

ТРИЗ в электронике: вокруг печатных плат

Если слово «электроника» понимать в широком смысле, то в сферу ее интересов, несомненно, попадают печатные платы — основной конструктивный элемент современной радиоэлектронной аппаратуры. В общем случае печатная плата — это пластина из электроизоляционного материала, на поверхности которой нанесены тонкие электропроводящие полоски (проводники) с контактными площадками для подсоединения навесных радиоэлементов [1].

**Владимир Уразаев,
к. т. н.**

urazaev@yandex.ru

Первенство в разработке печатных плат приписывают немецкому инженеру Альберту Паркеру Хансону [2]. Хансон предложил формировать рисунок печатной платы на медной фольге вырезанием или штамповкой. Далее элементы проводящего рисунка приклеивались к диэлектрику, например к пропарафиненной бумаге. С тех пор прошло больше ста лет. Все эти годы технологии изготовления печатных плат совершенствовались. В этом благородном деле приняло участие великое множество людей, в том числе знаменитый изобретатель Томас Эдисон и... гораздо менее знаменитый изобретатель — автор настоящей статьи.

С пафосом о ПАФОСе

У специалистов, имеющих отношение к производству печатных плат, сочетание «ИТМ и ВТ» и «Галецкий» вызывает глубокое уважение. Для института точной механики и вычислительной техники, брежневские времена, в отличие от многих других научных учреждений, не были годами застоя. А отделение этого института, возглавляемое Ф. П. Галецким, диктовало моду в области технологии изготовления печатных плат в «стране, которой уже нет». Не потерялось оно и в «стране, которая есть».

Супер-ЭВМ, разработкой которых занимался институт, потребовали создания суперсложных многослойных печатных плат. Для реализации таких печатных плат и была разработана технология, названная ПАФОС (полностью аддитивное формирование отдельных слоев).

От субтрактивных методов, основанных на травлении фольги, этот метод отличается тем, что токопроводящий рисунок наносят [3]. Проводящий рисунок слоев формируется на временных носителях — листах из нержавеющей стали, поверхность которых покрывается гальванически осажденной медной шиной толщиной 2–5 мкм.

На этих листах формируется защитный рельеф пленочного фоторезиста. Проводники получают гальваническим осаждением тонкого слоя никеля

(2–3 мкм) и меди (30–50 мкм) во вскрытые в фоторезисте рельефы. Затем пленочный фоторезист удаляется, и проводящий рисунок на всю толщину впрессовывается в диэлектрик.

Прессованный слой вместе с медной шиной механически отделяется от поверхности временных носителей. В слоях без межслойных переходов медная шина стравливается. При изготовлении двухсторонних слоев с межслойными переходами перед травлением медной шины создаются межслойные переходы посредством металлизации отверстий с контактными площадками.

Чем же хорош этот метод? Дело в том, что проводящий рисунок, утопленный в диэлектрик и защищенный сверху слоем никеля, при удалении медной шины не подвергается травлению. Поэтому форма, размеры и точность проводящего рисунка определяются рисунком рельефа, то есть процессами фотолитографии. А современные достижения в области фотолитографии и лазерного экспонирования позволяют совершить качественный скачок на пути повышения плотности печатного монтажа. Еще на рубеже восьмидесятых и девяностых годов прошлого века в ИТМ и ВТ научились делать двадцатислойные печатные платы размером полметра на полметра с шириной проводников и зазоров между ними 100 мкм!

Наш ответ Чемберлену

Судя по публикации [4], технология ПАФОС позволяет реализовать печатные платы с шириной проводников и зазорами между ними до 40–50 мкм. Но нет в мире совершенства! По законам теории решения изобретательских задач (ТРИЗ) улучшение одной характеристики технической системы неизбежно приводит к ухудшению какой-то другой ее характеристики. Так оно и получилось.

