

В. Г. Курин

Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины

12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина

E-mail: mirosh@ire.kharkov.ua

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХЧАСТОТНЫХ РЕЖИМОВ В ГЕНЕРАТОРАХ ДИФРАКЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В настоящее время многочастотные сигналы находят применение в многоканальных системах связи и многочастотных радиолокационных станциях (РЛС). Использование многочастотных РЛС повышает эффективность обнаружения, распознавания и различения объектов, что существенно повышает достоверность определения координат групповых целей и играет не последнюю роль в разработке интеллектуальных радиолокационных систем автоматического распознавания объектов. Для формирования радиолокационного изображения важное значение имеет не только диапазон, но и разнос частот формирователя (генератора) зондирующих сигналов. Разнос частот содействует формированию радиолокационных изображений, которые оказываются близки по визуальному восприятию и привычны для человека. В исследуемом генераторе разнос частот можно регулировать путем изменения анодного напряжения, что, несомненно, является одним из условий, обуславливающих высокоэффективную работу двухчастотных РЛС миллиметрового диапазона. Задача по возбуждению в генераторе двух частот решалась путем подбора условий для одновременного возбуждения в генераторе двух режимов, а именно, режима дифракционного излучения и так называемого лэддертронного режима. В обоих этих режимах энергию из объема открытого резонатора можно выводить на быстрых (объемных) волнах посредством отверстия связи, выполненном в одном из зеркал («верхнем») открытого резонатора. Оказалось, что в генераторе возбуждаются на разных частотах указанные режимы в случаях, когда в открытом резонаторе возбуждается резонансная мода, образующая в пространстве взаимодействия (в направлении движения электронного потока) два противофазных пятна поля. В этом случае электронный поток преобразуется из однопоточного в двухпоточный, что и обуславливает устойчивую работу генератора на двух частотах. Экспериментальные результаты показали устойчивость и эффективность одновременной работы генератора в указанных режимах. Причем, разнос генерируемых частот можно было изменять путем изменения анодного напряжения. Результаты исследований расширяют функциональные возможности применения генераторов в различных областях науки и техники. В частности, представляет интерес исследование возможности (или невозможности) совпадения частот указанных режимов. Ил. 6. Библиогр.: 9 назв.

Ключевые слова: режим дифракционного излучения, режим поверхностных волн, лэддертронный режим, разность частот, интерференция электронных волн.

Известно, что генераторы дифракционного излучения (ДИ) (или вообще генераторы с открытыми резонаторами, например, оротроны) могут работать в двух режимах: в режиме ДИ или в режиме объемных волн и в режиме лампы обратной волны (ЛОВ) или в режиме поверхностных волн [1–4]. Причина такой «двойственности» хорошо видна из графика рис. 1, на котором приведены расчетные дисперсионные характеристики режима ДИ и режима ЛОВ. Без учета потерь энергии электронов на излучение дисперсионная характеристика режима ДИ совпадает с линией равных фазовых углов $\varphi = 2\pi$. Дисперсионная характеристика режима ЛОВ, как это видно из графиков рис. 1, на линейном участке оказывается смещенной относительно линии $\varphi = 2\pi$ в сторону $\varphi \rightarrow \pi$. На нелинейном участке дисперсионная характеристика ЛОВ –1-й гармоники плавно переходит в дисперсионную характеристику ЛОВ 0-й гармоники.

Из приведенных графиков также следует, что при некотором значении величины отношения $c/V_\phi = \text{const}$ (в данном случае $c/V_\phi = 7,8$) генератор ДИ может работать в двух режимах: 1 в режиме ДИ и 2 в режиме ЛОВ. Разумеется, на разных частотах, что также следует из приведенных графиков рис. 1. На этих же графиках треугольниками нанесены результаты эксперимента.

Экспериментальные результаты извлечены из графиков, приведенных на рис. 2: на рис. 2, а приведена зона электронной перестройки генератора, работающего в режиме ДИ, на рис. 2, б – зона электронной перестройки того же генератора, но работающего в режиме ЛОВ.

