

ГЕНЕРАТОРЫ ДИФРАКЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПУТИ К ТЕРАГЕРЦАМ

В. С. Мирошниченко

*Институт радиофизики и электроники им А. Я. Усикова НАН Украины,
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
E-mail: mirosh@ire.kharkov.ua*

Прослежен путь, пройденный разработчиками генераторов дифракционного излучения (ГДИ) в Институте радиофизики и электроники (ИРЭ) им А. Я. Усикова НАН Украины при освоении терагерцевого диапазона, начиная с 1968 г. Рассмотрены особенности построения электродинамических систем субмиллиметровых ГДИ, технологические трудности изготовления дифракционных решеток. Приведены результаты современных исследований ГДИ на пути в терагерцевый диапазон. Рассмотрены методы борьбы с возбуждением конкурирующих режимов поверхностных волн, проанализированы особенности использования взаимодействия электронного пучка с высшими пространственными гармониками поля дифракционной решетки, а также преимущества использования многокаскадного пространства взаимодействия в ГДИ при продвижении в терагерцевый диапазон. Ил. 12. Табл. 2. Библиогр.: 37 назв.

Ключевые слова: генератор дифракционного излучения, открытый резонатор, электронный поток, дифракционное излучение, терагерцевый диапазон.

По общности подходов к решаемым задачам (устройства передачи энергии, методы обработки информации, типы исследуемых объектов и др.) условные границы терагерцевого диапазона составляют 0,1-20 ТГц. Повышенный интерес к терагерцевому диапазону, проявившийся в последние годы со стороны исследователей, и отсутствие удобных в эксплуатации источников излучения стимулировал возрождение разработок по вакуумным источникам терагерцевого диапазона. Действительно, в существующей измерительной аппаратуре терагерцевого диапазона используются полупроводниковые диоды с умножением частоты, работающие на гармониках тока и обеспечивающие незначительный уровень выходной мощности (10^{-6} Вт), что существенно ограничивает динамический диапазон проводимых исследований [1]. Субмиллиметровые лазеры [2] работают на ограниченном количестве фиксированных частот и представляют собой достаточно сложные в эксплуатации установки, что еще в большей степени относится к ускорительным источникам – лазерам на свободных электронах [3]. Наибольшее распространение в терагерцевом диапазоне среди генераторов, работающих в непрерывном режиме, получили вакуумные источники типа ламп обратной волны (ЛОВ) [4], но с укорочением длины генерируемой волны резко падает уровень выходной мощности ЛОВ и лавинообразно нарастают технологические проблемы.

В качестве альтернативы ЛОВ и отражательным клистроном в 60-х гг. прошлого столетия были предложены вакуумные источники, использующие дифракционное излучение электронного пучка, движущегося над периодической структурой, – генераторы дифракционного излучения (ГДИ). Благодаря неисчерпаемому энтузиазму академика В. П. Шестопалова именно в Харькове сформировался научный коллектив, комплексно

подошедший к решению задачи создания генераторов и усилителей нового типа, что в результате привело к созданию нового научного направления – дифракционной электроники [5].

Нами была поставлена цель – восстановить некоторые этапы тернистого пути в терагерцевый диапазон, пройденного разработчиками ГДИ, и рассмотреть направления дальнейших исследований.

1. Первые ГДИ. Разработанный в [6] строгий метод решения задачи дифракции плоской волны на металлической решетке дал необходимую методологическую основу для строгого теоретического рассмотрения дифракционного излучения электронного пучка в приближении заданного тока [7]. Уже эти первые публикации стимулировали начало экспериментальных исследований генераторов нового типа в Москве и Харькове. Благодаря непосредственному участию академика А. Я. Усикова в ИРЭ АН УССР был организован отдел теоретической электроники, и с 1966 г. начались интенсивные экспериментальные исследования ГДИ. Следует отметить, что в научной школе В. П. Шестопалова к решению поставленной проблемы всегда подходили комплексно – в строгой постановке решалась задача о собственных колебаниях открытых резонансных систем (ОРС), и разрабатывались экспериментальные методы исследования свойств колебаний в открытых резонаторах (ОР); теоретическими методами исследовались электродинамические свойства периодических структур и экспериментально находились пути преобразования поверхностных волн в объемные в системе диэлектрической волновод – отражательная решетка и др. Такой же подход использовался и в дифракционной электронике: параллельно рассматривалась в строгой постановке задача дифракции неоднородных волн электронного потока на периодической структу-

ре, развивалась линейная, а затем нелинейная теория возбуждения колебаний в ГДИ, проводились экспериментальные исследования свойств ОР с зеркалом, содержащим отражательную дифракционную решетку, ограниченную по ширине. Генерация колебаний в первом макете ГДИ-1 (рис. 1) была получена в феврале 1968 г. в 4-мм диапазоне длин волн [8]. В отличие от оротрона [9] в качестве периодической структуры в ГДИ использовалась дифракционная решетка, частично покрывающая зеркало ОР. Такой выбор открытой резонансной системы ОРС для ГДИ оказался настолько удачным, что на долгие годы определил преимущества ГДИ как источника мощных и стабильных колебаний в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах по сравнению с другими типами дифракционных генераторов (оротрон, ледатрон, ладдертрон). Проблемы, возникшие при согласовании ограниченной дифракционной решетки с полем ОР, были решены сначала экспериментальными методами, а затем – при помощи строгих теоретических методов, развитых для двумерных ОР с произвольными контурами зеркал.

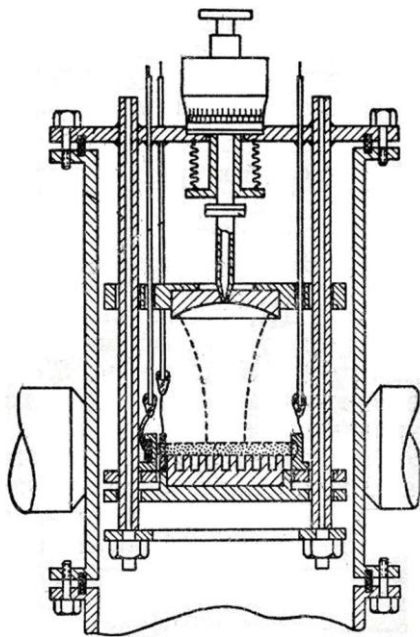


Рис. 1. Макет ГДИ-1 под непрерывной откачкой (1968 г.)

Уже в первой НИР «Селигер» (1966-1970 гг.), выполненной в ИРЭ АН УССР под руководством В. П. Шестопалова, были получены результаты по теоретическому исследованию электродинамических свойств различных периодических структур, проведены экспериментальные исследования сложных открытых резонаторов и создан действующий макет нового источника электромагнитных колебаний в 4-мм диапа-

зоне длин волн – генератор дифракционного излучения с выходной мощностью 1,5 Вт в непрерывном режиме [10].

