4D-ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ИНТЕГРАЛЬНЫХ ТРЕХМЕРНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

4D-TECHNOLOGIES FOR PRODUCTION OF THREE-DIMENSIONAL INTEGRATED CIRCUITS

УДК 621.382.2/.3

А.Кондрашин*, А.Лямин*, В.Слепцов* / condrashin@rambler.ru

A.Kondrashin*, A.Lyamin*, V.Sleptsov*

В первой и второй частях обзора 4D-технологий производства интегральных трехмерных электронных устройств (см.: "Наноиндустрия", 2016, №3 (65), с. 90–96; №4 (66), с. 60–77) были рассмотрены классификация технологий изготовления 3D-объектов ТЭУ, сплавные, жидкостные и газофазные (сухие) 3D-MID-технологии. В продолжении публикации представлен анализ состояния и перспектив развития 3D-MID-технологий.

In the first and second parts of the review, 4D-technologies of production of integrated three-dimensional electronic devices (see: Nanoindustry, 2016, Vol.3 (65), P. 90–96; Vol.4 (66), P. 60–77) the classification of manufacturing technologies of 3D-objects TEU (three-dimensional electronic devices), floatable, liquid and gas-phase (dry) 3D MID technologies were considered. The third part is dedicated to analyses the state and prospects of development of 3D MID technology.

Увеличивающийся в последние годы интерес к технологии 3D-MID привел к развитию соответствующих технологий и оборудования. С применением 3D-MID уже выпускаются или готовятся к серийному производству изделия с современной элементной базой: светодиодами, бескорпусными кристаллами, интегральными схемами со столбиковыми выводами и т.д.

4. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ 3D-MID-ТЕХНОЛОГИЙ

Изделия на базе технологии 3D-MID в настоящее время применяются: (рис.1):

- в качестве антенны для мобильных и телекоммуникационных устройств, например, для телефонов, смартфонов, КПК и др. Так, по технологии 3D-MID на одном компактном основании может быть изготовлена антенна, работающая в сотовых сетях связи (GSM, LTE) и радиосетях передачи данных (Bluetooth и Wi-Fi), а также обеспечивающая эффективный прием сигналов спутниковых навигационных систем (GPS, ГЛОНАСС);
- в автомобильной электронике – интерес к 3D-MID-технологиям в этой сфере связан с постоянным ростом количества электронных блоков в автотранспорте, к которым предъявляются все более жесткие

требования – от уменьшения числа деталей (кабелей, соединителей и др.) до снижения стоимости сборки, повышения надежности, ускорения и упрощения монтажа;

- в медицинской технике, например, в производстве слуховых аппаратов, приборов для раннего распознавания кариеса, кардиостимуляторов, аппаратов "искусственная почка" и др. Замена традиционных печатных плат в медицинском оборудовании позволяет существенно уменьшить его размеры, упростить конструкцию, отказаться от использования кабелей и расширить функциональные возможности;
- как средства радиочастотной идентификации (RFID/NFC-метка), содержащие антенну и чип, в котором хранятся данные. Технология RFID (Radio Frequency Identification) – это система однонаправленной связи, в которой данные метки передаются к бесконтактному считывателю (ридеру). В технологии NFC (Near Field Communication), "коммуникации ближнего радиуса действия", к функции чтения, дублирующей технологию RFID, добавлены еще два равноправных режима, которые осуществляют динамическую двухстороннюю связь между меткой чтения/записи. Первый режим – это

* Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) / Moscow Aviation Institute (National Research University).

"эмуляция карты NFC" (как запись информации на смарт-карту или другое совместимое устройство, так и ее считывание с этих устройств). Второй режим – это "равноправные узлы", P2P (peer-to-peer), когда смартфоны и другие NFC-совместимые устройства вступают в радиосвязь и при этом каждый узел (peer) является как клиентом, так и выполняет функции сервера. Радиус действия NFC не превышает 10 см, что намного меньше чем у RFID-технологии. Прогнозируется, что объем продаж только RFID/NFC-меток вырастет к 2020 году более чем в два раза (табл.1).

В России уделяется пристальное внимание разработке и внедрению новых типов 3D-MID-технологий. Так, в 2015 году была разработана базовая технология многокристальной сборки СБИС на основе методов 3D-интеграции под названием "Крутизна" [2]. Данная технология предназначена для создания миниатюрных бортовых модулей вычислительных и управляющих устройств аэрокосмического комплекса. По оценкам специалистов, только за счет сокращения длины электрических связей внедрение данной технологии позволяет в 3-4 раза уменьшить размер устройства и его массогабаритные характеристики.

