

УДК 621.385.6

Возможные варианты высокоорбитных гиро-ЛБВ

Колосов С. В., Шатилова О. О.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки 6, Минск, 220013, Беларусь
kolosov@bsuir.by

Получено: 24 декабря 2021 г.

Отрецензировано: 28 декабря 2021 г.

Принято к публикации: 28 декабря 2021 г.

Аннотация: *Описываются и сравниваются различные варианты высокоорбитных гиро-ЛБВ по эффективности, полосе усиления и мощности в результате их моделирования по программе Gyro-K. Определены возможности таких приборов по коэффициенту усиления, полосе усиления, КПД и частотному диапазону. Показано, что наилучшим вариантом является работа гиро-ЛБВ на второй гармонике гирочастоты и моде волны TE_{21} , который обеспечивается хорошим коэффициентом связи этой волны с высокоорбитным электронным потоком и позволяет при коэффициенте усиления 40 дБ иметь полосу усиления ~12 % и средний волновой КПД 15 %.*

Ключевые слова: *гирорезонансные приборы, ЛБВ, миллиметровый диапазон волн.*

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Колосов С. В., Шатилова О. О. Возможные варианты высокоорбитных гиро-ЛБВ // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2021. Т. 4, № 3. С. 183—193.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Колосов, С. В. Возможные варианты высокоорбитных гиро-ЛБВ / С. В. Колосов, О. О. Шатилова // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2021. — Т. 4, № 3. — С. 183—193.

Possible variants of high-orbit Gyro-TWT

S. V. Kolosov and O. O. Shatilova

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

P. Brovki st., 6, Minsk, 220013, Belarus

kolosov@bsuir.by

Received: December 24, 2021

Peer-reviewed: December 28, 2021

Accepted: December 28, 2021

Abstract: *Various variants of high-orbit Gyro-TWT in terms of efficiency, gain bandwidth and power are described and compared, as a result of their simulation using the Gyro-K program. The capabilities of such devices in terms of gain, gain band, efficiency and frequency range have been determined. It is shown that the best option is the operation of the Gyro-TWT at the second harmonic of the gyrofrequency and the TE_{21} wave mode, which is provided by a good coupling coefficient of this wave with the high-orbit electron beam and allows, at a gain of 40 dB, to have a gain band of ~ 12% and an average wave efficiency of 15%.*

Keywords: *generator, gyroresonant devices, TWT, millimeter wavelength range.*

For citation (IEEE): S. V. Kolosov et al. "Possible variants of high-orbit Gyro-TWT," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 4, no. 3, pp. 183–193, 2021. (In Russ.).

1. Введение

Создание широкополосных усилителей в диапазоне частот близких к терагерцовому в настоящее время является актуальной задачей. Наиболее перспективными в этом смысле являются гирорезонансные приборы. Принцип работы таких приборов основан на гирорезонансном взаимодействии электронного потока с электромагнитными полями. А это предполагает наличие сильного магнитостатического поля, особенно при продвижении в более высокий частотный диапазон. Но даже использование сверхпроводящих электромагнитов не позволяет создавать усилители для терагерцового частотного диапазона. Одним из способов проникнуть в этот диапазон частот является работа на гармониках гирочастоты и использование высокоорбитных электронных пушек. Однако здесь имеются свои трудности. С увеличением номера гармоники гирочастоты увеличивается и азимутальный индекс синхронного типа TE -волны. При этом максимальное значение поперечной составляющей ВЧ поля все ближе приближается к внутренней поверхности волновода, а радиус вращения элект-

тронов в высокоорбитной gyro-ЛБВ увеличивается в соответствии с увеличением номера гармоники гирочастоты, т. к. уменьшается значение магнитостатического поля. Но оказывается, что это приводит к необходимости увеличения тока электронного потока для эффективного взаимодействия его с вращающимся электромагнитным полем, т. к. коэффициент связи электронного потока с электромагнитными волнами уменьшается. Так при работе на 4-й гармонике гирочастоты [1, 2] величина тока составляет 86 ампер при напряжении 103 киловольт, что соответствует мощности электронного потока порядка 9 Мвт. Ожидается, что с уменьшением азимутального индекса ВЧ-поля будет уменьшаться и величина требуемого тока электронного потока.

