LMP (расплав легкоплавкого металла, в частности GaIn-сплава, подается в место

¹ Белорусский государственный аграрный технический университет, профессор.

² Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, профессор.

построения впрыскиванием (аналог IJP) [4] или выдавливанием из подогреваемого экструдера (аналог DIW) [5]);

- Direct Metal, DM (аналог VJ), отличается тем, что в качестве связующего впрыскиваются спекающие добавки, затем порошок подвергается спеканию, которое идет быстрее на участках, содержащих эти добавки) [6];
- Electric Poling-assisted Additive Manufacturing, EPAM / Electric Poling-assisted FDM (аналог FDM, отличается тем, что для печати используется волокно из полимера ПВДФ, к которому во время экструдирования прикладывается электрическое поле, благодаря чему в нем при отверждении образуется пьезоэлектрическая фаза) [7];
- Direct Laser Writing, DLW (аналог SLA, отличается тем, что на поверхности жидкого фотополимера происходит локализованная многофотонная полимеризация под действием лазерного излучения определенной длины волны) [8];
- Laser-induced Forward Transfer, LIFT (лазерная абляция материала тонкой пленки, нанесенной на прозрачную пластину, и перенос образовавшихся капель расплава в место построения на подложке, расположенной ниже пластины, где они затвердевают при охлаждении) [8].

Как правило, все эти технологии представляют собой модифицированные варианты классических технологий 3D-печати, исключением является LIFT-технология, которая имеет существенные отличия.

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ 3D-ПЕЧАТИ В ЭЛЕКТРОНИКЕ

Роль разных технологий 3D-печати в создании электронных устройств в значительной мере определяется используемыми строительными материалами, состав и, соответственно, свойства которых можно варьировать, например, путем использования различных полимеров или введения в них различных наполнителей, путем приготовления суспензий на основе различных частиц и т. д. [9].

Важным показателем технологий 3D-печати, применяемых в электронике, является разрешающая способность, то есть минимальные достижимые размеры структурных элементов электронных устройств, которые определяются шириной и толщиной слоев, печатаемых в один проход. Разрешение 3D-печати зависит от технических характеристик 3D-принтеров, а также от особенностей процессов реализации технологий 3D-печати, например размеров частиц порошка, которыми лимитируется толщина наносимых порошковых слоев (SLS [6]). Большинство технологий 3D-печати обеспечивают разрешение 50–100 мкм, в ряде случаев (при использовании высокосовременных 3D-принтеров) оно доходит до 20 мкм [8, 10, 11]. Наиболее высоким

разрешением характеризуются процессы AJP (10 мкм) [12], LIFT [8, 13] и DLW [8, 14–16] (менее 1 мкм).

В электронике наибольшее применение находят технологии мультиматериальной и гибридной 3D-печати, с помощью которых можно весьма эффективно создавать сложные, многокомпонентные электронные устройства [10].

Потребность в мультиматериальной 3D-печати (Multi-Material 3D printing) обусловлена тем, что структура электронных устройств формируется, как правило, из разнообразных материалов. Мультиматериальность может обеспечиваться непосредственно в ходе реализации одного определенного вида технологий 3D-печати [17–19]. Это становится возможным благодаря конструктивной модификации 3D-принтеров, в частности, оснащению их несколькими соплами, через которые впрыскиваются (IJP) или экструдированы (DIW) разные по составу «чернила» либо протягиваются разные по составу полимерные волокна (FDM); несколькими ваннами с разными по составу фотополимерными смолами (SLA) [9, 20] и т. д. С помощью таких принтеров обычно получают многослойные структуры. Например, в ходе FDM-процесса создаются структуры, состоящие из слоев АБС-пластика (ABS), полиактида (PLA) и высокопрочного полистирола (HIPS) [18], или в ходе IJP-процесса создаются структуры, состоящие из чередующихся слоев двух типов: диэлектрических (отверждение полимерных «чернил» под действием УФ-излучения) и проводящих (отверждение «чернил» на основе Ag-наночастиц под действием ИК-излучения) [21]. Особенно широкими возможностями печати разными материалами, в том числе диэлектрическими, проводящими, резистивными и полупроводниковыми, обладает AJP-технология [2, 9]. Тем не менее для изготовления электронных устройств из разнообразных материалов более предпочтительны гибридные технологии, сочетающие несколько разных видов процессов 3D-печати.