Активное внедрение технологий 3D-MID в производство радиоэлектронных изделий связано со следующими их достоинствами по сравнению с традиционными технологиями:

Рис.1. Сегментирование рынка 3D-MID-компонентов в мировой экономике (конец 2012 г.) [3]

Fig.1. Market segmentation of 3D-MID components in the world economy (end of 2012) [3]

- миниатюризацией изделий (сокращением массы и линейных размеров) вследствие оптимального использования трехмерного

Interest in the 3D-MID technology, which has grown in recent years, led to the development of appropriate technologies and equipment. With the use of 3D-MID are already available or ready for serial production devices with up-to-date element base: LEDs, unpacked chips, integrated circuits with tabs etc.

4. ANALYSIS OF STATE IN 3D MID-TECHNOLOGIES

Products based on the 3D-MID technology are currently used in the following areas (Fig.1):

- Antennas for mobile and telecommunication devices, such as phones, smartphones, PDAs etc. For example, with use of 3D-MID technology antenna for mobile communication networks (GSM,

LTE), radio data transmission (Bluetooth and Wi-Fi) and satellite navigation systems (GPS, GLONASS) can be manufactured on one compact base;

- Automotive electronics. Interest in 3D-MID technology in this area is associated with a constant increase in the number of electronic components in vehicles, which are subject to more stringent requirements from reduction of the number of parts (cables, connectors, etc.) to reduction of the cost, acceleration and simplification of assembly, improving reliability;
- Medical equipment, for example, in the manufacture of hearing aids, devices for the early detection of caries, pacemakers, artificial kidney apparatus,

etc. Replacement of traditional printed circuit boards in medical equipment can significantly reduce its size, simplify the design, to abandon the use of cables and to extend the functionality;

- Means of radio frequency identification (RFID/NFC tag) containing an antenna and a chip in which data is stored. RFID is a system for unidirectional communication in which the data is transmitted from the tag to the contactless reader. In NFC (Near Field Communication) to the read function, which duplicates the RFID technology, the two modes are added, which provide dynamic bidirectional communication between the tags for

Таблица 1. Прогноз объема продаж печатной памяти 3D-MID [1]

Table 1. Sales forecast for printed memory of 3D-MID [1]

Вид продукции Type of product		Прогнозируемый объем продаж, млрд. долл. США Predicted sales, billion\$	
		2010	2020
Бесконтактные метки Contactless tags	Розничные RFID-метки Retail RFID-tags	0,5	2,5
	Билеты Tickets	9	Н.д.*
	"Умные этикетки" для вещей (устройств) с IP-протоколом Smart labels for IP-based devices	Н.д.*	14
Метки с экранами Tags with screens	Интерактивная упаковка Interactive packaging	Н.д.*	5
	Ценники Price tags	Н.д.*	10
Метки с датчиками Tags with sensors	Мониторинг скоропортящихся продуктов, лекарств, химических веществ и т.д. Monitoring of perishable foods, medicines, chemicals, etc.	1,4	3,2

* Н.д. – "нет данных" / No data

пространства – как внутренних или внешних несущих конструкционных поверхностей, так и объемов конечных изделий;

- увеличением степени интеграции печатных плат за счет уменьшения площадей, занимаемых под дорожки, контактные площадки и т.д.;
- высокой гибкостью проектирования благодаря использованию подложек различных форм и размеров;
- повышенной надежностью конечных изделий за счет исключения навесных элементов (кабелей, соединителей и др.);

- уменьшением материалоемкости производства;
- увеличением объемов выпуска готовых изделий благодаря параллельному выполнению технологических операций сборки и монтажа;
- широким спектром используемых материалов оснований (подложек) и функциональных слоев.

Сравнительный анализ возможностей различных 3D-MID-технологий изготовления трехмерных электронных устройств (рис.2) выявил, что с точки зрения разрешения формируемых изображений (минимального размера элемента структуры) предпочтительно использование струйной, струйно-аэро-

read and write. The first mode is "NFC card emulation" (recording the information on a smart card or other compatible device and read from these devices). The second mode is P2P (peer to peer), where smartphones and other NFC-enabled devices come into radio communication and each node (peer) is both a client and performs the functions of the server. Radius of action of NFC does not exceed 10 cm, which is much smaller than that of the RFID technology. Predicted sales of only RFID/NFC tags will grow by 2020 more than twice (tab.1).

In Russia attention is paid to the development and introduction of new types of 3D-MID technology. In particular, in 2015, a basic technology of multichip assembly of super large scale integration circuits based on the methods of 3D integration called "Krutizna" was developed [2]. This technology is intended for creation of a miniature on-board modules for compute and control devices for aerospace. According to experts, only due to reduction of the length of electrical connections, the introduction of this technology allows to reduce the size of the device and

its weight and dimensions by 3-4 times.

