

# ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(12)

РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР  
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ  
СОБСТВЕННОСТИ

(19) ВУ (11) 19572

(13) С1

(46) 2015.10.30

(51) МПК

H 01J 25/00 (2006.01)

(54)

## ГЕНЕРАТОР НА ЦИКЛОТРОННОМ РЕЗОНАНСЕ

(21) Номер заявки: а 20120623

(22) 2012.04.16

(43) 2013.12.30

(71) Заявитель: Учреждение образования "Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники" (ВУ)

(72) Авторы: Кураев Александр Александрович; Матвеев Владимир Владимирович; Сеницын Анатолий Константинович (ВУ)

(73) Патентообладатель: Учреждение образования "Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники" (ВУ)

(56) ВУ 11964 С1, 2008.

SU 1314865 А1, 1994.

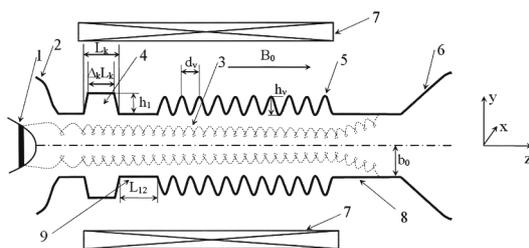
SU 1141932 А1, 2000.

EP 0301929 А1, 1989.

JPH 1183919 А, 1999.

(57)

Генератор на циклотронном резонансе, содержащий электронно-оптическую систему для формирования трубчатого спирализованного электронного пучка, электродинамическую систему, коллектор электронов, вывод излучения и электромагнит, отличающийся тем, что электродинамическая система содержит гофрированный волновод с катодным отражающим фильтром в виде круговой канавки, причем волновод выполнен с возможностью получения компоненты электромагнитной волны  $E_{0i}$ , и трубку дрейфа электронов между катодным отражателем и гофрированным волноводом.



Изобретение относится к радиотехнике и электронике сверхвысоких и крайне высоких частот (СВЧ и КВЧ) и может быть использовано в радиолокационной технике, системах телекоммуникаций и в устройствах СВЧ-нагрева.

Известен наиболее близкий аналог [2] генератор на циклотронном резонансе гиротрон, содержащий электронно-оптическую систему для формирования спирализованных электронных пучков трубчатого сечения, электродинамическую систему, коллектор электронов, вывод излучения и магнитную систему, формирующую продольное магнитостатическое поле  $B_0$ , в котором электродинамическая система выполнена в виде круглого слаборегулярного волновода с рабочей модой  $H_{0i}$ . В генераторе [1...2] такой конструк-

ВУ 19572 С1 2015.10.30

ции циклотронный резонанс электронов со стоячим полем резонатора достигается при  $B_0 = \frac{107}{n \cdot \lambda}$  кГц, где  $\lambda$  - рабочая длина волны,  $n$  - номер рабочей гармоники циклотронной частоты. Таким образом, уже на  $\lambda = 10$  мм при  $n = 1$  необходимо поле 10,7 кГц. Это приводит к большому весу электромагнита: так, для технологических гиротронов на  $\lambda = 10$  мм этот вес лежит в пределах 79-600 кг, а мощность питания - от 0,5 до 1 выходной мощности гиротрона [4]. В тоже время из-за требования высоких  $B_0$  на  $\lambda < 1$  мм, которые нереализуемы ни в криогенных, ни в импульсных электромагнитах, невозможно продвижение гиротронов в субмиллиметровый диапазон длин волн [4]. При этом использование высших гармоник циклотронной частоты для снижения  $B_0$  исключено: уже при  $n = 2$  требуемые рабочие напряженности электромагнитного поля в резонаторе намного превосходят пробивные значения и поэтому работа гиротрона на  $n = 2$  при  $\lambda < 1$  мм невозможна.

Задача изобретения - снижение требуемой для работы гиротрона индукции магнито-статического резонансного поля  $B_0$ .

Поставленная задача достигается тем, что в генераторе на циклотронном резонансе гиротроне, содержащем электронно-оптическую систему для формирования трубчатого спирализованного электронного пучка, электродинамическую систему, коллектор электронов, вывод излучения и электромагнит, электродинамическая система содержит гофрированный волновод с катодным отражающим фильтром в виде круговой канавки, причем волновод выполнен с возможностью получения компоненты электромагнитной волны  $E_{0i}$ , и трубку дрейфа электронов между катодным отражателем и гофрированным волноводом.

В генераторе такой конструкции при циклотронном взаимодействии электронов с попутной замедленной волной благодаря эффекту Доплера резонансное значение циклотронной частоты существенно понижается по сравнению с резонансным значением той же частоты для стоячего поля резонатора в обычных гиротронах. Соответственно, снижается и требуемая величина индукции  $B_0$ .

Как показали предварительные исследования, обычная для гиротронов рабочая мода  $H_{0i}$  в гофрированном волноводе не замедляется, поэтому в предлагаемом гиротроне рабочей модой является  $E_{0i}$ , которая может быть замедлена до 0,7 скорости света.

Сущность изобретения поясняется фигурой, на которой схематически изображено продольное сечение заявляемого устройства.