Гибридная 3D-печать (Hybrid 3D printing) предполагает использование комбинаций разных видов 3D-печати в рамках единого процесса изготовления электронных устройств. Эффективность такой печати обусловлена тем, что она позволяет получать сложные по конструкции электронные устройства, отдельные элементы которых не только сформированы из разных материалов, но также характеризуются разными структурными особенностями. Нередко она является единственным возможным способом создания мультиматериальных электронных устройств из разных материалов. Типичные примеры комбинации разных видов 3D-печати: струйная печать проводящими «чернилами» на основе наночастиц Ag и экструзионная печать полиуретановым гелем [22]; печать полимерной подложки с помощью принтера 3D Systems SL и проводящих дорожек с помощью принтера nScrypt, интегрированно в принтер 3D Systems SL [23] и т. п.

ИЗДЕЛИЯ ЭЛЕКТРОНИКИ, ПОЛУЧАЕМЫЕ С ПОМОЩЬЮ 3D-ПЕЧАТИ

Элементы электронных устройств

С помощью технологий 3D-печати получают различные элементы электронных устройств, включая корпусные детали, токопроводящие дорожки, пассивные и активные электронные компоненты.

Технологии 3D-печати, такие как FDM [9, 24, 25], SLS [9, 24], SLA [9, 24–26], DLP [27], BJ [9, 28, 29], позволяют создавать пластиковые корпусные детали, а также целиком корпуса электронных устройств, благодаря чему они рассматриваются в качестве перспективного направления развития производства электронных устройств 3D-MID-типа, основу конструкции которых составляют пластиковые монтажные 3D-основания [27, 30].

Проводящие дорожки наносятся на поверхность диэлектрических полимерных корпусных деталей (подложек). Обычно они формируются в каналах (углублениях), специально изготовленных на поверхности корпусных деталей, что позволяет предотвратить их возможное повреждение, вызываемое нанесением последующих слоев в процессе встраивания дискретных электронных компонентов [9]. Дорожки создают с помощью таких технологий 3D-печати, как AJP – струйное нанесение проводящих «чернил» в виде суспензий наночастиц Ag, Au, Cu, Pt, Pd [29, 31, 32], а также проводящих полимеров PEDOT:PSS [32]; DIW – экструдирование высоковязких пастообразных «чернил» с большим содержанием наночастиц Ag [25, 26]; FDM – осаждение волокон термопластичных полимеров с проводящими наполнителями в виде технического углерода (сажи), графена, меди [33].

Для изготовления пассивных электронных компонентов, в том числе резисторов, конденсаторов и индуктивностей, применяют технологии FDM [33], IJP [21], AJP [2, 3, 31, 32]. Например, FDM-резисторы создают из обладающих определенным электрическим сопротивлением полимеров (PLA), наполненных проводящими частицами (графен, технический углерод) [33], IJP-конденсаторы – из диэлектрических (PEDOT:PSS) и проводящих (ПВП) полимеров [19]. Для изготовления литий-ионных микроаккумуляторов применяется DIW-технология (печать осуществляется концентрированными «чернилами» на основе оксида лития) [34].

Наиболее распространенными активными электронными компонентами, получаемыми путем 3D-печати, являются транзисторы и светодиоды. Транзисторы печатаются с помощью AJP-технологии, при этом сток и исток формируются из золота, затвор – из полимера PEDOT:PSS, полупроводник – из полимера политиофена и углеродных нанотрубок [2]. Светодиоды на квантовых точках (QD-светодиоды) печатаются с помощью DIW-технологии, позволяющей последовательно формировать слои из разных материалов [35, 36]. 3D-печатный QD-светодиод содержит пять слоев: проводящее кольцо на основе наночастиц серебра,

которое окружает прозрачный анодный слой из полимера PEDOT:PSS; дырочный транспортный слой из полимера poly-TPD; светоизлучающий слой, состоящий из квантовых точек – полупроводниковых нанокристаллов на основе селенида кадмия / сульфида цинка (CdSe/ZnS QDs); катодный слой, состоящий из эвтектического GaIn-сплава (EGaIn).

