

Проектирование печатных плат. Нефункциональные контактные площадки

Текст: Аркадий Медведев
Аркадий Сержантов

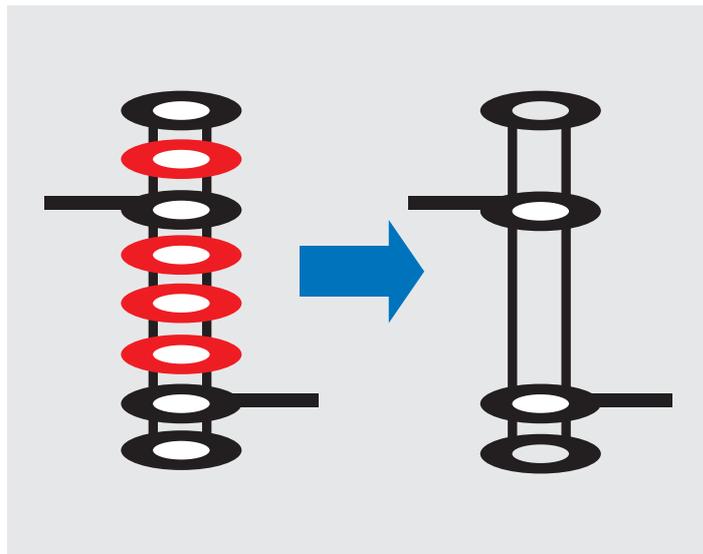


На страницах зарубежных периодических изданий развернулась дискуссия по поводу нефункциональных контактных площадок (НКП), заложенных в проекты многослойных печатных плат (МПП). В ходе дискуссий приводились доказательства об их полезности или вреде в конструкциях МПП. Мы подключились к этой теме и провели анализ различных точек зрения на проблемы наличия или отсутствия НКП в МПП электронных систем различного назначения. На основании этого анализа мы рекомендуем выводить НКП из проекта МПП, если иное не оговорено заказчиком.

НКП – это контактные площадки на внутренних слоях МПП, которые не имеют электрического соединения с каким бы то ни было элементом электрической цепи печатной платы. На рис 1 показан один из примеров наличия и изъятия НКП.

Решение о допустимости наличия НКП в проекте МПП проще принять на этапе технологической подготовки производства (ТПП), когда инженер-технолог занимается преобразованием абстрактного проекта МПП в исполняющие файлы для управления технологическим оборудованием. Этот этап неизбежно присутствует для адаптации конструкторского проекта к конкретным условиям производства и создания управляющих программ для оборудования с числовым программным управлением (ЧПУ). Именно в этот момент технолог может внести какие-либо изменения в конструкцию МПП, не искажая функциональность проекта. На усмотрение технолога НКП могут быть оставлены в проекте либо изъяты или выборочно – где-то оставлены, а где-то изъяты. Все процессы, описанные в статье, касаются компьютерного проектирования, конструирования и технологической подготовки производства.

При использовании систем автоматического проектирования САД (Computer Added Design) конструктор МПП специально не вводит НКП. Они вводятся по умолчанию САД-программами, и добиться их удаления можно, только специально настраивая САД. Сегодня этим озадачиваются только около 5 % конструкторов. Для большинства из них безразлично, будут НКП в проекте или нет, это никак не скажется



1 Нефункциональные контактные площадки. На левом изображении помечены красным, на правом – удалены на этапе технологической подготовки производства

на функциональных свойствах проекта. В результате НКП почти в 95 % случаев присутствуют в проекте МПП, поступающем в производство, и задача технолога, который готовит проект к производству, решить, нужны или не нужны НКП в проекте.

Цель данной статьи – представить доводы, в каких случаях НКП могут быть нужны, а в каких от них лучше избавиться. Для этого мы проведем анализ различных аспектов влияния НКП на характеристики МПП.

История вопроса.

Вопрос наличия НКП во внутренних слоях многослойных печатных плат обсуждался в течение многих лет и продолжает обсуждаться^{1,2,3,4}. Мнения о том, что НКП повышают надежность МПП и поэтому их в обязательном порядке нужно использовать, придерживались в основном военные, опираясь на исследования 60-80-х годов⁵ прошлого столетия. С ними солидарны проектировщики электронных систем ответственного назначения, считающие, что качество первоначально вне зависимости от сопутствующих производственных издержек⁶. Второго мнения – о необходимости удаления НКП – придерживается большинство производителей МПП. Они считают, что отсутствие НКП снижает затраты и повышает надежность системы межсоединений в МПП, т.к. позволяет избежать расслоений и коротких замыканий между контактными площадками (КП) и проводниками внутренних слоев, улучшает качество металлизации сквозных отверстий, а также, что очень важно, улучшает условия пайки выводов компонентов в отверстия.

¹ Birch B., Road S., Nepean W. Discussion on non functional pad removal / backdrilling and PCB reliability // PWB Interconnect Solut. Inc. 2005. №7. С. 14-32.

