

О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ РАБОТЫ ГЕНЕРАТОРА ДИФРАКЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

*И. М. Балаклицкий, В. Г. Курин, Б. К. Скрынник,
О. А. Третьяков, В. П. Шестопалов*

Харьков

Принцип действия генератора дифракционного излучения (ГДИ) основывается на существенном использовании физических свойств эффекта дифракционного излучения. Последний наблюдается при пропускании потока вдоль дифракционной решетки и может быть истолкован как результат дифракции собственного электромагнитного поля движущихся электронов на периодической поверхности решетки. Дифрагированное поле состоит из двух качественно различных видов: суперпозиции поверхностных (медленных) волн, локализованных вблизи решетки, и спектра однородных (быстрых) волн, уходящих от нее. В зависимости от условий возбуждения и геометрических параметров резонансной электродинамической структуры может оказаться преобладающим первый или второй вид дифрагированного поля.

Принципиальным отличием ГДИ от других электронных приборов с длительным взаимодействием является то, что в нем именно спектр быстрых волн преобладает и используется для возбуждения колебаний в резонансной электродинамической системе генератора и для вывода энергий из него.

ГДИ конструктивно представляет собой открытый резонатор (ОР), в котором концентрируется дифракционное излучение; на одно из зеркал ОР нанесена дифракционная решетка. Вдоль решетки пропускается электронный поток, электромагнитные колебания в ОР возбуждаются путем использования дифракционного излучения. Вывод энергии осуществляется через второе зеркало, не содержащее решетки, для чего в нем предусматривается связь с волноводом или же зеркало выполняется полупрозрачным для квазиоптического вывода энергии. Перспективность ГДИ для освоения миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн можно считать установленной (1—3), поэтому особенности работы этого генератора требуют детального изучения.

Лампа обратной волны и генератор дифракционного излучения

Для выяснения особенностей работы ЛОВ и ГДИ специально создан прибор, в котором генерация электромагнитных колебаний осуществляется как в режиме ЛОВ, так и в режиме ГДИ. Отбор энергии в данном приборе можно осуществлять соответственно на медленных и быстрых волнах (рис. 1). Энергия дифракционного излучения выводится через щель связи в сферическом зеркале открытого резонатора. Вывод энергии в режиме ЛОВ осуществляется через согласованный с дифракционной решеткой волновод, расположенный вблизи пушки; к волноводу у коллекторного конца решетки подключена согласованная нагрузка. В соответствии с имеющимися данными относительно оптимального режима возбуждения колебаний в ГДИ [3] дифракционная решетка наносится на часть поверхности плоского зеркала ОР. При работе прибора в режиме ГДИ колебания в открытом резонаторе возбуждаются на частотах, близких к его собственным частотам. Если же прибор возбуждается в режиме ЛОВ, сферическое зеркало, естественно, не оказывает влияния на генерацию. Однако и этому режиму сопутствует дифракционное излучение, которое регистрируется с помощью щели связи в сферическом зеркале ОР.

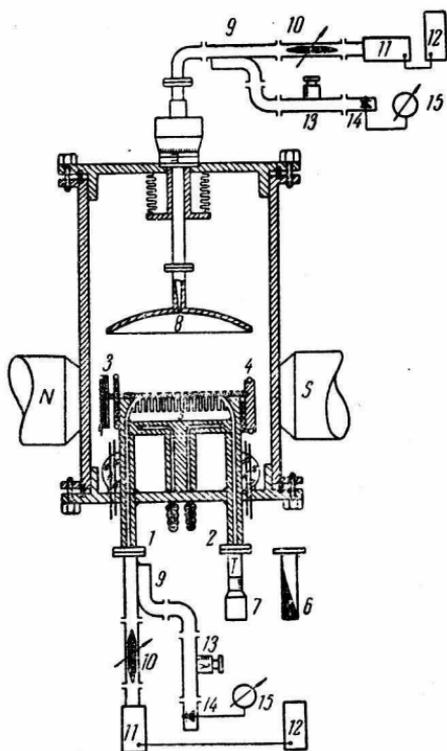


Рис. 1. Схематическое изображение макета ГДИ и измерительных цепей прибора, имеющего вывод энергии на быстрых и медленных волнах:

1, 2 — волноводные выводы для отбора энергии на медленных волнах; 3 — диодная пушка; 4 — коллектор; 5 — зеркало с дифракционной решеткой; 6 — согласованная нагрузка; 7 — реактивный поршень; 8 — сферическое зеркало со щелью связи; 9 — ответвители; 10 — аттенуаторы; 11 — калориметрический измеритель мощности; 12 — милливольтметр типа Н-373-1; 13 — волномер; 14 — детекторные головки; 15 — контрольные приборы.

