

УДК 621.37.037

ТЕХНИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА РЕИНЖИНИРИНГА ПЕЧАТНО-ПЛЕНОЧНОЙ ТОПОЛОГИИ ИЗДЕЛИЙ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

© 2019 г. М. С. Костин¹, *, Д. С. Воруничев¹, В. М. Викулов¹

¹МИРЭА – Российский технологический университет,
Российская Федерация, 119454 Москва, просп. Вернадского, 78

*E-mail: mihailkos@mail.ru

Поступила в редакцию 12.04.2018 г.

После доработки 01.06.2018 г.

Принята к публикации 11.06.2018 г.

Рассмотрены методы и средства реинжиниринга топологии многослойных печатных модулей и корпусных интегральных микросхем. Сформулирована концепция реинжиниринговой модернизации изделий радиоэлектронных средств. Представлены базисные технологические процессы реинжиниринга схмотехнической конфигурации печатно-плёночных радиоэлектронных изделий, основанные на различных физических принципах разрушающего (механообработка и химическое травление) и неразрушающего исследования: оптическое сканирование, радиовидение, рентгенографический анализ. Впервые предложен метод тепловизионного (электроиндукционного) анализа печатных плат с многослойной топологией.

DOI: 10.1134/S0033849419020098

ВВЕДЕНИЕ

Продление жизненного цикла радиоэлектронных изделий представляет собой системный научно-практический подход по разработке и внедрению методов и технологий, позволяющих в кратчайшие сроки локализовать неисправность устройства, провести функциональное тестирование, определить надежность изделия, подобрать замены неисправным элементам на современном технологическом уровне, устранить отказ изделия, создать его усовершенствованный аналог-прототип даже в случае отсутствия рабочей (схмотехнической) документации.

В настоящее время при модернизации в радиоэлектронной отрасли и ускоренном инновационном развитии возникает спрос на реинжиниринговые услуги по оригинальному проектированию и созданию изделий и технологий их производства, связанную с развитием процесса разработки новых методов экспертного реинжиниринга печатных модулей и корпусных микросхем [1].

Концептуальный подход спецпроектного реинжиниринга начинается с экспертного технического исследования образца готового изделия либо системного процесса, затем разворачивается обратным ходом в логическом порядке для выявления производственных технологий и представляет собой процесс модернизационного прототипирования изделия по функционально-логическим, физическим и объемно-топологическим характе-

ристикам, путем многопараметрического исследования, измерения и системно-целевой диагностики конструктивных элементов для разработки технических данных в зависимости от условий эксплуатации и новых требований к прототипному выпуску.

1. РЕИНЖИНИРИНГ ИЗДЕЛИЙ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЕЧАТНЫХ МОДУЛЕЙ

Характер, сложность, а также необходимость в многослойном топологическом исполнении изделий печатных плат определяется выбором способа обработки сигналов, типоконструкцией и интеграцией электронной компонентной базы (ЭКБ), рядом массогабаритных, теплофизических и радиочастотных параметров схмотехнической архитектуры радиоэлектронного устройства.

Как известно, в радиоэлектронике разделяют три подхода в решении задач обработки сигналов: аналоговая, цифровая и аналого-цифровая. При этом аналоговая обработка является исключительно аппаратным способом, состоящим в применении радиоэлектронных элементов и устройств, использующих различные физические принципы, явления и свойства материи, в то время как цифровая обработка реализуется посредством универсальной программно-аппаратной алгоритмизации, динамично осваивающей более высокочастотную область спектра. Такой подход в области активного применения средств цифровой обработки сигналов