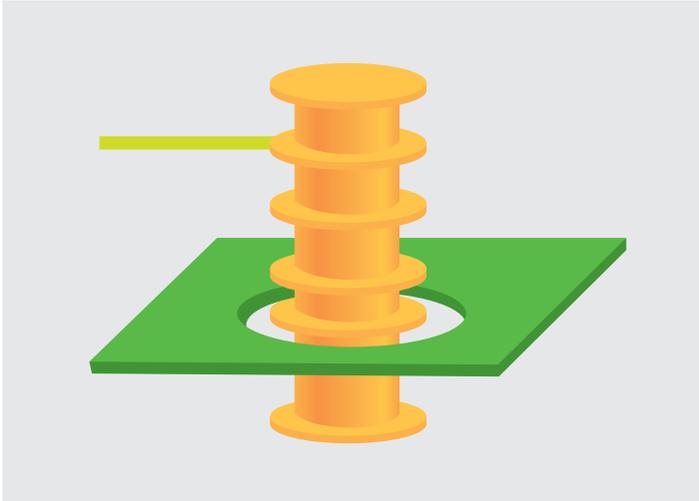
² G., Tulkoff C. Non-functional pads should they stay or should they go // DfR Solut. 2010. № 301. С. 45-52.

³ Birch, Bill, "Discussion on Non-functional Pad Removal/Backdrilling and PCB Reliability," PWB Interconnect Solutions Inc. 103-235 Stafford Road West, Nepean, Ontario, Canada K2H 9C1Caswell

⁴ V.Mozharov, O.Khomutskaya. Influence of non-functional contact pads on various characteristics of printed circuit boards. – <http://www.electronics.ru>.

⁵ Reid, Paul, "Design and Construction Affects on PWB Reliability," PWB Interconnect Solutions, IPC APEX EXPO.

⁶ Division S. Space product assurance: design rules for printed circuit. ECSS-Q-ST-70-12C. Noordwijk, The Netherlands. 173 с.



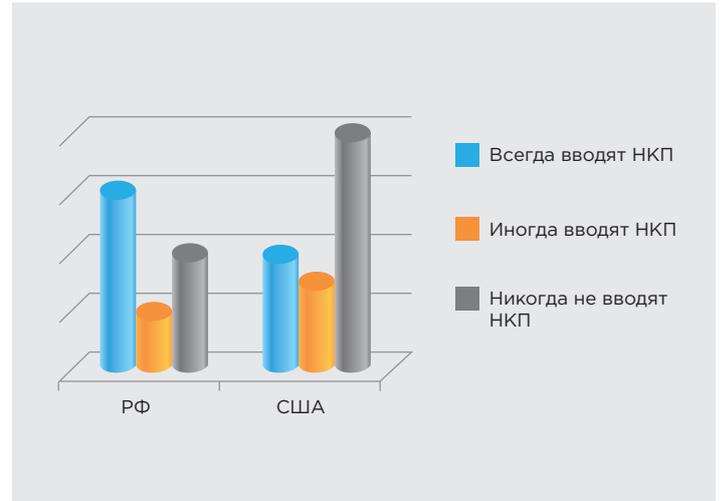
2
НФКП, оставленная в слое питания

Современное состояние проблемы

Для объективного анализа проблемы во время семинаров ООО «Остек-Сервис-Технология» нами проводилось анкетирование производителей и проектировщиков МПП по вопросу их отношения к НФКП. В опросе участвовали 42 отечественных предприятия, и на основе их оценок были сделаны следующие выводы:

- компании, удаляющие НФКП, делают это, в первую очередь, для продления срока службы сверл, улучшения условий пайки в отверстия МПП и улучшения условий технологического обеспечения надежности межсоединений и электроизоляционных конструкций МПП. Некоторые предприятия настаивают на том, что отсутствие НФКП повышает качество слоев МПП после травления, а также способствует уменьшению вероятности замыканий НФКП с соседними проводниками;
- компании, оставляющие НФКП, убеждены, что НФКП выполняют функции мульти-фланцевых заклепок для устранения опасности расслоения. Они считают, что в данном случае устраняется эффект неоднородного расширения элементов конструкции МПП по оси Z из-за различий в коэффициенте теплового расширения (КТР) разных материалов – меди и стеклотекстолита. Некоторые же компании откровенно признаются, что просто боятся ошибочно удалить нужную функциональную контактную площадку;
- часть участников опроса отметили, что в гибко-жестких МПП специально вводят НФКП для обеспечения дополнительного усиления конструкции.

Изготовители, которые предпочитают удалять НФКП, обосновывают это еще и тем, что в этом случае



3
Результаты опроса: отношение респондентов к НФКП во внутренних слоях МПП

упрощается процесс сверления^{7 8 9}. Медь – это тягучий металл, сверление которого всегда является проблемой, и заточка режущих кромок сверл не рассчитана на сверление меди. С другой стороны, полное отсутствие НФКП на большом количестве слоев МПП может привести к большим расстояниям между связанными точками (для соединения площадок) сквозного металлизированного отверстия (СМО), что может повлечь за собой частичное снижение надежности¹⁰. В качестве одного из компромиссных вариантов рассматривается выборочное удаление НФКП. Оно обеспечивает легкость изготовления, сохраняя при этом несколько связующих точек на протяжении всей длины СМО. Другой вариант – оставлять НФКП только на слоях питания, даже если они электрически ни с чем не связаны (рис 2). Эти слои не используются для прокладки сигнальных проводников, так что наличие в них НФКП никак не повлияет на сложность трассировки¹¹.

