

ПРОЕКТИРОВАНИЕ МНОГОУРОВНЕВЫХ СИСТЕМ В КОРПУСЕ С МЕТАЛЛИЗИРОВАННЫМИ ОТВЕРСТИЯМИ В МОЛД-КОМПАУНДЕ

С.П. Семенов

С.А. Батин

Д.В. Вертянов

Р.Н. Жумагали

М.Д. Кочергин

С.П. Тимошенко

ssp.science@mail.ru

sergey.batin@mail.ru

vdv.vertyanov@yandex.ru

zhumagali9005@gmail.com

misha.kochergin1999@yandex.ru

spt111@mail.ru

МИЭТ, Москва, г. Зеленоград, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрены перспективы применения металлизированных и заполненных гальванической медью переходных отверстий в молд-компаунде или полимерном материале, применяемом для герметизации интегральных схем в процессе двух- или трехмерного корпусирования. Изучен метод предварительных расчетов электрических параметров структуры переходных отверстий, выполненных в молд-компаунде систем в корпусе. Технология изготовления систем в корпусе с молд-компаундом позволяет повысить плотность размещения элементов, обеспечивает надежное соединение уровней, микросхем как в корпусном, так и бескорпусном исполнениях и значительно уменьшает размеры конечного изделия, обеспечивая высокие производительность и надежность электронных устройств. Приведены формулы расчета электрических параметров переходных отверстий в молд-компаунде системы в корпусе. Выполнен сравнительный анализ результатов, полученных по математическим формулам и методом симуляции (с помощью метода конечных элементов в трехмерной среде моделирования). Рассмотрены возможности моделирования распространения электромагнитных волн для анализа целостности сигналов и электромагнитной совместимости при проектировании мультикристалльных сборок и систем в корпусе с применением переходных отверстий в терморезистивном

Ключевые слова

Система в корпусе, трехмерное корпусирование, переходные отверстия, молд-компаунд, подложка, целостность сигнала, S-параметр, волновое сопротивление

молд-компаунде, предназначенном для герметизации микросхем. В результате моделирования определены согласованные структуры переходных отверстий в молд-компаунде, которые имеют оптимальные соотношения между геометрическими размерами, технологической возможностью производства и вносимыми потерями в целостность сигнала

Поступила 08.09.2025

Принята 05.11.2025

© Автор(ы), 2026

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (проект FSMR-2025-0005)

Введение. Стремление к миниатюризации электронных устройств и гетерогенной интеграции систем обуславливает необходимость разработки новых технологий корпусирования (рис. 1), обеспечивающих трехмерную компоновку с потенциалом увеличения плотности размещения элементов и компонентов [1–4]. Современные тенденции к повышению плотности межсоединений и миниатюризации в микроэлектронике, например, в модулях типа «система в корпусе» SiP (System-in-Package) и «корпус на корпусе» PoP (Package-on-Package), обусловлены растущими требованиями к компактности и функциональности смартфонов и носимых устройств [5]. Подход к расчету параметров структуры переходных отверстий в молд-компаунде систем в корпусе PMV (Plating Mold Via), дающий предварительное представление о геометрических и электрических параметрах структуры отверстий, приведен в [5].

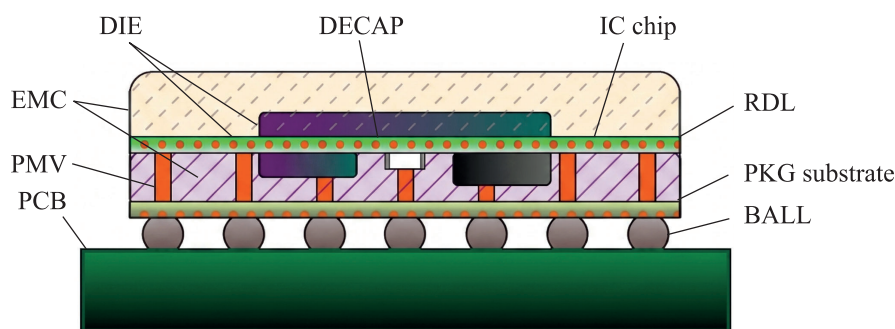


Рис. 1. Новые технологии корпусирования: двухсторонний монтаж компонентов на подложке трехмерной системы в корпусе (межуровневая коммутация подложек посредством переходных отверстий PMV):

PCB — печатная плата; EMC — молд-компаунд; DIE — бескорпусная интегральная схема на кристалле; DECAP — развязывающий конденсатор; IC chip — компонент поверхностного монтажа; RDL — слой перераспределения топологии; PKG substrate — органическая подложка корпуса микросхемы; BALL — внешний вывод на подложке микросхемы сферической формы

Цель настоящей работы — представить результаты разработки методики предварительной оценки электрических параметров структуры переходных отверстий, выполненных в молд-компаунде систем в корпусе, с последующей верификацией полученных результатов посредством трехмерного электродинамического моделирования.

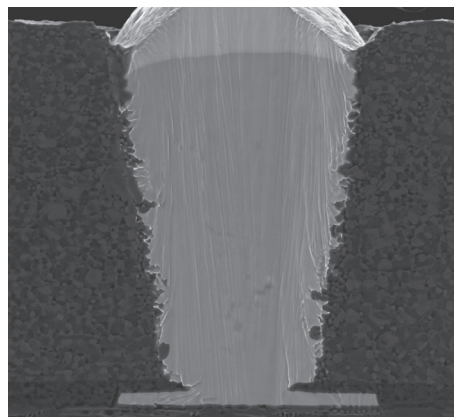
Материалы и методы. В настоящий момент выделяют два основных типа переходных отверстий [6, 7] для межуровневой коммутации через молд-компаунд.

1. TMV (Through Mold Via) — переходные отверстия, выполненные в молд-компаунде EMC (Epoxy Molding Compound) по классической технологии, где переход формируется методом лазерной абляции или сверлением с последующей металлизацией, обычно сначала делают химическую затяжку, а потом гальваническое осаждение меди.

2. PMV — переходные отверстия, выполненные в молд-компаунде усовершенствованным методом, сочетающим в себе лазерную абляцию и гальваническое осаждение металла с полным заполнением отверстия, это позволяет создавать более надежные и компактные межсоединения с улучшенными электрическими и механическими характеристиками.

