

УДК 621.382.2/.3

## АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ВЫБОРА СВЧ-ПОДЛОЖЕК ДЛЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

**Левченко Владислав Валентинович,**

Аспирант

Московский технический университет связи и информатики

Факультет сетей и систем связи

vladlevchen@yandex.ru

### Аннотация

В статье проведён анализ современных проблем выбора диэлектрических подложек для печатных плат в СВЧ-системах. Рассмотрены электрические, термические и технологические требования к материалам, оценены последствия применения традиционных (стеклотекстолит FR-4) и специализированных подложек из фторопласта, композитных материалов или керамики. Приведены критерии выбора материала и практические рекомендации для проектирования и серийного изготовления СВЧ-устройств.

**Ключевые слова:** СВЧ-подложки, диэлектрические материалы, печатные платы, диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь

## CURRENT CHALLENGES IN SELECTING MICROWAVE SUBSTRATES FOR PRINTED CIRCUIT BOARDS

**Levchenko Vladislav Valentinovich,**

Moscow Technical University of Communications and Informatics

Faculty of networks and communication systems

### ABSTRACT

The article analyzes the current challenges in selecting dielectric substrates for printed circuit boards used in microwave systems. Electrical, thermal, and manufacturing requirements for substrate materials are examined, along with the consequences of using traditional materials such as FR-4 and specialized substrates based on fluoroplastic, composite structures, or ceramics. Criteria for material selection and practical recommendations for the design and mass production of microwave devices are presented.

**Keywords:** Microwave substrates, dielectric materials, printed circuit boards, dielectric constant, loss tangent

## Введение

Высокочастотные СВЧ-устройства – фильтры, антенные элементы, приёмопередающие модули и радиолокационные блоки – требуют подложек с контролируемыми электрофизическими характеристиками, поскольку геометрия линий передачи и распределение полей чувствительны к  $\epsilon_n$  и  $\tan \delta$  материала [1]. Для частот выше 1–2 ГГц использование традиционных материалов, таких как стеклотекстолит (FR-4), приводит к росту потерь и нестабильности параметров схем [4]. Развитие промышленности печатных плат стимулировало появление специализированных материалов на основе фторопластов, керамик и композитов, детально описанных в технической документации ведущих производителей [2; 3].

## Актуальные проблемы

### 1. Стабильность диэлектрических параметров и затухание

Диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_r$  и  $\tan \delta$  определяют скорость распространения сигнала, величину затухания и устойчивость несущей частоты СВЧ-узлов [1]. Материалы FR-4 характеризуются значительным разбросом  $\epsilon_r$  по частоте и температуре, что приводит к смещению полосы пропускания и ухудшению согласования. Специализированные материалы (например, RO4350B) обеспечивают стабильность  $\epsilon_r$  и малый тангенс потерь [2], что критически важно для усилителей 8–12 ГГц и других высокочастотных систем [5].

### 2. Тепловые и механические ограничения

Несоответствие коэффициента теплового расширения (КТР) между диэлектриком и металлизацией вызывает микротрещины и деградацию качества соединений. В работах по ферритовым приборам миллиметрового диапазона отмечается, что стабильность размеров подложки оказывает прямое влияние на характеристики резонансных структур [6]. Современные материалы фторопластового и керамического типов демонстрируют улучшенные тепловые параметры и меньшую склонность к влагопоглощению [3; 7].

### 3. Технологические ограничения производства

Производство СВЧ-плат на композитных и фторопластовых материалах требует особой подготовки поверхности, специализированного инструмента для сверления и контроля металлизации переходных отверстий. Как отмечено в публикации Elec.ru, отклонения технологических режимов (например, при горячем лужении) могут выступать индикатором нарушений технологического процесса [4]. Кроме того, требования к качеству поверхности для высокочастотных линий передачи значительно строже, чем в цифровых платах [8].

### 4. Риски использования аналоговых материалов

Попытки снизить стоимость через замену оригинальных высокочастотных ламинатов более дешёвыми ФАФ-композициями могут привести к непредсказуемому изменению  $\epsilon_n$  и потерь [2; 3]. Практика разработки гибридно-монолитных усилителей показывает, что даже небольшие отклонения  $D_k$  приводят к смещению резонансных частот и ухудшению параметров АЧХ [5]. Поэтому метрологическая проверка каждой партии материала является обязательным этапом перед серийным производством.

## Выбор материала

### Критерии оценки

При выборе подложки необходимо учитывать:

- точность  $\epsilon_r$  и её стабильность в диапазоне температур и частот [2; 5];
- величину  $\tan \delta$  и её влияние на потери;
- теплопроводность и КТР, влияющие на надёжность конструкции [7];
- влагопоглощение и стабильность размеров при термоциклах [3];
- совместимость с серийным производством, включая требования к лужению, сверлению и металлизации [4];

– стоимость, наличие сертификатов качества и однородность партии [8]

Практические рекомендации

Для фильтров, антенн и устройств, требующих высокой добротности, предпочтительны специализированные материалы, сочетающие низкие потери и стабильность диэлектрических параметров [2].

При необходимости высокой термостойкости и минимального влагопоглощения целесообразно применять керамические или комбинированные материалы, такие как высокоплотный корунд [7].

При проектировании миллиметровых устройств важно учитывать однородность параметров подложки по площади [6].