Все производители также отметили, что:

- использование стеклотекстолита или полиимида в качестве основания МПП не создает какой-либо разницы при решении об использовании НФКП^{12 13 14};

⁷ Медведев А.М. Сверление глубоких микроотверстий // Производство электроники. 2013. № 1. С. 1-3.

⁸ Медведев А.М. Печатные платы. Механическое сверление // Технологии в электронной промышленности. 2012. № 8. С. 10-17

⁹ С. Ванцов, к. т.н., А. Медведев, д. т.н., З. Маунг Маунг, О. Хомутская. Надежность процесса сверления печатных плат, понятие отказа. – Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2016, №6 (000069). С.168-172.

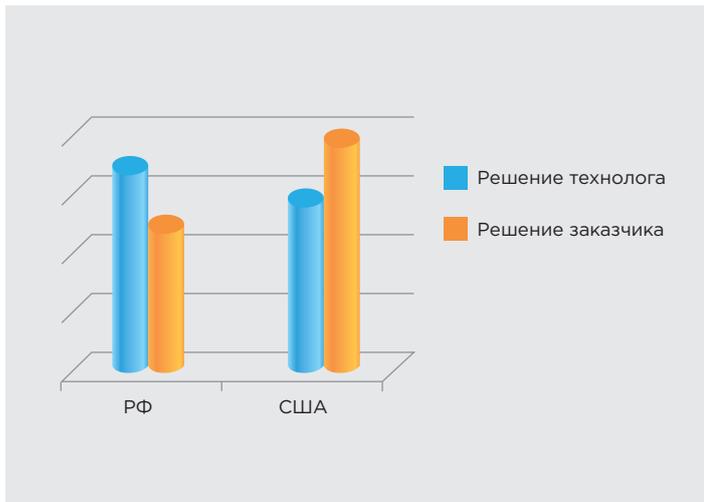
¹⁰ Wickham Martin, "Through Hole Reliability for High Aspect Via Holes," NPL Webinar June 11, 2013

¹¹ Non Functional Pad Removal. http://wiki.fed.de/images/7/70/Empfehlung_zu_Non_Functional_Pad_Removal.pdf.

¹² Greg Caswell? Cheryl Tulkoff. Non-Functional Pads (NFPs). Should They Stay or Should They Go? – SMTA ISCR 2014/

¹³ Altera AN-672, "Transceiver Link Design Guidelines for High-Gbps Data Rate Transmission," 02/15/2013.

¹⁴ Altera AN-529, "Via Optimization Techniques for High Speed Channel Design," May 2008.



4 На каком этапе принимается решение об использовании или удалении НКП

- основной причиной удаления НКП было увеличение технологичности МПП (уменьшение производственных издержек).

Стандарты

Единственной организацией, официально высказывающейся по поводу применения НКП, является Европейская кооперация по стандартизации в области космической техники (European Cooperation for Space Standardization, ECSS).

Согласно их стандарту¹⁵, можно не вводить НКП в двух случаях:

- если наличие НКП ухудшает электрические характеристики;
- если отсутствие НКП предотвращает появления областей с высоким давлением в процессе прессования, в которых может уменьшаться относительное содержание смолы в препреге (выдавливание связующего из зоны, окружающей отверстие).

При принятии решения об удалении НКП необходимо соблюдать следующие условия:

- НКП должны остаться на всех слоях питания и земли;
- НКП должны остаться на гибких слоях;
- допускается удалять не более половины всех НКП в переходном отверстии;
- допускается удалять НКП максимум на двух следующих друг за другом слоях;
- допускается удалять НКП только на одной стороне заготовки слоя;
- любые изменения, которые вводит технолог, должны быть в обязательном порядке согласованы с конструктором и введены в конструкторскую документацию.



5 Микрошлифы тестируемых МПП с НКП (справа) и без них (слева)

Анализ результатов исследований

Чтобы обоснованно решить, как поступать с НКП в конкретном случае, необходимо подробно рассмотреть и проанализировать связанные с ними факторы, так или иначе воздействующие на надежность печатных плат и/или различные аспекты технологических процессов их изготовления.

Факторы влияния НКП на надежность МПП

Однозначного ответа на вопрос о влиянии НКП на надежность МПП нет. Затруднения в оценке обусловлены тем, что современные требования к надежности аппаратуры зачастую конфликтуют с требованиями по миниатюризации и стоимости конечного устройства, поэтому значение этого влияния неодинаково для различных типов МПП, отличающихся назначением, условиями эксплуатации, плотности трассировки, классу точности и т.д. Единственный повод для оценки надежности создали результаты испытаний МПП на воздействие термоциклов¹⁶.