Здесь 1 - катодный узел электронно-оптической системы, 2 - анод, 3 - трубчатый спирализованный пучок, формируемый электронно-оптической системой в неоднородном внешнем магнитном поле, 4 - канавка, образующая катодный отражающий фильтр:  $\Delta_k L_k$  - длина основания канавки,  $L_k$  - раскрыв канавки,  $h_1$  - глубина канавки, 5 - гофрированная секция: период гофра -  $d_1$ , глубина гофрировки -  $h_v$ , радиус регулярной части волновода -  $b_0$ ; 6 - рупор вывода излучения; 7 - электромагнит гиротрона; 8 - коллектор электронов; 9 - трубка дрейфа электронов длиной  $L_{12}$ .

Заявляемый гиротрон в отличие от обычного может работать не только как генератор, но и как регенеративный отражательный усилитель. Принцип его действия состоит в следующем.

В области взаимодействия спирализованного электронного потока с полем гофрированной секции 5 реализуется условие циклотронного резонанса с основной замедленной пространственной гармоникой попутной по отношению к движению электронов вдоль оси  $z$  компоненты возбуждаемого в секции 5 электромагнитного поля. Благодаря эффекту Доплера частота этой компоненты в сопровождающей электрон системе координат понижается по сравнению с частотой стоячего поля в резонаторе обычного гиротрона в  $(1 - v_{||}/v_{\Phi 0})$  раз. Здесь  $v_{||}$  - скорость продольного движения электрона в направлении оси  $z$ ,  $v_{\Phi 0}$  - фазовая скорость основной пространственной гармоники возбуждаемого в секции 5 поля. Так, при  $v_{||} = 0,35c$ ,  $v_{\Phi 0} = 0,7c$  ( $c$  - скорость света в пустоте) видимая электронами частота по-

# BY 19572 C1 2015.10.30

нижается вдвое. Поэтому для достижения циклотронного резонанса требуемая величина циклотронной частоты и соответственно  $B_0$  понижается также вдвое (циклотронная частота  $\omega_H = \frac{e}{m} B_0$ ,  $e$ ,  $m$  - соответственно заряд и масса электрона,  $B_0$  - индукция магнитного

поля электромагнита). Встречная же компонента поля имеет в сопровождающей системе координат в  $(1 + v_{\parallel}/v_{\Phi 0})$  раз большую, чем в стоячем поле, частоту. Поэтому синхронное взаимодействие с ней невозможно: она далеко выходит за полосу циклотронного резонанса. Поэтому входной сигнал, проходящий справа налево (в направлении  $-z$ ) с потоком не взаимодействует. Только отразившись от канавки 4 и двигаясь в направлении  $+z$  (попутно с электронным потоком) поле сигнала вступает в циклотронный резонанс с электронным потоком 3 и происходит усиление сигнала. Таким образом, в предлагаемом устройстве возможна реализация отражательного усилителя.

В общем случае в рассматриваемом гиротроне при соответствующем подборе длины  $L_{12}$  реализуется положительная обратная связь: встречное излучение возбуждает поле в канавке 4, которое модулирует электронный поток. Иначе говоря, образуется двухкаскадный усилитель-канавка 4 и секция 5 - с положительной обратной связью.

Для подтверждения положительного эффекта в предлагаемом устройстве на основании строгих математических моделей, учитывающих все значимые эффекты [3, 4], был проведен расчет заявленного гиротрона на  $E_{0i}$ ; моде гофрированного волновода. Были получены следующие данные:

$\beta_0 = v_0/c$  ( $v_0 = 88$  кВ),  $I_0 = 78$  А,  $q = v_{\perp}/v_{\parallel} = 1$ ,  $b_0 = 5$ ,  $h_k = 1,52$ ,  $L_k = 6$ ,  $L_{12} = 4,067$ ;  $h_v = 1,6$ ;  $d_v = 26,1/25$ . Здесь  $v_0$  - полная начальная скорость электронов,  $V_0$  - ускоряющее напряжение,  $I_0$  - ток электронного пучка,  $v_{\perp}$ ,  $v_{\parallel}$  - соответственно начальные значения поперечной и продольной скоростей электронов, все длины даны в безразмерной форме:  $L = L'(2\pi/\lambda)$ ,  $L'$  - размерная длина,  $\lambda$  - рабочая длина волны, в примере  $\lambda = 1$  см. Итог: КПД  $\eta = 29$  %, коэффициент усиления по мощности  $K_y = 19$  дБ, выходная мощность  $P_{out} = 2$  МВт; требуемая индукция магнитного поля соленоида снижена до 0,61 уровня  $B_0$  в обычном гиротроне.

При отсутствии входного сигнала гиротрон работает как генератор с КПД  $\eta = 15$  %.

Источники информации:

1. А.с. СССР 223931, МПК Н 01J 25/00, 1976.
2. Патент РБ на изобретение 11964, 2010.
3. Кураев А.А. Мощные приборы СВЧ. Методы анализа и оптимизации параметров.- М.: Радио и связь, 1986. - 208 с.
4. Батура М.П., Кураев А.А., Сеницын А.К. Основы теории, расчета и оптимизации современных электронных приборов СВЧ. - Минск: Бестпринт, 2007. - 246 с.