

В
АКАДЕМИЯ НАУК СССР

РАДИОТЕХНИКА

И

ЭЛЕКТРОНИКА

Том XXVIII

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

8

МОСКВА · 1983

УДК 621.391:519.216

О ХАРАКТЕРИСТИКАХ ГЕНЕРАТОРОВ ДИФРАКЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С МНОГОКРАТНЫМ ПРОЛОТОМ ЭЛЕКТРОНОВ

*Воробьев Г. С., Нестеренко А. В., Цвык А. И.,
Шестопапов В. П.*

Приводятся результаты экспериментальных и теоретических исследований стартовых, энергетических, частотных, спектральных и модуляционных характеристик генераторов дифракционного излучения с отражателем электронного потока (ОГДИ). На основании полученных результатов, а также сравнительного анализа характеристик ОГДИ с другими приборами, обсуждаются перспективы развития этих устройств в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы значительное внимание уделяется исследованиям новой модификации генератора дифракционного излучения [1] — отражательного ГДИ (ОГДИ) [2, 3]. Однако до настоящего времени характеристики ОГДИ исследованы в недостаточном объеме [2—6].

В данной работе приводятся результаты экспериментальных исследований и упрощенный теоретический анализ пусковых, энергетических, частотных, спектральных и модуляционных характеристик генераторов дифракционного излучения с многократным пролетом электронов. На основании проведенных исследований определены возможные области практического использования таких приборов.

**1. ОСОБЕННОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК ОГДИ
ПРИ ДВУКРАТНОМ ПРОЛЕТЕ ЭЛЕКТРОНОВ**

Экспериментальные исследования характеристик ОГДИ проводились в диапазоне длин волн $\lambda = 3,8 - 5,6$ мм на макетах генераторов со сферическими цилиндрическими открытыми резонаторами [1]. Отличительной особенностью ОГДИ является то, что электронный поток на выходе из резонатора попадает в тормозящее электростатическое поле отражателя и возвращается обратно в пространство взаимодействия. В зависимости от траекторий движения обратных электронов (конфигурации магнитного и электростатического полей в области отражателя) они либо равномерно оседают на дифракционную решетку (двукратный пролет), либо попадают в электростатическое поле пушки и совершают последующие пролеты.

Одной из положительных особенностей ОГДИ является возможность безмощностного управления выходными характеристиками с изменением напряжения отражателя U_R при заданном значении ускоряющего напряжения U_0 . В работе [4] показано, что если активная составляющая мощности, отдаваемой СВЧ-полю электронным потоком при первичном пролете, превышает мощность взаимодействия отраженного пучка, то зависимости пускового тока \mathcal{I}_n , мощности P и частоты f генерации имеют осциллирующий характер. В противном случае с изменением U_R генератор возбуждается в дискретных зонах. В предположении, что $L \gg 4D$ (L — длина дифракционной решетки; D — расстояние от резонатора до отражателя), определены области значений коэффициента токопрохождения обратного пучка электронов (k_2) и напряжения U_R , при которых возбуж-

даются зоны генерации с номерами $N=0, 1, \dots, N_0$ [4]. В ОГДИ, как и в отражательных клистронах [7], зоны с меньшим N возбуждаются при более высоких отрицательных напряжениях U_R , а коэффициент k_2 показывает, во сколько раз величина тока на входе в пространство взаимодействия со стороны отражателя меньше тока \mathcal{I} электронной пушки.

В результате экспериментальных исследований энергетических и частотных характеристик ОГДИ путем изменения расстояния D и интервала значений U_R установлена практическая возможность возбуждения зон генерации с $N=1, 2, \dots, 16$. При этом мощность колебаний нарастает с