Электронные устройства

Процесс 3D-печати электронных устройств основан на интеграции процессов 3D-печати соответствующих компонентов. Так, интегрируя 3D-печатные пассивные электронные компоненты, можно осуществлять 3D-печать ряда электронных устройств: делителей напряжения, генераторов, реле, трансформаторов, фильтров и т.п. Более сложные электронные устройства можно создавать, совмещая 3D-печать активных и пассивных электронных компонентов. Пример тому – электронные AJP-схемы, состоящие из элементов И-НЕ (каждый включает два транзистора и один резистор), и инверторы (в состав каждого входит транзистор и резистор) [2].

Пожалуй, самую многочисленную группу электронных устройств, создаваемых путем 3D-печати, составляют различные виды сенсоров [37, 38]. К ним относятся сенсоры давления, перемещения, ускорения, влажности, температуры, расхода жидкости, обнаружения газа; антенны, анемометры, тактильные сенсоры, био- и хемосенсоры, сенсоры для контроля качества продуктов питания и др. По принципу действия большинство их являются сенсорами резистивного и емкостного типов. Для изготовления сенсоров применяют FDM, DLP, DIW, SLA, IJP и другие технологии 3D-печати.

Технологии 3D-печати, с учетом их уникальных возможностей, наиболее перспективны для изготовления встроенной электроники (в литературе по 3D-печати термин 3D Printed Embedded Electronics используется как групповое наименование для электронных сборок со встроенными компонентами), а также устройств конформной и гибкой электроники.

Встроенная электроника. При изготовлении электронных устройств в их структуру, формируемую в ходе 3D-печати, встраиваются готовые дискретные электронные компоненты [26]. Получаемые таким образом устройства обладают меньшей массой и объемом, а их изготовление упрощается за счет более рациональной упаковки встраиваемых компонентов и сокращения длины соединительных проводящих дорожек [10].

3D-печать устройств со встроенными дискретными компонентами имеет некоторые особенности [29]. В обычно применяемой в электронном производстве SMT-технологии электронные компоненты устанавливаются на печатные платы на предварительно нанесенную паяльную пасту с последующим формированием паяных контактов путем термообработки в ИК-печи. Однако такая пайка

непригодна для получения межсоединений дискретных компонентов на 3D-печатных полимерных подложках из-за низкой термостойкости последних. Поэтому вместо припоя используются проводящие клеи с низкой температурой отверждения, чем исключается значительное тепловое воздействие на подложки в случае печного нагрева клеев, необходимого для их затвердевания. Вместо печного нагрева для отверждения проводящего клея можно использовать системы селективного спекания, интегрированные в 3D-принтеры.

Для встраивания дискретных компонентов используются автоматизированные устройства захвата и размещения, которыми оснащаются 3D-принтеры. Также для этих целей служат многоосные роботы или интеллектуальные держатели деталей для стандартных систем захвата и размещения, применяемые в 3D-MID-технологии [39].

3D-печатные структуры, в которые встраиваются дискретные электронные компоненты, часто играют роль корпусов изготавливаемых электронных устройств. Типичный тому пример – пластиковый корпус, напечатанный по FDM-технологии, в который полностью инкапсулирован емкостный датчик [40]. Вместе с тем эти структуры могут иметь иное функциональное назначение. Например, это могут быть игральная SLA-кость в виде пластикового куба со встроенными микропроцессором, акселерометром и светодиодами (рис. 1) [41]; пластиковая FDM-стелька для обуви со встроенными сенсорами давления и температуры и микросхемой для беспроводной передачи данных [42]; пластиковая FDM-деталь протеза ноги со встроенным тензосенсором [43] и т. п.

