

Методы 3D-печати для изготовления печатных плат

О. Смирнова¹, Ю. Боброва², К. Моисеев³

УДК 621.3.049.75:658.5.012.1 | ВАК 05.27.06

В статье приводятся краткие обобщающие сведения о применении методов 3D-печати для изготовления печатных плат и узлов, а также характеристики получаемых при этом изделий. Рассмотрены проблемные вопросы применения и доступности оборудования и конструкционных материалов 3D-печати изделий электронной техники в России. Описаны особенности конструирования технологических полей заготовок печатных плат. Приведены результаты анализа, которые показали возможность изготовления плат с элементами 5 класса точности включительно, а также отсутствие комплексного подхода у имеющихся исследований.

Печатная плата (ПП) является достаточно сложным изделием с весьма трудоемким процессом разработки и производства. В связи с этим, для упрощения начальных этапов ее жизненного цикла происходит активное освоение и внедрение прогрессивных производственных процессов, обеспечивающих использование всех преимуществ современных цифровых технологий, к которым относится 3D-печать. В отношении ПП рассматриваемая технология может позволить обеспечить ряд таких потребностей, как:

- уменьшение размера плат и ширины печатных проводников (элементов топологии);
- сокращение отходов производства;
- встраивание компонентов внутрь платы;
- интеграция структурных элементов.

В данной статье рассматриваются некоторые аспекты методов 3D-печати и всей технологии в целом в ее сегодняшнем состоянии, имеющие значение при определении ее возможностей, ограничений и границ применения для задач изготовления ПП. Под понятием «стандартные технологии» будут подразумеваться технологические процессы, применяемые в настоящий момент для изготовления ПП.

КРАТКИЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ 3D-ПЕЧАТИ

Впервые в российской технической литературе целесообразность применения методов 3D-печати для изготовления ПП была рассмотрена в [1]. В дополнение к вышесказанной статье и с учетом сведений, приведенных

в цикле образовательных статей [2], был проведен сравнительный анализ четырех методов 3D-печати, наиболее подходящих и опробованных другими исследователями для изготовления ПП (табл. 1). Из таблицы видно, что уже сейчас обеспечиваемый коммерческим оборудованием класс точности ПП составляет от 1 до 5, то есть предоставляет достаточный диапазон для большинства российских предприятий.

Отдельно стоит выделить метод многофункционального нанесения (Multi-Functional Additive Manufacturing, MFAM), который не был приведен в таблице из-за отсутствия многих сведений. Он был разработан относительно недавно и позволяет изготавливать жесткие ПП. Для изготовления применяются чернила (диэлектрические – на основе акрилатных соединений, проводящие – с частицами серебра или графена), подложка не требуется. Сведения о возможном классе точности напечатанных ПП отсутствуют, как и коммерческое оборудование.

ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

Возможность применения 3D-печати для изготовления изделий электроники была много раз показана зарубежными исследователями путем создания таких демонстраторов технологии, как транзисторы, резисторы, индукторы, суперконденсаторы, различные датчики (деформации, температуры), носимая электроника, антенны и т. д. (табл. 2). Как правило, подобные демонстраторы проверяются лишь на подтверждение выполнения одной-двух основных для данного типа изделия функций. Приведенная информация выглядит весьма впечатляюще, но представляет собой лишь необходимый набор данных, но недостаточный.

Тем не менее, иногда встречаются статьи, посвященные испытаниям напечатанных образцов. Например, Д. Ребаун (J. Rebaun) с соавт. [14] провели испытания

¹ МГТУ им. Н. Э. Баумана, аспирант по специальности 05.13.06, olga.smirnova.nik@gmail.com.

² МГТУ им. Н. Э. Баумана, старший преподаватель, ju.s.bobrova@bmsu.ru.

³ МГТУ им. Н. Э. Баумана, доцент, k.moiseev@bmsu.ru.

