

Физико-технологические ограничения при изготовлении СВЧ-антенн Фабри–Перо с полупрозрачными элементами

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

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

О. А. Алексеев, *д. т. н., профессор, centr31@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)»,
г. Москва, Российская Федерация*

Аннотация. В настоящей статье численными методами исследовано влияние погрешностей изготовления антенн Фабри–Перо с полупрозрачными элементами на их электрические характеристики. Выделены два основных типа погрешностей: погрешности изготовления полупрозрачного элемента и погрешности изготовления открытого резонатора. Проведена оценка чувствительности антенны Фабри–Перо к этим погрешностям. Показано, что среди рассмотренных погрешностей самыми существенными являются формирование металлического рисунка полупрозрачных слоев и погрешность высоты расположения полупрозрачного элемента над излучателем. В то же время горизонтальные смещения полупрозрачных слоев относительно друг друга и полупрозрачного элемента относительно излучателя оказывают влияние на характеристики антенны в меньшей степени. Проведен анализ технологического процесса изготовления антенны Фабри–Перо и выделены критические операции. Для снижения вышеуказанных погрешностей предложено использование технологий микроэлектроники и автоматической сборки с контролем точности совмещения с помощью оптических методов или методов ближнепольного СВЧ-зондирования.

Ключевые слова: антенны Фабри–Перо, коэффициент усиления

Physical and Technological Limitations in the Manufacture of Fabry–Perot Microwave Antennas with Translucent Elements

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

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

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

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

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

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

FSBEI Moscow Aviation Institute (National Research University)

Abstract. The paper studies the influence of manufacturing errors of Fabry–Perot antennas with translucent elements on their electrical characteristics by numerical methods. Two main types of errors are identified: errors in the manufacture of a translucent element and errors in the manufacture of an open resonator. The sensitivity of the Fabry–Perot antenna to these errors is evaluated. The article shows that among the errors considered, the most significant are the formation of a metallic pattern of translucent layers and the error in the height of the translucent element above the radiator. At the same time, the horizontal displacements of the translucent layers relative to each other and the translucent element relative to the radiator less affect the antenna’s characteristics. The analysis of the technological process of the Fabry–Perot antenna manufacturing is carried out and critical operations are highlighted. To reduce the stipulated errors, the paper proposes to use the technology of microelectronics and automatic assembly with control of the alignment accuracy employing optical methods or methods of near-field microwave sensing.

Keywords: Fabry–Perot antenna, gain

Введение

В настоящее время активно ведутся исследования в области создания антенн Фабри-Перо. Данной теме посвящен ряд работ [1–7]. Эти антенны обладают рядом достоинств: простота конструкции, низкий профиль, отсутствие криволинейных поверхностей и т. д. В существующих работах, посвященных данной тематике, внимание в основном уделяется конструкции антенн Фабри-Перо, методам их расчета и экспериментальным исследованиям макетов. Вместе с тем вопросы влияния погрешностей изготовления на характеристики этих антенн в имеющихся работах систематически не исследовались. В этой связи решаемая задача представляется актуальной.

Цель работы: исследование влияния погрешностей изготовления антенны Фабри-Перо на ее характеристики.

Задачи: исследование зависимости характеристик антенны Фабри-Перо от различных погрешностей изготовления ее элементов, анализ технологического процесса изготовления антенны и выявление критических операций.

Объектом исследования является антенна Фабри-Перо, подобная [7], и технологический процесс ее изготовления. На рис. 1, 2 представлена конструкция этой антенны. Антенна состоит из двух полупрозрачных слоев, металлического экрана и излучателя в виде открытого конца волновода. Схема технологического процесса изготовления антенны представлена на рис. 3.

