

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

---

РАДИОТЕХНИКА  
И  
ЭЛЕКТРОНИКА

Том 36

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

10

---

МОСКВА · 1991

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

**МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА РЕДУКЦИИ  
ПЛАЗМЕННОЙ ЧАСТОТЫ ЭЛЕКТРОННОГО ПОТОКА**

Актуальной задачей вакуумной электроники является экспериментальное исследование характеристик электронного потока (ЭП) в статических и динамических режимах [1]. В данной работе предлагается использовать эффект дифракционного излучения (ДИ) модулированного ЭП для определения одной, часто используемой характеристики пучка — коэффициента редукции плазменной частоты [2].

Предлагаемый метод основан на электронно-волновом представлении процессов, происходящих в электровакуумных приборах СВЧ, которые указывают на возбуждение в ограниченных ЭП бесконечной последовательности волн плотности пространственного заряда, распространяющихся с различными фазовыми скоростями [3]. Наибольший интерес представляет пара волн низшего порядка с фазовыми скоростями

$$(1) \quad v_{\pm} = v_0 / (1 \pm \omega_q / \omega),$$

где  $v_0 = \sqrt{2\eta_e U_0}$  — скорость невозмущенного ЭП,  $\omega_q = R\omega_p$  — эффективная плазменная частота,  $R$  — фактор уменьшения плазменной частоты (или коэффициент редукции),  $\omega_p = \sqrt{\eta_e i_0 \epsilon_0 v_0}$  — собственная частота плазмы неограниченного ЭП,  $\eta_e = e/m$  — отношение заряда  $e$  электрона к его массе  $m$ ,  $\epsilon_0$  — диэлектрическая постоянная среды,  $i_0$  — статическая плотность тока,  $\omega$  — частота модуляции ЭП, знаки "±" соответствуют фазовым скоростям медленной  $v_{\pm}^+$  и быстрой  $v_{\pm}^-$  волн пространственного заряда (ВПЗ),  $U_0$  — ускоряющее напряжение.

Если модулированный ЭП движется вблизи периодической структуры, то различие в фазовых скоростях ВПЗ приведет к эффекту расщепления диаграммы направленности ДИ [4]. В этом случае максимальная интенсивность ДИ медленной (МВПЗ) и быстрой (БВПЗ) ВПЗ направлена под углами (рис. 1):

$$(2) \quad \Gamma_n^{\pm} = \arccos(\cos \Gamma_n^0 \pm \omega_q / \omega \beta_0),$$

где  $\Gamma_n^0 = \arccos(1/\beta_0 - |n|/\kappa)$  — угол ДИ идеализированного ЭП [5],  $\beta_0 = v_0/c$ ,  $c$  — скорость света,  $\kappa = l/\lambda$ ,  $l$  — период дифракционной решетки,  $\lambda = 2\pi c/\omega$  — длина волны модуляции ЭП,  $n = -1, -2, \dots$  — номер пространственной гармоники ДИ.

Из уравнения (2) видно, что если пренебречь степенью влияния пространственного заряда на ДИ, то  $\Gamma_n^{\pm} = \Gamma_n^0$ , т.е. диаграммы направленности излучения МВПЗ и БВПЗ совпадают с диаграммой излучения идеализированного потока (рис. 1, диаграмма 3). В этом случае ДИ возбуждается при скоростях электронов

$$(3) \quad \frac{\kappa c}{|n| + \kappa} < v_0 < \frac{\kappa c}{|n| - \kappa}.$$

Возбуждение в потоке ВПЗ приводит к расщеплению диаграммы ДИ на два отдельных лепестка, расположенных примерно симметрично направлению  $\Gamma_n^0$  под