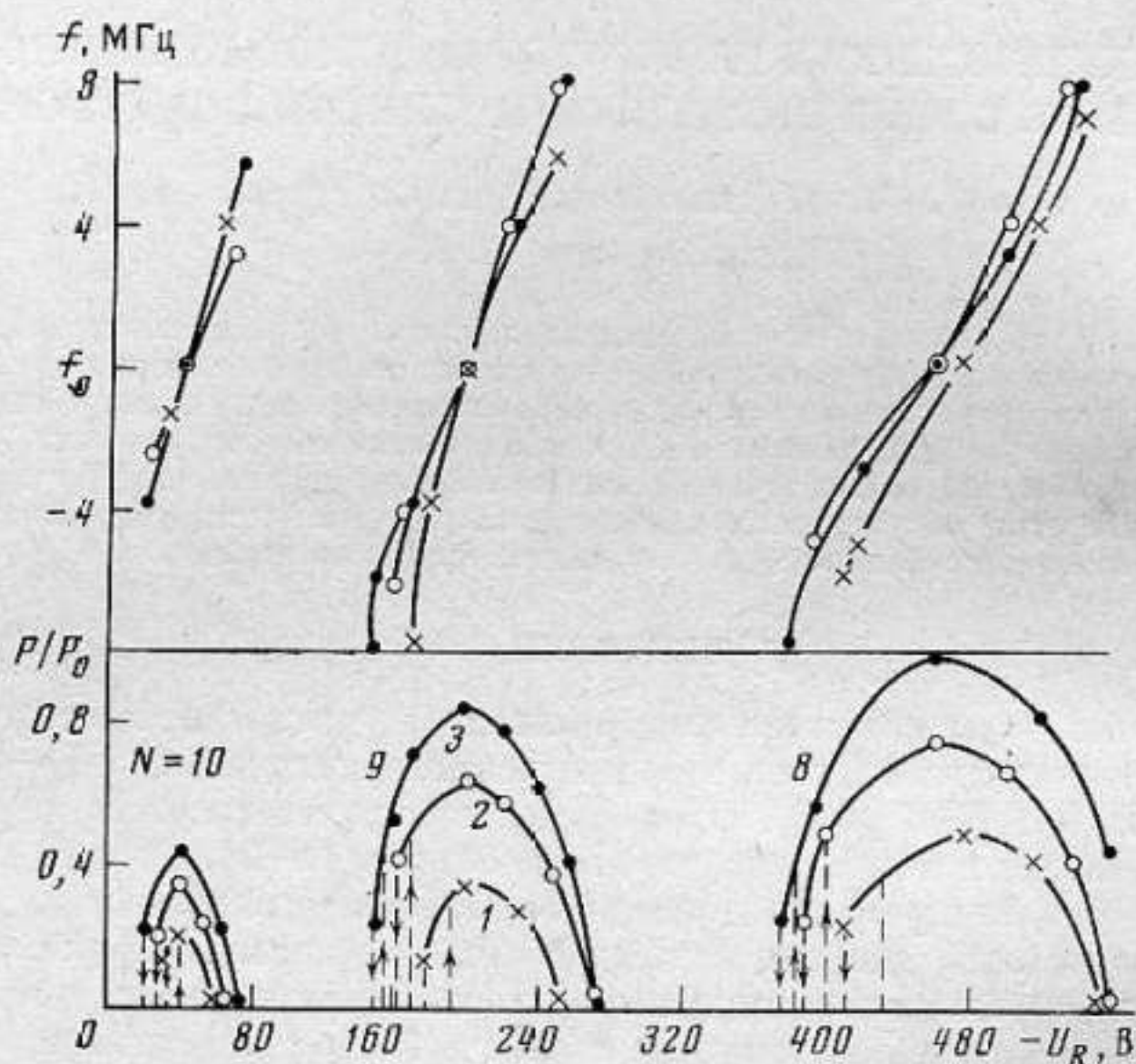


Рис. 1. Энергетические и частотные характеристики ОГДИ при двукратном пролете электронов

переходом на зоны генерации с меньшим номером. Так, при значениях $D=0,1-0,2$ мм получены зоны генерации $N=1, 2, 3$ с величиной P порядка 1 Вт и диапазоном безмощностной перестройки частоты 30–40 МГц в интервале изменения напряжения U_R до 900 В. С увеличением N мощность и ширина зон генерации по U_R уменьшаются, а крутизна $\nu_R = \partial f / \partial U_R$ возрастает и может достигать таких же значений, как и при перестройке по ускоряющему напряжению в пролетных ГДИ [1]. Такой характер поведения P при изменении N обусловлен наличием в ОГДИ группировки электронов по плотности заряда в тормозящем поле отражателя. При этом, как и в пролетно-отражательном клистроне [7], уменьшается суммарный эффект взаимодействия электронов в поле отражателя с ростом углов пролета (увеличением N).

На рис. 1 показаны типичные зоны генерации ОГДИ с номерами $N=8, 9, 10$ при $\mathcal{I}/\mathcal{I}_n=2; 3,7; 4,5$ (кривые 1, 2, 3 соответственно), $f_0=75,2$ ГГц, $U_0=2585$ В, f_0 — резонансная частота. Из рисунка видно, что с увеличением электронного тока мощность и ширина зон генерации возрастают, а крутизна перестройки частоты уменьшается незначительно. При этом в характеристиках ОГДИ наблюдается электронный гистерезис (штриховые линии со стрелками), наличие которого обусловлено процессами возникновения неустойчивых состояний в области малых амплитуд СВЧ-полей (края зон генерации). Неустойчивость колебаний может возникать как за счет нелинейных эффектов, характерных для пролетного ГДИ [5], так и за счет дополнительных явлений: фазировки и модуляции по плотности заряда электронов в поле отражателя; вероятности существования третьего пролета электронов, который, как и в отража-

тельном клистроне [7], может усиливать гистерезисные явления. Для зон генерации с меньшими N амплитуда СВЧ-поля в открытом резонаторе возрастает и степень проявления гистерезисов при $k_2 \geq 0,4$ уменьшается.

