



УКРАЇНА

(19) UA (11) 89882 (13) C2

(51) МПК (2009)

H01J 25/00

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІОПИС  
ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

(54) КОАКСІАЛЬНИЙ ОРОТРОН

1

2

(21) а200808394

(22) 23.06.2008

(24) 10.03.2010

(46) 10.03.2010, Бюл.№ 5, 2010 р.

(72) ЄРЬОМКА ВІКТОР ДАНИЛОВИЧ, КУРАЄВ  
ОЛЕКСАНДР ОЛЕКСАНДРОВИЧ, ВУ, СІНІЦІН  
АНАТОЛІЙ КОСТЯНТИНОВИЧ, ВУ(73) ІНСТИТУТ РАДІОФІЗИКИ ТА ЕЛЕКТРОНІКИ  
ІМ. О.Я.УСИКОВА НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НА-  
УК УКРАЇНИ

(56) SU 472598, H01J 23/24, 10.08.1976

SU 347834, H01J 25/08, 04.10.1972

SU 693884, H01J 25/00, 10.08.1981

SU 1612846 A1, H01J 25/00, 23.07.1992

UA 55721 A, H01J 25/00, 15.04.2003

JP 64-027142, H01J 25/00, 30.01.1989

JP 04-137806, H01J 25/00, 12.05.1992

RU 2054734 C1, H01J 25/00, 20.02.1996

US 5003225 A, H01J 25/00, 26.03.1991

(57) 1. Коаксіальний оротрон, який містить у собі  
електродинамічну систему, що включає коаксіаль-  
ний відкритий резонатор, створений внутрішнім

дзеркалом у вигляді однопорожнинного гіперболо-  
їда та зовнішнім дзеркалом у вигляді поверхні  
обертання, на якій виконано відбивальну дифрак-  
ційну ґратку типу "гребінка", та пристрій для виве-  
дення високочастотної енергії із відкритого резо-  
натора, розташований на внутрішньому дзеркалі,  
електронно-оптичну систему із кільцевим еміте-  
ром, встановленим з одного боку "гребінки", та  
магнітну фокусуючу систему, який **відрізняється**  
тим, що зовнішнє дзеркало виконано у вигляді  
поверхні обертання V-подібної ламаної лінії із ку-  
том  $174^0 \leq \psi \leq 1795^0$  при вершині, яка направле-  
на до осі обертання, а в електронно-оптичну сис-  
тему введено додатковий кільцевий емітер, який  
встановлено з другого боку "гребінки".

2. Коаксіальний оротрон за п. 1, який **відрізняєть-  
ся** тим, що "гребінка" виконана із нерегулярним  
періодом.

Винахід належить до електроніки надвисоких  
частот (НВЧ), а саме до оротронів - електровакуу-  
мних генераторів міліметрових (мм) та субмілімет-  
рових (субмм) хвиль О-типу із відкритим резонато-  
ром та відбивальною дифракційною ґраткою і  
може знайти широке використання в таких галузях  
науки і техніки як радіолокація, радіоспектроскопія,  
експериментальна фізика плазми, в прискорюва-  
льній техніці, а саме, в прискорювачах заряджених  
часток нового покоління, та в інших, в яких для  
реалізації відповідної технології необхідні джерела  
електромагнітних коливань із високим рівнем по-  
тужності вихідного сигналу, високим коефіцієнтом  
корисної дії (ККД) та високою стабільністю частоти  
коливань.

Підвищення потужності вихідного сигналу,  
ККД, а також покращення якості спектру його елек-  
тромагнітних коливань при невеликих габаритах та  
масі генераторів є головним завданням при розро-  
бці когерентних джерел електромагнітного випро-  
мінювання короткохвильових діапазонів. При цьо-

му в оптимальному технічному рішенні вказані  
параметри повинні досягати максимального зна-  
чення у відношенні до одиниці маси пристрою при  
мінімумі протирич.

