

Конформно интегрируемая электронная компонентная база гибкой печатной электроники для Интернета людей

В. Лучинин, д. т. н.¹, О. Бохов, к. т. н.², И. Мандрик³, В. Старцев³,
А. Смирнов³, П. Афанасьев, к. т. н.², М. Аньчков³, А. Пудова³,
В. Никонова³, С. Шевченко, к. т. н.⁴

УДК 621.3 | ВАК 05.27.01

В современном мире приобретают все большую актуальность тенденции, связанные с сохранением и генерацией «человеческого капитала», повышением качества жизни. В рамках развития этих тенденций сформировалось понятие «Интернет людей» (Internet of People – IoP). Оно отражает виртуальную деятельность человека в инфокоммуникационном пространстве по управлению объектами окружающего мира с использованием биометрических данных и биофункциональных показателей для обеспечения персонализированной среды жизнедеятельности человека. В статье рассматриваются комплекс конструкторско-технологических решений и практическая реализация конформно* интегрируемой электронной компонентной базы гибкой печатной электроники, которые могут эффективно использоваться в системах Интернета людей.

Человек как объект Интернета людей обладает собственными биологическими идентификационными признаками, ярко выраженными когнитивными функциями, развитой мультисенсорикой и автономным энергосбережением (табл. 1).

Особенности перехода от Интернета вещей к новому поколению Интернета людей:

- биометрическая идентификация личности (биологический адрес);
- контроль местоположения биообъекта и динамики его перемещения;
- анализ поведения и активности индивида;
- мониторинг биомедицинских параметров;
- активные фармакологическое и нефармакологическое воздействия на человека на основании удаленного анализа его биоданных;
- нейрокогнитивное управление человеком интегрированными в одежду или размещаемыми на теле

искусственными системами для мониторинга физиологического состояния, биомедицинской диагностики, неинвазивной и инвазивной терапии и биоамещения;

- дистанционное управление человеком окружающими и удаленными объектами за счет киберфизического интерфейса, обеспечивающего преобразование и передачу регистрируемых данных индивида в виде движений и жестов, мыслей и эмоций;
- дистанционное формирование без непосредственного участия человека управляющих воздействий на окружающие его объекты на основании виртуальных процедур анализа биоданных и мониторинга среды обитания.

Гибкая печатная электроника и фотоника [1, 2] может рассматриваться как одно из приоритетных направлений при решении научно-практических задач развития нового поколения Интернета людей, учитывая возможность ее конформной интеграции как в объекты органической, так и неорганической природы. Компоненты гибкой печатной электроники конформно пространственно-геометрически и функционально интегрируются в распределенные сенсорно-управляющие и инфокоммуникационные среды [3], обеспечивая высокую конструктивную адаптивность, эргономичность и экономическую эффективность технических решений [4, 5].

Целью работы является представление возможной конструктивно-технологической эволюции персонализированных носимых конформных автономных

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»), директор ИЦ «ЦМИД», tech@contractmanufacturing.ru.

² СПбГЭТУ «ЛЭТИ», старший научный сотрудник, заместитель директора ООО «Инжиниринговый центр «Гибкая печатная электроника и фотоника» («ИЦ «ГПЭИФ»).

³ СПбГЭТУ «ЛЭТИ», инженер.

⁴ СПбГЭТУ «ЛЭТИ», доцент.

* Конформность – приспособление к окружающим условиям и объектам.

Таблица 1. Современные направления развития технологий Интернета людей

Направление	Функции, назначения
Биометрическая идентификация	Идентификация личности и позиционирование индивида
Биомедицинская сенсорика	Контроль физиологических параметров
Биоэлектронное управление	Трансдермальная лекарственная терапия и нефармакологическая коррекция состояния
Биокогнитивное управление	Нейробиокогнитивный информационный и сенсорно-моторный интерфейсы
Бионическое замещение	Биомиметика, искусственные органы, биотехноинтерфейсы
Биоинформационная коммуни- кабельность	Персонализированные сетевые информационные системы, кибербезопасность
Биоэнергообеспечение	Автономные биоэнергорекуперирующие системы

интеллектуальных идентифицирующих, сенсорных, корректирующих и управляющих систем в рамках развития технологий гибкой печатной электроники.

