

## Параметры и состояния объекта при формировании прототипа цифрового двойника технологии многослойных СВЧ-плат

**А. Ю. Калашников**, аспирант, *kalashnikov.ay@spacecorp.ru*  
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

**А. А. Жуков**, д. т. н., профессор, *zhukov.aa@spacecorp.ru*  
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

ФГБОУ «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», Москва,  
Российская Федерация

**Аннотация.** Показана блок-схема последовательности технологического процесса формирования структуры трехслойной полиимидной платы на основе нитрида алюминия. Определены характеристики прохождения сигнала  $S(2, 1)$  в моделях копланарной линии при применении различных конструктивно-технологических решений в рамках технологической последовательности при изготовлении трехслойной СВЧ-платы. Получен алгоритм применения различных конструктивно-технологических решений как параметров и состояний объекта для формирования прототипа цифрового двойника технологического процесса при изготовлении трехслойной СВЧ-платы. Значение характеристики прохождения сигнала  $S(2, 1)$  в копланарной линии тестовой трехслойной СВЧ-плате на основе полиимида, изготовленной по последовательности формирования структуры многослойных СВЧ-плат на основе полиимида, составляет  $-0,336$  дБ, что соответствует сумме значений результатов моделирования отдельных конструктивно-технологических решений. Полученные алгоритм, параметры и состояния объекта являются исходными данными при формировании прототипа цифрового двойника технологии многослойных СВЧ-плат.

**Ключевые слова:** СВЧ-плата, цифровой двойник технологии, прототип, конструктивно-технологические решения, алгоритм

## Parameters and States of the Object when Forming a Digital Twin Prototype of Multilayer Microwave Board Technology

**A. Yu. Kalashnikov**, postgraduate student, *kalashnikov.ay@spacecorp.ru*  
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

**A. A. Zhukov**, Dr. Sci. (Engineering), Professor, *zhukov.aa@spacecorp.ru*  
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation

**Abstract.** The paper shows a block diagram of the process sequence of forming the structure of a three-layer polyimide board based on aluminum nitride. The characteristics of  $S(2, 1)$  signal transmission in models of a coplanar line were determined in various cases of design and technological solutions within the process sequence of a three-layer microwave board. An algorithm for applying various design and technological solutions in the form of parameters and states of an object was obtained to form a prototype of a digital twin of the technological process for manufacturing a three-layer microwave board. The value of the  $S(2, 1)$  signal transmission characteristic in the coplanar line of the test three-layer microwave board based on polyimide made according to the sequence of forming the structure of a multilayer microwave boards based on polyimide is  $-0.336$  dB, which corresponds to the sum of simulation results of separate structural and technological solutions. The obtained algorithm, parameters and object states are the initial data in the formation of a prototype digital twin of the multilayer microwave board technology.

**Keywords:** microwave board, digital twin of technology, prototype, design and technological solutions, algorithm

## Введение

Одной из наиболее актуальных и востребованных в рамках цифровой трансформации промышленности является тема цифровых двойников. Являясь по своей сути верифицированной мультидисциплинарной моделью реального объекта или процесса, цифровой двойник генерирует массив данных, позволяющих адекватно описывать поведение указанного реального объекта, а также моделировать возможные изменения, что обуславливает некоторые «предсказательные» его функции. При большой номенклатуре и малой серийности, характерных для изделий ракетно-космической техники, особенно значимым становится создание цифрового двойника, наполнение и функциональность которого определяется в ходе реализации стадии производства изделия. Данная работа посвящена попытке систематизации исходных данных при формировании цифрового двойника технологии многослойных СВЧ-плат для бортовой аппаратуры космического назначения, что и обуславливает ее актуальность.

Цель исследования — определение параметров и состояний объекта для алгоритма применения конструктивно-технологических решений при создании прототипа цифрового двойника технологического процесса изготовления многослойной СВЧ-платы на примере трехслойной полиимидной платы на основе нитрида алюминия.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- определить конструктивно-технологические решения при создании трехслойной полиимидной СВЧ-платы;
- создать алгоритм технологического процесса изготовления трехслойной полиимидной СВЧ-платы;
- получить алгоритм применения различных конструктивно-технологических решений как параметров и состояний объекта при формировании прототипа цифрового двойника технологии многослойных СВЧ-плат;
- определить характеристики прохождения сигнала  $S(2, 1)$  в модели копланарной линии при применении различных конструктивно-технологических решений;
- определить характеристики прохождения сигнала  $S(2, 1)$  в тестовой плате.

