

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРА ДИФРАКЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН

В. В. Нерубенко, А. И. Цвык

Х а р ь к о в

Исследованию возбуждения дифракционного излучения электронными потоками, движущимися над дифракционными решетками, и созданию на этом принципе источников когерентного электромагнитного излучения — генераторов дифракционного излучения (ГДИ) — посвящено большое число работ [1—7].

Интерес к ГДИ вызван его большой перспективностью. Предполагается, что ГДИ позволит продвинуть электронные принципы генерации электромагнитных колебаний в область более коротких длин волн, получить большие мощности при значительной перестройке. Помимо этого ГДИ является квазиоптическим прибором, который позволит осуществить вывод электромагнитной энергии из прибора непосредственно в пространство, минуя волноводные системы.

Однако в настоящее время отсутствует полная теория прибора и экспериментальные исследования, которые дали бы исчерпывающие ответы на многочисленные вопросы, связанные с выбором конструктивных параметров ГДИ.

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию ГДИ в диапазоне $\lambda = 3,75\text{—}4,6$ мм.

Конструкция генератора. Экспериментальная установка

Общий вид разборного макета исследуемого генератора и блок-схема прибора с расположением его относительно оси наконечников электромагнита представлены соответственно на рис. 1 и 2.

Открытый резонатор (ОР) генератора образован сферическим зеркалом 5 с радиусом кривизны 180 мм. и плоским зеркалом 4, на которое нанесена дифракционная отражательная решетка с параметрами: период решетки 0,4 мм, глубина канавок 0,95 мм, ширина щелей канавок 0,12 мм, ширина решетки 10 мм. Апертуры зеркал одинаковы — 74 мм.

Сферическое зеркало крепится на ходовом винте, внутри которого проходит волновод сечением $3,6 \times 1,8$ мм, плавно переходящий с одной стороны в щель связи ($3,6 \times 0,05$ мм), расположенную в центре сферического зеркала, а с другой стороны оканчивающийся вакуумным уплотнением. Во избежание перекоса зеркал при механической перестройке ОР основание ходового винта имеет втулки, скользящие по трем цилиндрическим направляющим. Плоское зеркало крепится на установочном кольце, на котором расположены три винта для юстировки плоского зеркала относительно сферического. Ленточный пучок электронов сечением $7 \times 0,3$ мм создается диодной пушкой, эмиттером которой служит импрегнированный вольфрамовый катод. Электронная пушка 1 и коллектор 3 крепятся на втором установочном кольце. Оба кольца могут перемещаться по направляющим для установки электронной пушки относительно дифракционной решетки и изменения начального базового расстояния меж-

ду зеркалами открытого резонатора. Коллектор 3 и дифракционная решетка 4 имеют совместное водяное охлаждение.

Детали генератора изготовлены из немагнитных вакуумных материалов, что обеспечивает однородность фокусирующего магнитного поля в пространстве взаимодействия и достаточно высокую степень вакуума в приборе.

Блок-схема установки для экспериментального исследования ГДИ приведена на рис. 3. Вакуумный агрегат 6 обеспечивает откачку прибора до давления $5 \cdot 10^{-7}$ мм рт. ст. Питание генератора 1 осуществляется от стабилизированного источника 5. Для фокусировки электронного потока используется лабораторный электромагнит 2 (до 6 кэрт) с устройством, позволяющим юстировать прибор относительно оси магнита (рис. 1). Система юстировки позволяет легко выбирать оптимальные условия для работы генератора и управлять при эксперименте электронным потоком.

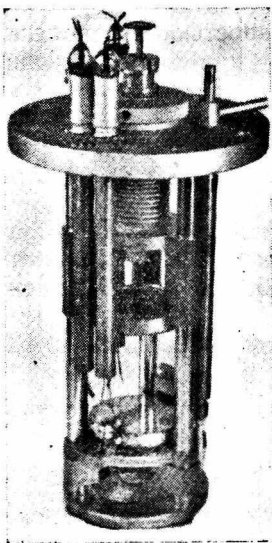


Рис. 1. Общий вид разборной конструкции ГДИ.