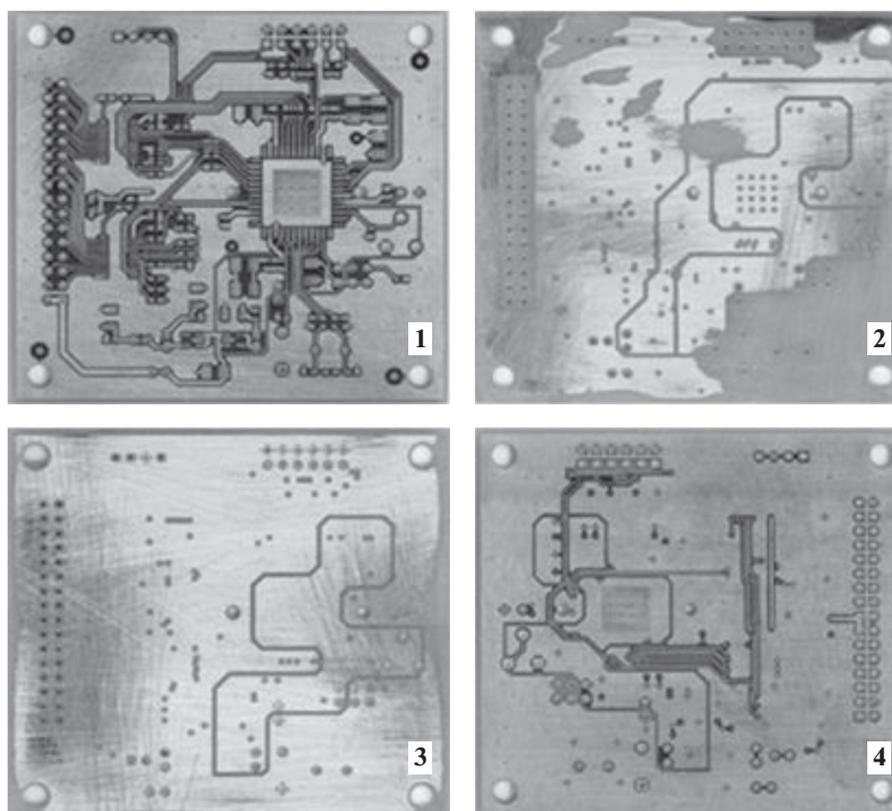


Рис. 1. Реинжиниринг четырехслойной МПП (1–4 – слои) методом послойной механообработки образца печатной платы шлифованием.

приводит к миниатюризации и типизации создания ЭКБ на базе транзисторно-транзисторной логики и КМОП-логики: микропроцессоров, контроллеров и ПЛИС.

Разделяют два метода реинжиниринга многослойных печатных модулей: разрушающие и неразрушающие [2]. К разрушающим методам реинжиниринга многослойных печатных плат (МПП) относится послойная механообработка образца шлифованием (рис. 1). Технология разрушающих методов реинжиниринга не гарантирует отсутствие повреждений топологии МПП при относительно плотной трассировке печатного рисунка, потому не является прогрессивной и применяется только в тех случаях, для которых исключается эффективность применения методов неразрушающего спецпроектного реинжиниринга, позволяющего восстанавливать топологию с применением косвенных средств экспертного анализа: оптическое сканирование, тепловизионный (электроиндукционный), радиоволновый и рентгенографический анализ.

Метод оптического сканирования является эффективным методом восстановления топологии печатного рисунка при помощи светового сканера, однако ограничивается применением только

на двухсторонних печатных платах и чаще применяется в сочетании с методом механического шлифования для МПП. На рис. 2 в качестве примера представлен прототип образца четырехслойной платы (см. рис. 1), восстановленный при помощи программного обеспечения Mentor Graphics.

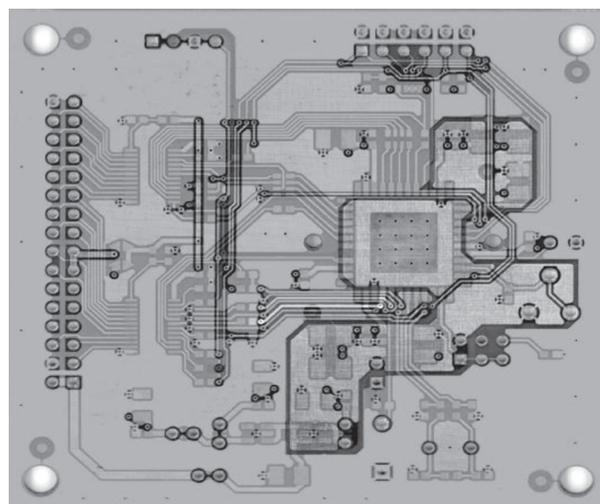


Рис. 2. Послойный прототип топологии образца МПП.

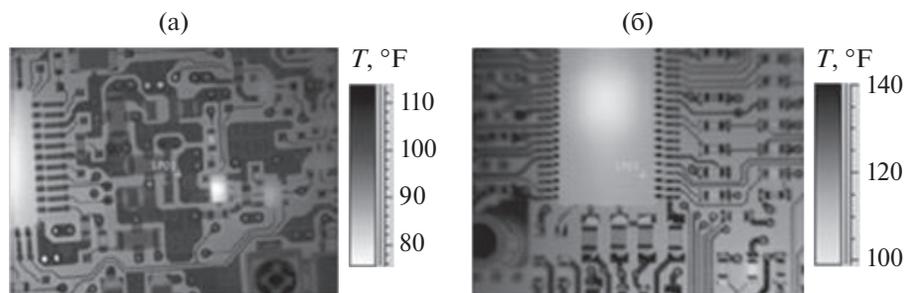


Рис. 3. Тепловизионный портрет печатной топологии образца МПП (инверсные термограммы): а – ближний слой МПП к индуктору; б – дальний слой МПП от индуктора.