## Общие сведения

В работе [1] показаны основные векторы развития цифровой экономики и места цифровой трансформации промышленности в ее рамках. Цифровые двойники [2], при всем разнообразии определений, занимают в данной концепции центральное место. В отличие от концепций цифровых двойников изделий и производств [3] цифровой двойник технологии как программный продукт непосредственно основан на алгоритмах [4] применения конструктивно-технологических решений в рамках технологической последовательности при разработке технологии изготовления изделий. Согласно классическим определениям [5] прототип цифрового двойника, являясь виртуальным описанием, содержит информацию, необходимую для создания физического объекта. Таким образом, конструктивно-технологические решения при изготовлении объекта представляют собой параметры и состояния объекта в виртуальном отображении, на которых основано понятие цифрового двойника технологии, показанного в работе [6].

В работах [7–9] рассматривались определенные экспериментально физико-технологические ограничения при проектировании многослойных коммутационных СВЧ-плат и характеристики изготовленных многослойных коммутационных СВЧ-плат, которые и являются исходными данными для разработки алгоритма применения конструктивно-технологических решений при создании цифрового двойника технологического процесса изготовления многослойной СВЧ-платы.

Общий принцип внедрения цифровых двойников лежит в основе концепции «Индустрии 4.0», предполагающей внедрения различных киберфизических систем в производственные структуры [10], что в совокупности с исследованными ранее физико-технологическими ограничениями [7] и характеристиками [8] многослойной коммутационной СВЧ-платы обуславливает актуальность получения алгоритма применения конструктивно-технологических решений при создании цифрового двойника.

В условиях широкого спектра определений и терминов в области технологий цифровых двойников следует уточнить, что под цифровым двойником технологии (технологического процесса) в дан-

ной статье понимается комплексная система, отображающая описание и актуальное состояние технологического процесса и производственной системы, имеющая прогностическую функцию и функционирующее в виртуальной среде [11].

## Объекты и методы исследования

Объектами исследования служили:

- тестовая трехслойная полиимидная плата на основе нитрида алюминия,
- блок-схема последовательности технологического процесса формирования структуры многослойной СВЧ-платы на основе полиимида,
- 3D-модели копланарной линии,
- блок-схема последовательности технологического процесса формирования структуры трехслойной полиимидной платы на основе нитрида алюминия,
- характеристики прохождения сигнала  $S(2, 1)$  в модели копланарной линии,
- физико-технологические ограничения при проектировании многослойных коммутационных СВЧ-плат.

Измерения величины прохождения сигнала в СВЧ-линии тестовой трехслойной полиимидной платы на основе нитрида алюминия проводились с помощью векторного анализатора цепей.

## Результаты и обсуждение

В работах [7, 8] была показана возможность реализации многослойной СВЧ-платы на основе полиимида (СВЧ-плата, рис. 1) с присущими ей физико-технологическими ограничениями. На рис. 2 в виде



Рис. 1. Многослойная СВЧ-плата на основе полиимида, где: 1 — пластина AlN; 2 — функциональный слой металлизации; 3 — диэлектрический полиимидный слой; 4 — последний слой металлизации; 5 — переходное металлизированное отверстие

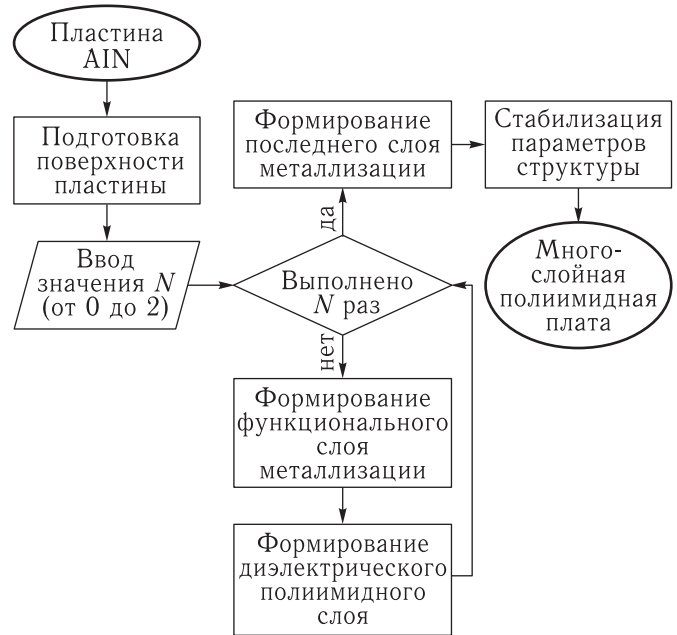


Рис. 2. Блок-схема последовательности технологического процесса формирования структуры многослойной СВЧ-платы на основе полиимида

блок-схемы представлена последовательность технологического процесса формирования структуры многослойной СВЧ-платы на основе полиимида.

В зависимости от изменения вводимого значения количества циклов операций  $N$  от 0 до 2 возможно получение одно-, трех- или пятислойных полиимидных СВЧ-плат.