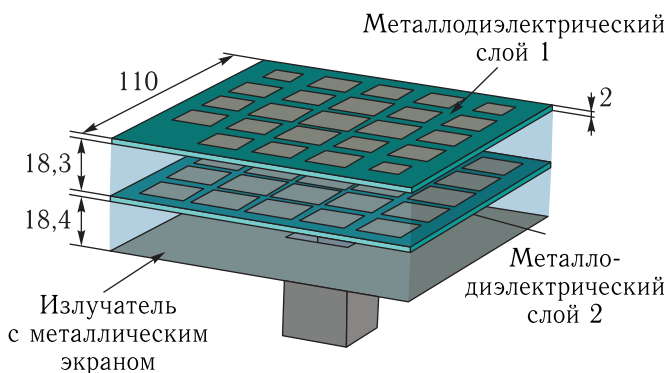


Рис. 1. Конструкция исследуемой антенны Фабри-Перо с полупрозрачными элементами

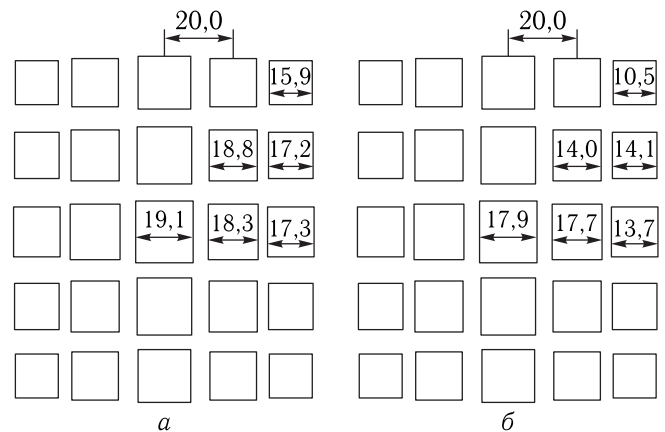


Рис. 2. Параметры топологии: а) полупрозрачного слоя 1 исследуемой антенны; б) полупрозрачного слоя 2 исследуемой антенны

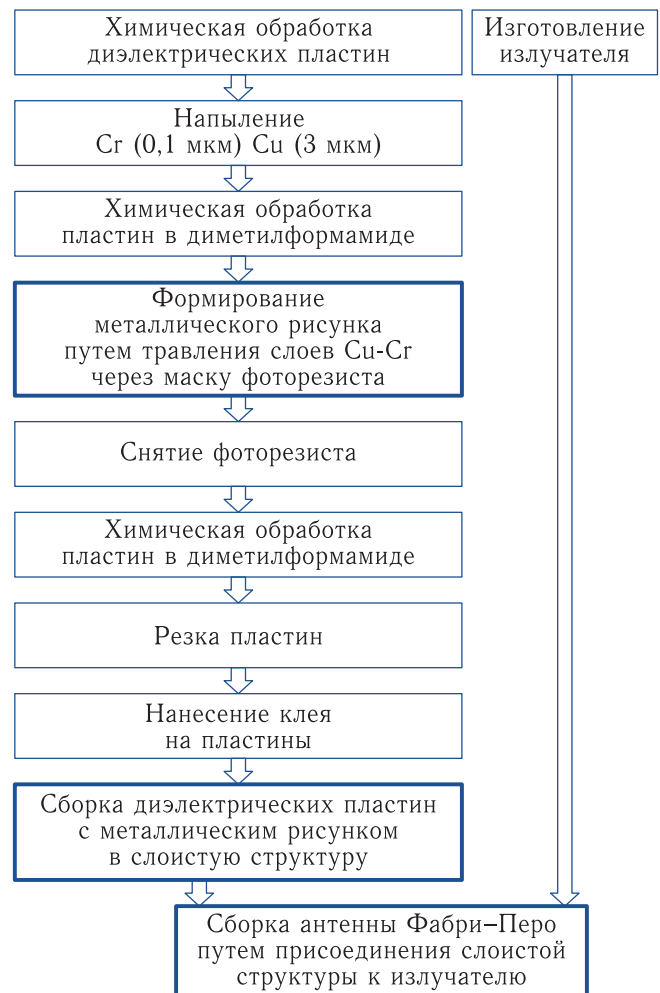


Рис. 3. Схема технологического процесса изготовления антенны Фабри-Перо с полупрозрачными элементами (жирными линиями выделены критические операции)

Методика исследований

Исследование представленной на рис. 1 антенны заключалось в определении зависимости ее характеристик от различных погрешностей. В качестве характеристики, определяющей качество этой антенны, применялся коэффициент усиления КУ. КУ антенны определялся с помощью метода конечных разностей в частотной области [8] в среде CST Microwave studio для различных погрешностей изготовления антенны Фабри–Перо. Исследовалось влияние двух основных типов погрешностей:

1. Погрешности изготовления полупрозрачных элементов, в том числе (рис. 4, а) погрешности, возникающие при формировании металлического рисунка металлических слоев полупрозрачного элемента; погрешности совмещения этих слоев, в том числе сдвиги, повороты, растяжения.