Прибор имеет следующие параметры (мм): диаметр плоского зеркала $2a_1 = 50$, диаметр сферического зеркала $2a_2 = 60$, радиус кривизны сферы $R = 110$, период решетки (на плоском зеркале)

$l = 0,4$, ширина щелей $d = 0,15$, высота ламелей $h = 0,93$, длина решетки $L = 40$, ширина решетки $B = 10$.

На рис. 2 представлена зависимость частоты генерирования и пусковых токов от приложенного напряжения в режимах ГДИ и ЛОВ. Диапазон перестройки ГДИ и ЛОВ в данном приборе примерно одинаков (рис. 2, а) и составляет около 15 % средней частоты. Однако крутизна перестройки ЛОВ в 2,5 раза меньше,

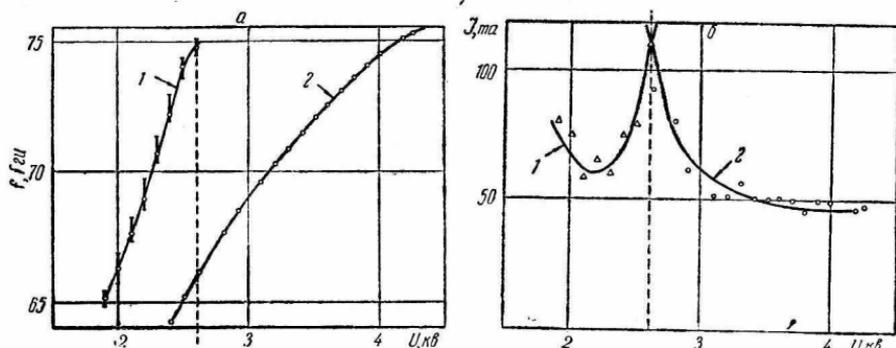


Рис. 2. Зависимость частоты (а) и пусковых токов (б) от приложенного напряжения в режиме ГДИ (1) и в режиме ЛОВ (2). Точками обозначены частоты с наибольшей мощностью при данном напряжении.

чем ГДИ. Кроме того, ЛОВ более высоковольтный генератор: рабочее напряжение ГДИ в 1,5 раза меньше ЛОВ для заданной частоты. Пусковые токи ЛОВ и ГДИ сравнимы по абсолютной величине, но характер их в диапазоне перестройки резко отличается (рис. 2, б). Пусковые токи для ЛОВ ниже в среднем на 20 % и уменьшаются с повышением напряжения (частоты). Для ГДИ имеется характерный минимум пускового тока как функции напряжения (частоты).

Различие в характере зависимости I от U приводит к тому, что при заданном напряжении один из режимов генерирования будет возбуждаться легче, чем другой. Это можно наглядно проиллюстрировать с помощью рис. 2, б. В характерной точке $U \approx 2,6$ кВ (пунктирная прямая) пусковые токи режимов ГДИ и ЛОВ равны. При $U > 2,6$ кВ пусковой ток ЛОВ ниже, чем для ГДИ, поэтому первый возбуждается легко, а для перехода к режиму ГДИ приходится преодолевать ряд затруднений. Наоборот, при $U < 2,6$ кВ легко возбуждается режим ГДИ, а для перехода в режим ЛОВ приходится повышать ток пучка и производить расстройку ОР. Обратная связь по медленной волне в каждом случае обеспечивается автоматически. Переходами от одного режима генерирования к другому, по-видимому, объясняются известные срывы генерации в ЛОВ при изменении анодного напряжения (частоты генерирования).

Зависимости выводимой мощности от частоты для режима ГДИ даны на рис. 3, а, а для режима ЛОВ — на рис. 3, б. Зависимость мощности от частоты в обоих режимах качественно совпадает, однако максимальная мощность в режиме ГДИ приблизительно в четыре раза больше, чем в ЛОВ (мощность тока пучка была для ЛОВ — 430 *вт*, для ГДИ — 442 *вт*).

