

П.П. МАКСИМОВ, А.И. ЦВЫК, академик АН УССР В.П. ШЕСТОПАЛОВ

### ЭФФЕКТ ДОПЛЕРОВСКОГО ВЫСВЕЧИВАНИЯ ЭНЕРГИИ ЗАМЕДЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В ГЕНЕРАТОРЕ ДИФРАКЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Упрощенная схема генератора дифракционного излучения (ГДИ), как известно [1], представляет собой полусферический открытый резонатор (ОР), в сферическом зеркале которого имеется волноводный вывод энергии в нагрузку, а на плоском зеркале нанесена, частично его покрывая, дифракционная решетка (ДР). Над ДР вдоль ее оси пролетает электронный поток, порождая дифракционное излучение (ДИ). Возникшее ДИ отражается от сферического зеркала и возвращается обратно на решетку, модулируя поток по скорости и плотности заряда. При этом преобразование кинетической энергии электронов в энергию ВЧ-поля ОР происходит вблизи ДР, а эффективность такого энергообмена в значительной степени зависит от направления (угла) распространения ДИ, определяемого доплеровским соотношением (условием излучения, [1]):

$$(1) \quad \cos \vartheta_p = \frac{c}{v_e} + p \frac{\lambda}{l},$$

где  $\vartheta_p$  — угол между вектором скорости  $v_e$  электронов и волновым вектором излучаемой волны,  $p$  — индекс пространственной гармоники,  $l$ ,  $\lambda$  — период ДР и длина волны излучения,  $c$  — скорость света.

В процессе энергообмена часть электронов замедляется, что приводит к изменению направления ДИ, а следовательно, и условий запитки ОР этим излучением. При определенных условиях замедление скорости электронов может привести к "высвечиванию" ДИ из ОР в свободное пространство, что вызывает изменение энергетических и частотных характеристик ГДИ. В дальнейшем это явление будем называть эффектом доплеровского высвечивания энергии замедленных электронов (ЭДВ). В данной работе впервые на основании численных расчетов уточненной системы самосогласованных уравнений ГДИ проводится анализ механизма возникновения ЭДВ, а также результаты экспериментальных исследований этого эффекта.

1. Рассматривая ГДИ как разновидность лазеров на свободных электронах [2, 3], ограничимся анализом только тех частиц, которые излучают на фиксированной частоте в ограниченном секторе наблюдения диаграммы излучения. В соответствии с этим решение задачи будем проводить при следующих предположениях: а) спектр собственных колебаний ОР достаточно разрежен для того, чтобы ограничиться случаем генерации прибора в одночастотном режиме; б) движение электронного потока одномерное и нерелятивистское; в) время пролета электронами пространства взаимодействия мало по сравнению с характерным временем нарастания амплитуды поля ОР; г) изменение электронным потоком пространственного распределения поля ОР незначительно вследствие высокой добротности ОР; д) реализовано отражение ДИ от сферического зеркала ОР и возврат его на ДР при выполнении условия

$$(1,1) \quad R_3(\xi) < \cos \vartheta_p(\xi) < R_2(\xi),$$

где параметр, характеризующий геометрическое ограничение ОР,

$$R_2 = \frac{D - \xi}{\sqrt{(D - \xi)^2 + (R_1 - a)^2}}, \quad R_3 = \frac{-\xi}{\sqrt{\xi^2 + (R_1 - a)^2}};$$

$D$  – диаметр основания шарового сегмента сферического зеркала (нормированный на период ДР);  $\xi$  – безразмерная продольная координата;  $N_l$  – число периодов ДР;  $R_1$  – расстояние между зеркалами ОР;  $a$  – прицельное расстояние.

