

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

РАДИОФИЗИКА

АВТОРСКИЙ ОТТИСК

1990

ТОМ 33

ИЗДАНИЕ ГОРЬКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
И НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО
РАДИОФИЗИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

УДК 621.985.6(088.8)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕДУЦИРОВАННОЙ ПЛАЗМЕННОЙ ЧАСТОТЫ ЭЛЕКТРОННОГО ПОТОКА

Г. С. Воробьев, А. Я. Кириченко, А. И. Цвык, Л. И. Цвык

Описана новая методика измерения динамических характеристик электронного потока в приборах СВЧ *O*-типа, основанная на использовании механизма преобразования энергии электронов в энергию дифракционного излучения. Приводятся результаты измерений коэффициента редукации электронного потока по предложенной методике, которые сравниваются с аналогичными измерениями, основанными на использовании переходного излучения электронного потока.

Информация о статических и динамических характеристиках электронного потока (ЭП) в приборах СВЧ является основополагающей при их конструировании и оптимизации выходных параметров. В этом плане существует большое количество теоретических и экспериментальных работ, которые достаточно полно обобщены в ряде монографий и обзоров [1-3]. Из экспериментальных следует выделить методы, использующие диафрагмы, зонды и объемные резонаторы. Эти методы нашли широкое применение в длинноволновой области СВЧ диапазона, однако их эффективность уменьшается по мере укорочения длины волны. За последние годы успешно развиваются фотометоды измерения структуры ЭП, основанные на использовании свечения оптического диапазона, возникающего при падении электронов на металлическую поверхность [4]. В работе [5] показана возможность применения явления переходного излучения для изучения динамических характеристик модулированного ЭП. Этот способ обладает тем преимуществом, что позволяет измерять в электровакуумных приборах коротковолновой области СВЧ диапазона динамические характеристики потока в дальней зоне, т. е. не внося в него возмущений. Однако такой способ обладает сравнительно низкой точностью и малой разрешающей способностью, что обусловлено широкой диаграммой, слабой когерентностью и низкой интенсивностью переходного излучения. В работах [6, 7] показано, что обширную информацию об электронно-волновых процессах, протекающих в модулированном ЭП, несет в себе дифракционное излучение (ДИ), возбуждаемое этим ЭП при пропускании его вблизи периодической структуры.

В данной работе описана новая методика [8] измерения динамических характеристик ЭП, которая основана на анализе ДИ, возбуждаемого волнами пространственного заряда модулированного потока, пропускаемого вблизи периодической структуры. Проводятся результаты измерений редуцированной плазменной частоты в зависимости от плотности тока и ускоряющего напряжения, которые были получены в сантиметровом диапазоне для двух типов периодических структур: гребенки и пластины с кольцами. Поскольку для ДИ характерны большая интенсивность, высокая когерентность и малая ширина диаграмм излучения, то описанная методика, по сравнению с известными неконтактными способами, позволяет значительно повысить точность и разрешающую способность измерений.

1. Методика измерений. Известно, что при модуляции электронного потока СВЧ полем в нем возбуждается пространственно-временной

спектр электронных волн, распространяющихся с различными фазовыми скоростями [2]. Если такой ЭП пропустить вблизи периодической структуры, то можно возбудить ДИ в направлениях, связанных с фазовыми скоростями распространения волн пространственного заряда (ВПЗ) и параметрами структуры. Эта связь определяется из условий возбуждения ДИ [6]. Так, в частности, для волн низшего порядка — медленной (МВПЗ) и быстрой (БВПЗ), имеющих максимальную амплитуду конвекционного тока, получим

$$\cos \Gamma_n^\pm = c/v - 2\pi c|n|/\omega l \pm R\omega_p c/\omega v, \quad (1)$$

где Γ_n^+ , Γ_n^- — углы максимальной интенсивности диаграмм направленности ДИ; R — коэффициент редукции или фактор уменьшения плазменной частоты [2]; l — период структуры; $\omega = 2\pi f$ — частота модуляции ЭП; $\omega_p = 1,83 \cdot 10^{10} i_0^{1/2} U_0^{-1/4}$ — плазменная частота неограниченного потока; i_0 , U_0 — плотность тока и ускоряющее напряжение; $v = \sqrt{2eU_0/m}$ — скорость электронов на выходе модулятора; c , e , m — скорость света, заряд и масса электрона соответственно; $n = -1, -2, -3, \dots$ — номер пространственной дифракционной гармоники.

