

УДК: 621.38

**ПОРІВНЯННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ВИГОТОВЛЕННЯ
МІКРОСМУЖКОВИХ СЕНСОРІВ: ФОТОЛІТОГРАФІЯ,
ЛАЗЕРНЕ ПРОТРАВЛЕННЯ, МЕХАНІЧНЕ ФРЕЗЕРУВАННЯ**

Чикун Р.С.

email: roman.chykun@nure.ua

Науковий керівник – доц., канд. фіз.-мат. наук. Глухов О.В
Харківський національний університет радіоелектроніки, каф. МЕЕПП
м. Харків, Україна

The paper presents a comparative analysis of fabrication technologies for microstrip sensors, including photolithography, laser ablation, and CNC milling. The influence of geometric accuracy and edge roughness on electromagnetic characteristics such as impedance, resonance frequency, and quality factor in the GHz range is investigated. It is shown that fabrication tolerances significantly affect frequency stability and losses. Photolithography provides the highest precision, while laser processing ensures flexibility for rapid prototyping.

Мікросмушкові сенсори є фундаментальним класом пристроїв для ВЧ- та НВЧ-систем. Завдяки компактності та простоті інтеграції вони широко застосовуються для безконтактного аналізу матеріалів, контролю параметрів напівпровідникових структур і біомедичних застосувань. Електродинамічні характеристики таких сенсорів істотно залежать від точності геометричних параметрів, зокрема ширини провідника, товщини металізації та властивостей підкладки. У гігагерцовому діапазоні навіть мікрометрові відхилення можуть призводити до помітних змін резонансної частоти, коефіцієнта відбиття та добротності структури.

Метою роботи є порівняльний аналіз технологій виготовлення мікросмушкових сенсорів (фотолітографії, лазерного протравлення та механічного фрезерування) та оцінка впливу точності формування провідникових структур на їх електромагнітні характеристики у гігагерцовому діапазоні.

1. Фотолітографія. Еталонний метод формування прецизійних структур. Цикл включає нанесення фоторезисту, експонування через шаблон та хімічне травлення [1].

Переваги: Висока роздільна здатність (± 10 мкм), стабільність характеристик.

Обмеження: Технологічна складність, потреба у чистих кімнатах та дорогому обладнанні.

2. Лазерне протравлення (абляція). Локальне видалення металу сфокусованим променем [1, 2].

Переваги: Гнучкість, швидка зміна дизайну без фотошаблонів, висока автоматизація.

Обмеження: Ризик мікротріщин, термічні дефекти та шорсткість країв (± 30 – 50 мкм), що підвищує втрати у ГГц-діапазоні.

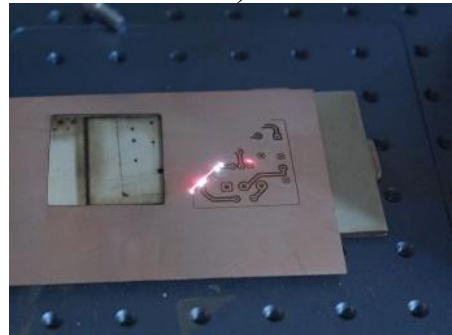
3. Механічне фрезерування (CNC). Видалення металу фрезами з програмним управлінням [1].

Переваги: Економічність, відсутність реактивів, швидкість виготовлення одиничних зразків.

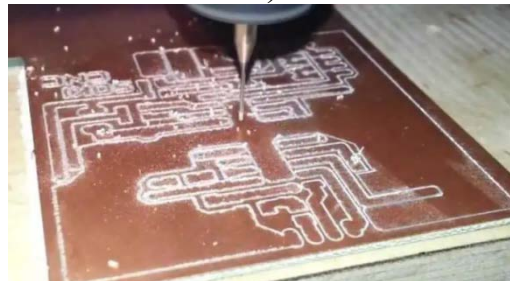
Обмеження: Точність (± 100 мкм) обмежена діаметром фрези та вібраціями; дефекти краю провокують розсіювання поля.



а)



б)



в)

Рисунок 1 – Технології виготовлення друкованих плат.

(а – фотолітографія, б – абляція, в – CNC)

Геометрична прецизійність визначає хвильовий опір (Z_0) та робочу частоту (f_r). Технологічні відхилення на рівні десятків мікрометрів призводять до порушення узгодження з трактом і викликають зсув резонансу на сотні мегагерц, що є критичним для сенсорів гігагерцового діапазону. Встановлено, що похибки геометрії у межах 50–100 мкм суттєво впливають на електродинамічні параметри структури, зумовлюючи зміну ефективної діелектричної проникності та розподілу поля.

Додатково, внаслідок скін-ефекту струм концентрується у приповерхневому шарі провідника, тому шорсткість країв призводить до збільшення ефективної довжини шляху струму та еквівалентного омичного опору. Це

супроводжується зростанням втрат і, відповідно, зниженням добротності (Q) резонансних структур. Геометричні неоднорідності також спричиняють локальні зміни хвильового опору, що викликає паразитні відбиття та впливає на фазову швидкість поширення електромагнітної хвилі [3].

Таблиця 1 – Порівняльна таблиця методів

Технологія	Точність	Вартість	Швидкість	Основне застосування	Форма доріжки
Фотолітографія	± 10 мкм	Висока	Висока	Серійне виробництво	Трапецевидна
Лазерне протравлення	$\pm 30\text{--}50$ мкм	Середня	Середня	Прототипування	Хвиляста
Механічне фрезерування	± 100 мкм	Низька	Низька	Лабораторні дослідження	Шорстка

Проведений аналіз підтвердив, що геометрична точність провідникових структур є визначальним фактором формування електромагнітних характеристик пристроїв гігагерцового діапазону. Встановлено, що технологічні похибки порядку десятків мікрометрів спричиняють помітний зсув резонансної частоти та зниження добротності, що обумовлено зростанням втрат, пов'язаних зі скін-ефектом і шорсткістю країв провідників. Порівняльний аналіз методів виготовлення показав, що фотолітографія забезпечує найвищу точність формування (до ± 10 мкм) і є оптимальною для серійного виробництва високочастотних сенсорів, тоді як лазерне протравлення доцільно використовувати на етапі прототипування як компроміс між точністю та технологічною гнучкістю. Механічне фрезерування, попри нижчу точність, може застосовуватись у лабораторних і навчальних задачах. Отримані результати доцільно враховувати при виборі технології виготовлення з урахуванням вимог до точності, вартості та функціонального призначення сенсорних структур.

Список використаних джерел:

1. Coombs C. F., Holden H. T. Printed Circuits Handbook. 7th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2016. 1568 p.
2. Lu Z., Wang M., Zhang P., Li C. Femtosecond Laser Machining of Flexible Printed Circuit Boards. Journal of Physics: Conference Series. 2022. Vol. 2185, No. 1. P. 012008.
3. Žemgulė J., Sadauskas M., Ragulis P., Trusovas R., Ratautas K., Simniškis R., Kanzleris Ž., Račiukaitis G. Effects of different manufacturing techniques on the performance of planar antennas. Scientific Reports. 2023. Vol. 13.