В отличие от классических переходных отверстий TMV в эпоксидном компаунде, переходные отверстия PMV — это не только непосредственные отверстия в термореактивном эпоксидном молд-компаунде EMC, но и комбинированный выход через контактную площадку на вывод микросхемы, сделанный из бессвинцового припоя SAC305 (рис. 2). Это создает надежные межслойные коммутационные переходы, формирует контактные площадки и выводы на смежных поверхностях корпуса микросхемы или системы в корпусе.

Рис. 2. Комбинированный выход через контактную площадку на вывод микросхемы, выполненный из бессвинцового припоя SAC305 [1]



Использование в современных полупроводниковых устройствах переходных отверстий PMV открывает новые возможности для миниатюризации, повышения производительности и надежности. Применение переходных отверстий PMV в молд-компаунде позволяет проектировать

PoP сборки с уменьшенным шагом межсоединений по сравнению с традиционными переходными отверстиями TMV, снижает риск отслоения при термоциклировании за счет связи между припоем и контактными площадками.

Появляется возможность размещать кристаллы и другие чип-компоненты внутри конструкции системы в корпусе с переходными отверстиями PMV по принципу мезонина (рис. 3). Такой подход позволяет создавать многоуровневые мультикристалльные системы повышенной миниатюризации. Эта концепция дает возможность перенести часть схемотехнических решений с печатной платы непосредственно в систему в корпусе за счет применения многоуровневой структуры, а также слоев перераспределения топологии RDL (Re-Distribution Layers). Например, принести на первый уровень мезонинной сборки системы в корпусе оперативное запоминающее устройство, постоянную запоминающую память flash, EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory), развязку шины питания и др.

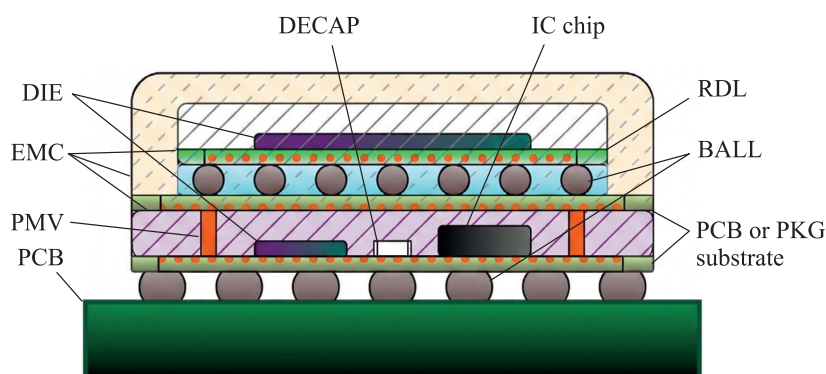


Рис. 3. Размещение кристаллов и чип-компонентов внутри конструкции системы в корпусе с переходными отверстиями PMV по принципу мезонина

Основные функции RDL:

- перераспределение проводников и контактов, позволяющее соединять близко расположенные контактные площадки кристалла (например, при технологии Flip-Chip) с более широкими выводами корпуса;
- уменьшение паразитных эффектов путем оптимизации длины проводников для снижения индуктивности и сопротивления;
- гибкость проектирования, обеспечивающая адаптацию одного кристалла под различные типы корпусов;
- интеграция пассивных элементов, таких как резисторы, катушки индуктивности или конденсаторы.

Слои перераспределения RDL применяют в корпусах микросхем различных типов. Например, в технологиях FO-WLP (Fan-Out Wafer-Level Packaging) RDL используют для вывода контактов кристалла за его физические границы. В технологии корпусирования FC BGA (Flip-Chip Ball Grid Array) слои RDL обеспечивают связь между кристаллом и шариковыми выводами корпуса, а в технологиях с применением интерпозера RDL служат для организации соединений между несколькими кристаллами внутри одного корпуса микросхемы. Использование RDL позволяет уменьшить физическую длину электрических цепей, повысить быстродействие системы, применять органические материалы подложек вместо кремниевых интерпозеров, к тому же увеличить гибкость процесса проектирования корпусов интегральных схем (ИС). Примерами устройств, использующих технологию RDL, являются мобильные процессоры серий Apple A-series и Qualcomm Snapdragon, высокопроизводительные графические ускорители компаний NVIDIA и AMD, а также специализированные решения для интернета вещей IoT и носимых электронных устройств.

Можно выделить несколько положительных аспектов применения переходных отверстий в молд-компаунде микросхемы или системы в корпусе. Задачи в рамках проектирования аппаратной части микроэлектроники в настоящее время решаются с прицелом на перспективу повышения производительности, плотности компоновки и увеличения эффективности вычислительного потенциала [8]. Такие тенденции привели к появлению инновационных решений в корпусировании ИС, например, технологии металлизированных формованных отверстий PMV. Интеграция PMV в корпус микросхем позволяет существенно повысить эффективность и надежность электронных устройств, обеспечивая широкий спектр преимуществ для производителей и разработчиков компактных устройств.

Преимуществом отверстий PMV является значительное улучшение электрической и тепловой проводимости. Металлизация отверстий медью обеспечивает минимальное переходное сопротивление, что критически важно для высокопроизводительных применений, таких как системы в корпусе SiP и мощные транзисторы MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor). Эффективный теплоотвод также помогает предотвратить перегрев кристаллов, продлевая срок службы за счет уменьшения вероятности возникновения электронной эмиссии, повышая общую надежность устройства. Благодаря низкой паразитной индуктивности пере-

ходные отверстия PMV способствуют улучшению энергоэффективности, позволяя снизить падение напряжения при передаче питания и сигналов.

Применение переходных отверстий в молд-компаунде открывает возможности для реализации сложных многослойных структур внутри корпуса микросхемы с сохранением при этом небольших габаритных размеров. В связи с этим увеличивается плотность размещения компонентов без увеличения размера электронного модуля, что становится важным фактором при разработке современных мобильных устройств и компактной вычислительной техники. Немаловажно использование PMV в сочетании с технологиями 3D-микросборок с торцевой коммутацией [9, 10], если необходимы вертикальные соединения между кристаллами ИС. В таком случае сокращение длины проводников уменьшает задержки передачи сигналов, что положительно сказывается на скорости обмена данными и работе высокоскоростных параллельных интерфейсов наподобие DDR (Double Data Rate), HBM (High Bandwidth Memory) и др.