На рис. 1 (см. на вклейке) приведены различные варианты возбуждения диаграмм направленности ДИ при пропускании модулированного ЭП 1 вблизи периодической структуры 2.

Из анализа соотношения (1) следует, что при малых значениях плотности тока

$$i_0 \lesssim 0,46 \cdot 10^{-2} f^2 U_0^{3/2} \sin^2 \delta \quad (2)$$

влияние ВПЗ на направление ДИ незначительно и ЭП возбуждает однопестковую диаграмму направленности излучения (рис. 1а):

$$\Gamma_n^+ \approx \Gamma_n^- \approx \Gamma_n^0 = \gamma_n \pm \delta,$$

где

$$\gamma_n = \arccos(c/v - 2\pi c|n|/\omega l), \quad \delta \approx (0,5 \div 2) \cdot 10^{-2} \pi.$$

Следовательно, устанавливая плотность тока (2), мы имеем начальный (базовый) угол излучения Γ_n^0 , относительно которого необходимо проводить все последующие измерения.

Увеличивая плотность тока относительно значения (2), получают двухпестковую диаграмму 4, 5 направленности излучения (рис. 1б), возбуждаемого медленной и быстрой ВПЗ. Измеряют углы α^+ , α^- отклонений максимальной интенсивности полученных диаграмм относительно начального угла Γ_n^0 и находят углы $\Gamma_n^+ = \Gamma_n^0 - \alpha^+$, $\Gamma_n^- = \Gamma_n^0 + \alpha^-$. Зная углы Γ_n^+ , Γ_n^- , из соотношения (1) определяют коэффициент редукции плазменной частоты:

$$R = 3,4 \cdot 10^{-13} f U_0^{3/4} i_0^{-1/2} (\cos \Gamma_n^+ - \cos \Gamma_n^-), \quad (3)$$

где частота f измеряется в герцах, U_0 — в вольтах, i_0 — в А/см².

Из соотношений (1), (3) следует, что коэффициент редукции плазменной частоты можно также определить, измеряя один из углов Γ_n^+ или Γ_n^- . В этом случае формула (3) преобразуется к следующему виду для углов Γ_n^+ и Γ_n^- соответственно:

$$R = 6,8 \cdot 10^{-13} f U_0^{3/4} i_0^{-1/2} (\cos \Gamma_n^+ - \cos \Gamma_n^0); \quad (4a)$$

$$R = 6,8 \cdot 10^{-13} f U_0^{3/4} i_0^{-1/2} (\cos \Gamma_n^0 - \cos \Gamma_n^-), \quad (4б)$$

где для углов излучения выполняется равенство $\cos \Gamma_n^+ + \cos \Gamma_n^- = 2 \cos \Gamma_n^0$. Формулами (4) удобно пользоваться, если одна из диаграмм 4 или 5

близко прилежит к поверхности периодической структуры (рис. 1 в, г; $\alpha^{\pm} \approx \Gamma_n^0 - \theta^0$, где $2\theta^0$ — ширина диаграммы направленности ДИ).

Следует отметить, что если один из углов α^{\pm} (рис. 1 в, г) или оба эти угла одновременно (рис. 1 д, е — пунктирные диаграммы 4, 5) близко прилегают к поверхности дифракционной решетки, то путем уменьшения ускоряющего напряжения от величины U_0 до значения U_1 или увеличения U_0 до значения U_2 поворачивают диаграммы 4, 5 по направлению к углу Γ_n^0 , измеряют углы поворота β^{\pm} и определяют коэффициент редукции по формулам, следующим из общего соотношения (3) или из частных соотношений (4):

$$R = 6,8 \cdot 10^{-13} f U_1^{3/4} i_0^{-1/2} [\cos(\Gamma_n^0 - \beta^-) - \cos(\Gamma_n^- - \beta^-)]; \quad (5a)$$

$$R = 6,8 \cdot 10^{-13} f U_2^{3/4} i_0^{-1/2} [\cos(\Gamma_n^+ + \beta^+) - \cos(\Gamma_n^0 + \beta^+)]. \quad (5b)$$

Точность измерения углов Γ_n^{\pm} , Γ_n^0 , β^{\pm} и разрешающая способность (минимальное расстояние между двумя первыми измеряемыми максимумами интенсивности диаграмм направленности ДИ) метода преимущественно зависят от ширины $2\theta^0$ диаграммы излучения, которая на уровне половинной мощности оценивается по формуле [9]

$$2\theta^0 = 65c / fNl,$$

где N — количество периодов структуры. Следовательно, всегда можно выбрать такую длину периодической структуры, при которой диаграмма излучения будет иметь незначительную ширину, что указывает на практическую возможность измерения углов Γ_n^{\pm} , Γ_n^0 , β^{\pm} с высокой точностью и разрешающей способностью. Так, если эти углы измерять с точностью до 1° , то в предложенном методе относительная погрешность определения коэффициента редукции плазменной частоты не превышает 3%. Это более, чем в два раза точнее метода измерения коэффициента R по переходному излучению [5].