Active introduction of 3D MID technology in the manufacture of electronic products is caused by their following advantages in comparison with traditional technologies:

- miniaturization of products (reduction in mass and linear dimensions) due to the optimal use of three-dimensional space: of an internal or external load-bearing structural surfaces, and volumes of end-products;
- an increase in the degree of integration of printed circuit boards

Рис.2. Сравнение характеристик 3D-MID-технологий изготовления квази-4D-объектов по следующим критериям: а – разрешению изображений (минимальному размеру элемента структуры); б – диапазону толщин слоев, формируемых за рабочий цикл для одного рабочего элемента 3D-MID-структуры; в – скорости формирования слоев в рабочем режиме.
Fig.2. Comparison of the characteristics of 3D-MID-technologies for production of quasi-4D objects on the following criteria: а – resolution (minimum size of the structure element); б – thickness of layer formed during the operating cycle for a single item of 3D-MID-structure; в – speed of formation of layers in production mode.

by reducing the space occupied by paths, pads, etc.;

- high design flexibility thanks to the use of substrates of various shapes and sizes;
- increased reliability of end product due to the exclusion of external components (cables, connectors, etc.);
- reduction of consumption of materials for production;
- increased production volumes of finished products due to parallel execution of operations of assembly and packaging;
- wide range of materials for bases (substrates) and functional layers.

A comparative analysis of capabilities of different 3D MID-technologies in manufacturing of three-dimensional electronic devices (Fig.2) revealed that from the point of view of resolution of the images (minimum size of the structure element) the use of jet sputtering, aerosol jet, laser direct structuring and 3D photolithography is preferably (Fig.2a).

In terms of possible thickness of formed per cycle functional layers (Fig.2b), 3D MID-technologies can be divided into three groups:

- thermo-active technologies with the thickness of

layers from 100 to 200 microns (insert molding and two step molding);

- thick-film technologies with the thickness of layers from 10 to 200 microns (laser structuring and 3D photolithography);
- thin-film technologies with the thickness of layers less than 10 microns.

Depending on the speed of formation of the functional layers during one cycle (Fig.2c), technologies can be divided into two groups:

- volume forming technologies with the speed of the formation of structures from 0.5 to 60 mm/

зольной технологий, лазерного структурирования и 3D-фотолитографии (рис.2а).

С точки зрения возможной толщины формируемых за один рабочий цикл функциональных слоев (рис.2б) 3D-MID-технологии можно подразделить на три группы:

- термоактивные технологии с толщинами слоев более 100–200 мкм (литье со вставкой и двухшаговое литье);
- толсто пленочные технологии с толщинами слоев от 10 до 200 мкм (лазерное структурирование и 3D-фотолитография);
- тонко пленочные технологии с толщинами слоев менее 10 мкм.

По скорости формирования функциональных слоев за один рабочий цикл (рис.2с) технологии можно подразделить на две группы:

- объемно-формные технологии со скоростью формирования структур от 0,5 до 60 мм/мин (литье со вставкой и двухшаговое литье);
- пленочные технологии со скоростью формирования структур менее от 0,5 мм/мин.

С точки зрения номенклатуры используемых материалов (табл.2) все известные в настоящее время технологии можно подразделить на следующие группы:

- "универсальные" технологии, позволяющие наносить практически любой материал на почти любые типы подложек без ограничений по видам материалов и структур. К данной группе относятся плазменные технологии атмосферного давления (газоплазменная технология и электродуговой плазматрон);

- "специализированные" технологии, которые можно подразделить на технологии "свободной подложки", позволяющие использовать практически любые типы подложек без ограничений по видам материалов и структур (струйное и струйно-аэрозольное напыление) и технологии "свободных функционалов", позволяющие использовать практически любые типы функциональных материалов или даже устройств с определенными типами подложек (разновидности литья со вставкой);
- "узкоспециализированные" технологии, использующие только определенные типы функциональных материалов, неразрывно связанные с определенным типом оснований (двухшаговое литье, лазерное структурирование и 3D-фотолитография).

Таким образом, выбор той или иной 3D-MID-технологии определяется параметрами изделий, материалами, серийностью и объемом производства.

Конечно, технологии 3D-MID не лишены целого ряда недостатков, так как не решают несколько базовых проблем, связанных с формированием 4D-элементов ТЭУ, таких как:

- необходимость использования материалов ТЭУ, способных выдерживать достаточно высокие температуры при пайке (до 260 °С), поэтому широкое внедрение 3D-MID-технологий ограничивается высокой стоимостью функциональных и вспомогательных материалов;
- необходимость использования минимум двух различных технологических процессов и маршрутных карт, то есть невозможность создания ТЭУ в едином технологическом цикле;

min (insert molding and two step molding);

- film technologies with the speed of the formation of structures of less than 0.5 mm/min.

