

УДК 621.375.029.64

Анатолій Семенюк, Любомир Смеркло, Орест Лозовий,
 Леонід Юрченко, Віктор Залізко, Микола Грозь
 Львівський науково-дослідний радіотехнічний інститут

РОЗРОБКА МАЛОГАБАРИТНИХ ПОТУЖНИХ ІМПУЛЬСНИХ ПІДСИЛЮВАЧІВ ДІАПАЗОНУ НВЧ

© Семенюк Анатолій, Смеркло Любомир, Лозовий Орест,
 Юрченко Леонід, Залізко Віктор, Грозь Микола, 2001

Розглянуто особливості розробки малогабаритних потужних імпульсних підсилювачів НВЧ діапазону. Запропоновано прогресивну технологію виготовлення мікросмужкових плат на основі підкладок із матеріалу ТММ фірми ROGERS. Розроблено структуру побудови потужного підсилювача. Наведені результати експериментальних досліджень.

The special features of elaboration of compact high-power impulse amplifier of microwave range are considered. Progressive technology for manufacturing of microband boards on the base of TMM substrates produced by ROGERS is proposed. Arrangement structure of high-power amplifier is elaborated. The results of experimental investigations are presented.

Вступ. Досягнення в розробці і серійному випуску провідними світовими фірмами потужних НВЧ транзисторів в поєднанні з мікросмужковою технологією сприяли комплексній мікромініатюризації радіопередавальних пристроїв НВЧ діапазону. Застосування таких транзисторів в кінцевих та передкінцевих каскадах, крім покращання об'ємно-вагових характеристик, підвищує коефіцієнт корисної дії, стійкість і надійність апаратури, яка працює в жорстких умовах експлуатації.

Поряд з цим сучасні високочастотні транзистори мають обмежене значення вихідної потужності. Особливо різко це обмеження проявляється в НВЧ діапазоні при роботі в режимі з малою щільністю імпульсів. З цієї причини для суттєвого збільшення вихідної потужності напівпровідникових радіопередавачів застосовуються спеціальні схеми підсумовування потужних сигналів великої кількості однотипних генераторів. Якщо врахувати необхідність забезпечення параметрів передавача в широкій смузі частот, високих експлуатаційних і технічних характеристик при мінімальних виробничих затратах, то вибір матеріалу підкладок і конструктивних рішень має вирішальне значення.

Нижче наводяться результати розробок і експериментальних досліджень малогабаритного імпульсного підсилювача двадцятисантиметрового діапазону хвиль.

Формулювання задачі. Зважаючи на технічні вимоги (діапазон частот, вихідна потужність, допустима мінімальна щільність імпульсів тощо) було вибрано біполярний транзистор фірми М/АСОМ. типу РН1516-100, який має такі основні параметри:

Вихідна потужність	100 Вт
Коефіцієнт підсилення	8 дБ
Коефіцієнт корисної дії	30 %

Конструктивно транзистор складається з двох кристалів, розміщених спільно в одному металокерамічному корпусі планарного типу. Було проаналізовано вхідних та вихідних імпедансів транзистора в необхідному діапазоні частот і режимі роботи, проведено розрахунок

та синтез на ЕОМ узгоджувальних ланок і основних характеристик каскаду підсилення [1]. Внаслідок розрахунку і корекції, після експериментальної перевірки отримані геометричні розміри елементів узгоджувальних ланок.

Враховуючи тип транзистора, порівняно широку смугу пропускання і необхідність досягнення мінімальних габаритів пристрою та необхідність підстроювання підсилювального каскаду в якості реалізації узгоджувальних ланок вибрана мікросмужкова несиметрична лінія з розподіленими параметрами, тобто підсилювальний каскад являє собою гібридно-інтегральну схему, зображену на рис. 1.