2. Экспериментальная установка. Экспериментальные исследования проводились в сантиметровом диапазоне волн, что позволило сравнить результаты измерений по предложенному способу с измерениями по переходному излучению [5]. Общий вид экспериментальной установки приведен на рис. 2. Электронный поток 1, создаваемый пушкой 2, модулировался тороидальным резонатором 3, пропускался вдоль периодической структуры 4 и рассеивался на коллекторе 5. При эксперименте использовались периодические структуры двух видов: гребенка и пластина с кольцами (на рис. 2 показана вторая периодическая структура). Периоды структур выбирались из соотношения $l(\text{мм}) = 5,94 \cdot 10^8 \sqrt{U_0(\text{В})} / f(\text{Гц})$ для основной пространственной дифракционной гармоники ($n = -1$), что соответствует условию возбуждения монохроматическим потоком ДИ по нормали к поверхности структуры. Основные параметры этих структур и ЭП приведены в табл. 1

Таблица 1

Структура	Длина, мм	Период, мм	Ширина щели, мм	Поперечный размер, мм	Поток	Сечение потока, мм ² ; радиус, мм
Гребенка	65	2,6	1	5	Ленточный	3×0,4
Пластина с кольцами	60	3,0	1,5	3×6	Цилиндрический	2,6

Резонаторы 3 отличались только формой и размерами отверстия, через которые проходил ЭП. Механическая настройка резонаторов 3

Позволяла изменять их собственную частоту в диапазоне $f = 8,7 \div 10$ ГГц. Периодическая структура 4, электронная пушка 2, резонатор 3, коллектор 5 размещались в вакуумной оболочке 6. Источником опорного сигнала резонатора 3 служил отражательный клистрон 7 трехсантиметрового диапазона, перестраиваемый в процессе измерений в соответствии с изменением собственной частоты модулирующего резонатора 3. Дифракционное излучение принималось рупорной антенной 8 (80×100 мм) с детекторной секцией, расположенной на расстоянии 900 мм от структуры. Сигнал излучения после детектора через усилитель 9 поступал на осциллограф или микроамперметр 10. Макет-анализатор располагается в зазоре между полюсными наконечниками электромагнита 11. Полюсные наконечники электромагнита ограничивали возможность проведения измерений при углах излучения $150^\circ \leq \Gamma_{-1}^0 \leq 30^\circ$. Для уменьшения влияния диаграммы ДИ отраженных СВЧ сигналов полюсные наконечники и часть стеклянной колбы покрывались поглотителем 12. Ускоряющее напряжение, создаваемое источником питания 13, менялось в интервале $0 \div 3500$ В, плотность тока i_0 составляла $(0,05 \div 4)$ А/см².

Таким образом, осуществляя управление скоростью электронов при постоянной плотности тока и частоте модуляции или же при постоянном напряжении и частоте модуляции плотностью тока, можно плавно вводить волны пространственного заряда в синхронизм с гармониками периодической структуры и изменять направление диаграмм ДИ.

3. Результаты измерений. Экспериментально установлено, что при плотностях тока $i_0 \approx (0,05 \div 0,1)$ А/см² формируется однолепестковая диаграмма 3 (рис. 1а) со значением $2\theta \approx 30^\circ$, что удовлетворительно согласуется с теоретическими расчетами по соотношениям (1), (6). Максимальная интенсивность излучения этой диаграммы наблюдалась под углом $\Gamma_{-1}^0 = \pi/2 \pm \delta$ ($\delta \approx 1-2^\circ$) при следующих параметрах: 1 — $f = 9,74$ ГГц, $U_0 = 1820$ В — для гребенки; 2 — $f = 8,9$ ГГц, $U_0 = 2000$ В — для пластины с кольцами.