Одним из наиболее распространенных конструктивных элементов плат СВЧ является линия передачи, выполняемая в виде микрополосковой, копланарной или щелевой линий [12]. Реализация указанного конструктивного элемента и получения платы с необходимыми характеристиками зависит от выполнения условий [7] при применении конструктивно-технологических решений. Для оценки влияния конструктивно-технологических решений на характеристики платы построена модель копланарной линии (рис. 3), где металл представлен системой Cr–Cu–Ni и Cr–Cu–Ni–Au, а диэлектрик — полиимидным покрытием. Длина представленной копланарной линии ( $L$ ) составляет 7 мм, рабочая частота ( $F$ ) 5,7 ГГц.

Представленный на рис. 3 конструктивный элемент имеет трехслойную структуру слоев, т.е. изготовление данного элемента в составе тестовой

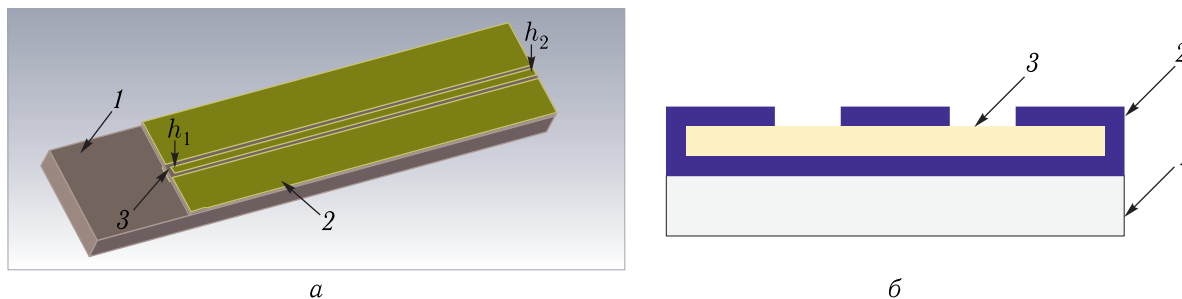


Рис. 3. *а* — 3D-модель копланарной линии, *б* — 3D-модель копланарной линии в разрезе, где: *1* — подложка из нитрида алюминия; *2* — металлизация системы Сг–Cu–Ni–(Au); *3* — полиимид (диэлектрический слой);  $h_1, h_2$  — толщина слоя полиимида

трехслойной полиимидной платы на основе нитрида алюминия осуществляется по последовательности, показанной на рис. 1, где  $N = 1$  соответственно (рис. 4).

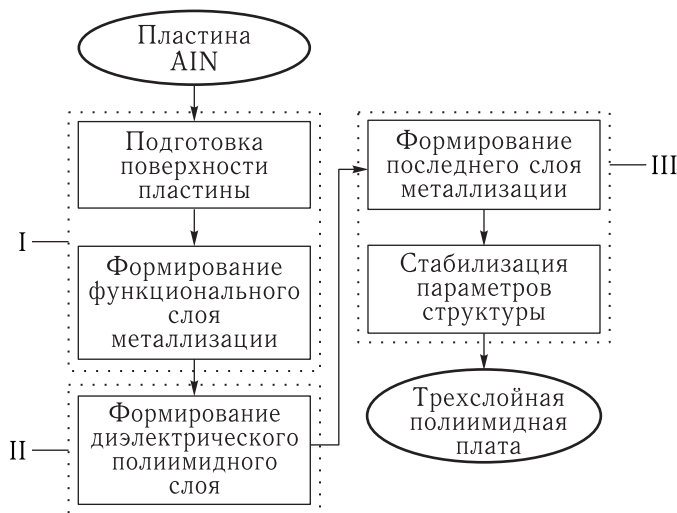


Рис. 4. Блок-схема последовательности технологического процесса формирования структуры трехслойной полиимидной платы на основе нитрида алюминия, где I — первый сегмент, II — второй сегмент, III — третий сегмент

Данная последовательность (рис. 4) условно разбита на 3 сегмента, обусловленных послойным формированием структуры. Первый сегмент (I) включает в себя комплексную обработку поверхности с последующим нанесением вакуумным магнетронным методом первого функционального слоя металлизации и формированием топологии с помощью фотолитографических процессов. Вторым сегментом (II) является процесс формирования диэлек-

трического полиимидного слоя, который включает в себя комплекс свойственных данной технологии конструктивно-технологических решений, в который входит метод нанесения покрытия, режим термообработки, способ удаления полиимидной пленки при формировании топологии диэлектрического слоя. Третий сегмент (III) состоит плазмохимической подготовки поверхности, поверхности с последующим нанесением вакуумным магнетронным методом слоя металлизации, гальванического осаждения и формированием топологии с помощью фотолитографических процессов, а также стабилизации параметров структуры [13]. В рамках третьего сегмента возможно заполнение переходных отверстий слоем металлизации, т.е. применение еще одного конструктивно-технологического решения.