Таблица 1. Сравнительный анализ методов 3D-печати для изготовления печатных плат

Параметр		Значение				
Наименование метода (сокращение)	Рус.	Аэрозольное нанесение материала (АНМ)	Капельное нанесение материала (КНМ)	Прямое нанесение материала (ПНМ)	Послойное наложение филамента (ПНФ)	Цифровое осаждение материала (ЦОМ)*
	Англ.	Aerosol Jet Printing (AJP)	Drop on Demand (DOD)	Direct Ink Writing (DIW)	Fused Deposition Modeling (FDM)	Digital Material Deposition (DMD)
Полученные исследователями (практически реализованные на специализированном коммерческом оборудовании) характеристики печатных плат						
Класс точности (ГОСТ Р 53429)		>7 (нет данных)	>7 (5-6)	<3 (<3)	<5 (нет данных)	Нет данных (<5)
Мин. ширина проводника, мкм		10 [3] (10 [4])	25 [5] (75 [6])	206 [7] (200 [8])	100 [9] (нет данных)	Нет данных (80 [10])
Мин. расстояние между проводниками, мкм		20 [11] (20 [4])	Нет данных (100 [6])	Нет данных (650 [8])	Нет данных	Нет данных (60 [10])
Количество слоев, шт.		>2 (имитация слойности)	>2	1-2	>2	>2
Тип ПП (жесткая / гибкая)		ЖПП, ГПП	ЖПП, ГПП	ЖПП	ЖПП, ГПП	ЖПП, ГПП
Расходные материалы						
Тип		Чернила-дисперсии	Чернила	Коллоидные суспензии	Филамент**	Чернила и пасты
Вязкость, мПа·с		1-15 (ультразвуковое распыление) 1-500 (пневматическое распыление)	1-40	> 1000	Не имеет	1-80 000
Материал	Непроводящий	Полиимид, SU-8	Диэлектрик (аналогичный стеклотекстолиту FR-4)	Al ₂ O ₃	Полиамид, керамика, высокотемпературные полимеры, термопластичный полиуретан	Диэлектрики, полимеры
	Проводящий	Ag, Cu	Ag, Au, графен	Ag, графен	Углерод	Ag, Cu, углерод
Наличие подложки (материал)		Требуется (стеклотекстолит FR, стекло, полиимид, керамика)	Не требуется	Требуется (стеклотекстолит FR)	Не требуется	Не требуется

* Был запатентован в 2020 году [12]. По мнению авторов, данный метод может являться усовершенствованным аналогом ПНМ.

** Нить калиброванного диаметра, получаемая непрерывным экструдированием пластмассы и композиций на ее основе, обычно наматывается на катушку [13].

Таблица 2. Практика изготовления изделий электроники методами 3D-печати

Изделие	Метод 3D-печати	Основные сведения	Источник
Волновод копланарный частотного диапазона до 50 ГГц	АНМ	<i>Материалы:</i> полиимидные чернила, AgNP-чернила, стеклянная подложка. <i>Характеристики:</i> вносимые потери 0,5 дБ/мм на частоте 50 ГГц и 0,2 дБ/мм на частоте 25 ГГц	[3]
Датчик давления емкостной (гибкий)	ПНМ	<i>Материалы:</i> Ag-чернила на основе TPU, TPU-чернила. <i>Характеристики:</i> диэлектрическая проницаемость 9,1; модуль упругости $E \approx 2,3$ МПа	[15]
Плата печатная со встроенными компонентами (имитатор)	ПНФ + дозирование пасты	<i>Материалы:</i> Филамент PET-G, серебряная паста. <i>Характеристики:</i> Средняя наработка до отказа 8000 ч (испытания проводились в климатической камере при температуре 77 °С, время выдержки образца 24 ч)	[16]
Графеновый тонкопленочный транзистор	КНМ	<i>Материалы:</i> графеновые чернила; подложка кремниевая Si/SiO ₂ , покрытая слоем гексаметилдисилазана (HMDS). <i>Характеристики:</i> подвижность основных носителей заряда (μ) до ~ 95 см ² /(В·с). Уровень переключения ~ 10 (значения получены при $V_{ds} = -2$ В)	[17]

Примечание: В таблице были применены следующие обозначения: Ag – серебро; NP – наночастицы; PET-G – полиэтилентерефталат-гликоль; TPU – термопластичный полиуретан

на устойчивость к перегибам тестовых образцов в соответствии с IPC-TM-650 (№ 2.4.3). Тестовый образец имел небольшое отличие топологии от приведенной в стандарте и представлял собой напечатанный методом АНМ и спеченный серебряный проводник на фольге PET. В результате проведенных испытаний было выявлено, что сопротивление образцов практически одинаково в процессе проведения нескольких тысяч перегибов, но после возрастает, в проводящих дорожках образуются трещины. Отказ обычно происходил между 9000 и 12000 циклов.