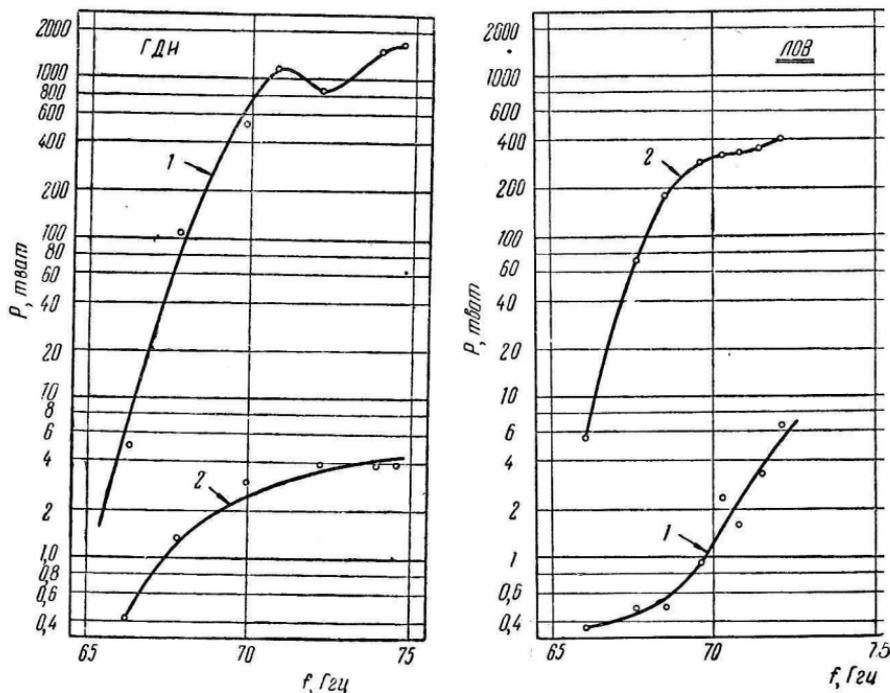


Рис. 3. Зависимость выведенной мощности на быстрой (1) и медленной (2) волнах при работе прибора в режиме ГДИ (а) и в режиме ЛОВ (б).

Рис. 3 может служить иллюстрацией к объяснению физического механизма работы ГДИ и ЛОВ с помощью так называемой дифракционной концепции. Действительно, в режиме ГДИ большая часть энергии электромагнитного поля запасается в быстрых пространственных гармониках дифракционного излучения (кривая 1) и значительно меньшая часть ее — в поле медленных волн (кривая 2). В режиме ЛОВ ситуация противоположная: мощность дифракционного излучения весьма мала по сравнению с мощностью, запасаемой в поле медленных волн (кривые 1 и 2 соответственно). Таким образом, общей для обоих режимов остается дифракционная сущность явления преобразования кинетической энергии электронов в энергию электромагнитного поля. Качественное различие заключается в структуре электромагнитного поля, в которое кинетическая энергия преобразуется при рассеянии собственного

электромагнитного поля электронов на периодической структуре. Существенное различие возбуждаемых полей в режиме ГДИ и в режиме ЛОВ определяет и качественное различие этих приборов между собой.

С более подробным обсуждением этого вопроса можно ознакомиться в работе [4].

Влияние поверхностного поля отражательной дифракционной решетки на работу ГДИ

Электромагнитное поле каждого из типов колебаний, возбуждающихся в ОР с дифракционной решеткой, состоит из суперпозиции плоских волн, формирующих поле в объеме резонатора, и суперпозиции поверхностных волн, локализованных вблизи нанесенной на зеркало решетки. Медленные пространственные гармоники поля собственного колебания резонатора совпадают по форме с пространственными гармониками поверхностных волн, образованных при рассеянии на решетке собственного поля заряженных частиц. Продольная составляющая суммарного поля медленных волн группирует электронный поток. Очень важно, что поле быстрых волн собственного колебания ОР связано с полем медленных пространственных гармоник, в результате чего осуществляется эффективная обратная связь. Благодаря этому некогерентное дифракционное излучение, возникающее в начальный момент возбуждения генератора, превращается затем в когерентное излучение. В конечном счете группировка электронного потока осуществляется всем полем резонатора — быстрыми и медленными гармониками.

