

Принцип формирования металлодиэлектрических микроразмерных метаструктур

А. А. Аджибеков, *rogov_ae@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. А. Жуков, *д. т. н., доцент, zhukov.aa@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

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

О. А. Алексеев, *д. т. н., профессор, centr31@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. Предложен принцип формирования слоистых металлодиэлектрических микроразмерных метаструктур, представляющих собой слои диэлектрика с нанесенными металлическими рисунками. Принцип состоит в изготовлении отдельных слоев фотолитографическими методами с последующей их сборкой и совмещением на специальной установке, использующей источник высокочастотного электромагнитного излучения с антисимметричным полем. Критерием точности совмещения слоев является уровень мощности принимаемого высокочастотного электромагнитного сигнала на выходе приемника, фиксирующего поле источника излучения, рассеянное металлическими метками совмещения, нанесенными на каждый совмещаемый слой. При применении предложенного принципа возможно совмещение оптически непрозрачных металлодиэлектрических слоев метаструктур, при этом использование штифтов не требуется. Численная оценка качества совмещения слоев показала, что погрешность совмещения слоев при использовании для зондирования поля сантиметрового диапазона длин волн составляет не более 3–4 мкм.

Ключевые слова: метаматериал, метаструктура, волновод

The Principle of Formation of Metal-dielectric Micro-sized Metastructures

A. A. Adzhibekov, *rogov_ae@spacecorp.ru*

Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

A. A. Zhukov, *Dr. Sci. (Engineering), Associate Prof., zhukov.aa@spacecorp.ru*

Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

FSBEI Moscow Aviation Institute (National Research University)

O. A. Alekseev, *Dr. Sci. (Engineering), Prof., centr31@spacecorp.ru*

Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

Abstract. The principle of formation of layered metal-dielectric micro-sized metastructures, which are dielectric layers with deposited metal patterns, is proposed. The principle consists in the production of individual layers by photolithographic methods, followed by their assembly and alignment on a special installation using a source of high-frequency electromagnetic radiation with an antisymmetric field. The criterion for the accuracy of the alignment of layers is the power level of the received high-frequency electromagnetic signal at the output of the receiver, which fixes the field of the radiation source, scattered by the metal alignment marks applied to each matched layer. When applying the proposed principle, it is possible to combine optically opaque metal-dielectric layers of metastructures, without the use of pins. A numerical assessment of the quality of layer alignment showed that the error of layer alignment when using a centimeter wavelength range for field sensing is no more than 3–4 μm .

Keywords: metamaterial, metastructure, waveguide

Введение

За последние два десятилетия многими исследовательскими коллективами активно ведутся работы по изучению свойств и определению направлений применения метаматериалов — композитов, обладающих отрицательной диэлектрической или (и) магнитной проницаемостью. Впервые предположение о возможности существования таких материалов было высказано в работе В.Г. Веселаго [1]. Также в этой работе были теоретически, с помощью аппарата электродинамики описаны электрические свойства таких материалов. Позже в работах [2, 3] был показан способ практической реализации подобных материалов. Опубликование работ [2, 3] способствовало активизации исследований в данном направлении. Исследования были направлены на изучение путей реализации метаматериалов и направлений их потенциального применения. В частности, была показана возможность использования метаматериалов для создания электрически малых антенн, антенн с низким уровнем заднего излучения, линз, экранов с улучшенными характеристиками [4–7]. При этом в подавляющем числе публикаций отражена реализация метаматериалов в виде слоистых металлодиэлектрических композитов. Размеры металлических элементов этих композитов и расстояния между элементами, как правило, не превышают длины волны. Таким образом, при переходе к более высокочастотным диапазонам реализация метаматериалов становится все сложнее. В миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн размеры металлических элементов могут составлять десятки–сотни микрометров, а требуемые допуски на их изготовление — единицы микрометров и менее. Современные технологии формирования металлических структур на диэлектрической подложке (литографические методы изготовления) способны обеспечить такую точность [8]. Однако при создании слоистой структуры возникают сложности с точным позиционированием слоев относительно друг друга. Вопросы совмещения слоев при создании миниатюрных металлодиэлектрических структур на данный момент изучены слабо. Анализ имеющихся в открытой печати источников, посвященных данной тематике, показывает, что высокоточное совмещение требуется, как