Можно считать, что максимальные уровни выходной мощности генератора в обоих режимах совпадают. При этом наблюдается существенное различие величин крутизны электронных перестроек рассматриваемых режимов. Средняя крутизна по зоне перестройки в случае режима ДИ оказалась равной $S = 0,7$ МГц/В, в то время как в случае режима ЛОВ $S = 1,88$ МГц/В. Заметим, что в данном случае генератор работает в режиме резонансной ЛОВ (рис. 2, б), который известен еще как режим «лэддертрона» (ЛЭД) [5]. В связи с тем, что в таком режиме ЛОВ имеет сходство с пролетными клистродами, энергию можно выводить по объемной волне аналогично тому, как это обычно осуществляется в режиме ДИ посредством отверстия связи, выполненном в верхнем зеркале открытого резонатора [1], что и было сделано в рассматриваемом эксперименте. Из него следует (см. рис. 1), что в данном случае одновременной работы генератора в двух режимах ДИ \Leftrightarrow ЛЭД не наблюдается. Они (режимы) оказались существенно смещенными относительно условия их совместного существования

$c/V_\phi = \text{const}$. До настоящего времени такие режимы в генераторах ДИ с отражательными периодическими структурами пока не удается обнаружить. Все эксперименты с такими генераторами, как правило, ограничиваются вышеприведенными результатами (см. рис. 1 и 2).

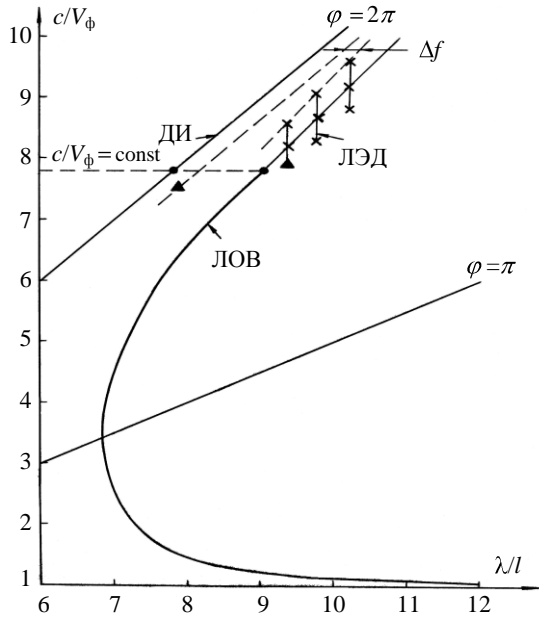


Рис. 1. Дисперсионные характеристики (области существования) режимов работы генератора ДИ: 1 – режим ДИ; 2 – режим ЛОВ; 3 – режим «лэддертрона» (ЛЭД); Δf – разность частот режимов ДИ и ЛЭД

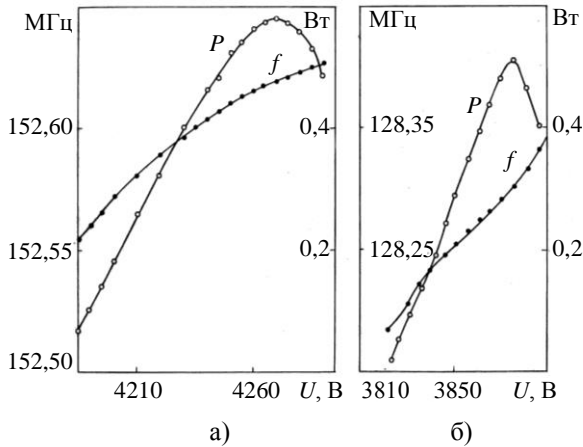


Рис. 2. Зоны электронных перестроек генератора: а) – в режиме ДИ; б) – в режиме ЛЭД

Получить режим ДИ \Leftrightarrow ЛЭД оказалось возможным в генераторах ДИ с двойными периодическими структурами. Схематический чертеж такого генератора приведен на рис. 3. В данной работе впервые приводятся экспериментальные результаты исследования генератора ДИ с двойными периодическими структурами, работающи-

ми в двух-частотном режиме, а именно в режиме ДИ + ЛЭД на TEM_{01q} -моде открытого резонатора, образующей два противофазных пятна поля в пространстве взаимодействия [6].

Эксперимент. Типичная зона электронной перестройки указанного генератора (рис. 3), работающего на TEM_{01q} -моде приведена на рис. 4.