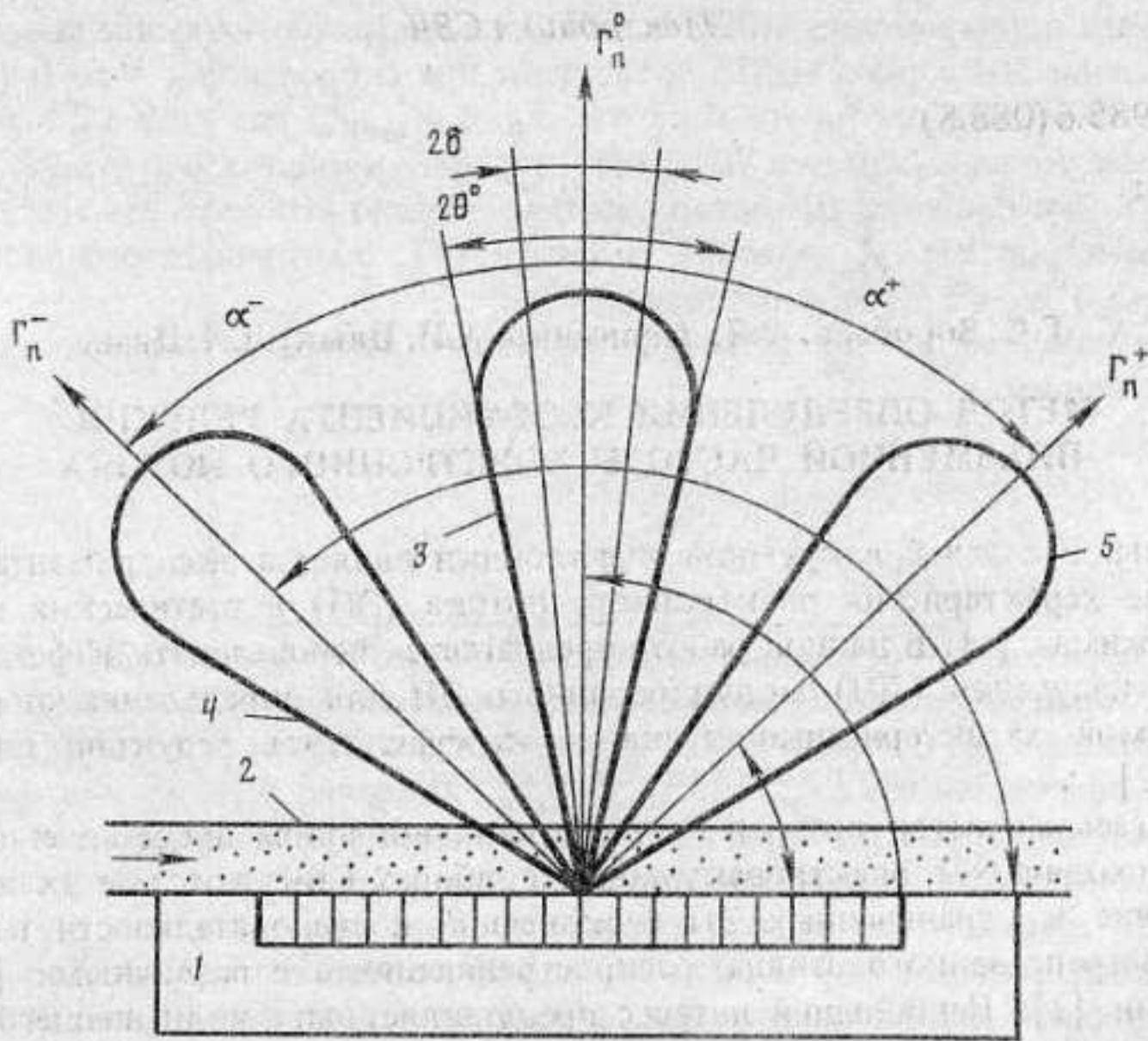


Рис. 1. Диаграммы направленности ДИ возбуждаемого модулированным ЭП: 1 – периодическая структура, 2 – ЭП, 3 – однолепестковая диаграмма при минимальном значении плотности тока  $i_0$ , 4, 5 – двухлепестковая диаграмма при увеличении плотности тока относительно  $i_0$ ,  $\Gamma_n^0$  – начальный угол излучения,  $\alpha^+$  и  $\alpha^-$  – углы излучения относительно  $i_0$ ,  $2\theta$  – ширина диаграммы