ДОСТУПНОСТЬ В РОССИИ

Для реализации методов АНМ, КНМ, ПНМ и ЦОМ могут быть применены специализированные на изготовлении ПП 3D-принтеры и соответствующие им расходные материалы, производимые и поставляемые из-за границы. В отношении материалов стоит упомянуть, что обычно производитель оборудования запрещает применение материалов сторонних организаций, не включенных в список рекомендуемых поставщиков, под угрозой снятия своего оборудования с гарантийного обслуживания.

В условиях импортозамещения в отношении чернил для этих методов пока аналогов нет, но попытки их создания ведутся. Наиболее преуспели в этой сфере исследователи ИХТТМ СО РАН [18, 19]. Также, согласно открыто опубликованным источникам на 2017 год, существовал единственный отечественный производитель наночернил, включенный в список рекомендуемых поставщиков

некоторых производителей оборудования для печати электроники с помощью КНМ [19, 20].

Другая ситуация сложилась для реализации метода ПНФ. В связи с тем, что он является одним из самых доступных и распространенных, ПНФ на сегодняшний день практически полностью импортозамещен. Однако есть некоторые особенности применения, заключающиеся в отсутствии принтеров для этого типа печати, адаптированных для нужд электроники, и недостатке данных о некоторых свойствах материалов (например, электропроводности, диэлектрической проницаемости и др.).

ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ

Технология трехмерной печати, как и любая другая, не лишена недостатков. Однако большинство из существующих проблем взаимосвязаны и являются следствием недостаточной изученности технологии. Рассмотрим некоторые из них.

Зрелость технологии. 3D-печать, как технология изготовления ПП, имеет 1 уровень готовности технологии по ГОСТ Р 58048 (основные принципы технологии изучены и опубликованы), что не позволяет сделать вывод о целесообразности ее применения в промышленных масштабах в связи с недостатком данных об обеспечиваемых параметрах изделий.

Расходные материалы. Номенклатура расходных материалов для нужд изготовления ПП не только крайне ограничена, но и позволяет получить лишь проводники

с относительно высоким значением сопротивления (табл. 3), что накладывает некоторые ограничения при применении. Тем не менее, грамотный подбор режимов постобработки может значительно снизить получаемое удельное сопротивление.

Монтаж компонентов. Отсутствие какой-либо системы определения местоположения части напечатанного изделия или подложки в рабочем пространстве 3D-принтера свидетельствует о сложностях проведения манипуляций во время печати, что усложняет процедуру встраивания компонентов внутрь платы. Кроме того, в большинстве случаев монтаж компонентов осуществляется вручную, что закономерно уменьшает точность их расположения.

Однако сейчас уже предпринимаются попытки решения данной проблемы. Пока существуют два коммерчески зафиксированных способа:

- размещение подложки на шаблоне с размеченными секторами (или без него) и ее фиксация с помощью двух направляющих;
- оснащение принтера рабочим органом, позволяющим заменять печатную головку на другой инструмент.

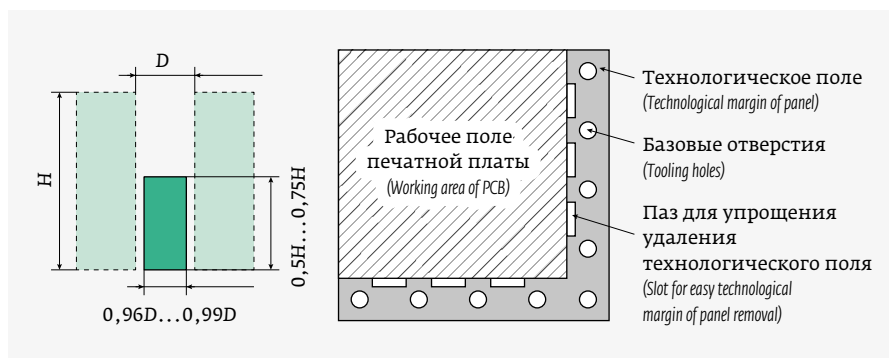


Рис. 1. Возможный вариант реализации напечатанных «штифтов» по L-конфигурации

В качестве альтернативы существующим технологическим решениям мы предлагаем применять для возврата платы в область печати напечатанные «штифты» (рис. 1), по сути, аналогичные применяемым в штифтовой технологии для совмещения элементов смежных слоев ПП. Для реализации данного подхода потребуется предусмотреть в конструкции ПП наличие сквозных неметаллизированных базовых отверстий (БО), расположенных по определенной системе базирования (например, L-конфигурации или по перпендикулярным осям).

Предполагается, что после прерывания печати и извлечения изделия будет запущена часть управляющей

Таблица 3. Удельное сопротивление напечатанных проводников

Метод 3D-печати	Материал / подложка	Удельное сопротивление, мкОм·см	Параметры отверждения	Источник
АНМ	AgNP-чернила / стекло	3,5	Печь: 120'@220 °С	[21]
КНМ	Ag-чернила из отечественных материалов / полиимидная пленка Картон	4,7	Печь: 30'@250 °С	[18]
КНМ	AgMOD-чернила / содалимовое стекло	2,02	Сушка на воздухе: 10'@25 °С Печь: 120'@220 °С	[22]
КНМ	CuMOD-чернила / стекло	10,0	Вакуумная камера: 20'@200 °С, давление 160 Па Отжиг в газовой среде H ₂ +N ₂ (forming gas anneal): 30'@200 °С	[23]
ПНМ	Ag-чернила / керамика Al ₂ O ₃	2,1	Печь: цикл начиная с 20'@110 °С, затем повышая до 850 °С и выдерживая 10'@850 °С. Полный цикл – 120'	[24]
ПНФ	Филамент на основе Cu / -	14,0·10 ³	Без доп. отверждения после печати	[25]

Примечания:

Обозначения в таблице: Ag – серебро, Cu – медь, MOD – с металлоорганическим разложением, NP – наночастицы, ' – минута, @ – предлог «при». Удельное сопротивление, мкОм·см: Ag – 1,6; Cu – 1,72; золото – 2,2.

программы для печати «штифтов» в месте расположения центров БО. Затем ПП будет возвращена на рабочую платформу в место предыдущей печати путем совмещения БО с напечатанными «штифтами».

Обеспечиваемая точность будет напрямую зависеть от зазора между диаметрами БО и «штифта» (чем меньше зазор, тем выше точность), но, к сожалению, в любом случае будет невысока (ориентировочно ± 50 мкм [26] и хуже).

Пайка. Из-за физико-химических свойств применяемых расходных материалов при изготовлении печатных узлов необходимо использовать низкотемпературные припои с температурой плавления не более 200 °С, что будет уменьшать диапазон рабочих температур и снижать устойчивость к механическим воздействиям получаемой ПП.

Ремонтопригодность. На данном этапе напечатанные ПП пока можно отнести к классу неремонтопригодных изделий [1].

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУИРОВАНИЯ ПП

Общие нормы проектирования для напечатанных ПП пока не установлены, но некоторые производители вместе

с оборудованием предоставляют свои рекомендации. Зарубежный опыт показывает, что существующие нормы вполне могут быть успешно применены для 3D-печати. Однако стоит помнить, что они были разработаны с учетом процессов, применяемых в стандартных технологиях, и заложенные в них допуски могут быть избыточными или недостаточными для 3D-печати. Рассмотрим некоторые аспекты проектирования ПП в отношении основных элементов проводящего рисунка.

Печатные проводники. Соединение проводников под острым углом считается недопустимым из-за технологических особенностей процесса травления [27], но данное требование, вероятно, потеряет смысл при 3D-печати. В этом случае хорошо подойдет змееобразный (изотропный) стиль трассировки, заключающийся в выполнении поворотов вокруг препятствий дугообразными сегментами, и размещение проводников под произвольным углом, что позволит сократить длину проводников и, как следствие, уменьшить искажения сигнала и повысить плотность трассировки [28].

Переходные отверстия. 3D-принтер может обеспечить формирование металлизированного отверстия

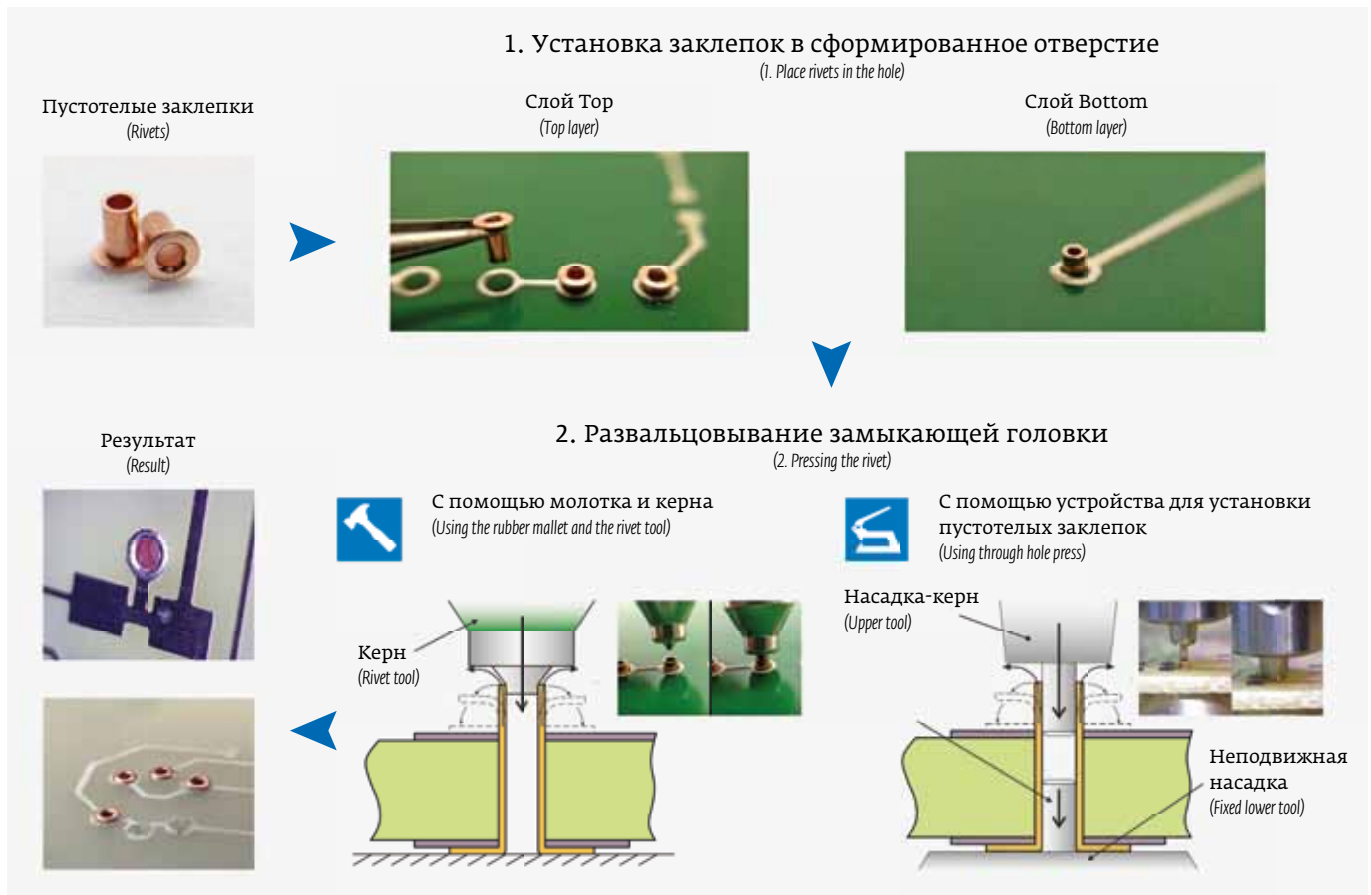


Рис. 2. Применение заклепок для формирования сквозного металлизированного отверстия (разработано на основе [29, 30])