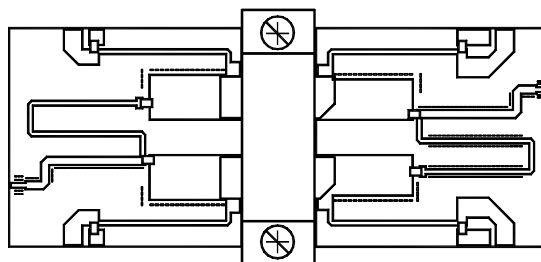


Рис. 1. Топологія підсилювального каскаду

Вибір матеріалу для мікросмужкових підкладок. Конструктивною основою гібридно-інтегральної схеми є діелектрична підкладка, властивості матеріалу якої суттєво впливають на параметри підсилювача. На підкладці, яка виконує роль високочастотного ізолятора і фактично визначає геометричні розміри підсилювача, розміщується вся сукупність мікросмужкових ліній та узгоджувальних елементів, провідників, мініатюрних безкорпусних радіоелементів та ланок живлення. Враховуючи важливість проблеми, розглянемо детальніше вибір матеріалу підкладки, зосередившись на основних параметрах, які її характеризують.

Діелектрична проникність ϵ_r . Здебільшого найкраще підходить величина ϵ_r в межах від 8 до 15. Бажано вибрати максимальне значення, що забезпечує зменшення розмірів узгоджувальних ланок.

Тангенс кута діелектричних втрат $tg\delta$, який визначає значення послаблення сигналу за рахунок підкладки, бажано мати мінімальний.

Товщина підкладки h . При збільшенні h втрати зменшуються, але зростають пропорційно геометричний та тепловий опір R_T . Тому величину h вибирають на основі компромісу між цими факторами, вибравши мінімальну товщину при допустимих втратах.

Коефіцієнт теплопровідності K_T , Вт/м·К, значення якого пов'язане такою залежністю з тепловим опором:

$$R_T = h / K_T \cdot b, \quad (1)$$

де h – товщина підкладки, b – ширина та довжина елементарної площадки.

Підкладка повинна бути механічно міцною, що дуже важливо при великих перепадах температури між корпусом транзистора і основою, мінімально пористою і допускати механічну обробку.

Враховуючи перелічені вимоги, діелектричною підкладкою можна використовувати матеріали, які наведені в табл. 1.

По сукупності перерахованих вимог в якості діелектричної підкладки для реалізації узгоджувальних ланок гібридно-інтегрального підсилювального каскаду було вибрано два альтернативних матеріали: полікор (оксид алюмінію 99,5 % Al_2O_3) вітчизняного виробництва та термостабілізований матеріал ТММ10і фірми ROGERS. Враховуючи низькі

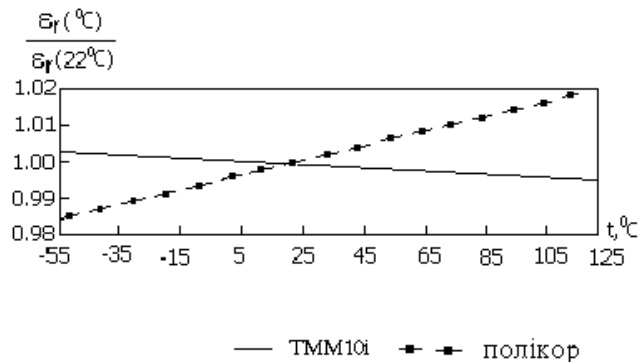
вхідні та вихідні імпеданси транзистора PH1516-100 (порядку одиниць Ом) і необхідність узгодження їх за допомогою трансформуючих відрізків у хвильовий опір 50 Ом, останні можуть мати відносну ширину порядку 12h, тому ширина мікросмужкової плати і підсилювального каскаду практично визначається товщиною підкладки h. Було реалізовано гібридно-інтегральний підсилювач на полікорових підкладках завтовшки 0,5 і 1 мм, а також на матеріалі ТММ10і завтовшки 0,635мм. Габаритні індекси підсилювальних каскадів на полікорі завтовшки 0,5 мм та на ТММ10і виявились практично однакові за рахунок майже однакової відносної діелектричної проникливості (ТММ10і - $\epsilon_r=10,2$, полікор - $\epsilon_r=9,8$), а на полікорі завтовшки 1 мм габаритний індекс на 50 % більший. Але проведені кліматичні випробовування на термостійкість в діапазоні температур мінус 50...+50 °С призвели до механічних пошкоджень мікроплат завтовшки 0,5 мм, що було спричинено механічними напруженнями через значний перепад температур між корпусом потужного транзистора і підкладкою.