Необходимым условием изготовления устройств встроенной электроники является обеспечение перерывов

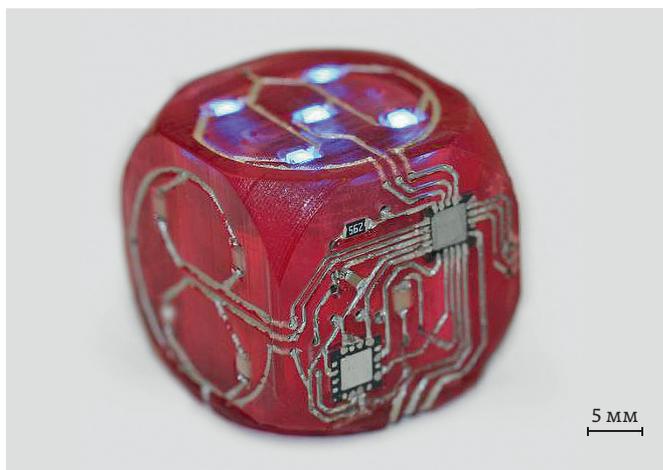


Рис. 1. Электронная игральная кость в виде пластикового SLA-куба со встроенными микропроцессором, акселерометром и светодиодами. Проводящие дорожки получены DIW-3D-печатью [41]

в процессе 3D-печати на время, в течение которого дискретные электронные компоненты встраиваются в 3D-печатную структуру электронных устройств. Таким образом, процессы 3D-печати приобретают прерывистый характер (Print-Pause-Print 3D Printing [44] или Pick-and-Place 3D Printing [45]).

Конформная электроника. Технологии 3D-печати позволяют формировать электронные схемы, включая отдельные типы электронных компонентов, а также проводящие дорожки, на наклонных и криволинейных монтажных поверхностях. Например, с помощью DIW-технологии изготавливаются полусферические антенны путем конформной печати на их выпуклой поверхности проводящими чернилами, содержащими наночастицы Ag, рисунка из проводящих меандровых линий (рис. 2), для чего применяются сопла, выполненные с возможностью заданного изменения пространственной ориентации [46]. Для изготовления конформных электронных устройств можно весьма эффективно применять AJP-технологию. Это объясняется тем, что она, благодаря возможности регулируемого ориентирования сопла и его относительно высокого отступа от поверхности подложки, позволяет довольно просто наносить электронные схемы на наклонные и криволинейные поверхности [2, 47].

Гибкая электроника. С помощью технологий 3D-печати можно создавать электронные устройства, компоненты которых размещаются на поверхности гибких подложек, а также встраиваются в них. Такие устройства обладают повышенной стойкостью к деформациям, их можно изгибать, скручивать, растягивать без нарушения их функциональных характеристик, что делает их особенно удобными для эксплуатации в носимом варианте [48]. Гибкие подложки изготавливают из эластичных полимеров с применением технологий FDM, IJP, DLP [10, 49]. Для формирования проводящих дорожек, встраиваемых в гибкие подложки, особенно перспективно применять LMP-технологии,

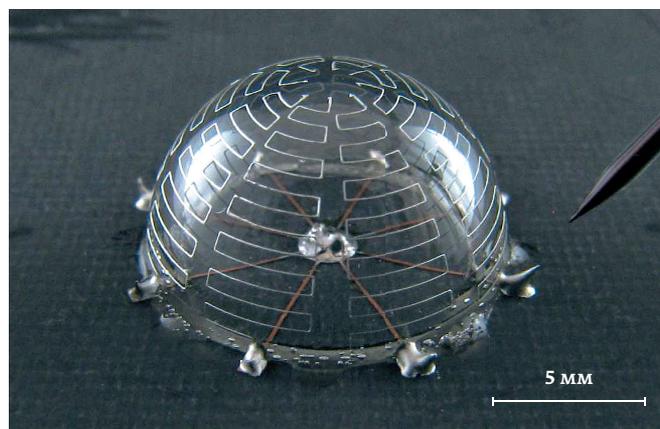


Рис. 2. Полусферическая антенна с электропроводящим рисунком, полученным конформной DIW-3D-печатью [46]