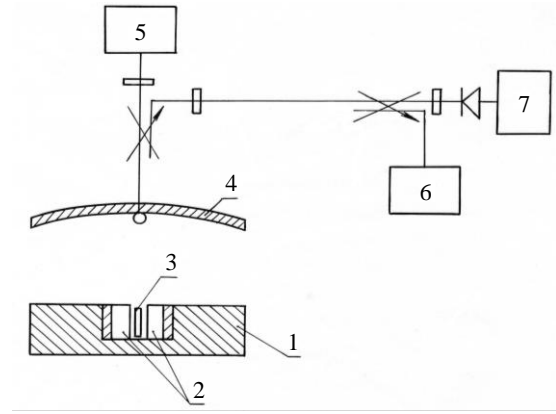


Рис. 3. Схематический чертеж генератора ДИ с двойной периодической структурой: 1 – нижнее зеркало; 2 – периодические структуры; 3 – электронный поток; 4 – верхнее зеркало; 5 – измеритель мощности; 6 – частотомер; 7 – индикатор сигнала

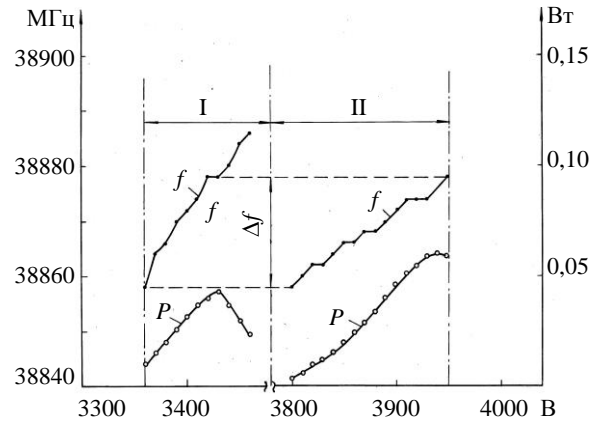


Рис. 4. Зона электронной перестройки исследуемого генератора, работающего на TEM_{01q} -моде образующей два пятна поля в пространстве взаимодействия: I – низковольтная подзона; II – высоковольтная подзона; f – характер изменения частоты в подзонах; P – изменение уровня выходной мощности

Видно, что зона электронной перестройки расщепляется на две подзоны: низковольтную I и высоковольтную II. Факт возможности такого расщепления был отмечен ранее [7] и в настоящей работе не рассматривается. Здесь заметим, что в низковольтной и высоковольтной подзонах генератор работает практически в одной и той же полоске частот Δf (показано штриховыми прямыми). В низковольтной подзоне двухчастотную генерацию обнаружить оказалось невозможно. Двухчастотная генерация была обнаружена в

высоковольтной подзоне, но при существенно больших значениях анодного напряжения $U_a > 4000$ В и при больших рабочих токах. Данная зона (рис. 4) была снята при рабочем токе $I_p = 30$ мА и при $U_a < 4000$ В. Высоковольтная подзона, в которой была обнаружена двухчастотная генерация, приведена на рис. 5.

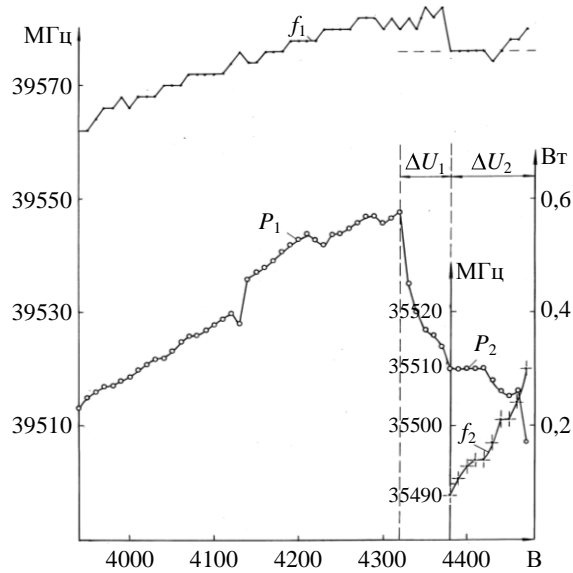


Рис. 5. Высоковольтная подзона, в которой наблюдается двухчастотный режим: f_1 , P_1 – изменение частоты и мощности в режиме ДИ; f_2 – изменение частоты в режиме ЛЭД; P_2 – суммарная мощность режима ДИ + ЛЭД

