

УДК 621.385.6

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН В ОБЪЕМНЫЕ В ОТКРЫТОМ ВОЛНОВОДЕ

*А. А. Вертий, Г. С. Воробьев, И. В. Иванченко,
А. В. Нестеренко, Н. А. Попенко, А. И. Цвык*

Экспериментально в миллиметровом диапазоне исследуется новая электродинамическая структура — открытый волновод (ОВ), образованный двумя цилиндрическими зеркалами, вдоль образующих которых расположены отражательные дифракционные решетки. Возбуждение ОВ производится электромагнитным полем волн, распространяющихся из диэлектрических волноводов, расположенных вблизи дифракционных решеток. Исследованы коэффициент передачи ОВ, распределение поля внутри волновода и особенности процессов взаимодействия электронного потока с этим полем.

Значительный интерес для техники миллиметровых и субмиллиметровых волн представляют открытые электродинамические системы, которые находят широкое применение в вакуумной электронике, технике СВЧ и антенной технике [1–3]. К таким системам относятся открытые резонаторы (ОР) и открытые волноводы (ОВ), а также системы, трансформирующие поверхностные волны в объемные, например, дифракционные решетки (ДР), вдоль поверхности которых расположен диэлектрический волновод (ДВ) или движется электронный поток (ЭП). Одним из свойств этих систем является возможность эффективного управления их диаграммами направленности путем изменения параметров решетки, ДВ или ЭП. Это указывает на перспективность применения таких излучателей для возбуждения ОР и ОВ. Однако если вопросы возбуждения ОР излучателями типа ДР—ДВ и ДР—ЭП изучены достаточно хорошо [2], то таких исследований для ОВ до настоящего времени не проводилось.

В данной работе экспериментально исследовано возбуждение двухзеркального ОВ системами ДР—ДВ и ДР—ЭП. Волновод был образован двумя параллельно расположенными цилиндрическими зеркалами, вдоль образующих которых помещались излучающие системы типа ДР—ДВ или ДР—ЭП. В результате проведенных исследований определены условия формирования бегущей объемной волны вдоль оси ОВ, а также изучены физические процессы взаимодействия ЭП с этой волной.

1. Возбуждение ОВ путем преобразования поверхностной волны ДВ в объемную волну. На рис. 1 приведена блок-схема установки для исследования данной электродинамической системы. ОВ образован двумя металлическими цилиндрическими зеркалами, расположенными на расстоянии h друг от друга. Вдоль образующих зеркал установлены ДР 1, 2. Вблизи поверхностей решеток помещены диэлектрические волноводы 3, 4, подключенные через согласующие переходы 5, 6 к СВЧ тракту. Согласующие переходы подбирались экспериментально с точки зрения обеспечения их небольших размеров по длине при приемлемых значениях КСВ в тракте. Оптимальными в этом плане оказались согласователи, выполненные в виде плавных волноводных переходов с сечением $7,2 \times 3,6$ мм² на сечение стандартного металлического волновода

$3,6 \times 1,8 \text{ мм}^2$. При этом торцы кварцевого волновода были выполнены в виде конуса с углом при вершине $\varphi = 30^\circ$ [4]. Для лучшего согласования волновых импедансов ДВ и свободного пространства в области конуса располагались клинообразные тefлоновые вставки.

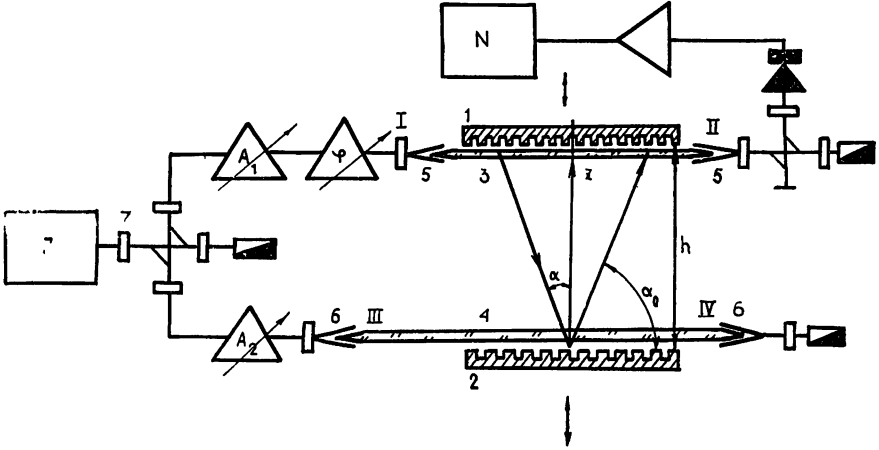


Рис. 1.

