

Содержание

Перечень сокращений и условный обозначений	6
Предисловие	12
Введение	15
ГЛАВА 1. ПЕЧАТНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА ДЛЯ КВАЗИ-3D-ТЭУ	18
1.1. Технологии фиксированной печати	20
1.1.1. Трафаретная печать (screen printing)	20
1.1.2. Глубокая печать (gravure printing)	24
1.1.3. Высокая печать (flexographic)	26
1.1.4. Горячее тиснение (hot pressing/embossing)	28
1.1.5. Офсетная печать (offset)	30
1.1.5.1. Однократная форма	32
1.1.5.2. Перезаписываемая форма	33
1.1.6. Нанопечатная литография (NIL)	35
1.1.6.1. Нанопечатная термическая литография	36
1.1.6.2. Нанопечатная фотолитография	37
1.1.6.3. Микроконтактная печать (μ CP)	39
1.1.7. Ударная консолидация (Cold Spray)	42
1.1.8. Общие выводы по технологиям фиксированной печати	44
1.2. Технологии нефиксированной печати	44
1.2.1. Матричная печать (dot matrix printing)	45
1.2.2. Электрография (electrophotography)	46
1.2.3. Ризография (Risography)	48
1.2.4. Струйная печать (BPM)	49
1.2.5. Термография (Thermography)	52
1.2.5.1. Термотрансферный перенос (thermotransfer)	53
1.2.5.2. Сублимационная технология (sublimatic heat transfer printing)	55
1.2.5.3. Лазерная абляция (Laser ablation)	56
1.2.6. Общие выводы по технологиям нефиксированной печати квази-3D-объектов	57
1.3. Сравнение технологий формирования квазиобъемных фигур на базе 2D-подложек	58



ГЛАВА 2. 3D-ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ТЭУ	64
2.1. Технология склеивания порошков (3DP-технология)	66
2.2. Технологии теплового воздействия на конструкционный материал до процесса формирования слоя	68
2.2.1. Экструзия (выдавливание вязкого расплава) материала (extrusion)	68
2.2.2. Струйное распыление расплавленного материала (DODJet, LMJP и др.)	71
2.3. Технологии теплового воздействия на конструкционный материал в процессе формирования слоя	74
2.3.1. Ламинирование листовых материалов (LOM)	74
2.3.2. Селективное тепловое спекание (SHS)	76
2.3.3. Селективное лазерное спекание порошков (SLS/SLM)	77
2.3.4. Лазерное сплавление материалов (LENS)	79
2.3.5. Электронно-лучевое сплавление порошков (EBM)	81
2.3.6. Электронно-лучевая наплавка твердых веществ (EBF ³)	82
2.3.7. Ультразвуковая консолидация (UAM)	84
2.3.8. Электродуговое наваривание в различных газовых средах (3DMP)	85
2.3.9. Плазменно-дуговое наплавление материала (IFF)	88
2.4. Технологии фотополимеризации	90
2.4.1. Прямая лазерная стереолитография (SLA)	91
2.4.2. Интегральная непрерывная тонкослойная технология (FTI)	92
2.4.3. Выращивание монолита из раствора (CLIP)	94
2.4.4. Технология послойного отверждения через маску (SGC)	97
2.4.5. Стимулированное струйное распыление (PJP/PolyJet)	99
2.4.6. Голографическая печать (HIS)	101
2.5. Заключение главы 2	103
2.5.1. Достоинства и недостатки технологий	103
2.5.2. Ближайшие перспективы внедрения 3D-принтеров	108
2.5.3. Перспективные технологии изготовления трехмерных электронных устройств (ТЭУ)	112
ГЛАВА 3. КВАЗИ-4D-ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ТЭУ	117
3.1. Сплавные 3D MID-технологии (V-3D MID)	118
3.2. Жидкостные S-3D MID-технологии (LS-3D MID)	122
3.2.1. Двухшаговая заливка («2S»-технология)	123
3.2.2. Лазерное структурирование (LDS)	126
3.2.2.1. Композитная технология (LDS-C)	126
3.2.2.2. Печатно-аддитивная технология (LDS-P)	128

