



УКРАЇНА

(19) UA

(11) 97883

(13) U

(51) МПК

H03K 3/26 (2006.01)

H03K 3/38 (2006.01)

H03K 5/1252 (2006.01)

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: **u 2014 11051**

(22) Дата подання заявки: **09.10.2014**

(24) Дата, з якої є чинними
права на корисну
модель: **10.04.2015**

(46) Публікація відомостей
про видачу патенту: **10.04.2015, Бюл.№ 7**

(72) Винахідник(и):

**Калабухова Катерина Миколаївна (UA),
Сітніков Олександр Олександрович (UA),
Олійник Віктор Валентинович (UA),
Колесніченко Михайло Васильович (UA)**

(73) Власник(и):

**ІНСТИТУТ ФІЗИКИ НАПІВПРОВІДНИКІВ
ІМ. В.Є. ЛАШКАРЬОВА НАЦІОНАЛЬНОЇ
АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ,
пр. Науки, 41, м. Київ, 03680 (UA)**

(54) ПЕРЕДАВАЛЬНИЙ МОДУЛЬ МІКРОХВИЛЬОВОГО МОСТУ ДЛЯ ІМПУЛЬСНОГО КОГЕРЕНТНОГО СПЕКТРОМЕТРА ЕЛЕКТРОННОГО ПАРАМАГНІТНОГО РЕЗОНАНСУ 8-МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ ДОВЖИН ХВИЛЬ З ГЕНЕРАТОРОМ НА БІПОЛЯРНОМУ ТРАНЗИСТОРІ

(57) Реферат:

Передавальний модуль мікрохвильового мосту для генерації надвисокочастотних (НВЧ) імпульсів у складі імпульсних когерентних спектрометрів ЕПР 8-міліметрового діапазону довжин хвиль містить задавальний генератор, два дискретних фазообертачі з дискретністю 90° та 180°, вентиля, двох високошвидкісних амплітудних PIN модуляторів, двокаскадного імпульсного підсилювача на основі кремнієвих лавино-пролітних діодів, амплітудного детектора та атенюатора. Як задавальний генератор встановлено генератор на біполярному транзисторі, який складається з кварцового генератора, синтезатора з фазовим автопідстроюванням частоти (ФАПЧ), генератора, що керують напругою на біполярному транзисторі та помножувача частоти.

UA 97883 U

Корисна модель належить до техніки високочастотної спектроскопії і може бути використана як передавальний модуль мікрохвильового мосту, що генерує та детектує надвисокочастотну (НВЧ) потужність в імпульсних спектрометрах електронного парамагнітного резонансу (ЕПР).

Мікрохвильовий міст є невід'ємною частиною спектрометра ЕПР [див. Пул Ч. Техника ЭПР-спектроскопии", Изд-во "Мир", 1970, - С. 131-205], який складається з передавального та приймального модулів, що генерує та детектує НВЧ потужність у мікрохвильовому тракці спектрометра ЕПР. Принцип дії імпульсного мікрохвильового мосту засновано на генерації серії короткочасних мікрохвильових імпульсів, енергія яких поглинається парамагнітною речовиною в умовах ЕПР, та реєстрації сигналу відгуку спінової системи парамагнітної речовини на імпульсне збудження. Цей сигнал має назву сигналу електронної спінової луни (ЕСЛ) - відповідь електронної спин системи на імпульсне збудження.

Враховуючи той факт, що головними характеристиками, які визначають рівень якості імпульсного спектрометра ЕПР, є його імпульсні характеристики та чутливість, основною проблемою при створенні імпульсних спектрометрів Q-діапазону частот залишається вибір конструкції мікрохвильового мосту, зокрема конструкції передавального модуля, у якому формуються НВЧ імпульси.

Загальний принцип побудови передавального модуля імпульсного мікрохвильового мосту реалізується за наступною схемою: задавальний генератор, фазообертач, амплітудний модулятор, підсилювач НВЧ потужності, амплітудний детектор та атенуатор вихідної потужності підсилювача.

Задавальний генератор працює у неперервному режимі. Амплітудний модулятор формує з НВЧ коливань задавального генератора імпульси, які потім потрапляють на підсилювач НВЧ потужності.

Задавальний генератор є одним із важливих компонент передавального модуля мікрохвильового мосту, який визначає шумові характеристики і тим самим, чутливість спектрометра ЕПР.