При увеличении плотности тока (путем увеличения накала электронной пушки) наблюдалось смещение максимальной интенсивности диаграмм излучения. На рис. 3а, б показаны результаты экспериментальных измерений углов излучения $\Gamma_{\pm 1}^\pm$ и редуцированной плазменной частоты $f_R = \omega_R/2\pi$ от плотности тока i_0 для гребенки (крестики) и для пластины с кольцами (точки). Здесь же на рис. 3б для сравнения приводятся теоретические графики 1, 2 нередуцированной плазменной частоты f_p , рассчитанные при двух напряжениях $U_0 = 1820$ В (гребенка) и $U_0 = 2000$ В (пластина с кольцами). Измерения показывают, что в данном случае при изменении плотности тока в пределах $i_0 = 0,5 \div 1$ А/см² коэффициент редукиции $R = 0,79 \pm 0,02$, а абсолютная погрешность определения эффективной плазменной частоты примерно составляет ± 12 МГц (доверительный интервал в точках измерения показан вертикальными отрезками). Отметим, что для плотности тока $i_0 > 1$ А/см², вследствие относительно широких диаграмм излучения, одновременное измерение углов $\Gamma_{\pm 1}^\pm$ затруднялось. Поэтому измерения проводились путем уменьшения или увеличения ускоряющего напряжения. При токах $i_0 = (1,5 \div 2)$ А/см² получены диаграммы направленности, соответствующие возбуждению излучения только медленной (рис. 1е) или быстрой (рис. 1д) волнами пространственного заряда. Коэффициент редукиции в этом случае вычислялся по формулам (5а), (5б). Из теоретических и измеренных графиков следует, что эффективная плазменная частота f_R существенно отличается от значения f_p неограниченного ЭП. При этом рассматриваемые ленточный электронный поток над гребенкой и цилиндрический поток в канале с кольцевой электродинамической системой, возбуждающие ДИ под углом $\Gamma_{-1}^0 \approx 90^\circ$, имеют близкие плазменные частоты. Для других ускоряющих напряжений или частот модуляции (ДИ направлено под углами $\Gamma_{-1}^0 < 90^\circ$ или $\Gamma_{-1}^0 > 90^\circ$) коэффи-

циенты редукции и плазменные частоты этих потоков могут заметно отличаться.

На рис. 4 показано, как изменяется интенсивность ДИ и коэффициент редукции от ускоряющего напряжения для цилиндрического модулированного потока, движущегося в канале периодической структуры «пластина с кольцами». Здесь вверху приведены экспериментальные зависимости распределения в дальней зоне интенсивности ДИ от ускоряющего напряжения при малой и большой плотностях тока ($\Gamma_{-1}^0 = 90^\circ$, $f = 8,9$ ГГц; кривые 1 — $i_0 = 0,1$ А/см²; 2 — $i_0 = 1,2$ А/см²); пунктирные вертикальные линии разделяют области возбуждения поверхностных электромагнитных волн периодической структуры (заштрихованная область) и отрывающихся волн ДИ, а линия сдвига фаз на периоде структуры $\varphi = 2\pi$ соответствует ускоряющему напряжению пучка $U_0 = 2000$ В, при котором наблюдается излучение под углом $\Gamma_{-1}^0 = 90^\circ$ (особенности возбуждения поверхностных и отрывающихся волн в открытой электродинамической системе (рис. 2) достаточно подробно изучены в работе [10]). Внизу на рис. 4 приводятся измеренные предложенным методом значения коэффициентов редукции при различных ускоряющих напряжениях и теоретическая зависимость R от U (кривая 3), рассчитанная по данным работы [2] (с. 29, рис. 1. 5) для цилиндрического потока, помещенного в трубку дрейфа. Из графиков 1, 2 следует, что для плотности тока $i_0 = 0,1$ А/см² при $U_0 = 2000$ В формируется однолепестковая диаграмма с максимальной интенсивностью ДИ в направлении $\Gamma_{-1}^0 = 90^\circ$. При $i_0 > 0,1$ А/см² наблюдается эффект расщепления диаграммы на отдельные лепестки, соответствующие излучению медленной и быстрой электронными волнами пространственного заряда. В частности, при $i_0 = 1,2$ А/см² максимальная интенсивность в диаграмме ДИ регистрируется под углами $\Gamma_{-1}^+ = 62^\circ$ и $\Gamma_{-1}^- = 118^\circ$, что по формуле (3) соответствует коэффициенту редукции $R = 0,78 \pm 0,02$. Отметим, что для рассматриваемых параметров системы измеренные значения коэффициентов редукции цилиндрического потока в периодической структуре «пластина с кольцами» достоверно близки к теоретическим значениям фактора уменьшения плазменной частоты ЭП, движущегося в трубке дрейфа, т. е. в плане вычисления коэффициента редукции приведенная в работе [2] теоретическая модель цилиндрического потока в трубке дрейфа неплохо моделирует реальный поток электронов в электродинамической системе типа «пластина с кольцами».