Відомі генератори електромагнітних коливань  
НВЧ О-типу із високодобротними коливальними  
системами - оротрони, що містять в собі напівс-  
феричний відкритий резонатор (ВР), створений  
двома дзеркалами, одне із яких має сферичну  
робочу поверхню та пристрій для виведення висо-  
кочастотної енергії а друге - плоске, покрите від-  
бивальною дифракційною ґраткою - періодичною  
структурою (ПС) типу «гребінка», електронно-  
оптичну систему (ЕОС), яка формує стрічковий  
електронний потік, що рухається над робочою по-  
верхнею «гребінки» (А. с. СССР №195557, МКИ:  
H01 J25/00. Электронный прибор для генерации и  
усиления колебаний миллиметрового и субмил-  
лиметрового диапазонов волн. Ф.С. Русин, Г.Д.  
Богомолов, 1966г.). Генератор електромагнітного  
випромінювання із відкритим резонатором, на од-

(13) C2

(11) 89882

(19) UA

ному із дзеркал якого виконано відбивальну дифракційну ґратку у вигляді ПС типу «гребінка» «над якою рухається електронний потік», автори Ф.С. Русін та Г.Д. Богомолов назвали оротроном. ОРОТРОН - похідне від російських слів «Открытый Резонатор», «ОТражательная Решетка», «электрон».

До недоліків оротронів слід віднести невисокий рівень потужності вихідного сигналу та ККД, обумовлений невеликим коефіцієнтом використання електронного потоку внаслідок неоднорідності високочастотного поля по товщі електронної стрічки. При цьому із високочастотним електромагнітним полем взаємодіють не всі електрони потоку, а лише «тонкий» шар заряджених часток, який межує із робочою поверхнею «гребінки». Співвідношення товщини «тонкого» шару заряджених часток до товщини стрічки електронного потоку назвемо коефіцієнтом його використання. У ВР оротронів вздовж відбивальної дифракційної ґратки - ПС типу «гребінка», «над якою рухається електронний потік», інтенсивність високочастотного поля неоднорідна і має вигляд розподілення Гауса. При розподіленні Гауса інтенсивність високочастотного поля від початку «гребінки» до осі ВР зростає, а далі до кінця «гребінки» спадає. Невисокий ККД оротронів із напівсферичним ВР обумовлений також великими дифракційними втратами внаслідок покриття всієї поверхні плоского дзеркала відбивальною дифракційною ґраткою типу «гребінка».

Відомий також генератор електромагнітних коливань НВЧ О-типу - коаксійний оротрон, який містить в собі коаксійний ВР, створений поверхнями внутрішнього та зовнішнього співвісно розташованих тіл обертання, у якого відбивальна дифракційна ґратка - ПС типу «гребінка», виконана на циліндричній робочій поверхні внутрішнього дзеркала, пристрій для виведення високочастотної енергії із ВР, розташований на зовнішньому дзеркалі, ЕОС та магнітну фокусуючу систему (МФС) (А.с. СССР №347833, М. кл. Н01 J25/00. Генератор дифракционного излучения / Н.Н. Суслов, В.П. Шестопалов. 1970г.). Недоліком такого коаксійного оротрону є невисокий ККД та потужність вихідного сигналу, що обумовлено низьким коефіцієнтом використання електронного потоку та низькою ефективністю взаємодії електронів із неоднорідним по інтенсивності високочастотним полем вздовж простору взаємодії та по товщі електронного потоку.

Найбільш близьким за технічною сутністю та сукупністю ознак до даного технічного рішення аналогом є генератор електромагнітних коливань КВЧ О-типу із високодоботною коливальною системою - генератор дифракційного випромінювання - коаксійний оротрон, який містить у собі електродинамічну систему, що включає коаксійний відкритий резонатор, створений внутрішнім дзеркалом у вигляді однопорожнинного гіперболоїда та зовнішнім дзеркалом у вигляді поверхні тіла обертання, на якій виконано відбивальну дифракційну ґратку типу «гребінка», та пристрій для виведення високочастотної енергії із відкритого резонатора, розташований на внутрішньому дзеркалі, електронно-

оптичну систему із кільцевим емітером, встановленим з одного боку ґратки, та магнітну фокусуючу систему (А.с. №472598. Генератор дифракционного излучения / Е.И. Нефедов, 1976г., БИ №18).