ИРЭ АН УССР в те годы был лидером в развитии вакуумной электроники с самостоятельно разработанными технологиями изготовления СВЧ-узлов, поэтому переход от установок с разборными макетами ГДИ до отпаянных приборов и внедрения приборов для выпуска малыми сериями в опытном производстве Института произошел достаточно быстро, что отражено в исторической таблице (1971 г.), приведенной на рис. 2. Хотя первые ГДИ и не превосходили по выходной мощности и КПД, разработанные в Институте резонансные ЛОВ и магнетроны [11], однако достаточный уровень выходной мощности в несколько ватт и высокая стабильность частоты наряду с широким диапазоном комбинированной перестройки обеспечили внедрение таких генераторов в различных научных институтах СССР, а также стимулировали дальнейшее развитие исследований по разработке ГДИ во всем миллиметровом диапазоне на ближайшие годы [12].

**ХАРАКТЕРИСТИКИ ГДИ,
РАЗРАБОТАННЫЕ В ИРЭ АН УССР**

ДИАПАЗОН РАБОТЫ		РЕЖИМ РАБОТЫ ПРИ МАКСИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ						ГЛУБИНА РЕШЕТКИ	ВЫВОД ЭНЕРГИИ	ДАТА ИСПЫТАНИЯ
ДЛИНА ВОЛНЫ λ мм	АНОДНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ U кВ	МОЩ. Р Вт	ДЛИНА ПОЛЫ λ мм	ТОК НАПРЯЖ. U кВ	ТОК ПУЧКА I мА	МАГНИТ. ПОЛЕ H кэ				
1. 465–372	195–31	1.5	39	285	170	4.5	Р	В	II–1968г.	
2. 545–337	14–37	115	348	36	270	6.6	Р	В	VII–1969г.	
3. 35–312	36–44	56	315	4.3	280	6.6	спец	В	VII–1969г.	
4. 325–23	23–44	24	231	4.3	280	7.0	Р	В	IX–1969г.	
5. 165–144	3.2–4.3	0.03	1.5	3.9	280	7.0	Р	В	I–1969г.	
6. 55–40	1.35–2.6	0.2	4.01	2.57	170	6.0	Р	К.О.	II–1970г.	
РАЗБОРНЫЕ МАКЕТЫ										
7. 59–366	1.25–3.0	3.3	4.3	2.3	170	4.5	Р	В	V–1970г.	
8. 555–31	1.3–4.45	28	326	3.9	270	7	спец	В	IX–1970г.	
9. 26–23	3.5–4.4	1.0	2.4	3.9	240	6.6	Р	В	X–1970г.	
10. 54–39	1.4–2.8	0.6	3.9	2.8	180	6.6	Р	К.О.	II–1971г.	
ОТПАЯННЫЕ ПРИБОРЫ										

В 4-х миллиметровом диапазоне волн:
 Электронная перестройка частоты $10 \div 45$ МГц при крутизне $0,25 \div 0,4$ МГц/В
 Длительная нестабильность частоты $\sim 3 \cdot 10^{-5}$ при кратковременной н.ч. 10^{-6}
 Температурный уход частоты $\sim 0,7$ МГц/град
 α токовый $\sim 0,3$ МГц/мА
 Степень затягивания частоты (КСВН=1,5) $\sim 2 \div 4$ МГц при нагруженной добротности $Q_n = (2 \div 4) \cdot 10^9$

Рис. 2. Копия таблицы выходных параметров первых ГДИ (1971 г.): Р – равномерная по глубине решетка; спец – неравномерная по глубине решетка; В – волноводный вывод энергии; К. О. – квазиоптический вывод энергии

2. Разработка ГДИ в субмиллиметровом диапазоне. Уже изначально источники, использующие дифракционное излучение движущихся электронов, представлялись как перспективные генераторы в субмиллиметровом диапа-

зоне волн [8, 9]. Для подтверждения преимуществ генераторов нового класса в короткий период после получения первых действующих ГДИ в миллиметровом диапазоне были начаты исследования по их продвижению в короткую часть миллиметрового диапазона и субмиллиметровый диапазон. В начале 1970-х гг. областью применения субмиллиметровых ГДИ была в основном диагностика плазмы в установках по термоядерному синтезу, что в значительной мере определило и финансовую поддержку этих исследований со стороны ХФТИ, а затем и научными институтами Москвы. В ходе выполнения хозяйственных НИР «ГИД-2», «ГИД-3» и госбюджетных НИР «Поиск-1», «Дискус» на протяжении 10 лет (1970-1979 гг.) проводились интенсивные исследования субмиллиметровых ГДИ [13, 14, 15].

Было установлено, что в связи с повышением требований к стабильности частоты источников излучения, усиливающемуся воздействию температуры и механических вибраций проведение достоверных «холодных» измерений параметров ОР в субмиллиметровом диапазоне становится проблематичным и целесообразно проводить оптимизацию электродинамической системы ГДИ путем масштабного моделирования в длинноволновых диапазонах. Оценочные измерения параметров субмиллиметровых ОР показали существование колебаний с высокой добротностью ($Q \approx 15000$). Геометрия зеркал субмиллиметрового ГДИ претерпела существенные изменения. Вместо полусферического ОР сначала были использованы резонаторы со сферическим и цилиндрическим зеркалами (см. рис. 3, а), хорошо зарекомендовавшими себя в ГДИ средней части миллиметрового диапазона [16]. Затем, при укорочении длины волны, от сферического зеркала перешли к сфероидальному зеркалу, позволяющему увеличить пятно поля на решетке вдоль движения электронного пучка. Поскольку в субмиллиметровом диапазоне необходимая кривизна сфероидального зеркала вдоль оси, совпадающей с движением электронного пучка, должна составлять $R_{сф} > 1000 \div 5000$ мм, для обеспечения необходимой длины пространства взаимодействия были применены составные сфероидальные зеркала меньшего радиуса кривизны (см. рис. 3, б). Именно с использованием таких ОР и были проведены испытания первых субмиллиметровых ГДИ [17].

Одним из самых сложных узлов субмиллиметрового ГДИ является отражательная дифракционная решетка. Период решетки при умеренных ускоряющих напряжениях ($U = 2,5$ кВ) и работе ГДИ на 1-й пространственной гармонике составляет $l = 0,1\lambda < 0,1$ мм, что уже в начале субмиллиметрового диапазона находится на пределе традиционных технологий изготовления периодических структур.

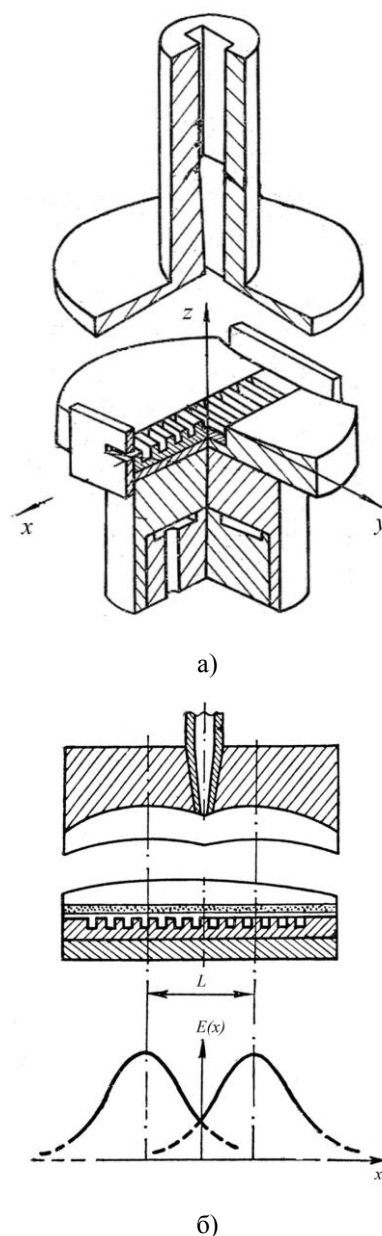


Рис. 3. Открытые резонаторы для субмиллиметровых ГДИ

Для изготовления дифракционных решеток субмиллиметровых ГДИ использовались следующие технологии: электроискровой метод ($l = 0,10 \div 0,20$ мм); использование наборного резака из калиброванного проката стали Х12 ($l = 0,15 \div 0,25$ мм); метод электролитического наращивания основания решетки на пакете из чередующихся пластин меди и алюминия ($l = 0,08 \div 0,10$ мм). Изготовление дифракционной решетки с использованием наборного резака обеспечивает наилучшую чистоту поверхности, однако эта технология применима только в длинноволновой части субмиллиметрового диапазона.