Предложенный в работе тепловизионный метод реинжиниринга МПП отличается простотой реализации и заключается в том, что МПП электроиндукционно нагревается высокочастотным током малой мощности в ближнем поле плоского электромагнитного индуктора. По сравнению с индукционным нагревом, применяемым для разогрева электропроводящих материалов (медных проводников) переменным током частотой не более 30 МГц, диэлектрический нагрев проводится обычно с использованием более высоких частот, свыше 100 МГц. Поэтому топология МПП, идентифицируемая графическим тепловизором [3], имеет четко очерченные контуры печатного рисунка в каждом слое и в явном виде выделяется на фоне диэлектрического основания (рис. 3). Кроме того, в отдельных случаях в качестве детального рассмотрения фрагментарных элементов топологии может быть использован метод нагревания печатных проводников постоянным током до 100 мА.

Радиоволновый и рентгеновский методы относят к прогрессивным реинжиниринговым методам неразрушающего прототипирования топологии печатного рисунка МПП. Радиоволновый метод основан на принципах регистрации распределения электромагнитного поля в ближней зоне Френеля с помощью средств графической радиовизуализации (радиовидения) при возбуждении элементов печатной топологии электромагнитным полем сверхвысокочастотного диапазона 0.5...1 ГГц. Рентгеновский метод является самым точным и обеспечивает послойную регистрацию МПП в двух координатных плоскостях с управляемой глубиной облучения (рис. 4).

2. РЕИНЖИНИРИНГ ИЗДЕЛИЙ КОРПУСНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Так же, как и в случае с реинжинирингом МПП, прототипирование интегральных микросхем (ИМС) заключается в воссоздании печатной топологии их схематехнической конфигурации. Известно, что обратное проектирование топо-

гии сложной микросхемы ускоряет по времени процесс разработки нового интегрального изделия с улучшенными характеристиками на порядки ввиду уменьшения затрат на создание нового электронного устройства. Так, реинжиниринг корпусных ИМС с технологией по разрешению не менее 1 мкм и числом эквивалентных вентилях на кристалле до 5000 позволяет менее чем за полгода полностью воссоздать не только типологию ИМС, но и ее электрическую принципиальную схему, однако уже с рядом заранее улучшенных характеристик, например, по мощности и надежности выходных каскадов, в более жестком климатическом исполнении и т.д.

Прототипирование принципиальной схемы ИМС осуществляется путем исследования и сопоставления кристаллографических изображений с типовыми решениями изготовления элементов на подложке ИМС при последовательном травлении слоев металлизации [4]. В качестве слоя металлизации может выступать, например, алюминий, каждый слой которого разделяется диоксидом кремния. Если топология и структура транзисторов в пленочном исполнении при микровизионном исследовании не очевидна, то на кристалле подложки ИМС выполняется поперечный срез.

В отличие от реинжиниринга МПП, где существует возможность применения неразрушающих методов исследования макротопологии, спецпроектный реинжиниринг микротопологии изделий корпусных ИМС осуществляется только при помощи разрушающих методов: механического фрезерования и послойного химического травления или шлифования и послойного химического травления. По существу, выбор метода декапсуляции ИМС определяется типом материала, из которого состоит ее корпус: пластиковый (полимерный), керамический (металлокерамический) или металлокерамический.

Механообработка корпусных ИМС является подготовительной операцией технологического процесса травления и обеспечивает предварительное истончение активной зоны травления. Для составных шовных корпусов из полимеров