Недоліком такого оротрону є невисокий ККД, обумовлений неоднорідністю високочастотного поля вздовж трубчастого електронного потоку та по товщині його трубки, а також невисокий коефіцієнт використання трубчастого електронного потоку внаслідок слабкого зв'язку заряджених часток із високочастотним полем періодичної структури у вигляді відбивальної дифракційної ґратки типу «гребінка» при наявності «зазору» між електронним потоком та робочою поверхнею «гребінки».

Поряд із цим, технічне рішення - прототип має суттєвий недолік, який не сприяє збільшенню ККД та вихідної потужності електромагнітного випромінювання, а також стабільності частоти коливань вихідного сигналу. Це обумовлено тим, що конструкція регулярної періодичної структури у вигляді відбивальної дифракційної ґратки типу «гребінка», при збільшенні прискорювальної напруги та робочого струму генератора, забезпечує умови для збудження електромагнітних коливань як у режимі оротрону на одній частоті, так і в конкуруючому паразитному режимі лампи зворотної хвилі (ЛЗХ) на другій частоті, при одній і тій же величині робочої напруги.

В основу винаходу поставлено задачу - удосконалити коаксійний оротрон шляхом підвищення ефективності взаємодії електронів із високочастотним полем ВР, збільшення коефіцієнта використання трубчастого електронного потоку, та усунення можливості збудження генератора в режимі ЛЗХ, що забезпечить збільшення потужності - вихідного сигналу, збільшення ККД при підвищенні робочої частоти, та підвищить стабільність електромагнітних коливань в робочому режимі.

Поставлена задача вирішується тим, що у коаксійному оротроні, який містить у собі електродинамічну систему, що включає коаксійний відкритий резонатор, створений внутрішнім дзеркалом у вигляді однопорожнинного гіперболоїда та зовнішнім дзеркалом у вигляді поверхні обертання, на якій виконано відбивальну дифракційну ґратку типу «гребінка», та пристрій для виведення високочастотної енергії із відкритого резонатора, розташований на внутрішньому дзеркалі, електронно-оптичну систему із кільцевим емітером, встановленим з одного боку «гребінки», та магнітну фокусуючу систему, згідно із винаходом зовнішнє дзеркало виконано у вигляді поверхні обертання V-подібної плоскої ламаної лінії із кутом  $174^\circ \leq \psi \leq 179,5^\circ$  при вершині, яка направлена до осі обертання, а в електронно-оптичну систему введено додатковий кільцевий емітер, який встановлено з другого боку «гребінки».

В конструкції коаксійного оротрона періодична структура - відбивальна дифракційна ґратка - виконана у вигляді «гребінки» із нерегулярним періодом, при цьому закон зміни її періоду розраховують у відповідності до наступних рекурентних формул:  $z_0 = 0$ ;  $d_0 = \lambda \cdot v_0 / c$ ;  $z_i = z_{i-1} + d_{i-1}$ ;  $d_i = v_{ph}(z) / d_0$ , де  $d_0$  - період регулярної «гребі-

нки»,  $d_i$  - зміна періоду нерегулярної «гребінки» у відповідності із зміною фазової швидкості  $v_{ph}$ ,

$z_i = z_{i-1} + d_{i-1}$  - закономірність зміни вздовж вісі Z періоду нерегулярної «гребінки» від її кінців до площини симетрії ВР, яка перпендикулярна його вісі.

Причинно-наслідковий зв'язок між сукупністю ознак винаходу, що заявляються, та технічним результатом, що досягається полягає в наступному.

Виконання за формулою винаходу відбивальної дифракційної ґратки - періодичної структури типу «гребінка» на робочій поверхні зовнішнього дзеркала - поверхні обертання V-подібної ламаної лінії із кутом  $174^\circ \leq \psi \leq 179,5^\circ$  при вершині, яка направлена до осі обертання сприяє збільшенню коефіцієнта використання електронного потоку, підвищенню ефективності взаємодії трубчастого електронного потоку із хвилею просторової гармоніки електромагнітного поля за рахунок клинотронного ефекту. Клинотронний ефект має місце при падінні трубчастого електронного потоку із «товстою» стінкою (товщина  $\frac{\Lambda}{2} \leq s \leq \Lambda$ , тут  $\Lambda$  -

довжина сповільненої хвилі ВЧ поля) на поверхню відбивальної дифракційної ґратки - періодичної структури типу «гребінка» під гострим кутом  $15^\circ \leq \alpha \leq 6^\circ$  та забезпечує суттєве зростання коефіцієнту використання електронного потоку завдяки підвищенню ефективності взаємодії усіх заряджених часток із інтенсивним високочастотним полем поблизу робочої поверхні «гребінки». Це обумовлює збільшення ККД та потужності вихідного сигналу генератора при підвищенні його робочої частоти.