Практический интерес представляют зависимости мощности генерации от тока пучка (рис. 2, $k_2=0,5$; 1 — $U_0=2554$ В, $U_R=-160$ В; 2 — $U_0=2575$ В, $U_R=-70$ В; 3 — $U_0=2620$ В; $U_R=-40$ В). Из этих данных следует, что путем изменения параметров U_0 , U_R , \mathcal{U} всегда можно выбрать оптимальные условия, при которых мощность генерации максимальна.

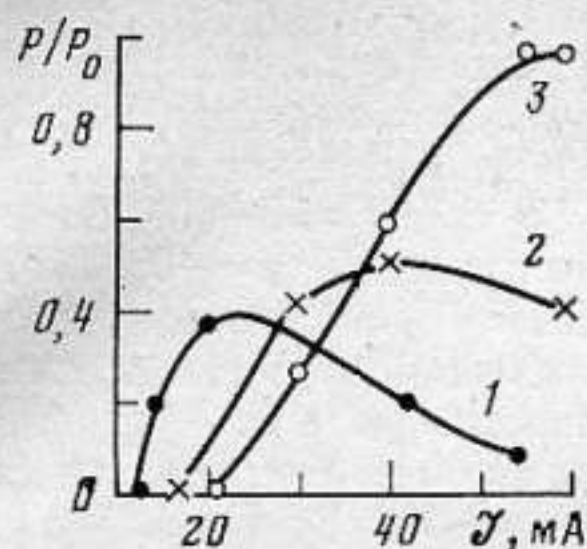


Рис. 2

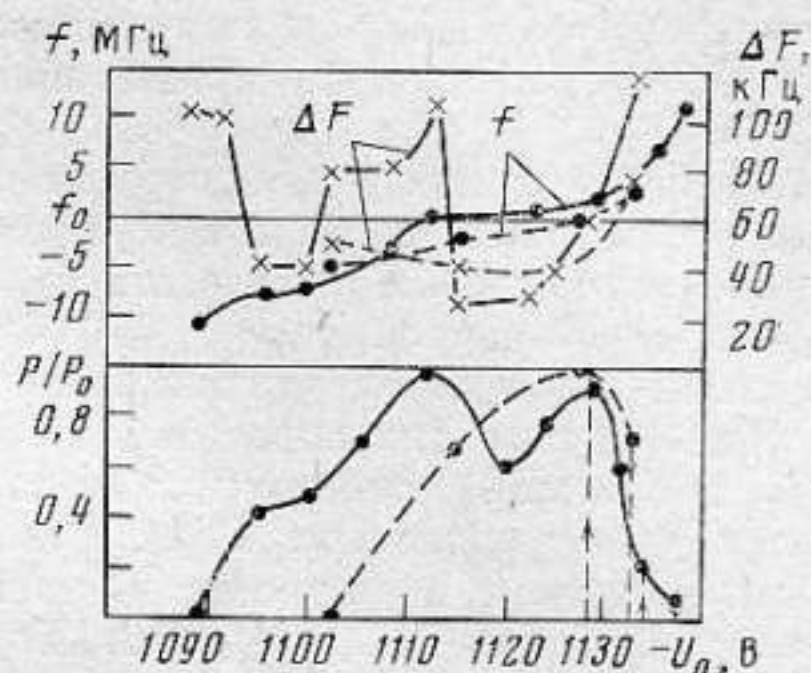


Рис. 3

Рис. 2. Влияние тока пучка на мощность генерации ОГДИ

Рис. 3. Зависимость мощности, частоты и ширины спектра СВЧ-сигнала ОГДИ (сплошные кривые) и пролетного ГДИ (штриховые кривые) от ускоряющего напряжения

Рис. 4. Модуляционные характеристики ОГДИ: а — режим одночастотной модуляции; б — режим двухчастотной модуляции