From the point of view of the range of the used materials (table.2) all currently known technologies can be divided into the following groups:

- "versatile" technologies that enables deposition of almost any material to almost any kind of substrates without restrictions on the types of materials and structures. This group includes plasma technologies of atmospheric

pressure (flamecon and plasma dust);

- "specialized" technologies that can be divided into technologies of "free substrate", which allows to use almost any type of substrates without restrictions on the types of materials and structures (jet sputtering and aerosol jet), and technologies of "free functional", which allows to use virtually any type of functional materials or even devices with certain types of substrates (insert molding);
- "highly specialized" technologies, which use only certain types of functional materials

associated with a particular type of substrate (two step molding, laser structuring and 3D photolithography).

Thus, the choice of a particular 3D MID-technology is determined by the parameters of products, materials and production volume.

Of course, the 3D-MID technologies have a number of disadvantages, as it does not solve several basic problems associated with the formation of 4D-elements of TEU:

- need to use materials of TEU that can withstand a sufficiently high temperature during

Таблица 2. Материалы 3D-MID-технологий

Table 2. Materials of 3D-MID-technology

Наименование 3D-MID-технологий 3D-MID-technology		Материал основания Substrate	Технология изготовления основания Technology of substrate manufacturing	Функциональный материал Functional material	Вспомогательный материал Auxiliary material
Литье со вставкой Insert molding		Термопластики Thermoplastics	Однокомпонентное литье Single component molding	Без ограничений No limits	—
Двухшаговое литье Two step molding	PCK	Токопроводящие поли- меры с наполнителями в виде частиц металлов Conductive polymers with metal particles	Однокомпонентное литье Single component molding	Металлы (медь, никель, золото) Metals (copper, nickel, gold)	Неметаллизированный термополимер второго шага (впрыска) Non-metallized thermopolymer of second step (injection)
	PA	Неметаллизированный полимер Non-metallized polymers			Токопроводящие термо- полимеры второго шага (впрыска) Conductive thermopolymer of second step (injection)
	SKW				Проводящий подслон и неметаллизированный тер- мополимер (второй впрыск) Conductive sublayer and non- metallized thermopolymer (second injection)
Лазерное структуриро- вание Laser direct structuring	LDS-C	Композиционные полимеры со специаль- ными добавками в виде частиц металлов Composite resins with metal particles	Одно- и многоком- понентное литье Single and multi-com- ponent molding	Металлы (медь, никель, золото...) Metals (copper, nickel, gold...)	—
	LDS-P	Полимеры, керамика... Polymers, ceramics...			Токопроводящая "краска" Conductive "ink"
	LSS				Материалы гальванорезиста Galvano resist materials
Струйное распыление Jet sputtering		Без ограничений No limits	В зависимости от подложки Depending on the substrate	"Чернила" с напол- нителями субми- кронного диапазона (частицы метал- лов, диэлектрики, полупроводники) "Ink" with submicron fillers (particles of metals, dielectrics, semiconductors)	—
Струйно-аэрозольное напыление Aerosol jet					В основном инертные газы (транспортные и защитные) Mainly inert gases (transport and protective)
3D-фото-литография 3D photolithography		В основном диэлек- трики (полимеры, керамика...) Mainly insulators (poly- mers, ceramics...)	Одно- и многоком- понентное литье Single and multi-com- ponent molding	Металлы (медь, никель, золото...) Metals (copper, nickel, gold...)	Материалы фоторезиста Photoresist materials
Газо-плазменное осаждение Flamecon		Без ограничений No limits	В зависимости от подложки Depending on the substrate	Без ограничений No limits	Химически активные газы (кислород, ацетилен, водород) Chemically active gases (oxy- gen, acetylene, hydrogen)
Осаждение электроду- говым плазматроном Plasma dust					Разнообразные химически активные и инертные газы Chemically active and inert gases

- трудности с монтажом электронных компонентов к основаниям, для чего необходимы прецизионные трехмерные системы электронной сборки по нескольким осям со сложными оптическими системами;
- невозможность изготовления полноценных 4D-деталей ТЭУ с использованием в качестве функциональных элементов всех свободных граней, ребер и объема (или всей толщины стенок).

Основываясь на проведенном сравнительном анализе различных методов создания квази-4D-изделий с использованием технологий 3D-MID, можно сделать вывод, что для дальнейшего их развития и внедрения в серийное производство необходимы следующие решения:

- системы высокопроизводительных многофункциональных установок, позволяющих в одном производственном здании (помещении) получать готовое изделие, применяя совершенно разные технологии (от лазерного структурирования до гальванического осаждения металла), объединенные единым технологическим процессом;
- системы высокопроизводительных гибридных установок, позволяющих совмещать несколько различных методов обработки или нанесения различных типов материалов одним методом. Например, для увеличения производительности и расширения номенклатуры материалов, наносимых струйно-аэрозольным способом, необходимо создавать установки с матрицей головок (сопел) с независимой системой подачи (впрыскивания) материалов. Такая матрица должна позволять осуществлять как

высокоскоростное нанесение одного материала, так и нанесение различных типов материалов, например, с разной температурой плавления;

- сети непрерывного технологического контроля параметров изделия, которые с помощью, например, системы видеокамер, датчиков или 3D-сканеров для неразрушающего контроля позволяли бы осуществлять выбраковку изделий на всех стадиях производства, включая самые ранние;
- проводное и беспроводное подключение сети из датчиков и блоков к системе автоматизированного управления;
- новые принципы формирования функциональных структур и материалов, особенно для создания изделий микронного и субмикронного диапазонов.

5. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ 3D-ТЕХНОЛОГИЙ ТЭУ

Конечной целью развития современных 3D-технологий является разработка промышленных решений, позволяющих создавать 4D-объекты ТЭУ (табл.2). Но данная цель слишком сложна для реализации за одно поколение технологий, поэтому, с нашей точки зрения, целесообразно выделить основные задачи текущего этапа развития:

- создание "полых" 4D-объектов ТЭУ на базе корпусов РЭС;
- создание "монолитных" трехмерных ИС с их последующим монтажом в "полые" 3D-корпуса ТЭУ (изготовленные, например, с применением технологии 3D-MID);
- создание "монолитных" трехмерных интегральных устройств.

soldering (up to 260°C), so the widespread introduction of 3D MID-technology is limited by high cost of operating and supporting materials;

- need to use at least two different processes and route cards, that is, the inability to create a TEU in a single technological cycle;
- difficulties with the mounting of electronic components to the substrate, which requires precision three-dimensional system of electronic assembly on several axes with complex optical systems;
- impossibility of making a full-fledged 4D-parts of TEU using

as functional elements of all free faces, edges, and volume (or the entire thickness of the walls).

Based on a comparative analysis of different methods of creating a quasi-4D products using the 3D-MID technology it can be concluded that the following solutions are necessary for their further development and introduction into production:

- systems of high performance multi-function facilities, allowing in the same industrial building (premises), to obtain the finished product, using entirely different technologies

(from laser structuring to the galvanic deposition of metals) combined in a single technological process;

- system of high-performance hybrid equipment, which allow to combine several different methods of processing or deposition of various types of materials in a single method. For example, to increase productivity and expand the range of materials that are deposited by aerosol jet it is necessary to create installations with a matrix of heads (nozzles) with an independent supply system (injection) of materials. Such a

Поскольку возможно параллельное решение данных задач, в классификацию объектов ТЭУ необходимо ввести понятие "поколений" (рис.3).

4D-объекты первого поколения формируются послойно с использованием только толщины стенок конструктивных элементов изделия в качестве функциональных элементов. Например, весь объем корпуса электронного устройства может использоваться для формирования как слоев проводников, так и электрических цепей, состоящих из дискретных сопротивлений, конденсаторов и т.д.

В бескорпусных 4D-объектах второго поколения реализуется послойное формирование монолитных трехмерных интегральных схем (ТИС), состоящих из взаимосвязанных слоев проводников и электрических цепей, которые включают интегральные сопротивления, конденсаторы и т.д. Последующей операцией технологического процесса изготовления ТЭУ является корпусирование монолитных ТИС с их последующей разводкой.

Для монолитных 4D-объектов второго поколения характерно послойное формирование трехмерных устройств, состоящих из "встроенного" внешнего защитного корпуса с соответствующими внешними выводами и монолитных ТИС на базе как интегральных, так и дискретных сопротивлений, конденсаторов и т.д.;

4D-объекты третьего поколения – корпусные или бескорпусные пластичные (гибкие) устройства, состоящие из нескольких взаимосвязанных пластичных объектов. Например, противоударный мобильный телефон включает следующие компоненты:

- гибкую многослойную печатную материнскую плату, выполненную по технологии бескорпусных 4D-объектов второго поколения;
- многослойный ультратонкий (порядка 1 мм) пластично-гибкий полимерный дисплей, полученный по технологии OLED или PLED [3, 4], который характеризуется низким энергопотреблением, высоким разрешением (UHD 4K или 8K), высокой динамической контрастностью и широкой цветовой гаммой;
- экологически чистый сверхъёмкий гибкий полимерный источник тока (аккумулятор) [5];
- пластично-гибкий полимерный корпус [6].

В качестве примера 4D-объекта второго поколения сравним автономные радиопередатчики УКВ-диапазона, выполненные по современной технологии печатных плат с компонентами, монтируемыми на поверхность ("поверхностный монтаж"), и перспективной технологии, основанной на 3D-трассировке.

Устройство (рис.4) состоит из трех VT-биполярных транзисторов, 11 конденсаторов, пяти резисторов, двух катушек индуктивности, микрофона, антенны и элемента питания. Генератор ВЧ-сигнала собран на базе транзисторов VT2 по известной трехточечной схеме. Контур настроен на частоту 96 ± 5 МГц. В настоящее время данная электрическая схема, смонтированная на печатной плате на SMD-компонентах, имеет габаритные размеры $15 \times 25 \times 15$ мм (рис.5).

Проектирование данного устройства в редакторе SolidWorks с использованием 3D-трассировки объекта

matrix should allow high-speed deposition of one material and the deposition of various types of materials, for example, with different melting point;

- networks of continuous control of product parameters with use of camera systems, sensors, 3D scanners for non-destructive testing, which allows to carry out the culling of products at all stages of production, including the earliest;
- wired and wireless connection of sensors and blocks to automated control system;
- new principles of formation of functional structures and

materials, particularly for manufacture in micron and submicron ranges.

5. PROSPECTS OF DEVELOPMENT OF 3D TECHNOLOGIES FOR TEU

The ultimate goal of the development of modern 3D technology is the development of industrial solutions, allowing to create 4D objects of TEU (table.2). But this goal is too complicated to implement in one generation of technology, so, from our point of view, it is appropriate to highlight the main challenges of the current stage of development:

- creation of "hollow" 4D objects of TEU on the basis of cases of elements;
- creation of a "monolithic" three-dimensional IC with their subsequent installation into the "hollow" 3D cases of TEU (for example, made using the 3D-MID technology);
- creation of a "monolithic" three-dimensional integrated devices.

Since these tasks can be solved in parallel, it is necessary to introduce the concept of "generations" (Fig.3) in the classification of TEU.

4D-objects of the first generation are formed layer by layer

Рис.3. Классификация технологий изготовления 4D-объектов микрометрового диапазона ТЭУ: а – 4D-объекты первого поколения (1G 4D); б – 4D-объекты второго поколения (2G 4D) в бескорпусном исполнении; в – монолитные 4D-объекты второго поколения (2G 4D); д – гибкие 4D-объекты третьего поколения (3G 4D)

Fig.3. Classification of manufacturing technologies for micrometer 4D-objects of TEU: а – 4D-objects of the first generation (1G 4D); б – 4D-objects of the second generation (2G 4D); в – monolithic 4D-object of the second generation (2G 4D); д – flexible 4D-objects of the third generation (3G 4D)

using only the wall thickness of structural elements as functional elements. For example, the entire volume of the case of the electronic device can be used for the formation of the conductor layers and electrical circuits consisting of discrete resistors, capacitors, etc.

In uncased 4D-objects of the second generation the layer-by-layer formation of a monolithic three-dimensional integrated circuits (3D IC), consisting of interconnected layers of electrical conductors and circuits that include integrated resistors, capacitors, etc. is implemented.

Subsequent operation of manufacture of a TEU is a encapsulation of monolithic 3D IC and their subsequent wiring.

For monolithic 4D-objects of the second generation is typical the layer-by-layer formation of three-dimensional devices consisting of a "built-in" external protective case with the corresponding external connections and of monolithic 3D IC on the basis of both integral and discrete resistors, capacitors, etc.

4D objects of the third generation are packaged and unpackaged plastic (flexible) devices consisting of several

interconnected plastic objects. For example, shockproof mobile phone, includes the following components:

- flexible multilayer printed motherboard manufactured with use of technology of unpackaged 4D-objects of the second generation;
- multilayer ultrathin (about 1 mm) plastic flexible polymer display, obtained according to the OLED or PLED technology [3, 4], which is characterized by low power consumption, high resolution (UHD 4K or 8K), high dynamic contrast and wide color gamut;

Рис.4. Трехточечная электрическая схема радиопередатчика УКВ-диапазона с дальностью 350 м

Fig.4. Three-point circuit of VHF radio with a range of 350 m

при замене части элементной базы (рис.6) свидетельствует о возможности изготовления данного устройства с габаритами $6 \times 6 \times 5$ мм, то есть уменьшения его размеров в 30 раз.

Сравнительный анализ современных (середина 2016 г.) технологий создания 4D-объектов ТЭУ (табл.3) позволяет сделать три основных вывода.

Во-первых, в настоящее время разработаны только отдельные 3D-технологии изготовления ТЭУ, принципиально позволяющие получать интегральные структуры микронного диапазона. Так, например,

литьем со вставкой возможно изготовление 3D или квази-4D функциональной ячейки изделия, а далее, применяя лазерное структурирование и гальваническое наращивание, можно создать пассивную часть изделия.

Во-вторых, ни одна из существующих технологий не позволяет создавать в едином цикле интегральные одноуровневые и многоуровневые квази-4D-объекты ТЭУ, поэтому ближайшая перспектива развития связана с интеграцией различных типов технологий в единую произ-

- environmentally friendly ultra-capacitive flexible polymer power source (battery) [5];
- flexible plastic case [6].