ИНЖЕНЕРИЯ ИНТЕРНЕТА ЛЮДЕЙ

Базовые направления Интернета людей отражает совокупность следующих конструкторско-технологических решений:

- **умная одежда** – пассивный субстрат с размещенными функциональными сенсорными, процессорными, энергообеспечивающими и инфокоммуникационными модулями;
- **интеллектуальный текстиль** – активный гетерогенный субстрат – носитель интегрируемых функциональных свойств;
- **искусственная электронная и фотонная кожа** – эпидермальные и трансэпидермальные мультифункциональные гибридные сенсорно-корректирующие интерактивные платформы;
- **биоинтегрируемые импланты** – идентификаторы, стимуляторы, корректоры состояния, искусственные органы.

Особенностями индустрии данных изделий являются:

- широкое использование при изготовлении изделий прецизионных аддитивных струйных, корпускулярных и импринт-технологий;
- реализация процессов с применением 2D- и 3D-субстратов различной физико-химической природы;
- развитие конвергентных технологий на основе органо-неорганической и бионеорганической гибридации.

Как отмечалось ранее [3], базисом для создания функциональных компонентов являются преимущественно аддитивные технологии: капельно-струйные, печатно-матричные трафаретные, аэрозольные и так называемые 3D-MID-технологии, основанные на лазерной

модификации поверхности субстрата. Основными особенностями данного вида технологий являются:

- гибкость, малая толщина или трехмерность субстратов;
- низкие температуры процессов формирования рисунка;
- достижение высокого пространственного разрешения [6, 7] при струйной печати (до 1 мкм) с возможностью отказа от литографических процессов;
- широкая номенклатура базовых функциональных материалов, обеспечивающих формирование металлических, диэлектрических, магнитных, пьезоэлектрических, оптических и люминесцентных композиций.

Технология гибкой печатной электроники и фотоники интегрируется с процессами 2D и 3D прецизионной сборки, в том числе с использованием утоненной бескорпусной элементной базы, что обеспечивает сохранение гибкости и конформности конструкции.

На тонких гибких подложках толщиной от десятков до сотни микрон могут устанавливаться сверхтонкие кристаллы – утоненные чипы интегральных систем, придающие им в совокупности с субстратами функции сенсоров, излучателей, процессоров, памяти. Фактически создается сложное функциональное изделие – например, современный интеллектуальный сенсорно-инфокоммуникационный гибкий модуль сверхмалой толщины (менее 200 мкм), конформно встраиваемый в любые объекты. Фактически это новый базис «интернета» различного функционального назначения: от контроля окружающей среды до мониторинга биопараметров и органозамещения.

Совокупность вышеуказанных технологических решений определяет ряд предметных индустриальных направлений гибкой печатной электроники для Интернета людей:

- мультифункциональные сенсорно-исполнительные компоненты, интегрируемые в одежду или размещаемые на теле человека для биомониторинга и коррекции состояния организма;
- микроаналитические диагностические системы типа «лаборатории на чипе» для биомедицинского экспресс-контроля;
- сверхминиатюрные информационно-коммуникационные модули, конформно интегрируемые в одежду или размещенные на теле биообъекта для его быстрой идентификации, высокоточного позиционирования и передачи информации через персонифицированные носимые электронные средства или сторонние локальные терминалы;
- биосенсорные модули, в том числе камуфлируемые, для расширения функциональных возможностей человека, компенсации утраченных функций и когнитивного управления;
- исполнительные миниатюрные конформно интегрируемые модули для бионических систем органозамещения.

СЕНСОРНО-ИНФОРМАЦИОННАЯ ПЛАТФОРМА ГИБКОЙ ПЕЧАТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

В основу формирования интеллектуальной сенсорно-информационной платформы нового поколения, конформно интегрируемой в биотехносферные инженерные разработки, были положены конструкторско-технологические решения, обеспечивающие создание разнообразных по функциональным возможностям сверхтонких изделий на основе совокупностей модулей (табл. 2). Семейство созданных модулей обеспечивает сбор, обработку, накопление и передачу информации, загрузку программного обеспечения и контроль за работой мультифункциональной системы дистанционно со смартфона, включая процесс энергообеспечения.