Поле медленных поверхностных волн, распространяясь вдоль периодической структуры, может выходить за пределы акустики колебания ОР, что является одним из видов потерь энергии колебания ОР с дифракционной решеткой. Следовательно, влияние концов отражательной дифракционной решетки на условия распространения этого поля должно существенным образом сказываться на работе ГДИ. В связи с этим разработку конструкций плоского зеркала, на которую наносится решетка, можно вести по двум направлениям. В одном случае концы решетки могут быть выполнены согласованными для медленных волн, т. е. они не будут отражать поверхностные волны, в другом — эффективно их отражать. В первом случае резонансные свойства ГДИ будут выражены слабо. Во втором — коэффициент отражения и его фаза существенно изменяются по диапазону перестройки прибора, в связи с чем генерация будет эффективной только вблизи некоторых резонансных частот. Возможна такая конструкция прибора, которая позволит изменять длину электрической линии по медленной волне и в результате подстраивать генератор в резонанс по медленной волне во всем диапазоне его перестройки.

Исследование влияния медленных волн на работу ГДИ проведено на специально изготовленном генераторе, допускающем смену решеток. Сменные отражательные решетки располагаются по диаметру зеркала. Параметры открытого резонатора указаны выше. Все решетки имеют одинаковую длину — 46 мм, период — 0,4 мм, основную глубину щелей — 0,98 мм. Различие состоит в способе выполнения крайних десяти щелей решетки. При смене решеток юстировка пушки не нарушалась.

Т а б л и ц а 1

№ п/п	Способ выполнения крайних щелей решетки	Рабочая частота	Изменение пусковых токов	Оптимальные условия работы			Диапазон перестройки
				Длина волны	Мощность	К. п. д.	
		Гц	ма	мм	вт	в %	в %
1	Обычная решетка, глубина концов 0,98 мм	57,5—65,5	70—135	4,75	0,7	0,32	13
2	Отсутствие щелей на концах (плоскость по 4 мм)	55—67	50—130	4,75	0,6	0,28	20
3	Плавное углубление крайних десяти щелей от 0,98 до 1,20 мм	55—69	45—130	4,75	0,6	0,34	23
4	Плавное уменьшение крайних десяти щелей от 0,98 до 0,78 мм	59,5—77	60—140	3,95	1,3	0,31	24
5	Обычная решетка, но концы покрыты аквадагом	55—67	40—100	4,75	0,5	0,32	20
6	Обычная решетка, на концах графитовые вставки	55—65,5	70—97	5,1	0,75	0,42	17

В табл. 1 приведены диапазон перестройки, изменение пусковых токов в данном диапазоне и оптимальные условия работы для этих гребенок. Как показали экспериментальные исследования, наибольшая зависимость от частоты присуща решетке с канавками равной глубины по всей длине от анода до коллектора. Слабее зависит от частоты выходная мощность ГДИ, имеющего решетку, где сохранены части плоского зеркала длиной 4 мм у пушечного и коллекторного концов решетки. Для решеток, глубина канавок в которых на десяти крайних периодах плавно увеличивалась или уменьшалась, наблюдается более плавное изменение уровня выходной мощности по диапазону перестройки. Во всех четырех рассмотренных случаях в той или иной мере проявляется резонанс по медленной волне. Он обусловлен тем, что независимо от способа изготовления решетки имеются неустраиваемые отражения медленной волны от концов решетки. Величина коэффициента отражения и его фаза зависят от частоты и геометрии концов решетки.

Для полного устранения отражения от концов решеток их края покрывались аквадагом или же ряд крайних канавок заполнялся графитовыми пластинками. Для решетки, в которой по всей длине одинаковая глубина щелей, а крайние десять периодов покрыты аквадагом, выходная мощность с изменением частоты изменяется более плавно, чем во всех предыдущих случаях. Недостаточная поглощающая способность тонкой пленки аквадага приводила к отражению медленной волны от концов решетки при частотах 59 и 65 Гц в неблагоприятной фазе, а при 57 и 63 Гц — в благоприятной, что и обусловило изменение уровня выходной мощности в этих диапазонах. Замена тонкой пленки аквадага пластинками из графита позволила добиться возбуждения прибора сравнительно мало изменяющейся выходной мощностью почти во всем диапазоне перестройки.