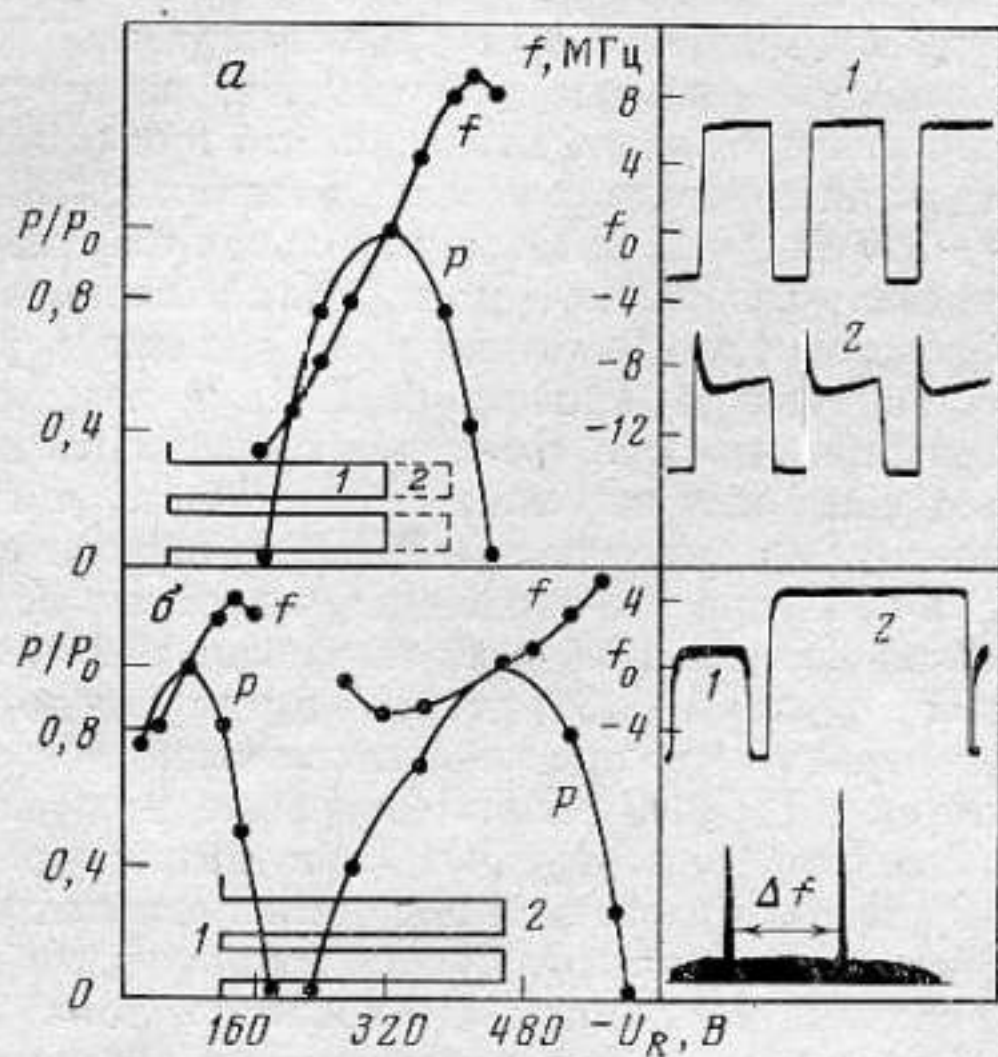


Рис. 4

Следует отметить, что эффективность безмощностного управления выходными характеристиками ОГДИ сохраняется во всем диапазоне комбинированной перестройки частоты (механической и электронной), который, как и в пролетном ГДИ, определяется напряжением U_0 , параметрами электродинамической системы и может превышать октаву.

Остановимся на некоторых результатах экспериментальных исследований спектра СВЧ-сигнала ОГДИ в режиме непрерывной генерации и сравним эти характеристики с другими резонансными приборами, в частности, с пролетным ГДИ, резонансной ЛОВО, отражательным клистроном. Для проведения количественного сравнения ширина спектров ΔF сигналов генерации измерялась на уровне 0,1 по отношению к основной амплитуде спектра. Проведенные исследования показали, что при возбуждении дискретных зон генерации (рис. 1) спектр сигналов ОГДИ из-

меняется таким же образом, как и в пролетном ГДИ [8] — минимальные ширины ΔF и искажения спектра наблюдаются в области линейных участков перестройки частоты (примерно на уровне 3 дБ от максимальной мощности генерации), а значительное его уширение происходит на краях зон генерации, где возрастает крутизна перестройки частоты. Относительно пролетного ГДИ [8] ширина спектральной линии ОГДИ (с двукратным пролетом) увеличивается в 1,2–1,3 раза, что вызвано дополнительной паразитной модуляцией электронного потока по цепи питания отражателя электронов. В общем случае ширина спектра сигнала четырехмиллиметрового ОГДИ в области максимальной мощности генерации составляла 40–80 кГц, а по краям зоны генерации составляла 80–160 кГц.

Более сложные изменения спектра наблюдаются для осциллирующего изменения мощности и частоты генерации [4]. При перестройке по U_R минимальное значение ΔF соответствует областям положительной крутизны v_R частотной зависимости ($v_R=0,08$ МГц/В; $\Delta F \approx 50-60$ кГц), а в областях изменения знака крутизны спектр уширяется ($v_R=-0,1$ МГц/В, $\Delta F \approx 120$ кГц). Однако при перестройке ОГДИ по ускоряющему напряжению (U_R постоянно) существуют области генерации с лучшим качеством спектра, чем в пролетном ГДИ. В частности, на рис. 3 приведены зависимости мощности, перестройки частоты и ширины спектра для длинноволнового колебания ОГДИ ($f_0=53$ ГГц; $U_R=-450$ В; $k_2 \approx 0,3$) и пролетного ГДИ (штриховые кривые) от ускоряющего напряжения при значениях $\mathcal{I}=50$ мА. Из рисунка видно, что в ОГДИ существуют области с относительно малой крутизной ($\partial f/\partial U_0 \approx 0-0,01$ МГц/В), где ширина спектра примерно в 1,5 раза меньше, чем в ГДИ с однократным пролетом.