Комплекс работ по тополого-схемотехническому проектированию и технологической реализации функциональных модулей, включая программные средства управления печатным и микросборочным оборудованием, а также программное обеспечение для взаимодействия со всеми подсистемами смартфона, выполнен в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» на базе Инжинирингового центра «Гибкая печатная электроника и фотоника».

Выделим лишь совокупность достаточно уникальных технологий, разработанных в СПбГЭТУ «ЛЭТИ» в процессе конструкторско-технологической практической реализации сверхтонкой конформно интегрируемой сенсорно-информационной платформы нового поколения, созданной на основе технологий гибкой печатной электроники

и адаптированных к ней процессов микросборки функциональных модулей:

- декапсуляция кристаллов интегральных микросхем без потери их работоспособности;
- утонение кристаллов-чипов функциональных компонентов до 30–70 мкм с высоким выходом годных без нарушения работоспособности;
- роботизированная стековая сборка кристаллов-чипов с обеспечением их вертикальной функциональной интеграции;
- технология многослойной псевдопланаризации поверхности по периметру утоненного кристалла бескорпусного компонента, размещенного на подложке, с реализацией многоуровневой токоразводки и контактирования с выводами кристалла-чипа методом локальной капле струйной печати без нарушения сплошности и разрывов шин коммутации;
- технология локального капле струйного «доращивания» внешних контактных систем кристалла-чипа для обеспечения его монтажа на подложке методом перевернутого кристалла;
- технология высокоточного позиционирования при монтаже кристаллов-чипов интегральных микросхем методом перевернутого кристалла с формированием на подложке капле струйной печатью рельефного диэлектрического слоя определенной топологии для обеспечения комплементарного совмещения (методом вложения) выводов кристалла с контактными системами подложки;
- разработка печатного узла для оборудования высокоразрешающей капле струйной печати с субмикронным разрешением металлическими наноструктурированными композициями с использованием стимулирующего электрического поля, обеспечивающего локальный массоперенос [6, 7];
- программные средства проектирования [10], адаптированные к решению тополого-схемотехнических задач разработки гибридных функциональных модулей на основе бескорпусной элементной базы на гибкой тонкой органической подложке;
- программные средства для управления аппаратными модулями роботизированной линии гибкой печатной электроники [11] и кластера гибкой печатной электроники и фотоники в целом (рис. 1), включая реализацию процессов технохимии, комплекса операций 2D-печати и прецизионной 2D- и 3D-микросборки компонентов на гибких и твердых субстратах различной физико-химической природы.

Базовые функциональные узлы (модули), реализованные на полимерном субстрате (125 мкм), представлены в табл. 2.

В качестве унифицированных платформ, технически реализованных с использованием имеющихся

Таблица 2. Банк функциональных модулей, созданных в СПбГЭТУ «ЛЭТИ» на тонком субстрате (125 мкм) на основе технологий гибкой печатной электроники