правило, при изготовлении многослойных печатных плат [9, 10]. В найденных источниках показано, что для сборки и совмещения в технологии многослойных печатных плат применяется либо штифтовая технология сборки, обеспечивающая погрешности совмещения порядка ± 50 мкм, либо автоматизированные системы сборки с оптической (рентгеновской) системой совмещения с погрешностями ± 17 мкм [9, 10]. В этой связи актуальной задачей является разработка принципа совмещения слоистых структур металлодиэлектрических микроразмерных метаструктур, обеспечивающего высокоточное (с погрешностью совмещения менее 5–10 мкм) совмещение оптически непрозрачных слоев без применения штифтов.

Цель работы — разработка принципа формирования слоистых металлодиэлектрических микроразмерных метаструктур.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- рассмотреть и проанализировать использование электромагнитного излучения для совмещения оптически непрозрачных слоев;
- предложить аппаратную реализацию принципа — установку контроля качества совмещения слоев метаструктуры;
- провести численную оценку качества совмещения слоев.

Использование электромагнитного излучения для совмещения слоев

Представляет интерес использование электромагнитного излучения сантиметрового, миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн для реализации совмещения слоев металлодиэлектрических микроразмерных метаструктур, обеспечивающего высокоточное совмещение слоев без применения штифтов. При этом простое облучение совмещаемых слоев метаструктуры электромагнитным полем с последующим исследованием картины его рассеяния для определения качества совмещения слоев представляется малоперспективным. Во-первых, зондирование слоистой структуры волнами сантиметрового и даже миллиметрового диапазонов длин волн при характерных размерах

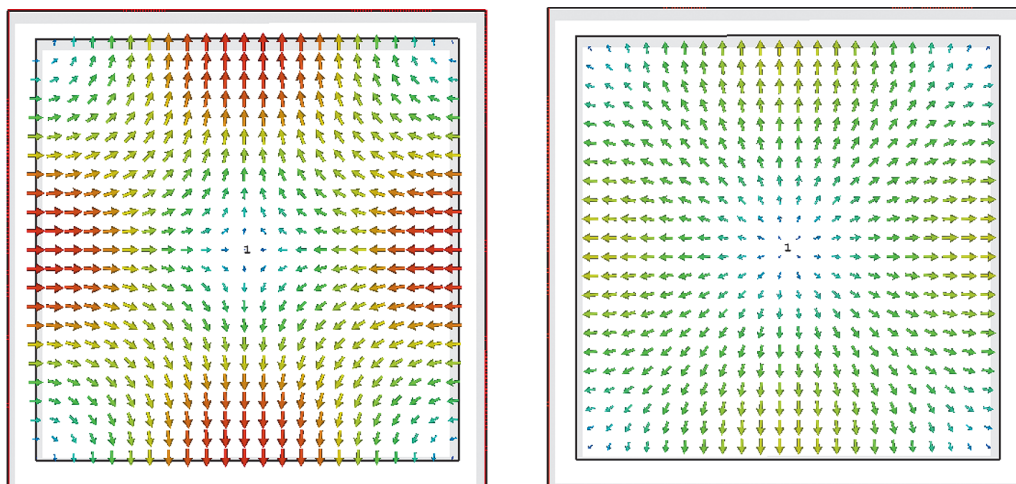


Рис. 1. Силовые линии электрического поля мод Н11 (слева) и Е11 (справа) в поперечном сечении квадратного волновода