Таблиця 1

Матеріали для використання діелектричною підкладкою

Матеріали	Діелектрична проникність, ϵ_r	Тангенс кута втрат tg на $f=10\text{ГГц}$	Коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К)
Полікор 99,5% Al_2O_3	9,5 – 10	$(1-3)\cdot 10^{-4}$	25
Сапфір	9,3 – 11,7	$1\cdot 10^{-4}$	40
Ситал СТ-38-1	7,2 – 7,4	$5\cdot 10^{-4}$	14
RT/duroid 6010M	$10,2 \pm 0,25$	0,0023	0,41
ТММ10	$9,2 \pm 0,23$	0,0023	0,73
ТММ10і	$9,8 \pm 0,25$	0,0020	0,75
RT/duroid 6002	$2,94 \pm 0,04$	0,0012	0,44
ТММ03	$3,27 \pm 0,016$	0,0020	0,68
ФАФ4	$2,6 \pm 0,2$	0,001	0,21

Другою перевагою на користь вибору матеріалу ТММ є термостабільність діелектричної проникливості ϵ_r . Річ у тому, що при підсумовуванні вихідних потужностей великої кількості транзисторів в широкій смузі робочих частот необхідно забезпечити стабільні фазочастотні і амплітудночастотні характеристики ланок узгодження, вплив зміни ϵ_r на які є визначальним. На рис. 2 показано відносну залежність ϵ_r від температури для полікору і ТММ10і.

Рис. 2. Температурна залежність ϵ_r

Важливою проблемою виготовлення НВЧ пристроїв є вартість. Традиційно гібридно-інтегральні НВЧ схеми виготовлялись методом тонкоплівкової технології на полікорі, яка вимагала обладнання вакуумного напилення, застосування великої номенклатури матеріалів, що суттєво підвищувало трудоємність їх виготовлення.

Матеріал ТММ10і постачається вже з нанесеним щільним мідним провідниковим шаром і технологія вакуумного напилення не використовується. У табл. 2 наведено порівняльні витрати на виготовлення пристроїв із полікору та ТММ на фірмах Litton Corporation, Applied Technology Division [2].

Таблиця 2

Порівняльні витрати

	Полікор	ТММ10
Металізація \$/дюйм ²	15	0,86
Механічна обробка \$/дюйм ²	12	0,80
Травлення \$/дюйм ²	8	1,2
Сумарно \$/дюйм ²	35	2,86

Перевага матеріалу ТММ очевидна.

Характерною особливістю матеріалу ТММ є значна товщина мідної металізації – 17,5мкм. Відпрацьовані на цей час тонкоплівкові фотолітографічні процеси передбачають обробку шару міді до 5мкм. При більшій товщині отримуються значні підтрави мікро-смушкових елементів НВЧ мікроплат, що погіршує їх технічні характеристики.

У зв'язку з цим, розроблений і впроваджений новий технологічний процес виготовлення НВЧ мікроплат за допомогою подвійної фотолітографії. При цьому, як захисний рельєф при травленні використовується окрім фоторезисту також металевий (срібний) шар.

Основними із багатьох операцій запропонованого технологічного процесу є:

- виготовлення на мідній фользі матеріалу ТММ фоторезистивної маски за допомогою позитивного фотошаблону, відкоректованого з врахуванням значення підтравлення;
- травлення мідної фольги до товщини 5...10 мкм;
- виготовлення фоторезистивної маски за допомогою негативного фотошаблону з максимально можливим суміщенням рисунку схеми;
- гальванічне осадження срібла (краще з підшаром гальванічної міді) завтовшки 2...3 мкм;
- дотравлення мідної фольги до поверхні підкладки.

Виготовлені зразки НВЧ мікросмушкових плат на матеріалі ТММ дозволили значно покращити технічні характеристики потужних імпульсних підсилювачів діапазону НВЧ, підвищити надійність і технологічність, зменшити габаритно-вагові показники в 1,5 – 2 рази, розширити сферу їх застосування.

Реалізація потужного імпульсного підсилювача. Для забезпечення вихідної потужності 400 Вт в імпульсі було використано підсумовування чотирьох підсилювальних каскадів, розглянутих вище. Функціональна схема потужного підсилювача зображена на рис. 3 і складається з попереднього каскаду, чотириканального подільника, чотирьох однотипних підсилювальних каскадів та чотириканального суматора.