С учетом указанных предположений и соотношений (1) самосогласованную систему уравнений стационарных колебаний ГДИ представим в следующем виде:

$$(2,1) \quad \dot{F} = \frac{-il}{2(\omega - \omega_r)E_0 N_r} \int_0^{N_l} I_\omega(\xi) f(\xi) \cos k\xi d\xi,$$

$$(2,2) \quad \frac{\partial \theta}{\partial \xi} = \psi_0 [(1 - \eta_e)^{-1/2} - 1],$$

$$(2,3) \quad \frac{\partial \eta_e}{\partial \xi} = \text{Re}[\dot{F} f(\xi) \cos k\xi e^{-i(\varphi_0 + \psi_0 \xi + \theta)} + E_{пз}],$$

$$(2,4) \quad I_\omega(\xi) = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} I_0 e^{i(\varphi_0 + \psi_0 \xi + \theta)} d\varphi_0,$$

$$(2,5) \quad H_3(\xi) < \eta_e(\xi) < H_2(\xi), \quad H_n = 1 - \left[ (1 + b) \frac{v_{ФР}}{c} R_n - \frac{2\pi p}{\psi_0} \right]^{-2},$$

где  $\dot{F}$  – безразмерная комплексная амплитуда поля ОР, нормированная на величину  $E_0$ ;  $\theta = \omega t(\varphi_0, \xi) - \varphi_0 - \psi_0 \xi$  – изменение фазы электрона в результате взаимодействия с полем ОР;  $\eta_e$  – электронный КПД прибора;  $I_\omega(\xi)$  – конвекционный ток;  $I_0$  – постоянный ток;  $\omega$  – частота генерации;  $\omega_r = \omega_r' - i\omega_r''$  – собственная частота;  $\omega_r'' = \omega_r'/2Q$ ;  $Q$  – нагруженная добротность ОР;  $E_0 = mv_0^2/2|e|l$ ;  $N_r$  – норма колебаний;  $\psi_0 = \omega l/v_0$ ;  $\dot{F} E_0 f(\xi) \cos k\xi$  – собственное поле ОР, усредненное по поперечному сечению потока;  $\varphi_0 = \omega t_0$  – фаза влета частиц в пространство взаимодействия;  $E_{пз}$  – поле пространственного заряда;  $e, m$  – заряд и масса электрона;  $b = v_0/v_{ФР} - 1$  – параметр рассинхронизма.

Начальные условия для случая поступления на вход в пространство взаимодействия немодулированного электронного потока имеют вид

$$(3) \quad \theta(\varphi_0, \xi) = \eta_e(\varphi_0, \xi) = 0 \quad \text{при } \xi = 0.$$

Методом крупных частиц интегродифференциальная система уравнений (2) сводится к системе обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$(4,1) \quad F = -\frac{g}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \int_0^{N_l} F f(\xi) \cos(\psi_0 \xi + \theta_n) d\xi,$$

$$(4,2) \quad \delta = \frac{g}{FN} \sum_{n=0}^{N-1} \int_0^{N_l} F f(\xi) \sin(\psi_0 \xi + \theta_n) d\xi,$$

$$(4,3) \quad \frac{d\theta_n}{d\xi} = \psi_0 [(1 - \eta_n)^{-1/2} - 1],$$

$$(4,4) \quad \frac{d\eta_n}{d\xi} = F f(\xi) \cos[(1 + b)\psi_0 \xi] \cos(\psi_0 \xi + \theta_n) + E_{пз},$$

$$(4,5) \quad I_\omega(\xi) = \frac{2I_0}{N} \sum_{n=0}^{N-1} e^{i(\varphi_0 + \psi_0 \xi + \theta_n)},$$