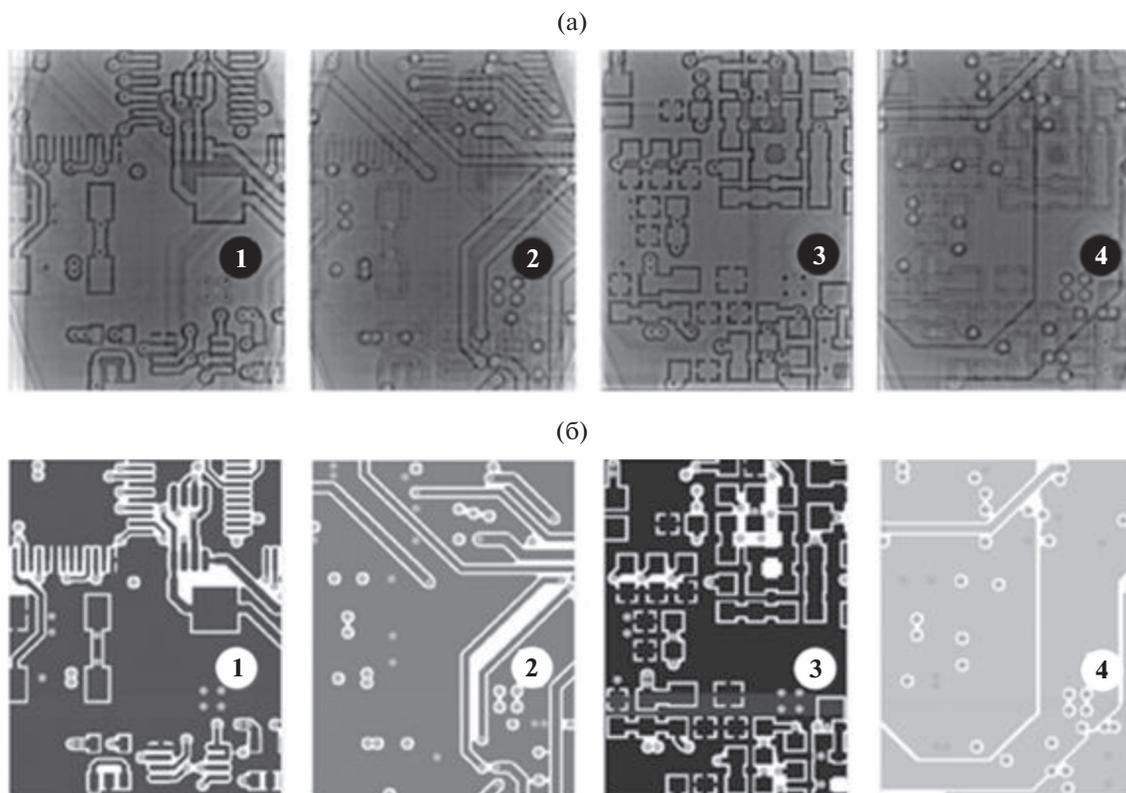


Рис. 4. Рентгенографический анализ фрагментарного образца четырехслойной печатной платы: а – послойные рентгенограммы МПП; б – восстановленная топология в ПО Mentor Graphics.

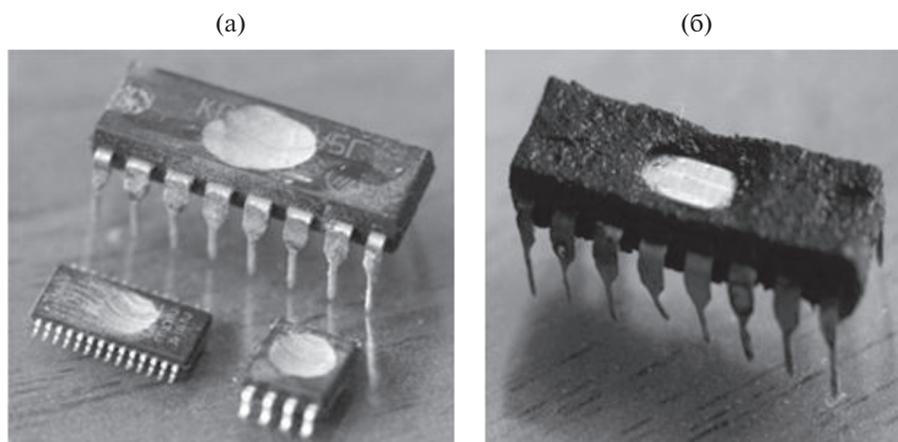


Рис. 5. Реинжинеринг микротопологии изделий корпусных ИМС: а – механообработка корпуса; б – химическое травление корпуса.

механообработка – единственный процесс, предшествующий микровизионному исследованию.

Технологический процесс послойного химического травления заключается в удалении части материала корпуса при помощи концентрированной смеси растворов серной и азотной кислот при температуре около $+100^{\circ}\text{C}$. *Внимание! Требуется соблюдение всех норм обеспечения техники безопасности.* Серная кислота участвует в основ-

ном процессе травления, а азотная только подтравливает побочный продукт – углеродистые массы, образующиеся при реакции материала корпуса ИМС с серной кислотой (рис. 5).