3.2.3. Субтрактивное лазерное структурирование (LSS)	131
3.2.4. Струйно-аэрозольная технология (AJD/M ³ D)	131
3.2.5. Струйная микрокапельная печать (μ DWT)	135
3.2.6. 3D-фотолитография (3D-Photoimaging)	136
3.3. Газофазные (сухие) 3D MID-технологии (DS-3D MID)	139
3.3.1. Газоплазменное (газотермическое) напыление (Flamecon)	141
3.3.2. Осаждение при помощи электродугового плазмотрона (PST)	143
3.4. Анализ и перспективы развития 3D MID-технологий	147
3.5. Перспективы развития 3D-технологий ТЭУ	157
ГЛАВА 4. ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ	166
4.1. Тестовые задания к главе 1 «Печатная электроника для квази-3D-ТЭУ»	166
4.2. Тестовые задания к главе 2 «3D-технология производства ТЭУ»	176
4.3. Тестовые задания к главе 3 «Квази-4D-технологии производства интегральных ТЭУ»	189
4.4. Эталоны ответов к тестовым заданиям	198
К главе 1	198
К главе 2	199
К главе 3	200
Список использованной литературы	201

Перечень сокращений и условный обозначений

- БМК — базовые матричные кристаллы
- БПЛА — беспилотный летательный аппарат
- ИМС — интегральная микросхема
- НПЛ — нанопечатная литография
- ПЛИС — программируемые логические интегральные схемы
- ПП — печатная плата
- ПУ — печатный узел
- СБИС — сверхбольшая интегральная схема
- ТЭУ — трехмерное электронное устройство
- ТПС — технологии послойного синтеза
- ХГДН — холодное газодинамическое напыление
- ЧПУ — числовое программное управление
- 3DP (3D printing powdered bed and inkjet heads) — печать объемных объектов в камерах с порошковым материалом при помощи разбрызгивания клея
- 3DMP (3D Metal Print) — метод электродугового наваривания в газовых средах
- 4K/UHD (Ultra High Definition) — разрешающая способность в средствах отображения информации, соответствующая матрице 3840×2160 пикселей
- AF/AM (Additive Fabrication/Additive Manufacturing)/RPM (Rapid Prototyping and Manufacturing) — аддитивные технологии послойного наращивания
- ABS — акрилонитрилбутадиенстирол (АБС)
- AJD (Aerosol Jet Deposition)/M3D (Maskless Mesoscale Material Deposition) — технология струйно-аэрозольного напыления
- BIS (Beam Interference Solidification) — двулучевое интерференционное затвердевание
- BJ (Binder Jetting)/ИП (Indirect Inkjet Printing) — «обратная» струйная печать 3D-объектов, т.е. разбрызгивание растворителя по полимерным порошкам

- BPM (Ballistic Particle Manufacture)/IP (Inkjet Printing)/MJ (Material Jetting) — технология прямой струйной печати
- BTF (Buy-To-Fly ratio) — коэффициент использования материала
- CAD (Computer-Aided Design) — системы автоматизированного проектирования
- CAM (Computer-Aided Manufacturing) — системы автоматизированного производства
- CVD (Chemical Vapor Deposition) — химическое (плазмохимическое) осаждение материалов из газовой фазы
- CLIP (Continuous Liquid Interface Production) — технология непрерывного выращивания изделия из жидкого фоточувствительного полимера
- СМЯК (Cyan, Magenta, Yellow, Key color) — система формирования черного цвета путем вычитания из белого трех первичных цветов (RGB). Таким образом, получаются три дополнительных цвета (голубой, пурпурной и желтый), которые в сумме и дают черный цвет
- CS (Cathode Sputtering) — катодное распыление
- CJP (Color Jet Printing) — склеивание слоев материалов с их одновременным окрашиванием при помощи струйных технологий
- DMF (Direct Metal Fabrication) — технология прямой печати расплавом металлов
- DODJet (Drop-On-Demand-Jet) — струйное нанесение слоев расплавленного воска
- DLP (Digital Light Processing) — «цифровая обработка потока света» при помощи микроэлектромеханической технологии
- DPI (Dots Per Inch) — количество точек на дюйм (мера разрешения изображения)
- EBM (Electron Beam Melting) — электронно-лучевое спекание порошков
- EBF³ (Electron Beam Free Form Fabrication) — электронно-лучевая наплавка
- EHLA (Extreme High Speed Laser Cladding) — высокоскоростное лазерное сплавление