Полученные в результате рассмотрения различных способов нанесения диэлектрического полиимидного покрытия из раствора и экспериментальных данных значения возможной разнотолщинности слоя ( $\Delta h$ ) [7] в совокупности с рабочей частотой ( $F$ ) и  $L$ , диэлектрической постоянной ( $\epsilon$ ), равной 3,5, составляют исходные данные для определения характеристики прохождения сигнала  $S(2, 1)$  в модели копланарной линии. Полученные результаты определения характеристики прохождения сигнала  $S(2, 1)$  в модели копланарной линии при различной разнотолщинности межслойного диэлектрика представлены на рис. 5.

Диапазон изменения значений характеристики прохождения сигнала  $S(2, 1)$  для модели копланарной линии (рис. 5) составил от  $-0,148$  дБ до  $-2,48$  дБ при изменении  $\Delta h$  от 10% до 90%, где  $\Delta h$  представляет собой разницу в толщине

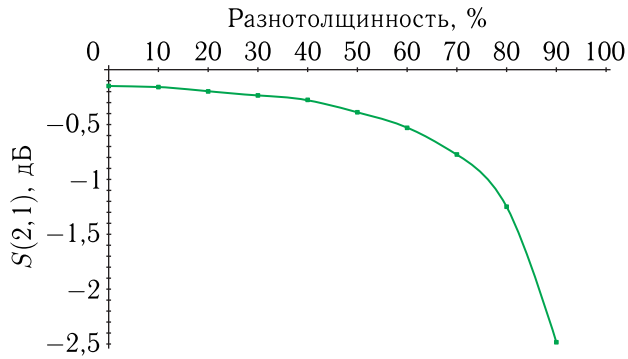


Рис. 5. График зависимости характеристики прохождения сигнала  $S(2,1)$  в модели копланарной линии от разнотолщинности межслойного диэлектрика

покрытия на двух концах копланарной линии. Наименьшее значение потерь в модели копланарной линии при частоте 5,7 ГГц наблюдается при разнотолщинности не хуже 10%, что соответствует комбинированному методу нанесения покрытия [14], наибольшее значение — при разнотолщинности 90% соответственно.

Следующим шагом при формировании диэлектрического слоя является термообработка полученного покрытия, от режимов проведения которой зависит конечная характеристика диэлектрического покрытия — диэлектрическая постоянная ( $\epsilon$ ). Таким образом, для определения характеристики прохождения сигнала  $S(2,1)$  в модели копланарной линии при определенных значениях диэлектрической постоянной ( $\epsilon$ ) (рис. 6) исходными данными являются значения  $\epsilon$  в диапазоне от 3,4 до 3,66 и  $F$ ,  $L$ ,  $H$ .

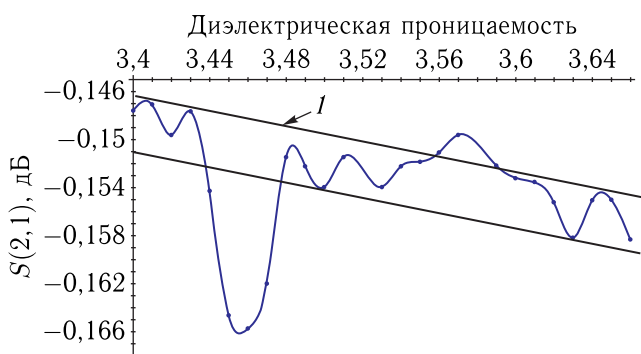


Рис. 6. График зависимости характеристики прохождения сигнала  $S(2,1)$  в модели копланарной линии от значения диэлектрической постоянной, где  $I$  — направление изменения характеристики в виде канала

На рис. 6 наблюдается общее направление на снижение значений характеристики прохождения сигнала с ростом отклонения по значению диэлектрической постоянной. Несущественные отклонения от канала направления (до 10%) могут быть связаны с незначительными отклонениями при валидации модели (менее 5%). Диапазон изменения значений характеристики прохождения сигнала  $S(2,1)$  для копланарной линии (рис. 6) составляет от  $-0,14$  до  $-0,165$  дБ в диапазоне значений  $\epsilon$  от 3,4 до 3,66.

В случае развитой структуры СВЧ-платы копланарная линия может быть выполнена в нескольких слоях, что определяет существование металлизированного перехода с одного слоя на другой, т.е. металлизированного переходного отверстия. На рис. 7 показана 3D-модель копланарной линии, выполненной в двух слоях с металлизированным переходом.