Выбор параметров системы ДР—ДВ производился на основании выполнения условия формирования бегущей объемной волны в ОВ в соответствии с соотношением [3]

$$\alpha = \arccos(1/\beta - n/\kappa), \quad (1)$$

где α — угол излучения, n — номер гармоники, $\kappa = l/\lambda$, l — период ДР, λ — заданная длина волны, β — коэффициент замедления волны в ДВ. Проведенные исследования излучающей системы ДР—ДВ показали, что для хорошо согласованных волноводов ($2a = 7,2 \text{ мм}$) диаграмма направленности является однолепестковой и изменение частоты приводит к «качанию» максимума диаграммы (рис. 2, кривые 1—3 приведены для частот $f = 53; 70$ и 77 ГГц соответственно). В то же время для больших значений КСВ уход по частоте на 2—3 ГГц относительно расчетного значения для заданного угла α приводит к появлению многолепестковости в диаграмме направленности (рис. 2, кривая 4 для $2a = 10 \text{ мм}$). Появление паразитной многолепестковости в диаграмме излучения связано прежде всего с увеличением амплитуды отраженной от торцов ДВ поверхностной волны.

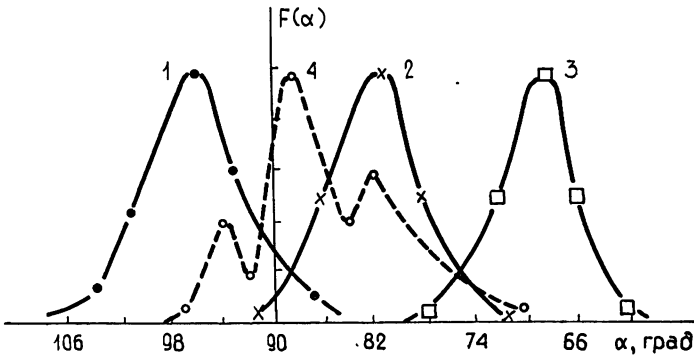


Рис. 2.

Выбранные таким образом параметры периодической структуры и ДВ обеспечили эффективное преобразование поверхностной волны в объемную для широкого частотного диапазона. На рис. 3 приведены зависимости коэффициента передачи $|A_{\text{вых}}/A_{\text{вх}}|^2$ (сплошные линии)

и КСВ (пунктир) от частоты для изолированного ДВ с согласующими элементами (графики 1) и системы ДР—ДВ (2). При этом динамический диапазон сигнала составлял величину порядка 40 дБ, а КСВ системы несколько уменьшался по сравнению с КСВ волновода, что было вызвано дополнительным согласованием излучателя при оптимальной величине прицельного параметра [2].

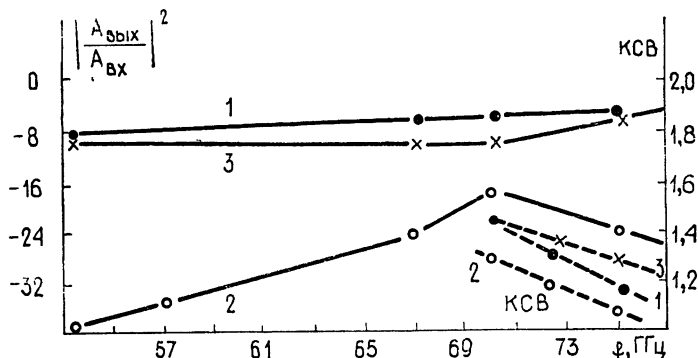


Рис. 3.