- EBE (Electron Beam Evaporation) — электронно-лучевое испарение
- FDM (Fused Deposition Modeling)/FFF (Fused Filament Fabrication) — технология выдавливания расплавленного материала (экструзия) через сопло
- FIM (Film Insert Molding) — литье с закладкой (вставкой) пленочных заготовок (одна из разновидностей технологии литья под давлением)
- FST (Flame Spray Technologies)/FWST (Flame Wire Spray Technologies)/FPS (Flame Powder Spray) — технологии газоплазменного напыления
- FSP (Flat Screen Printing) — плоская трафаретная печать
- FTI (Film transfer imaging) — послойный перенос изображения путем создания пленочного слоя
- GMAW (Gas Metal Arc Welding) — электродуговая металлизация
- GSM (Global System for Mobile Communications) — стандарт мобильной сотовой связи
- GPS (Global Positioning System) — спутниковая система навигации
- HIS (Holographic Interference Solidification) — голографическая интерференционная полимеризация (голографическая печать)
- IMD (In Mould Decoration) — декорирование в пресс-форме (одна из разновидностей технологии литья под давлением с предварительно отформованными закладными деталями)
- IML (In Mould Labelling) — этикетирование в пресс-форме (одна из разновидностей технологии литья под давлением с предварительно отформованными закладными деталями)
- IP (Inkjet Printing)/BPM (Ballistic Particle Manufacture)/MJ (Material Jetting) — технология прямой струйной печати
- IIP (Indirect Inkjet Printing)/BJ (Binder Jetting) — «обратная» струйная печать 3D-объектов, т.е. разбрызгивание растворителя по полимерным порошкам
- IFF (Ion Fusion Formation) — плазменное наплавление материала
- LENS (Laser Engineered Net Shaping)/LMF (laser metal fusion)/LMD (Laser Metal Deposition) — технологии селективного лазерного спекания порошков

- LMJP (Liquid Metal Jet Printing) — струйное нанесение расплавленного металла
- LOM (Laminated Object Manufacturing) — технология получения объемных объектов путем многослойного ламинирования листовых материалов
- LJ (LotJet) — технология, применяющая множество одинаковых тонкоканальных сопел в печатающей головке и/или множество печатных головок
- LTE (Long-Term Evolution) — стандарт высокоскоростной мобильной связи
- LDS (Laser Direct Structuring) — лазерное структурирование поверхности полимеров с последующей металлизацией облученных участков
- LDS-C — композитная технология LDS для металлосодержащих полимеров
- LDS-P — печатно-аддитивная технология LDS, не использующая металлосодержащие пластики
- LSS (Laser Subtractive Structuring) — субтрактивное лазерное травление металлического адгезионного слоя, нанесенного ранее на подложку
- MAG (Metal Active Gas) — плазмообразующий химически активный газ в технологии электродугового наваривания
- MIG (Metal Inert Gas) — плазмообразующий защитный (инертный) газ в технологии электродугового наваривания
- MID (Molded Interconnected Devices) — литое монтажное основание
- MSJ (Metal Spray Jet) — одна из технологий газоплазменного напыления
- MSPD (Magnetron Sputtering process) — магнетронное распыление
- μCP (microcontact printing) — микроконтактная печать (разновидность нанофотолитографии)
- μDWT (micro Direct Write Technology) — струйная микрокапельная печать
- MRD (Multy Rolle Developer) — узлы подачи различных материалов на поверхность формного вала
- MJM (Multi-Jet Modeling)/PJP (Plastic Jet Printing) — струйное распыление фотопластика с его последующим отверждением УФ-облучением

- MPJS (Multiphase Jet Solidification) — технология нанесения легкоплавких материалов на подложку с их предварительным плавлением
- NIL (Nanoimprint Lithography) — нанопечатная (термо- или фото-) литография
- NIP (Non-Impact Printing) — технологии нефиксированной печати
- NFC (Near Field Communication) — коммуникации ближнего радиуса действия
- OLED (Organic Light-Emitting Diode) — светодиод из органических материалов
- PA-Prozess — производство печатных плат, разработанное фирмой Kollmorgen (Германия), с металлизацией негатива «изображения»
- РСК (Printed Circuit Board) — производство печатных плат, разработанное фирмой Kollmorgen (Германия), с металлизацией позитива «изображения»
- PLED (Plastic Light Emmittig Diod) — светодиод из полимерных материалов
- PET — полиэтилентерефталат (ПЭТФ, лавсан)
- PEN — полиэтиленнафталат (высокоплавкий аналог PET)
- RFID (Radio Frequency IDentification) — система однонаправленной связи (радиометка системы безопасности)
- PI — полиимид
- PJP (Plastic Jet Printing)/MJM (Multi-Jet Modeling) — струйное распыление фотопластика с его последующим отверждением УФ-облучением
- PVD (Physical Vapor Deposition) — физическое осаждение из газовой фазы
- PLA — полилактид
- PP — полипропилен
- PST (Plasma Spray Technologies)/Plasma dust — осаждение при помощи электродугового плазмотрона
- PTF (Polymer Precision thick-Film) — способ получения проводящих, полупроводниковых, диэлектрических и полимерных покрытий