Виконання періодичної структури у вигляді відбивальної дифракційної ґратки типу «гребінка» із періодом, який монотонно зменшується від її кінців до площини симетрії ВР, забезпечує, по-перше, збільшення електронного ККД, по-друге, унеможливлення збудження оротрона в режимі ЛЗХ, який є конкурентом робочому режимові генератора.

Введення в ЕОС коаксіального оротрона додаткового кільцевого емітера електронів, який встановлено з другого боку «гребінки» забезпечує можливість суттєво збільшити робочий струм генератора (до  $1 \div 2A$ ) та потужність вихідного сигналу при підвищенні робочої частоти за рахунок зростання ефективності взаємодії заряджених часток із високочастотним електромагнітним полем, амплітуда якого зростає у напрямку від кінців «гребінки» до площини симетрії ВР (завдяки гаусовому розподіленню інтенсивності поля у коаксіальному ВР). Суміщення на робочій поверхні періодичної структури типу «гребінка» функції відбивальної дифракційної ґратки та функції колектора відпрацьованих електронів забезпечує зменшення вісьових габаритів приладу та маси МФС.

Сутність винаходу пояснюється ілюстраціями. На Фіг.1 схематично зображено поздовжній перетин конструкції коаксіального оротрона, виконаної у відповідності до п.1 та п.2 формули винаходу; на Фіг.2 схематично зображено ПС у вигляді кільцевої

відбивальної дифракційної ґратки типу «гребінка»; на Фіг.3 - результати математичного моделювання основних характеристик процесу взаємодії високочастотного поля відкритого резонатора та трубчастих електронних потоків, які падають на робочу поверхню нерегулярної ПС у вигляді кільцевої відбивальної дифракційної ґратки типу «гребінка» під гострим кутом  $15^\circ \leq \alpha \leq 6^\circ$ . Позначення на Фіг.3:  $v_{ph}$  - залежність фазової швидкості хвилі високочастотного поля від відносної довжини  $T$  ПС;  $G(T)$  - залежність функції групування електронів;  $g(T)$  - гаусове розподілення амплітуди високочастотного поля; КПД ( $T$ ).

Коаксіальний оротрон (Фіг.1), містить в собі електродинамічну систему, що включає коаксіальний ВР, створений двома дзеркалами 1, 2 у вигляді зовнішньої та внутрішньої коаксіально розташованих поверхонь обертання, періодичну структуру 3 у вигляді відбивальної дифракційної ґратки типу «гребінка», розташованої на зовнішньому дзеркалі 1. Періодична структура 3 - відбивальна дифракційна ґратка типу «гребінка» виконана із нерегулярним періодом.

Поздовжній перетин дзеркала 1 має вигляд V-подібної ламаної лінії, створеної відрізками 4, 5, розташованими дзеркально-симетрично відносно площини симетрії відкритого резонатора, яка перпендикулярна осі пристрою, і повернутої вершиною кута  $\psi$  до осі обертання, при цьому кут  $\psi$  при вершині складає величину, яка лежить в інтервалі  $174^\circ \leq \psi \leq 179,5^\circ$  (Фіг.2). ЕОС 6 має основний та додатковий кільцеві емітери, встановлені з обох боків «гребінки» 3. ЕОС 6 формує трубчасті електронні потоки 8, 9. Пристрій 10 зі щільностями 11 для виведення високочастотної енергії із ВР в навантаження розташовано на внутрішньому дзеркалі 2, виконаному у формі гіперboloїда обертання. Для формування та супроводження трубчастих електронних потоків 6 застосовано МФС 12.

Коаксіальний оротрон працює таким чином. Заряджені частки «товстих» трубчастих електронних потоків 4, 5, що емітовані кільцевими емітерами 6, 7, прискорюються робочою напругою та падають на робочу поверхню періодичної структури 3 у вигляді відбивальної дифракційної ґратки типу «гребінка» під гострим кутом  $15^\circ \leq \alpha \leq 6^\circ$  (Фіг.1).