Оптимизация радиусов кривизны R цилиндрических зеркал проводилась путем обеспечения минимальных потерь на излучение из ОБ при возбуждении его изученной выше системой ДР—ДВ, расположенной на одном из зеркал ОБ. В результате анализа полученных данных для серии зеркал с различными R ($2R/\lambda = 3-15$) было установлено, что оптимальные значения R находятся в интервале $2R/\lambda = 4-6$. Это обусловлено тем, что при $2R/\lambda > 6$ фокусирующее действие зеркала уменьшается, в результате чего часть перерассеянного зеркалом поля высвечивается из системы, а при $2R/\lambda < 4$ апертура зеркала перехватывает лишь часть излучения системы возбуждения. Для зеркал с $2R = 5\lambda$ величина потерь СВЧ сигнала при прохождении ОБ во всем частотном диапазоне близка к потерям для изолированного ДВ (рис. 3, графики 1, 3). Это объясняется тем, что большая часть мощности, отражаясь от цилиндрического зеркала, преобразуется в поверхностную волну ДВ. Для углов излучения $\alpha < 80^\circ$ и $\alpha > 100^\circ$ на системе ДВ—ДР происходит последовательное преобразование поверхностной волны в объемную и отраженной от поверхности второго зеркала объемной волны в поверхностную. В результате многократного повторения этого процесса вдоль оси ОБ образуется бегущая волна. При этом КСВ в системе несколько возрастает (рис. 3, кривая 3 — пунктир).

Измерение пространственного распределения поля в описанном выше ОБ осуществлялось посредством круглого элемента связи диаметром $0,3\lambda$, расположенного в центре гладкого цилиндрического зеркала, при перемещении которого строго параллельно излучающей апертуре вдоль оси ОБ регистрировался сигнал, пропорциональный амплитуде поля на поверхности зеркала. Полученные распределения ближних полей E в относительных единицах приведены на рис. 4. ДР были рассчитаны для частот $f = 53$ ГГц и $f = 75$ ГГц (соответствующие им ДН приведены на рис. 2). Наблюдаемое смещение максимума поля относительно центра решетки 1 (рис. 1) в сторону СВЧ генератора (вход 1) связано со спецификой формирования ДН антенной системой ДР—ДВ [2]. При углах излучения $\alpha > 90^\circ$ СВЧ поле плавно спадает вдоль оси ОБ (график а)), а для значений $\alpha < 90^\circ$ вдоль оси ОБ формируется бегущая волна и распределение СВЧ полей имеет более сложный характер (графики б), в)).

С практической точки зрения (создания интерферометров, моделирования волновых процессов в устройствах дифракционной электроники) представляет интерес изучение взаимодействия двух протя-

женных дифракционно-связанных когерентных источников излучения, расположенных в ОВ (рис. 1). С этой целью проводились специальные исследования, в которых полиэтиленовый волновод 4 эллиптического сечения (рассматриваемого в качестве эквивалента реального электронного потока в вакуумном приборе) помещался вблизи поверхности ДР 2, расположенной вдоль образующей цилиндрического зеркала. Периоды решеток 1, 2 выбирались из условия синфазности излучений систем ДР 1—ДВ 3 и ДР 2—ДВ 4.

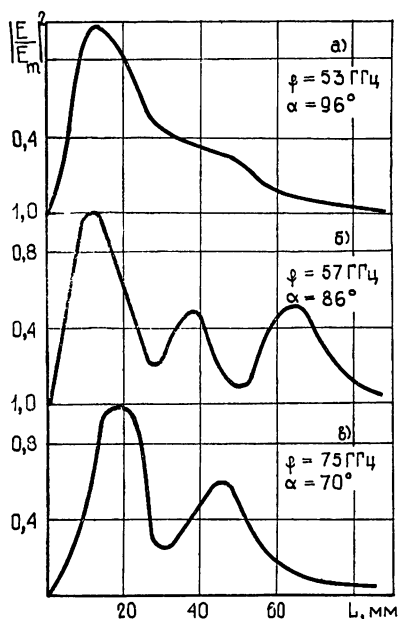


Рис. 4.

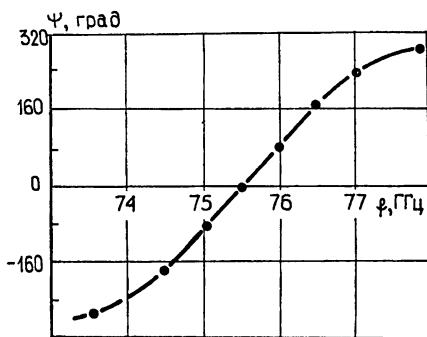


Рис. 5.