- R2R (Roll to Roll) — рулонные технологии печати
- RPM (Rapid Prototyping and Manufacturing)/AF/AM (Additive Fabrication/ Additive Manufacturing) — аддитивные технологии послойного наращивания
- S2S (Sheet to Sheet) — листовые плоскочечатные технологии
- SKW (Sankyo Kasei Wiring Board) — производство печатных плат, разработанное фирмой Sankyo Kasei (Япония), с металлизацией позитива «изображения»
- Smart NIL — технология, разработанная австрийской компанией EVG, аналогичная технологии NIL (см. выше), но использующая специальные гибкие штампы, повторяющие рельеф подложки при нагрузке
- SLM (Selective Laser Melting) — лазерное сплавление металлического порошка
- SMD (Surface Mounted Device) — чип, монтируемый на поверхность печатной платы
- SHS (Selective Heating Sintering) — селективное тепловое спекание порошков
- SLS (Selective Laser Sintering) — селективное лазерное спекание порошков
- SLA (Stereolithography Laser Apparatus) — технология фотополимеризации полимеров с использованием интегрального облучения УФ-лазером
- SGC (Solid Ground Curing) — технология фотополимеризации полимеров с использованием интегрального облучения УФ-лампой через маску
- SPLJ (Singlephase LotJet) — технологии нанесения однофазных (жидких) материалов на подложку без их предварительного нагрева
- T-LJ (Termo LotJet) — технологии нанесения пасто- или гелеобразных материалов на подложку с их предварительным нагревом
- UAM (Ultrasonic Additive Manufacturing, Fabrisonic)/UC (Ultrasonic Consolidation) — технология ультразвуковой консолидации (ультразвукового наплавления)

Предисловие

С развитием новых технологий конструирования и производства электронных устройств за счет создания и редактирования их трехмерных компьютерных моделей и новых типов устройств и материалов для послойного создания физического объекта все более реальным становится воспроизводимый выпуск полноценных трехмерных электронных устройств (ТЭУ). В связи с этим представляется необходимым произвести новую классификацию сложных объемных (3D) объектов и всех современных технологий их изготовления по физическому принципу воздействия на конструкционный материал. Только выявив преимущества и недостатки данных технологий и определив приоритетные направления их развития, можно будет определить перспективы развития современных физико-химических методов формирования ТЭУ.

В главе 1 пособия выявлены основные принципы и возможности формирования ТЭУ на плоских (2D) и квазиобъемных (квази-3D) подложках. Проанализированы основные характеристики методов печати: максимальная толщина слоя, наличие контакта, тип переноса печатного изображения (фиксированное, нефиксированное), производительность и т.д. Показано, что использование современных технологий плоской печати не позволяет экономически целесообразно изготавливать объемные структуры сложной формы в непрерывном технологическом цикле.

В главе 2 пособия проанализированы возможности современных аддитивных и полуаддитивных технологий для производства ТЭУ по их основным характеристикам: диапазонам толщин наносимых материалов, максимальному разрешению формирования структур и производительности. Произведена классификация данных технологий по физическому принципу воздействия на конструкционный материал. Показано, что общими недостатками всех данных технологий являются слоистость получаемых структур, ведущая к худшим механическим свойствам, достаточно низкое разрешение изготавливаемых объектов (до 1 мкм) и доста-



точно высокая стоимость сформированных изделий, что значительно ограничивает возможность их массового (конвейерного) производства. Использование традиционных аддитивных и полуаддитивных технологий, как и традиционных 2D-технологий печати, также не позволяет формировать многослойные сложные 3D-объекты с использованием в качестве функциональных элементов всех граней, ребер и толщин стенок.

Впервые понятие 4D-печати (4D-технологий) ввел в употребление в 2013 г. Скайлар Тиббитс (Skylar Tibbits) из Массачусетского технологического института (MIT). Поэтому в последнее время в литературе появилось множество работ [1–3], посвященных созданию 4D-объектов, т.е. созданию трехмерных объектов, которые могут менять свою форму или структуру после создания в зависимости от внешних условий, например при попадании в водную среду, облучении УФ определенной длины, изменении температуры, механическом воздействии и т.д. То есть к трем измерениям добавилась четвертая координата — время.

В главе 3 пособия рассматриваются лишь первые этапы создания 4D-объектов — создание жестких многослойных 3D-структур, названных в данной работе квази-4D объектами. Это название связано с тем, что предлагаемые гибридные технологии в настоящее время находятся лишь в стадии разработки (являются пред-4D-технологиями или «3D+» технологиями), практически не обеспечены необходимыми материалами и элементной базой, но имеют потенциальные возможности для создания полноценных 4D-объектов. Достоверной информации о создании и применении полноценных 4D-объектов на момент написания пособия не найдено.