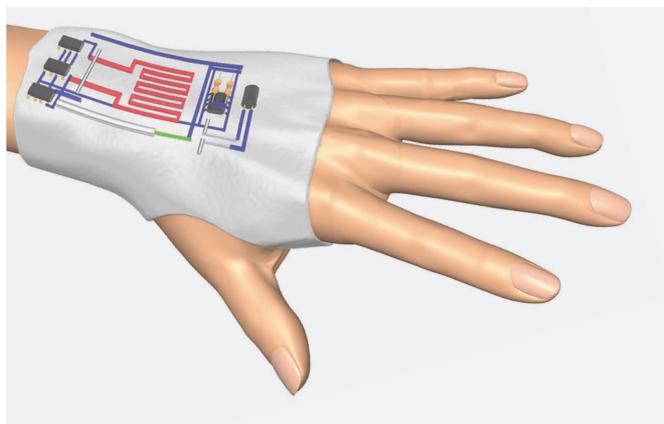


Рис. 3. Гибкая перчатка со встроенной электронной схемой, полученная гибридной 3D-печатью [52]

с помощью которой создаются жидкие металлические проводники [50].

Характерный пример создаваемых с помощью 3D-печати устройств гибкой носимой электроники – кастомизированные гибкие электронные перчатки, служащие для комфортной термотерапии руки пациента (рис. 3) [49, 51, 52]. Такие перчатки получают следующим образом. Сначала изготавливается базовая FDM-подложка, содержащая микроканалы и пазы для интегрируемых компонентов. В микроканалы впрыскивается жидкий металл, чтобы сформировать межкомпонентные соединения, а в пазы встраиваются дискретные твердотельные электронные компоненты (интегральные микросхемы, резисторы и конденсаторы). Затем встроенные компоненты заливаются полидиметилсилоксаном (ПДМС) и эпоксидной смолой, в результате чего формируется верхний защитный слой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Существует большое число технологий 3D-печати, которые можно применять для изготовления изделия электронной техники, однако среди них наиболее перспективна мультиматериальная 3D-микрорепликация, позволяющая создавать сложные, многокомпонентные устройства встроенной, конформной и гибкой электроники [53]. В то же время, несмотря на значительные успехи, достигнутые в последние годы в области изготовления электронных устройств с помощью технологий 3D-печати [35, 54], рынок 3D-печатной электроники пока еще весьма мал, и предстоит пройти значительный путь исследований и разработок, прежде чем эти технологии получат широкое применение в промышленном производстве.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кондрашин А. А., Лямин А. Н., Слепцов В. В.** Современные технологии изготовления трехмерных электронных устройств. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2019. 210 с.
2. **Нисан А., Бонапартов С.** Аэрозольная печать: технология и варианты применения // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2014. № 8. С. 112–116.
3. **Wilkinson N.J., Smith M.A. A., Kay R.W., Harris R.A.** A review of aerosol jet printing – a non-traditional hybrid process for micro-manufacturing // Int. J. Advanced Manufacturing Technology. 2019. No. 5, 105. PP. 4599–4619.
4. **Wang T., Kwok T.-H., Zhou C.** In-situ droplet inspection and control system for liquid metal jet 3D printing process // Proc. Manufacturing. 2017. No. 10. PP. 968–981.
5. **Wang X., Liu J.** Recent advancements in liquid metal flexible printed electronics: properties, technologies and applications // Micro-machines. 2016. No. 7, 206. 24 p.
6. **Vaezi M., Seitz H., Yang S.** A review on 3D micro-additive manufacturing technologies // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2013. No. 67. PP. 1721–1754.
7. **Liu C. [et al.].** 3D printing technologies for flexible tactile sensors toward wearable electronics and electronic skin // Polymers. 2018. No. 10, 629. 31 pp.
8. **Kumar S., Bhushan P., Pandey M., Bhattacharya S.** Additive manufacturing as an emerging technology for fabrication of micro-electromechanical systems (MEMS) // J. Micromanufacturing. 2019. V. 2. No. 2. 24 p.
9. **Toursangsarakhi M.** A review of multi-material and composite parts production by modified additive manufacturing methods // <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1808/1808.01861.pdf>. 2018.
10. **Lu B., Lan H., Liu H.** Additive manufacturing frontier: 3D printing electronics // Opto-Electronic Adv. 2018. V. 1. No. 1. 10 p.
11. **Han T., Kundu S., Nag A., Xu Y.** 3D Printed Sensors for Biomedical Applications: A Review // Sensors. 2019. No. 19. 22 p.
12. **Cai F. [et al.].** High Resolution Aerosol Jet Printing of D-Band Printed Transmission Lines on Flexible LCP Substrate // 2014 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. (IMS2014). 2014. 3 p.
13. **Serra P., Pique A.** Laser-Induced Forward Transfer: Fundamentals and Applications // Adv. Mater. Technol. 2019. No. 4, 1800099. 33 p.
14. **Maruo S., Kawata S.** Two-photon-absorbed near-infrared photopolymerization for three-dimensional microfabrication // IEEE/ASME J. Microelectromech. Syst. 1998. No. 7. PP. 411–415.
15. **Kawata S., Sun H.B., Tanaka T., Takada K.** Finer features for functional microdevices // Nature. 2001. V. 412. PP. 697–698.
16. **Geng Q. [et al.].** Ultrafast multi-focus 3-D nano-fabrication based on two-photon polymerization // Nat Commun. 2019. No. 10. 2179. 32 p.
17. **Liu Y., Cui T. H., Varahramyan K.** All-polymer capacitor fabricated with inkjet printing technique // Solid-State Electronics. 2003. V. 47. P. 1543–1548
18. **Singh R.** Multi-Material Additive Manufacturing of Sustainable Innovative Materials and Structures // Polymers. 2019. No. 11. PP. 62–76.
19. **Sun J.** Fabrication of electronics devices with multi-material drop-on-demand dispensing system // Int. J. Computer Integrated Manufacturing. 2011. No. 10. 30 p.