металлизированных элементов порядка десятков микрон из-за ограничений по дифракционному пределу не обеспечит приемлемой точности совмещения. Во-вторых, каждый новый тип слоистой структуры даст свою сложную и уникальную картину рассеяния электромагнитного излучения. Это потребует для каждого типа метаструктур решения задачи определения тех характеристик рассеяния, которые могут служить критериями точности совмещения слоев метаструктуры, выбора диапазона частот и параметров излучателя зондирующей волны. Вместе с тем для технологии совмещения слоев более приемлем единый критерий оценки точности совмещения слоев, подходящий для широкого класса метаструктур. В данной работе предлагается для совмещения слоев метаструктур использовать источник высокочастотного электромагнитного излучения с антисимметричным полем [11]. Таким источником может быть, например, открытый конец квадратного волновода с модой Н11 или Е11. Картина силовых линий электрического поля этих мод показана на рис. 1.

Установка контроля качества совмещения слоев метаструктуры

Схема установки контроля качества совмещения слоев метаструктуры представлена на рис. 2. Принцип работы установки состоит в следующем:

на каждом диэлектрическом слое с металлическими метаструктурами формируется металлическая метка совмещения; на первом этапе совмещения очередной слой двигается таким образом, чтобы метка совмещения оказалась в пространстве между двумя соосными квадратными волноводами. Используемый диапазон частот и размеры волноводов выбираются таким образом, чтобы в волноводах, помимо низших мод Н10 и Н01, могли распространяться моды Н11 или Е11. На входе первого волновода подключаются передатчик и преобразователь мод, обеспечивающие формирование

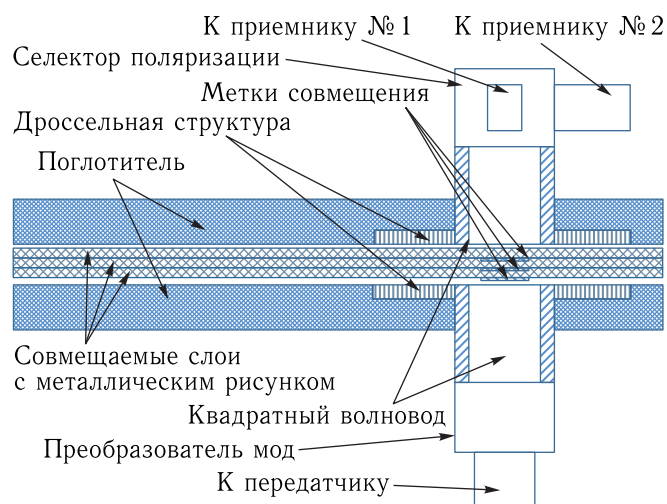


Рис. 2. Схема установки контроля качества совмещения слоев метаструктуры

нужной нечетной моды (H11 или E11), на втором — поляризационный селектор, обеспечивающий селекцию низших мод квадратного волновода. К двум выходам селектора поляризации подключаются приемники. Дроссельные структуры и поглотитель служат для ослабления вытекающего через зазор между волноводами излучения.

В случае если метка идеально совмещена с осью волновода, должна сохраняться симметрия: мода H11 или E11, проходя через слои диэлектрика с метками, частично отражается в первый волновод, частично проходит во второй, при этом преобразования нечетной моды в моду H10 или H01 не происходит. На приемниках выходов селектора мод H10 и H01 в этом случае наблюдаются минимумы мощности сигналов. Если по какой-либо из координатных осей (x или y) происходит сдвиг метки относительно оси волновода, осуществляется частичное преобразование соответствующей нечетной моды в моду H10 или H01 в зависимости от конкретной координатной оси, по которой произошел сдвиг. В этом случае на выходе соответствующего канала селектора мод наблюдается повышение мощности сигнала. Мощность сигнала соответствующего канала тем больше, чем больше сдвиг. При наличии сдвига по обеим координатным осям повышение мощности в каналах селектора поляризации происходит одновременно и в основном независимо. Таким образом, сигналы на выходах поляризации являются фактически сигналами погрешностей совмещения по осям x и y , эти сигналы могут быть использованы системой для совмещения слоев. Подобная установка может быть использована для совмещения слоев при отсутствии поворотов. Для совмещения слоев при наличии как сдвигов, так и поворотов требуются две метки и две пары волновода.