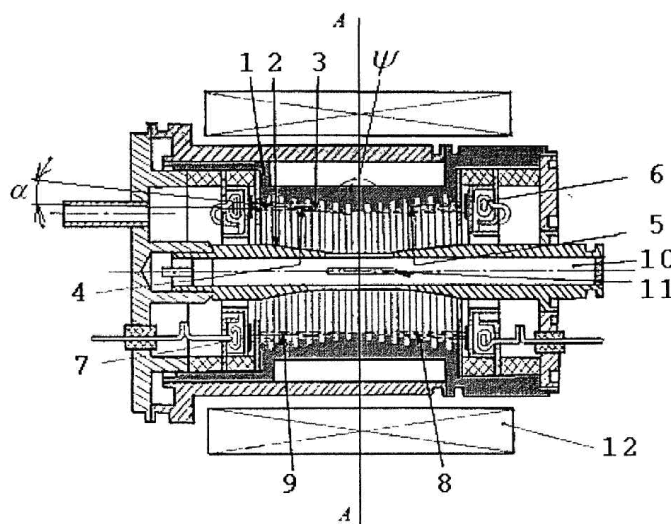
Кожна заряджена частинка трубчастих електронних потоків 4, 5, які емітовані основним 6 та додатковим 7 кільцевими емітерами, при падінні на робочу поверхню «гребінки» під гострим кутом а взаємодіє із високочастотним полем, інтенсивність якого зростає від її кінців до площини симетрії відкритого резонатора (гаусове розподілення) (Фіг.3). Електрична компонента сповільненої хвилі просторової гармоніки високочастотного поля, яка розповсюджується із фазовою швидкістю  $v_{ph}$  в «гребінці» із нерегулярним періодом ефективно гальмує електрони, які віддають полю свою енергію. Амплітуда високочастотного поля вздовж простору взаємодії має гаусове розподілення  $g(T)$  (Фіг.3) Коаксіальний оротрон, виконаний відповідно до формули винаходу, як свідчать результати комп'ютерного моделювання, спроможний забез-

печити електронний ККД біля 70% (Фіг.3, графік ККД).

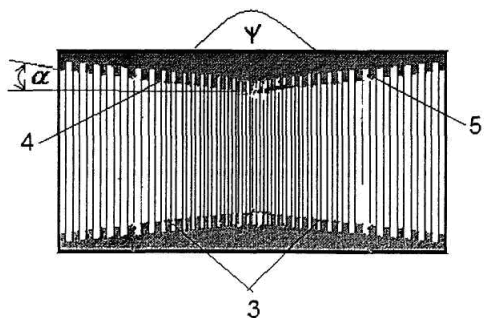
Високочастотну енергію накопичену у ВР спрямовують у навантаження через циліндричний хвилевод 10, зв'язаний із коаксійним ВР щілинами зв'язку 11.

При збільшенні робочої частоти конструкція коаксійного оротрону, створена у відповідності до

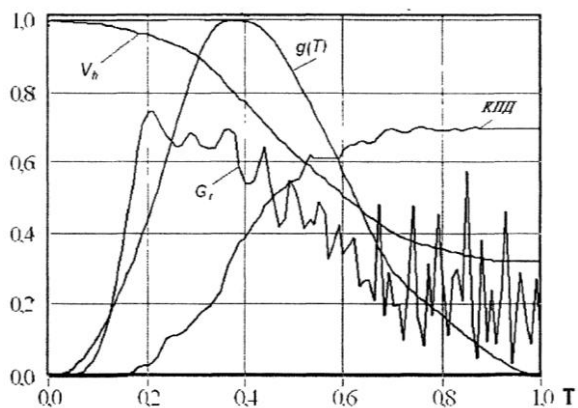
формули винаходу, спроможна забезпечити при роботі високий ККД, високу потужність та стабільність вихідного сигналу як за рахунок ефективного перетворення кінетичної енергії трубчастого електронного потоку в енергію високочастотних електромагнітних коливань, так і за рахунок усування можливості збудження генератора в конкуруючому режимі лампи зворотної хвилі.



Фіг.1



Фіг.2



Фіг.3.