Конструкция корпуса системы в корпусе, оснащенная молд-компаундами, демонстрирует высокую механическую прочность и стойкость к изменениям температуры. Использование специальных материалов молд-компаундов делает конструкцию устойчивее к абсорбированию влаги и повреждениям при термоциклических нагрузках. Эти качества делают молд-компаунды предпочтительным решением для промышленных исполнений изделия, в которых экстремальные условия эксплуатации являются нормой. Кроме того, молд-компаунды для систем в корпусе могут иметь малые диаметры (рис. 4).

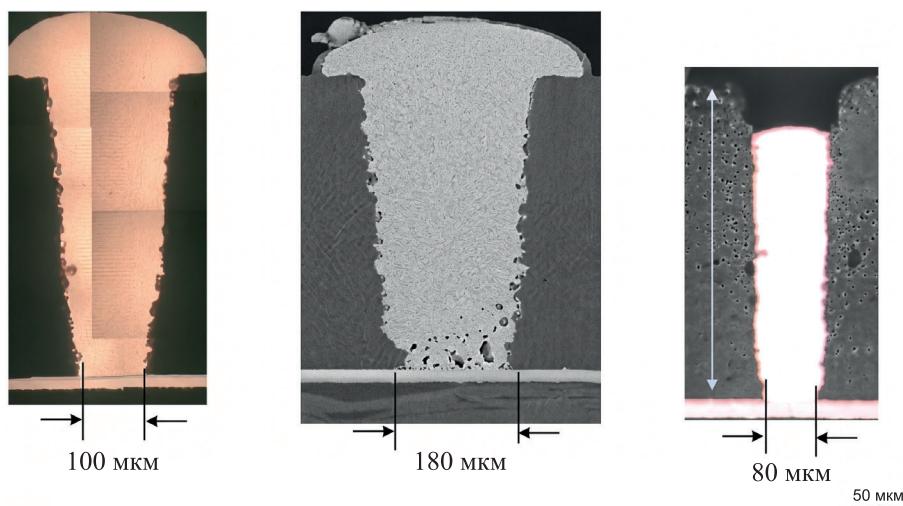


Рис. 4. Молд-компаунды с малыми диаметрами для систем в корпусе [1]

Использование металлизированных отверстий в качестве экранов снижает уровень электромагнитных помех и перекрестных наводок между сигналами. Такая конструкция защищает чувствительные компоненты, такие как кварцевый осциллятор, предотвращая искажение передаваемых сигналов, и снижает вероятность возникновения наводок. Организация эффективных заземляющих слоев посредством переходных отверстий PMV может обеспечить разработку надежных и качественных аналоговых и радиочастотных схем, используемых в системах беспроводной связи пятого поколения (5G) и радиолокационных устройств.

Немаловажным аспектом внедрения переходных отверстий PMV по сравнению с торцевой коммутацией является экономическая выгода. Формирование PMV осуществляется лазерной абляцией, что позволяет сократить производственные этапы и затраты по сравнению со сложными многоуровневыми 3D-сборками. Совместимость с массовым производством, включая корпусирование на уровне пластин FO-WLP, делает переходные отверстия PMV возможным вариантом решения конструкторской задачи при проектировании многоуровневой системы в корпусе для микроэлектронной продукции [11, 12].

Использование переходных отверстий в молд-компаунде обеспечивает преимущества в плане электрических характеристик, тепловых свойств, механической прочности и устойчивости к внешним воздействиям. Будущее развитие микроэлектроники неотъемлемо связано с дальнейшим совершенствованием технологии корпусирования микросхем, где переходные отверстия PMV и TMV в молд-компаунде, вероятно, найдут свое применение.

Результаты. Расчет параметров структуры переходных отверстий, выполненных в молд-компаунде микросистемных сборок. Перед непосредственным проектированием и моделированием структуры переходных отверстий PMV необходимо провести предварительные расчеты параметров волнового сопротивления, емкости и индуктивности. Это позволит получить предварительное представление о габаритных размерах и электрических параметрах топологической структуры переходных отверстий PMV.

Такой подход позволяет спрогнозировать ожидаемый результат и уменьшить число итераций проведения FEM-моделирования (метод конечных элементов) при решении дифференциальных уравнений с частными производными.

Формулы, описывающие расчет волнового сопротивления, индуктивности и емкости переходных отверстий в молд-компаунде микро-

схем, — это детализированный вариант расчета параметров неэкранированной двухпроводной линии передачи бесконечной длины в среде с заданной диэлектрической проницаемостью. Ключевые геометрические параметры структуры молд-компаунда микросхем приведены на рис. 5.

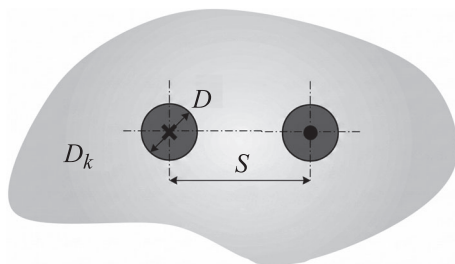


Рис. 5. Ключевые геометрические параметры структуры молд-компаунда микросхем

Волновое сопротивление переходного отверстия в молд-компаунде микросхем можно рассчитать по формуле¹

$$Z_0 = \frac{119,904}{\sqrt{D_k}} \ln \left(\frac{S}{D} + \sqrt{\left(\frac{S}{D} \right)^2 - 1} \right), \quad (1)$$

где D_k — относительная диэлектрическая проницаемость молд-компаунда; S — расстояние между центром двух переходных отверстий; D — диаметр переходных отверстий.

Согласование волнового сопротивления между проводником на подложке корпуса микросхемы и переходным отверстием PMV позволяет минимизировать отражения. В случае если волновое сопротивление переходного отверстия PVM отличается от сопротивления проводника, возникнет рассогласование импеданса. Как правило, это приводит к частичному отражению электромагнитной волны обратно в сторону источника сигнала, что может быть критично, поскольку передатчик, расположенный на кристалле, находится в непосредственной близости от места неоднородности внутри системы в корпусе. Отраженная волна интерферирует с исходной волной, вызывая искажение формы сигнала и ухудшение качества передачи данных. При большом значении обратных потерь возможны сбои в работе передатчика данных, возникновение межсимвольной интерференции в передаваемом сигнале. Несоответствие импедансов вызывает рассеивание энергии на границах раздела сред, увеличивая потери сигнала. Для соединения проводниками кристаллов в рамках мультикристалльной сборки и системы в корпусе особенно кри-

¹ Ганстон М.А. Справочник по волноводным сопротивлениям фидерных линий СВЧ. М., Связь, 1976.