Здесь кривая f_1 показывает характер изменения частоты в зоне электронной перестройки, соответствующий работе генератора в режиме ДИ. Соответственно, кривая P_1 показывает изменение уровня выходной мощности по зоне в режиме ДИ. Кривая f_2 характеризует изменение частоты, соответствующее режиму ЛЭД, а кривая P_2 характеризует изменение суммарной мощности генератора в режиме ДИ + ЛЭД. Работа генератора в режиме ДИ + ЛЭД занимает в зоне электронной перестройки диапазон по анодному напряжению $\Delta U_2 = 85$ В. Кроме того, как следует из графиков, наблюдается реализация переходной области $\Delta U_1 = 60$ В; возбуждение ЛЭД режима не оказывает существенного влияния на характер изменения частоты режима ДИ в зоне электронной перестройки. Наблюдается небольшое уменьшение частоты ДИ $\Delta f_1 = 6$ МГц в области возбуждения ЛЭД режима. Максимальный уровень суммарной мощности здесь достигает $P_2 = 0,3$ Вт.

На рис. 6 приведена высоковольтная подзона электронной перестройки исследуемого генератора, смещенная в область еще более высоких анодных напряжений.

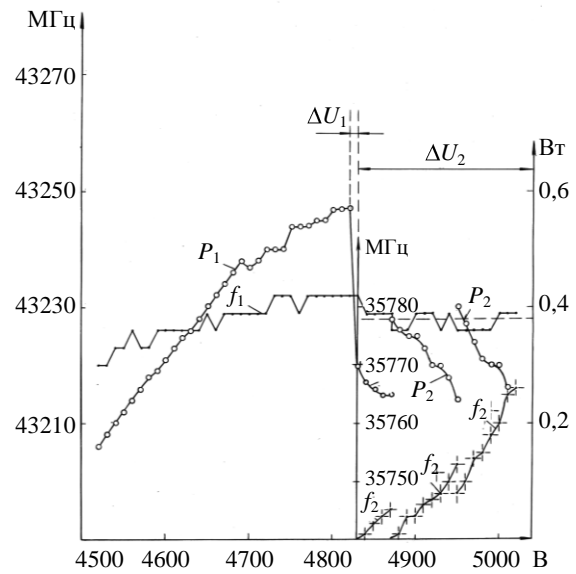


Рис. 6. Высоковольтная подзона, в которой наблюдается двухчастотный режим, смещенная в область более высоких анодных напряжений: f_1 , P_1 – изменение частоты и мощности в режиме ДИ; f_2 – изменение частоты в режиме ЛЭД; P_2 – суммарные мощности в режиме ДИ + ЛЭД при разных рабочих токах

На рис. 5 подзона электронной перестройки занимала диапазон 3 940...4 470 В. Рассматриваемая подзона (рис. 6) занимает диапазон 4 520...5 020 В. В этом случае двухчастотный режим занимает диапазон $\Delta U_2 = 190$ В, в то время как переходная область всего лишь $\Delta U_1 = 10$ В. При этом в области существования двухчастотных режимов наблюдаются три зоны. Заметим, что подзона снималась при рабочем токе $I_p = 80$ мА = const, как и в случае на рис. 5. При этой величине рабочего тока реализовалась небольшая первая двухчастотная зона и генерация прекратилась. Рабочий ток был увеличен до $I_p = 90$ мА = const, что привело к реализации второй двухчастотной зоны. Соответственно, третья двухчастотная зона реализовалась при рабочем токе $I_p = 100$ мА = const. Таким образом, при увеличении рабочего тока область существования двухчастотного режима существенно расширяется. Уровень выходной мощности двухчастотного режима здесь также оказалась выше ($P_2 = 0,4$ Вт), чем в ранее рассмотренном случае (рис. 5), где он был равен $P_2 = 0,3$ Вт. В области существования двухчастотного режима наблюдается небольшое снижение среднего уровня частотной характеристики режима ДИ на величину $\Delta f \cong 4$ МГц. В случае на рис. 5 это снижение было равным $\Delta f = 6$ МГц. Эти смещения на обоих рисунках указаны штриховыми прямыми. Однако при этом общий характер поведения частоты режима ДИ в зоне электронной перестройки остался без изме-

нений. Следовательно, можно сказать, что наблюдаемые смещения обусловлены перераспределением высокочастотных токов между режимами. Разность частот между режимами ДИ – ЛЭД в первом случае (рис. 5) была равной $\Delta f_{cp} \cong 4,1$ ГГц, во втором случае (рис. 6) $\Delta f_{cp} \cong 7,5$ ГГц.