2. Результаты расчетов

Для расчетов использовалась программа *Gyro-K* [3, 4], в которой уравнения возбуждения электронным потоком нерегулярного волновода строятся на основе метода преобразования координат А. Г. Свешникова, который основан на замене задачи возбуждения нерегулярного волновода задачей возбуждения регулярного волновода с единичным радиусом. Этот метод позволяет искать решение волновых уравнений в виде разложений по системе базисных функций регулярного цилиндрического волновода. Для решения уравнений Максвелла был использован метод Галеркина, который также называется методом ортогонализации. Коэффициенты разложения поля по собственным базисным функциям определяются в этом методе из условия ортогональности невязок уравнений собственным базисным функциям регулярно волновода. Граничные условия на открытых концах волновода определяются для каждой моды регулярного волновода отдельно, что устраняет некорректность задания граничных условий для полного поля, как это происходит при использовании «pic»-технологии.

В результате мы получаем систему обыкновенных дифференциальных уравнений для коэффициентов разложения, зависящих теперь только от продольной координаты. Такой подход позволяет преобразовать трехмерную задачу возбуждения нерегулярного волновода в одномерную задачу. Омические потери в стенках волновода учитываются на основе граничных условий Шукина — Леонтовича. Для самосогласованного решения задачи возбуждения нерегулярного волновода электронным потоком использовался итерационный метод последовательной нижней релаксации.

В результате поиска оптимальной конструкции gyro-ЛБВ для рабочей моды TE_{41} по значениям радиуса волновода, магнитостатического поля, тока электронного потока, питч-фактора и ускоряющего напряжения

были получены следующие параметры giro-ЛБВ: ускоряющее напряжение — 103 Кв ($\beta_0 = 0.5542$), электронный ток — 87 А ($\sigma = 0.0646$), питч фактор — 1.447, нормированный радиус волновода $g = \frac{2\pi b}{\lambda_0} = 5.4332$,

магнитостатическое поле $F = \frac{\mu_0 e H_z^0(z)}{\omega_0} = \frac{1.7588 \cdot 10^{11} B_0 [T]}{2\pi f_0 [Hz]} = 0.28012$, ко-

эффициент усиления $K_{yc} = 34$ Дб. Интегральные характеристики данной giro-ЛБВ приведены на рисунке 1.

На кривой 2 (профиль волновода) серым цветом отмечены области волновода с поглощающим покрытием. Фрагментация поглощающего покрытия позволила повысить КПД giro-ЛБВ.

Из рисунка 2 следует, что полоса усиления данной giro-ЛБВ составляет 11 %, но при этом потери мощности достигают для заданной частоты 60 ГГц 5 % от мощности электронного потока.

На рисунке 3 показано, что максимальное значение напряженности электромагнитного поля наблюдается только в конце волновода.

Белым пунктирным цветом на рисунке 4 показана окружность начального распределения электронов в высокоорбитной ЛБВ.

При поиске оптимальной конструкции giro-ЛБВ на волне TE_{21} [5] был получен следующий результат. Величина тока электронного потока составляла 3.2 А ($\sigma = \frac{\eta_0 \mu_0}{c} I_0 = 0.73723 \cdot 10^{-3} I_0 [A] = 0.00235$), ускоряющее

напряжение составило 60Кв ($\beta_0 = \frac{v_0}{c} = \sqrt{1 - \frac{1}{(1.957 \cdot 10^{-6} V_0 [v] + 1)^2}} = 0.446$), питч

фактор $q = V_{\perp} / V_{\parallel} = 1.$, нормированный радиус волновода $g = \frac{2\pi R_w}{\lambda_0} = 3.0844$, нормированное значение магнитостатического поля

$F(z) = \frac{\mu_0 e H_z^0(z)}{\omega_0} = \frac{1.748 \cdot 10^{11} \cdot B_0 [T]}{2\pi \cdot f_0 [Hz]} = 0.5251$, нормированная длина прибора

$l = \frac{2\pi L_w}{\lambda_0} = 277$, коэффициент усиления – 40 дВ.