2. Погрешности, влияющие на геометрию резонатора Фабри–Перо (рис. 4, б), — погрешности расстояния между экраном и полупрозрачным элементом, сдвиг и поворот полупрозрачного элемента относительно экрана (возникают на этапе сборки антенны Фабри–Перо блок-схемы на рис. 4).

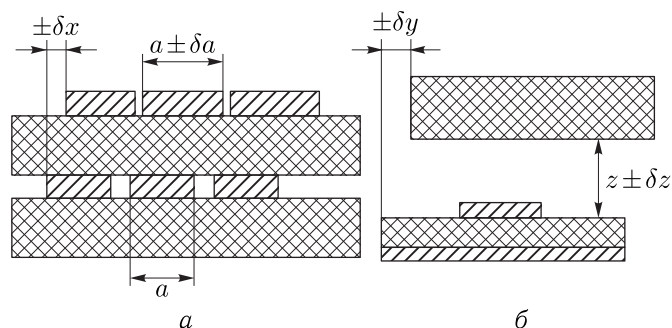


Рис. 4. Основные погрешности, возникающие при изготовлении антенны Фабри–Перо с полупрозрачными элементами: а) погрешности изготовления полупрозрачного элемента; б) погрешности, влияющие на геометрию открытого резонатора

В качестве исходных данных задавалась: геометрия антенны, в том числе топология металлических слоев (представлены на рис. 1, 2); материалы (идеальный проводник для всех металлов, диэлектрик с $\epsilon = 2,1$ для диэлектрических слоев, на которых наносится металлический рисунок); граничные условия (условия излучения); источник возбужде-

ния (волноводный порт на конце отрезка квадратного волновода). В качестве частотного диапазона выбран X-диапазон.

Результаты

В результате проведения численных расчетов получены следующие характеристики: зависимость КУ от горизонтального смещения полупрозрачного слоя 1 относительно слоя 2 (обозначена как δx на рис. 4); зависимости КУ от погрешности изготовления металлического рисунка полупрозрачных слоев (обозначена как δa на рис. 4); зависимости КУ от горизонтального смещения полупрозрачного элемента относительно слабонаправленного излучателя (обозначена как δy на рис. 4) и от вертикального смещения полупрозрачного элемента относительно слабонаправленного излучателя (обозначена как δz на рис. 4), представлены на рис. 5–8.

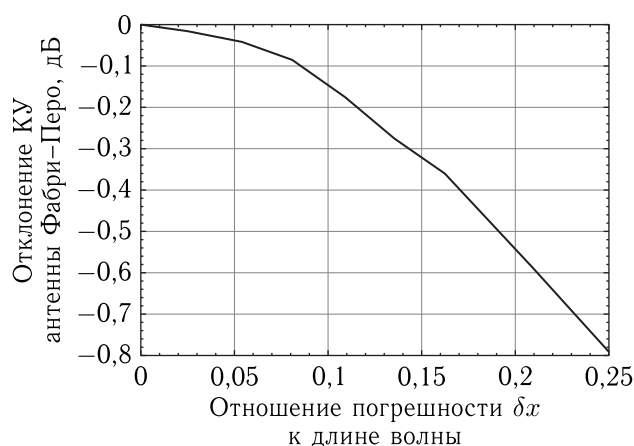


Рис. 5. Зависимость отклонения КУ антенны Фабри–Перо с полупрозрачными элементами от смещения полупрозрачного слоя 1

Из рис. 5–8 видно, что наибольшее влияние на КУ антенны Фабри–Перо оказывают погрешности изготовления металлического рисунка и отклонения высоты расположения полупрозрачного элемента над излучателем. Эти две погрешности оказывают прямое влияние на резонансную частоту и добротность открытого резонатора, и, как следствие, влияние этих двух характеристик на диаграмму направленности антенны наиболее велико. В меньшей степени на характеристики антенны