точно отсутствие отраженных волн, поскольку даже небольшие изменения импеданса приводят к значительным изменениям амплитуд и фаз сигналов. Точное согласование сопротивлений гарантирует сохранение характеристик сигнала в широком диапазоне частот.

Для предварительного расчета значений параметров диаметра переходного отверстия D и расстояния между центрами переходных отверстий S под заданное волновое сопротивление Z_0 запишем формулы определения этих параметров.

Выразим из формулы волнового сопротивления (1) расстояние S между центрами переходных отверстий.

Упростим формулу путем введения обозначений для отношения расстояния между центрами отверстий к диаметру отверстий $x = S/D$,

а также запишем $k = \frac{Z_0 \sqrt{D_k}}{119,904}$.

С учетом упрощения получим $k = \ln(x + \sqrt{x^2 - 1})$. Выразим x через гиперболические функции: $\ln(y + \sqrt{y^2 - 1}) = \operatorname{arcosh} y$. Таким образом, $k = \operatorname{arcosh} x$.

Применим гиперболический косинус к обеим частям: $x = \cosh k$.

Вернемся к исходным переменным, подставив введенные переменные:

$$\frac{S}{D} = \cosh\left(\frac{Z_0 \sqrt{D_k}}{119,904}\right).$$

Расстояние между центрами отверстий и диаметр переходного отверстия PMV можно представить так:

$$S = D \cosh\left(\frac{Z_0 \sqrt{D_k}}{119,904}\right); \quad (2)$$

$$D = \frac{S}{\cosh\left(\frac{Z_0 \sqrt{D_k}}{119,904}\right)}. \quad (3)$$

Кроме волнового сопротивления и геометрических размеров переходных отверстий PMV, важно предварительно рассчитать электрические параметры проводника — погонную емкость и индуктивность, влияющие на целостность сигнала, реактивное сопротивление линии пере-

дачи и характеризующие способность системы накапливать энергию в электрическом и магнитном полях.

Значения погонной емкости C_0 , индуктивности L_0 на 1 мм длины переходного отверстия PMV можно вычислить по формулам:

$$C_0 = \frac{27,8D_k}{\ln\left(\frac{S}{D} + \sqrt{\left(\frac{S}{D}\right)^2 - 1}\right)}; \quad (4)$$

$$L_0 = 0,4 \ln\left(\frac{S}{D} + \sqrt{\left(\frac{S}{D}\right)^2 - 1}\right). \quad (5)$$

Параметры погонной емкости и индуктивности связывают физическую структуру переходных отверстий с их электрическими свойствами². Правильный учет позволяет уменьшить искажения сигналов, повысить энергоэффективность и обеспечить работоспособность высокочастотных и цифровых систем. Согласование переходного отверстия, выполненного в молд-компаунде с проводником аналогичной электрической цепи, расположенным на подложке корпуса микросхемы или в структуре микросистемной сборки, представляет собой важный топологический прием, направленный на оптимизацию электрических, тепловых и конструктивных характеристик устройства. Такое согласование позволяет существенно снизить паразитную индуктивность, присущую переходным отверстиям, за счет формирования более короткого возвратного токового пути между слоями. Это особенно актуально в условиях высокочастотного функционирования, когда даже незначительные изменения в импедансе могут привести к изменению сигнала. Благодаря уменьшению индуктивного сопротивления улучшается целостность сигнала, снижается вероятность возникновения отражений и искажений, что критично для цифровых схем с высокими тактовыми частотами и для аналоговых трактов с узкой полосой пропускания.

В некоторых случаях подобная конфигурация также положительно влияет на тепловые характеристики микросборки, поскольку может использоваться для создания эффективных тепловых путей, обеспечивающих отвод теплоты от активных элементов к теплоотводящим слоям подложки.

² Кечиев Л.Н. Справочник по расчету электрической емкости, индуктивности и волнового сопротивления в электронной аппаратуре. М., Грифон, 2021.

Это может играть существенную роль в условиях повышенной тепловой нагрузки при ограниченных возможностях внешнего охлаждения.

С точки зрения проектирования согласование переходных отверстий в молд-компаунде с внутренними проводниками позволяет рационально использовать межслойные ресурсы подложки корпуса микросхемы, обеспечивая при этом высокую плотность компоновки и надежность электрических соединений. Таким образом, указанная практика является не только конструктивной мерой, но и важным элементом комплексного подхода к обеспечению стабильной и предсказуемой работы микросистем в широком диапазоне эксплуатационных условий.

Моделирование структуры отверстий в молд-компаунде систем в корпусе. Переходные отверстия, выполненные в молд-компаунде, представляют собой важный элемент конструкции современных высокочастотных печатных плат и микросистемных сборок. Для детального исследования электрических свойств и оптимизации конструктивных решений важно провести трехмерное моделирование процессов распространения электромагнитных волн и поведения электрических сигналов в данном материале. Одним из наиболее эффективных методов является использование трехмерного решателя электромагнитных полей на основе FEM-моделирования.

Метод конечных элементов широко применяется в инженерных задачах благодаря своей универсальности и способности учитывать сложную геометрию объектов, неоднородность физических сред и различные виды внешних воздействий. В частности, применение данного подхода позволяет эффективно анализировать электрические характеристики переходных отверстий, учитывая такие важные факторы, как материал компаунда, размеры контактных площадок и структуру топологии.

При создании виртуальной модели учитывается специфика используемого материала молд-компаунда, задаваемого посредством конкретных значений относительной диэлектрической проницаемости, тангенса угла потерь, удельной проводимости и других параметров, влияющих на распространение электромагнитных волн [13, 14]. Это дает возможность точно воспроизвести реальную ситуацию и повысить достоверность численных экспериментов.

Процесс моделирования начинается с построения подробной трехмерной геометрии исследуемых структур. Геометрия включает в себя точные размеры переходных отверстий, форму выводов, контактные площадки и слои подложки. Затем расчетную область разбивают сеткой на конечные элементы, позволяющие проводить дальнейшие расчеты. После этого зада-

ют начальные и краевые условия задачи, определяющие внешнее воздействие на систему, например, приложенное напряжение или источник тока, порты. Следующий этап — расчет электромагнитных полей. Метод конечных элементов предполагает решение дифференциальных уравнений Максвелла в каждом узле расчетной сетки. Этот процесс выполняется автоматически специализированным программным обеспечением. В результате на основе полученных данных анализируются потери мощности, сопротивление переходных отверстий и согласование импедансов.

При создании исследуемой структуры применялись материалы диэлектриков и проводников с электрическими параметрами (табл. 1).