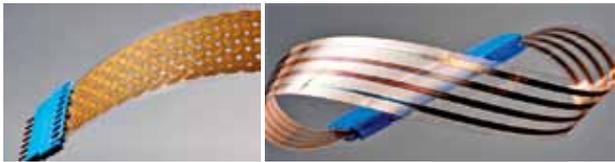
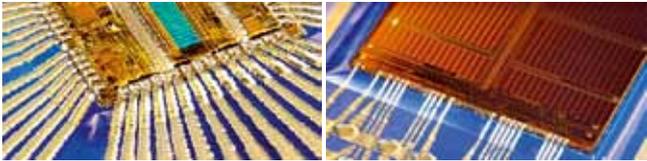
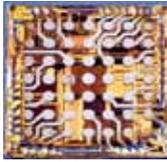
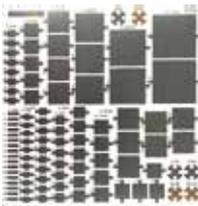
Базовые элементы и компоненты	Характеристики и особенности
<p>Многоуровневая гибкая коммутационная шина – шлейф</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Технология каплеструйной печати; • многослойная композиция: диэлектрик (субстрат) – металл – диэлектрик; • материал токопроводящих шин: наносеребро; • материал изолирующего диэлектрического слоя: полиимид
<p>Многоуровневая токоразводка от выводов утоненных кристаллов-чипов процессора и памяти</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Технология каплеструйной печати; • технология утоненного кристалла; • технология мультислойной диэлектрической псевдо-планаризации поверхности по периметру кристалла; • планализатор: полиимид; • межслойная изоляция: полиимид; • материал токоразводки: наносеребро; • ширина проводника: от 40 мкм; • толщина проводника: от 0,5 до 10 мкм
<p>Коммутационное поле для монтажа кристалла по технологии «флип-чип»</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Технология каплеструйной печати; • печатная технология диэлектрических окон; • печатная технология «доразщивания» контактных систем; • материал контактных систем: наносеребро; • материал изоляции: полиимид
<p>Резисторы [8]</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Технология каплеструйной печати; • резистивный материал: наноуглерод; • контактные системы: наносеребро; • номиналы: от 50 Ом до 10 МОм
<p>Конденсаторы [8]</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Технология каплеструйной печати; • многослойная композиция: металл – диэлектрик – металл; • диэлектрик: полиимид; • металлические обкладки: наносеребро; • толщина: от 30 мкм; • номиналы: от 20 пФ до 2 нФ
<p>Индуктивности [8]</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Технология каплеструйной печати; • многослойная композиция (катушка): металл – магнитный материал (сердечник) – металл; • материал проводников: наносеребро; • материал сердечника: наножелезо; • толщина: от 30 мкм; • номиналы: от 10 нГн до 1 мГн
<p>Антенны [9]</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Технология каплеструйной печати; • материал антенны: наносеребро; • тип антенны: диполь, патч, мультивибратор; • частота: от 100 МГц до 10 ГГц, характеристики зависят от материала подложки

Таблица 2. Продолжение

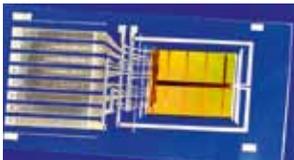
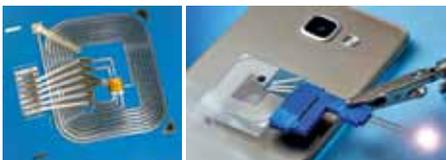
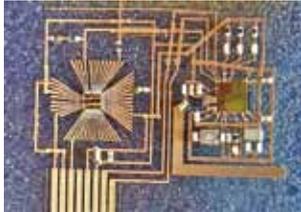
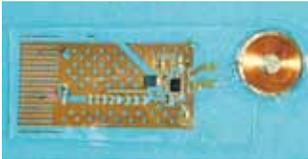
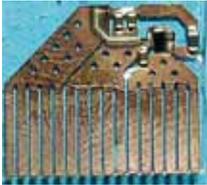
Базовые элементы и компоненты	Характеристики и особенности
<p>Модуль памяти</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Технология каплеструйной печати контактных систем; • технология утоненного кристалла памяти; • утонение чипа: от 760 до 75 мкм
<p>Блок микроконтроллера</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Технология каплеструйной печати контактных систем; • технология утоненного кристалла микроконтроллера; • утонение чипа: от 330 до 30 мкм
<p>Модуль NFC-интерфейса</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Технология каплеструйной печати; • технология многоуровневой коммутации; • материал коммутации: наносеребро; • материал изоляции: полиимид; • технология утоненного кристалла NFC; • печатная антенна; • рабочая частота: 13,56 МГц
<p>Модуль UHF-интерфейса</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Технология каплеструйной печати; • технология многоуровневой коммутации; • материал коммутации: наносеребро; • материал изоляции: полиимид; • технология утоненного кристалла UHF; • навесные низкопрофильные компоненты; • печатная антенна; • рабочая частота: от 865 до 965 МГц
<p>Модуль Bluetooth-интерфейса</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Технология каплеструйной печати; • технология многоуровневой коммутации; • материал коммутации: наносеребро; • материал изоляции: полиимид; • технология утоненного Bluetooth-кристалла; • технология утоненного микроконтроллера; • навесные низкопрофильные компоненты; • печатная антенна; • толщина модуля: 550 мкм
<p>Модуль беспроводной зарядки</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Технология каплеструйной печати; • технология многоуровневой коммутации; • материал коммутации: наносеребро; • материал изоляции: полиимид; • навесные низкопрофильные компоненты; • толщина модуля: не более 700 мкм
<p>Блок стабилизации напряжения питания</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Технология каплеструйной печати; • технология многоуровневой коммутации; • материал коммутации: наносеребро; • материал изоляции: полиимид; • навесные низкопрофильные компоненты; • толщина модуля: 650 мкм