Взагалі сумарні шуми у спектрометрі ЕПР виникають від чотирьох незалежних джерел. Це температурні шуми на навантаженні, шуми у приймальному модулі при детектуванні сигналу ЕПР; шуми мікрохвильового джерела та шуми резонатора.

Тому поліпшення чутливості спектрометра ЕПР вище середнього рівня вимагає перш за все зниження коефіцієнту шуму як задавального генератора у передавальному модулі, так і приймального модуля мікрохвильового мосту спектрометра ЕПР (див. J.S. Hyde, M.E. Newton, R.A. Strangeway, Th.G. Camenisch, W.Fronczisz// Electron paramagnetic resonance Q-band bridge with GaAs field effect transistor signal amplifier and low noise Gunn diode oscillator// Review of Scientific Instruments 62, 2969, 1991).

Відомо, що шуми мікрохвильового генератора складаються з амплітудних та фазово-частотних флуктуацій. Амплітудні шуми генератора можна успішно подолати шляхом відповідного вибору схеми детектування у приймальному модулі. Так, наприклад, використання опорного плеча у НВЧ тракці, критичного зв'язку з резонатором та балансного змішувача у схемі приймального модуля може у значній мірі знизити амплітудні шуми. Фазово-частотні шуми генератора є більш важливими і стають основною проблемою, коли спектрометр настраюється на реєстрацію сигналу дисперсії, як це відбувається при детектуванні сигналу електронної спінової луни (ЕСЛ). У цьому випадку спектрометр є чутливим до зсуву частоти резонатора і, як результат, є чутливим також до зсуву частоти та фази генератора.

У спектрометрах ЕПР, що випускаються комерційно, використовуються два типи мікрохвильових генераторів. Це клістри та діоди Ганна. Але сам діод Ганна є достатньо шумливим. Його шуми складають близько 25 дБ. Крім того, фазові шуми у генераторів на основі діодів Ганна у мм діапазоні частот (Q-діапазон) складають на 10 дБ більше, ніж у см діапазоні частот (X-діапазон) (див. Давыдова Н.С., Данюшевский Ю.З. Диодные генераторы и усилители СВЧ. - М.: Радио и связь. 1986. - С. 184; S.S. Eaton, G.R. Eaton, L. Berliner// Biomedical EPR-Part B: Methodology, Instrumentation, and Dynamics. J.S. Hyde Trends in EPR technology, Biological Magnetic Resonance, Springer Science, - С. 415, - 2005).

Перевагою діодів Ганна є висока мікрохвильова потужність та низькі напруги живлення. Однак, фазові шуми цих генераторів у 10 разів більше, ніж у клістронів, що робить їх менш придатними для імпульсних спектрометрів ЕПР, у яких реєструється сигнал дисперсії. В той же час фазові шуми діодних генераторів можуть бути суттєво знижені при включенні до їх НВЧ схеми високочастотних резонансних вузлів, зокрема високочастотних діелектричних резонаторів. В цьому випадку величина фазово-частотних шумів діодів Ганна на GaAs, виготовлених на ДП НДІ "Оріон" (Україна), "Світлана" (Росія) у діапазоні частот 33-36 ГГц, досягала -105 дБн/Гц при відстроюванні на 10 кГц (див. Л.В. Касаткин, В.Е. Чайка//

Полупроводниковые устройства диапазона миллиметровых волн. Севастополь: Вебер, 2006. 319 с). Отриманий рівень фазових шумів може бути порівняний з величиною - 103 дБн/Гц, що надається у специфікації клістрона на спектрометрі Q-діапазону частот фірми Varian, яка на 4 дБ більше, ніж у інших наведених специфікаціях клістрона у літературі, що складає величини від -70 до -115 дБн/Гц (див. D.T. Teaney, M.P. Klein, A.M. Portis Microwave Superheterodyne Induction Spectrometer// Review of Scientific Instruments 32, 721-729, 1961).