углами  $\Gamma_n^+ < \Gamma_n^0 < \Gamma_n^-$  (рис. 1, диаграммы 4, 5). Минимальное значение тока  $i_{\text{мин}}$ , при котором обнаруживается расщепление диаграммы направленности ДИ, определяется возможностью измерения минимального значения разностного угла  $2\delta = \Gamma_n^- - \Gamma_n^+$ . На практике можно положить  $2\delta_{\text{мин}} \approx 0,5\theta^0$ . Тогда из (2) при  $\kappa = |n|\beta_0$  следует, что

$$(4) \quad i_{\text{мин}} = 4\pi^2 \frac{\epsilon_0}{\eta_e} \frac{U_0}{\lambda^2} \sin^2 \frac{16\lambda}{Nl},$$

где  $2\theta^0 = 65\lambda/Nl$  – ширина диаграммы направленности отдельного лепестка ДИ (5),  $N$  – число периодов дифракционной решетки.

Для заданных параметров  $\kappa$ , длины решетки  $Nl$  и скорости  $U_0$  увеличение плотности тока  $i_0$  относительно значения (4) приводит к уменьшению угла  $\Gamma_n^+$  и увеличению  $\Gamma_n^-$ . В этом случае существуют максимальные (предельные) значения тока  $i_0 = i_{\text{макс}}$  возбуждения двухлепестковой диаграммы излучения. Эти значения токов зависят от выбранных параметров  $\kappa$ ,  $U_0$ , определяющих направление оси симметрии  $\Gamma_n^0$ , и находятся из соотношения (2) при условиях  $\Gamma_n^+ = 0$ ,  $\Gamma_n^- = \pi$ ,  $R = 1$ . В частности, предельное значение  $i_{\text{макс}}$  возбуждения двухлепестковой диаграммы ДИ достигается при  $U_0 = \kappa c/|n|$  и определяется соотношением

$$(5) \quad i_{\text{макс}} = 4\pi^2 \frac{\epsilon_0}{\eta_e} \frac{U_0}{\lambda^2}.$$

Следовательно, при условии  $\beta_0 = \kappa/|n|$  и плотности тока  $i_{\text{мин}} < i_0 < i_{\text{макс}}$  ДИ

возбуждается одновременно МВПЗ и БВПЗ симметрично направлению  $\Gamma_n^0 = \pi/2$ .

Возбуждение ДИ только МВПЗ происходит при скорости  $\mathcal{V}_0 = kc/(|n| - \kappa)$  в диапазоне изменения плотности тока  $0 < i_0 \leq 4i_{\text{макс}}$ , где угол  $\Gamma_n^0 = \pi$ ; в этом же диапазоне  $i_0$  возбуждается ДИ БВПЗ, но при скоростях  $\mathcal{V}_0 = kc/(|n| + \kappa)$ , где  $\Gamma_n^0 = 0$ . Эти свойства ДИ позволяют эффективно использовать его для измерения параметров  $\omega_q$ ,  $R$ , фазовой скорости (1), постоянных распространения  $h^\pm = (\omega \pm \omega_q)/\mathcal{V}_0$  и других характеристик ЭП.

