2013

УДК 621.385.6

СРАВНЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ВЫСОКООРБИТНОЙ ГИРО-ЛБВ И ПЕНИОТРОННОГО УСИЛИТЕЛЯ НА Н₄₁ МОДЕ

С.В. КОЛОСОВ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 3 октября 2013

Приведены результаты сравнения по КПД, полосе усиления, коэффициенту усиления и начальному угловому разбросу скоростей электронов высокоорбитной гиро-ЛБВ и пениотронного усилителя. Показано, что пениотронный усилитель обладает большим КПД и мощностью по сравнению с высокоорбитной гиро-ЛБВ, но имеет более узкую полосу усиления.

Ключевые слова: высокоорбитный гиротрон, пениотрон.

Введение

Проблема генерации и усиления электромагнитных колебаний большой мощности на частотах более 200 ГГц остается весьма актуальной задачей в электронике больших мощностей [1]. Дело в том, что эффективность использования гиротронов традиционной конструкции – основных источников высокой мощности в миллиметровом диапазоне – резко понижается в диапазоне субмиллиметровых волн по двум причинам: на первой и даже второй гармониках циклотронной частоты невозможно обеспечить необходимый уровень магнитной индукции магнитного поля, при работе же гиротрона на 3, 4-й и высших гармониках циклотронной частоты КПД резко понижается. На это неоднократно обращалось внимание [2, 3]. Так, если на частотах (100...170) ГГц в квазинепрерывном режиме гиротроны обеспечивают выходную мощность (1,5...2) МВт, то уже на частоте 300 ГГц на гиротроне достигнут уровень выходной мощности 1,75 кВт [4]. Потенциально более перспективным при работе на высоких гармониках представляется пениотрон [5]. Однако непосредственного сравнения эффективности гиротронов и пениотронов на высоких гармониках циклотронной частоты выходной мощности алу ставляется и электродинамической системы не проводилось.

В статье приведены результаты такого сравнения с использованием математической модели, развитой в [6, 7], в которой учтены все значимые факторы: многомодовость (E_{1i} и H_{1i} моды), условия согласования на границах области взаимодействия и учет потерь в стенках волновода.

Результаты расчета гиро-ЛБВ

Моделирование процессов в гиротроне и пениотроне осуществлялось с помощью компьютерной программы GYRO-К из программного комплекса «КЕДР» [8].

Поперечное сечение области взаимодействия и распределение модуля электрической напряженности поля для пениотрона и высокоорбитного гиротрона на вращающейся по азимуту H_{41} моде изображено на рис. 1.

90



Рис. 1. Распределение модуля напряженности электрического поля в поперечном сечении волновода для моды H₄₁: 1 – начальные траектории электронов для гиротрона; 2 – траектории электронов для пениотрона

Их конструкции идентичны, различно лишь значение индукции резонансного магнитного поля для азимутального индекса n = 4 электромагнитной волны H_{41} :

- для гиротрона
$$B_g^0 \cong \frac{\omega_0 m_0}{4e} \left(1 - \frac{\beta_0}{\beta_{\phi}}\right)^{-1} \left(1 - \beta_0^2\right)^{-\frac{1}{2}}$$

- для пениотрона $B_p^0 \cong \frac{4}{3} B_g^0$.

Здесь ω_0 – опорная угловая частота поля в диапазоне усиления; m_0 – масса покоя электрона; e – заряд электрона; $\beta_0 = \frac{V_0}{C}$ – нормированная продольная скорость электронов, β_{ϕ} – продольная фазовая скорость волны H₄₁; β_0 – полная нормированная скорость электронов.

Как следует из рис. 1, начальный радиус вращения электронов для гиро-ЛБВ больше чем для пениотрона в силу меньшего значения магнитостатического поля, а это значит, что электроны гиро-ЛБВ находятся в более сильном электрическом поле, чем электроны в пениотроне и поэтому для работы гиро-ЛБВ будет требоваться меньший ток, чем для работы пениотрона.

При расчетах были выбраны следующие параметры электронного потока и волновода:

начальная нормированная скорость электронов – $\beta_0 = 0,5542$, питч фактор – $q = \frac{v_{\perp}}{v_{\parallel}} = 1,27$,

нормированный радиус волновода – $g = \frac{2\pi b}{\lambda_0} = 5,38$, нормированная длина волновода –

$$l = \frac{2\pi L}{\lambda_0} = 125, 6.$$

Для расчета гиро-ЛБВ значение нормированного магнитостатического поля составляло $F(z) = \frac{\mu_0 e H_z^0(z)}{\omega_0} = \frac{1,748 \cdot 10^{11} \cdot B_0[T]}{2\pi \cdot f_0[Hz]} = 0,2783$, что почти в 4 раза меньше циклотронного

значения. Для недопущения попадания на вход гиро-ЛБВ возбуждаемой в выходной секции встречной волны по середине волновода была помещена волноводная вставка с поглощающим покрытием с удельным сопротивлением 1092 [мкОм·см] длиной 25 [рад].

Оптимизация гиро-ЛБВ по рабочему току, магнитостатическому полю и радиусу волновода позволила достигнуть КПД = 19 %, что для четвертой гармоники циклотронной частоты является очень хорошим результатом, с учетом того, что на первой гармонике достигается КПД порядка 45 % для тех же параметров электронного потока. На рис. 2 изображены интегральные характеристики полученного варианта гиро-ЛБВ.

На рис. 2 штриховкой отмечен участок волновода с поглощающим электромагнитную энергию покрытием. Кривые 5 и 6 показывают, что часть энергии, которую отдает электронный поток волне H₄₁, теряется (около 2 %), т.к. одновременно с возбуждением попутной волны возбуждается и встречная волна, которая затем поглощается в волноводной вставке.



Рис. 2. Интегральные характеристики гиро-ЛБВ:

1 – функция фазовой группировки электронов; 2 – радиус волновода *b*/λ, 3 – нормированная поперечная скорость электронов; 4 – нормированный средний радиус вращения электронов; 5 – электронный КПД; 6 – волновой КПД

Оптимизированные параметры приняли следующие значения: нормированное значение электронного тока – $\sigma = \frac{\eta_0 \mu_0}{c} I_0 = 0,73723 \cdot 10^{-3} I_0 [A] = 0,04$, что соответствует току I = 54 [A], радиус волновода – g = 5,4082, магнитостатическое поле – F = 0,27828, коэффициент усиления $K_{yc} = 30$ дБ.

На рис. 3 приведены фазовые траектории электронов.



Рис. 3. Фазовые траектории электронов гиро-ЛБВ

Фазовые траектории показывают, как формируется фазовый сгусток электронов, который затем отдает энергию волне и разгруппировывается.

На рис. 4 приведены частотные характеристики гиро-ЛБВ. Из него следует, что полоса усиления гиро-ЛБВ составляет около 3,5% и волновой КПД (КПД-в) немного меньше электронного КПД (КПД-в), т.к. возбуждаемая встречная волна поглощается в средней вставке волновода. Расчеты гиро-ЛБВ с разбросом питч-фактора $\Delta q/q=0,5$ показали, что КПД при этом снижается до значения 11 %.



Результаты расчета пениотронного усилителя

Значение нормированного магнитостатического поля для пениотрона (F) будет приближено к 0,36. Расчеты пениотрона показали, что КПД усилителя может достигать 49 % (рис. 5), причем встречная волна почти не возбуждается электронным потоком. Поэтому наблюдается совпадение волнового и электронного КПД. Однако, в силу уменьшения коэффициента связи электронного потока с электромагнитной волной в пениотроне по сравнению с высокоорбитной гиро-ЛБВ за счет меньшего радиуса вращения электронов, такой результат достигается при большем токе электронного потока и уменьшенном коэффициенте усиления.