З іншого боку інформація, яка є в літературі, свідчить про те, що для клістронів частотна стабільність $\Delta\nu/\nu$ складає 10^{-8} - 10^{-10} (при ширині смуги 1 Гц). Таку відносно високу стабільність частоти для клістрона можна досягти, якщо він має зовнішню стабілізацію, яка здійснюється шляхом автоматичного підстроювання частоти (АПЧ) клістрону на частоту резонатора. Такий метод може бути використаний тільки у випадку реєстрації сигналу поглинання, тому що у цьому випадку частота відхилення корегується АПЧ. В той же час це приводить до того, що дисперсійна частина сигналу знищується. Для вимірювання сигналу дисперсії задавальний генератор повинен бути стабілізований зовнішнім стабільним еталонним генератором. Найчастіше таким генератором служить кварцовий генератор. Для стабілізації частоти задавального генератора також використовуються зовнішні резонатори. Але у цьому випадку робочий та еталонний резонатори повинні бути ідентичними за мікрохвильовими характеристиками протягом усього періоду вимірювання сигналів ЕПР. Виконати такі умови на практиці дуже важко. Вирішити цю проблему можна за рахунок використання двомодового резонатора. Другий успішний підхід до знищення фазових шумів при вимірюванні сигналу дисперсії - це використання щілинного резонатора. У цьому випадку комбінація резонатора з низькою добротністю (Q-фактором) та високим значенням мікрохвильового магнітного поля у місті знаходження зразка приводить до поліпшення співвідношення сигнал/шум.

Однак, треба зауважити, що для ЕПР спектроскопії дефектів у напівпровідникових матеріалах потрібні низькі температури, що накладає обмеження на конструкції мікрохвильових резонаторів, і тому вони не можуть бути використані за криогенних температур.

Альтернативним рішенням цієї проблеми може бути використання мікрохвильових синтезаторів, у яких мікрохвильова потужність безпосередньо генерується високостабільним кварцовим генератором. У цьому випадку зниження фазових шумів мікрохвильового генератора дозволяє покращити чутливість спектрометра навіть при використанні звичайних циліндричних резонаторів. Але незважаючи на те, що синтезатори випускаються комерційними фірмами, їх використання у магнітному резонансі є дуже обмеженим (див. K.A. Robinson, Rev. Sci. Instrum. 60, 392, 1989; J.L. Hall R.T. Schumacher, Phys. Rev. 127, 1892, 1962), і вони не розглядаються при конструюванні стандартних спектрометрів ЕПР, що працюють у неперервному режимі. У той же час перевагою такого підходу є те, що непотрібно використовувати зовнішню стабілізацію частоти генератора, що робить конструкцію спектрометра значно простішою і результуюча короткочасна стабільність частоти становиться значно краще ($\Delta\nu/\nu \approx 1 \times 10^{-12}$ для смуги припущення 1 Гц).

В імпульсних спектрометрах ЕПР до цього часу як опорні генератори використовувались лише твердотільні НВЧ автогенератори на діодах Ганна, а підсилювачами НВЧ потужності обиралися підсилювачі на лампі біжучої хвилі (ЛБХ), див. I. Gromov, J. Shane, J. Forrer, R. Rakhmatoullin, Yu. Rozentzweig, A. Schweiger, "A Q-band Pulse EPR/RNDOR Spectrometer and the Implementation of Advanced One-and Two-Dimensional Pulse EPR Methodology", J. Magn. Reson. vol. 149, pp. 196-203, 2001; C.E. Davoust, P.E. Doan, B.M. Hoffman, Q-band Pulsed Electron Spin-Echo Spectrometer and Its Application to ENDOR and ESEEM", J. Magn. Reson. A, vol. 119, pp. 38-44, 1996), або на основі кремнієвих (Si) лавинно-пролітних діодів (ЛПД) - (див. Л.В. Касаткин "Твердотельные импульсные генераторы на лавино-пролетных диодах миллиметрового диапазона длин волн" Электронная техника, сер. СВЧ техника № 2 (468), сс. 41-47, 1998; М.Г. Ищенко, Л.В. Касаткин, В.М. Тарасюк, А.В. Цвир, Р.М. Рахматулин, Ю.К. Розенцвайг, "Импульсный когерентный полупроводниковый генератор для спектрометра электронного спинового эха миллиметрового диапазона волн" Радиоэлектроника № 8, сс. 50-55, 2000).