Суперсложные и супербольшие многослойные печатные платы не соответствуют техническим требованиям по влагостойкости. Более того, при изменении относительной влажности воздуха от 45 до 80% (нормальные условия) сопротивление изо-

ляции изменяется на 3-4 порядка [5]. Образно говоря, такие печатные платы «дышат». Уменьшение зазоров между проводниками привело к тому, что уровень диэлектрических характеристик стеклотекстолита стал явно недостаточным.

Прошли годы. Изменилась элементная база, изменилась архитектура супер-ЭВМ. Использование таких громадных печатных плат стало «признаком плохого тона». А проблема, увы, осталась. Колокольчик зазвонил вновь, но уже не в России, а за ее пределами. Диэлектрические характеристики стеклотекстолита стали лимитировать дальнейшую микроминиатюризацию печатных плат. И традиционными методами решить эту задачу нашим «потенциальным друзьям» пока не удается [6].

Как же быть? Прекрасная задача для доказательств дееспособности ТРИЗ. Можно даже сказать, что это «вопрос на засыпку». Экзамен был сдан — и не кое-как, а на «отлично»!

Дефекты структуры стеклотекстолита, по словам некоторых специалистов, позволяют сравнить его с промокашкой. Чем больше воды в этой промокашке, тем хуже диэлектрические свойства. Для повышения влагостойкости печатных плат их покрывают после монтажа радиоэлементов лаком. При нанесении лаковых покрытий дефекты структуры стеклотекстолита частично устраняются (заполняются) полимером. Как повысить эффективность?

Сформулируем техническое противоречие задачи (ТП).

ТП 1. Если лак сильно разбавлен, из-за низкой вязкости он глубоко проникает в капиллярно-пористую структуру стеклотекстолита, но из-за небольшого содержания полимерного связующего коэффициент заполнения капилляров невелик.

ТП 2. Если лак содержит много полимерного связующего, то коэффициент заполнения капилляров увеличивается, но из-за высокой вязкости глубина его проникновения невелика.

Сформулируем физическое противоречие задачи (ФП).

ФП 1. Лак должен содержать много полимерного связующего, чтобы был выше коэффициент заполнения капилляров, и должен содержать мало полимерного связующего, чтобы глубоко проникать в капилляры.

Это противоречие легко разрешается с использованием стандартного приема разрешения физических противоречий «разделение противоречивых требований во времени». Для нанесения первого слоя лака следует использовать сильно разбавленный лак, а при нанесении последующих слоев — лак с большим содержанием связующего. К сожалению, на практике это решение оказалось недостаточно эффективным.

При формулировке технического противоречия, чтобы «обмануть» психологическую инерцию человека, ТРИЗ рекомендует уходить от конкретных названий. Если слово «лак» заменить более широким понятием «жидкость», ФП можно сформулировать следующим образом.

ФП 2. Полимерное связующее в жидкости должно быть, чтобы обеспечить заполнение

капилляров, и полимерного связующего в жидкости не должно быть, чтобы она обладала максимальной проникающей способностью.

Или:

ФП 3. Частицы полимера в жидкости должны быть большими, чтобы..., и должны быть маленькими, чтобы...

Или:

ФП 4. Частицы полимера в жидкости должны быть, чтобы..., и не должны быть, чтобы...

Для разрешения этих противоречий вновь можно использовать прием «разделить противоречивые требования во времени». Частицы полимера в жидкости должны быть на финише процесса, и частиц полимера не должно быть на его старте.

Конкретное техническое решение можно найти в школьном учебнике по химии — реакция полимеризации. Молекулы мономеров соизмеримы по величине с молекулами воды. Молекулярная масса полимеров измеряется сотнями тысяч и даже миллионами у. е. (не подумайте о долларах). И самое главное, полимеризация идет практически без изменения объема!

Специалисты (на то они и специалисты) умерят наш восторг и скажут: «Нет, не пойдет. Полимеризация обычно происходит при температуре выше 60 °С (стандартной для сушки лаковых покрытий)». Можно, опустив руки, на этом остановиться. А можно, и даже нужно продолжить решение.