Экспериментальные исследования спектральных характеристик отражательного клистрона показали, что при использовании того же источника питания и режимах работы, близких к ОГДИ ($f_0=75$ ГГц, $U_0=2900$ В, $U_R=-200$ В, $\mathcal{I}=20$ мА), минимальная ширина спектра составила 500 кГц, а мощность генерации — на порядок меньше, чем в ОГДИ.

Сравнивая приведенные выше данные с результатами исследований качества спектра пролетного ГДИ и резонансной ЛОВО [8], можно утверждать, что при одинаковой стабильности источников питания степень проявления паразитной модуляции в спектре ОГДИ значительно меньше, чем в резонансной ЛОВО и отражательном клистроне.

В ОГДИ при возбуждении дискретных зон генерации имеется практическая возможность осуществления эффективных амплитудной и частотной модуляций СВЧ-сигнала путем модуляции фазы отраженного пучка электронов, что является качественно новым явлением по сравнению с пролетным ГДИ. Экспериментальные исследования показали, что качество импульсов генерации (при амплитудной модуляции) и степень эффективности частотной модуляции определяются начальной фазой влета отраженного пучка электронов, амплитудами и качеством модулирующих напряжений, величиной электронного тока в пространстве взаимодействия, номером зоны генерации. Для обеспечения минимальных искажений при амплитудной модуляции постоянное значение модулирующего напряжения U_m должно находиться за пределами зоны генерации, а вершина U_m — в области центра зоны генерации (максимальной мощности). В частности, на рис. 4, а показана амплитудная модуляция СВЧ-сигнала ОГДИ для отдельной зоны генерации ($U_0=2433$ В, $f_0=72,43$ ГГц). Здесь же условно приведена амплитуда последовательности прямоугольных импульсов (длительностью $\tau=760$ мкс), осуществляющих модуляцию, и осциллограммы возбуждаемых сигналов в точках «1», «2» зоны генерации. Из рисунка видно, что при амплитуде модулирующего импульса, соответствующей центру зоны колебания, импульсы генерации претерпевают незначительные изменения (сигнал 1). Существенные искажения импульсов генерации наблюдаются в области малых амплитуд колебания (сигнал 2), что в основном связано с техническими причинами: отклонениями модулирующих импульсов от прямоугольной формы, в частности большой длительностью переднего (~ 50 мкс) и заднего (~ 30 мкс) фрон-

тов. Это приводит к дополнительной паразитной амплитудной и частотной модуляции сигнала генерации. При улучшении качества модулирующих импульсов искажения сигнала в этой области зоны генерации уменьшаются. Если амплитуда модулирующего импульса U_m находится вблизи области жесткого режима возбуждения колебания (рис. 1), то в сигнале генерации наблюдаются сильные «дрожания» его огибающей и уширение спектра.

При близком расположении зон генерации и амплитудной модуляции в ОГДИ возрастает вероятность двухчастотного режима возбуждения колебаний. Это явление связано с двойной модуляцией фазы отраженного пучка вследствие расположения обеих вершин последовательности модулирующих импульсов в области существования колебаний. Разница между этими частотами определяется амплитудой U_m и крутизной перестройки частоты близлежащих зон генерации. В частности, этот случай показан на рис. 4, б, где приведены зоны генерации ОГДИ при $U_0 = 2476$ В ($f_0 = 72,46$ ГГц), огибающая СВЧ-сигнала и его спектр. В данном случае одновременно возбуждаются два сигнала с различной длительностью импульсов и частотой генерации, разнесенной на 3 МГц. Аналогичный эффект можно получить и в пределах одной зоны генерации, если постоянная составляющая напряжения U_R и амплитуда модулирующего импульса находятся в пределах этой зоны. Однако при возбуждении генератора в дискретных зонах от двухчастотного режима можно избавиться путем изменения постоянного напряжения U_R . В отличие от этого случая при возбуждении колебаний с осциллирующим характером изменения мощности и частоты генерации для произвольных значений U_R и амплитуд модулирующих импульсов всегда наблюдается двухчастотный режим генерации, что для некоторых практических применений нежелательно.

При исследовании в ОГДИ частотной модуляции СВЧ-сигнала установлено, что более эффективно частотная модуляция ОГДИ осуществляется для зон высшего порядка, где крутизна перестройки частоты максимальна. В частности, при амплитуде модулирующей синусоиды в 80 В и частоте модуляции $f_m = 50$ Гц для колебания, приведенного на рис. 4, а, величина индекса частотной модуляции $\beta = \Delta f / f_m = 1,4 \cdot 10^5$ (Δf — частотное отклонение от f_0), а полоса качания частоты равна 14 МГц. Ширина спектра ЧМ-колебаний с $\beta = 1,4 \cdot 10^5$ составила примерно 15 МГц, что близко к теоретическому значению при $\beta \gg 1$.