Низковольтный субмиллиметровый ГДИ [17] ($U = 1,5 \div 2,3$ кВ) был разработан в середине 1975 г., в нем использовалась ОРС с составным зеркалом, образованным двумя сфероидальными поверхностями. Дифракционная решетка с периодом $l = 0,08$ мм размещалась вдоль образующей цилиндрического зеркала. Решетка была изготовлена электролитическим методом. Расчетная длина пространства взаимодействия вдоль OX составляла 19 мм. Поперечное сечение ленточного электронного пучка $-3,5 \times 0,2$ мм². Выходная мощность генератора в постоянном режиме достигала 60 мВт, характеристики генератора в диапазоне перестройки представлены на рис. 4. Диапазон комбинированной перестройки по частоте составлял 275-360 ГГц, пусковой ток генератора по диапазону перестройки изменялся в пределах 140-230 мА.

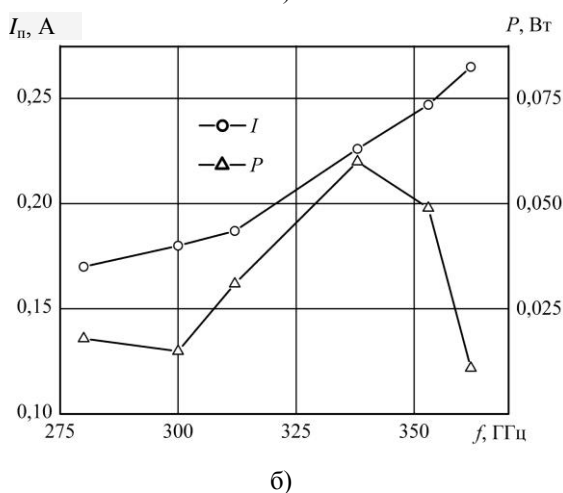
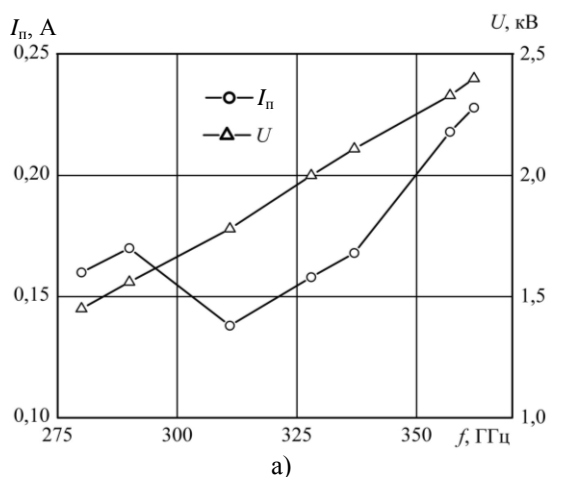


Рис. 4. Выходные характеристики низковольтного субмиллиметрового ГДИ

Эффективная толщина приповерхностного слоя, в котором амплитуда 1-й пространственной гармоники поля решетки достаточна для энергообмена с электронным пучком, составляет $\approx 0,3l$, поэтому в субмиллиметровых ГДИ необ-

ходимо использовать тонкие электронные пучки, для сопровождения которых используется продольное магнитное поле с индукцией $B > 0,8$ Тл. По этой причине с самого начала разработки субмиллиметровых ГДИ в ИРЭ АН УССР параллельно проводились работы по созданию электронных пушек с высокой плотностью тока и тонким ленточным пучком, а также создавались малогабаритные магнитные фокусирующие системы (МФС) из $SmCo_5$, обеспечивающие необходимую индукцию магнитного поля в зазоре 32 – 46 мм [18].

Переход к ускоряющим напряжениям $U = 2,5 \div 4,0$ кВ и применение более тонких электронных пучков $0,07 \times 3,8$ мм² позволили повысить выходную мощность субмиллиметровых ГДИ в 3-5 раз. В 1977-1978 гг. такие ГДИ были разработаны в диапазоне длин волн $\lambda = 0,81 \div 1,12$ мм. В качестве вывода энергии использовался волновод сечением $0,8 \times 1,6$ мм², торец которого размещался вблизи границы пятна поля на сфероидальном зеркале со стороны коллектора. Занимаемый зазор в магнитном поле составлял 46 мм, а индукция фокусирующего магнитного поля – 0,8 Тл. Крутизна электронной перестройки ГДИ-0,9 составляла 0,2-0,5 МГц/В, пусковой ток – $I_p = 100-120$ мА. Внутреннее устройство макета ГДИ-0,9 и пакетированный вариант генератора в МФС из $SmCo_5$ представлены на рис. 5. Вес пакетированного ГДИ в МФС из $SmCo_5$ составлял 12 кг.

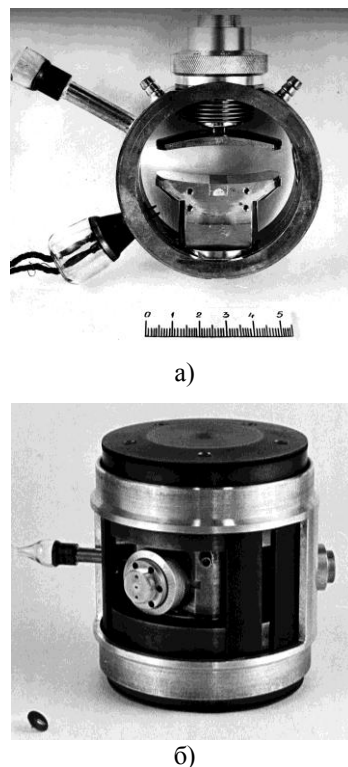


Рис. 5. Внутреннее устройство (а) и внешний вид (б) пакетированного в МФС субмиллиметрового ГДИ-0,9

Разработка ГДИ на частотах свыше 400 ГГц была проведена в 1978-1979 гг. на макетах под непрерывной откачкой [15]. В связи с технологическими трудностями изготовления малоразмерных периодических структур и их недолговечностью период дифракционной решетки был выбран $l = 0,1$ мм, что привело к увеличению ускоряющего напряжения пучка до $U = 6 \div 10$ кВ. Были исследованы следующие модификации субмиллиметровых генераторов: а) ГДИ-0,6, работающий в диапазоне длин волн $\lambda = 0,57 \div 0,65$ мм при ускоряющем напряжении $U = 6 \div 8$ кВ и индукции магнитного поля 1,0 Тл; б) ГДИ-0,5, работающий в диапазоне длин волн $\lambda = 0,52 \div 0,58$ мм при ускоряющем напряжении $U = 7,5 \div 9,5$ кВ и индукции магнитного поля 1,2 Тл. Измерения параметров ГДИ проводились в режиме длинных импульсов ($\tau_u \approx 2$ мс), частота следования импульсов – 50 Гц. Для формирования протяженных полей на дифракционной решетке использовался ОР из составных астигматических зеркал. Было отмечено, что на этих частотах для стабильной работы ГДИ ввиду сложности юстировки зеркал ОР целесообразно разрабатывать отпаянные макеты генераторов на фиксиро-

ванные частоты без механического перемещения зеркал.