На рис. 6 приведены фотографии микровизионного исследования образцов ИМС методом фрезирования и послойного химического травления. На снимках четко видны очерченные контуры типовых решений тонкопленочного формирования эквива-

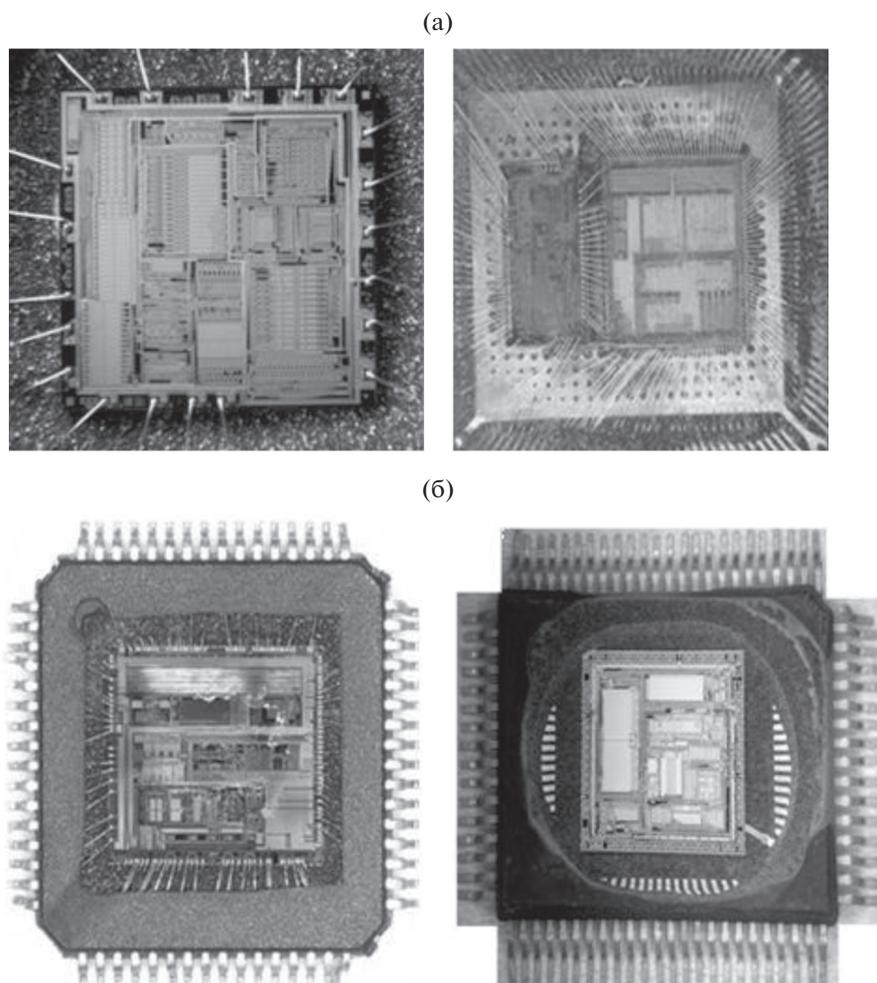


Рис. 6. Микротопологии образцов изделий декорпусированных ИМС: а – полученные методом химического травления; б – полученные методом механической обработки с последующим травлением.

лентных вентилях и цепей периферической обвязки на базе КМОП-логики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С постоянной динамикой усложняемого развития конструкций радиоэлектронных изделий, миниатюризацией и интеграцией ЭКБ, материально-технической и производственной базы современных радиоэлектронных средств, ранее применяемые методы и технологии обратного инжиниринга становятся мало эффективными, а следовательно, знания о них не позволяют в полной мере сформировать новую стратегию реинжиниринговой модернизации и анализа дефектов МПП и ИМС. В то же время рассмотренные в работе методы и средства прототипирования позволяют разработать комплекс специальных технических мер, обеспечивающих оригинальность и неповторимость разрабатываемых изделий [5].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Keng Tiong Ng.* Art of PCB Reverse Engineering (Standard Edition): Unravelling the Beauty of the Original Design. USA: CreateSpace Independent Publishing Platform, 2015.
2. *Guo Z., Tehranipoor M., Forte D., Di J.* // Design Automation Conf. (DAC). San Francisco, CA, USA. 8–12 June. N.Y.: IEEE, 2015. P. 144.
3. *Битюков В.К., Жуков А.Н., Симачков Д.С.* // Рос. технол. журн. 2016. Т. 4. № 4. С. 21. https://rtj.mirea.ru/upload/medialibrary/bd4/3_bitukovwatermark.pdf.
4. *Torrance R., James D.* Cryptographic Hardware and Embedded Systems (CHES). Lecture Notes in Computer Science. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009. V. 5747. P. 363.
5. *Костин М.С., Воруничев Д.С.* Реинжиниринг радиоэлектронных средств: монография. М.: МИРЭА, 2018.