З метою мінімізації габаритів було вибрано суматор (подільник) синфазного типу. Для зсуву фаз на 90° між каскадами використовуються чвертьхвильові відрізки між плечами суматора і подільника в протилежних виходах відповідно [3]. Реалізація подібного суматора

несиметричною полосковою лінією на полікорі виявила низьку стійкість підсилювача, спричинену низькою просторовою розв'язкою вхідних та вихідних ланок підсилювача. Тому було розроблено і реалізовано суматор і подільник на матеріалі ТММ03 завтовшки 0,635 мм в симетричному виконанні. Застосування матеріалу з відповідно низьким $\epsilon_r=3,27$ зумовлено необхідністю збільшення ширини полоскових ліній суматора. Топологія суматора показана на рис. 4. Як баластні використані резистори типу RFP-30-100R. Альтернативний вітчизняний матеріал ФАФ4 не забезпечує необхідної фазочастотної термостабільності ліній через низьку стабільність ϵ_r .

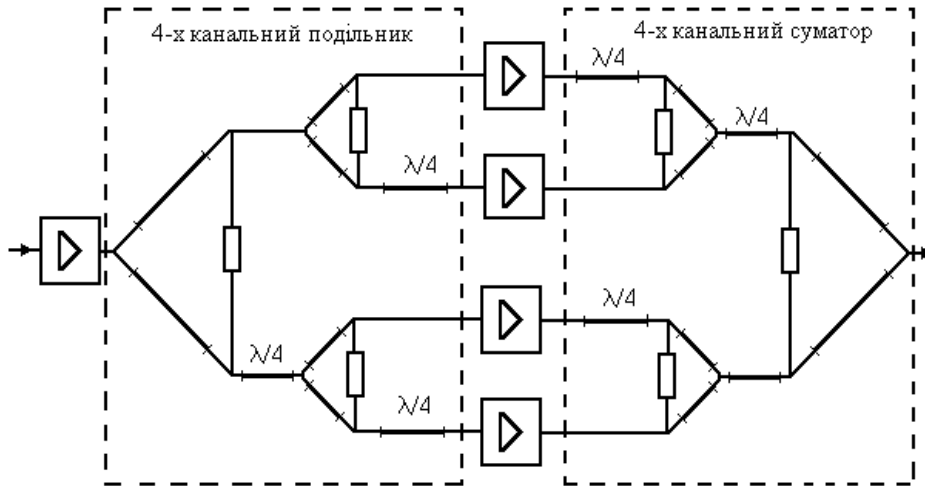


Рис. 3. Функціональна схема потужного підсилювача

Конструктивно підсилювач (рис.5) реалізовано в герметичному корпусі із матеріалу Д16Б, розмірами 206x124x60 мм.

Вхід і вихід НВЧ сигналу здійснено через герметичні переходи типу СРГ-50-751ФВ, а напруги живлення через металоскляні прохідні ізолятори. Для забезпечення теплового режиму транзисторів, вони встановлені так, що надлишкова тепла енергія з них передається на нижню кришку корпусу, зовнішня поверхня якої ребриста і служить радіатором. Вся НВЧ частина (транзистори, мікроплати, суматори) розміщена в одній площині верхньої частини корпусу, а схема керування, зміщення і ланки живлення підсилювача – в нижній частині.

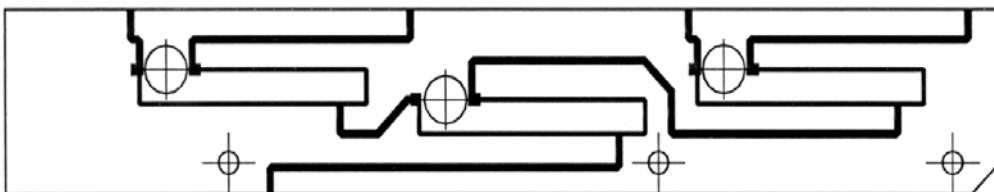


Рис. 4. Топологія суматора

Експериментальні дослідження підсилювача показали такі параметри:

Діапазон робочих частот	20 см
Робоча смуга частот	8 %
Вихідна імпульсна потужність в НУ	400 Вт
Вихідна імпульсна потужність в діапазоні температур мінус 50...+50 °С	320 Вт
Тривалість імпульсів	16 мкс
Частота повторення	16 кГц
Вхідна потужність	20 Вт