Відома конструкція передавального модулю мікрохвильового мосту, обрана нами за прототип (див. Калабухова К.М., Сітніков О.О. Цвир А.В., Іщенко М.Г., Олійник В.В. Деклараційний патент на корисну модель UA № 58891 "Передавальний модуль мікрохвильового мосту для імпульсного когерентного спектрометра електронного парамагнітного резонансу 8-міліметрового діапазону довжин хвиль// опублік. 26.04.2011, Бюл. "Промислова Власність" № 8) побудована на основі високопотужного твердотільного імпульсного підсилювача. Вона складається із задавального генератора на діоді Ганна, двох дискретних фазообертачів з дискретністю 180° та 90°, вентилів, двох високошвидкісних амплітудних PIN модуляторів, двокаскадного імпульсного підсилювача на основі кремнієвих

ЛПД, амплітудного детектора та атенюатора. Така конструкція передавального модуля забезпечує потужність у імпульсі до 20 Вт при часовому розв'язанні $\Delta t = 10^{-8}$ сек.

Істотним недоліком цієї схеми є те, що використання задавального генератора на діоді Ганна не дозволяє досягнути максимальної чутливості імпульсного спектрометра ЕПР при реєстрації сигналів дисперсії (електронної спінової луни) за рахунок недостатнього рівня придушення фазових шумів у генераторі Ганна, які визначають частотну та фазову стабільність генератора та складають у діапазоні частот 33-36 ГГц значення не більш ніж -70 дБн/Гц при відстроюванні на 10 кГц (див. В.Н. Иванов, В.М. Ковтонюк, Н.С. Раевская// Разработка конструкции и технологии изготовления диодов Ганна для СВЧ терапии// Интегральные схемы полупроводниковые приборы № 3, с. 55-57, 2004; див., наприклад, продукцію фірми Agilent Technologies, www.agilent.com/semiconductors, Series HLNA Low Noise Amplifiers, www.hxi.com).

В основу корисної моделі поставлена задача створення такої конструкції передавального модуля мікрохвильового мосту, яка дозволить при збереженні надійності та невисокої вартості підвищити частотну та фазову стабільність, а тим самим чутливість імпульсного спектрометра ЕПР при реєстрації сигналів ЕСЛ.

Поставлена задача вирішується тим, що в передавальному модулі мікрохвильового мосту, призначеного для генерації надвисокочастотних (НВЧ) імпульсів у складі імпульсних когерентних спектрометрів ЕПР 8-міліметрового діапазону довжин хвиль, який складається з задавального генератора, двох дискретних фазообертачів з дискретністю 90° та 180° , вентилів, двох високошвидкісних амплітудних PIN модуляторів, двокаскадного імпульсного підсилювача на основі кремнієвих лавино-пролітних діодів, амплітудного детектору та атенюатора, як задавальний генератор встановлено генератор на біполярному транзисторі, який складається з кварцового генератора, синтезатора з фазовим автопідстроюванням частоти (ФАПЧ), генератора, що керується напругою на біполярному транзисторі та помножувача частоти.

Використання запропонованого нами задавального генератора на основі біполярного транзистора має наступні переваги: більш висока стабільність частоти за рахунок її стабілізації зовнішнім стабільним кварцовим генератором, значно менші фазово-частотні шуми генератора на біполярному транзисторі, ніж у генераторів на діоді Ганна, більший ККД, більш висока надійність та термін служби.

Суть корисної моделі пояснює креслення.

На кресленні представлено схему передавального модуля імпульсного мікрохвильового мосту. Вона складається із задавального генератора на біполярному транзисторі, який складається з опорного (кварцового) генератора (1), синтезатора з фазовим автопідстроюванням частоти (ФАПЧ) (2), що містить у собі фазовий чутливий детектор (ФД) та два підсилювача частоти з коефіцієнтом поділу R і N, фільтра нижніх частот (ФНЧ) (3), генератора, що керується напругою (ГКН) на біполярному транзисторі з мікроконтролером (4), помножувача частоти (5), резистивного атенюатора (6), попереднього підсилювача (7), вентиля (8). Далі до схеми передавального модуля входять два дискретних фазообертача (9, 11), зібраних на циркуляторах (10), вентилях (8), два високошвидкісних амплітудних PIN модулятора (12), що керуються ТТЛ імпульсами, потужний двокаскадний імпульсний підсилювач (13), амплітудний детектор (14) для контролю послідовності мікрохвильових імпульсів на виході підсилювача та атенюатор (6) для регулювання потужності на виході двокаскадного підсилювача. Двокаскадний імпульсний підсилювач зібрано на двох каскадах двопротітних Si ЛПД.