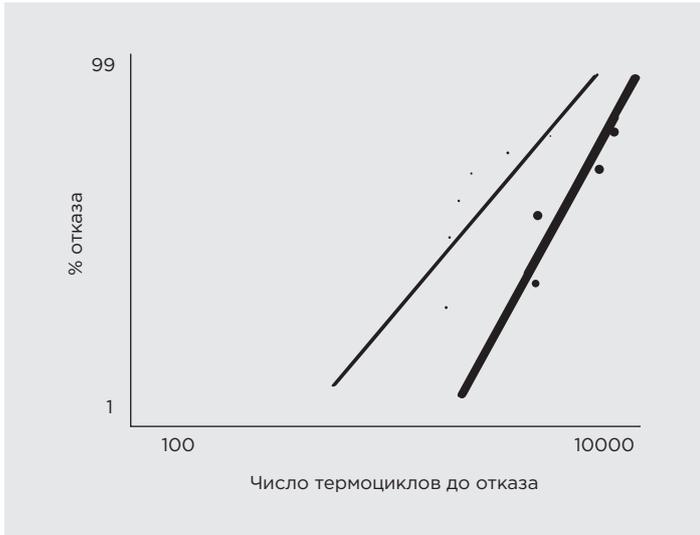
Увеличение вероятности расслоения

Национальная физическая лаборатория Великобритании провела исследования устойчивости к термоциклированию МПП с и без НКП¹⁷. Было создано два комплекта образцов толщиной 2,5 мм и соотношением глубины отверстия к диаметру 10:1 (рис 5).

Отказы, обнаруженные при термоциклировании образцов в диапазоне температур от -55 до 125 °С, представлены на рис 6 в виде распределения Вейбулла. График показывает аналогичные градиенты для обоих комплектов образцов. Однако в образцах без НКП время

¹⁵ Thierauf S.C. High-Speed Circuit Board Signal Integrity, Boston, London: Artech House, Inc., 2004. 243 с.

¹⁶ Barker, Donald & Dasgupta, Abhijit, Chapter 20 "Thermal Stress Issues in Plated-Through-Hole Reliability" in Thermal Stress and Strain in Microelectronic Packaging, Van Nostrand Reinhold, 1993.
¹⁷ Holes A.V. Through Hole Reliability for High Aspect Via Holes. 2013. № June. С. 50-55.



6

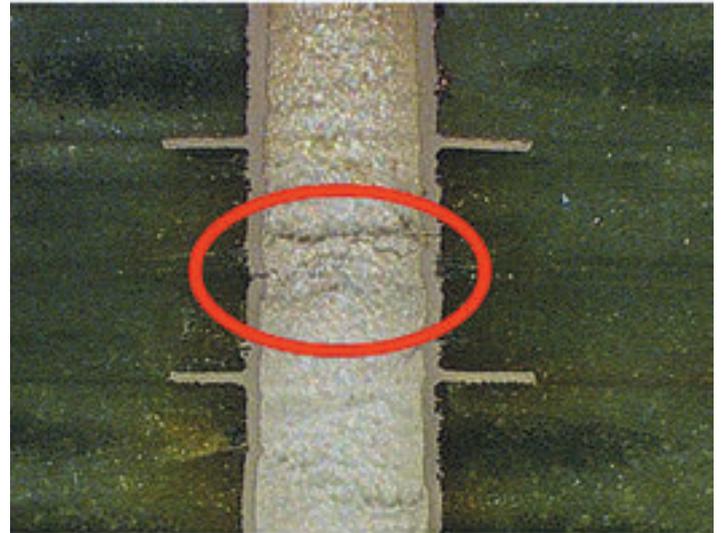
Зависимость процента отказов соединений в МПП от числа термоциклов. Тонкой линией показаны МПП с НКП, толстой – без НКП

до разрушения соединений больше. Количество термоциклов до 50 % отказов составляет около 700 для образцов с НКП по сравнению с примерно 930 циклами до отказа без НКП.

На основании исследования появилось предположение, что наличие НКП увеличивает усталостные разрушения материала на 20 %. Причину этого видят в том, что НКП, введенные в отверстия с высоким отношением толщины платы к диаметру просверливаемых отверстий – так называемым аспектным отношением – выступают в качестве концентраторов напряжений, что приводит к более ранним отказам. Если всё же НКП по каким-то причинам необходимы, для снижения их пагубного влияния на надежность рекомендуется вводить НКП только в местах, наиболее близких к 1/3 расстояния от верхней и нижней поверхности МПП (итого не более двух НКП в дополнение функциональным контактными площадкам). Этот подход делит цилиндр отверстия на три части в отношении термомеханических напряжений при термоциклировании: верхняя и нижняя части не испытывают практически никаких растягивающих или сжимающих напряжений, так как большая часть нагрузки сосредотачивается в средней части переходного отверстия. На рис. 7 показано, как эти напряжения реализуются в виде кольцевой трещины в середине отверстия. Расположение двух удерживающих соединений позволяет получить более равномерное распределение напряжений по всей длине цилиндра отверстия¹⁸.