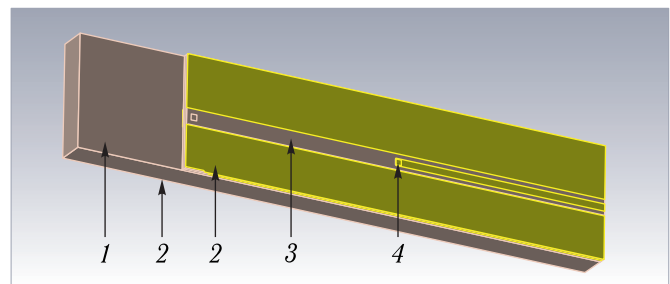


Рис. 7. 3D-модель копланарной линии с металлизированным переходом, где  $1$  — подложка из нитрида алюминия;  $2$  — металлизация системы Cr-Cu-Ni-(Au);  $3$  — полиимид (диэлектрический слой);  $4$  — переходное металлизированное отверстие

Формирование переходного отверстия в диэлектрическом слое возможно различными методами с различными режимами, которые, в свою очередь, имеют присущие им свойства анизотропии при удалении (травлении) материала в отверстии. Для 3D-модели копланарной линии, выполненной в двух слоях с металлизированным переходом (рис. 7), это выражается наличием угла  $\beta$ , характеризующего угол уклона стенки переходного отверстия, или клин травления (рис. 8).

Для определения характеристики прохождения сигнала  $S(2,1)$  в модели копланарной линии при различной конусности переходного металлизированного отверстия при толщине диэлектрического слоя,

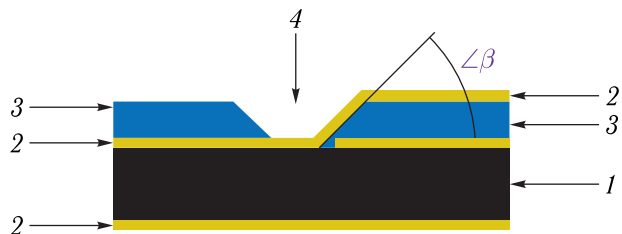


Рис. 8. Угол стенки переходного отверстия  $\beta$  (клин травления), где: 1 — подложка из нитрида алюминия; 2 — металлизация системы Cr–Cu–Ni–(Au); 3 — полиимид (диэлектрический слой); 4 — переходное металлизированное отверстие

равной 50 мкм, взят диапазон значений угла стенки переходного отверстия  $\angle\beta$  от  $48^\circ$  до  $90^\circ$ . Характеристики прохождения сигнала  $S(2,1)$  в модели копланарной линии показаны для частоты 5,7 ГГц (рис. 9). В данном случае исходными данными являются значения  $\angle\beta$ ,  $F$ ,  $L$ ,  $H$ ,  $\varepsilon$ , а также значение диэлектрической постоянной подложки из нитрида алюминия толщиной 500 мкм, равной 8,5.

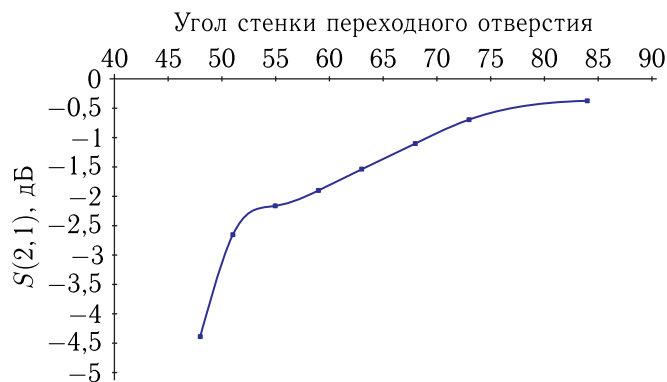


Рис. 9. График зависимости характеристики прохождения сигнала  $S(2,1)$  в модели копланарной линии от конусности переходного металлизированного отверстия

Диапазон изменения значений характеристики прохождения сигнала  $S(2,1)$  для копланарной линии (рис. 9) составил от  $-0,372$  дБ до  $-4,39$  дБ. Наименьшее значение потерь в модели копланарной линии при частоте 5,7 ГГц наблюдается при значении  $\angle\beta = 90^\circ$ , наибольшее значение — при  $\angle\beta = 48^\circ$ .

Другим переменным значением при формировании переходного отверстия является металлизация в отверстии, которая может быть выполнена

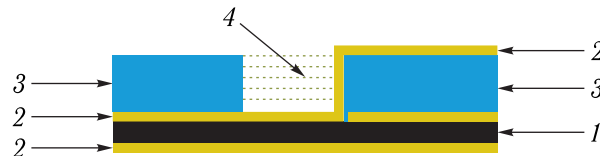


Рис. 10. Заполнение переходного отверстия металлом в копланарной линии, выполненной в 2 слоях, где 1 — подложка из нитрида алюминия; 2 — металлизация системы Cr–Cu–Ni–(Au); 3 — полиимид (диэлектрический слой); 4 — переходное металлизированное отверстие

с различной степенью заполнения (рис. 10), в связи с чем был введен коэффициент заполнения переходного отверстия металлом  $K_3$ , который характеризует отношение толщины металлизации в отверстии к толщине диэлектрического слоя.