Комбинационных частот в рассматриваемом эксперименте не было обнаружено. На частотных характеристиках режима ДИ обнаруживаются полочки, имеющие по анодному напряжению ширину до $\Delta U_a \cong 60$ В. По предварительным данным [8] эти эффекты автостабилизации частоты обусловлены именно тем, что исследуемый генератор работал на TEM_{01q} -модах, образующих два противофазных пятна поля в пространстве взаимодействия. Изучение этого явления требует дополнительных исследований.

Выводы. Проведенный анализ опытных данных показал, что генераторы ДИ с двойными периодическими структурами устойчиво работают на двух независимых частотах в комбинационном режиме ДИ + ЛЭД. Возможность работы исследуемого генератора в таком режиме реализуется в случаях возбуждения в его резонансной системе (открытом резонаторе) TEM_{01q} -мод, которые образуют в пространстве взаимодействия два противофазных пятна поля. Электронный луч, пролетая такое пространство взаимодействия, преобразуется из однопоточного в многопоточный [7], что и обуславливает устойчивую работу генератора в комбинационном режиме ДИ + ЛЭД на двух частотах. Разность частот Δf этого режима изменяется при переходе работы генератора от одной зоны электронной перестройки к другой. В условиях эксперимента были обнаружены зоны с $\Delta f = 4,1$ ГГц и $\Delta f = 7,5$ ГГц. Следовательно, в процессе экспериментов возможны случаи сближения частот $\Delta f \rightarrow 0$, а следовательно, и вырождения режима ЛЭД в режим ДИ. С этой точки зрения режим ДИ можно будет рассматривать, как предельный режим ЛЭД. В соответствии с этим ($\Delta f \rightarrow 0$) возможны случаи реализации интерференции электронных волн («волн группировки»), а следовательно, и эффектов расплывания или обострения бунчей, что, соответственно, приведет к понижению или повышению уровня выходной мощности и КПД исследуемого генератора. Последнее представляет очевидный интерес для продвижения работы генераторов этого класса в терагерцевый диапазон.

Библиографический список

1. Шестопалов В. П. Дифракционная электроника / В. П. Шестопалов. – Х.: изд-во Харьков. ун-та, 1976. – 232 с.
2. Балаклицкий И. М. О возможности работы генератора дифракционного излучения в режиме ЛОВ / И. М. Балаклицкий, В. Г. Курин, Б. К. Скрынник // VI Всесоюз. межвузов. конф. по электронике СВЧ: тез. докл. – Минск, 1969. – С. 120–122.

3. О синфазном и «ловистом» возбуждении колебаний в генераторе с открытым резонатором / Г. Д. Богомолов, А. И. Бородкин, В. С. Куш и др. // Там же. – С. 41–43.
4. Балаклицкий И. М. О работе ГДИ в режиме ЛОВ / И. М. Балаклицкий, В. Г. Курин, Б. К. Скрынник // Укр. физ. журн. – 1970. – 15, № 5. – С. 717–724.
5. Лебедев И. В. Техника и приборы СВЧ: в 2 т. Т. 2 / И. В. Лебедев. – М.: Высш. школа, 1972. – 370 с.
6. Особенности работы ГДИ на высших модах открытого резонатора / Ю. И. Евдокименко, К. А. Лукин, И. Д. Ревин, Б. К. Скрынник // Журн. техн. физики. – 1982. – 52, вып. 3. – С. 525–526.
7. Об одной особенности преобразования энергии в генераторах дифракционного излучения – лазерах на свободных электронах / Ю. И. Евдокименко, К. А. Лукин, И. Д. Ревин и др. // Докл. АН СССР. – 1983. – 268, № 4. – С. 853–856.
8. Корнеев В. К. Экспериментальное исследование явления автостабилизации частоты в генераторах дифракционного излучения / В. К. Корнеев, В. Г. Курин // Радиопизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2007. – 12, № 2. – С. 389–393.