Усиленный теплоотвод при пайке

Стек НКП формирует радиатор, который рассеивает тепло, из-за чего монтажное отверстие не поддается



7

Микрошлиф переходного отверстия с отказом (выделено красным) в области ввода НКП

прогреву, достаточному для удовлетворительного пропая. Как правило, диаметр контактной площадки в два раза больше диаметра отверстия. Простые расчеты показывают, что каждая НКП увеличивает поверхность теплоотвода в три раза. При пайке выводов компонентов в такие отверстия припой остывает при контакте уже с первыми НКП, в результате не удается реализовать полный пропая. Если эти элементы межсоединений относятся к силовым цепям, сосредоточение тока на ограниченном сечении пайки из-за непропая приводит к катастрофическому перегреву цепи джоулевым теплом и выходу системы из строя. Другие элементы и компоненты схем с выводами для пайки в отверстия, не получив нужного пропая, могут разрушиться при механических воздействиях.

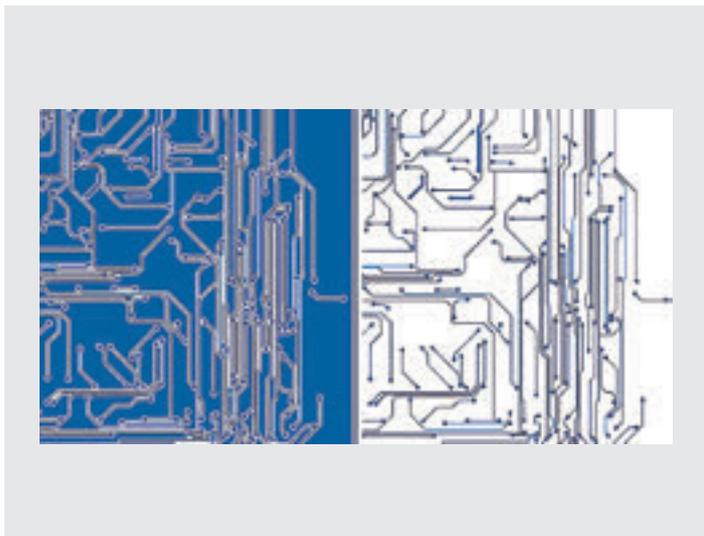
У нас часто спрашивают: что делать? Отверстия не пропаяются. Наш опыт подтверждает, что удаление НКП решает эту проблему.

Увеличение времени проверки и количества ложных срабатываний при автоматической оптической инспекции

Для детального контроля качества на производстве МПП используются системы автоматической оптической инспекции (АОИ). Форма НКП не критична, однако АОИ их проверяет как все другие, что приводит к ложным признакам брака, затягивает процесс инспекции и отвлекает внимание оператора – возникает опасность пропуска критической ошибки. Специально проведенные исследования человеческого фактора на достоверность тестирования показали, что вероятность пропуска брака составляет 23 %¹⁹.

¹⁸ Lau J., Barker D., Dasgupta A. Thermal stress and strain in microelectronics packaging. Van nostrand reinhold company. New York City. 1993. 683 с.

¹⁹ Медведев А. Конструктивно-технологическое обеспечение надежности БЦВМ. Проблемы информатизации. №3, 2008.



8 Слева – слой с заполненными медью пустотами, справа – исходный слой с проводниками

Увеличение геометрической стабильности слоев МПП

Фольгированные композитные материалы формируются горячим прессованием за один цикл. При отверждении связующего происходит полимеризационная усадка, которая не может себя реализовать, поскольку она фиксируется фольгой. Таким образом, материал основания слоя МПП получает внутренние напряжения, связанные с его композитной природой. Когда при травлении часть меди убирается, эти внутренние напряжения реализуют себя, деформируя основание слоя. Медь, по сути, армирует тонкое диэлектрическое основание, снижая коробление слоя и не давая высвободиться всем внутренним напряжениям материала на этапе травления^{20 21 22}. Таким образом, наличие значительных площадей меди за счет наличия НКП, оказывает позитивное влияние на качество платы в целом и на точность совмещения в частности. Кроме того, уменьшение площади травления за счет наличия НКП приводит к более медленному истощению травильного раствора, что положительно сказывается на качестве травления.

Геометрическая стабильность (с) фольгированного стеклотекстолита FR4 напрямую зависит от толщины медной фольги (t) и толщины диэлектрика (h).

Количественное выражение этой зависимости описывается формулой:

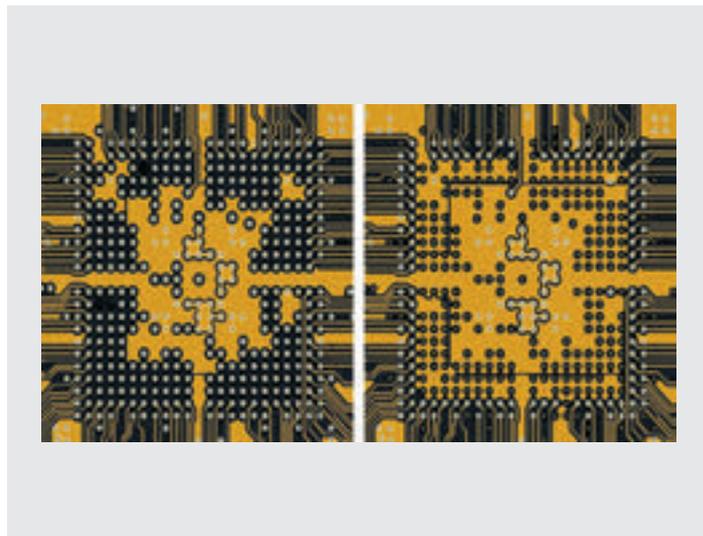
$$c(t, h) = (1,636 \cdot 10^{-3} - 9,106 \cdot 10^{-3} \cdot t) \cdot e^{-4,441 \cdot h} \cdot e^{14,808 \cdot t}$$

$$h \in [0,05; 0,5], t \in [0,018; 0,21]$$

²⁰ Медведев А.М., Можаров В.А. Размерная стабильность слоев прецизионных многослойных печатных плат // Печатный монтаж (приложение к журналу «Электроника. НТБ»). 2011. № 4. С. 140–147.

²¹ Можаров В.А. Математическая модель зависимости усадки стеклотекстолита от его конструктивных параметров // Электронный журнал «Труды МАИ». 2013. № 65. С. 1–8.

²² Медведев А.М., Можаров В.А. Многослойные печатные платы. Способы улучшения размерной стабильности материалов слоев // Производство электроники. 2011. № 5. С. 30–34.



9 Посадочное место с НКП и без НКП под BGA-компонент на плате

Можно сделать заключение, что наличие большого количества пустот в металлизации слоя ведет к серьезной погрешности расположения и размера межслойных соединений, особенно на тонких основаниях. НКП могут занимать 67 % от всей поверхности слоя; поэтому если рассматривать улучшение его геометрической стабильности как приоритетную задачу, очевидно, что НКП необходимо оставлять (рис 8).

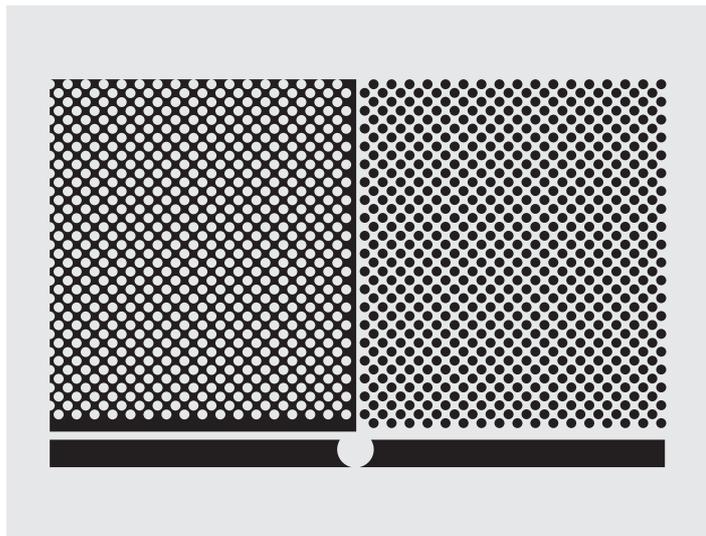
Однако в зонах установки BGA-корпусов подходящие к КП проводники находятся на разных внутренних слоях, при этом они располагаются достаточно близко друг к другу. Их близкое расположение не позволяет заполнить пустое пространство медным полигоном. Поэтому НКП под BGA-компонентом рекомендуются к удалению, т.к. при соблюдении минимального отступа от переходного отверстия площадь заполненного медью полигона будет больше, что улучшит совмещение слоев (рис 9).

Уменьшение ресурса сверл

Существует гипотеза о том, что наличие НКП приводит к ухудшениям характеристик сверления, так как сверление происходит через дополнительный слой меди НКП. Это ведет к увеличению температуры в зоне сверления, что, в свою очередь, приводит к залипанию стружки в спиральных канавках сверла и выводу её из зоны сверления и размазыванию расплавленной смолы связующего на торцах контактных площадок внутренних слоев МПП, значительно снижая надежность внутренних соединений МПП.

Для проверки данной гипотезы нами была изготовлена 16-слойная плата размером 175 × 280 мм, в правой части которой было 6014 НКП (62 ряда по 97), а в левой – 6014 так называемых «antipads» – круглых высвобождений в меди без НКП (кружков свободного стеклотекстолита в сплошном медном полигоне), рис 10.