С увеличением тока пучка до значений $\mathcal{I} = 4 - 6 \mathcal{I}_n$ существенных изменений в приведенных выше характеристиках не наблюдается. Однако при увеличении тока до значений $\mathcal{I} \approx 10 \mathcal{I}_n$ уменьшается амплитуда генерируемых импульсов, возрастает паразитная модуляция в спектре и огибающей излучения, а для частотной модуляции уменьшается величина β и возникает уширение спектра сигналов генерации, что, по-видимому, связано с влиянием пространственного заряда на фазу модуляции обратного пучка электронов.

При необходимости получения в ОГДИ более высокой мощности генерации целесообразно использовать импульсную модуляцию по ускоряющему напряжению. Такие исследования были проведены для следующих параметров импульсов модулятора: длительность прямоугольных импульсов 0,1—10 мкс, частота следования 200—2000 Гц, амплитуда напряжения 1,4—7 кВ, уклон вершины импульсов 0,5—5 В/мкс. В результате экспериментальных исследований установлено, что в ОГДИ возбуждались импульсы генерации длительностью $\tau = 0,15 - 9,9$ мкс с удовлетворительным качеством спектра. При этом ширина спектра сигналов $\tau = 0,15 - 1$ мкс примерно соответствовала теоретическому значению $\Delta F \approx (1 - 2) / \tau$, а для импульсов $\tau = 5 - 10$ мкс, как и в пролетном ГДИ [9], наблюдалось уширение спектра, связанное с паразитной частотной модуляцией СВЧ-сигнала. Однако путем подбора фазы отраженного пучка электронов (напряжением U_R) можно улучшить качество импульсного сигнала: приблизить ширину спектра к теоретическому значению и уменьшить степень проявления паразитных эффектов. Так, если в пролетном ГДИ на длительностях

импульсов генерации $\tau \approx 9,9$ мкс минимальная ширина спектра составила 600–800 кГц, то в ОГДИ она составила 300–350 кГц.

Отметим, что рассмотренные виды модуляции характерны и для отражательных клистронов. Однако в миллиметровом диапазоне с двукратным пролетом электронов ОГДИ имеют более высокую выходную мощность и стабильность частоты генерации, что является одним из определяющих факторов в ряде практических приложений.

2. ВЛИЯНИЕ МНОГОКРАТНЫХ ПРОЛЕТОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ОГДИ

Степень влияния многократных пролетов электронов на характеристики ОГДИ можно определить путем решения эквивалентной задачи возбуждения последовательно соединенных n «парциальных» пролетных ГДИ, разделенных фазами (временем) пролета электронов в тормозящих статических полях отражателя и электронной пушки. Такой подход, в частности, использовался для анализа характеристик отражательных клистронов [7]. Так, в линейном приближении для стартового тока и частоты генерации ОГДИ с многократным пролетом (в предположении однородного распределения поля в пространстве взаимодействия [4]) получим

$$(1) \quad \mathcal{I}_n \approx 0,165 \frac{z_q}{l} \frac{U_0^{3/2}}{Q} \frac{V}{L^3} \frac{e^{2\gamma(z_q+d)}}{(-g_{na}) \operatorname{sh} 2\gamma z_q},$$

$$(2) \quad f = f_0 \left(1 + \frac{1}{2Q} \frac{g_{nr}}{g_{na}} \right),$$

где

$$\begin{Bmatrix} g_{na} \\ g_{nr} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_a \\ F_r \end{Bmatrix} \sum_{m=1}^n k_m \mp 2M \frac{A}{\Phi_0^2} \sum_{m=2}^{n \geq 2} \sum_{s=1}^{m-1} k_m \begin{Bmatrix} \cos \\ \sin \end{Bmatrix} \varphi_{ms} -$$

$$- \frac{M^2}{\Phi_0} \sum_{m=2}^{n \geq 2} \sum_{k=1}^{m-1} \sum_{s=1}^k k_m \theta_{k,k+1} \begin{Bmatrix} \sin \\ \cos \end{Bmatrix} \psi_{ms} +$$

$$+ M^2 \sum_{m=3}^{n \geq 3} \sum_{k=1}^{m-1} \sum_{s=1}^k k_m \begin{Bmatrix} \sin \\ \cos \end{Bmatrix} \psi_{ms},$$

$$\varphi_{ms} = \psi_{ms} + \frac{\Phi_0}{2} + \psi,$$

$$\psi_{ms} = (m-s) \Phi_0 + \sum_{v=1}^m \theta_{v-1,v} - \sum_{j=1}^s \theta_{j-1,j};$$

Функции g_{na} , g_{nr} пропорциональны активной и реактивной составляющим мощности взаимодействия, $n=1, 2, \dots, n_0$ — количество пролетов, ограниченное коэффициентом $k_m = i_m/i_0$ токооседания пучка в пространстве взаимодействия области отражателя и электронной пушки, i_m , i_0 — постоянные токи — начальный и на входе в m -е пространство взаимодействия; $\theta_{k,k+1}$ для нечетных значений k определяет статический угол пролета θ_R электронов в поле отражателя, а для четных — в поле катода электронной пушки; остальные обозначения те же, что и для двукратного пролета [4].