Таблица 2. Продолжение

Базовые элементы и компоненты	Характеристики и особенности
Сенсорная платформа с микроконтроллером 	<ul style="list-style-type: none"> • Технология каплеструйной печати; • технология многоуровневой коммутации; • материал коммутации: наносеребро; • материал изоляции: полиимид; • технология утоненного кристалла микроконтроллера; • навесные низкопрофильные компоненты; • сенсорная панель
Интеллектуальная сенсорно-информационная платформа 	<ul style="list-style-type: none"> • Технология каплеструйной печати; • технология многоуровневой коммутации; • материал коммутации: наносеребро; • материал изоляции: полиимид; • технология утоненных кристаллов: процессор, память, NFC-радиоинтерфейс; • печатная антенна; • сенсорная панель

в Инжиниринговом центре «Гибкая печатная электроника и фотоника» [12] печатных и микросборочных технологий, были определены два интеллектуальных сенсорных модуля, отличающихся видом инфокоммуникационного канала (электрический или радиотехнический) и возможностью накопления информации в специализированной памяти.

Представленные приоритетные отечественные конструкторско-технологические решения, реализованные в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» в области гибкой печатной электроники, являются наиболее прогрессивными для формирования персонализированной биомедицинской

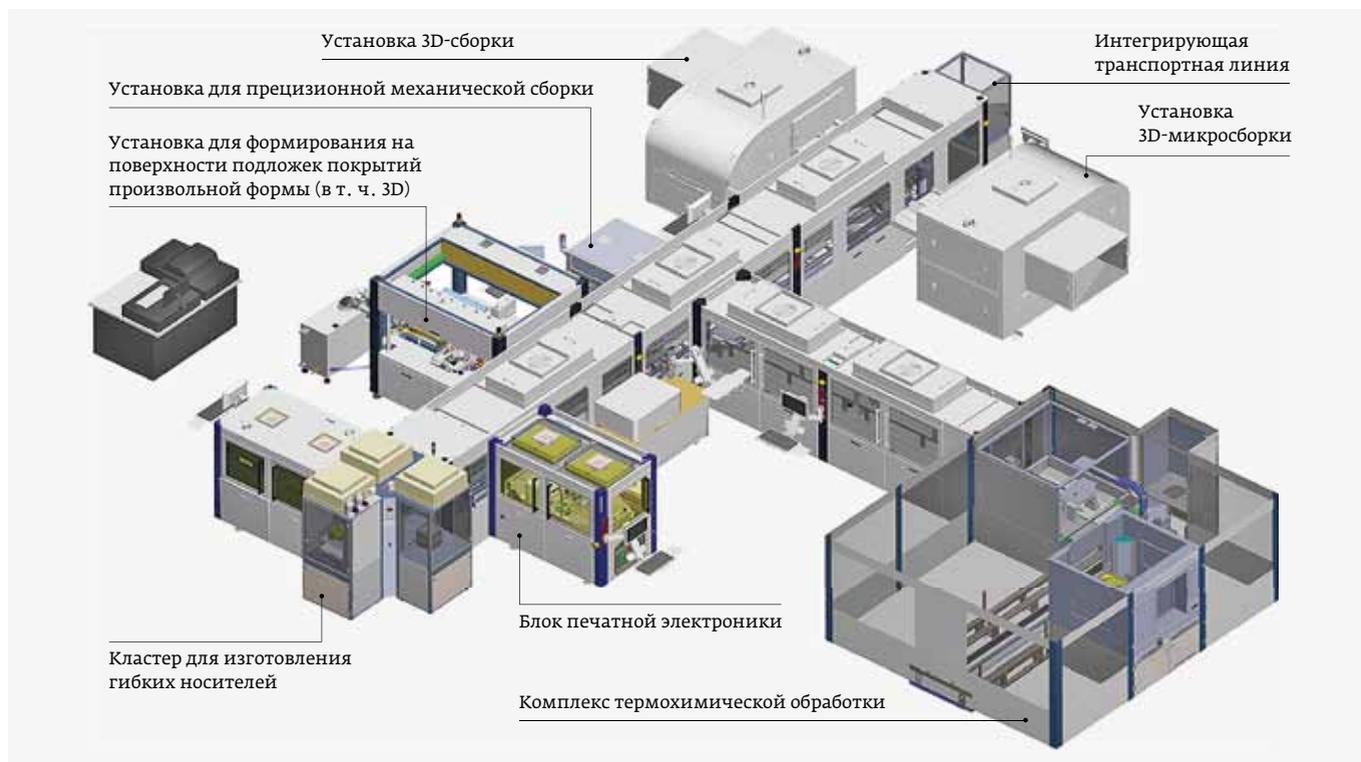


Рис. 1. Кластер гибкой печатной электроники и фотоники, разработанный в СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

техносферы. Интегрируемые в одежду эпидермальные и имплантируемые биоинтегрируемые персонифицированные интеллектуальные сенсорные, процессорные, энерго- и инфообеспечивающие микро- и наносистемные платформы на гибких конформных носителях являются базисом Интернета людей, определяющим качество жизни человека и, безусловно, неисчерпаемый рынок наукоемкой высокоинтеллектуальной и креативной продукции [13].