Конструктивное выполнение концов отражательной дифракционной решетки влияет не только на мощность, но и на пусковые токи и диапазон перестройки. В высокочастотной части диапазона пусковые токи возрастают, так как здесь заметно увеличиваются дифракционные потери. В наиболее узком диапазоне частот перестраивается прибор с решеткой, имеющей равную глубину канавок на всей длине, где отсутствует согласование на медленной волне. В случае решетки с участками плоского зеркала на концах диапазон перестройки несколько расширяется. Наиболее широкий диапазон перестройки наблюдается в случае, когда на десяти крайних периодах с обоих концов глубина канавок решетки плавно уменьшается на концах. Расширение полосы перестройки получено в этом приборе за счет высокочастотной части диапазона перестройки. Однако наиболее оптимальное выполнение концов решетки есть плавное углубление крайних десяти щелей по 0,05 мм на каждые два периода. При этом наблюдаются наивысшие к. п. д., большой диапазон перестройки, относительно плавное изменение пусковых токов и выходной мощности.

Влияние глубины щелей дифракционной отражательной решетки на работу ГДИ

Для возбуждения ГДИ необходимо, чтобы его резонатор был настроен на частоту излучения. Кроме того, для заданных периода решетки и ширины щелей необходимо подобрать оптимальную глубину щелей, при которой достигается максимальная амплитуда дифракционного излучения. С изменением глубины ячеек изменяется рабочая частота, а следовательно, и диапазон перестройки ГДИ.

С целью выявления оптимальной глубины щелей при постоянном периоде 0,4 и ширине щелей 0,15 мм нами испытана решетка (с углублением на десяти крайних периодах), глубина щелей в

которой уменьшалась на 20—30 мк от одного испытания к другому (от 0,95 до 0,78 мм). Остальные параметры решетки и резонатора оставались неизменными. В табл. 2 приведены результаты испытания вариантов ГДИ для некоторых значений глубины щелей решетки.

Таблица 2

№ п/п	Основная глубина решетки	Углубленные крайних десяти щелей до глубины	Рабочая частота	Изменения пусковых токов	Оптимальные условия работы			Диапазон перестройки
					Длина волны	Мощность	К. п. д.	
	мм	мм	Гц	ма	мм	вт	%	%
1	0,95	1,15	60÷73	60÷105	4,1	3	0,5	20
2	0,87	1,07	53÷88	45÷190	3,5	11,5	1,5	50
3	0,81	1,01	69÷93	120÷210	3,45	6	0,7	30

Заметно, что изменение глубины канавок дифракционной решетки изменяет границу высокочастотной области возбуждения прибора. При этом в значительной степени изменяется максимальная частота генерации, полоса перестройки и максимальная выходная мощность. Таким образом, оптимальная глубина щелей составляла $h = 0,22—25\lambda$, что согласуется с теоретическими выводами. Дальнейшее уменьшение глубины ячеек на данном периоде привело к отрицательным явлениям: уже при глубине $h = 0,72$ мм прибор не возбуждается. Итак, в зависимости от глубины ячеек изменяются не только максимальная частота генерирования, но и полоса перестройки прибора, его пусковые характеристики и выходная мощность. Наилучшие характеристики прибора получены при $\frac{h}{l} = 2,2$ по сравнению с другими значениями глубины щелей при условии, что остальные параметры (постоянное магнитное поле, дифракционная решетка, ОР) оставались неизменными.

ЛИТЕРАТУРА

1. W. W. Salisbury. Патент США № 2634372 от 7. 04, 1953.
2. Ф. С. Русин, Г. Д. Богомолов. Сб. «Электроника больших мощностей», вып. 5. Изд-во «Наука», 1968.
3. И. М. Балаклицкий, Б. К. Скрынник, О. А. Третьяков, В. П. Шестопапов. УФЖ, 4, 1969.
4. И. М. Балаклицкий, В. Г. Курин, Б. К. Скрынник. УФЖ, 15, 5, 1970.