As an example of 4D-object of the second generation it is possible to compare standalone VHF-transmitters, one of which is made by up-to-date technology of printed circuit boards with components mounted on the surface, and another is made using promising technology, based on 3D tracing.

The device (Fig.4) consists of three VT-bipolar transistors, 11 capacitors, five resistors, two inductors, microphone, antenna

and battery. The generator of the RF signal is assembled at the base of the VT2 transistor using the known three-point scheme. Circuit is tuned to the frequency of 96 ± 5 MHz. Currently, this electrical circuit mounted on a printed circuit board using SMD components, has overall dimensions of $15 \times 25 \times 15$ mm (Fig.5).

The design of the device in SolidWorks using the 3D tracing of the object with replacing a part of the circuitry (Fig.6), testifies to a possibility of manufacture of this device with dimensions $6 \times 6 \times 5$ mm, that is reduction of his size by 30 times.

Comparative analysis of modern (mid-2016) technologies for creating 4D objects of TEU (table.3) allows to draw three main conclusions.

First, currently are developed only certain 3D manufacturing technologies of TEU, which are essentially allowing to obtain the integral structure of micron range. So, for example, by insert molding it is possible to manufacture a quasi 3D or 4D functional cell of products and further, using laser structuring and galvanic deposition, it is possible to create a passive part of the product.

Таблица 3. Сравнительная характеристика технологий изготовления ТЭУ

Table 3. Comparative characteristics of the technologies for TEU production

Наименование технологии Production technology	Области применения (в н.в.) Applications (in the present)	Создание объемных изделий Creation of bulk products	Формирование элек- тронных схем Production of electronic circuits	Интегральная технология Integrated technology
Квази-3D Quasi-3D	Печатная электроника Printed electronics	–	+	+
3D	Трехмерная печать 3D printing	+	–	+
Квази-4D Quasi-4D	3D-MID	+	+	–
4D	—*	+	+	+

* Технологии отсутствуют / No technology

Рис.5. Электрическая схема, собранная и смонтированная на печатной плате на SMD-компонентах

Fig.5. Electric circuit, assembled and mounted on a printed circuit board with SMD components

водственную линейку. Для этого необходимо разработать оборудование, отвечающее следующим требованиям:

- ТЭУ должно изготавливаться на основе трехмерной компьютерной модели, созданной средствами САПР;
- элементы электронной схемы должны формироваться разными блоками функциональных головок на всех свободных гранях и ребрах (по возможности одновременно), а также в объеме (или по всей толщине стенок) изделия;
- создание ТЭУ должно происходить в непрерывном технологическом цикле в единой роботизированной 3D-системе;
- изготовление или установка и монтаж как пассивных, так и активных элементов, а также линий межсоединений;

Second, none of the existing technologies allows to create integrated single-level and multilevel quasi-4D objects of TEU in a single cycle, therefore, the immediate prospect of development is associated with the integration of different types of technologies in a single production line. It is necessary to develop equipment that meets the following requirements:

- TEU should be made on the basis of three-dimensional computer models created by CAD tools;
- the elements of the electronic circuit should be formed by different blocks of functional

heads on all the free edges (possibly simultaneously) and in volume (or across the wall thickness) of the product;

- creation of the TEU should occur in a continuous process cycle in a single 3D robotic system;
- manufacture or installation of both passive and active elements and lines of interconnects;
- system must be compatible with the manufactured functional materials (paints, inks) used in printed electronics to create conductors and active and passive elements.

As an example of one of the first steps towards the creation of manufacturing technologies of integrated single-level and multilevel quasi-4D objects of TEU it is possible to consider the existing hybrid technology, which allows to combine the installation of discrete electronic components and the creation of conductive layers [7, 8]. Using this technology the wing for the UAV with integrated printed electronic circuit composed of the discrete sensor (or chips) and conductive metal tracks, which works as antennas and power supply, was manufactured. Polymer

Рис.6. Электрическая схема, выполненная в редакторе SolidWorks для реализации 4D-технологии

Fig.6. Electrical circuit made in SolidWorks for the implementation of 4D-technology

- установка должна быть совместима с выпускаемыми функциональными материалами (красками, чернилами), применяемыми в печатной электронике для создания проводников, а также и активных и пассивных элементов.

В качестве примера одного из первых шагов на пути создания технологий изготовления интегральных одноуровневых и многоуровневых квази-4D-объектов ТЭУ можно привести существующую гибридную технологию, которая позволяет сочетать установку дискретных электронных компонентов и создание проводящих слоев [7, 8]. При помощи данной технологии было изготовлено крыло для БПЛА с интегрированной печатной электронной схемой, состоящей из дискретного датчика

(или микросхемы) и проводящих металлических дорожек, которые выполняют функции антенны и системы энергоподачи. Для создания несущего конструкционного элемента была использована экструзия полимера (FDM) – технология 3D-печати. Гибридная технология объединила метод экструзии расплавленным металлом для формирования элементов схемы и проводников [7] и 3D-MID-метод струйно-аэрозольного напыления (Aerosol-Jet) [8].