20. Обзор применения 3D-печати в электронике / <https://habr.com/ru/company/top3dshop/blog/424413>. 2018.
21. **McKerricher G., Vaseem M., Shamim A.** Fully inkjet-printed microwave passive electronics // *Microsystems & Nanoengineering*. 2017. No. 3. 8 p.
22. **Ready S. [et al.]**. 3D printed electronics // *Proc. NIP & Digital Fabrication Conference*, Palo Alto, California. 2013. PP. 9–12.
23. **Lopes A.J., MacDonald E., Wicker R.B.** Integrating stereolithography and direct print technologies for 3D structural electronics fabrication // *Rapid Prototyping J.* 2012. No. 18. PP. 129–143.
24. **Волков И.** Технология 3D-MID. Новые возможности прототипирования изделий // *Печатный монтаж*. 2013. № 2. С. 170–174.
25. **Espalin D., Muse D.W., MacDonald E., Wicker R.B.** 3D Printing multifunctionality: Structures with electronics // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2014. V. 72. PP. 963–978.
26. **Maalderink H.H. [et al.]**. 3D Printed structural electronics: embedding and connecting electronic components into freeform electronic devices // *Plastics, Rubber and Composites*. 2018. V. 7 (1). PP. 35–41.
27. **Аспидова А., Папуша И.** 3D-печать по новой технологии MOVINGLIGHT // *Control Engineering Россия*. 2017. № 4. С. 56–60.
28. **Шахнович И.** 3D-принтеры компании voxeljet: как стартап становится бизнесом // *ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес*. 2015. № 3. С. 129–139.
29. **Hoerber J. [et al.]**. Approaches for additive manufacturing of 3D electronic applications // *Proc. CIRP*. 2014. No. 17. PP. 806–811.
30. **Киселёв С.А., Могильников И.А., Райков Д.В., Яковлев Д.М.** Применение 3D MID-технологии для конструирования электронных устройств // *Физика. Технологии. Инновации* // Сб. матер. V Междунар. молодежной науч. конф., Екатеринбург, 14–18 мая 2018 г. – Екатеринбург: УрФУ, 2019. С. 63–71.
31. **Максимов Н.М.** Аддитивные технологии: бесконтактная печать // <https://ritm-magazine.ru/ru/public/additivnyetehnologii-beskontaktnaya-pechat>. 2019.
32. **Hedges M., Marin A.B.** 3D aerosol jet printing – adding electronics functionality to RP/PM // *Proc. DDMC Conf.* Berlin, 2012, 14–15.03. 2012. PP. 14–15.
33. **Flowers P.F. [et al.]**. 3D printing electronic components and circuits with conductive thermoplastic filament // *Additive Manufacturing*. 2017. V. 18. PP. 156–163.
34. **Sun K., Wei T.-S., Ahn B.Y., Schen J.Y.S.** 3D printing of interdigitated Li-ion microbattery architectures // *Advanced Materials*. 2013. V. 25. Is. 33. P. 4539–4543.
35. **Lewis J.A., Ahn B.Y.** Three-dimensional printed electronics // *Nature*. 2015. V. 518. PP. 42–43.
36. **Kong Y.L.** 3D printed quantum dot light-emitting diodes // *Nano Lett.* 2014. V. 14. No. 12. PP. 7017–7023.
37. **Xu Y.** The boom in 3D-printed sensor technology // *Sensors*. 2017. No. 17.1166. 37 p.