Результаты численной оценки качества совмещения слоев

Результаты численной оценки качества совмещения слоев при использовании предложенного принципа (зависимости модулей коэффициентов передачи сигнала передатчика в каналы № 1 и № 2 поляризационного селектора от сдвигов по осям x и y)

представлены на рис. 3–5. Оценка проводилась для двух квадратных волновода с шириной 15 мм на частоте 20 ГГц. Совмещаемая структура представляла собой четыре слоя диэлектрика с $\epsilon = 2,2$ и толщиной 0,5 мм, при этом на каждом слое была метка с конфигурацией, представленной на рис. 6. В ходе численного расчета вычислялись зависимости модулей коэффициентов передачи с входа первого волновода в каналы погрешностей совмещения по оси x и по оси y второго волновода от смещения ближайшего к приемному волноводу слоя относительно оси волновода.

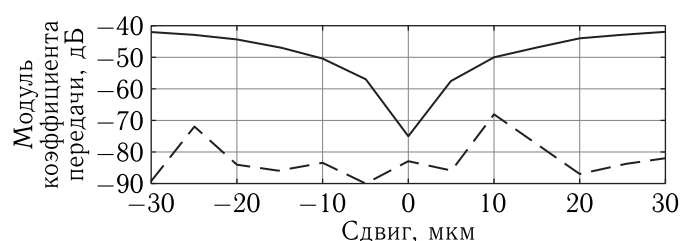


Рис. 3. Зависимость модуля коэффициента передачи первого волновода в каналы погрешностей совмещения по оси x (сплошная линия) и по оси y (штриховая линия) от сдвига по оси x при отсутствии сдвига по оси y

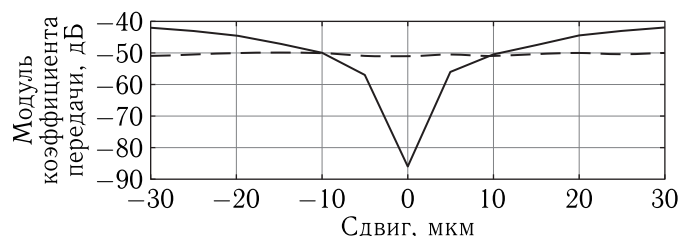


Рис. 4. Зависимость модуля коэффициента передачи первого волновода в каналы погрешностей совмещения по оси x (сплошная линия) и по оси y (штриховая линия) от сдвига по оси x при сдвиге по оси y , равном 10 мкм

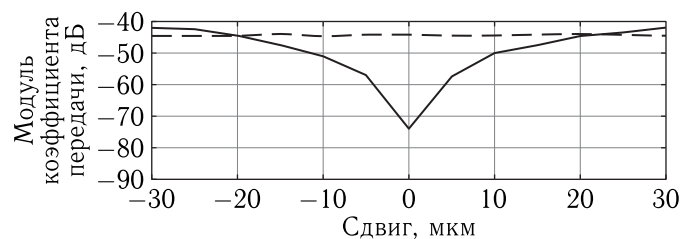


Рис. 5. Зависимость модуля коэффициента передачи первого волновода в каналы погрешностей совмещения по осям x (сплошная линия) и по оси y (штриховая линия) от сдвига по оси x при сдвиге по оси y , равном 20 мкм