Рукопись поступила 14.08.2012 г.

V. G. Kurin

EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE DUAL-FREQUENCY MODES IN DIFFRACTION RADIATION OSCILLATOR

Currently, multi-frequency signals are applied in multi-channel communication systems and multi-frequency RLS. The use of multi-frequency radar systems increase the efficiency of detection, recognition and distinction of objects, which significantly improves the accuracy of determining the coordinates of group goals and plays a significant role in the development of intelligent radar systems for automatic object identification. For the radar image formation the range and the frequency spacing of the shaper (oscillator) of the probing signals are of equal importance. Frequency spacing supports to the radar images shape that are similar in visual perception and accustomed to humans. In the tested oscillator frequency spacing can be adjusted by changing the anode voltage, which is undoubtedly one of the conditions causing the high-performance of dual-frequency millimeter-wave radar. The task of the oscillator excitation in the two frequencies is solved by changing the conditions for the simultaneous excitation of the oscillator in two modes, namely, the diffraction radiation mode, and the so-called leddertron mode. In both of these modes energy from the open resonator can be displayed on the fast (“volume”) waves through the aperture coupling, made in one of the mirrors (“top”) of the open resonator. It turned out that the specified modes in the oscillator at different frequencies are excited when in open resonator the resonant mode is excited, which forms two opposite-field spot in the space interaction (in the direction of the electron beam). In this case, the electron beam is converted from a single thread in the two-line, which results in stable operation of the oscillator at the two frequencies. The experimental results show the stability and efficiency of the oscillator at the same time in these modes. Moreover, the spacing generated frequencies can be changed by varying the anode voltage. Research results extend the functionality of the oscillators in the various fields of science and technology. In particular, it is interesting to investigate the possibility (or impossibility) of matching the frequency of these modes.

Key words: diffraction radiation mode, surface waves modes, dual-frequency mode, frequency difference, electron wave interference.

В. Г. Курин

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ДВОЧАСТОТНИХ РЕЖИМІВ В ГЕНЕРАТОРАХ ДИФРАКЦІЙНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

В даний час багаточастотні сигнали знаходять застосування в багатоканальних системах зв'язку і багаточастотних радіолокаційних станціях (РЛС). Використання багаточастотних РЛС підвищує ефективність виявлення, розпізнавання і розрізнення об'єктів, що істотно підвищує достовірність визначення координат групових цілей і грає не останню роль у розробці інтелектуальних радіолокаційних систем автоматичного розпізнавання об'єктів. Для формування радіолокаційного зображення важливе значення має не тільки діапазон, але і рознос частот формувача (генератора) зондувальних сигналів. Рознос частот сприяє формуванню радіолокаційних зображень, які виявляються близькими по візуальному сприйняттю і звичні для людини. У досліджуваному генераторі рознос частот можна регулювати шляхом зміни анодної напруги, що, безперечно, є однією з умов, що обумовлюють високоефективну роботу двочастотних РЛС міліметрового діапазону. Завдання по збудженню в генераторі двох частот

вирішувалося шляхом підбору умов для одночасного збудження в генераторі двох режимів, а саме, режиму дифракційного випромінювання і так званого леддертронного режиму. В обох цих режимах енергію з об'єму відкритого резонатора можна виводити на швидких (об'ємних) хвилях за допомогою отвору зв'язку, виконаному в одному з дзеркал («верхньому») відкритого резонатора. Виявилось, що в генераторі збуджуються на різних частотах зазначені режими у випадках, коли у відкритому резонаторі збуджується резонансна мода, що утворює у просторі взаємодії (в напрямку руху електронного потоку) дві протифазні плями поля. У цьому випадку електронний потік перетворюється з однопотокового на двопотоковий, що й обумовлює стійку роботу генератора на двох частотах. Експериментальні результати показали стійкість і ефективність одночасної роботи генератора в зазначених режимах. Причому, рознос частот, що генеруються, можна було змінювати шляхом зміни анодної напруги. Результати досліджень розширюють функціональні можливості застосування генераторів в різних галузях науки і техніки. Зокрема, становить інтерес дослідження можливості (або неможливості) збігу частот зазначених режимів.

Ключові слова: режим дифракційного випромінювання, режим поверхневих хвиль, двочастотний режим, різниця частот, інтерференція електронних хвиль.