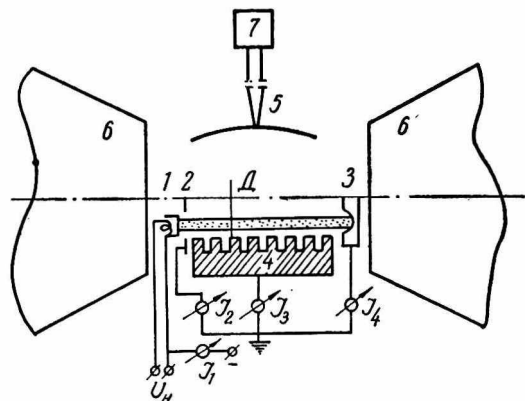


Рис. 2. Схема электрического питания ГДИ и расположение прибора относительно оси наконечников магнита:

1 и 2 — катод и анод диодной пушки; 3 — коллектор; 4 — плоское зеркало с решеткой; 5 — сферическое зеркало; 6 — наконечники электромагнита; 7 — волноводно-измерительный тракт; D — расстояние от оси магнита до плоского зеркала с решеткой; J_1, J_2, J_3, J_4 — контрольные приборы.

Схема стабилизации тока магнита обеспечивает точность стабилизации 0,03%. Для быстрой перестройки открытого резонатора ГДИ использовался моторный привод, позволяющий во время эксперимента плавно изменять расстояние между зеркалами.

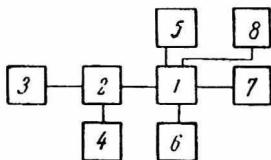


Рис. 3. Блок-схема экспериментальной установки: 1 — ГДИ; 2 — электромагнит; 3 — блок питания электромагнита; 4 — юстирующее устройство; 5 — блок питания ГДИ; 6 — вакуумный агрегат; 7 — волноводно-измерительный тракт; 8 — моторный привод резонатора ГДИ.

Волноводно-измерительный тракт собирался в двух вариантах: для контроля генерации, измерения длины волны и относительных значений мощности тракт состоял из измерительного аттенюатора, волномера и де-

текторной секции с прибором, а для измерения абсолютных значений мощности генерации детекторная секция заменялась калориметрическим измерителем мощности.

Результаты экспериментального исследования

При движении электронного потока над дифракционной решеткой плоского зеркала ОР возбуждаются электромагнитные колебания, поле которых представляет суперпозицию поверхностных волн, распространяющихся вдоль периодической структуры с фазовыми скоростями*

$$v_{\phi} = \frac{x}{x\alpha + n} c, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots,$$

и волн дифракционного излучения, из которых формируется собственное колебание открытого резонатора.

Решение задач в приближении заданного тока и в самосогласованной постановке [3—7] показывает, что мощность дифракционного излучения P существенно убывает при удалении электронного потока от периодической структуры ($P \sim \exp(-2qa)$, где $qa = \frac{\pi}{l} a \sqrt{1 - \beta^2}$; a — расстояние от оси электронного пучка до дифракционной решетки; $\beta = \frac{v}{c}$; v — скорость движения электронного потока вдоль решетки).

Хорошее «прилегание» электронного пучка к дифракционной решетке способствует эффективному взаимодействию пучка с одной из поверхностных гармоник (если выполняется условие синхронизма), в процессе которого происходит модуляция пучка.

«Прилегание» пучка к дифракционной решетке можно обеспечить, используя для фокусировки пучка сильное продольное однородное магнитное поле, нейтрализующее на границе пучка действие сил пространственного заряда электронов и позволяющее получить пучок с минимальными пульсациями.

В случае плоских круглых наконечников магнита однородность магнитного поля в зазоре зависит от отношения $\xi = \frac{A}{B}$, где A — диаметр наконечников, B — расстояние между ними. При $\xi = 1$ однородное поле сосредоточено в небольшой области вдоль оси наконечников; с увеличением ξ область однородности поля возрастает. Уменьшение ξ приводит к уменьшению области однородности, и при $\xi \ll 1$ поле является неоднородным.

Области неоднородности магнитного поля приводят к пульсациям на границе пучка, ухудшающим условия взаимодействия пучка с поверхностными гармониками. От того, насколько решена задача согласования пучка с магнитным полем, в значительной степени зависит работа ГДИ. На практике согласование электронного пучка с фокусирующим магнит-

* Здесь $x = \frac{l}{\lambda}$; l — период дифракционной решетки; c — скорость света; λ — длина волны дифракционного излучения; коэффициент α находится из решения дисперсионного уравнения [3].

ным полем в ГДИ обеспечивается улучшением переходной области* и предварительной юстировкой приборов (в процессе настройки их) в фокусирующем магнитном поле.