Если предположить, что углы  $\Gamma_n^\pm$  известны (измерены экспериментально), то из (2) находим

$$(6) \quad \omega_q = \frac{1}{2} \omega \beta_0 (\cos \Gamma_n^+ - \cos \Gamma_n^-),$$

$$R = \omega_q / \omega_p.$$

Таким образом, на основании вышеизложенного предлагаемый метод может быть реализован путем выполнения следующих операций: устанавливают скорость модулированного ЭП согласно (3) и пропускают его вблизи периодической структуры; для плотностей тока  $i_{\text{мин}} < i_0 < i_{\text{макс}}$  измеряют углы  $\Gamma_n^\pm$  и по формулам (6) определяют параметры  $\omega_q$  и  $R$ . Метод является эффективным для определения динамических характеристик плоского, цилиндрического, полого и других сечений ЭП, движущегося вблизи различного вида периодических структур, используемых в приборах СВЧ О-типа. Это связано с тем, что условия возбуждения ДИ определяются параметрами  $\kappa$ ,  $\beta_0$ ,  $i_0$  и не зависят от геометрической формы ячеек, их глубины и других характеристик периодической структуры, которые преимущественно влияют на коэффициент связи и интенсивность ДИ.

Экспериментальные измерения  $R$  предложенным методом проводились в сантиметровом диапазоне, что позволило сравнить полученные результаты с известными измерениями по переходному излучению [6]. Установка для измерений содержала электронную пушку, модулятор пучка (тороидальный резонатор), приемник дифракционного излучения (рупорную антенну), подключенный к волноводно-измерительному тракту, и сменные периодические структуры двух видов: гребенку и пластину с кольцами. Периоды структур выбирались из соотношения  $l_{(\text{мм})} = 5,94 \cdot 10^8 \sqrt{U(\text{В})}/f$  (Гц) для основной гармоники ДИ ( $n = -1$ ), что соответствовало условию  $\Gamma_{-1}^0 = \pi/2$ . Предельные значения  $i_0$  оценивались по формулам (4), (5), которые в системе СИ преобразовываются к виду  $i_{\text{макс}} = 4 \cdot 10^{-4} U^{3/2} / \lambda^2$  (А/м<sup>2</sup>),  $i_{\text{мин}} = i_{\text{макс}} \sin^2(16\lambda/Nl)$ . Основные параметры структур и ЭП приведены в таблице.

Экспериментально установлено, что при плотностях тока  $i_0 \approx \approx (0,05 \dots 0,1)$  А/см<sup>2</sup> формируется однолепестковая диаграмма 3 (рис. 1) со значением  $2\theta \approx 30^\circ$ . Максимальная интенсивность излучения этой диаграммы наблюдалась под углом  $\Gamma_{-1}^0 = \pi/2 \pm \delta_{\text{мин}}$  ( $\delta_{\text{мин}} \approx 2,5 - 3^\circ$ ) для следующих параметров:  $f = 9,74$  ГГц,  $U_0 = 1820$  В — гребенка,  $f = 8,9$  ГГц,  $U_0 = 2000$  В — пластина с кольцами, что удовлетворительно согласуется с теоретическими оценками.

| Структура           | Длина, мм | Период, мм | Ширина щели, мм | Поперечный размер, мм | Поток          | Сечение и диаметр, мм |
|---------------------|-----------|------------|-----------------|-----------------------|----------------|-----------------------|
| Гребенка            | 65        | 2,6        | 1               | 5                     | ленточный      | 3 × 0,4               |
| Пластина с кольцами | 60        | 3,0        | 1,5             | 3 × 6                 | цилиндрический | 2,6                   |