При этом отдельные разрабатываемые гибридные технологии связаны между собой в реальном (объективном) времени сложными зависимостями. Чтобы абстрагироваться от этих сложных зависимостей, предлагается рассматривать изготовление ТЭУ по таким технологиям не в реальном времени, а на условной шкале времени, состоящей из дискретных участков реального времени не в хронологической последовательности. При таком подходе назовем использование таких гибридных технологий квази-4D-технологиями.

В дальнейшем с развитием данных технологий приставка «квази-» перестанет быть актуальной.

Первым шагом при разработке квази-4D-объектов стала разработка 3D MID-технологий (Three Dimensional Molded Interconnect Devices). В главе 3 произведен сравнительный анализ возможностей различных 3D MID-технологий формирования ТЭУ. Показано, что основным недостатком 3D MID-технологий является невозможность изготовления полноценных квази-4D-деталей ТЭУ с использованием в качестве функциональных элементов всех свободных граней, ребер и объема (или всей толщины стенок). Приведены примеры внедрения 3D MID-технологий в производство изделий радиоэлектроники.

В заключении представлены этапы и перспективы развития (так называемая дорожная карта) современных физических методов формирования ТЭУ до 2026 г.

Данный материал является блоком, который может использоваться в курсах «Моделирование конструкций и технологических процессов производства электронных средств», «Научные и организационные проблемы конструирования и технологии РЭС», «Проектирование и технология РЭС специального назначения», «Нанотехнология и наноматериалы в производстве электронных средств», «Средства отображения информации», «Физико-химические основы нанотехнологии и технологии электронных средств» и «Интегральные устройства радиоэлектроники и наноэлектроники».

Введение

До недавнего времени электронное устройство состояло из печатного узла (ПУ) — печатной платы (ПП) с установленными на ней чипами пассивных и активных элементов и корпуса. Одним из способов уменьшения габаритов печатных плат является замена части их дискретных элементов и интегральных схем на ПЛИС (программируемые логические интегральные схемы) и БМК (базовые матричные кристаллы). В условиях мелкосерийного производства разработка специализированной элементной базы нецелесообразна. Еще одним способом миниатюризации устройств является использование корпуса печатного узла не только в качестве пассивного конструкционного несущего элемента, но и в качестве объемной печатной платы (трехмерных электронных устройств — ТЭУ). Первые неудачные попытки создать ТЭУ (наносить токопроводящие дорожки непосредственно на внутренние поверхности объемных пластиковых корпусов) относятся еще к 80-м гг. XX в.

И только с развитием новых принципов конструирования устройств за счет создания их трехмерных компьютерных моделей, новых типов устройств послойного создания физического объекта и новых материалов стало возможно наладить воспроизводимый выпуск полноценных ТЭУ.

Создание 3D-объектов в технике, машиностроении, электронике и т.д. вне зависимости от типа конструкционного материала осуществляется в основном при помощи четырех групп методов:

- субтрактивные методы (subtractive) — методы удаления «лишнего» объема из изначального объема заготовки, т.е. технологии удаления (химическим травлением, фрезерованием, плазменным травлением и т.д.) массива материала подложки;
- формовочные методы — методы получения изделий по форме предварительно изготовленной модели (штамповка, литье, ковка и т.д.);

- аддитивные методы (AF — Additive Fabrication), (AM — Additive Manufacturing) или (RPM — Rapid Prototyping and Manufacturing) технологии — методы последовательного узконаправленного «наращивания» материала слой за слоем (наплавка, наклеивание, спекание и т.д.);
- полуаддитивные (semiadditive) (гибридные, многофункциональные и т.д.) — технологии аддитивного наращивания с последующим удалением части нанесенного материала, например, методами токарной или фрезерной обработки, лазерной резки и т.д. на станках с ЧПУ или методами химического (плазмохимического) травления, используя нанесенный материал в качестве маски.

Достаточно долгое время аддитивные технологии считались экономически нецелесообразными, так как стоимость механообработки дешевле порошкового синтеза в 3—10 раз [4]. Изначально AF-технологии, которые часто называют технологиями быстрого прототипирования, предназначались только для изготовления несерийных (опытных) моделей. Но современное развитие общества требует от поставщиков-производителей (заводов, предприятий и т.п.) деталей все более и более сложной формы при уменьшении их геометрических размеров. При этом цена изготовления изделий механообработкой значительно увеличивается, а решать задачи при помощи формовочных методов становится крайне затруднительным (вплоть до невозможности изготовления) или экономически нецелесообразным. При этом все большее значение имеют:

- коэффициент использования материала — ВТФ (Buy-To-Fly ratio), т.е. отношение массы материала, необходимого для изготовления деталей, к массе конечной детали. Для традиционных (субтрактивных) механообрабатывающих технологий величина параметра соответствует (15—20):1. Аддитивные технологии доводят этот показатель до (1—5):1;
- скорость изготовления детали. У аддитивных технологий скорость «выращивания» детали может превышать скорость «удаления» материалов до 2—4 раз;



- необходимость изготовления объектов с высокой степенью воспроизводимости.