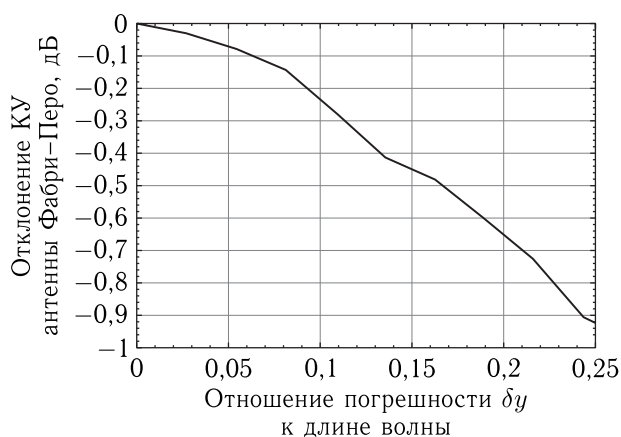


Рис. 6. Зависимость отклонения КУ антенны Фабри-Перо с полупрозрачными элементами от смещения полупрозрачного элемента

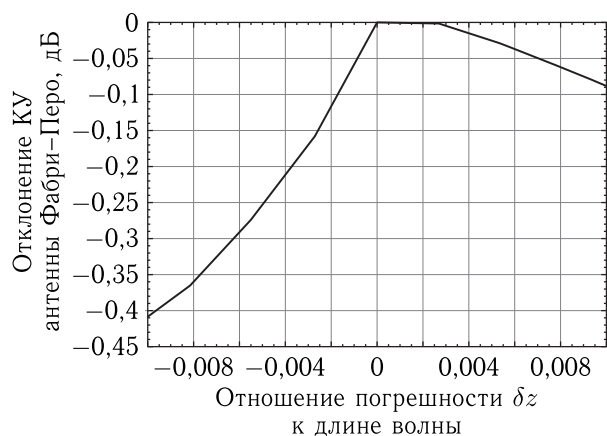


Рис. 7. Зависимость отклонения КУ антенны Фабри-Перо с полупрозрачными элементами от вертикального смещения полупрозрачного элемента

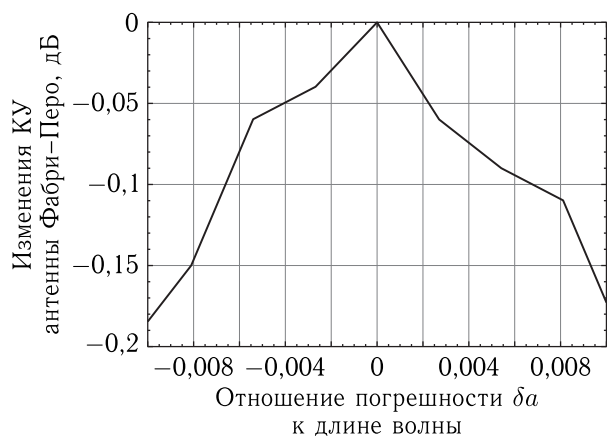


Рис. 8. Зависимость отклонения КУ антенны Фабри-Перо с полупрозрачными элементами от погрешности изготовления металлического рисунка полупрозрачных слоев

влияют горизонтальные смещения полупрозрачных слоев относительно друг друга и полупрозрачного элемента относительно излучателя. В первом случае снижение КУ антенны на 0,2 дБ происходит при величинах погрешностей $0,004-0,012\lambda$, во втором — $0,09-0,12\lambda$ (λ — длина волны).

Таким образом, точность изготовления металлического рисунка слоев полупрозрачного элемента может быть обеспечена применением современных технологий на основе литографии [9, 10]. Вместе с тем при создании антенн Фабри-Перо проявляются физико-технологические ограничения, которые обусловлены требованием к погрешности горизонтального совмещения слоев полупрозрачного металлодиэлектрического элемента, а также полупрозрачного элемента и излучателя (рис. 4, а, 5, 6) в виде десятых долей длины волны, а для антенн Фабри-Перо субмиллиметрового и миллиметрового диапазонов — требованием к позиционированию полупрозрачного металлодиэлектрического элемента над излучателем с точностью до тысячных долей длины волны. Это выходит за требуемые пределы точности механической сборки металлодиэлектрических пластин в слоистую структуру («в пакет») (рис. 3, выделено).