В качестве примера приведем результаты, полученные на частоте $f=75$ ГГц для рассчитанных значений $l_1=3,5$ мм, $l_2=4,8$ мм и угла $\alpha=70^\circ$. Настройка электродинамической структуры производилась следующим образом. При перекрытом аттенюаторе A_1 на выходном детекторе (см. рис. 1) регистрировался сигнал, обусловленный излучением системы волновод 4 — решетка 2 и преобразованием этого сигнала системой I в медленную волну ДВ, т. е. в данном случае система I работала в режиме приемной антенны. При закрытом аттенюаторе A_2 система I является приемно-передающей антенной. При этом система II работает на прием поля, излученного системой I под углом θ_1 , преобразование его в поле ДВ и последующее переизлучение его в направлении системы II под углом θ_2 . В случае модельного эксперимента по взаимодействию дифракционно-связанных волноведущих структур, образующих ОВ, оба аттенюатора A_1 и A_2 открыты. Для обеспечения максимальной глубины интерференции амплитуды СВЧ полей с помощью аттенюаторов A_1 и A_2 устанавливаются одинаковыми (рис. 1). При перестройке генератора СВЧ по частоте настройка на максимальную амплитуду сигнала на выходе детектора осуществлялась с помощью калиброванного фазовращателя, помещенного в плечо I. Фазочастотная характеристика данной структуры (рис. 5) была получена при перестройке генератора СВЧ с синхронной подстройкой калиброванным фазовращателем в плече III на максимальную мощность сигнала на выходе IV. Как видно из графика, в полосе частот $\pm 1,5$ ГГц фазочастотная характеристика остается линейной. Это обусловлено тем, что данное изменение частоты приводит к «качанию» ДН в секторе углов $\Delta\alpha \approx \pm 2 \div 3^\circ$, причем эта величина различна для двух рассматриваемых излучающих апертур. В связи с этим при расстройке

частоты более 2 ГГц происходит быстрое рассогласование систем по углам излучения и фазочастотная характеристика становится нелинейной.

2. Взаимодействие электронного потока с СВЧ полем открытого волновода. В работах [5, 6] исследован электронно-волновой механизм возбуждения дифракционного излучения (ДИ) при нормальном падении объемной волны на ДР, вдоль которой движется ЭП. Аналогичным образом можно провести анализ физических процессов возбуждения ДИ в исследуемой системе, рассматривая случай взаимодействия ЭП с бегущей волной дифрагированного на периодической структуре электромагнитного поля. В частности, такая волна поля образуется при падении под углом α на поверхность ДР-2 плоской H -поляризованной электромагнитной волны (рис. 1, ДВ заменен ЭП). Если период решетки $l < \lambda / (1 + \sin \alpha)$, то спектр дифрагированного поля состоит из объемной электромагнитной волны ($n=0$), излучаемой в направлении $\alpha_0 = 90^\circ - \alpha$ (угол отражения), и поверхностных бегущих вдоль решетки волн пространственных гармоник, которые распространяются с фазовыми скоростями

$$v_\Phi = kc / (n + k \sin \alpha). \quad (2)$$

Электронный поток взаимодействует с E_y -составляющей поля бегущей волны, которая находится из решения дифракционной задачи. В процессе взаимодействия в потоке электронов образуется конвекционный ток волн пространственного заряда, зависящий от амплитуды и фазы падающего поля. Волны пространственного заряда (ВПЗ) распространяются вдоль потока с различными фазовыми скоростями. Фазовая скорость v_1 невозмущенной волны равна v_Φ , а скорости медленной v_2 и быстрой v_3 ВПЗ определяются соотношениями

$$v_{2,3} = v_0 / (1 \pm \omega_q / \omega), \quad (3)$$

где ω_q — редуцированная плазменная частота.

Подставляя найденное значение конвекционного тока в уравнения Максвелла и решая задачу дифракционной электроники в приближении заданного тока, находим электромагнитное поле и плотность энергии ДИ. Из решения задачи следует, что возбуждение ДИ наблюдается при скоростях электронных ВПЗ

$$kc / (|m| + k) \leq v_s \leq kc / (|m| - k), \quad (4)$$

а плотность энергии ДИ направлена под углами

$$\alpha_{ms} = \arccos(c/v_s + m/k), \quad (5)$$

где $s = 1, 2, 3$ — индексы электронных волн, $m = -1, -2, \dots$ — номер пространственной гармоники ДИ.