Мощность электронного потока при работе на моде TE_{21} составила 192 кВт, в то время как при работе на волне TE_{41} эта величина равнялась 9 МВт, что в 47 раз больше, чем требуется для работы на волне TE_{21} . Интегральные характеристики для рассчитанного варианта giro-ЛБВ показаны на рисунке 6.

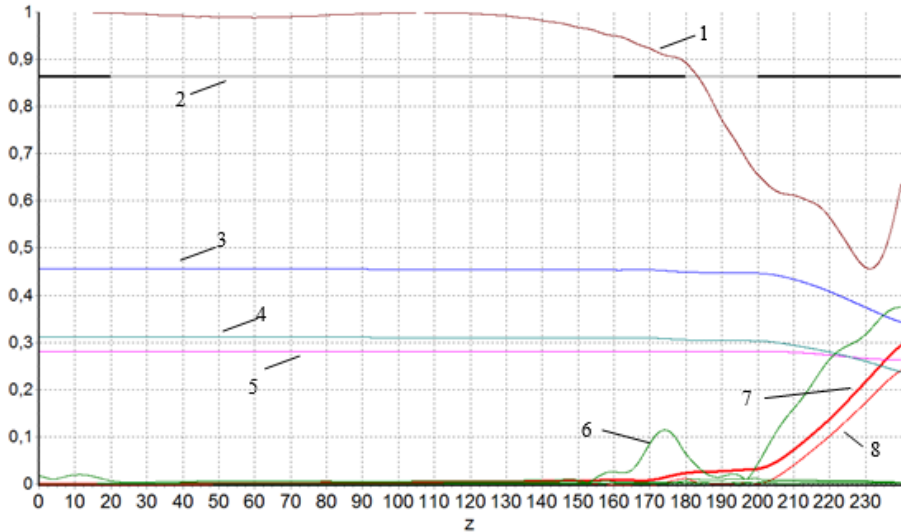


Рис. 1. Функция группировки по первой гармонике рабочей частоты, 2 – профиль волновода $g/(2\pi)$, 3 – среднее значение поперечной скорости электронов, 4 – среднее значение радиуса вращения электронов, 5 – нормированное значение магнитостатического поля, 6 – нормированное значение амплитуды электромагнитной волны H_{41} , 7 – электронный КПД, 8 – волновой КПД.

Fig. 1. Function of grouping by the first harmonic of the operating frequency, 2 – waveguide profile $g/(2\pi)$, 3 – the average value of the transverse electron velocity, 4 – the average value of the electron rotation radius, 5 – the normalized value of the magnetostatic field, 6 – the normalized value of the electromagnetic wave amplitude H_{41} , 7 – electronic efficiency, 8 – wave efficiency

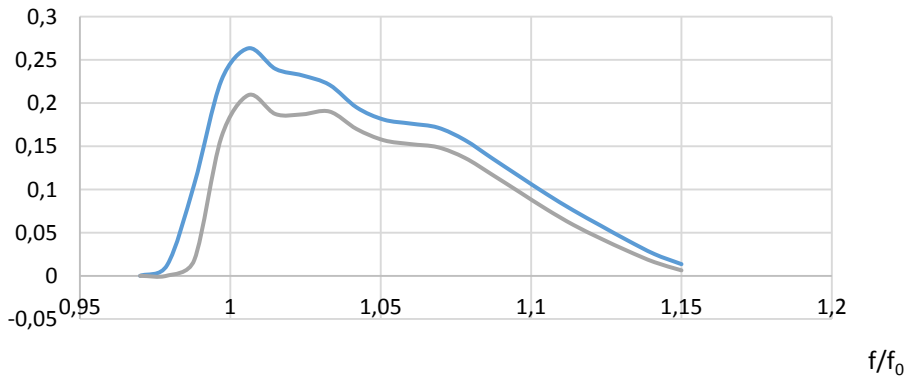


Рис. 2 Частотная характеристика Гирос-ЛБВ, верху — электронный КПД, внизу — волновой КПД.

Fig. 2. Frequency response of Gyro-TWT, top – electronic efficiency, bottom – wave efficiency



Рис. 3. Распределение модуля напряженности электромагнитного поля в продольном сечении волновода.