Рис. 5. Интегральные характеристики пениотрона: 1 – радиус волновода *b*/λ; 2 – нормированная амплитуда волны H₄₁; 3 – нормированная поперечная скорость электронов; 4 – электронный и волновой КПД

В результате оптимизации были получены следующие значения поисковых параметров: $F = 0,36048, g = 5,4122, \sigma = 0,3431, K_{vc} = 27 \text{ дБ}.$



Рис. 6. Распределение модуля напряженности электрическиго поля в продольном сечении волновода пениотрона

На рис. 6 видно, как возрастает напряженность электрического поля возбуждаемой волны по длине лампы и как она прижата ко внутренней поверхности волновода.

Полоса усиления пениотрона составила 1,5 % (рис. 7), но максимальный КПД достигает 49 %. Расчеты влияния углового скоростного разброса электронов показали, что для $\Delta q/q = 0,5$ КПД пениотрона снижается до 16 % (рис. 8).



Рис. 7. Частотные характеристики пениотронного усилителя



Рис. 8. Распределения нормированных поперечных скоростей электронов по длине прибора для 5-компонентной модели разброса питч-фактора *q*

Расчеты показали, что даже такой большой угловой скоростной разброс электронов в пучке не приводит к резкому уменьшению КПД, что говорит об устойчивости работы пениотрона по отношению к изменению параметров электронной пушки.

Заключение

Сравнение результатов расчетов высокоорбитной гиро-ЛБВ и пениотронного усилителя при одной и той же их конструкции показало, что:

 – для работы гиро-ЛБВ требуется меньший ток электронного потока (в 8 раз по сравнению с пениотроном) и она обеспечивает коэффициент усиления на 3 дБ выше, чем пениотронный усилитель;

– полоса усиления у гиро-ЛБВ составляет 3,5 %, в отличие от пениотронного усилителя с полосой усиления 1,5 %;

– максимальный электронный КПД пениотронного усилителя достигает 49 %, а КПД высокоорбитной гиро-ЛБВ только 19 %.

Оба варианта усилителей оказались устойчивы к начальному угловому разбросу скоростей электронов. Можно сделать вывод, что высокоорбитная гиро-ЛБВ может применяться в качестве усилителя при выходной мощности порядка 6 МВт, а усилительный пениотрон будет обладать мощностью в 8 раз большей, чем высокоорбитная гиро-ЛБВ. Однако КПД пениотроного усилителя в 2,5 раз больше, чем у высокоорбитной гиро-ЛБВ.

COMPARISON OF OPPORTUNITIES OF LARGE-ORBIT GYRO-TWT AND PENIOTRON ON MODE H₄₁

S.V. KOLOSOV

Abstract

The results of the comparison in terms of efficiency, the band gain, the gain and the initial angular spread of the electron velocities for large-orbit gyro-TWT and peniotron amplifier are given. It is shown that the peniotron amplifier has a higher efficiency and power compared with large-orbit gyro-TWT, but has a narrower band of amplification.

Список литературы

- 1. Rosker M. J., Wallace H. B. // IVEC 2008. P. 5-7.
- 2. *Братман В.Л.* // Тез. лекц. и докл. Саратовской школы по радиофизике и электронике СВЧ. Саратов, 2009.
- 3. Глявин М.Ю., Лучинин А.Г., Мануилов В.Н. и др. // Тезисы лекц. и докл. Саратовской школы по радиофизике и электронике СВЧ. Саратов, 2009.
- 4. Zapevalov V. E., Saito T., Nakano T. et al. // IVEC 2007. P. 345-346.
- 5. Кураев А. А. // Радиотехника и электроника. 1990. Т. 35, № 6. С. 1278–1283.
- 6. Колосов С. В., Кураев А. А. // ЭВиЭС. 1998. Т. 3, № 4. С. 35-44.
- 7. Колосов С.В., Кураев А.А., Сенько А.В. // Техника и приборы СВЧ. 2009. № 2. С. 8–13.
- 8. Колосов С.В., Кураев А.А., Синицын А.К., Аксенчик А.В. Компьютерный программный комплекс «КЕДР» (CEDR) / Свидетельство о регистрации компьютерной программы № 389.