Для определения характеристики прохождения сигнала  $S(2,1)$  в модели копланарной линии при различной степени заполнения переходного отверстия металлизацией взят диапазон значений  $K_3$  от 0,05 до 1 при толщине диэлектрического слоя, равной 100 мкм. Характеристики прохождения сигнала  $S(2,1)$  в модели копланарной линии показаны для частоты 5,7 ГГц (рис. 11).

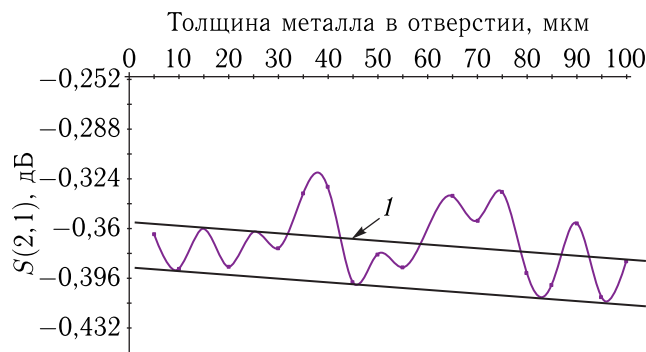


Рис. 11. График зависимости характеристики прохождения сигнала  $S(2,1)$  в модели копланарной линии от толщины металла в переходном отверстии, где 1 — направление изменения характеристики в виде канала

На рис. 11 наблюдается общее направление на снижение значений характеристики прохождения сигнала с ростом толщины металла в переходном металлизированном отверстии. Несущественные отклонения от канала направления (до 10%) могут быть связаны не незначительными отклонениями в валидации модели (менее 5%). Диапазон

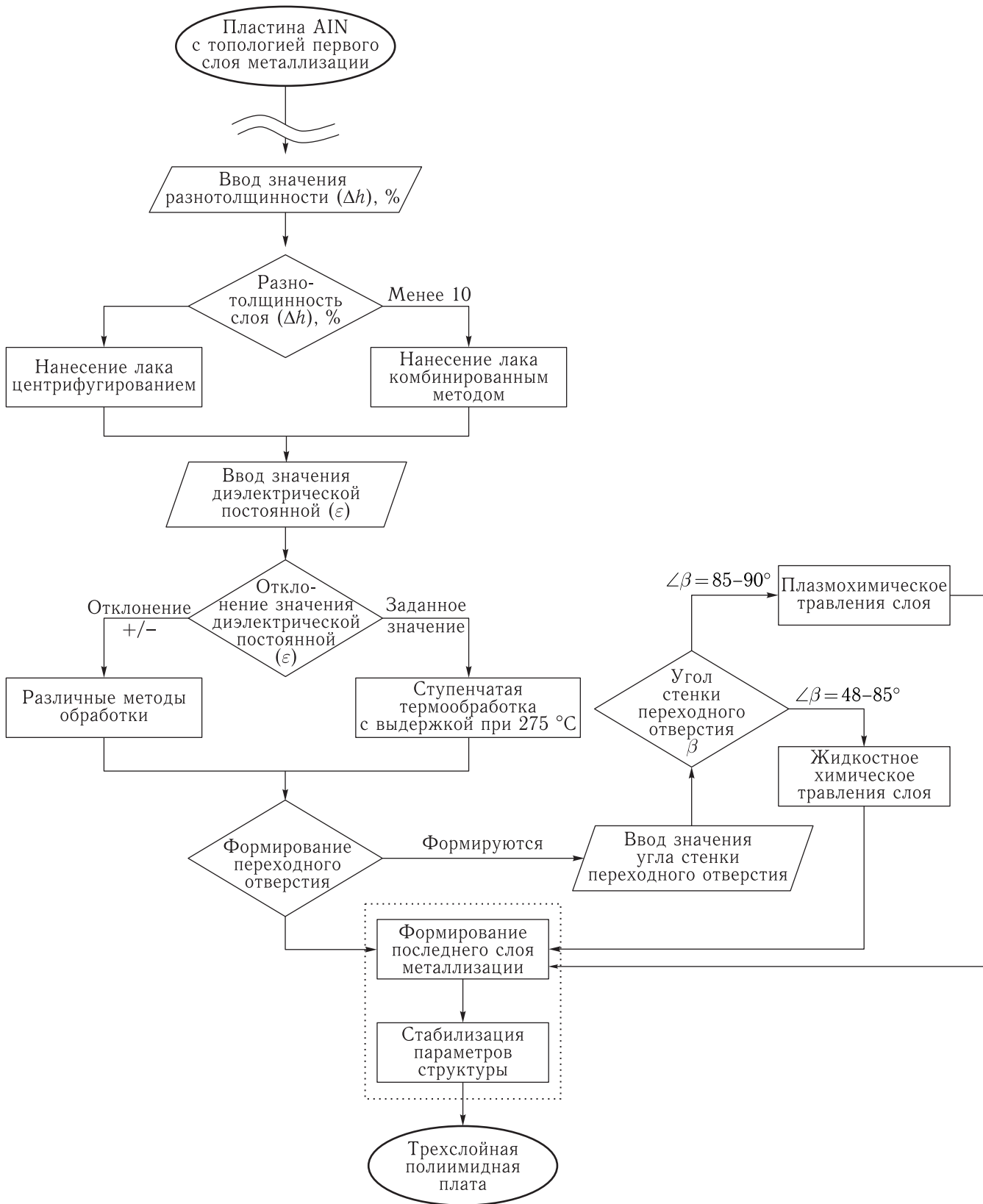


Рис. 12. Алгоритм применения конструктивно-технологических решений

изменения значений характеристики прохождения сигнала  $S(2,1)$  для копланарной линии (рис. 11) составил от  $-0,329$  дБ до  $-0,409$  дБ. Наименьшее значение потерь в модели копланарной линии при частоте 5,7 ГГц наблюдается при значении  $K_3 = 0,4$ , наибольшее значение при  $K_3 = 0,95$ .

Таким образом, рассматриваемые конструктивно-технологические решения применяются в рамках 2-го и 3-го сегмента последовательности формирования структуры (рис. 3), а значит, алгоритм применения вышеуказанных конструктивно-технологических решений существует внутри данной последовательности (рис. 12) и непосредственно влияет на количественную характеристику потерь при прохождении сигнала в линии передачи.

При изготовлении тестовой трехслойной полиимидной платы на основе нитрида алюминия по последовательности формирования структуры (рис. 4) полученный алгоритм (рис. 12) применяется в варианте нанесения лака комбинированным методом с последующей ступенчатой термообработкой. На рис. 13 представлена изготовленная тестовая плата, где «А» — копланарная линия.

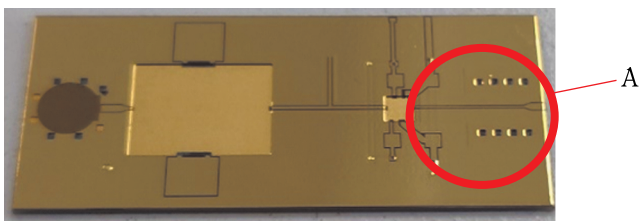


Рис. 13. Тестовая трехслойная полиимидная плата на основе нитрида алюминия, где А — копланарная линия

Значение характеристики прохождения сигнала  $S(2,1)$  для копланарной линии (длиной 7 мм) в тестовой многослойной СВЧ-плате на основе полиимида составило  $-0,336$  дБ (рис. 14).

## Выводы

Таким образом, показаны последовательности формирования структуры многослойных СВЧ-плат на основе полиимида. Представлены модели копланарных линий трехслойных СВЧ-плат на основе полиимида. В рамках трехсегментарной последовательности рассмотрено влияние применения кон-

Trc1 S21 dB Mag 10 dB/Ref 0 dB Cal  
Trc2 S11 dB Mag 10 dB/Ref 0 dB Cal  
Trc3 S22 dB Mag 10 dB/Ref 0 dB Cal

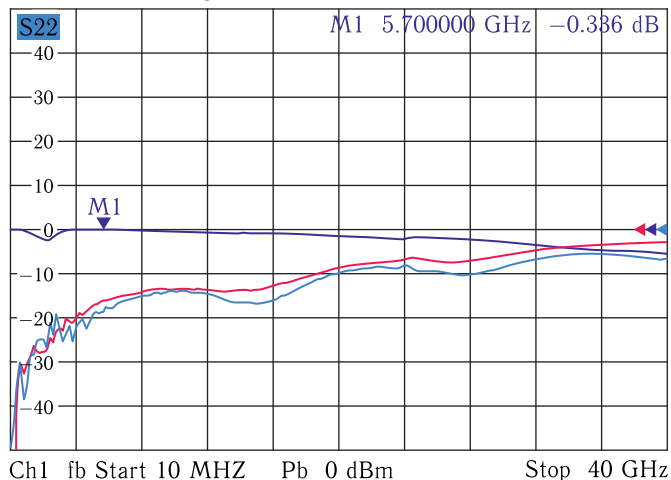


Рис. 14. Значение характеристики прохождения сигнала  $S(2,1)$  для копланарной линии в тестовой многослойной СВЧ-плате на основе полиимида [15]