Таким образом, проведенные исследования указывают на высокую эффективность использования дифракционного излучения для определения коэффициента редукции, плазменной частоты и других динамических параметров ЭП, которые необходимы при решении задач оптимизации электровакуумных приборов О-типа.

1) Описанный способ по сравнению с известными неконтактными способами позволяет примерно в два раза повысить точность и разрешающую способность измерений. При этом с увеличением частоты модуляции точность и разрешающая способность измерений возрастают, что связано с уменьшением ширины диаграмм направленности излучения.

2) Предложенная в [6] экспериментальная установка позволяет эффективно реализовать данный способ и для измерений динамических характеристик ЭП приборов миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн, в частности генераторов дифракционного излучения [9].

ЛИТЕРАТУРА

1. Евтифеева Е. С., Кабардина Х. А. // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Электроника. 1961. Вып. 8. С. 54.
2. Шевчик В. Н., Шведов Г. Н., Соболева А. В. Волновые и колебательные явления в электронных потоках на сверхвысоких частотах.—Саратов: Гос. ун-т, 1962.—335 с.

3. Александров Г. И., Заморозков Б. М., Калинин Ю. А. и др. // Обзоры по электронной технике. Сер. Электроника СВЧ. 1973. Вып. 8 (108). — 206 с.
4. Балаклицкий И. М., Белоусов Е. В., Корж В. Г. // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1982. Т. 25. № 5. С. 38.
5. Еремка В. Д., Корищенко А. Я., Лысова Л. А. // Радиотехника и электроника. 1977. Т. 22. № 1. С. 153.
6. Вертий А. А., Цвык А. И., Шестопапов В. П. // ДАН СССР. 1985. Т. 280. № 10. С. 343.
7. Вертий А. А., Иванченко И. В., Нестеренко А. В. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1985. Т. 28. № 11. С. 1443.
8. А. С. № 1077501 СССР. Воробьев Г. С., Кириченко А. Я., Цвык А. И. и др.—Опубл. в Б. И. 1985. № 31. С. 248.
9. Шестопапов В. П. Дифракционная электроника.—Харьков: Вища школа, 1976.—231 с.
10. Кириченко А. Я. Препринт ИРЭ АН УССР № 113. Харьков, 1979.

Сумской филиал Харьковского
политехнического института

Поступила в редакцию
6 января 1989 г.,
после доработки
3 апреля 1990 г.

EXPERIMENTAL DEFINITION OF THE REDUCED PLASMA FREQUENCY OF THE ELECTRON FLOW

G. S. Vorob'ev, A. Ya. Kirichenko, A. I. Tsvyk, L. I. Tsvyk

A new method of measurement of dynamic characteristics of the electron flow which is based on the analysis of diffraction radiation excited by waves of the space charge of the modulated electron flow transmitting near the periodic structure has been described. The results are given of measurements of the ratio of plasma frequency reduction depending on the current density and accelerating voltage which have been obtained in the centimetre range for two types of periodic structures, i. e. a comb and a plate with rings. The results obtained are compared with the measurements of the ratio of reduction based on the using the transition radiation of the electron flow.

Аннотации депонированных статей

УДК 551.46.

О ПРОСТРАНСТВЕННОМ РАСПРЕДЕЛЕНИИ ИНТЕНСИВНОСТИ В ИЗОБРАЖЕНИИ НА ТРАССЕ С ОТРАЖЕНИЕМ ОТ СЛУЧАЙНО-НЕРОВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

М. Л. Белов, В. М. Орлов

В статье исследуется пространственное распределение интенсивности за приемной линзой на трассе с отражением от случайно-неровной поверхности. С использованием метода Кирхгофа получено выражение для средней интенсивности в изображении, когда влиянием затенений одних элементов поверхности другими можно пренебречь, а падающее на поверхность и принимаемое излучение проходят по разным неоднородностям среды. Показано, что случайно-неровный характер отражающей поверхности может приводить к уменьшению размера изображения (по сравнению с плоской ламбертовской поверхностью).

Статья депонирована в ВИНИТИ,
рег. № 6348-В90. Деп. от 20 декабря 1990 г.