Fig. 3. Module distribution of electromagnetic field in the longitudinal cross section of the waveguide

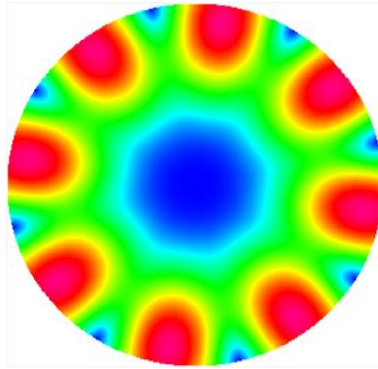


Рис. 4. Поперечное распределение модуля напряженности электромагнитного поля в конце волновода моды H_{41} .

Fig. 4. Transverse distribution of the electromagnetic field intensity modulus at the end of the waveguide mode H_{41}

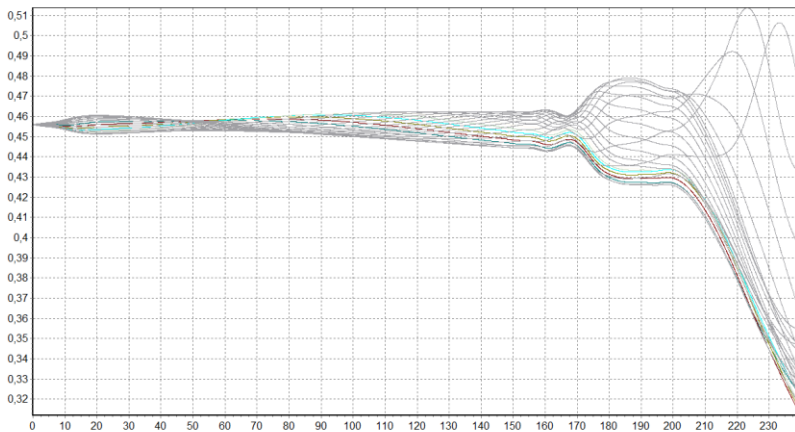


Рис. 5. Поперечные нормированные скорости электронов.

Fig. 5. The normalized transverse velocity of electrons

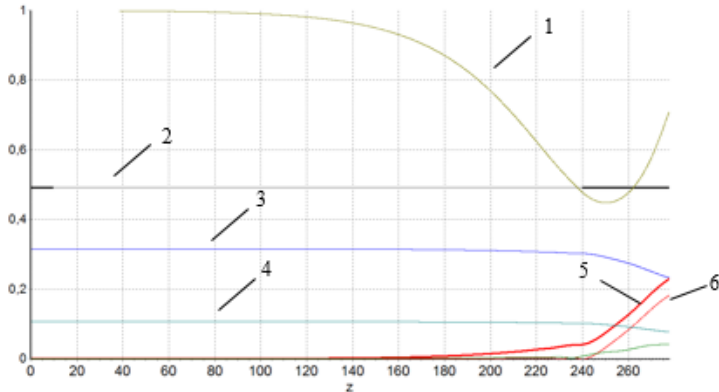


Рис. 6. Функция фазовой группировки электронов, 2 – радиус волновода, 3 – поперечная средняя скорость электронов, 4 – средний радиус вращения электронов, 5 – электронный КПД, 6 – волновой КПД.

Fig. 6. Electron phase bunching function, 2 - waveguide radius, 3 - average transverse velocity of electrons, 4 - average electron rotation radius, 5 - electronic efficiency, 6 - wave efficiency

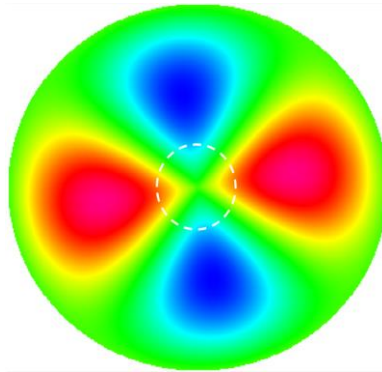


Рис. 7. Поперечное распределение модуля напряженности поперечной составляющей электромагнитного поля в конце волновода моды H_{21} .