Разработка и производство конденсаторов

оксидно-электролитические алюминиевые конденсаторы

K50-15, K50-17, K50-27, K50-37, K50-68, K50-77, K50-80, K50-81, K50-83, K50-84, K50-85, K50-86, K50-87, K50-88, K50-89, K50-90, K50-91, K50-92, K50-93, K50-94, K50-95(чип), K50-96, K50-97(чип), K50-98, K50-99, K50-100, K50-101(чип), K50-102, K50-103, K50-104, K50-105, K50-106

объемно-пористые танталовые конденсаторы

K52-1, K52-1M, K52-1BM, K52-1B, K52-9, K52-11, K52-17, K52-18, K52-19, K52-20, K52-21, K52-24, K52-26(чип), K52-27(чип), K52-28, K52-29, K52-30

оксидно-полупроводниковые танталовые конденсаторы

K53-1A, K53-7, K53-65(чип), K53-66, K53-68(чип), K53-69(чип), K53-71(чип), K53-72(чип), K53-74(чип), K53-77(чип), K53-78(чип), K53-82

суперконденсаторы (ионисторы)

K58-26, K58-27, K58-28, K58-29, K58-30, K58-31, K58-32, K58-33

накопители электрической энергии на основе модульной сборки суперконденсаторов НЭЭ, МИК, МИЧ, ИТИ

Система менеджмента качества сертифицирована на соответствие требованиям ISO 9001



двумя коммерчески зафиксированными способами: применение медных пустотелых заклепок, которые вбиваются в заранее просверленные в подложке отверстия и соединяются с напечатанной контактной площадкой (рис. 2); формирование проводящих стенок отверстия с помощью проводящего материала слой за слоем. Минимальный диаметр созданных данными способами отверстий может составить до 0,4 мм.

Также 3D-печать позволяет сформировать «напечатанное» отверстие, аналогичное заравниваемому. В этом случае 3D-принтер будет слой за слоем печатать круглые контактные площадки диаметром, равным диаметру отверстия. Стоит учитывать, что для «напечатанного» отверстия будут характерны процессы усадки, как и для заполненного (тип V по IPC 4761). Минимальный диаметр созданного данным способом отверстия может составить до 0,2 мм.

Контактные площадки (КП) отверстий. Существующие нормы расчета диаметра КП и величина гарантийного пояса в основном обусловлены проблемами совмещения слоев ПП. Кроме того, в стандартных технологиях каждое переходное отверстие обязательно должно иметь на соответствующем слое КП для обеспечения электрического соединения.

В технологии 3D-печати отсутствует необходимость в КП для переходного «напечатанного» отверстия, так как отверстие формируется одновременно с проводником. Таким образом, для некоторых отверстий нормы для КП и гарантийного пояса могут быть упразднены или значительно уменьшены.

Стоит помнить, что проблемы топологической точности также будут актуальны для 3D-печати (например, КП, из которых будет сформировано «напечатанное» отверстие, должны быть совмещены), особенно в случае втуточного монтажа компонентов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Уже сейчас изготовленные демонстраторы технологии показывают жизнеспособность 3D-печати для создания различных изделий электроники. Однако проведенным исследованиям не хватает комплексности. В связи с этим осложняется внедрение трехмерной печати на промышленных предприятиях. Тем не менее, на сегодняшний день зарубежные коммерческие 3D-принтеры позволяют изготавливать ПП до 5 класса точности, то есть типового класса точности для большинства российских предприятий.

Предполагается, что дальнейшее развитие 3D-печати в России будет сопряжено с проведением ряда научно-исследовательских и опытно-технологических работ, положительный результат которых будет отражаться в разработанной по их результатам нормативной документации.