Все вышесказанное и породило настоящий бум развития различных 3D-технологий печати. Меньше чем за последние 10 лет стоимость изготовления 3D-объектов при помощи аддитивных технологий уменьшилась на 30—40% [4]. В настоящее время аддитивные технологии уже рассматривают в качестве одной из стратегических технологий аэрокосмической и оборонной отраслей. Это стало возможным за счет очевидных достоинств АФ-технологий:

- простота изготовления образцов за счет компьютерных технологий визуализации объектов и возможность быстрого исправления ошибок перед запуском изделия в серию;
- насыщение рынка доступными расходными материалами;
- достаточно высокая точность изготовления объектов различных форм и материалов.
- плотность, например, металлических изделий, напечатанных на 3D-принтере, оказывается на 50% выше плотности металлических изделий, получаемых литьем, и всего на 10—15% ниже плотности, получаемой у металлов при прокате [4];
- возможность корректировки отклонения размеров детали от заданных непосредственно в процесс печати при помощи системы обратной связи — оптических датчиков и соответствующего программного обеспечения.

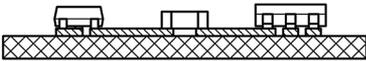
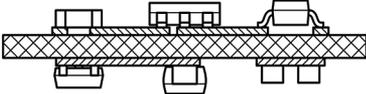
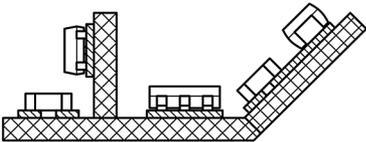
ГЛАВА I

ПЕЧАТНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА ДЛЯ КВАЗИ-3D-ТЭУ

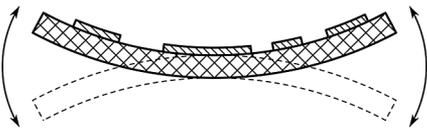
В настоящее время в производстве ТЭУ различают несколько типов сложных объемных объектов (см. табл. 1.1):

- объемные фигуры (квази-3D-объекты), создаваемые из отдельных 2D-модулей на базе жестких или гибких подложек [5, 6];
- жесткие объемные (3D) фигуры [7, 8], создаваемые послойно при помощи 3D-принтеров (или многофункциональных устройств) и ex-situ технологий (дополнительных посттехнологий) обработки поверхности;
- жесткие объемные (3D) фигуры, получаемые традиционными промышленными методами (литьем, штамповкой и т.д.) и ex-situ технологиями обработки поверхности (3DMID) [9, 10].

Таблица 1.1. Классификация монтажных оснований и устройств

Размерность	Расположение поверхностей и способ монтажа компонентов	Схема монтажа компонентов
2D	Плоская поверхность; компоненты на одной стороне	
	Плоские поверхности; компоненты на обеих сторонах	
Квази-3D	Плоские поверхности, располагающиеся под углом друг относительно друга	

Окончание таблицы 1.1

Размерность	Расположение поверхностей и способ монтажа компонентов	Схема монтажа компонентов
	Гибкие печатные платы (печатная электроника)	
3D	Поверхности свободной формы без компонентов (3D-печать)	

Создание первых ТЭУ осуществлялось именно на базе нанесения покрытий различного вида (проводящих резистивных, полупроводниковых или диэлектрических) на:

- жесткие подложки (стеклотекстолит, гетинакс и т.д.) [11];
- гибкие подложки (полиэтилентерефталат (PET), полиэтиленнафталат (PEN), полиимид (PI), полипропилен (PP), полилактид (PLA), бумагу, полиэтилен и т.д.) [12].

Это направление не потеряло своей актуальности и по настоящее время. В большинстве случаев нанесение покрытий на гибкие и жесткие подложки аналогично. Разница лишь в соединении гибкой и жесткой платы в единый модуль (рис. 1.1) или в размещении гибкой печатной платы внутри жесткого 3D-корпуса (рис. 1.2) [13].