Fig. 7. Transverse distribution of the modulus of the strength of the transverse component of the electromagnetic field at the end of the waveguide of the H_{21} mode

Из этого рисунка следует, что электронный КПД этой gyro-ЛБВ составляет 23 %. Заметим, что большая часть волновода (кривая 2) имеет поглощающее ВЧ поле покрытие. Оно отмечено серым цветом, в отличие от медной поверхности, которая на рисунке имеет черный цвет.

На рисунке 7 белым цветом отмечен радиус вращения электронного потока относительно оси прибора. Можно отметить, что электронный поток проходит в еще достаточно сильном электромагнитном поле, что и обеспечивает хорошее взаимодействие электронного потока с полем волны TE_{21} .

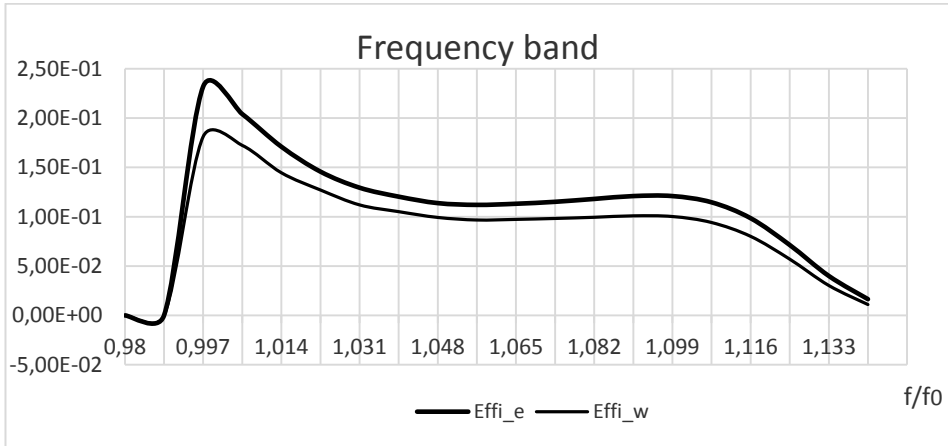


Рис. 8. Частотная характеристика giro-ЛБВ, работающей на волне TE_{21} .

Fig. 8. Frequency characteristic of the Gyro-TWT operating on the TE_{21} wave

Полоса усиления данной ЛБВ составляет 12,6 %, что немного выше, чем при работе на TE_{41} , но средний КПД несколько меньше, т. к. здесь нет такой фрагментации поглощающего покрытия, как в предыдущем варианте giro-ЛБВ.



Рис. 9. Распределение модуля напряженности электромагнитного поля в продольном сечении волновода.

Fig. 9. Module distribution of electromagnetic field in the longitudinal cross section of the waveguide

Интересным представляется сравнение giro-ЛБВ, работающей на моде TE_{21} с ЛБВ, работающей на моде TE_{22} , что означает увеличения радиуса волновода почти в 2 раза.

Из рисунков 10, 11 следует, что на ларморовской орбите формируются два фазовых сгустка электронов, как и должно быть при работе на второй гармонике гирочастоты.

Исходя из рисунка 12 можно сделать вывод о том, что средний КПД почти такой же, что и при работе на моде TE_{21} , но полоса усиления существенно меньше и составляет 3.35 %.