Характеристики спектральної чистоти (фазові шуми) задавального генератора визначаються всіма трьома елементами схеми задавального генератора. У безпосередній близькості до несучої частоти в межах смуги пропускання ФАПЧ, фазові шуми сигналу дорівнюють сумі фазових шумів кварцового генератора та синтезатора частоти, а за межами смуги пропускання петлі ФАПЧ, фазовими шумам ГКН.

Як приклад, виготовлений авторами, згідно із запропованою корисною моделлю, задавальний генератор на біполярному транзисторі для передавального модуля мікрохвильового мосту імпульсного когерентного спектрометра електронного парамагнітного резонансу 8-міліметрового діапазону довжин хвиль має наступні технічні характеристики:

1. Робоча частота біполярного транзистора 8,75 ГГц.
2. Робоча частота на виході помножувача частоти 35 ГГц.
3. Вихідна потужність 70 мВт.
4. Частота кварцового генератора 100 МГц.
5. Рівень фазових шумів задавального генератора при відстроюванні на 10 кГц ≤ 110 дБн/Гц.

Задавальный генератор на біполярному транзисторі працює наступним чином. Сигнал з кварцового генератора поступає через опорний поділювач частоти R на ФД. У ФД частота, яка

потрапляє з виходу поділювача N у ланцюгу зворотного зв'язку $F_N = F_{\text{вих}}/N$, порівнюється з поділеною частотою кварцового генератора (КГ) $P_{\text{ФЧД}} = F_{\text{КГ}}/R$. Імпульси вихідного струму ФД інтегруються та, за допомогою генератора підкачування заряду, перетворюється у напругу. Інтегруючий фільтр ФНЧ перетворює імпульсний сигнал ФД у постійну напругу, яка змінюється та подається на контролюючий варикап генератора, що керується напругою (ГКН). Це дозволяє змінювати частоту так, щоб мінімізувати різницю фаз між імпульсами, які порівнюються. Зменшуючи чи збільшуючи вихідну частоту, можна привести середнє значення виходу ФД до нуля. Вхідний поділювач R зменшує частоту опорного генератора до частоти ФЧД $E_{\text{ФЧД}} = F_{\text{КГ}}/R$. Лічильник зворотного зв'язку зменшує вихідну частоту у N раз для порівняння з частотою ФД $F_{\text{ФЧД}}$. В результаті у положенні рівноваги дві частоти дорівнюють одна однієї та вихідна частота порівнює:

$$F_{\text{ГКН}} = NF_{\text{ФЧД}}.$$

Далі сигнал потрапляє до помножувача частоти, у якому вихідна частота задавального генератора збільшується у 4 рази, і сигнал з частотою 35 Гц через атенюатор, попередній підсилювач та вентиля подається на дискретний фазообертач передавального модуля імпульсного мікрохвильового мосту. Після фазообертачів сигнал через два амплітудних PIN модулятори подається до високопотужного двокаскадного імпульсного підсилювача. Кількість, тривалість та частота повторювання задавальних імпульсів задається імпульсним контролером. Контроль вихідної потужності імпульсного підсилювача здійснюється за допомогою амплітудного детектора, розташованого на виході підсилювача. Послаблення вихідної потужності передавального модуля здійснюється за допомогою атенюатора з глибиною модуляції 40 дБ, який розміщено після імпульсного підсилювача.

Як кварцовий генератор було вибрано термостабілізований кварцовий генератор ОХО100-1-349 фірми Synergy Microwave Corporation з вихідною частотою 100 МГц.

Відносна нестабільність частоти $\Delta f/f$ кварцового генератора

короткочасна ($< 1 \text{ сек}$) $\leq 1 \cdot 10^{-10}$

середньочасна ($< 1 \text{ години}$) $\leq 1 \cdot 10^{-8}$

довготривала $\leq 1 \cdot 10^{-6}$

Синтезатор з фазовим авто підстроюванням частоти було розроблено на основі ІМС ADF4110 фірми Analog Devices.

Рівень фазових шумів синтезатору при відстроюванні

на 100 Гц $\leq -60 \text{ дБн/Гц}$

на кГц $\leq -75 \text{ дБн/Гц}$

на 10 кГц $\leq -85 \text{ дБн/Гц}$

на 100 кГц $\leq -110 \text{ дБн/Гц}$.