С точки зрения типа переноса изображения все технологии 2D-печати (рис. 1.3) можно подразделить на следующие виды:

- фиксированное печатное изображение переносится со специально изготовленной печатной формы (штампа, вала и т.д.) или осуществляется через трафарет (маску) на подложку. При этом максимальный размер изображения определяется, например, длиной окружности цилиндра (трафаретная печать, глубокая печать и т.д.), а качество изображения — современным уровнем технологии изготовления печатного элемента на печатной форме («computer-to-press»);

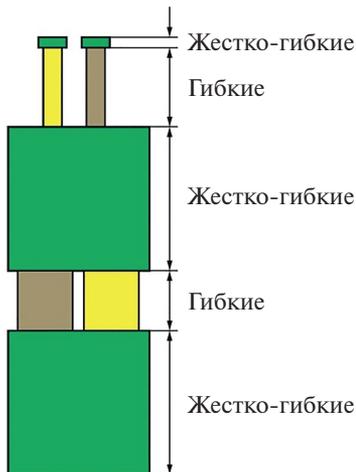


Рис. 1.1. Модульное соединение гибких и жестких частей платы

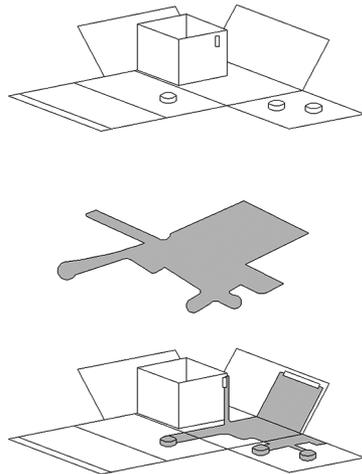


Рис. 1.2. Квази-3D-моделирование гибких и жестких частей платы

- нефиксированное (динамическое) изображение переносится на подложку с редактируемого источника и не требует изготовления постоянной фиксированной печатной формы. Максимальное разрешение для черно-белой или цветной печати измеряется в *dpi* (струйная печать, лазерная абляция, матричная и т.д.) («computer-to-print»);
- гибридная технология — сочетание фиксированной и нефиксированной печати. Например, трафаретная печать для создания толстых покрытий и струйная для создания тонких покрытий с высокой точностью.

1.1. Технологии фиксированной печати

1.1.1. Трафаретная печать (screen printing)

Аддитивная технология нанесения рисунка в трафаретной печати состоит в продавливании пасты через трафарет с использованием ракеля. В настоящее время существуют две технологии трафаретной печати —

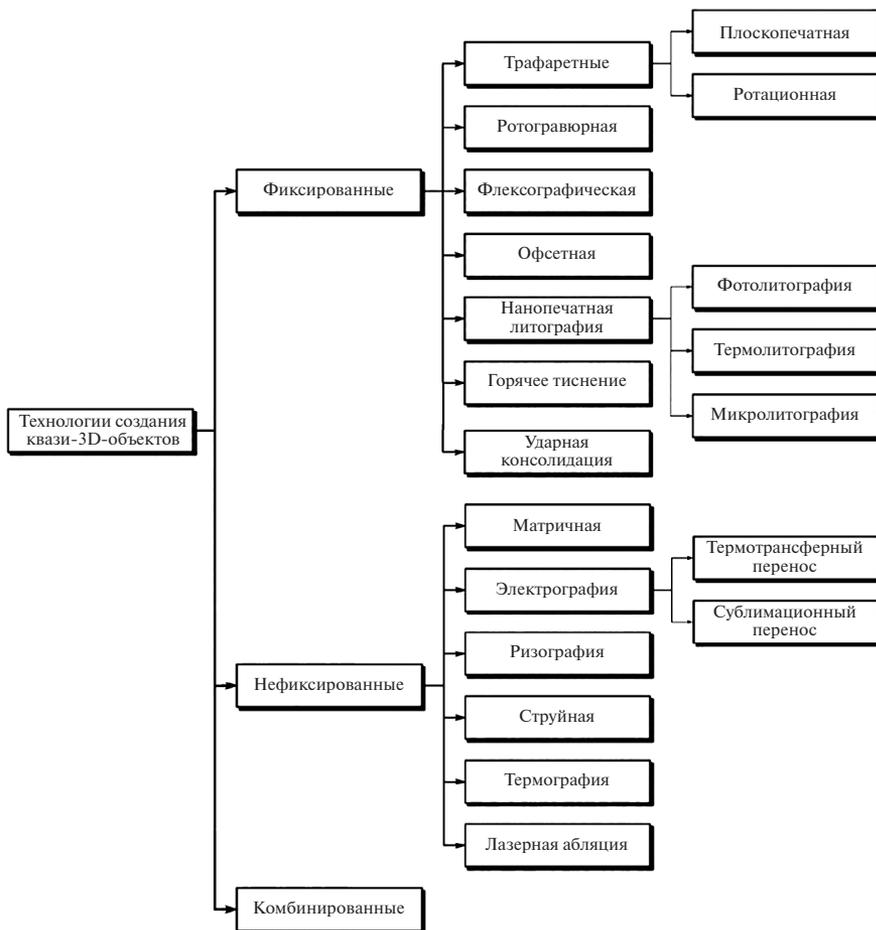


Рис. 1.3. Классификация технологий создания квази-3D-объектов

плоскопечатная (FSP — Flat Screen Printing) и ротационная (RSP — Rotary Screen Printing) [14]. Они различаются формой и расположением трафарета (рис. 1.4 и 1.5).