По нашему мнению, наибольший интерес применительно к использованию гибких печатных элементов представляют персонифицированные конформно интегрируемые в одежду интеллектуальные сенсорные и корректирующие (фармакологические и нефармакологические) устройства для контроля биомедицинских показателей, анализа активности индивида, корректировки поведения и физиологического состояния. Для интеграции пригодны любые элементы: одежда, обувь и даже кожа человека.

Одежда и эпидермальные системы представляют интерес в первую очередь для людей пожилого возраста, поскольку они позволяют постоянно мониторить не только такие параметры, как пульс, артериальное давление, содержание сахара в крови, но и двигательную активность человека, положение его тела, прием лекарственных препаратов, а также дистанционно управлять техническими устройствами в условиях нарушения органов движения. Фактически устройства гибкой печатной электроники – это конформная интеллектуальная платформа нового поколения для следующей генерации Интернета людей.

В настоящее время «умная» одежда стоит достаточно дорого, однако сама технология гибкой печатной электроники обеспечивает возможность массового тиражирования функциональных модулей. Созданные в СПбГЭТУ «ЛЭТИ» отдельные модули уже сейчас можно дистанционно интегрировать с «умным» телефоном, расширив функциональные возможности человека.

В случае технологической конформной интеграции систем гибкой печатной электроники в одежду ее стоимость должна быть даже ниже, чем при стандартном размещении на человеке в виде совокупности современных электронных устройств с системами энергосбережения.