38. **Farooqui M.F., Karimi M.A., Salama K.N., Shamim A.** 3D-Printed Disposable Wireless Sensors with Integrated Microelectronics for Large Area Environmental Monitoring // *Adv. Mater. Technol.* 2017, 1700051. 9 p.
39. **Pfeffer M, Goth C, Craiovan D, Franke J.** 3D-assembly of molded interconnect devices with standard SMD pick & place machines using an active multi axis workpiece carrier // *Proc. Int. Symp. Assembly and Manufacturing (ISAM)*. Tampere: IEEE. 2011.
40. **Shemelya C. [et al.]**. Encapsulated copper wire and copper mesh capacitive sensing for 3-D printing applications // *IEEE Sens J.* 2015. No. 15. PP. 1280–1286.
41. **Macdonald E.** 3D printing for the rapid prototyping of structural electronics // *IEEE Access*. 2012. V. 2. PP. 234–242.
42. 3D printed footwear: SMART insole. <https://www.raise3d.com/case/3d-printed-footwear-smart-insole>. 2018.
43. **Runge D.** 3D-printing und gedruckte elektronik für die medizintechnik. Univ. Applied Science Bremerhaven, Bremen Area, Germany. 2016.
44. **Li F., Macdonald N.P., Guijt R.M., Breadmore M.C.** Increasing the functionalities of 3D printed microchemical devices by single material, multimaterial, and print-pause-print 3D printing // *Lab-Chip*. 2019. V. 19. PP. 35–49.
45. **Cesewski E. [et al.]**. Additive manufacturing of three-dimensional (3D) microfluidic-based microelectromechanical systems (MEMS) for acoustofluidic applications // *LabChip*. 2018. V. 18 (14). PP. 2087–2098.
46. **Adams J.J.** Conformal printing of electrically small antennas on three-dimensional surfaces // *Adv. Mater.* 2011. No. 23. PP. 1335–1340.
47. **Paulsen J.A., Renn M., Christenson K., Plourde R.** Printing conformal electronics on 3D structures with aerosol jet technology // *Future of Instrumentation International Workshop Proc.* 2012. PP. 47–50.
48. **Park Y.-L., Chen B.-R., Wood R.J.** Design and fabrication of soft artificial skin using embedded microchannels and liquid conductors // *IEEE Sensors J.* 2012. V. 12. No. 8. PP. 2111–2118.
49. **Yang H., Leow W.R., Chen X.** 3D printing of flexible electronic devices // *Small Methods*. 2018. No. 2, 1700259. 7 p.
50. **He Y.** Three-dimensional coprinting of liquid metals for directly fabricating stretchable electronics // *3D printing and additive manufacturing*. 2018. V. 5. No. 3. PP. 195–202.
51. **Muth J.T.** Embedded 3D Printing of Strain Sensors within Highly Stretchable Elastomers // *Adv. Mater.* 2014. No. 26. PP. 6307–6312.
52. **Ota H.** Application of 3D printing for smart objects with embedded electronic sensors and systems // *Adv. Mater. Technol.* 2016. V.1. Is.1. 8 p.
53. **Lehmhus D., Busse M., von Hehl A., Jagle E.** State of the art and emerging trends in additive manufacturing: from multi-material processes to 3D printed electronics // *MATEC Web of Conf. ICEAF-V 2018*. 2018. V. 188, 03013. 10 p.
54. **Espera Jr. A. H., Dizon J.R. C., Chen Q., Advincula R.C.** 3D-printing and advanced manufacturing for electronics // *Progress in Additive Manufacturing*. 2019. No. 4. PP. 245–267.