Таблица 1

Электрические параметры материалов, используемых при моделировании

Материал	Тип материала	Проводимость, См/м	Диэлектрическая постоянная	Тангенс угла диэлектрических потерь
Воздух	Диэлектрик	–	1	0
Медь	Проводник	$5,8 \cdot 10^7$	–	–
Молд-компаунд Г-001	Диэлектрик	–	4	0,008

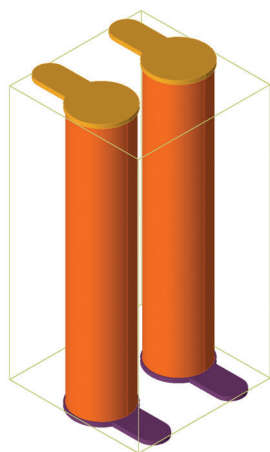


Рис. 6. Трехмерная модель переходных отверстий PMV

В качестве исследуемых структур переходных отверстий определены три варианта конструкции, предварительно отвечающих целевому сопротивлению 50 и 100 Ом. Представленные варианты имеют разные геометрические размеры структуры и рассчитаны на целевое волновое сопротивление. Переходные отверстия PMV выполнены в отечественном молд-компаунде Г-001, разработанном АО «Институтом Пластмасс», ФИЦ ИПХФ и МХ РАН, НИУ МИЭТ. Исследуемые структуры переходных отверстий заполнены гальванической медью (согласно технологии IPC 4761 Type VII). Исследуемая трехмерная модель переходных отверстий приведена на рис. 6.

По формулам (2), (3) рассчитаны геометрические параметры структур переходных отверстий под заданное волновое сопротивление (табл. 2).

Таблица 2

**Геометрические параметры структур переходных отверстий
в молд-компаунде Г-001**

Номер отверстия	Расстояние между центром отверстий, мкм	Диаметр переходного отверстия, мкм	Волновое сопротивление, Ом
1	370	270	50
2	500	182	100
3	1270	928	50

На первом этапе в системе автоматизированного проектирования создаются модели переходных отверстий PMV в соответствии с конструктивными параметрами, такими как диаметр отверстия, толщина металлизации и диэлектрическая проницаемость материала. Далее модель импортируется в специализированный 3D-решатель электромагнитного поля, где выполняется численное моделирование с анализом характеристик электромагнитного поля, уделяется особое внимание параметрам передачи и отражения сигнала, так как они напрямую влияют на качество передачи сигналов.

Создав структуры переходных отверстий по конструктивным параметрам из табл. 1 в САПР и промоделировав их средствами 3D-решателя электромагнитного поля, получаем результаты рефлектометрии во временной области. Рефлектометрия — метод анализа качества и целостности переходных отверстий с помощью измерения отраженных сигналов [15]. Скриншот рефлектограммы значений волнового сопротивления на пути прохождения импульса через структуру переходных отверстий PMV № 1 приведен на рис. 7. Для измерения временной зависимости (профиля) импеданса исследуемой топологии или устройства используется измерительный прибор TDR (Time Domain Reflectometer). С помощью генератора ступенчатого сигнала в цепи формируется перепад напряжения с малым временем нарастания фронта. Если в тракте передачи сигнала от источника к нагрузке присутствуют неоднородности, вызывающие локальное изменение импеданса, то часть энергии сигнала отразится (отраженная волна) обратно и будет зафиксирована осциллографом на входе тракта. Анализируя значение, длительность и форму отраженного сигнала, можно определить характер изменения полного сопротивления в системе передачи [16].

Для анализа воздействия переходных отверстий PMV на целостность сигнала необходимо учесть вносимые S_{21} и обратные S_{11} потери. Скриншо-

ты вносимых S_{21} и обратных S_{11} потерь исследуемых структур переходных отверстий PMV № 1–3 приведены на рис. 8. Рекомендуется, чтобы вносимые потери переходного отверстия лежали в пределах до 0,5 дБ на частоте несущей частоты сигнала, такое предельное условие обеспечит благоприятную обстановку по электромагнитным излучениям и сохранит целостность сигнала [17]. В общем случае при анализе обратных потерь рекомендуется ориентироваться на значение до –13 дБ, что обеспечит вносимые потери до 0,22 дБ. В таком случае не наблюдается существенного влияния вносимых потерь на затухание сигнала. Обратные потери передаваемого сигнала возникают в результате наличия неоднородностей в среде распространения электромагнитной волны, изменения волнового сопротивления. При отсутствии дополнительных диссипативных потерь между вносимыми и обратными потерями есть определенная взаимосвязь [18, 19]:

$$1 = S_{11}^2 + S_{21}^2; \quad S_{21} = \sqrt{1 - S_{11}^2},$$

где S_{11} — коэффициент отражения по входу; он показывает, какая часть входящего сигнала отражается обратно от порта входа (приемник) в порт выхода (передатчик); S_{21} — коэффициент передачи сигнала от порта входа к порту выхода.

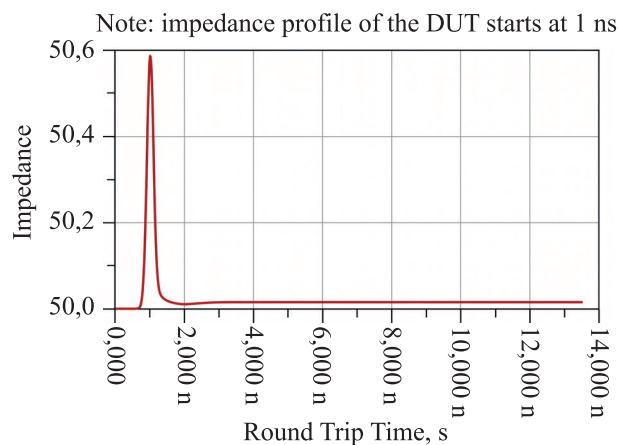


Рис. 7. Скриншот рефлектограммы значений волнового сопротивления на пути прохождения импульса через структуру переходных отверстий PMV № 1

Для уменьшения активных потерь на проводнике переходного отверстия PMV диаметр отверстия может быть увеличен. Это обеспечит большую площадь поперечного сечения и уменьшит сопротивление, вызванное скин-эффектом на высоких частотах.