Лучше успеть забежать в последний вагон отправляющегося поезда, чем пытаться догнать уже давно ушедший.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Боброва Ю., Мануков Д.** 3D-печать в производстве печатных плат // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2019. № 7. С. 114–126.
2. **Смирнова О., Боброва Ю., Моисеев К.** Анализ методов 3D-печати для изготовления печатных плат: общие положения // Технологии в электронной промышленности. 2020. № 8 (124). С. 20–25.
3. **Cai F.** Aerosol jet printing for 3-D multilayer passive microwave circuitry / 44th European Microwave Conference, 2014. PP. 512–515.
4. Брошюра 3D-принтера Aerosol Jet HD2. URL: <https://optomec.com/aj-hd2>
5. **Meier H. et al.** Inkjet printed, conductive, 25 µm wide silver tracks on unstructured polyimide // Physica Status Solidi (A) Applications and Materials Science, 2009. Vol. 206, Iss. 7. PP. 1626–1630.
6. Брошюра 3D-принтера Dragon Fly IV. URL: <https://www.nano-di.com/wp-content/uploads/2022/02/DF-IV-FLIGHT-brochure-2-1-02.15.202225296.pdf>
7. **Chen R., Gruebele A., Liu C.** Low-Cost and robust printing of resistance thermometer sensors using the Voltera. ENGR 241 Project Report. – Stanford University. 17 p.
8. Брошюра 3D-принтера Voltera V-One. URL: <https://assets.ctfassets.net/e6vf9wdhbae5/2yjsp6sl8Zw7w2YN09oecH/892e3bb674cd4a38de84ba3bfe82951d/specs.pdf>
9. **Nelson M. D., Ramkumar N., Gale B. K.** Flexible, transparent, sub-100 µm microfluidic channels with fused deposition modeling 3D-printed thermoplastic polyurethane // Journal of Micromechanics and Microengineering. 2019. Vol. 29, Iss. 9. 8 p.
10. Digital material Deposition. Selective Patterns & Material Structuration for printed electronics // KELENN technology. 2021.
11. **Seifert T. et al.** Additive manufacturing technologies compared: morphology of deposits of silver ink using Inkjet and Aerosol Jet Printing // Industrial & Engineering chemistry research. 2015. Vol. 54. PP. 769–779.
12. FR3081753B1. Systeme de depot matiere et procedeassocie. 2020. URL: <https://patents.google.com/patent/FR3081753B1/en?q=FR+3081753>
13. ГОСТ Р 59100-2020. Пластмассы. Филаменты для аддитивных технологий. Общие технические требования. М.: Стандартинформ, 2020. 12 с.
14. **Reboun J. et al.** Bending endurance of printed conductive patterns on flexible substrates // 39th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). 2016. PP. 184–188.
15. **Valentine A. D. et al.** Hybrid 3D Printing of soft electronics // Advanced Materials. 2017. Issue 1703817. 8 p.
16. **Walpuski B., Sloma M.** Accelerated Testing and Reliability of FDM-Based Structural Electronics // Applied sciences. 2022. No. 12. 8 p.



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНОСФЕРА» ПРЕДСТАВЛЯЕТ КНИГУ:



Бобков С.Г., Басаев А.С.

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА АППАРАТНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ

Рецензент: Стенин Владимир Яковлевич – д-р техн. наук, проф. (Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»)

**М.: ТЕХНОСФЕРА, 2021. – 264 с.
ISBN 978-5-94836-610-4**

Цена 975 руб.

Важнейшей характеристикой микропроцессорных систем является производительность. Производительность микропроцессора линейно зависит от трех характеристик – его частоты, средней частоты на выполнение инструкций и количества инструкций в выделенной области программы. В свою очередь, эти характеристики определяются технологией изготовления, архитектурой микропроцессора, системой команд и технологией компиляции. В представленной книге рассмотрены проблемы улучшения этих характеристик, а также методы и методики проектирования высокопроизводительных вычислительных систем.

Рассмотрены архитектуры микропроцессоров и коммуникационных систем, ориентированных на создание высокопроизводительных вычислительных комплексов вплоть до супер-ЭВМ. Приводится маршрут и методики проектирования микросхем.

Книга предназначена для студентов старших курсов кафедр электроники и автоматики университетов, аспирантов и специалистов указанной области.

Бобков С.Г. (Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»)

Басаев А.С. (Научно-производственный комплекс «Технологический центр»)

Как заказать наши книги?