Юстировочные характеристики исследуемого генератора приведены на рис. 4. При снятии этих и последующих характеристик для фокусировки электронного потока использовался электромагнит с круглыми наконечниками, у которых $A = 100$ мм, $B = 135$ мм ($\xi = 0,74$). Из графиков рис. 4, а видно, что при фиксированных расстояниях между зеркалами ОР ($L = 29,5$ мм), а также между осью магнита и плоским зеркалом с решеткой ($D = 4,5$ мм) мощность генерации существенно зависит

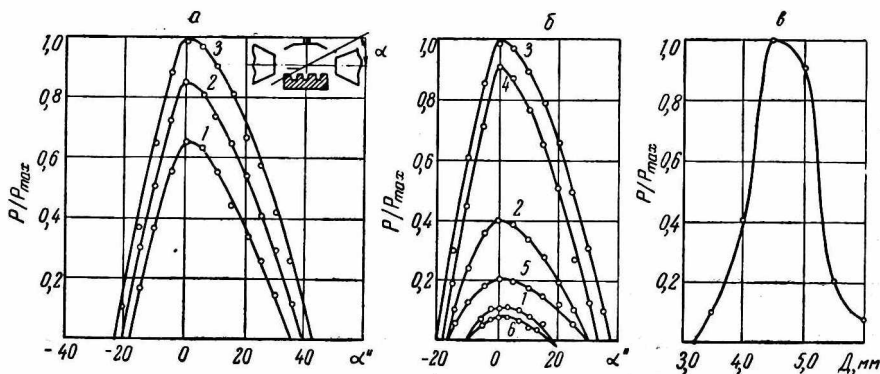


Рис. 4. Юстировочные характеристики:

$L = 29,5$ мм; $U = 2650$ в; $\lambda = 4,1$ мм; $P_{\text{max}} = 465$ мвт:

а — зависимость генерируемой мощности (в относительных единицах) от юстировочного угла; $D = 4,5$ мм (1 — $H = 4,7$ кэрт; 2 — $H = 5$ кэрт; 3 — $H = 5,2$ кэрт); б — зависимость генерируемой мощности (в относительных единицах) от юстировочного угла, $H = 5,0$ кэрт. (1 — $D = 3,5$ мм; 2 — $D = 4,0$ мм; 3 — $D = 4,5$ мм; 4 — $D = 5,0$ мм; 5 — $D = 5,5$ мм; 6 — $D = 6,0$ мм); в — зависимость генерируемой мощности (в относительных единицах) от расстояния D ($H = 5,0$ кэрт).

от угла поворота оси магнита (юстировочного угла) относительно положения, соответствующего максимуму генерируемой мощности. С увеличением напряженности фокусирующего магнитного поля мощность генерации и диапазон изменения юстировочного угла возрастают. Так при $H = 4,7$ кэрт юстировочный угол изменяется в пределах от $-18''$ до $+35''$, а для $H = 5,2$ кэрт $\alpha = -22'' \div +42''$. При углах поворота вне этих значений генерации не наблюдается.

На рис. 4, б приведены юстировочные характеристики, снятые при фиксированном $H = 5$ кэрт и различных расстояниях между осью магнита и плоским зеркалом с решеткой. Кривые 1 и 6 соответствуют наименьшему ($D = 3,5$ мм, кривая 1) и наибольшему ($D = 6$ мм, кривая 6) расстояниям, при которых мощность генерации прибора составляет 10% максимального уровня генерируемой мощности ($D = 4,5$ мм, кривая 3). При $D < 3,5$ мм и $D > 6$ мм генератор не возбуждался.

Характеристика рис. 4, в иллюстрирует влияние изменения расстояния на величину генерируемой мощности. При снятии этой характеристики для каждого изменения D на 0,5 мм производилась юстировка прибора на максимум генерируемой мощности.

На рис. 5, а и б представлены зависимости мощности генерации прибора от напряженности магнитного поля при различных значениях

* Область ввода электронного пучка в фокусирующее магнитное поле.