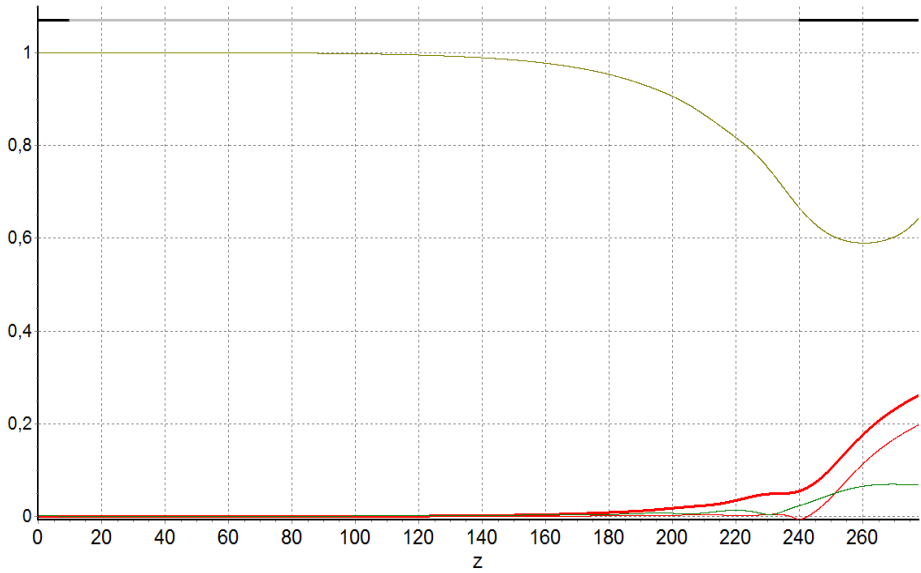


Рис. 10. Интегральные характеристики гирос-ЛБВ для моды TE_{22} .
Fig. 10. Integral characteristics of the Gyro-TWT for the TE_{22} mode

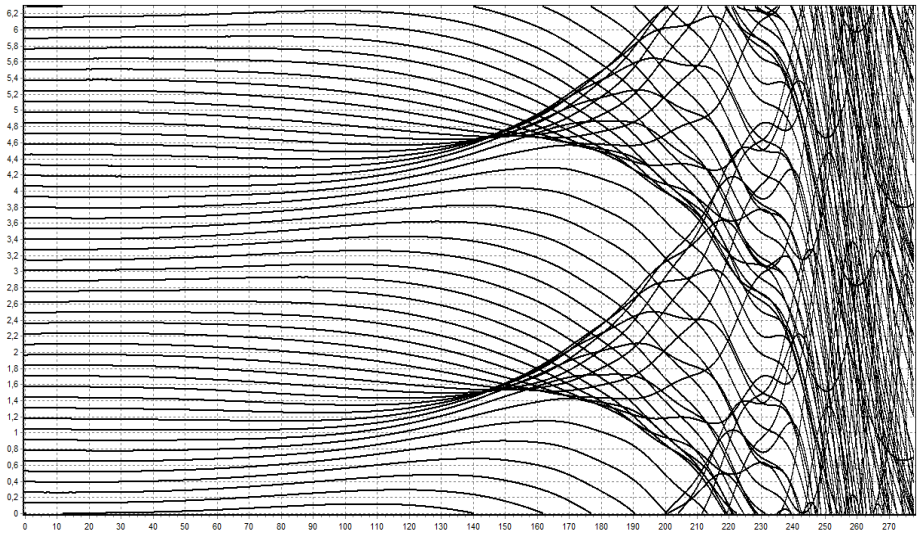


Рис. 11. Фазовые траектории электронов для Гирос-ЛБВ с модой TE_{22} .
Fig. 11. Phase trajectories of electrons for the Gyro-TWT with the TE_{22} mode

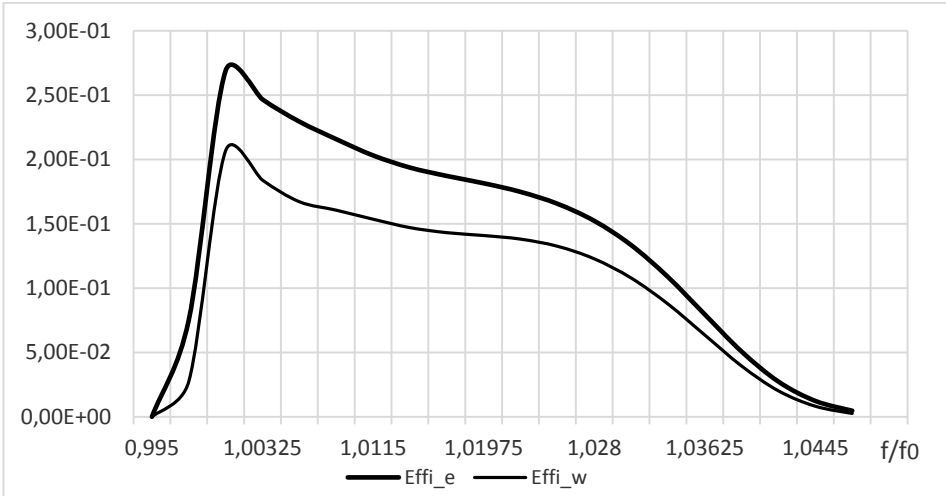


Рис. 12. Частотная характеристика Гиро-ЛБВ, работающей на волне TE_{22} .