По почте: 125319, Москва, а/я 91
По факсу: (495) 956-33-46
E-mail: knigi@technosphera.ru
sales@technosphera.ru

ИНФОРМАЦИЯ О НОВИНКАХ
www.technosphera.ru

17. **Torrisi F. et al.** Inkjet-printed graphene electronics // ACS Nano. 2012. Vol. 6. No. 4. PP. 2992–3006.
18. **Titkov A. I. et al.** Conductive inks for Inkjet Printing based on composition of nanoparticles and organic silver salt // Inorganic Materials: Applied Research. 2015. Vol. 6. No. 4. PP. 375–381.
19. **Ткачев С. В.** Дисперсии наночастиц в водно-органических растворителях как основа серебряных наночернил для 2D печати // Наносистемы. 2016. Т. 8. № 2. С. 171–184.
20. **Корнилов Д. Ю. [и др.]**. Принтерные технологии в электронике. Материалы и устройства для печати – первый российский семинар (Москва, 15.12.2017) // Наносистемы. 2017. Т. 9. № 2. С. 181–204.
21. **Gieser H. A. et al.** Rapid prototyping of Electronic Modules Combining Aerosol Printing and Ink Jet Printing // 3rd Electronics system integration technology conference ESTC. 2010. 6 p.
22. **Smith P. J. et al.** Direct ink-jet printing and low temperature conversion of conductive silver patterns // Journal of Materials Science. 2006. No. 41. PP. 4153–4158.
23. **Hong C. M., Wagner S.** Jet printing of copper lines at 200 °C maximum process temperature // Materials research society symposium proceeding. 2000. No. 558. PP. 387–392.
24. **Roberson D. A. et al.** Microstructural and process characterization of conductive traces printed from Ag particulate inks // Materials. 2011. No. 4. PP. 963–979.
25. **Flowers P. F. et al.** 3D printing electronic components and circuits with conductive thermoplastic filament // Additive Manufacturing. 2017. No. 18. PP. 156–163.
26. **Пахнин А.** Формирование структуры сложных многослойных печатных плат // Производство электроники: технологии, оборудование, материалы. 2011. № 2. С. 32–39.
27. Целостность сигналов на печатной плате и волновое сопротивление проводников. Учет ЭМС при разработке высокочастотных печатных плат. URL: <https://interweber.ru/tablets/celostnost-signalov-na-pечатnoi-plate-i-volnovoe-soprotivlenie-provodnikov-uchet-ems-pri-razrabotke.html>
28. **Зырин И.** Трассировка под произвольными углами с огибанием препятствий дугами – Snakerouting // Технологии в электронной промышленности. 2020. № 5. С. 6–11.
29. Working with rivets. URL: <https://support.voltera.io/working-with-rivets>
30. Favorit Through Hole Rivets. URL: <https://www.vpcinc.com/Category/Favorit-Through-Hole-Rivets-104.cfm>

КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



Цена 1188 руб.

СПРАВОЧНИК ПО ВАКУУМНОЙ ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯМ

Под ред. Д. Хоффмана, Б. Сингха, Дж. Томаса III

При поддержке ФГУП «Научно-исследовательский институт вакуумной техники им. С.А. Векшинского»

Перевод с англ. под ред. В.А. Романько, С.Б. Нестерова

Предлагаемый справочник по вакуумной технике и технологиям является переводом книги, созданной американскими специалистами. В справочнике приведены фундаментальные положения технологии вакуума и физики поверхности, рассмотрены конструкции различных типов насосов и средств измерения вакуума и течеискания. Подробно описаны различные вакуумные системы и технологии. Приведены примеры применения вакуумной техники. Большое внимание в справочнике уделено описанию технологии получения и поддержания безмасляного вакуума. Справочник состоит из пяти частей:

- 1) введение;
- 2) получение вакуума (насосы и технологии, используемые в настоящее время в эксплуатации и конструкции);
- 3) вакуумные измерения (давление, парциальное давление, поток газа, обнаружение течей, калибровка и технологии, связанные с вакуумметрией);
- 4) элементы и конструкции вакуумных систем, включая материалы, клапаны, фланцы, эксплуатацию и техническое обслуживание, а также очистку и поддержание чистоты системы;
- 5) применение высоковакуумной и сверхвысоковакуумной технологии. Информация, включенная в настоящий справочник, предназначена для тех, кто практически использует вакуумную технологию.

М.: ТЕХНОСФЕРА,
2011. – 736 с.,
978-5-94836-294-6

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 495 234-0110; 📠 +7 495 956-3346; knigi@technosphaera.ru, sales@technosphaera.ru