ускоряющего напряжения. Графики 1 на характеристиках снимали с юстировкой прибора на максимальный уровень генерируемой мощности при каждом изменении напряженности фокусирующего магнитного поля. Из этих зависимостей видно, что мощность генерации возрастает с увеличением магнитного поля. В случае юстировки генератора только в «нижней» точке ($H = 3,3$ кэрт, рис. 5, а и $H = 4,0$ кэрт, рис. 5, б кривые 2) мощность генерации также возрастает с увеличением магнитного поля. Однако при $H = 4,75$ кэрт уровень мощности почти не изменяется с увеличением H и составляет 55% уровня мощности, полученного в первом случае. Кривые 3 на рис. 5, а; 5, б соответствуют юстировке прибора при $H = 5,25$ кэрт. Из этих графиков видно, что с уменьшением напряженности магнитного поля мощность генерации убывает быстрее, чем в первых двух случаях.

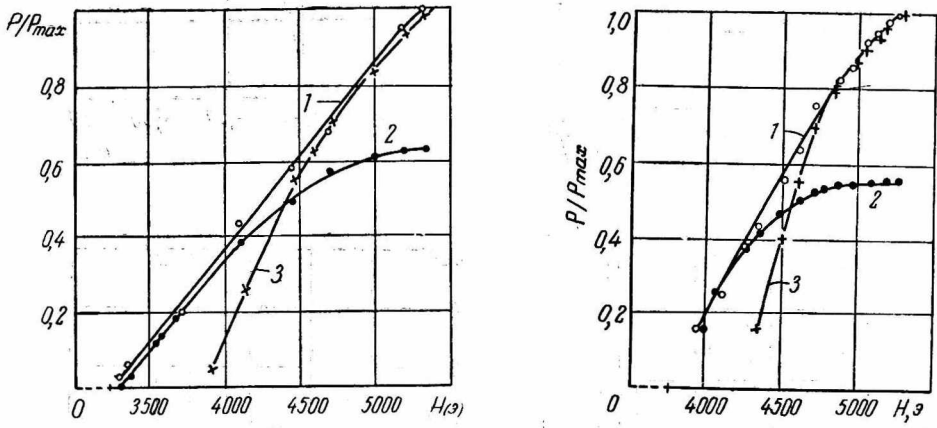


Рис. 5. Зависимость генерируемой мощности (в относительных единицах) от напряженности магнитного поля:

1 — юстировка в каждой точке; 2 — юстировка в точке минимального значения H ; 3 — юстировка в точке максимального значения H :
 (а — $L = 29,5$ мм; $U = 2650$ в; $\lambda = 4,1$ мм; $P_{\max} = 480$ мвт; б — $L = 41$ мм; $U = 3250$ в; $\lambda = 4,3$ мм; $P_{\max} = 160$ мвт).

Таким образом, из рассмотренных графиков следует, что увеличение фокусирующего магнитного поля и выбор оптимальных условий ввода электронного пучка в фокусирующее поле (юстировки прибора в нем) позволяют значительно повысить уровень генерируемой мощности. Это необходимо учитывать при экспериментальных исследованиях и практическом применении подобных устройств.

На рис. 6 а, б, в, г приведены зависимости генерируемой мощности (в относительных единицах) от ускоряющего напряжения при различных расстояниях между зеркалами открытого резонатора. В случае $L = 29,5$ мм (рис. 6, а) при изменении ускоряющего напряжения от 0 до 5 кВ генерация наблюдается для $U = 2650$ в ($\lambda = 4,1$ мм). С увеличением расстояния между зеркалами (рис. 6, б, в, г) генератор возбуждался при более высоких напряжениях и на других длинах волн. Следует отметить, что минимальный пусковой ток в этих случаях составлял 65 ма.

Исследовались также частотные характеристики прибора. ГДИ перестраивалась (перестройка — комбинированная электронно-механическая) в диапазоне $\lambda = 3,75$ —4,6 мм. При этом расстояние между зеркалами ОР изменялось в пределах от 29 до 48,5 мм, ускоряющее напряжение — от

2,5 до 5 кв. Генератор возбуждался на различных видах колебаний открытого резонатора.

Все исследования ГДИ проводились в непрерывном режиме.