На протяжении 1980-1991 гг. в связи с возросшими потребностями в когерентных генераторах для радиолокации, непрерывного контроля технологических процессов, физических исследований новых материалов и др. основное внимание разработчиков ГДИ уделялось совершенствованию пакетированных ГДИ в диапазоне длин волн $\lambda = 1 \div 3$ мм [19]. Были созданы две серии генераторов непрерывного действия с рабочим зазором в магнитном поле 32 и 42 мм, полностью перекрывающих весь миллиметровый диапазон (табл. 1). В 3-мм диапазоне были созданы также ГДИ импульсного действия с выходной мощностью 300 Вт и скважностью $q > 20$. Все разработанные ГДИ были предназначены для пакетирования в малогабаритные МФС из SmCo_5 . Для генераторов, разработанных с зазором 32 мм, также допускалось пакетирование в более дешевых МФС типа «Звено-3» [20, 21, 22]. В разработанных ГДИ 3-мм диапазона с повышенным уровнем выходной мощности использовалась двоякая периодическая структура, позволяющая повысить эффективность использования электронного потока по его толщине (табл. 2).

Таблица 1

Пакетированные ГДИ, непрерывно перекрывающие миллиметровый диапазон длин волн ($I = 0,10 \div 0,15$ А; $U = 2,4 \div 3,9$ кВ; $L = 41$ мм)

Тип прибора	Рабочий диапазон λ , мм	Выходная мощность P , Вт	Электронная перестройка частоты, МГц	Крутизна перестройки		Масса МФС		Магнитное поле, Тл
				по напряжению, МГц/В	по току, МГц/мА	из Алнико, кг	из SmCo_5 , кг	
ГДИ-1	0,8 – 1,1	0,1 – 0,5	25	0,5 – 0,7	0 – 0,7	96	12	0,7
ГДИ-1,5			25	0,5 – 0,7	0 – 0,6	96	12	0,7
А	1,1 – 1,4	0,1 – 1,0						
Б	1,4 – 1,8	0,2 – 1,0						
ГДИ-2			30	0,4 – 0,6	0,1 – 0,5	36	7,0	0,5
А	1,7 – 2,1	0,3 – 1,5						
Б	2,1 – 2,6	0,4 – 2,0						
ГДИ-3			35	0,3 – 0,5	0,1 – 0,3	36	7,0	0,5
А	2,5 – 3,2	0,6 – 3,0						
Б	3,2 – 3,9	1,0 – 5,0						
ГДИ-4			40	0,2 – 0,4	0,2 – 0,4	18	4,5	0,4
А	3,8 – 4,8	1,0 – 2,0						
Б	4,7 – 6,0	1,5 – 7,0						
ГДИ-6			60	0,1 – 0,3	0,1 – 0,3	18	4,5	0,4
А	5,9 – 6,9	3,0 – 18						
Б	6,8 – 8,0	5,0 – 30						

Таблица 2

Выходные параметры ГДИ со двоякой периодической структурой

Тип прибора	Рабочий диапазон, λ , мм	Непрерывный режим		Импульсный режим	
		Выходная мощность P , Вт	Ускоряющее напряжение, U , кВ	Выходная мощность $P_{ис}$, кВт	Ускоряющее напряжение, U , кВ
ГДИ-3	3,1 – 3,6	15	4,5	0,3	14
ГДИ-5	4,9 – 5,3	30	5,5	0,6	14
ГДИ-8	7,7 – 8,3	100	5,0	1,2	12

3. Современный этап развития дифракционных источников в терагерцевом диапазоне. После непродолжительного перерыва (1992-1998 гг.) и в связи с возрастающей активностью зарубежных исследований были возобновлены работы в Украине по продвижению дифракционных генераторов в терагерцевый диапазон. В это же время вакуумным источникам излучения в этом диапазоне стали уделять большее внимание и во всем мире. Было предложено активизировать разработку отражательных клистронов в терагерцевом диапазоне [23]. Сотрудники фирмы *Varian* начали разработку ладдертрона на частотах выше 300 ГГц [24]. В России был разработан оротрон с многорядной дифракционной решеткой для диапазона частот 280 ГГц [25]. Во Франции были разработаны гетеродинные ЛОВ в диапазоне 850÷1000 ГГц [26].

Использование строгих теоретических методов анализа свойств колебаний в ОР. Благодаря успешному развитию в ИРЭ НАН Украины строгих методов анализа спектрального состава и распределения полей в ОР со сложным профилем поверхности зеркал [27] дальнейшие работы по оптимизации ОР для ГДИ проводились в тесной взаимосвязи экспериментальных и теоретических исследований. Использование же строгих теоретических методов анализа колебаний в ОР снимает ряд технических проблем в эксперименте для терагерцевого диапазона (обеспечение стабилизации частоты источника колебаний, устранение влияния вибраций, термостабилизация и заполнение объема ОР инертным газом и др.).

Благодаря использованию пакета прикладных программ СЭМ-04, разработанного для анализа сложных волноводных узлов, была оптимизирована открытая резонансная система ГДИ 3-мм диапазона, состоящая из сферического и уголково-эшелеттного зеркал [28, 29]. Применение такой сложной ОР позволяет существенно разредить спектр возбуждаемых колебаний в ГДИ при укорочении длины волны. Строгий теоретический анализ позволяет выявить новые свойства колебаний в сложных ОР: так было обнаружено стягивание резонансного поля к оси системы в сферическом и уголково-эшелеттном зеркалах, а также выявлены типы колебаний с высокой интенсивностью поля на ступеньках эшелетта, что позволяет создавать многолучевые ГДИ (см. рис. 6). Это позволило реализовать в ГДИ резонансный способ согласования полей в ОР с ограниченной дифракционной решеткой [31, 32]. В такой ОР дифракционная решетка располагалась на дне прямоугольной канавки, выполненной на цилиндрическом зеркале (рис. 8).