Для прототипирования и изготовления изделий низкой сложности, работающих в пределах  $\sim 0,1$ – $1$  ГГц допускается использование FR-4 при условии обязательного контроля параметров и подтверждения характеристик резонансных структур экспериментально [4]. Но при переходе на высокочастотные диапазоны его использование требует осторожности и проверки реальных параметров изделия

При ограниченном бюджете на серийное производство: заранее проводить метрологический контроль партий материала (измерение  $\epsilon_r$ ,  $\tan \delta$ , влагопоглощения) и выполнять верификацию на готовых образцах СВЧ-характеристик (резонансные частоты, затухание). При обнаружении несоответствий – корректировать расчёт геометрии микрополосковых линий и/или выбирать альтернативные материалы.

Заключение

Выбор подложки для СВЧ-печатных плат – многопараметрическая задача, требующая баланса между электрическими, термическими и технологическими требованиями. Универсального решения не существует: оптимальный материал определяется целями конкретной системы, частотным диапазоном, условиями эксплуатации и объёмом производства. ФАФ и специализированные СВЧ-подложки от ведущих производителей предлагают имеют высокую надёжность, но требуют адекватной технологической подготовки производства и учёта экономических факторов. В случаях применения аналогов необходим строгий контроль качества и повторная метрологическая квалификация партий материала. Соблюдение этих этапов позволит повысить надёжность и воспроизводимость характеристик СВЧ-устройств [2; 5; 7].

### Список литературы:

1. Бахарев С.И., Вольман В.И. Справочник по расчёту и конструированию СВЧ полосковых устройств / С.И. Бахарев, В.И. Вольман, Ю.Н. Либ и др.; под ред. В.И. Вольмана. – М.: Радио и связь, 1982. – 328 с.
2. Rogers Corporation. RO4000 Series Laminates – RO4350B Data Sheet. – Rogers Corporation, 2025. – 24 p. – URL: <https://rogerscorp.com/advanced-electronics-solutions/ro4000-series-laminates/ro4350b-laminates> (дата обращения: 03.10.2025).
3. Rogers Corporation. RT/duroid 5880 Laminates Data Sheet. – Rogers Corporation, 2024. – 20 p. – URL: <https://rogerscorp.com/advanced-electronics-solutions/rt-duroid-laminates/rt-duroid-5880-laminates> (дата обращения: 03.10.2025).
4. Титова Т. Процесс горячего лужения как индикатор качества производства печатных плат // Практикум для профессионалов. Elec.ru, 26.04.2023. – URL: <https://www.elec.ru/publications/praktikum-dlja-professionalov/7674/> (дата обращения: 03.10.2025).

5. Ефимов А.С., Темнов А.М., Дудинов К.В. Разработка гибридно-монокристаллической интегральной схемы усилителя диапазона 8–12 ГГц // Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника. – 2020. – № 3. – С. 34–39.
6. Семенов А.С., Налогин А.Г., Алексеев А.А. Микрополосковые ферритовые развязывающие приборы миллиметрового диапазона с улучшенными характеристиками // Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника. – 2021.
7. Анисимов А.Г., Безлепкин В.А., Мали В.И. и др. Электрофизические характеристики высокоплотной корундовой керамики, спечённой в условиях SPS // Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника. – 2023. – № 1. – С. 52–57.
8. Закирова Э.А. Исследование печатных плат с многослойными диэлектрическими подложками и разработка микрополосковых СВЧ-устройств на их основе. Диссертация. – 2020.

### References:

1. Bakharev S.I., Volman V.I. Handbook on the Calculation and Design of Microwave Stripline Devices / S.I. Bakharev, V.I. Volman, Yu.N. Lib et al.; edited by V.I. Volman. – Moscow: Radio i Svyaz, 1982. – 328 p.
2. Rogers Corporation. RO4000 Series Laminates – RO4350B Data Sheet. – Rogers Corporation, 2025. – 24 p. – URL: <https://rogerscorp.com/advanced-electronics-solutions/ro4000-series-laminates/ro4350b-laminates> (accessed: 28.11.2025).
3. Rogers Corporation. RT/duroid 5880 Laminates Data Sheet. – Rogers Corporation, 2024. – 20 p. – URL: <https://rogerscorp.com/advanced-electronics-solutions/rt-duroid-laminates/rt-duroid-5880-laminates> (accessed: 28.11.2025).
4. Titova T. The Hot Air Solder Leveling Process as an Indicator of PCB Manufacturing Quality // Practicum for Professionals. Elec.ru, 26.04.2023. – URL: <https://www.elec.ru/publications/praktikum-dlja-professionalov/7674/> (accessed: 28.11.2025).
5. Efimov A.S., Temnov A.M., Dudinov K.V. Development of a Hybrid-Monolithic Integrated Amplifier for the 8–12 GHz Band // Elektronnaya Tekhnika. Series 1: Microwave Engineering. – 2020. – No. 3. – pp. 34–39.
6. Semenov A.S., Nalagin A.G., Alekseev A.A. Microstrip Ferrite Isolating Devices for the Millimeter-Wave Range with Improved Characteristics // Elektronnaya Tekhnika. Series 1: Microwave Engineering. – 2021.
7. Anisimov A.G., Bezlepkin V.A., Mali V.I. et al. Electrophysical Properties of High-Density Alumina Ceramics Sintered under SPS Conditions // Elektronnaya Tekhnika. Series 1: Microwave Engineering. – 2023. – No. 1. – pp. 52–57.
8. Zakirova E.A. Study of Printed Circuit Boards with Multilayer Dielectric Substrates and Development of Microstrip Microwave Devices Based on Them. Dissertation. – 2020.