Из условий излучения (4), (5) следует, что в зависимости от параметров электронного потока и периодической структуры ДИ возбуждается либо одновременно несколькими ВПЗ, либо отдельной s -й ВПЗ. При этом из совместного анализа мощности взаимодействия электронных волн с полем бегущей волны, плотности энергии ДИ и условий (4), (5) вытекает ряд физических свойств рассматриваемых процессов взаимодействия.

1) Медленная ВПЗ отдает энергию, а быстрая ВПЗ отбирает (поглощает) энергию дифрагированного поля.

2) Для заданной плотности тока i_0 (плазменной частоты ω_q) и скорости электронов $v_0 = v_\Phi$ медленная и быстрая ВПЗ возбуждают ДИ в направлениях, примерно симметричных направлению распространения отраженного от поверхности решетки падающего поля.

3) При оптимальном квазисинхронизме медленная или быстрая ВПЗ возбуждают ДИ в направлении отраженного от решетки электро-

магнитного поля, что следует из совместного анализа условий излучения и синхронизма электронных ВПЗ с бегущей волной дифрагированного поля.

Таким образом, при взаимодействии электронного потока с бегущей волной ОВ могут наблюдаться как эффекты поглощения, так и эффекты усиления СВЧ энергии дифрагированного поля электронным потоком. Этими процессами можно управлять путем изменения угла и фазы падающего СВЧ поля, параметрами периодической структуры и электронного потока, что подтверждается экспериментальными исследованиями.

При «горячих» измерениях использовалась ДР 2 с периодом $l=0,4$ мм и ЭП сечением $5 \times 0,2$ мм². Электродинамическая структура располагалась в вакуумной оболочке макета между полюсными наконечниками магнита, что ограничивало длину ОВ до 30 мм. Зеркало с ДР 1 и ДВ 3 снабжено автономными механизмами перемещения, позволяющими в широких пределах регулировать расстояния d_1 между ДВ и решеткой, а также расстояние h между зеркалами ОВ. Вход I и выход II ДВ подключены через направленные ответвители к контрольно-измерительным приборам, регистрирующим амплитудные и частотные характеристики СВЧ сигналов. Калиброванный по образцовому аттенюатору СВЧ сигнал подается на вход I от генератора дифракционного излучения (ГДИ).

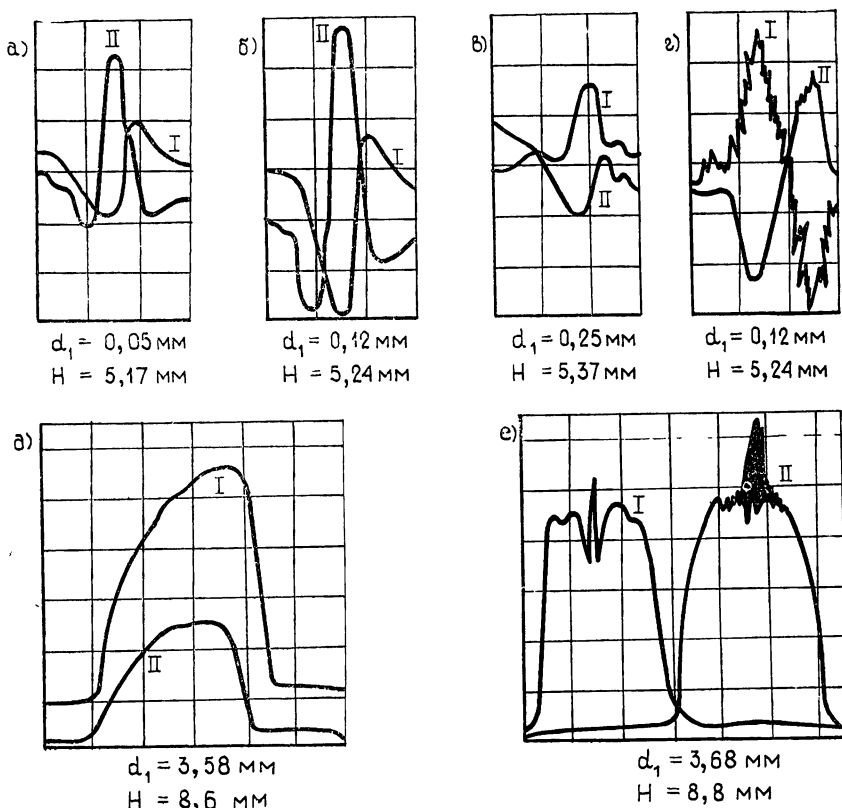


Рис. 6.