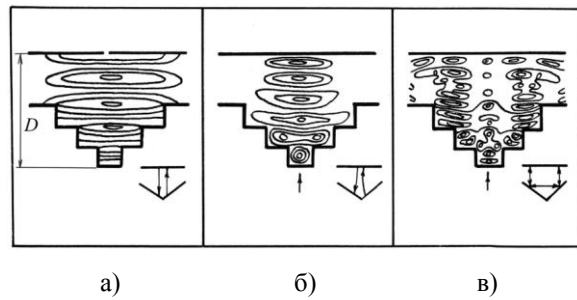


Рис. 6. Электромагнитное моделирование распределения поля резонансного колебания в ОР состоящей из сферического и уголково-эшелеттного зеркал: а) – $D/\lambda = 2,68$; б) – $D/\lambda = 3,185$; в) – $D/\lambda = 6,881$

Для двумерных ОР с ограниченной апертурой зеркал разработан пакет программ для анализа свойств Е-поляризованных колебаний. Установлено, что в таких ОР при перестройке частоты происходит непрерывная трансформация структуры резонансного поля (см. рис. 7, а), т. е. “классическое” распределение поля, описываемое функциями Гаусса-Эрмита, присутствует только при определенных соотношениях параметров частота–расстояние [30]. При строгом анализе свойств колебаний в двумерном ОР с прямоугольной канавкой на зеркале был обнаружен эффект стягивания резонансного поля TEM_{00q} -типа колебаний к оси резонатора (см. рис. 7, б).

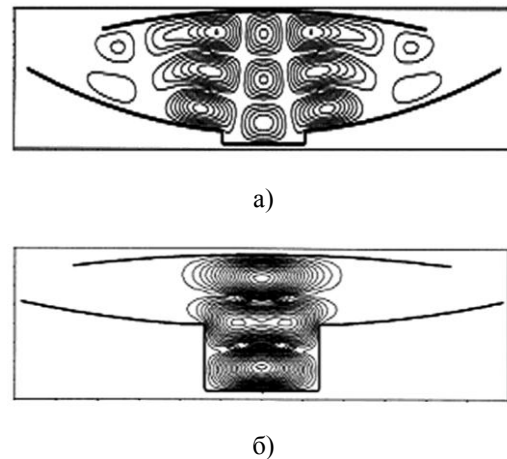


Рис. 7. Структура поля в двумерном ОР с канавкой на зеркале при глубине канавки $h < \lambda/4$ (а) и при резонансной глубине канавки $h \approx \frac{3}{4} \lambda$ (б)

Общая глубина канавки (с учетом глубины щелей решетки) составляла $3/4\lambda_b$, где λ_b – длина волны H_{10} , распространяющейся в прямоугольной канавке вдоль продольной оси резона-

тора. В такой ОРС удается существенно разредить спектр возбуждаемых колебаний, снизить дифракционные потери на основном TEM_{00q} – типе колебаний, повысить концентрацию резонансного поля на дифракционной решетке. Это позволяет обеспечить возбуждение колебаний в ГДИ при сравнительно низких пусковых токах электронного пучка.

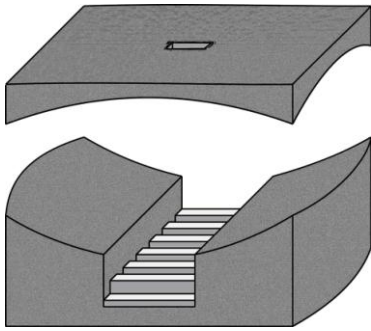


Рис. 8. Открытая электродинамическая система ГДИ с резонансным согласованием дифракционной решетки

Возбуждение колебаний в ГДИ на высших пространственных гармониках поля дифракционной решетки. Продвижение в терагерцевый диапазон сопровождается возрастающими технологическими трудностями изготовления как самих периодических структур, так и тонких электронных пучков с высокой плотностью тока, а также проблемами теплоотвода для осажденных электронов пучка. Одним из способов преодоления указанных трудностей является использование в генераторах механизма взаимодействия электронного пучка с высшими пространственными гармониками электрической составляющей периодического поля, сосредоточенного вблизи поверхности структуры. При неизменном ускоряющем напряжении для электронного пучка работа ГДИ на n -й пространственной гармонике позволяет в n раз увеличить период решетки без изменения скорости затухания периодического поля при удалении от поверхности решетки. Ранее [33] была продемонстрирована возможность использования для генерации колебаний в ГДИ 2-й пространственной гармоники периодического поля, сосредоточенного вблизи отражательной дифракционной решетки. Первые исследования показали существенный рост пускового тока ГДИ на высших пространственных гармониках, что и привело к преждевременной потере внимания к таким генераторам.

Оптимальный выбор параметров дифракционной решетки позволяет уравнивать распределение амплитуды высших пространственных гармоник с амплитудой 1-й пространственной гармоники по поперечному сечению электронного потока.

Проблема состоит в росте омических потерь в ОР, содержащем дифракционную решетку, оптимизированную для работы на высшей пространственной гармонике. При этом возрастает и пусковой ток ГДИ, что ограничивает применение данных структур при продвижении в коротковолновые диапазоны. Эта проблема может быть успешно решена при оптимальном выборе ОРС генератора.

Эксперимент по сопоставлению особенностей работы ГДИ на 1, 2 и 3-й пространственной гармонике поля отражательной дифракционной решетки был проведен в 5-мм диапазоне длин волн [34]. С целью снижения влияния омических потерь, вносимых дифракционной решеткой, была выбрана ОРС с резонансным согласованием дифракционной решетки с полем резонатора, в которой дифракционная решетка располагалась на дне прямоугольной канавки, выполненной на цилиндрическом зеркале ОРС. Это позволило возбудить колебания в ГДИ на высших пространственных гармониках без существенного увеличения пускового тока. Параметры дифракционных решеток составляли: для работы ГДИ на 1-й пространственной гармонике – $l = 0,50$ мм, $d = 0,20$ мм; для работы ГДИ на 2-й пространственной гармонике – $l = 1,00$ мм, $d = 0,20$ мм; для работы ГДИ на 3-й пространственной гармонике – $l = 1,50$ мм, $d = 0,20$ мм. Глубина щелей дифракционных решеток была выбрана одинаковой. При размещении в макете ГДИ дифракционной решетки, рассчитанной на 1-ю или на 2-ю пространственную гармонику, пусковой ток ГДИ был практически одинаковым и составлял $I_{\text{п}} = 12 \div 15$ мА. Максимум выходной мощности ГДИ при работе на 2-й пространственной гармонике составлял $P = 6,5$ Вт, т. е. эффективность взаимодействия ГДИ была сравнима с эффективностью работы ГДИ на 1-й пространственной гармонике (рис. 9, а). Повышение пускового тока более чем в 2 раза для ГДИ, работающего на 3-й пространственной гармонике дифракционной решетки, было вызвано снижением числа периодов структуры до 10 в гауссовом пятне поля (рис. 9, б). Для диапазона длин волн $\lambda < 1$ мм число периодов в пятне поля на высших пространственных гармониках существенно возрастает, и этот недостаток становится несущественным при той же апертуре зеркал.

ГДИ с многокаскадным пространством взаимодействия. Перекрытие по ускоряющему напряжению зон генерации для быстрой моды ОРС (режим «ГДИ») и для медленной поверхностной волны в периодической структуре (режим «ЛЮВ») усиливается при укорочении длины волны и является одним из серьезных препятствий при разработке ГДИ в терагерцевом диапазоне [35].