Преодоление сформулированных физико-технологических ограничений может быть осуществлено путем автоматической сборки элементов антенны Фабри-Перо при контроле точности совмещения элементов с применением ближнепольного СВЧ-зондирования [11–13], а также контролем точности позиционирования по высоте полупрозрачного элемента над излучателем лазерной дальнометрией.

Выводы

Таким образом, в работе исследовано влияние точности изготовления антенны Фабри-Перо с полупрозрачными элементами на коэффициент усиления. Показано, что из-за различий типов используемых технологий изготовления элементов антенны ее коэффициент усиления в наибольшей степени зависит от точности формирования полупрозрачных элементов и позиционирования полупрозрачного элемента над излучателем. Сформулированы требования к технологии малогабаритных

антенн Фабри–Перо с полупрозрачными элементами миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов — необходимость размещения полупрозрачного металлодиэлектрического элемента над излучателем с точностью до сотых и тысячных долей длины волны соответственно, совмещения слоев полупрозрачного металлодиэлектрического элемента, а также полупрозрачного элемента и излучателя с точностью до десятых долей длины волны. Показано, что для преодоления ограничений требуется автоматическая сборка элементов антенны Фабри–Перо при контроле точности совмещения элементов с использованием ближнепольного СВЧ-зондирования и высоты расположения полупрозрачного элемента над излучателем лазерной дальнометрией.

Список литературы

1. *Zhiming L., Jens B., Shaobin L., Xiangkun K.* Investigations and prospects of Fabry–Perot antennas: a review // *Journal of Systems Engineering and Electronics*, August 2021, vol. 32, № 4. P. 731–747.
2. *Аджибеков А. А.* Разработка бортовых антенн Фабри–Перо с конструктивным элементом на основе искусственного магнитодиэлектрика // *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*, 2022, т. 9, вып. 3. С. 48–56.
3. *Lyu Y.-He., Ding X., Wang B.-Z.* Dual-wideband high-gain Fabry–Perot cavity antenna // *IEEE Access*, Dec. 2019. P. 1–7.
4. *Azuzu Y., Komaji N., Karimpour M.* Design and fabrication of a high gain, low cost, LHCP Fabry–Perot antenna at Ku-band // *Microwave and optical technology letters*, Mar. 2020, vol. 1, № 61. P. 1–7.
5. *Li L., Lei S., Liang Ch.-H.* Metamaterial-based Fabry–Perot resonator for ultra-low profile high-gain antenna // *Microwave and optical technology letters*, Aug. 2012, vol. 54, № 11. P. 2620–2623.
6. *Goudarzi A., Honari M.M., Mirzavand R.* A millimeter wave Fabry–Perot antenna with unidirectional beam scanning capability for 5G applications // *IEEE Transactions on antennas and propagation*, March 2022, vol. 70, № 3. P. 1787–1796.
7. *Letavin D.A., Konovalov A.L.* Antenna for mobile communication of the 5th generation // *Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT)*, 13–15 Mar. 2018 / *Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. M.*, 2018. P. 1–4.
8. *Банков С. Е., Курушин А. А.* Электродинамика для пользователей САПР СВЧ. М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2017. 316 с.
9. *Коледов Л. А.* Технология и конструкции микросхем, микропроцессоров и микросборок. М.: Радио и связь, 1989. 393 с.
10. *Валиев К. А.* Физические основы субмикронной фотолитографии. М.: Наука, 1990. 350 с.
11. *Пахнин А.* Формирование структуры сложных многослойных печатных плат // *Производство электроники: технологии, оборудование, материалы*, 2011, № 2. С. 32–40.
12. *Angale S.M., Talanov V., Scwartz A.R.* Principles of near-field microwave probe microscopy // *Journal of scanning probe microscopy*, 2006. P. 207–245.
13. *Королев С. А.* Микроволновая микроскопия полупроводниковых структур. Дисс.... канд. физ.-мат. наук, 2018. 106 с.
14. *Гайкович К. П., Смирнов А. И., Максимович Е. С., Бадеев В. А.* Ближнепольное СВЧ-зондирование нелинейных подповерхностных объектов // *Журнал радиоэлектроники*, 2020, № 8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.8.6> (Дата обращения 18.02.2023).

Дата поступления рукописи
в редакцию 21.12.2022
Дата принятия рукописи
в печать 27.02.2023