Третий вывод заключается в том, что долгосрочная перспектива создания 4D-объектов ТЭУ должна быть связана с разработкой принципиально новых технологий.

Основными лимитирующими факторами изготовления новых объектов ТЭУ является необходи-

extrusion (FDM, a 3D printing technology), has been used to create the carrier. Hybrid technology combined extrusion of molten metal for forming the circuit elements and conductors [7] and 3D-MID method of aerosol jet [8].

The third conclusion is that the long-term perspective of creating 4D objects of TEU should be linked to the development of fundamentally new technologies.

The main limiting factors in the production of new objects of TEU is a need to develop technologies and equipment, providing reduction of size and increase in

the degree of integration of elements. That is, the development of new technology should be associated, primarily, with the increased resolution of the basic method based on a certain physical principle. Thus, upon transition to the submicron range the analysis of existing methods of miniaturization (creation of semiconductor TEU of appropriate dimensions) showed a significant reduction in the number of possible physical principles of TEU (Fig.7). One of solutions to this problem is the widespread introduction of group methods of functional electronics, providing

a fundamental replacement of the basic methods of design of TEU and the creation of new element base. For example, instead of conductive metal interconnects (paths) it is possible to use optical waveguides, and lasers of various types as signal generators. ■

This article concludes a series of papers (see: Nanoindustry, 2016, Vol.3 (65), P. 90–96 and Nanoindustry, 2016, Vol.4 (66), P. 60–77), published in the framework of the Federal target program "Development of electronic component base for electronics", project N 14.429.11.0004.

Рис.7. Этапы и перспективы развития современных физических методов формирования ТЭУ (дорожная карта)

Fig.7. Stages and prospects of development of modern physical methods for the TEU formation (road map)

мость разработки технологий и оборудования, обеспечивающих уменьшение размеров и увеличение степени интеграции элементов ТЭУ. То есть, разработка новой технологии должна быть связана, в первую очередь, с увеличением разрешающей способности базового метода, основанного на определенном физическом принципе. При этом, при переходе в субмикронный диапазон анализ существующих методов микроминиатюризации (создания полупроводниковых ТЭУ соответствующих размеров) показал значительное сокращение числа возможных физических принципов ТЭУ (рис.7). Одним из решений данной проблемы является широкое внедрение групповых методов функциональной электроники, обеспечивающих принципиальную замену части базовых методов конструирования ТЭУ и создание новой элементной базы. Так, вместо токопроводящих металлических линий межсоединений (дорожек) предполагается использование оптических волноводов, а в качестве генераторов сигналов – лазеров различных типов.

Настоящая статья завершает цикл публикаций (см.: "Наноиндустрия", 2016, №3 (65), с. 90–96 и "Наноиндустрия", 2016, №4 (66), с.60–77), выполненных в рамках Федеральной целевой программы "Развитие электронной компонентной базы радиоэлектроники" по теме N 14.429.11.0004.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sutija D. Smarter everyday powered by printed electronics // Material International Exhibition and

Conference for the Printed Electronics Industry (LOPEC 2013).

2. "Крутизна" поможет ОПК создать миниатюрные системы для космоса и авиации / Анонс технологии "Крутизна" / Материалы официального сайта объединенной приборостроительной корпорация "Ростех" (<http://rostec.ru/news/4517313>).
3. Кондрашин А.А., Слепцов В.В., Лямин А.Н. Многофункциональность технологий органических светодиодов (Oled /Pled) // Успехи современной радиоэлектроники. 2011. № 6. С. 59–64.
4. Кондрашин А.А., Лямин А.Н., Слепцов В.В. Применение органических светодиодных структур в дисплейных матрицах // Светотехника. 2011. № 3. С. 44–46.
5. Слепцов В.В. Необратимость и нелинейность как базовые физико-химические основы, обеспечивающие создание новых материалов и систем методами нанотехнологий поверхности // Нанотехнология. 2013. № 8 (26). С. 7–15.
6. Изогнутый смартфон LG G Flex 3 / Обзор материалов выставки потребительской электроники CES (Consumer Electronics Show) 2015. Лас-Вегас, США. Январь 2016. <https://www.cesweb.org/>.
7. The Voxel8 Developer's Kit 3D Printer // Материалы официального сайта компании Voxel8 Inc. (<http://www.voxel8.co/printer/>).
8. Малюха В. Stratasys и Optomec объединяют силы, чтобы обеспечить 3D печать электронных устройств. http://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=15224.