Генератор, що керується напругою (ГКН), було розроблено на основі МІС GaAs InGaP біполярного гетеротранзистору типу HMC734LP5/734LP5 (Е) фірми Hittite. МІС HMC734LP5/734LP5 (Е), що включає до себе резонатор, пристрій з негативним опором, варакторний діод та функції поділювача частоти на 4 вихідні потужності. Вихідна потужність дорівнює +18 дБм при напрузі живлення +5В.

Фазові шуми ГКН складають при відстроюванні на 100 кГц $< -110 \text{ дБн/Гц}$.

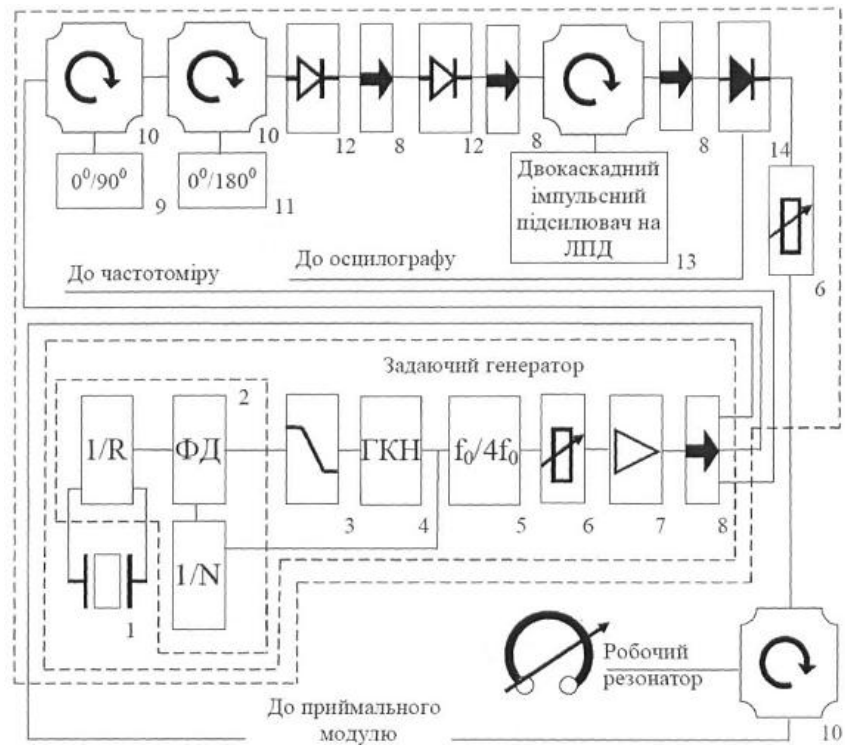
Таким чином, наведена конструкція передавального модуля мікрохвильового мосту завдяки встановленню запропонованого нами задавального генератора на біполярному транзисторі замість генератора на діоді Ганна дозволяє знизити фазово-частотні шуми передавального модуля, збільшити ККД, підвищити надійність та термін служби передавального модуля імпульсного мікрохвильового мосту, призначеного для спектрометрів ЕСЛ.

Перевагою передавального модуля імпульсного мікрохвильового мосту 8 мм діапазону довжин хвиль із запропонованим нами задавальним генератором на біполярному транзисторі є більш висока фазова та частотна стабільність, а тим самим більш висока чутливість імпульсного спектрометра ЕПР при реєстрації сигналів ЕСЛ.

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

Передавальний модуль мікрохвильового мосту для генерації надвисокочастотних (НВЧ) імпульсів у складі імпульсних когерентних спектрометрів ЕПР 8-міліметрового діапазону довжин хвиль, який містить задавальний генератор, два дискретних фазообертачі з дискретністю 90° та 180° , вентиля, двох високошвидкісних амплітудних PIN модуляторів, двокаскадного імпульсного підсилювача на основі кремнієвих лавино-пролітних діодів, амплітудного детектора та атенюатора, який **відрізняється** тим, що як задавальний генератор встановлено генератор на біполярному транзисторі, який складається з кварцового генератора, синтезатора з фазовим

автопідстроюванням частоти (ФАПЧ), генератора, що керують напругою на біполярному транзисторі та помножувача частоти.



Комп'ютерна верстка Л. Бурлак

Державна служба інтелектуальної власності України, вул. Василя Липківського, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

ДП "Український інститут промислової власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601