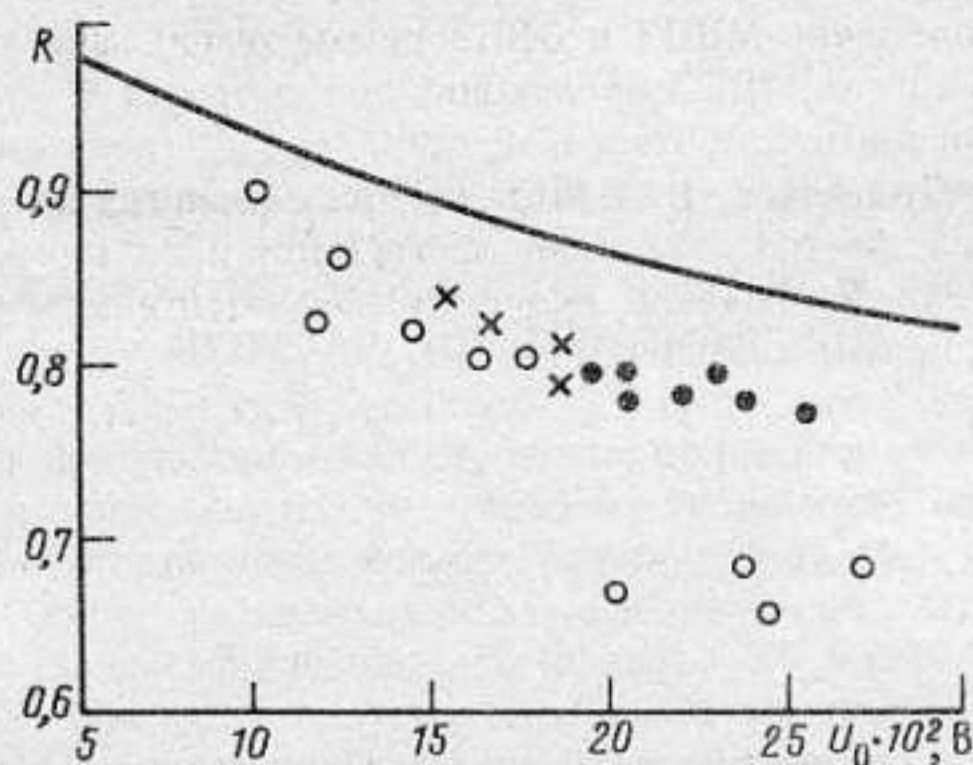


Рис. 2. Зависимость коэффициента редукции  $R$  от ускоряющего напряжения  $U_0$ : 1 — расчетная зависимость, 2 — эксперимент для гребенки, 3 — эксперимент для пластины с кольцами, 4 — результаты работы [6]

С изменением  $i_0$  в интервале  $(0,2 \dots 2)$  А/см<sup>2</sup> наблюдалась двухлепестковая диаграмма направленности излучения, которая позволяла по формуле (6) определять значения  $R$  при заданных  $i_0$  и  $U_0$ . В частности, на рис. 2 приведены результаты измерений коэффициента  $R$  от ускоряющего напряжения. Здесь же показаны теоретический график и данные измерений по переходному излучению [6]. Из рисунка видно, что описанный способ дает более достоверные данные о величине коэффициента редукции плазменной частоты ЭП. Так, в частности, максимальная относительная погрешность измерения  $R$  в 2 раза меньше, чем по переходному излучению [6], и составляет 3–4%. Кроме того, точность измерений и динамический диапазон по току возрастают с укорочением  $\lambda$ , что обусловлено уменьшением ширины диаграмм излучения и увеличением предельных значений  $i_{\text{макс}}$  согласно соотношения (5).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров Г.И., Заморозков Б.М., Калинин Ю.А. и др. // Обзоры по электронной технике. Сер., Электроника СВЧ. 1973. Вып. 8 (108). С. 3.
2. Воробьев Г.С., Кириченко А.Я., Цвык А.И. и др. Способ определения коэффициента редукции плазменной частоты электронного потока в приборах СВЧ: А.с. 1077501 СССР // Б.И. 1985. № 31. С. 248.
3. Шевчик В.Н., Шведов Г.Н., Соболева А.В. Волновые и колебательные явления в электронных потоках на сверхвысоких частотах. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1962.
4. Вергий А.А., Цвык А.И., Шестопалов В.П. // Докл. АН СССР. 1985. Т. 280. № 10. С. 343.
5. Шестопалов В.П. Дифракционная электроника. Харьков: Выща шк., 1976.
6. Еремка В.Д., Кириченко А.Я., Лысова Л.А. // РЭ. 1977. Т. 22. № 1. С. 153.

Поступило в редакцию  
24.10.89

После исправления  
20.12.90