Вторым серьезным препятствием является проблема создания ОРС, устойчивой к перекосу зеркал и формирующее пространство взаимодействия достаточной длины. Эффективным способом подавления режима «ЛОВ» является введение одного или нескольких скачков фазы $\Delta\Phi$ для резонансного поля вдоль пространства взаимодействия. Так, при размещении скачка фазы поля в середине дифракционной решетки можно повысить в восемь раз пусковой ток для режима «ЛОВ» ($I_n \sim 1/L^3$; L – длина решетки). С другой стороны, инверсия фазы поля в соседних «пятнах» резонансного колебания на решетке позволяет расширить эффективную длину пространства взаимодействия без увеличения радиуса кривизны зеркал ОРС.

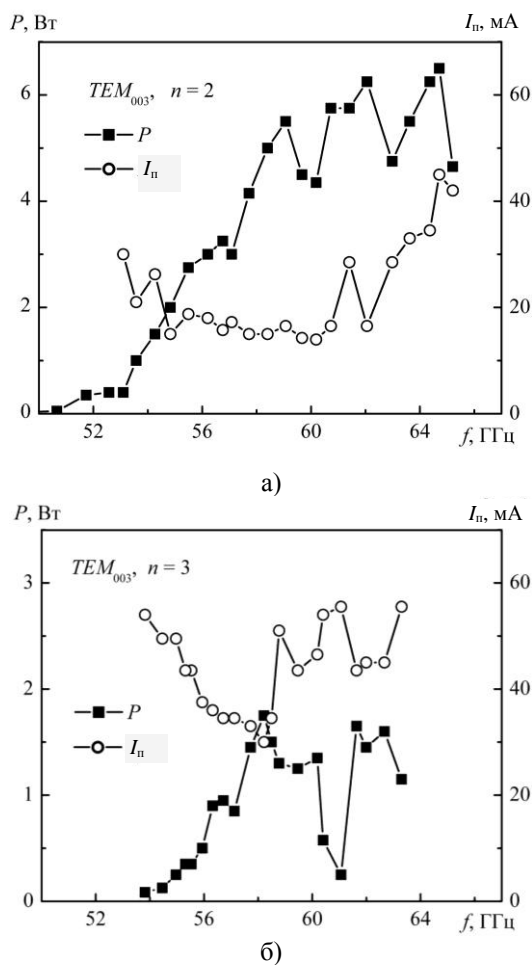


Рис. 9. Выходные параметры ГДИ при работе на 2-й (а) и на 3-й (б) пространственных гармониках поля решетки

Существенное снижение пускового тока ГДИ возможно при использовании многокаскадного пространства взаимодействия, образованного несколькими ОРС, пронизываемыми единым электронным пучком [36], однако использование многорезонаторных ОРС увеличивает габариты прибора и вес МФС.

Нами были рассмотрены особенности возбуждения колебаний в ГДИ с многокаскадным пространством взаимодействия, реализованном в одной ОРС на высших модах без увеличения габаритов прибора в фокусирующем магнитном поле. Пусть распределение поля вдоль пространства взаимодействия при синфазности электрического поля в соседних каскадах составляет

$$E_{0nq}(y) = A_{0nq} \left| H_n \left(\sqrt{2} \frac{y}{r_y} \right) \right| \exp \left(-\frac{y^2}{r_y^2} \right),$$

где A_{0nq} – нормировочный множитель; r_y – радиус пятна поля TEM_{0nq} – типа колебаний на дифракционной решетке. Тогда функция рассинхронизма F_{0nq} , характеризующая эффективность энергообмена электронного потока с резонансным полем TEM_{00q} , TEM_{01q} и TEM_{02q} – типов колебаний, имеет вид, представленный на рис. 10. Для численного анализа был выбран ГДИ 5-мм диапазона, в котором длина пространства взаимодействия в два раза превышала диаметр пятна поля резонансного колебания. Таким образом, уже двухкаскадное пространство взаимодействия на TEM_{01q} – типе колебаний дает выигрыш по пусковому току в 1,91 раза по сравнению с однокаскадным гауссовым распределением поля в ГДИ. Для трехкаскадного ГДИ, работающего на TEM_{02q} – типе колебаний, эффективность энергообмена сравнима с двухкаскадным режимом, но присутствуют дополнительные зоны по ускоряющему напряжению, где $F_{02q} > 0$ и возможно самовозбуждение генератора.

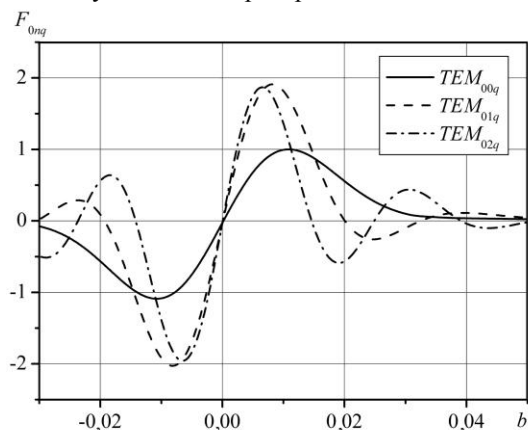


Рис. 10. Характер энергообмена в ГДИ при синфазном поле в каскадах вдоль пространства взаимодействия

В эксперименте синфазность поля в каскадах на 1-й пространственной гармонике обеспечивалась сдвигом на $0,5l$ периодичности нарезки щелей решетки при $H_n(y) = 0$. Были про-

ведены испытания ГДИ с равномерной дифракционной решеткой ($\Delta\Phi=0^\circ$) и с дифракционной решеткой, имеющей сбой периода в середине решетки ($\Delta\Phi=180^\circ$). В случае однородной решетки пусковые токи режимов «ГДИ» и «ЛОВ» были сравнимы по величине, а также наблюдалось частичное перекрытие зон генерации для этих режимов по ускоряющему напряжению. Для решетки с инверсией фазы поля пусковой ток для режима «ЛОВ» возрос в 4-5 раз, а в режиме «ГДИ» возбуждались только TEM_{01q} -моды (см. рис. 11).

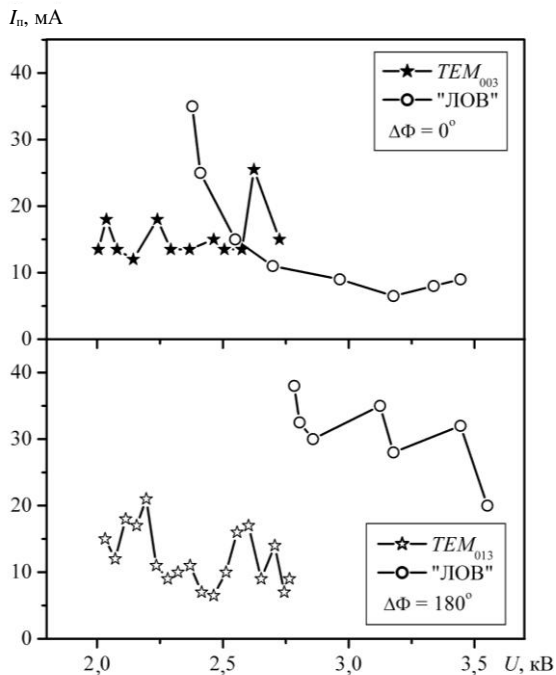


Рис. 11. Поведение стартовых токов режимов «ГДИ» и «ЛОВ» для однородной решетки ($\Delta\Phi=0^\circ$) и решетки с фазовым сдвигом ($\Delta\Phi=180^\circ$)

Пусковой ток на TEM_{013} -моду в ГДИ с инверсией фазы поля был в 1,5 раза ниже, чем пусковой ток для TEM_{003} -моды в ГДИ с равномерной решеткой. Снижение пускового тока в ГДИ с инверсией фазы поля можно объяснить увеличением эффективной длины пространства взаимодействия для TEM_{01q} -моды по сравнению с диаметром пятна поля TEM_{00q} -моды на однородной решетке.