Fig. 12. Frequency characteristic of the Gyro-TWT operating on the TE_{22} wave

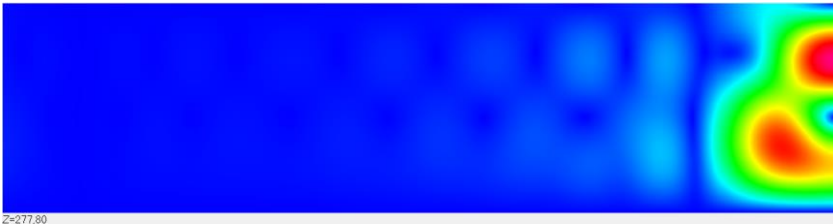


Рис. 13. Распределение модуля напряженности электромагнитного поля в продольном сечении волновода для волны TE_{22} .

Fig. 13. Module distribution of electromagnetic field in the longitudinal cross section of the waveguide for the TE_{22} wave

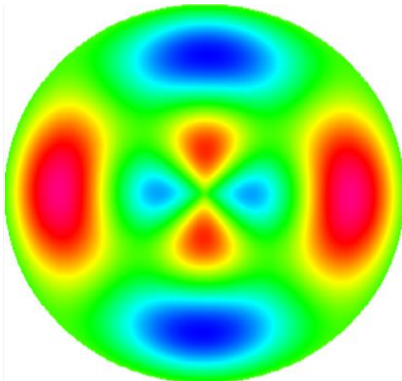


Рис. 14. Поперечное распределение модуля напряженности поперечной составляющей электромагнитного поля в конце волновода моды H_{22} .

Fig. 14. Transverse distribution of the modulus of the strength of the transverse component of the electromagnetic field at the end of the waveguide of the H_{22} mode

3. Заключение

Сопоставление полученных результатов расчетов трех вариантов Гирос-ЛБВ позволяет сделать следующие выводы.

1. Есть принципиальная возможность создания гирос-ЛБВ, работающих в области миллиметровых длин волн, за счет работы на гармониках гирочастоты.

2. Наилучшим вариантом является работа на второй гармонике гирочастоты и моде волны TE_{21} , что обеспечивается хорошим коэффициентом связи этой волны с высокоорбитным электронным потоком и позволяет при коэффициенте усиления 40 дБ иметь полосу усиления $\sim 12\%$ и средним волновым КПД 15 %.

3. Работа на более высоких радиальных модах, например, TE_{22} , уменьшает полосу усиления в данном случае более чем в 3 раза.

Список литературы

1. Колосов С. В., Батура М. П., Зайцева И. Е. Терагерцовая высокоорбитная ГИРО-ЛБВ // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. 2020. № 1-2. С. 47—48.
2. Колосов С. В., Шатилова О. О. Мощная высокоорбитная гирос-ЛБВ // Доклады БГУИР. 2021. Т. 19, № 5. С. 45—51.
3. Колосов С. В., Зайцева И. Е. Компьютерная программа GYRO-K для разработки и проектирования гирорезонансных приборов СВЧ // СВЧ электроника. 2017. № 2. С. 46—48.
4. Kolosov S. V. Optimization of microwave devices with irregular waveguide. LAP LAMPERT Academic Publishing RU, 2019. 192 p.
5. Колосов С. В., Шатилова О. О. Высокоорбитная гирос-ЛБВ на волне TE_{21} // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. 2021. № 3. С. 292—293.

Информация об авторах

Колосов Станислав Васильевич, доктор физ.-мат. наук, профессор кафедры «Вычислительные методы и программирование» Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Беларусь.

Шатилова Ольга Олеговна, старший преподаватель кафедры «Вычислительные методы и программирование» Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Беларусь.

Information about the authors

Stanislav V. Kolosov, Doctor of Phys.-Math. Sci., Professor of the Department of Computational Methods and Programming, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus.

Olga O. Shatilova, senior lecturer of the Department of Computational Methods and Programming, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus.