

14

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ
ЗАВЕДЕНИЙ

Радиоэлектроника

ТОМ XXI
10
1978

СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК
ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ СВЧ

ИЗДАНИЕ
КИЕВСКОГО ОРДЕНА ЛЕНИНА
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
ИМЕНИ 50-ЛЕТИЯ ВЕЛИКОЙ
ОКТЯБРЬСКОЙ СОЦИАЛИСТИЧЕСКОЙ
РЕВОЛЮЦИИ

УДК 538.574.6

И. М. БАЛАКЛИЦКИЙ, Г. С. ВОРОБЬЕВ, А. Н. ГОДЕЦКИЙ,
Ю. В. МАЙСТРЕНКО, А. И. ЦВЫК, В. П. ШЕСТОПАЛОВ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕНЕРАТОРА ДИФРАКЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Приведены результаты экспериментальных исследований качества сигналов генератора дифракционного излучения (ГДИ) миллиметрового диапазона длин волн. Установлено, что ширина спектра колебаний ГДИ во всем диапазоне перестройки частоты примерно в 4 раза меньше, а уровень частотных шумов вблизи несущей частоты на (12÷15) дБ ниже, чем в ЛОВО.

В работе [1] описаны результаты исследований энергетических, частотных и пусковых характеристик генераторов дифракционного излучения (ГДИ), а также показано, что такие генераторы имеют ряд положительных качеств по сравнению с другими электровакуумными приборами с длительным взаимодействием (ЛОВО, ЛБВ). Исследование спектрального состава излучения таких генераторов до настоящего времени не проводилось. В то же время определяющим фактором практического использования приборов дифракционной электроники является знание этих характеристик.

Существует множество причин, влияющих на качество сигналов генерации приборов с длительным взаимодействием: нестабильность и паразитная модуляция источников питания, накопление ионов и их последующие колебания, возбуждение в генераторе колебаний высших порядков, изменение в пространстве взаимодействия формы электронного пучка (пульсации) и др. В общем случае эти процессы обычно носят как регулярный характер, так и случайный, чему соответствуют дискретный и сплошной спектры. Поэтому спектральная линия сигналов генерации на основной частоте оказывается «размытой», т. е. спектр состоит из линии основной частоты и боковых спектральных линий на частоте $\omega_0 + n\Omega_i$. Непериодические (хаотические) флюктуации имеют случайный характер и обычно связаны с дробовыми и тепловыми эффектами, ионами остаточных газов и т. д. Наличие этих флюктуаций вызывает сплошной спектр шума в пучке, а следовательно, и в дифракционном излучении. Причиной всех видов периодических модуляций ВЧ колебаний являются периодические флюктуации скорости электронов, плотности заряда и формы электронного пучка, которые обусловлены периодическими изменениями ускоряющего напряжения, поперечными колебаниями электронного потока и др.

В настоящей работе приведены результаты экспериментальных исследований спектрального состава СВЧ колебаний ГДИ миллиметрового диапазона длин волн [1]. Выяснены некоторые факторы, влияющие на качество спектра сигнала ГДИ, а также проведено сравнение спектральных характеристик ГДИ и резонансной ЛОВО.

Исследование спектральных характеристик проводилось на анализаторе спектра С4-27. Путем визуального наблюдения, измерения, фото-

графирования и последующего анализа спектрограмм определялись основные характеристики: количественное сравнение ширины спектров на уровне 0,1 по отношению к основной амплитуде и наличие паразитной модуляции в спектре. Измерения флюктуационных характеристик генератора проведены в полосе анализа от несущей частоты $F_{\text{д}} = (1 \div 500)$ кГц. В основу измерений был положен двухканальный, корреляционный метод с использованием частотного детектора-дискрими-

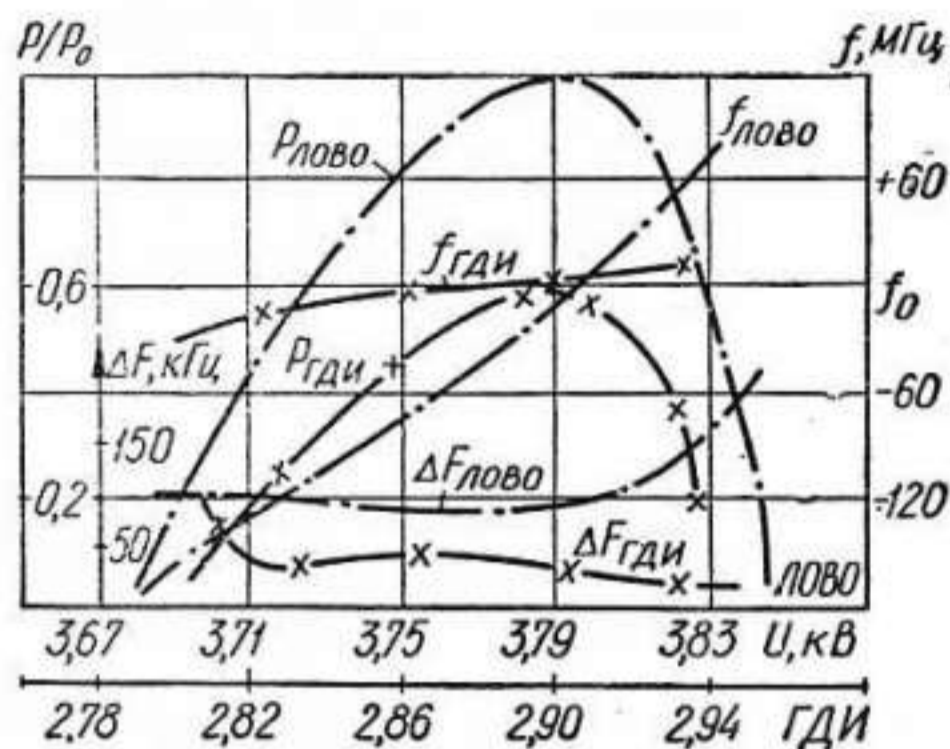


Рис. 1.

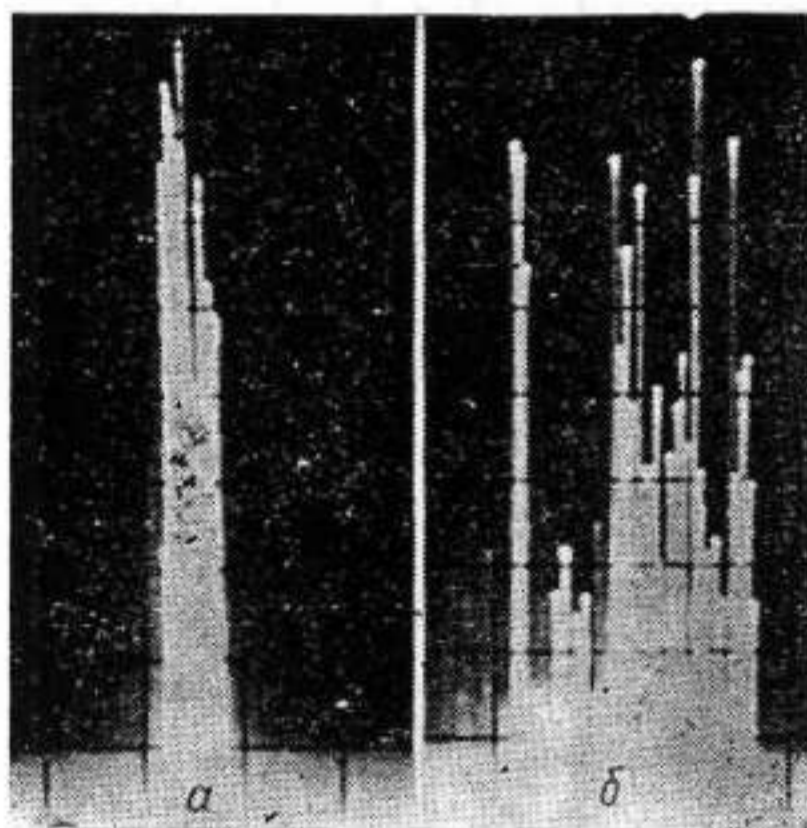


Рис. 2.

натора интерференционного типа (полусферический открытый резонатор) [2].

В процессе исследований использовались приборы со степенью вакуума $\sim (10^{-8} \div 10^{-7})$ мм. рт. ст. и источник ускоряющего напряжения со стабильностью $(10^{-4} \div 10^{-5})$.

При исследовании спектральных характеристик ГДИ в области центра зоны электронной перестройки частоты (центр зоны — точка максимального уровня выходной мощности) установлено, что для большинства резонансных частот (f_0) исследуемого генератора ширина спектра колебаний (ΔF) изменяется в пределах $(30 \div 50)$ кГц ($f_0 = (62 \div 79)$ ГГц).

Однако при изменении частоты генерации относительно f_0 путем изменения ускоряющего напряжения (U) крутизна электронной перестройки частоты изменяется и наблюдается увеличение или уменьшение ширины спектра (табл. 1).

Таблица 1

$f_0, \text{ ГГц}$ $U, \text{ кВ}$	$f_0=78,725$ $U=3,50$	$f_0=75,250$ $U=2,90$	$f_0=62,231$ $U=1,96$
$U, \text{ кВ}$	3,35 3,50 3,54	2,70 2,90 2,93	1,93 1,96 1,98
$\frac{df}{dU}, \frac{\text{ МГц}}{\text{ В}}$	0,70 0,22 0,22	0,6 0,3 0,15	0,18 0,25 0,50
$\Delta F, \text{ кГц}$	120 40 40	80 30 25	30 33 70

На рис. 1 приведены зависимости мощности генерации (P), электронной перестройки частоты (f) и ширины спектра (ΔF) от величины ускоряющего напряжения для ГДИ и резонансной ЛОВО. На рис. 2 показаны спектрограммы колебаний в центрах зон генерации: спектры ГДИ (а) и ЛОВО (б). Данные характеристики снимались при равных

технических условиях: оба генератора запитывались от стабилизированного источника питания с амплитудой пульсаций ($U_{\text{п}}$) по ускоряющему напряжению ~ 10 мВ; генераторы настраивались на резонансную частоту $f_0 = 75,250$ ГГц при токе пучка ~ 125 мА; ленточный электронный пучок над периодической структурой типа «гребенка» в ГДИ и ЛОВО создавался двухэлектродной пушкой и фокусировался в пространстве

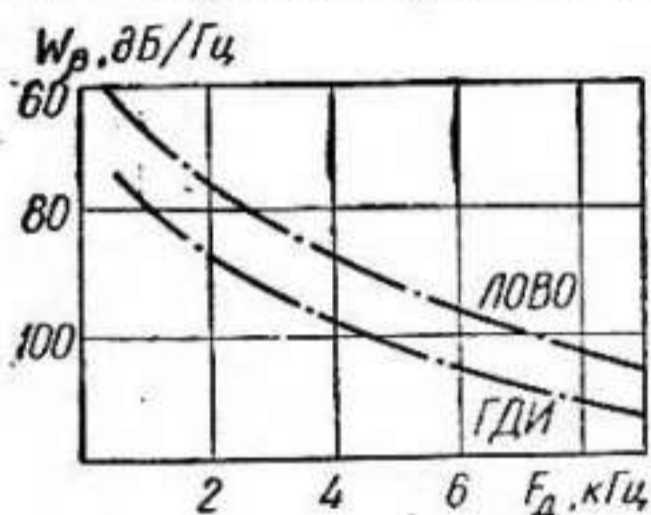


Рис. 3.

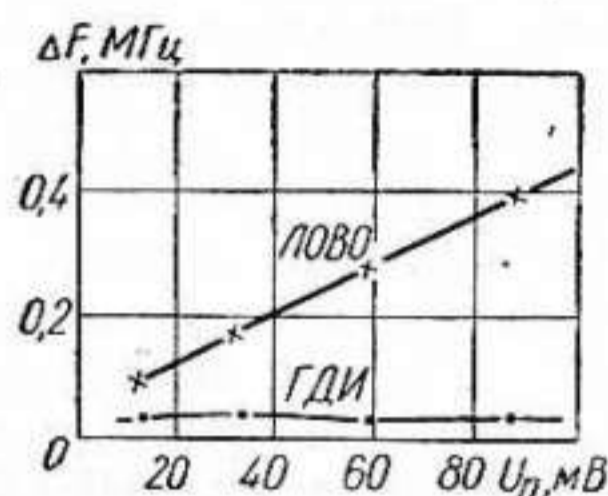


Рис. 4.

взаимодействия магнитным полем ~ 4 кЭ; в обоих генераторах использовался волноводный вывод энергии.

Из приведенных графиков на рис. 1 и спектрограмм сигналов (рис. 2) следует, что крутизна электронной перестройки частоты $\left(\frac{df}{dU}\right)$ в области цент-

ра зоны генерации для ЛОВО $\sim 2,3 \frac{\text{МГц}}{\text{В}}$, а ГДИ $\sim 0,3 \frac{\text{МГц}}{\text{В}}$. Ширина спектра ЛОВО в зоне перестройки частоты изменяется от 100 до 210 кГц и в центре зоны генерации примерно в 3,5 раза больше ширины спектра ГДИ. Максимальное уширение спектра ГДИ на краю зоны генерации не превышает ширины спектра ЛОВО в центре зоны ($\Delta F_{\text{ГДИ}} = 70$ кГц, $\Delta F_{\text{ЛОВО}} = 100$ кГц). При этом в спектральном составе ЛОВО наблюдается существенная паразитная модуляция в полосе частот $1 \div 100$ кГц.

При исследовании флюктуационных характеристик данного колебания ГДИ было установлено, что спектральная плотность частотных шумов $W_{\beta} = -(78 \div 90) \frac{\text{дБ}}{\text{Гц}}$ при полосе анализа $(1 \div 3)$ кГц и при отстройке от центра зоны генерации в пределах 30В (линейный участок электронной перестройки) остается неизменной. Спектральная плотность амплитудных шумов (W_{α}) зависит от перестройки по зоне генерации. В частности, в центре зоны генерации $W_{\alpha} = (5 \cdot 10^{-13} \div 10^{-14}) \frac{1}{\text{Гц}}$ ($F_{\text{д}} = (1 \div 5)$ кГц).

С увеличением полосы анализа шумы генератора уменьшаются и при $F_{\text{д}} = 20$ кГц величина $W_{\alpha} = 5 \cdot 10^{-15} \frac{1}{\text{Гц}}$. При отстройке генератора от центра зоны в сторону меньших значений U (область возникновения колебания) в полосе анализа $F_{\text{д}} = 1 \div 5$ кГц шумы генератора возрастают на $(3 \div 4)$ дБ, а при отстройке в сторону больших значений U (область срыва колебаний) — на $(7 \div 8)$ дБ. С ростом полосы анализа эта разность убывает, и при $F > 20$ кГц шумы генератора в центре и по краям зоны генерации примерно одинаковы.

Сравнительный анализ частотных шумов ГДИ и ЛОВО показал, что вблизи несущей ($F_{\text{д}} = (1 \div 3)$ кГц) величина шумов ЛОВО на $(12 \div 15)$ дБ выше шумов ГДИ. При увеличении полосы анализа $F_{\text{д}} = (3 \div 10)$ кГц эта разность уменьшается до 10 дБ и в дальнейшем остается неизменной. На рис. 3 приведены усредненные значения величины

спектральной плотности флюктуаций ЛОВО и ГДИ, полученные в результате серии измерений в полосе анализа 10 кГц.

Интересной с точки зрения сравнительного анализа спектрального состава сигнала ГДИ и ЛОВО является зависимость ширины спектра и уровня шумов от амплитуды пульсаций ускоряющего напряжения. На рис. 4 приведены зависимости ширины спектра ЛОВО и ГДИ при

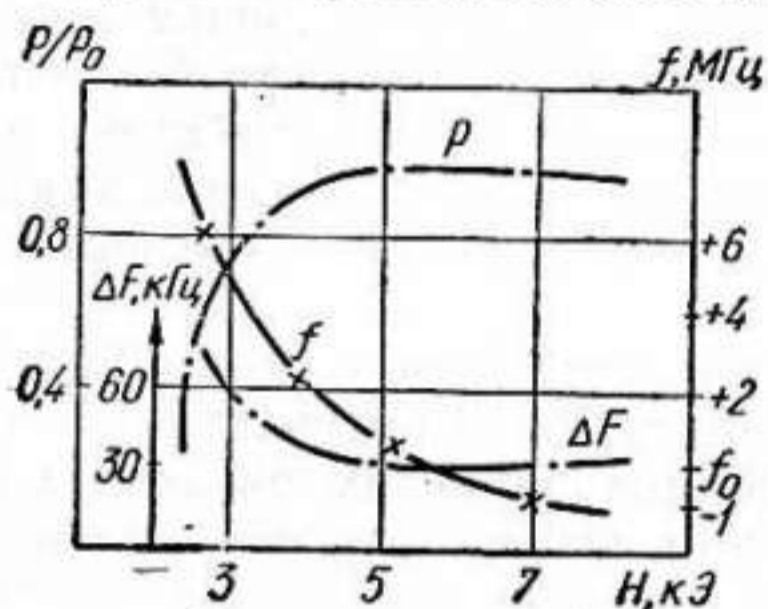


Рис. 5.

изменении пульсаций ускоряющего напряжения в пределах (10÷100) мВ ($f_0 = 75,250$ ГГц, $U_{\text{ЛОВО}} = 3,79$ кВ, $U_{\text{ГДИ}} = 2,90$ кВ). Из графиков видно, что ширина спектра сигнала ГДИ не меняется с ростом $U_{\text{п}}$, а спектр колебания ЛОВО уширяется до 450 кГц. При изменении частоты генерации относительно f_0 ($U_{\text{п}} = 100$ мВ) спектр колебания ЛОВО уширяется до 550 кГц ($U = 3,72$ кВ) и до 1 МГц ($U = 3,82$ кВ), а ширина спектра колебания ГДИ во всей зоне электронной перестройки частоты остается неизмен-

ной по отношению к ширине спектра при $U_{\text{п}} = 10$ мВ.

Вместе с уширением спектра колебания в ЛОВО также наблюдается увеличение уровня шумов. Так, например, для центра зоны генерации ЛОВО

при $U_{\text{п}} = 10$ мВ, $W_{\alpha} = 1 \cdot 10^{-13} \frac{1}{\text{Гц}}$, $W_{\beta} = -90 \frac{\text{дБ}}{\text{Гц}}$, а при $U_{\text{п}} = 100$ мВ, $W_{\alpha} =$

$= 7 \cdot 10^{-13} \frac{1}{\text{Гц}}$, $W_{\beta} = -82 \frac{\text{дБ}}{\text{Гц}}$. В ГДИ для указанного диапазона измене-

ний амплитуды пульсаций ускоряющего напряжения уровень шумов для центра зоны генерации остается неизменным.

С физической точки зрения рассмотренные искажения спектра непосредственно связаны с паразитной и частотной модуляциями сигналов генерации, что обусловлено изменением в пространстве взаимодействия скорости электронов пучка. В общем случае эти изменения скорости могут быть вызваны как техническими причинами, так и физическими процессами, протекающими в электронном потоке. Однако наличие в приборах типа ГДИ высокочастотного открытого резонатора позволяет значительно уменьшить влияние этих явлений на качество спектра сигналов генерации.

В процессе эксперимента установлено, что качество сигналов генераций существенно зависит от величины фокусирующего магнитного поля (H). На рис. 5 приведены зависимости мощности генерации, перестройки частоты и ширины спектра ГДИ от величины H ($f_0 = 72,250$ ГГц).

С уменьшением магнитного поля мощность генерации падает, крутизна перестройки частоты по H — возрастает, наблюдается уширение спектра и увеличение паразитной модуляции, а вблизи области срыва колебания ($H = (2,3 \div 3,0)$ кЭ), где крутизна перестройки максимальна, спектр уширяется до 70 кГц. Очевидно, это явление связано с увеличением амплитуды пульсаций электронного потока, что приводит к оседанию пучка электронов на решетку. Увеличение магнитного поля относительно оптимального значения $H = 5,6$ кЭ приводит к незначительному уменьшению мощности генерации, уширению спектра, появлению дополнительной паразитной модуляции, что связано с уменьшением эффективности взаимодействия пучка с ВЧ полем резонатора. В этом случае качество спектра можно улучшить дополнительной юстировкой прибора (приблизить пучок к дифракционной решетке).

Исследовалось влияние на качество спектрального состава ГДИ величины электронного тока пучка. При уменьшении тока пучка ($U = \text{const}$) значительное уширение спектра наблюдается вблизи пусковых токов генератора ($I_n = 70$ мА; $U = 2,9$ кВ; $\Delta F = 60$ кГц). При токах пучка $I > 2I_n$ ширина спектра составляет $50 \div 30$ кГц и может корректироваться дополнительной юстировкой прибора в магнитном поле.

Следовательно, общим для спектров ЛОВО и ГДИ является наличие паразитной модуляции на частотах ($1 \div 100$) кГц, которая обусловлена как нестабильностью источников питания, так и радиальными пульсациями электронного потока, возникающими в результате действия линзовых эффектов электронной пушки и фокусирующего магнитного поля.

Таким образом, в результате экспериментальных исследований спектральных характеристик ГДИ установлено:

1. В диапазоне комбинированной перестройки частоты ($62 \div 79$) ГГц ширина спектра сигналов ГДИ в области резонансных частот генератора изменяется в пределах ($25 \div 50$) кГц. Значительное уширение спектра наблюдается на краях зон электронной перестройки частоты и вблизи пусковых токов генератора, где для некоторых колебаний ширина спектра может достигать 120 кГц.

2. Ширина спектра ГДИ на краю зоны генерации не превышает ширины спектра ЛОВО в центре зоны генерации, а ширина спектра ГДИ в центре зоны генерации в 4 раза меньше, чем в ЛОВО.

3. Амплитудные и частотные флуктуации ЛОВО вблизи несущей частоты выше, чем в ГДИ на ($5 \div 8$) и ($12 \div 15$) дБ.

4. Лучшее качество спектра сигналов генерации в приборах типа ГДИ по сравнению с ЛОВО обусловлено наличием высокодобротной обратной связи электронного пучка с полем дифракционного излучения, что приводит к значительному уменьшению крутизны электронной перестройки частоты генератора и меньшему влиянию на качество спектра паразитной модуляции скорости электронов в пространстве взаимодействия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шестопалов В. П. Дифракционная электроника. Харьков, «Вища школа», 1976, стр. 231.
2. Корнилов С. А., Савшинский В. А., Уман С. Д., Шумы клистронных генераторов малой мощности. М., «Советское радио», 1972, стр. 199.

Поступила в редакцию
7 VII 1977 г.,
после переработки
25 X 1977 г.