Далее все площадки были просверлены (для каждого типа площадок использовалось отдельное сверло диаме-



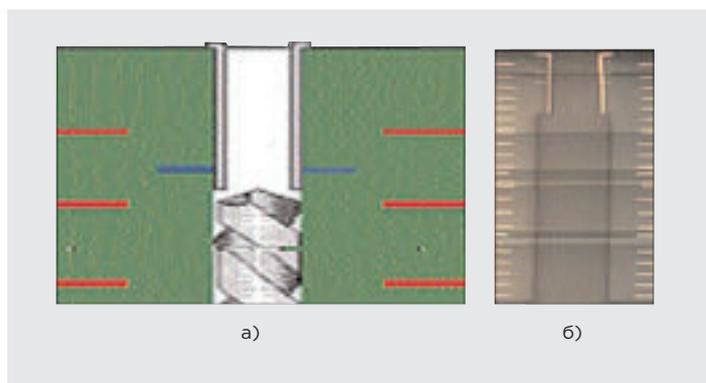
10

Нижняя центральная часть тестовой платы: участок с НКП (справа), полигон с высвобождениями (слева)



11

Первые отверстия на участке с НКП (слева) и на участке с высвобождениями (справа)



12

Обратное сверление для уменьшения емкостной нагрузки: а) схема сверления, б) микрошлиф обратного сверления

тром 0,65 мм), причем после прохождения каждого ряда в обоих случаях (с и без НКП) сверлилось контрольное отверстие на краю платы с медной фольгой (рис 11).

Там, где отверстие просверлено через НКП – видна стружка и буртик, что свидетельствует о сильном затуплении сверла. На контрольных отверстиях без НКП буртик значительно меньше размером, а отверстия не содержат стружку или другие продукты сверления. На половине с НКП буртик начал появляться уже

на 8–10 ряду, а на половине без НКП – только на 32–34 ряду. Это свидетельствует о большем затуплении сверла при сверлении отверстий с НКП. На основании этого можно утверждать, что НКП негативно влияют на стойкость сверла и качество сверленных отверстий в производстве МПП.

Создание помех и искажение характеристик линий связи

Для реализации высокой плотности межсоединений в конструкциях МПП используют большое количество переходных отверстий, задача которых – осуществить соединения между слоями в трансверсальном направлении. Зачастую в сквозном переходном отверстии контактные площадки могут присутствовать на каждом сигнальном слое (даже если этот слой не связан трассировкой через отверстие). Очевидно, что эти контактные площадки имеют емкостную связь со слоями питания выше и ниже в стеке. Эта нежелательная емкость увеличивает емкостную нагрузку, создаваемую отверстием; если отверстие длинное или если частота сигнала высока, неиспользованная часть отверстия с его НКП будет выступать в качестве не предусмотренной емкостной нагрузки, искажающей согласование линий связи²³.

Удаление НКП в этом случае считается обязательным в отверстиях высокочастотных печатных плат. Ряд проектировщиков СВЧ-плат предусматривает высверливание части металлизации отверстия для уменьшения емкостной нагрузки (рис 12).

Уменьшение увода сверла при сверлении

В процессе сверления переходных отверстий МПП, особенно с высоким аспектным отношением (более 10:1), наблюдается разность координат входа и выхода сверла, т.е. имеет место отклонение сверла от прямой траектории движения. Сторонники НКП считают, что медные площадки НКП работают как кондукторы, не давая сверлу отклониться от оси сверления. При сверлении МПП с низким аспектным отношением (менее 10:1) погрешностью такого отклонения сверла можно пренебречь. Однако надо учитывать, что современные МПП высокого класса точности имеют переходные отверстия диаметром 0,2 мм и менее, и при таких диаметрах аспектное отношение становится высоким даже при сравнительно небольшой толщине МПП, поэтому проблема компенсации этой погрешности особенно актуальна. Тем не менее, исследования точности позиционирования выхода сверла не показали заметной разницы их рассеивания как представлено на рис 13. Вероятно это обусловлено тем, что конфигурация режущей части сверл не рассчитана на сверление меди фольги МПП, а ориентирована в основном на сверление стеклоэпоксидной композиции.

²³ Thierauf, Stephen, High-speed Circuit Board Integrity, Artech House, January 2004

Сокращение трассировочного пространства слоя

Этот фактор имеет значение для определенного класса МПП: для рационального использования пространства слоя рекомендуется удалять НКП. Это позволяет сократить протяженность дорожек и упростить топологический рисунок слоя. На рис 1 4 представлен пример трассировки, когда наличие НКП имеет значение.

Ухудшение качества металлизации сквозного отверстия

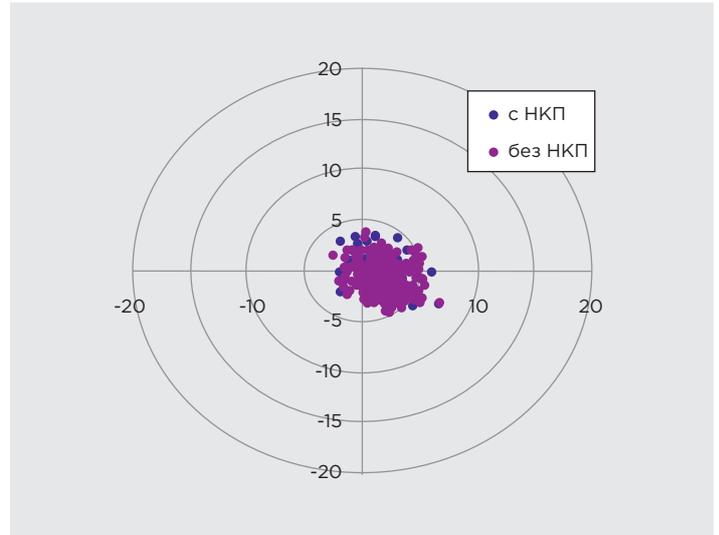
В производстве МПП есть операция очистки отверстий после сверления. Она необходима, чтобы убрать наносмолы, неизбежно остающийся после сверления, со стенок отверстия. Эта очистка медных торцов сопровождается подтравливанием диэлектрика, в результате которого образуются пазухи (на рис 1 5 они показаны белым цветом), в которых скапливаются трудно удаляемые остатки химикатов и технологических загрязнений. Это может приводить к коррозионным процессам разрушения металлизации и миграции загрязнений в электроизоляционные зазоры МПП, что в конечном итоге снижает надежность системы. НКП создают на стенках отверстий своеобразный лабиринт, затрудняющий отмывку, и тем самым снижают потенциальную надежность межсоединений и электроизоляцию.