$$(4,6) \quad H_3(\xi) < \eta_n(\xi) < H_2(\xi),$$

где  $F$  – безразмерная вещественная амплитуда поля ОР, нормированная на вели-

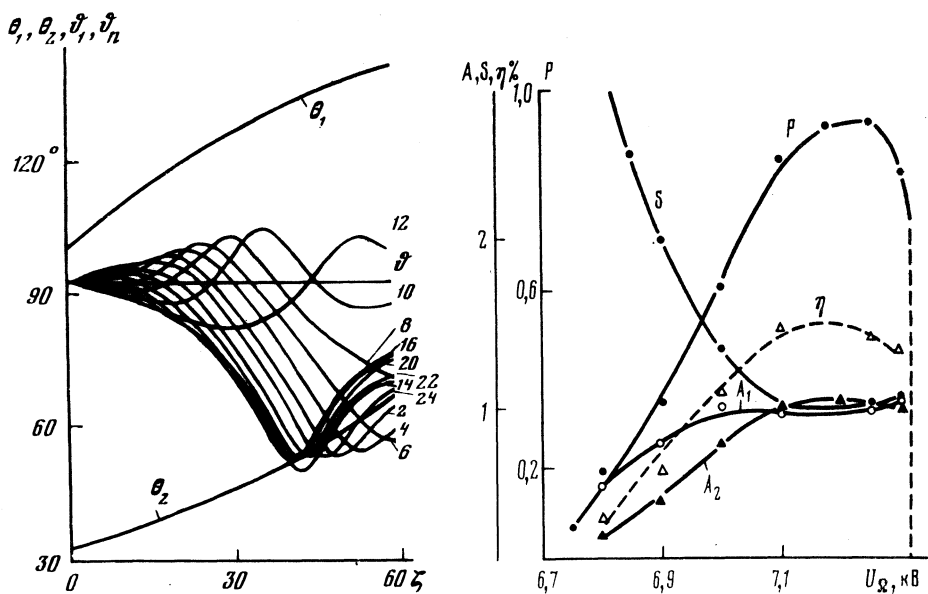


Рис. 1. Механизм возникновения ЭДВ в ГДИ: кривые с числами 2–24 – зависимости угла излучения частиц от количества периодов ДР;  $\vartheta$  – угол излучения частиц на входе в пространство взаимодействия;  $\theta_1(\zeta)$ ,  $\theta_2(\zeta)$  – угловое ограничение на направление ДИ со стороны электронной пушки и коллектора соответственно;  $D = 94$ ;  $R_1 = 55$ ;  $b = 0,025$ ;  $\psi_0 = 1,99\pi$ ,  $N_l = 60$ ;  $g = 0,001$ ;  $N = 24$

Рис. 2. Зависимости мощности  $P = \frac{P_1}{P_{\max}}$ , КПД  $\eta$  ГДИ, интенсивностей (квадрат нормированной амплитуды) первого  $A_1$  и второго  $A_2$  сигналов генерации, отношения  $S$  этих интенсивностей от ускоряющего напряжения в пределах зоны генерации

чину  $E_0$ ;  $\delta$  – электронное смещение частоты;  $n$  – номер крупной частицы;  $N$  – число крупных частиц;  $g = 2QI_0I^2/\omega_r'U_0N_r$ .

Неравенство (2,5) или (4,6) получено из соотношений (1) и производит сортировку крупных частиц по направлению ДИ: частица излучает в объем ОФ, если ее  $\eta_n$  удовлетворяет (2,5), и создает ЭДВ, если  $\eta_n$  лежит в интервале

$$(5) \quad H_2(\zeta) < \eta_n(\zeta) < H_3(\zeta).$$

Начальные условия для системы (4) приобретают вид

$$(6) \quad \theta_n = \frac{2\pi n}{N-1}, \quad \eta_n = 0 \text{ при } \zeta = 0.$$

2. Система нелинейных уравнений ГДИ (4) численно интегрировалась на ЭВМ БЭСМ-6 методом Рунге–Кутты. Отличительная особенность вычислительного алгоритма заключается в том, что на каждом шаге интегрирования необходимо контролировать выполнение условия (1,1) каждой крупной частицей и учитывать только те,  $\eta_n$  которых удовлетворяет условию (4,6).