На рис. 6 приведены осциллограммы СВЧ сигналов в плечах I, II, характеризующие режимы возбуждения, исследуемой электродинамической структуры при изменении ускоряющего напряжения U_0 — горизонтальная ось (режим модуляции) и значений параметров d_1 (расстояние ДР—ДВ), h , i_0 (плотность тока).

Осциллограммы рис. 6а, б, в иллюстрируют процессы взаимодействия (области поглощения и усиления) ЭП с прямой (II) и обратной (I) волнами ОВ при заданных значениях $f=69,3$ ГГц, $i_0=6$ А/см²

и изменении параметра d_1 . Наличие обратной волны в данном случае обусловлено отражениями от торцов ОБ и на согласующих переходах. Из осциллограмм видно, что с изменением d_1 возможны различные режимы взаимодействия: явное усиление медленной ВПЗ СВЧ поля прямой волны ОБ (осц. 6а, II) или поглощение быстрой ВПЗ СВЧ энергии (осц. 6в, II); в общем случае (осц. 6б, II) с увеличением скорости электронов (или U_0) вначале происходит поглощение СВЧ энергии быстрой ВПЗ, а затем усиление медленной ВПЗ СВЧ энергии. Сильная зависимость амплитуд СВЧ сигналов обусловлена различной степенью трансформации поверхностной волны ДВ в объемную при изменении прицельного параметра d_1 . Как было показано выше, оптимальные значения d_1 в зависимости от частоты преобразуемого сигнала находятся в пределах 0,1—0,2 мм.

С увеличением плотности тока до значений 7 А/см² и при пятидесятипроцентном токопрохождении электронов на коллектор в ОБ могут самовозбуждаться паразитные колебания в режиме ЛОВ (осц. 6г). При этом их частота существенно отличается от частоты входного сигнала ($f = 51,9\text{--}55,9$ ГГц). Излучение поверхностной волны режима ЛОВ в объем ОБ происходит за счет переотражений на концах дифракционной решетки. Данный режим не является устойчивым и может быть подавлен путем уменьшения токопрохождения электронов до 40%.

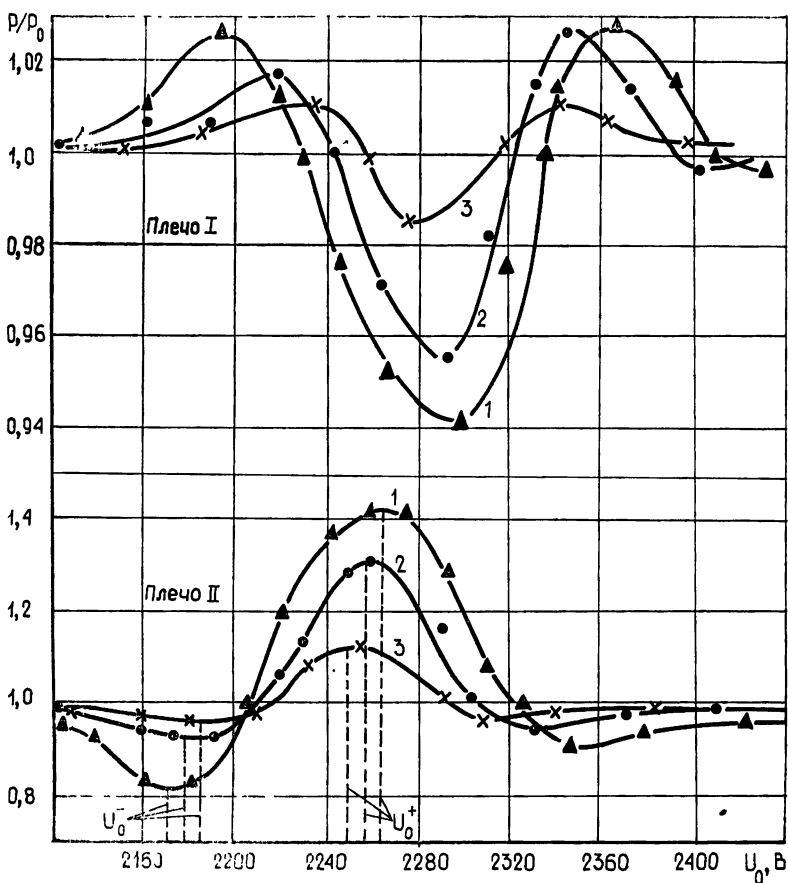


Рис 7.