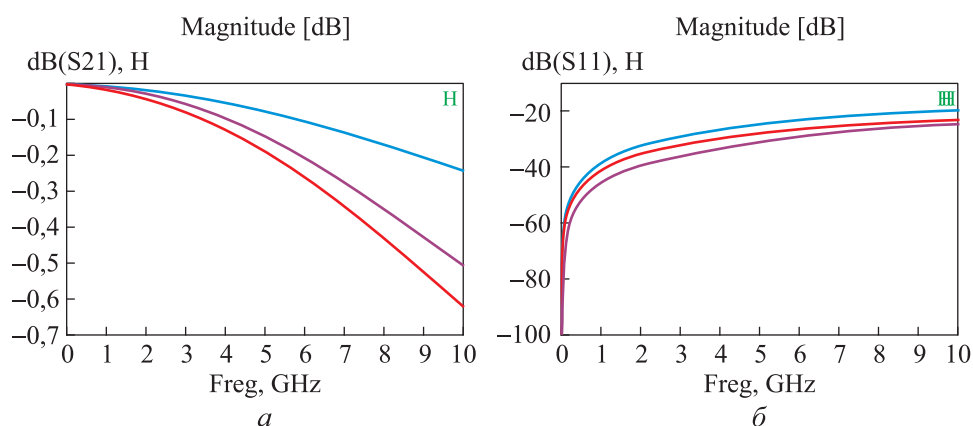
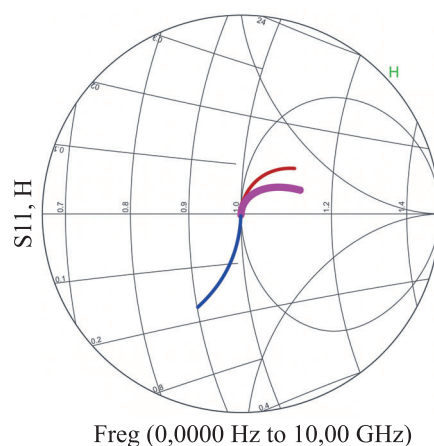


Рис. 8. Скриншоты вносимых S_{21} (а) и обратных S_{11} (б) потерь исследуемых структур переходных отверстий PMV № 1 (—), № 2 (—), № 3 (—)

Рассмотрим диаграмму Вольперта — Смита или круговую диаграмму полных сопротивлений для определения доминирования в реактивном сопротивлении. Скриншот круговой диаграммы полных сопротивлений для исследуемых моделей переходных отверстий PMV № 1–3 приведен на рис. 9. С точки зрения сохранения целостности сигнала наиболее оптимально, если емкостное и индуктивное реактивные сопротивления скомпенсированы, при этом участок цепи имеет лишь активное сопротивление проводника на несущей частоте сигнала [20].

Рис. 9. Скриншот круговой диаграммы полных сопротивлений для исследуемых моделей переходных отверстий PMV № 1 (—), № 2 (—), № 3 (—)



Из приведенных диаграмм следует, что индуктивная составляющая переходного отверстия в молд-компаунде несколько превалирует над емкостным реактивным сопротивлением, что указывает на индуктивный характер топологического участка. Теоретически возможно подобрать структуру с чисто активным сопротивлением, однако ее практическая реализация может привести к увеличению габаритных размеров и технологической сложности.

Полученные данные имеют сходимость с расчетными значениями. Заданные структуры переходных отверстий в молд-компаунде микросхемы обеспечивают целостность сигнала с вносимыми потерями менее 0,5 дБ на частотах до 8 ГГц. В случае необходимости переходные отверстия могут быть подобраны так, чтобы обеспечить заданное согласование с линией передачи, реализованной на подложке корпуса микросхемы.

Заключение. Рассмотрен метод предварительных расчетов электрических параметров структуры переходных отверстий, выполненных в молд-компаунде систем в корпусе. Проведено моделирование структур переходных отверстий средствами 3D-решателя электромагнитных полей методом конечных элементов, проанализированы полученные результаты.

Исследованы электрические параметры переходных отверстий, выполненных в термореактивном молд-компаунде, используемом для герметизации микросхем, с акцентом на анализ вертикальных межуровневых соединений, обеспечивающих электрическую связь между различными слоями системы в корпусе. Методология исследования включала в себя два взаимодополняющих подхода: во-первых, разработаны математические модели для аналитического расчета ключевых электрических параметров, таких как индуктивность, сопротивление и импеданс, с учетом геометрических характеристик структуры и электрофизических свойств молд-компаунда. Во-вторых, сравнительный анализ результатов аналитических расчетов и данных численного моделирования позволил не только верифицировать предложенные математические модели, но и выявить границы применимости упрощенных формул, особенно в случаях, требующих учета неоднородности поля и частотной дисперсии параметров.