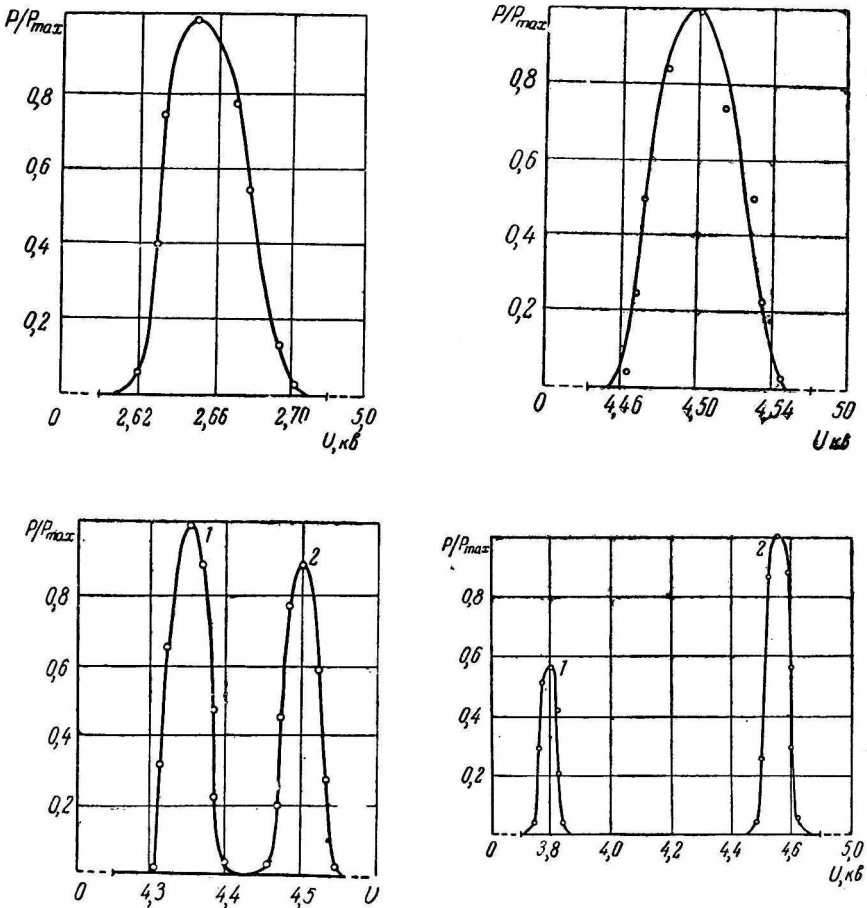


Рис. 6. Зависимость генерируемой мощности (в относительных единицах) от ускоряющего напряжения ($H = 5,2$ кэвст):

$a - L = 29,5$ мм; $\lambda = 4,1$ мм; $P_{max} = 465$ ватт; $b - L = 31,5$ мм; $\lambda = 4,1$ мм;
 $P_{max} = 215$ ватт; $\sigma - L = 33,5$ мм; $\lambda_1 = 3,8$ мм; $P_{max} = 190$ ватт; $\lambda_2 =$
 $= 4,05$ мм; $z - L = 45$ мм; $\lambda_1 = 4,27$ мм; $P_{max} = 135$ ватт; $\lambda_2 = 4,05$ мм.

ВЫВОДЫ

1. Экспериментальные исследования ГДИ показали, что мощность, генерируемая прибором, зависит от величины и однородности магнитного поля. Незначительные ухудшения условий ввода электронного пучка в фокусирующее поле существенно снижают уровень генерируемой мощности.

2. Генерация прибора наблюдается при определенных (резонансных) расстояниях между зеркалами открытого резонатора. Каждому расстоянию соответствует определенная величина ускоряющего напряжения электронного пучка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ф. С. Русин, Г. Д. Богомоллов. Сб. «Электроника больших мощностей», вып. 5. Изд-во «Наука», 1968.
2. И. М. Балаклицкий, Б. К. Скрынник, О. А. Третьяков, В. П. Шестопапов. УФЖ, 14,4, 1968.
3. Л. Н. Литвиненко, А. М. Радин, В. Г. Сологуб, О. А. Третьяков, В. П. Шестопапов. «Изв. вузов, Радиофизика», 12, 752, 1969.
4. Л. И. Николаенко, А. И. Цвык. Возбуждение дифракционного излучения в периодической структуре с потерями. Сб. «Радиотехника», вып. 10. Изд-во ХГУ, Харьков, 1969.
5. О. А. Третьяков, А. И. Цвык, Э. И. Черняков. Возбуждение дифракционного излучения в периодической структуре с потерями. Сб. «Радиотехника», вып. 7. Изд-во ХГУ, Харьков, 1968.
6. О. А. Третьяков, Э. И. Черняков, В. П. Шестопапов. ЖТФ, 36, 33, 1966.
7. Б. М. Болотовский, Г. В. Воскресенский. УФН, 88, 2, 209, 1966.