С увеличением значения d_1 уменьшается мощность падающего на решетку с ЭП электромагнитного поля, что может привести к самовозбуждению электродинамической системы в режиме генерации дифракционного излучения (ГДИ) (см. осц. 6д, $i_0 = 5$ А/см²). В этом случае при наличии внешнего сигнала наблюдается режим синхронизации (осц. 6е). Самовозбуждение в режиме ГДИ обусловлено двумя факторами:

слабой степенью трансформации объемной волны в поверхностную волну ДВ при больших значениях d_1 , что приводит к прямому отражению излучения ЭП от зеркала с ДР1 (рис. 1), а также увеличением добротности поперечных колебаний при увеличении h .

Приведенные на рис. 6 осциллограммы дают качественное представление о режимах возбуждения ОВ. На рис. 7 показано количественное изменение мощности взаимодействия медленной и быстрой ВПЗ электронного потока с прямой (плечо II) и обратной (плечо I) волнами пространственной дифракционной гармоники при различных значениях плотности тока ($i_0=13,5; 6,5; 2 \text{ А/см}^2$ — графики 1 — 3 соответственно; P_0 — интенсивность СВЧ сигнала без ЭП). Из графиков видно, что основная энергия ДИ поступает в канал II (у коллекторного конца устройства) при взаимодействии ВПЗ с прямой (бегущей) волной ОВ. Максимальная мощность взаимодействия (усиление или поглощение) ЭП наблюдается при квазисинхронизме ВПЗ с СВЧ полем. Устанавливая для заданной плотности тока значения ускоряющего напряжения U_0^+ (рис. 7), соответствующие скоростям электронов (3), всегда можно выделить эти режимы взаимодействия и направить излучение ЭП под углом, соответствующим углу излучения отраженного от решетки СВЧ поля. При этом амплитуда бегущей вдоль оси ОВ волны будет либо максимально ослабляться, либо максимально усиливаться.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1) Установлено, что при соответствующем выборе параметров дифракционных решеток, ДВ и рабочей длины волны в рассматриваемой электродинамической системе может быть реализован режим бегущей волны с заданным амплитудным распределением поля.

2) Методом волнового моделирования процессов интерференции двух когерентных источников излучения показана возможность управления взаимодействием ближних полей путем изменения угла излучения и фазы одного из СВЧ полей, что открывает новые перспективы при изучении эффектов поглощения и усиления энергии электронными пучками.

3) Определены режимы возбуждения ОВ при трансформации поверхностного поля ЭП в объемные волны и установлена возможность выделения медленной и быстрой ВПЗ путем преобразования их излучения в поверхностные волны ДВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вайнштейн Л. А., Солнцев В. А. Лекции по сверхвысокочастотной электронике. — М.: Сов. радио, 1973. — 399 с.
2. Шестопалов В. П. Дифракционная электроника — Харьков: Вища школа, 1976. — 231 с.
3. Шестопалов В. П. Физические основы миллиметровой и субмиллиметровой техники — Киев: Наукова думка, 1985. 1. — 213 с.
4. Кириленко А. А., Рудь Л. А. — Радиотехника и электроника, 1977, № 10, с. 2057.
5. Цвык А. И. — ДАН УССР, 1985, сер. А, № 12, с. 53.
6. Цвык А. И. — Изв. вузов — Радиоэлектроника, 1986, 29, № 3, с. 58.

Институт радиофизики и электроники
АН УССР

Поступила в редакцию
11 сентября 1986 г.,
после переработки
23 апреля 1987 г.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF TRANSFORMATION OF SURFACE WAVES INTO VOLUMETRIC ONES IN OPEN WAVEGUIDE

A. A. Vertij, G. S. Vorob'ev, I. V. Ivanchenko, A. V. Nesterenko,
N. A. Popenko, A. I. Tsvyck

A new electrodynamic structure such as an open waveguide (OW) formed by two cylindrical metallic mirrors in which reflecting diffraction gratings are placed along the generatrices is investigated experimentally in the millimeter range. The OW is excited by the electromagnetic field of leaky waves of the dielectric waveguide placed near diffraction gratings. A transfer constant of the OW, field distribution inside the waveguide and features of the electron flow interaction with this field have been investigated.