Практическая значимость работы заключается в разработке методики проектирования переходных отверстий в молд-компаунде, сочетающей аналитический и численный подходы, что позволяет эффективно решать задачи минимизации электромагнитных помех и потерь сигнала в системах в корпусе. Полученные результаты могут быть непосредственно использованы при проектировании корпусов микросхем с применением высокочастотных и высокоскоростных интерфейсов, способствуя повышению целостности сигнала без ущерба для требований к миниатюризации и надежности. Результаты исследований вносят вклад в развитие методов проектирования систем в корпусе и подложек корпуса микросхем, расширяя возможности инженеров по оптимизации электромагнитных характеристик сложных многоуровневых структур в условиях постоянно растущих требований к быстродействию и плотности компоновки электронных компонентов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Yoo D.J., Ryu J.I., Oh G.H., et al. Plating mold via interconnection development in molded SiP modules. *IMAPSource Proceedings*, 2014, no. 1, pp. 777–782. DOI: <https://doi.org/10.4071/isom-THP11>
- [2] Braun T., Becker K.-F., Voges S., et al. Through mold vias for stacking of mold embedded packages. *61st Electronics Components and Technology Conf. (ECTC)*, 2011, New York, IEEE, pp. 48–54. DOI: <https://doi.org/10.1109/ECTC.2011.5898490>
- [3] Jiaqi W., Kangrong L., Teck-Guan L. RF performance study of through-mold-via using L-2L de-embedding method. *23rd Electronics Packaging Technology Conf. (EPTC)*, New York, IEEE, 2021, pp. 343–346.
- [4] Lipton R. 3D-vertical integration of sensors and electronics. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, 2007, vol. 579, no. 2, pp. 690–694. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2007.05.271>
- [5] De Jong E., Ferreira L.A., Bauer P. 3D integration with PCB technology. *IEEE APEC*, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1109/APEC.2006.1620639>
- [6] Li Y., Goyal D. Introduction on 3D microelectronic packaging. *3D Microelectronic Packaging*. Cahm, Springer Nature, 2020, vol. 64, pp. 1–16.
- [7] Lindner P., Glinsner T., Uhrmann T., et al. Key enabling processes for more-than-Moore technologies. *IEEE SOI*, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1109/SOI.2012.6404360>
- [8] Кочергин М.Д., Вертянов Д.В. Способы вертикальной коммутации в 3D-микросборках. *Интеллектуальные системы и микросистемная техника. Сб. тр. науч.-практ. конф.* М., МИЭТ, 2022, с. 160–166. EDN: WPEHPX
- [9] Dunton V., Chen T., Konevecki M., et al. Zias: vertical wires in 3-D memory devices. *Proc. 22nd Int. VLSI Multilevel Interconnection Conf.*, 2005, pp. 480–485.
- [10] Park J., Li C., Mok E., et al. New vertical connection in PCB and its scalable model. *TechRxiv*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.36227/techrxiv.171259651.11084104/v1>
- [11] Kim J., Kim J., Mihai R., et al. Via and reference discontinuity impact on high-speed signal integrity. *Electromagnetic Compatibility Conf.*, 2004, vol. 2, pp. 583–587.
- [12] Скорняков И.А., Суровцев Р.С. Анализ влияния ширины развязывающей трассы на амплитуду перекрестных наводок в связанной двухпроводной линии. *Сб. избранных стат. науч. сессии ТУСУР*, 2021, № 1-2, с. 86–91. EDN: YTJJPT
- [13] Иванова Е.В. Кондуктивные электромагнитные помехи в электроэнергетических системах: теория, расчет, подавление. Дис. ... д-ра техн. наук. Новосибирск, НГАСУ, 2007.
- [14] Медведев А.М. Печатные платы. Конструкции и материалы. М., Техносфера, 2005.
- [15] Обуховец В.А. Излучение и рассеяние электромагнитных волн. *Антенны*, 2016, № 8, с. 6–15. EDN: WJXGMR

- [16] Avitabile G., Florio A., Gallo V.L., et al. An optimization framework for the design of high-speed PCB VIAs. *Electronics*, 2022, vol. 11, no. 3, art. 475. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics11030475>
- [17] Chang R.W.Y., See K.Y., Chua E.K. Comprehensive analysis of the impact of via design on high-speed signal integrity. *9th Electronics Packaging Technology Conf. (EPTC)*, 2007, pp. 266–267. DOI: <https://doi.org/10.1109/EPTC.2007.4469746>
- [18] Антипин Б.М., Виноградов Е.М. Анализ моделей для оценки потерь распространения сигналов при расчетах электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств. *СПбНТОРЭС: труды НТК*, 2021, № 1, с. 233–235. EDN: DYOVPL
- [19] Преображенский А.П. Методы прогнозирования характеристик рассеяния электромагнитных волн. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*, 2014, № 1, с. 3–4. EDN: SAYLMT
- [20] Watanabe O., Hirokazu I., Pulugurtha R., et al. Low-loss impedance-matched sub-25 μm vias in 3D millimeter-wave packages. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2020, vol. 10, iss. 5, pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2020.2982294>

Семенов Сергей Петрович — ведущий инженер института НМСТ МИЭТ (Российская Федерация, 124498, Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1).

Батин Сергей Андреевич — инженер-конструктор НИЛ ТКПМ института НМСТ МИЭТ (Российская Федерация, 124498, Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1).

Вертянов Денис Васильевич — начальник НИЛ ТКПМ института НМСТ МИЭТ (Российская Федерация, 124498, Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1).

Жумагали Райымбек Нуржанулы — инженер-технолог НИЛ ТКПМ института НМСТ МИЭТ (Российская Федерация, 124498, Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1).

Кочергин Михаил Дмитриевич — инженер-конструктор НИЛ ТКПМ института НМСТ МИЭТ (Российская Федерация, 124498, Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1).

Тимошенков Сергей Петрович — директор института НМСТ МИЭТ (Российская Федерация, 124498, Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Семенов С.П., Батин С.А., Вертянов Д.В. и др. Проектирование многоуровневых систем в корпусе с металлизированными отверстиями в молд-компаунде. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2026, № 2 (155), с. 19–40. EDN: EECTTB

DESIGN OF MULTI-LEVEL SYSTEM IN PACKAGE WITH METALIZED VIAS IN A MOLD COMPOUND

S.P. Semenov

S.A. Batin

D.V. Vertyanov

R.N. Zhumagali

M.D. Kochergin

S.P. Timoshenkov

ssp.science@mail.ru

sergey.batin@mail.ru

vdv.ertyanov@yandex.ru

zhumagali9005@gmail.com

misha.kochergin1999@yandex.ru

spt111@mail.ru

MIET, Moscow, Zelenograd, Russian Federation

Abstract

The article considers the prospects of using metalized and galvanic copper-filled vias in a mold compound or a polymer material used to seal integrated circuits during two-dimensional or three-dimensional packaging. The main objective of the study is to investigate the effect of the proposed structure on the signal integrity for various functional levels of a system in a package. The technology of manufacturing systems in a package with mold compound allows increasing the packing density of elements, ensures reliable connection of levels, microcircuits both in a package and unpackaged design and significantly reduces the size of the final product, ensuring high performance and reliability of electronic devices. The article presents formulas for calculating the electrical parameters of vias made in the mold compound of a system in a package. A comparative analysis of the results obtained using mathematical formulas with the result of simulation carried out by the finite element method in a three-dimensional modeling environment is carried out. The possibilities of modeling the propagation of electromagnetic waves for analyzing the integrity of signals and electromagnetic compatibility in the design of multi-crystal assemblies and systems in a case using vias made in a thermosetting mold compound intended for sealing microcircuits are considered. Based on the analysis of the obtained modeling results, matched structures of vias in the mold compound were determined, which have

Keywords

System in package, three-dimensional packaging, vias, mold compound, chip package substrate, signal integrity, S-parameters, impedance

optimal relationships between overall dimensions, Received 08.09.2025
 technological feasibility of production and intro- Accepted 05.11.2025
 duced losses in signal integrity © Author(s), 2026

*The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education
 of the Russian Federation (project no. FSMR-2025-0005)*