структивно-технологических решений на характеристику прохождения сигнала в моделях копланарных линий. Диапазон изменения значений характеристики прохождения сигнала  $S(2,1)$  для модели копланарной линии составил: от  $-0,148$  дБ до  $-2,48$  дБ при изменении разнотолщинности от 10% до 90%; от  $-0,14$  до  $-0,165$  дБ в диапазоне значений  $\epsilon$  от 3,4 до 3,66; от  $-0,372$  дБ до  $-4,39$  дБ при изменении угла стенки переходного отверстия от  $48^\circ$  до  $90^\circ$ ; от  $-0,329$  дБ до  $-0,409$  дБ при различной степени заполнения переходного отверстия. Получен алгоритм применения конструктивно-технологических решений как параметров и состояний при изготовлении трехслойных СВЧ-плат на основе полиимида. Значение характеристики прохождения сигнала  $S(2,1)$  в копланарной линии тестовой трехслойной СВЧ-плате на основе полиимида, изготовленной по последовательности формирования структуры многослойных СВЧ-плат на основе полиимида, составляет  $-0,336$  дБ, что соответствует сумме значений результатов моделирования отдельных конструктивно-технологических решений. Полученные алгоритм, параметры и состояния объекта являются исходными данными при формировании прототипа цифрового двойника технологии многослойных СВЧ-плат.



## Список литературы

1. *Боровков А.И., Рябов Ю.А.* Цифровые двойники: определение, подходы и методы разработки / В сб. «Цифровая трансформация экономики и промышленности». СПб.: ФГАОУ ВО СПбПУ, 2019. С. 234–245.
2. *Курганова Н.В., Филлин М.А., Черняев Д.С., Шахлаев А.Г., Намиот Д.Е.* Внедрение цифровых двойников как одно из ключевых направлений цифровизации производства // *International Journal of Open Information Technologies*, 2019, т. 7, № 5. С. 105–115.
3. *Пономарев К.С., Феофанов А.Н.* Цифровой двойник производства как инструмент цифровизации технологических процессов предприятия / В сб. «Актуальные тренды и перспективы развития науки, техники, технологий». Белгород: ООО АПНИ, 2019. С. 141–145.
4. *Гурьянов А.В., Заколдаев Д.А., Шукалов А.В., Жаринов И.О.* Алгоритм технологического процесса изготовления изделий приборостроения на предприятиях индустрии 4.0 // *Вопросы оборонной техники. Серия 16*, 2018, № 5–6. С. 134–140.
5. *Шведенко В.Н., Мозохин А.Е.* Применение концепции цифровых двойников на этапах жизненного цикла производственных систем // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*, 2020, т. 20, вып. 6. С. 815–827.
6. *Bao Jinsong, Guo Dongsheng, Li Jie, Zhang Jie.* The modelling and operations for the digital twin in the context of manufacturing // *Enterprise Information Systems*, 2019, № 13. P. 534–556.
7. *Жуков А.А., Калашников А.Ю., Соловьев М.К.* Физико-технологические ограничения при проектировании многослойной коммутационной СВЧ-платы // *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*, 2020, т. 7, вып. 2. С. 70–77.
8. *Жуков А.А., Калашников А.Ю., Поймалин В.Э.* Характеристики многослойной коммутационной СВЧ-платы микро модуля космического назначения // *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*, 2019, т. 6, вып. 4. С. 89–96.
9. *Калашников А.Ю., Жуков А.А.* Особенности планирования композиционной структуры многослойной СВЧ-платы // *Наноиндустрия*, 2020, т. 13, S4. С. 415–416.
10. *Шахнов В.А., Курносенко А.Е.* Моделирование цифрового производства электронной аппаратуры в рамках концепции «индустрия 4.0» / В сб. «Цифровая трансформация промышленности: тенденции, управление, стратегии». Екб.: ИЭ УрО РАН, 2019. С. 585–594.
11. *Царев М.В., Андреев Ю.С.* Цифровые двойники в промышленности: история развития, классификации, технологии, сценарии использования // *Известия вузов. Приборостроение*, 2021, т. 64, вып. 7. С. 517–531.
12. *Белоус А.И., Мерданов М.К., Шведов С.В.* СВЧ-электроника в системах радиолокации и связи. *Техническая энциклопедия*. Кн. 1. М.: Техносфера, 2018. 818 с.
13. Пат. 2713572, Российская Федерация, МПК H01L 21/77, Способ изготовления СВЧ-гибридной интегральной микросхемы космического назначения с многоуровневой коммутацией / В.Э. Поймалин, А.Ю. Калашников, А.А. Жуков; заявитель и патентообладатель АО «Российские космические системы» № 2019124359; заявл. 01.08.2019; опубл. 05.02.2020, Бюлл. № 4.
14. Пат. 2692373, Российская Федерация, МПК B05D1/36, H01L21/108. Способ получения диэлектрического слоя на основе полимерного покрытия в изделиях микроэлектроники / А.Ю. Калашников, А.А. Жуков; заявитель и патентообладатель АО «Российские космические системы» № 20181284; заявл. 03.08.2018; опубл. 24.06.2019, Бюлл. № 18.
15. *Буйякин А.В., Жуков А.А., Калашников А.Ю., Поймалин В.Э.* Микроэлектронный СВЧ-модуль на многослойной плате // *Радиотехника и электроника*, 2022, т. 67, вып. 9. С. 916–922.