Из анализа формул следует, что при $k_m=1$, определенных параметрах рассинхронизма Φ_0 , углах пролета электронов в поле отражателя θ_R и катода электронной пушки увеличение количества пролетов в ОГДИ, как и в ЛОВО [10], уменьшает пусковой ток генератора примерно в n_0^3 раз. Однако с учетом токооседания степень снижения пусковых токов уменьшается. Некоторые результаты таких расчетов приведены в таб-

лице, где даны значения функции $G_n = -1/g_{na}$, пропорциональной пусковому току (1); $\theta_k \approx \theta_{23} \approx 16\pi$; $\varphi_0 = 100\pi$ (абсолютный угол пролета [4]). Из таблицы видно, что в рассматриваемом случае при шестикратном пролете пусковой ток уменьшается примерно в 35 раз, в то время как без учета потерь электронов на токооседание — в 260 раз.

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили теоретические результаты. В частности, пусковой ток в ОГДИ с многократным пролетом составил 1–5 мА, а в пролетном ГДИ составил 30–50 мА.

Однако, несмотря на снижение пусковых токов, в ОГДИ с многократным взаимодействием могут возникать нежелательные явления — сужение

| n_0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|----------|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| G_n | 7,8 | 1,9 | 0,98 | 0,46 | 0,28 | 0,22 |
| Φ_0 | $-\pi$ | $-0,5\pi$ | $-0,2\pi$ | $-0,1\pi$ | $-0,1\pi$ | $-0,1\pi$ |
| k_m | 1 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,1 |

зон или неравномерность характера изменения стартового тока, частоты и мощности генерации. Так, если в пролетном ГДИ в интервале изменения $\Phi_0 = -2\pi - 0$ для заданной длины пространства взаимодействия возбуждается одна зона генерации, то многократность пролетов приводит к возбуждению нескольких, более узких зон или одной с неравномерным