Сформулируем техническое противоречие следующей задачи.

ТП 1. Если мономер наносится на печатную плату с радиоэлементами, то капиллярная пористость эффективно заполняется, но из-за повышенной температуры полимеризации «погибают» термочувствительные радиоэлементы.

ТП 2. Если мономер наносится на печатную плату до монтажа радиоэлементов, то термочувствительные радиоэлементы сохраняют работоспособность, но при этом мономер полимеризуется и на поверхности печатной платы, ухудшая качество пайки.

От ТП 2 переходим к формулировке физического противоречия.

ФП. Мономер должен полимеризоваться, чтобы обеспечить заполнение капилляров в подложке, и не должен полимеризоваться, чтобы гарантировать качество последующей пайки радиоэлементов.

На этот раз ТРИЗ предлагает использовать другой прием разрешения физических противоречий — «разделить противоречивые требования в пространстве». Мономер должен полимеризоваться в объеме (в капиллярах) и не должен полимеризоваться вне объема (на поверхности). Для нахождения конкретного решения следует заглянуть уже в вузовский учебник по химии полимеров. Оказывается, мономерные композиции с такими свойствами существуют.

Итак, поставленная задача решена. Но, как это бывает в реальной жизни, на пути от принципиального решения до работающей технологии пришлось сформулировать и решить еще немало изобретательских задач. И очень удачным оказалось то, что ТРИЗ-специалист и просто специалист в данном случае объединились в одном лице. Технология, названная

полимеризационным наполнением, оказалась способной повышать уровень сопротивления изоляции стеклотекстолита в печатных платах не в сотни, тысячи и более раз, со всеми вытекающими из этого последствиями.

Вот вам и изобретение, сделанное при помощи ТРИЗ. И это не какое-то несущественное усовершенствование (бантик на фраке), а, по словам специалистов, прорыв в области технологии изготовления и влагозащиты печатных плат. В максимальном объеме информации о технологии полимеризационного наполнения можно получить на сайте автора [7].

Ориентир — идеальность

Некоторые приемы разрешения технических противоречий в ТРИЗ переросли в законы развития технических систем. Так, из приёма «самообслуживание» появился закон повышения идеальности технических систем. Повышение идеальности есть увеличение соотношения

$$\frac{\sum \Phi_n}{\sum \Phi_p} \rightarrow \infty$$

где Φ_n — полезная функция, Φ_p — функция расплаты.

Повышение идеальности возможно в результате увеличения числителя или уменьшения знаменателя этого соотношения. Для идеальной машины $\Phi_p = 0$ (машины нет, а функция выполняется). Для реальной машины функция расплаты должна стремиться к нулю.

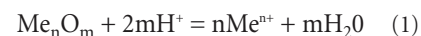
Закону повышения идеальности технических систем подчиняются новые веяния в технологии прессования многослойных печатных плат. Наблюдается постепенный переход на прессование... без прессформ. Идеальность достигается сочетанием двух технических решений:

1. Система совмещения слоев с бандажированием пакета [8].
2. Нагрев заготовок многослойных печатных плат за счет пропуска большого тока (до 2000 А) через фольгу внешних слоев. Фирмой Cedal разработан пресс, в котором используется такой способ [9].

Пресс-формы нет, а ее функции выполняются! Идеальный конечный результат (ИКР) в данном случае достигается в результате использования внутренних ресурсов системы.

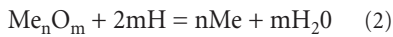
Закону повышения идеальности технических систем отвечает и интегрирование печатных плат с элементной базой. Некоторые радиоэлементы (емкости, индуктивности) изготавливаются уже непосредственно в печатной плате.