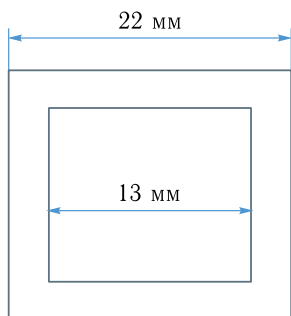


Рис. 6. Конфигурация меток совмещения

Как видно из рисунков, минимум сигналов на выходах №1 и №2 поляризационного селектора соответствует случаю идеального совмещения. При этом сигналы погрешностей совмещения по осям x и y в значительной степени независимы. При мощности генерируемого сигнала в 1 мВт (0 дБмВт), в случае обеих нечетных мод величина мощности сигнала в соответствующем канале погрешности совмещения при величине сдвига 3–4 мкм составит не менее –57 дБмВт. При чувствительности современных измерителей мощности, достигающей –60 – –70 дБмВт, величина принимаемого сигнала будет выше уровня собственных шумов измерителя мощности.

Заключение

Таким образом, в работе предложен принцип создания слоистых металлодиэлектрических метаструктур, заключающийся в изготовлении отдельных слоев с металлическим рисунком фотолитографическими методами с последующей их сборкой и совмещением в слоистую структуру. Критерием точности совмещения является уровень мощности попадающего на приемник поля источника излучения, рассеянного металлическими метками совмещения, нанесенными на каждый совмещаемый слой. Принцип обеспечивает автоматизированное совмещение оптически непрозрачных металлодиэлектрических слоев и не требует сверления отверстий или применения штифтов. При использовании зондирующего электромагнитного поля с частотой 20 ГГц достижимая погрешность совмещения слоев составляет 3–4 мкм. Полученная

погрешность на порядок меньше, чем погрешность штифтовой технологии и в 3–4 раза меньше погрешности известного рентгеновского метода совмещения.

Список литературы

1. *Веселаго В.Г.* Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями ϵ и μ // Успехи физических наук, 1967, т. 92, вып. 3. С. 517–526.
2. *Pendry J.B., Holden A.J., Robbins D.J., Stewart W.J.* Magnetism from conductors and enhanced on linear phenomena // IEEE Transactions Microwave Theory and Techniques, 1999, № 47. P. 2075–2081.
3. *Smith D.R., Padilla W.J., Vier D.C. et al.* Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity // Physical Review Letters, 2000, vol. 84, № 18. P. 4184–4187.
4. *Слюсар В.И.* Метаматериалы в антенной технике: история и основные принципы // Электроника: наука, технология бизнес, 2009, № 7. С. 70–79.
5. *Слюсар В.И.* Метаматериалы в конструкциях антенн // Электроника: наука, технология бизнес, 2009, № 8. С. 66–70.
6. *Слюсар В.И.* Метаматериалы в антенной технике: основные принципы и результаты // Первая миля. Last Mile, 2010, № 3-4. С. 44–60.
7. *Вендик И.Б., Вендик О.Г.* Метаматериалы и их применение в технике сверхвысоких частот: обзор // Журнал технической физики, 2013, т. 83, вып. 1. С. 4–28.
8. *Валиев К.А.* Физические основы субмикронной фотолитографии. М.: Наука, 1990. 350 с.
9. *Черкасов С.* Оборудование фирмы CEDAL EQUIPMENT для сборки и совмещения пакетов многослойных печатных плат // Печатный монтаж, 2006, вып. 4. 6 с. http://www.circuitry.ru/files/article_pdf/2/article_2442_337.pdf (Дата обращения 30.10.2020).
10. *Шуваев П.В., Трусов В.А., Баннов В.Я. и др.* Формирование структуры сложных многослойных печатных плат // Тр. Международного симпозиума «Надежность и качество». Пенза: Пензенский государственный университет, 2013. С. 364–373.
11. *Аджибеков А.А., Жуков А.А., Алексеев О.А.* Экспериментальный стенд для сборки и испытаний антенных модулей на основе микроминиатюрных слоистых метаматериалов // Труды МАИ, 2016, № 87. С. 14.