Изменение механизма энергообмена в ГДИ с инверсией фазы поля позволяет дополнительно разредить спектр возбуждаемых колебаний без ограничения апертуры зеркал: в макете ГДИ возбуждались только TEM_{013} , TEM_{014} и TEM_{015} -моды, так как для TEM_{00q} -моды расчетный пусковой ток возрастет более чем в

2 раза. В то же время, в спектре ГДИ с однородной решеткой присутствуют TEM_{00q} и TEM_{01q} -моды с частичным перекрытием зон генерации по ускоряющему напряжению, приводящему к энергетической конкуренции мод. Для ГДИ с инверсией фазы поля наблюдался широкий диапазон перестройки по частоте на TEM_{013} -моду, а уровень выходной мощности генератора сравним с выходной мощностью ГДИ с однородной дифракционной решеткой, работающего на TEM_{003} -моду (рис. 12).

Таким образом, использование в ГДИ дифракционной решетки со сдвигом периода в центре пространства взаимодействия является эффективным средством для разрежения спектра возбуждаемых быстрых мод и подавления конкуренции со стороны режима «ЛОВ». Инверсия фазы поля в середине решетки позволяет реализовать в одной ОРС двухкаскадное пространство взаимодействия и снизить пусковой ток ГДИ при укорочении длины волны генерируемых колебаний.

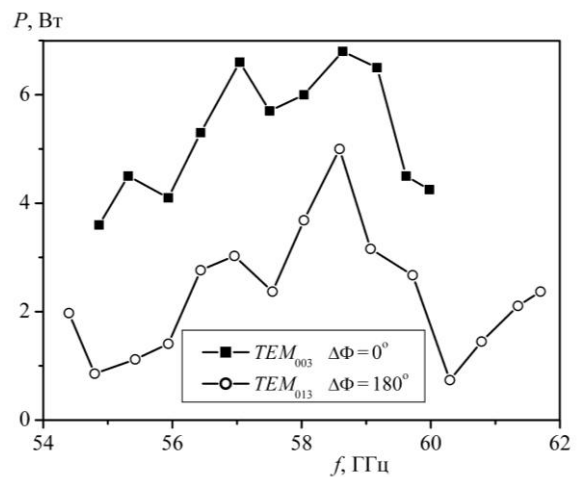


Рис. 12. Изменение выходной мощности однокаскадного и «двухкаскадного» ГДИ по диапазону перестройки

Выводы. Освоение терагерцевого диапазона вакуумными источниками излучения наталкивается на серьезные трудности, которые удается преодолеть с использованием традиционных подходов только в длинноволновой части терагерцевого диапазона. Генераторы дифракционного излучения, использующие высокодобротные ОРС, остаются наиболее подходящими вакуумными источниками непрерывного и когерентного излучения в этом диапазоне. Технологические проблемы, связанные с изготовлением мелкоструктурных решеток, могут быть сняты при использовании эшелетта в качестве периодической структуры [37]. Развитые методы электромагнитного моделирования позволяют уже в настоящее время провести полный электродинамический

анализ открытых резонансных систем ГДИ в терагерцевом диапазоне, оптимизировать их параметры без привлечения экспериментальных методов. При современных технологиях становится доступным создание ОР с протяженными (супергауссовыми) полями, многокаскадным пространством взаимодействия, что позволяет реализовать в дифракционных генераторах более эффективные механизмы энергообмена между электронным пучком и полем ОРС.