Когда-то мой коллега по институту сделал неплохой бизнес на паяльных флюсах. В основе работы традиционных паяльных флюсов, используемых для пайки радиоэлементов, лежит реакция (1):



Техническим обоснованием бизнес-идеи было заимствование флюса из иной области (сварки металлов). Принцип действия этого

флюса был основан на том, что окисная пленка не растворялась, а восстанавливалась до металла по реакции (2):



В качестве восстановителя в этом флюсе использовался атомарный водород, обладающий сильнейшими восстановительными свойствами. Источником же атомарного водорода был гипофосфит. Идеальность этого решения заключалась в том, что гипофосфит был отходом производства многотоннажного продукта. К сожалению, через некоторое время производство этого продукта прекратили, отходов не стало, и бизнес пришлось свернуть...

Былое и думы

Говорят, что новое — это хорошо забытое старое. С этим трудно не согласиться.

Так, в методе ПАФОС возродилась старинная технология изготовления печатных плат методом переноса [10]. Когда-то в этой технологии использовалась трафаретная печать. Открытия в области лазерной техники и фотолитографии позволили реализовать ее на принципиально новом уровне.

Применение SMD-компонентов позволило уменьшить толщину печатных узлов и тем самым уменьшить габариты изделий электронной техники. На этом фоне в прямом и переносном смысле выделялись трансформаторы

и дроссели. В соответствии с еще одним законом ТРИЗ (согласования — рассогласования технических систем) изобретатели «постучали по приподнятым шляпкам гвоздей». В результате появились планарные трансформаторы, в которых многослойные печатные платы заменили проволочные обмотки. В работе [11] говорится о том, что такие трансформаторы впервые были разработаны в конце 80-х годов. Заблуждаются! Еще в 1933 году Эрвин Е. Франц (США) предложил использовать для изготовления трансформаторов проводящие слои, изготовленные на целлофане, которые складывались гармошкой в пакет и пронизывались магнитопроводом [2].

Обычно ТРИЗ дает решение изобретательской задачи в общем виде. Говорят, что при этом задача решена на 99%. Для конкретного решения задачи следует знать физические, химические, геометрические и иные эффекты (информационный фонд). Бывает и так, что на данный момент замкнуть решение задачи не удастся. Ну не открыли еще такого эффекта!

Откроют. За вашей спиной законы развития технических систем! Гораздо обиднее будет, если искомый эффект уже открыт, а вы об этом просто не знаете. Невозможно перелопатить все источники информации. Да и память свою следует пожалеть. Здесь вам помогут указатели физических, геометрических, химических, биологических эффектов, наработанные энтузиастами от ТРИЗ. Различные версии таких указателей можно найти в Интернете. ■

Литература

1. Политехнический словарь / Редкол.: А. Ю. Ишлинский и др. — 3 изд. М.: Сов. энциклопедия. 1989.
2. Из истории технологий печатных плат // Электроника-НТБ. 2004, № 5.
3. <http://www.pcbfab.ru/article.php?id=21>
4. Галецкий Ф. П. Этапы развития печатных плат в ИТМ и ВТ им. С. А. Лебедева // Экономика и производство. 2001. № 1.
5. Галецкий Ф. П. Технология изготовления двадцатислойных печатных плат с проводниками 100 мкм // Экономика и производство. 2000. № 12.
6. <http://www.ats.net/deutsch/technologie/technologieplattform.html>
7. <http://www.urazaev.narod.ru>
8. Медведев А. М. Оборудование для производства печатных плат. По стендам «Экспозиции Электроники 2002» // Электронные компоненты. 2002. № 3.
9. Печатный монтаж — задача государственная // Электроника-НТБ. 2004. № 2.
10. Белевцев А. Т. и др. Печатные схемы в приборостроении, вычислительной технике и автоматике. М., Машиностроение. 1972.
11. Макаров В., Рушихин А. Применение планарных трансформаторов и плат на алюминиевой подложке в импульсных источниках электропитания // Компоненты и технологии: Силовая электроника. 2004. № 1.