Рекомендации по использованию НКП

Теперь, когда определены эффекты, вызванные наличием НКП, можно сформулировать рекомендации о целесообразности наличия либо отсутствия НКП в проектах МПП.

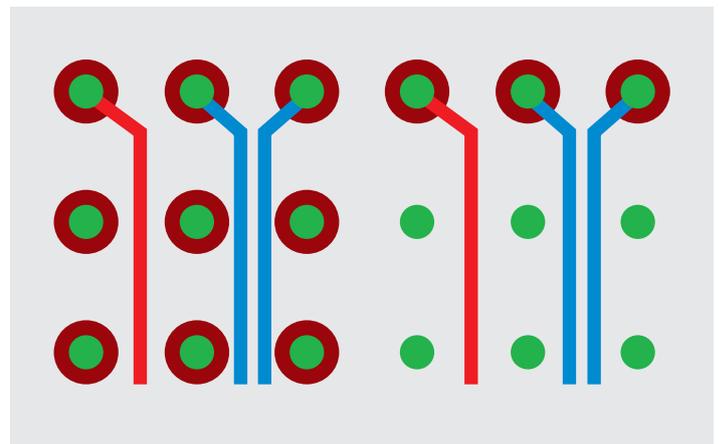
CAD-системы автоматически вводят НКП в проекты МПП. Решение об изъятии НКП принимает или конструктор на завершающем этапе проектирования, или технолог на этапе технологической подготовки проекта МПП к производству. При этом технолог руководствуется необходимостью обеспечить минимальные издержки для производства. С этой точки зрения проекты МПП с НКП приводят к осложнениям при пайке в отверстия, усложнению процедуры контроля средствами АОИ и снижению качества металлизации. Поэтому технолог считает, что их нужно удалять. Конструктор руководствуется другими соображениями, и они тоже, как правило, побуждают его удалять НКП из проекта МПП. Особенно это относится к проектам МПП с согласованными линиями передач: НКП создают нежелательную для линий емкостную нагрузку. Также лишние НКП ухудшают условия для уплотнения трасс проводников. Что касается обеспечения надежности МПП, то проведенные испытания на воздействие термоциклов показали преимущества проектов с удаленными НКП. Наличие НКП не оказывает и существенного положительного влияния на конечный продукт.

Как итог – производителям МПП рекомендуется выводить НКП из проектов, если иное не оговорено заказчиком. □



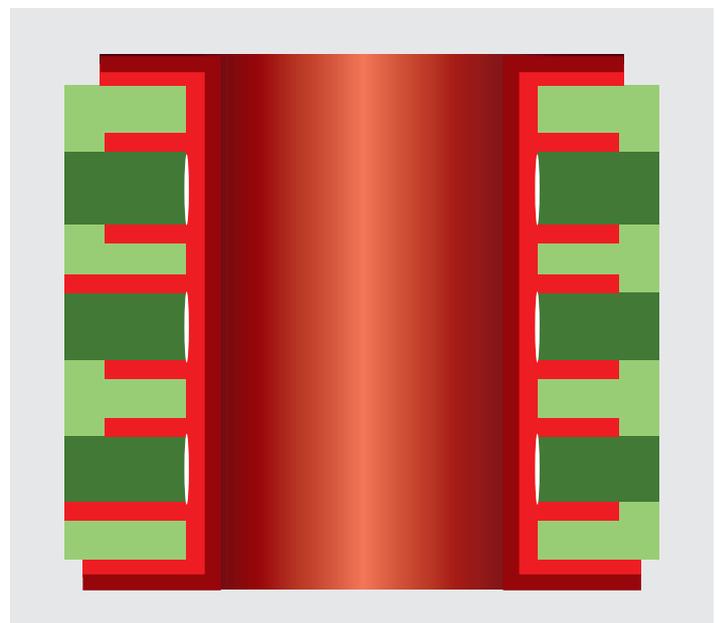
1 3

Координаты выхода сверла



1 4

Схема расположения переходных отверстий и дорожек при наличии (слева) и отсутствии (справа) НКП



1 5

Поперечный срез сквозного металлизированного отверстия