В плоскопечатных установках (рис. 1.4) материал покрытия (4) продавливается ракелем (5) на подложку (6), закрепленную на основании (3), через ячейки трафарета (1), располагаемого между ракелем

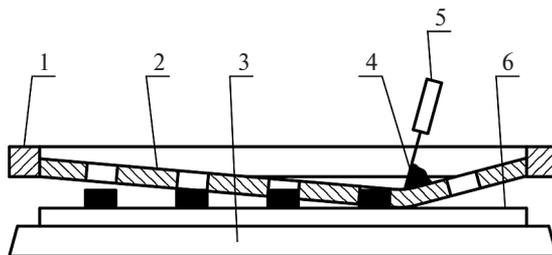


Рис. 1.4. Трафаретная плоскочечная печать: 1 — рамка трафарета; 2 — трафарет; 3 — основание; 4 — функциональные чернила; 5 — ракель; 6 — подложка

и подложкой. Производительность этих установок невысока в связи с предварительным приготовлением (раскроем) плоских заготовок и периодической подачей их в камеру нанесения.

Для повышения производительности используется полая ротационная установка печати (рис. 1.5), в которой печатный вал с трафаретом (4) представляет собой полый цилиндр с ячейками. Внутри этого полого цилиндра помещается ракель (3), переносящий краску (3) на подложку (1), продавливая ее через ячейки вращающегося печатного цилиндра. Трафаретная краска закачивается непрерывно в трафаретную форму нагнетающим насосом.

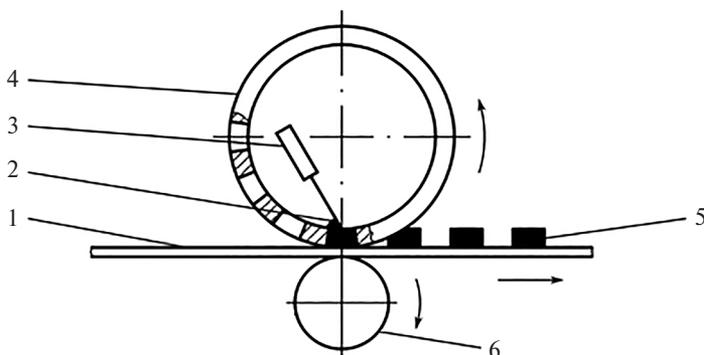


Рис. 1.5. Трафаретная ротационная печать: 1 — подложка; 2 — наносимый материал; 3 — ракель; 4 — печатный вал с трафаретом; 5 — нанесенное покрытие; 6 — прижимной вал

Для получения качественного отпечатка с четким краем рисунка заданной толщины элементов ТЭУ необходимо осуществлять контроль следующих технологических параметров:

- 1) вязкости паст. Пасты должны обладать тиксотропностью (способностью под действием механического давления увеличивать текучесть (уменьшать вязкость) и затем после прекращения давления снова загустевать). Чем больше вязкость, тем толще пленка;
- 2) параметры ракеля:
 - угол встречи (атаки) с поверхностью подложки (выбирается от 4° до 60° — чем меньше угол встречи, тем больше давление и толщина пленки);
 - твердость материала ракеля (величина его прогиба). Большой прогиб уменьшает угол атаки, увеличивая расход пасты;
 - давление ракеля на трафарет (повышение давления увеличивает толщину слоя пасты);
 - скорость перемещения ракеля (чем выше скорость перемещения, тем меньше толщина наносимой пленки);
- 3) параметры трафарета:
 - размеры ячеек (для получения толстых пленок однородной толщины необходимо применять крупную сетку, а для точного воспроизведения — более мелкую сетку или регулировать натяжение одной сетки);
 - зазор между трафаретом и подложкой. Увеличение зазора приводит к увеличению толщины слоя;
- 4) режимы термообработки:
 - сушка (для удаления легколетучих компонентов). Так как сразу наносится слой значительной толщины, то требуется определенное время сушки;
 - обжиг (например, для удаления органических связующих компонентов или спекания компонентов). При производстве толсто пленочных электронных схем сначала вжигается рисунок проводников при температуре 850°C , далее диэлектриков при $T = 750^\circ\text{C}$, а затем и резисторов при $T = 700^\circ\text{C}$;