На рис. 1 показан механизм возникновения ЭДВ. Видно, что в начале пространства взаимодействия частицы излучают под углом  $\vartheta = 92^\circ$  к направлению движения. В процессе энергообмена частиц с полем ОР происходит изменение угла ДИ  $\vartheta_n$  в соответствии с соотношением (1). При этом ускоренные частицы излучают под углом  $\vartheta_n > \vartheta$ , а замедленные –  $\vartheta_n < \vartheta$ . В рассматриваемом случае энергия

ДИ всех частиц, пролетающих над ДР до 41-го резонатора, идет на возбуждение ГДИ. Начиная с 41-го, в пространстве взаимодействия появляются замедленные частицы ( $n = 2, 4, 6, 14, 24$ ), излучающие под углом, меньше критического  $\vartheta_n < \theta_2$ . Эти частицы создают ЭДВ, что приводит к падению электронного кпд прибора от 6,8 до 5,2%.

Таким образом, механизм возникновения ЭДВ связан с изменением направления ДИ. Численный анализ показывает, что ЭДВ создается замедленными частицами и существенно влияет на выходные характеристики ГДИ. Степень этого влияния зависит от эффективности взаимодействия и геометрии ОР.

3. Наличие ЭДВ в ГДИ проверялось экспериментально. Исследования проводились в мм-диапазоне как в импульсном, так и в непрерывном режимах на специально изготовленном макете ГДИ. Экспериментальная установка позволяла провести сравнительный анализ характеристик ДИ двух сигналов: первого, поступающего в измерительный тракт от волноводного вывода энергии сферического зеркала ОР, и второго — от рупорного приемника, расположенного за объемом ОР. Измерялись энергетические и амплитудные характеристики этих сигналов в процессе изменения параметров электронного потока и электродинамической системы.

Экспериментально установлено, что интенсивность излучения этих сигналов изменяется неоднозначно при изменении величины тока пучка, ускоряющего напряжения, фокусирующего магнитного поля (при фиксированном расстоянии между зеркалами ОР). Некоторые результаты таких измерений приведены на рис. 2. Видно, что в области мягкого режима возбуждения ГДИ интенсивность второго сигнала меньше, чем первого. С увеличением ускоряющего напряжения одновременно с увеличением  $P$  и  $\eta$  наблюдается более быстрый рост интенсивности излучения второго сигнала и значительное уменьшение параметра  $S$ . Такое изменение характеристик связано с ЭДВ: в начале зоны генерации вследствие "слабой" модуляции электронного потока по плотности заряда потери энергии на высвечивание незначительны. Однако с повышением эффективности взаимодействия амплитуда конвекционного тока электронного потока нарастает, что приводит к увеличению интенсивности излучения второго сигнала. Отметим, что исследуемый ЭДВ эквивалентен наличию в ГДИ "пассивного" ватротронного излучения: на первом участке пространства взаимодействия (со стороны электронной пушки) электронный поток модулируется полем ОР, а на втором участке (со стороны коллектора) — излучает энергию ДИ, как в ватротроне [1].

Таким образом, устройствам типа ГДИ присущи ЭДВ, который приводит к значительному уменьшению электронного кпд генератора и к изменению энергетических и частотных характеристик ГДИ в целом. Степень проявления этого эффекта можно уменьшить путем применения в ГДИ укороченных (со стороны коллектора) ДР и ОР с малыми расстояниями между зеркалами и оптимальными апертурами. Перспективными в этом плане являются ОР с короткофокусными зеркалами.

В заключение отметим, что ЭДВ может быть использован в технике физического эксперимента: по ДИ замедленных электронов измерять и анализировать динамические параметры электронного потока.

Институт радиофизики и электроники  
Академии наук УССР, Харьков

Поступило  
11 XI 1983

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Шестопалов В.П. Дифракционная электроника. Харьков: Вища школа, 1976. 232 с.
2. Leavitt R.P., Wortman D.E., Morrison C.A. — Appl. Phys. Lett., 1979, vol. 35 (5), p. 1.
3. Шестопалов В.П. — ДАН, 1981, т. 261, № 5, с. 1116–1118.