Известное высказывание: «Доброта – это то, что слышит глухой и видит слепой» – применительно к Интернету людей может быть представлено как технология социально-ориентированной биотехносферной интеллектуальной «доброты» ноосферы, то есть современной сферы разума и технологических возможностей человека.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Tsuyoshi Sakitani, Takao Someya.** Ambient Electronics // Japanese Journal of Applied Physics. 2012. V. 51, P. 100001-1–100001-13.
2. **Лучинин В. В.** Мультидисциплинарные технологии. Гибкая электроника и фотоника // Нано- и микросистемная техника. 2013. № 12 (161). С. 2–6.
3. **Лучинин В. В., Бохов О. С., Афанасьев П. В., Мандрик И. В., Старцев В. А., Смирнов А. В., Никонова В. А.** Гибкая печатная конформная электроника. Отечественные компетенции и электронные компоненты // НАНОИНДУСТРИЯ. 2019. Т. 12. № 6(92). С. 342–350.
4. **Ильин С. Ю., Лучинин В. В.** Эпидермальные биоинтегрируемые персонифицированные интеллектуальные сенсорные и корректирующие микро- и наносистемы // Биотехносфера. 2017. № 3 (51). С. 2–14.
5. **Ильин С. Ю., Лучинин М. В.** Интеллектуальная искусственная кожа – эпидермальный мониторинг и коррекция биообъектов // Нано- и микросистемная техника. 2017. Т. 19. № 8. С. 499–507.
6. **Бохов О. С., Афанасьев П. В.** Электрогидродинамический способ печати наноразмерных 2D- и 3D-структур // Нано- и микросистемная техника. 2017. Т. 19. № 8. С. 475–478.
7. **Bochov O., Afanasev P., Grooten M., Henk van Broekhuizen, Startsev V., Mandrik I., Nikonova V., Smirnov A.** Super inkjet technology machine development for additive 3D Manufacturing // International Scientific Journal «Industry 4.0». 2019. P. 175–178.
8. **Афанасьев П. В., Бохов О. С., Мандрик И. В., Старцев В. А.** Каплетруйная технология гибкой печатной электроники для изготовления пассивных компонентов // Нано- и микросистемная техника. 2017. Т. 19. № 8. С. 465–468.
9. **Топталов С. И., Устинов Е. М., Афанасьев П. В., Бохов О. С., Мандрик И. В., Старцев В. А.** Создание антенных печатных модулей каплетруйной технологией // Нано- и микросистемная техника. 2017. Т. 19. № 8. С. 470–473.
10. **Бороденков Н. И., Бохов О. С., Смирнов А. В., Шилков В. М.** Разработка программных средств для проектирования и создания устройств гибкой печатной электроники // Нано- и микросистемная техника. 2017. Т. 19. № 8. С. 459–462.
11. **Афанасьев П. В., Бохов О. С., Лучинин В. В.** Научно-технологический комплекс экспресс-прототипирования изделий гибкой электроники и фотоники // НАНОИНДУСТРИЯ. 2013. № 6(44). С. 94–104.
12. **Лучинин В. В.** Российский пилотный проект инженерингового центра «Гибкая печатная электроника и фотоника» // Нано- и микросистемная техника. 2017. Т. 19. № 8. С. 451–455.
13. **Лучинин В. В.** Индустрия микро- и наносистем: от импортозамещения к технологическому суверенитету // НАНОИНДУСТРИЯ. 2018. Т. 11. № 6(85). С. 450–461.



ООО
ИНЖИНИРИНГОВЫЙ ЦЕНТР
«ГИБКАЯ ПЕЧАТНАЯ
ЭЛЕКТРОНИКА И ФОТОНИКА»

КОМПЛЕКС ЭЛЕКТРОГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТРУЙНОЙ МИКРО- И НАНОРАЗМЕРНОЙ 2D И 3D ПЕЧАТИ



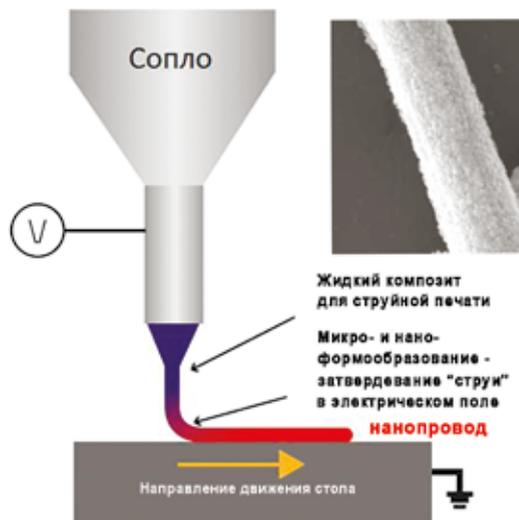
Совместная разработка DoMicro
и ООО Инжиниринговый центр

«Гибкая печатная электроника и фотоника»

Микро- и наноразмерное
формообразование
в сильном электрическом поле

ГИБКАЯ ПЕЧАТНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И ФОТОНИКА

- Бесшаблонные печатные технологии
- Субмикронное пространственное разрешение
- Многообразие печатных функциональных материалов
- Универсальная (базовая) платформа капельно-струйных 2D принтеров



Жидкий композит
для струйной печати

Микро- и нано-
формообразование -
затвердевание "струи"
в электрическом поле

нанопровод

Направление движения стола

ПРОИЗВОДСТВО 2D И 3D- ИНТЕГРИРОВАННЫХ МИКРОСИСТЕМ

- ИНТЕРНЕТ ВЕЩЕЙ
- УМНАЯ ОДЕЖДА
- ЛАБОРАТОРИИ НА ЧИПЕ
- RFID МЕТКИ

www.protolab.ru
197376 Санкт-Петербург,
ул. Проф. Попова, д.37, лит.А,
тел. 8 921 301 10 52