1. Siegel P. H., Dengler R. J., Tsai T., Goy R., Javadi H. Multiple frequency submillimeter-wave heterodyne imaging using an AB Millimetre MVNA // *Infrared and Millimeter Waves and 13th International Conference on Terahertz Electronics, IRMMW-THz*. – 2005. – 2. – P. 576-577.
2. Tobin M. Review of optically pumped NMMW lasers // *Proc. of IEEE*. – 1985. – 73, No. 1. – P. 61-80.
3. Vinokurov N. A., Gavrilov N. G., Knyazev B. A. et al. Status of the Novosibirsk high power terahertz FEL // *Proceedings of FEL 2006, BESSY, Berlin, Germany*. – P. 492-495.
4. Гершензон Е. М., Голант М. Б., Негирев А. А. и др. Лампы обратной волны миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов. – М.: Радио и связь, 1985. – 136 с.
5. Шестопалов В. П. Дифракционная электроника. – Харьков: Изд-во Харьк. ун-та, 1976. – 232 с.
6. Агранович З. С., Марченко В. А., Шестопалов В. П. Дифракция электромагнитных волн на плоских металлических решетках // *Журн. техн. физики*. – 1962. – 32, вып. 4. – С. 381-394.
7. Третьяков О. А., Третьякова С. С., Шестопалов В. П. Излучение электромагнитных волн электронным потоком, движущимся над дифракционной решеткой // *Радиотехника и электрон.* – 1965. – 10, вып. 7. – С. 1233-1243.
8. Балаклицкий Б. М., Скрынник Б. К., Третьяков О. А., Шестопалов В. П. Генератор дифракционного излучения волн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов // *Укр. физ. журн.* – 1969. – 14, вып. 4. – С. 539-552.
9. Русин Ф. С., Богомолов Г. Д. Оротрон как генератор миллиметрового диапазона. // В кн.: *Электроника больших мощностей*. – М.: Наука, 1968. – С. 45-58.
10. Исследование дифракции электромагнитных волн на периодических структурах и излучение электромагнитных волн электронными потоками, движущимися над дифракционными структурами: Отчет по НИР «Селигер» / Рук. В. П. Шестопалов. – Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. АН УССР, 1970. – 132 с.
11. Усиков А. Я. Исследования и разработки в области электроники СВЧ, выполненные в Институте радиофизики и электроники АН УССР // *Электронная техн. Сер. 1. Электроника СВЧ*. – 1972. – № 12. – С. 39-49.
12. Шестопалов В. П., Балаклицкий Б. М., Третьяков О. А., Скрынник Б. К. Эффект дифракционного излучения и его применение в электронике // *Электронная техн. Сер. 1. Электроника СВЧ*. – 1972. – № 12. – С. 50-65.
13. Исследование и разработка генераторов дифракционного излучения непрерывного действия субмиллиметрового диапазона волн: Отчет по НИР «ГИД-2» / Рук. В. П. Шестопалов. – Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. АН УССР, 1975. – 250 с.
14. Создание генераторов дифракционного излучения непрерывного действия с механической и электронной перестройкой миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн: Отчет по НИР «Поиск-П» / Рук. В. П. Шестопалов. – Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. АН УССР, 1975. – 249 с.
15. Развитие теоретических и экспериментальных методов исследования явлений дифракции, распространения электромагнитных волн и дифракционного излучения с целью разработки генераторов дифракционного излучения и элементной базы миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн: Отчет по НИР «Дискус» / Рук. В. П. Шестопалов. – Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. АН УССР, 1979. – 351 с.
16. Корнеев В. К., Петрушин А. А., Скрынник Б. К., Шестопалов В. П. Генератор дифракционного излучения со сфероцилиндрическим открытым резонатором // *Изв. вузов. Радиофизика*. – 1977. – 20, № 2. – С. 290-299.
17. Курин В. Г., Ревин И. Д., Скрынник Б. К., Шестопалов В. П. Низковольтный субмиллиметровый генератор дифракционного излучения // *Докл. АН УССР. Сер. А*. – 1978. – № 4. – С. 332-334.
18. Капитонов В. Е., Лопатин И. В., Тищенко А. С. и др. Малогабаритные электронно-оптические системы для ЭВП миллиметрового диапазона волн // В кн.: *Физика и техника миллиметровых и субмиллиметровых волн*. – Киев: Наук. думка, 1983. – С. 166-176.
19. Шестопалов В. П., Вертий А. А., Ермак Г. П. и др. Генераторы дифракционного излучения. – Киев: Наук. думка, 1991. – 320 с.
20. Корнеев В. К., Мирошниченко В. С. Пакетированные ГДИ диапазона частот 25-100 ГГц // 1-й Укр. симпозиум «Физика и техника миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн»: Тез. докл. – Харьков, 1991. – Т. 1. – С. 130-131.
21. Корнеев В. К., Мирошниченко В. С., Пивоварова А. Г. и др. Состояние и перспективы развития генератора дифракционного излучения миллиметрового диапазонов длин волн // *Тр. международной научно-техн. конф. «Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-92»*. – Новосибирск. – 1992. – Т. 1. – С. 19-23.
22. Korneev V. K., Miroshnichenko V. S., Skrynnik B. K. Diffraction Radiation Oscillators for CW and Pulsed Operation // *Telecommunication and Radio Engineering*. – 1997. – 51, No. 5/6. – P. 144-147.
23. Fletcher J. R., Thorpe J. R., Ejaz Hug et al. Design Considerations for Submillimeter-Wave Reflex Klystrons // *IEEE Trans. on MTT*. – 2004. – 52, No. 10. – P. 2344-2351.
24. Berry D., Horoyski P., Hyttinen M. et al. Extended interaction klystrons for submillimeter applications // *Infrared and Millimeter Waves and 13th International Conference on Terahertz Electronics, IRMMW-THz*. – 2005. – 1. – 84 p.
25. Братман В. Л., Гинцбург В. А., Гришин Ю. А. и др. Импульсные широкодиапазонные оротроны миллиметровых и субмиллиметровых волн // *Изв. вузов. Радиофизика*. – 2006. – 49, № 11. – С. 958-963.
26. Guidee Ph., Teysier I. A 850-1000 GHz backward-wave oscillator for advanced applications // *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.* – 1985. – 598. – P. 93-98.
27. Шестопалов В. П. Спектральная теория и возбуждение открытых структур. – Киев: Наук. думка, 1987. – 283 с.
28. Белоус О. И., Кириленко А. А., Корнеев В. К. и др. Генератор дифракционного излучения со сфероуголково-эшелеттным открытым резонатором // *Изв. вузов. Радиоэлектроника*. – 1995. – 38, № 11. – С. 3-13.
29. Belous O. I., Fisun A. I., Kirilenko A. A. et al. Research on Orotron Oscillator with Dispersive Open Resonant System // *Int. J. of Infrared and Millimeter Waves*. – 1997. – 18, No. 2. – P. 445-461.
30. Демченко М. Ю., Корнеев В. К., Мирошниченко В. С. и др. Открытый резонатор с прямоугольной канавкой на зеркале, теория и эксперимент // *Радиофизика и электроника*. – Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – 2000. – 5, № 3. – С. 19-29.
31. Мирошниченко В. С., Демченко М. Ю., Сенкевич Е. Б. и др. Генератор дифракционного излучения с резонансной ступенчатой неоднородностью на зеркале // 15-я Межд. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии»: Тез. докл. – Севастополь, 2005. – Т. 1. – С. 271-272.
32. Демченко М. Ю., Мирошниченко В. С., Свищев Ю. В. и др. Электродинамическая система для генератора дифракционного излучения с резонансным согласованием дифракционной решетки // *Радиофизика и электроника*. – Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – 2007. – 12, № 2. – С. 383-388.

33. Ревин І. Д., Скрынник Б. К., Сысов А. С. и др. К линейной теории генераторов дифракционного излучения // Изв. вузов. Радиофизика. – 1977. – 20, № 5. – С. 764-776.
34. Miroshnichenko V. S., Korotkiy V. K. Modes excitation in diffraction radiation oscillator on high space harmonics of the periodic structure // MSMW'07 Symposium Proceedings. Kharkov, Ukraine, June 25-30, 2007. – 2. – P. 526-528.
35. Русин Ф. С., Костромин В. П. Возбуждение поверхностных волн в оротроне // Радиотехника и электрон. – 1985. – 30, вып. 6. – С. 994-997.
36. Вагров Д. М., Третьяков О. А. Теория резонансных усилителей О-типа. – Киев: Наук. думка, 1989. – 152 с.
37. Масалов С. А. О возможности использования эшелетта в генераторах дифракционного излучения // Укр. физ. журн. – 1980. – 25, № 4. – С. 570-574.

DIFFRACTION RADIATION OSCILLATORS ON PATH TO TERAHERTZ

V. S. Miroshnichenko

Since 1968 year the path is traced which the developers of diffraction radiation oscillators (DRO) in the Usikov's Institute of Radiophysics and Electronics of NAS of Ukraine have done at terahertz (THz) region. The singularities of build-up of electrodynamic systems of submillimeter DRO, technological difficulties of manufacture of diffraction gratings are surveyed. The outcomes of modern investigations of DRO in a THz-region are presented. The methods of struggle with competing excitation of surface waves are surveyed, the singularities of use of interaction of a beam with higher space harmonics of a field of a diffraction grating, and also

advantage of use of a multistage interaction space in DRO are analysed at promoting in THz region.

Key words: diffraction radiation oscillator, open resonator, electron beam, diffraction radiation, terahertz region.

ГЕНЕРАТОРИ ДИФРАКЦІЙНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА ШЛЯХУ ДО ТЕРАГЕРЦІВ

В. С. Мірошніченко

Простежено шлях з 1968 р., який пройшли розробники генераторів дифракційного випромінювання (ГДВ) в ІРЕ ім. О. Я. Усикова НАН України при опануванні терагерцевого діапазону. Розглянуто особливості побудови електродинамічних систем субміліметрових ГДВ, технологічні труднощі виготовлення дифракційних ґраток. Наведено результати сучасних досліджень ГДВ на шляху до терагерцевого діапазону. Розглянуто методи боротьби із збудженням конкуруючих режимів поверхневих хвиль, проаналізовано особливості використання взаємодії електронного потоку з вищими просторовими гармоніками поля дифракційних ґраток, а також переваги використання багатокаскадного простору взаємодії в ГДВ при просуванні в терагерцевий діапазон.

Ключові слова: генератор дифракційного випромінювання, відкритий резонатор, електронний потік, дифракційне випромінювання, терагерцевий діапазон.

Рукопись поступила 9 июня 2008 г.