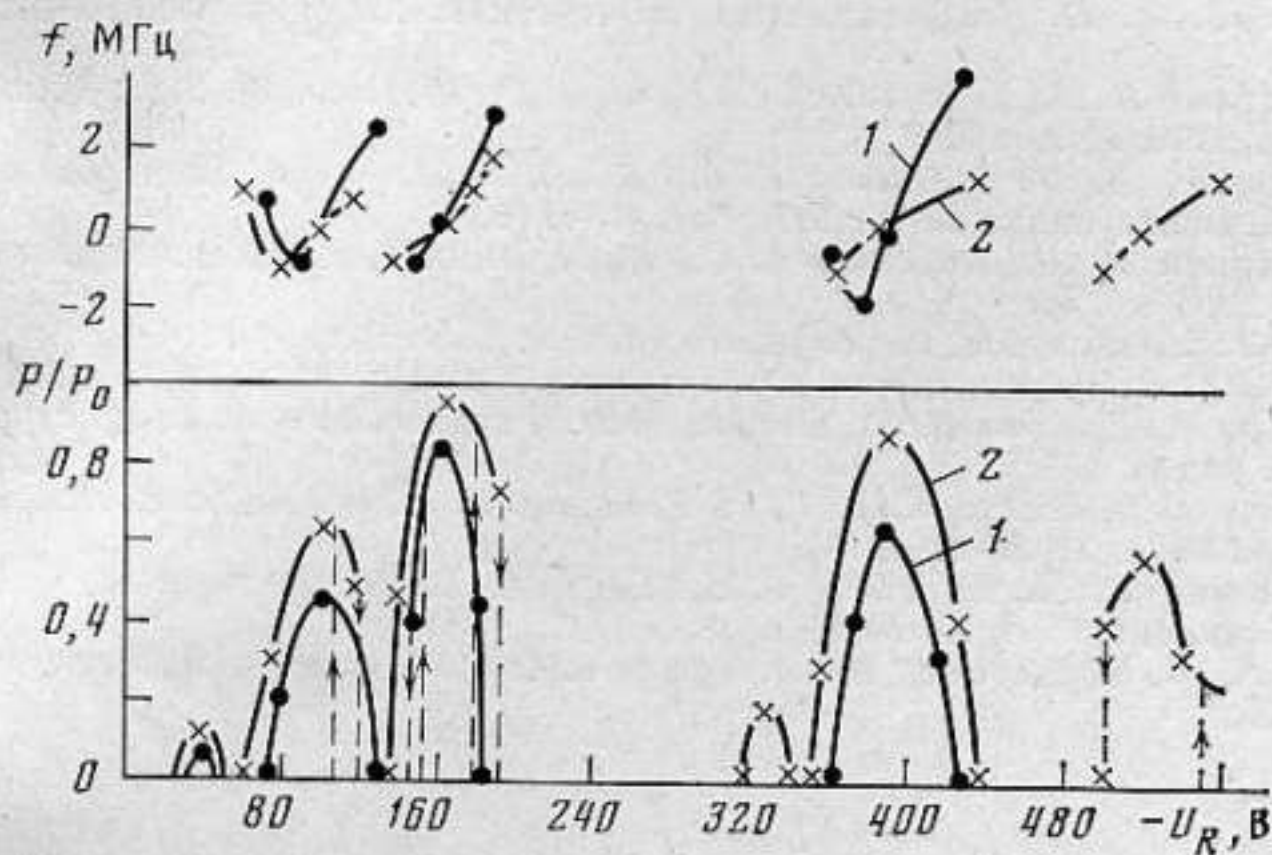


Рис. 5. Влияние многократности пролета электронов на зоны генерации отражательного ГДИ

изменением \mathcal{I}_n , f , P при минимуме пускового тока в области $\Phi_0 \approx -\pi/n_0$. Явление «дробления» зон генерации, в частности, проиллюстрировано на рис. 5, где приведены экспериментальные зависимости мощности и частоты генерации от напряжения отражателя ($U_0 = 2342$ В, $\mathcal{I} = 3\mathcal{I}_n$ — кривые 1; $\mathcal{I} = 5\mathcal{I}_n$ — кривые 2; $\mathcal{I}_n = 2$ мА). В заданном интервале $U_R = -(20-560)$ В возбуждается шесть зон генерации, в то время как при двукратном пролете — 2 или 3 зоны. При этом возрастает степень проявления гистерезисных эффектов (штриховые линии со стрелками), существенно нарушается линейность перестройки частоты и ухудшается качество спектра излучения.

Рассмотренные явления связаны со значительным увеличением эффективной длины пространства взаимодействия в ОГДИ. Поэтому при использовании многократного взаимодействия ($n > 2$) длину пространства

взаимодействия целесообразно уменьшать, что может быть достигнуто путем уменьшения радиуса кривизны сферического зеркала и уменьшения L . Это позволяет значительно улучшить характеристики ОГДИ с многократным взаимодействием, в частности, увеличить ширину и диапазон перестройки частоты зон генерации, уменьшить омические потери дифракционной решетки и габариты прибора по сравнению с пролетным ГДИ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из проведенных экспериментальных и теоретических исследований следует, что ОГДИ обладает широким диапазоном комбинированной перестройки частоты, который обеспечивается путем настройки открытого резонатора и изменения величины ускоряющего напряжения. В отличие от пролетного ГДИ ОГДИ, подобно отражательному клистрону, имеет эффективное безмощностное электронное управление энергетическими, частотными и спектральными характеристиками СВЧ-сигнала. Диапазон безмощностной перестройки частоты максимален при возбуждении отдельных зон генерации и ограничен амплитудой осцилляций при непрерывном изменении частоты. В коротковолновой области мм-диапазона мощность генерации и качество спектра СВЧ-сигнала в ОГДИ выше, чем в отражательном клистроне и в резонансной ЛОВО.

Возможность использования в ОГДИ многократности взаимодействия электронного потока с СВЧ-полем позволяет значительно снизить пусковые и рабочие токи, уменьшить длину и омические потери дифракционной решетки, что указывает на целесообразность создания на базе таких устройств задающих и гетеродинных генераторов МСМ-диапазона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шестопалов В. П. Дифракционная электроника. Харьков: Изд-во Харьк. ун-та, 1976.
2. Балаклицкий И. М., Воробьев Г. С., Цвык А. И., Шестопалов В. П. Докл. АН УССР. Серия А, 1976, № 9, с. 822.
3. Балаклицкий И. М., Воробьев Г. С., Вягин Г. И. и др. Электронная техника. Серия 1. Электроника СВЧ, 1977, вып. 10, с. 105.
4. Балаклицкий И. М., Воробьев Г. С., Цвык А. И. Изв. вузов. Радиоэлектроника, 1980, т. 23, № 10, с. 49.
5. Лукин К. А. Изв. вузов. Радиофизика, 1980, т. 23, № 9, с. 1113.
6. Шматко А. А. Радиотехника и электроника, 1981, т. 26, № 6, с. 1260.
7. Гайдук В. И., Палатов К. И., Петров Д. М. Физические основы электроники СВЧ. М.: Сов. радио, 1971.
8. Балаклицкий И. М., Воробьев Г. С., Годецкий А. Н. и др. Изв. вузов. Радиоэлектроника, 1978, т. 21, № 10, с. 105.
9. Балаклицкий И. М., Воробьев Г. С., Цвык А. И., Шестопалов В. П. Изв. вузов. Радиофизика, 1978, т. 21, № 12, с. 1853.
10. Голант М. Б., Бобровский Ю. Л. Генераторы СВЧ малой мощности. М.: Сов. радио, 1977.

Поступила в редакцию
13.IV.1982