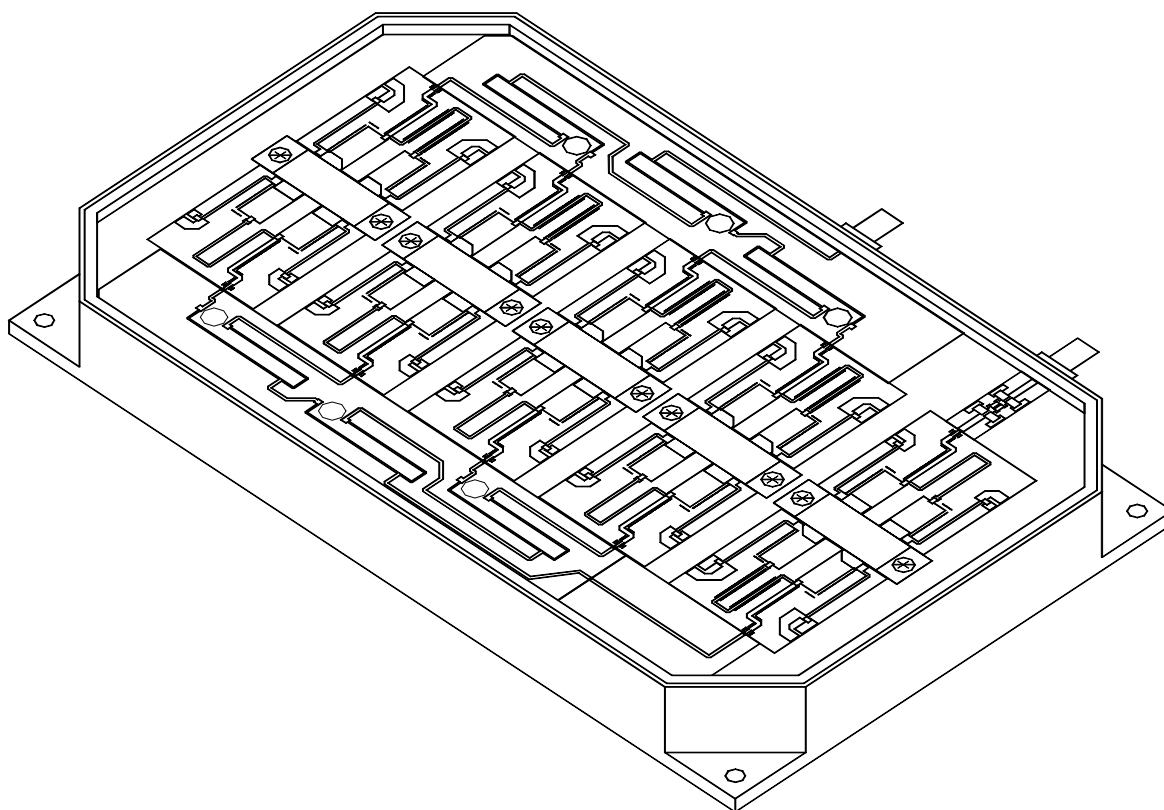


Рис. 5. Загальний вигляд підсилювача

Висновки. 1. Застосувати підсумовування сигналів транзисторів в поєднанні з мікросмужковою технологією сприяли комплексній мікромініатюризації передавальних пристроїв НВЧ діапазону і дозволили створити потужний мініатюрний підсилювач, здатний працювати в жорстких умовах експлуатації.

2. Використання мікросмужкових плат НВЧ на матеріалі ТММ дозволило значно покращити технічні характеристики потужних підсилювачів, підвищити надійність і технологічність, зменшити габаритно-вагові показники і вартість виготовлення пристроїв НВЧ. Запропоновані технологічні процеси можуть значно розширити сферу їх застосування.

1. Пакет прикладних програм синтезу, моделювання і підготовки до проектування типових вузлів РЕА // ПРАМ 4.9/ОС.И2.00035–01.31–01, 1985р. 2. Me Kleroy, Chris, “Low Gost Microwave Package” // Wireless Technology” 96 Conferene Proccedings, October 7–11, 1996. 3. Каганов В.И. Транзистрные радиопередатчики. Изд.2-М. М., “Энергия”, 1976. С.355–370.