REFERENCES

- [1] Yoo D.J., Ryu J.I., Oh G.H., et al. Plating mold via interconnection development in molded SiP modules. *IMAPSource Proceedings*, 2014, no. 1, pp. 777–782. DOI: <https://doi.org/10.4071/isom-THP11>
- [2] Braun T., Becker K.-F., Voges S., et al. Through mold vias for stacking of mold embedded packages. *61st Electronics Components and Technology Conf. (ECTC)*, 2011, New York, IEEE, pp. 48–54. DOI: <https://doi.org/10.1109/ECTC.2011.5898490>
- [3] Jiaqi W., Kangrong L., Teck-Guan L. RF performance study of through-mold-via using L-2L de-embedding method. *23rd Electronics Packaging Technology Conf. (EPTC)*, New York, IEEE, 2021, pp. 343–346.
- [4] Lipton R. 3D-vertical integration of sensors and electronics. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, 2007, vol. 579, no. 2, pp. 690–694. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2007.05.271>
- [5] De Jong E., Ferreira L.A., Bauer P. 3D integration with PCB technology. *IEEE APEC*, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1109/APEC.2006.1620639>
- [6] Li Y., Goyal D. Introduction on 3D Microelectronic Packaging. *3D Microelectronic packaging*. Cahm, Springer Nature, 2020, vol. 64, pp. 1–16.
- [7] Lindner P., Glinsner T., Uhrmann T., et al. Key enabling processes for more-than-Moore technologies. *IEEE SOI*, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1109/SOI.2012.6404360>
- [8] Kochergin M.D., Vertyanov D.V. [Methods of vertical commutation in 3D microassemblies]. *Intellektualnye sistemy i mikrosistemnaya tekhnika. Sb. tr. nauch.-prakt. konf. [Intelligent Systems and Microsystems Technology. Proc. Sc.-Pract. Conf.]*. Moscow, MIET Publ., 2022, pp. 160–166 (in Russ.). EDN: WPEHPX
- [9] Dunton V., Chen T., Konevecki M., et al. Zias: vertical wires in 3-D memory devices. *Proc. 22nd Int. VLSI Multilevel Interconnection Conf.*, 2005, pp. 480–485.
- [10] Park J., Li C., Mok E., et al. New vertical connection in PCB and its scalable model. *TechRxiv*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.36227/techrxiv.171259651.11084104/v1>
- [11] Kim J., Kim J., Mihai R., et al. Via and reference discontinuity impact on high-speed signal integrity. *Electromagnetic Compatibility Conf.*, 2004, vol. 2, pp. 583–587.
- [12] Skorniyakov I.A., Surovtsev R.S. Analiz vliyaniya shiriny razvyazyvayushchey trassy na amplitudu perekrestnykh navodok v svyazannoy dvukhprovodnoy linii. *Sbornik izbrannykh statey nauchnoy sessii TUSUR [TUSUR Scientific Session: Collection of Selected Papers]*, 2021, no. 1-2, pp. 86–91 (in Russ.). EDN: YTJJPT

- [13] Ivanova E.V. *Konduktivnye elektromagnitnye pomekhi v elektroenergeticheskikh sistemakh: teoriya, raschet, podavlenie*. Dis. d-ra tekhn. nauk [Conducted electromagnetic interference in electric power systems: theory, calculation, and suppression. Cand. Sc. (Eng.). Diss.]. Novosibirsk, NGAVT, 2007 (in Russ.).
- [14] Medvedev A.M. *Pечатnye platy. Konstruktsii i materialy* [Printed circuit boards. Designs and materials]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2005.
- [15] Obukhovets V.A. Radiation and scattering of electromagnetic waves. *Antenny* [Antennas], 2016, no. 8, pp. 6–15 (in Russ.). EDN: WJXGMR
- [16] Avitabile G., Florio A., Gallo V.L., et al. An optimization framework for the design of high-speed PCB VIAs. *Electronics*, 2022, vol. 11, no. 3, art. 475.
DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics11030475>
- [17] Chang R.W.Y., See K.Y., Chua E.K. Comprehensive analysis of the impact of via design on high-speed signal integrity. *9th Electronics Packaging Technology Conf. (EPTC)*, 2007, pp. 266–267. DOI: <https://doi.org/10.1109/EPTC.2007.4469746>
- [18] Antipin B.M., Vinogradov E.M. Analysis of models for estimating signal propagation losses in calculations of electromagnetic compatibility of radio-electronic devices. *SPbNTORES: trudy NTK*, 2021, no. 1, pp. 233–235 (in Russ.). EDN: DYOVPL
- [19] Preobrazhenskij A.P. The methods of predicting the characteristics of scattering of electromagnetic waves. *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii* [Modeling, Optimization and Information Technology], 2014, no. 1, pp. 3–4 (in Russ.). EDN: SAYLMT
- [20] Watanabe O., Hirokazu I., Pulugurtha R., et al. Low-loss impedance-matched sub-25 μm vias in 3D millimeter-wave packages. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2020, vol. 10, iss. 5, pp. 1–6.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2020.2982294>

Semenov S.P. — Leading Engineer, Institute of Nano and Microsystem Technology, MIET (Shokina ploshchad 1, Moscow, Zelenograd, 124498 Russian Federation).

Batin S.A. — Design Engineer, Laboratory for Advanced Technologies of Enclosure and Production of 3D Microsystems Laboratory, Institute of Nano and Microsystem Technology, MIET (Shokina ploshchad 1, Moscow, Zelenograd, 124498 Russian Federation).

Vertyanov D.V. — Head of the Laboratory for Advanced Technologies of Enclosure and Production of 3D Microsystems, Institute of Nano and Microsystem Technology, MIET (Shokina ploshchad 1, Moscow, Zelenograd, 124498 Russian Federation).

Zhumagali R.N. — Process Engineer, Laboratory for Advanced Technologies of Enclosure and Production of 3D Microsystems, Institute of Nano and Microsystem Technology, MIET (Shokina ploshchad 1, Moscow, Zelenograd, 124498 Russian Federation).

Kochergin M.D. — Design Engineer, Laboratory for Advanced Technologies of Enclosure and Production of 3D Microsystems, Institute of Nano and Microsystem Technology, MIET (Shokina ploshchad 1, Moscow, Zelenograd, 124498 Russian Federation).

Timoshenkov S.P. — Head of the Institute of Nano and Microsystem Technology, MIET (Shokina ploshchad 1, Moscow, Zelenograd, 124498 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Semenov S.P., Batin S.A., Vertyanov D.V., et al. Design of multi-level system in package with metalized vias in a mold compound. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2026, no. 2 (155), pp. 19–40 (in Russ.). EDN: EECTTB