ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Том XXIX, № 8 РАДИОФИЗИКА 1986

УДК 621.385.6

АВТОДИННЫЙ ЭФФЕКТ В ГЕНЕРАТОРЕ ДИФРАКЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Ермак Г. П., Лебедев А. Б., Лукин К. А., Скрынник Б. К., Шестопалов В. П.

Проведено теоретическое и экспериментальное исследование генератора дифракционного излучения (ГДИ) в автодинном режиме. Получены нелинейные нестационарные уравнения динамики ГДИ под воздействием внешнего СВЧ сигнала, отраженного от исследуемого объекта. Найдены выражения для автодинных характеристик ГДИ, исследована их зависимость от основных параметров генератора. Рассмотрены режимы внешнего и внутреннего детектирования ГДИ-автодина. Теоретические результаты согласуются с проведенным экспериментом.

Автодинный эффект связан с изменением внешних и внутренних характеристик автогенератора под воздействием собственного когерентного излучения, отраженного от исследуемого объекта. Автодины характеризуются высокой чувствительностью, конструктивной простотой, надежностью в эксплуатации. Этим объясняется их широкое применение в различных областях радиофизики и электроники. Исследованию автодинов, выполненных на базе генераторов различных типов СВЧ и оптического диапазонов длин волн, посвящен ряд работ [1–5]. Теоретический и экспериментальный анализ автодинного эффекта в генераторе дифракционного излучения (ГДИ) [6], представленный в данной работе впервые, содержит сведения о нелинейных нестационарных уравнениях, описывающих работу ГДИ в неавтономном режиме и выражения для автодинных характеристик ГДИ. Приведены результаты теоретического и экспериментального исследования ГДИ-автодина в режимах внешнего и внутреннего детектирования.

Уравнения динамики ГДИ-автодина. ГДИ представляет собой открытый резонатор (ОР), образованный двумя зеркалами с квадратичной коррекцией. На нижнем зеркале расположена ограниченная дифракционная решетка, над которой движется электронный поток. В верхнем зеркале имеется вывод электромагнитной энергии, выполненный в виде узкой полуволновой щели, нагруженной на одномодовый волновод, в котором возбуждается волна H_{01}. Генерируемый сигнал распространяется от генератора через волновод нагрузки и излучается антенной в пространство. Отразившись от исследуемого объекта с комплексным амплитудным коэффициентом отражения $\Gamma_0 = |\Gamma_0| \exp\{-i\varphi_\Gamma\}$, сигнал принимается той же антенной, попадает в открытый резонатор ГДИ через отверстие связи и в результате взаимодействия с электронным потоком изменяет характеристики самого потока, а также выходного ВЧ сигнала. При движении облучаемого объекта с постоянной скоростью частота отраженного сигнала будет изменяться на величину доплеровского смещения $\omega_D = 2(v/c)\omega$, где c — скорость света, v — проекция скорости объекта на ось, соединяющую его с излучателем, ω — частота излученного сигнала. Амплитуда $B_{\text{отр}}(t)$ отраженного сигнала, возвратившегося в волновод с доплеровским сдвигом частоты, и амплитуда $B(t)$ сигнала, излученного из волновода, связаны соотношением

$$B_{\text{отр}}(t) = \Gamma_0 K_c B(t - t_з), \tag{1}$$

где $K_c = |K_c| \exp\{-i\delta_1(t)\}$ — коэффициент согласования, учитывающий суммарные потери мощности излученного сигнала на трассе и изменение его фазовых характеристик, $t_3 = 2L/c$ — время запаздывания отраженного сигнала, $\delta_1(t) = \omega_D[t + t_3(1/2 + 2\omega/\omega_D)]$ — поправка к фазе, обусловленная доплеровским сдвигом частоты и временем запаздывания, L — расстояние между исследуемым объектом и отверстием связи в момент отражения.

Таким образом, колебания в ОР ГДИ-автодина возбуждаются одновременно электронным потоком и отраженным сигналом через узкую прямоугольную щель связи. Длина a этой щели совпадает с размером широкой стенки волновода, а ее ширина d — много меньше длины волны. Такую щель удобно заменить эквивалентным магнитным током. Если в волноводе распространяется волна H_{01}, то поверхностная плотность этого тока имеет только продольную компоненту и зависит от разности магнитных полей в ОР H_{OP} и в волноводе нагрузки $H_в$ [8]:

$$j_{mx} = \frac{\varkappa_0 c}{ad} f(x) \int_0^a [\boldsymbol{H}_в(x') - \boldsymbol{H}_{OP}(x')]_x f(x')\, dx', \qquad (2)$$

где $f(x) = \sin \pi x/a$, $\varkappa_0 = 0{,}13$ — константа, определяемая при расчете волнового сопротивления щели.

Используя выражения для амплитуд колебаний, возбуждаемых в ОР и волноводе заданными токами [7], и исключая из них (с учетом (2)) амплитуду поля в волноводе , получаем уравнения для стационарной амплитуды s-й моды ОР [5]

$$C_s(\omega)\,[i(\omega - \omega_s) - \tilde{\omega}_s] - \hat{\omega}_s C_s(\omega) = J_e(\omega)\,. \qquad (3)$$

Применяя к (3) обратное преобразование Фурье (положив, что ω_s, $\hat{\omega}_s$ и $\tilde{\omega}_s$ от частоты не зависят), получаем дифференциальное уравнение для анализа медленно меняющихся процессов со спектром, локализованным вблизи частоты ω_0 стационарной генерации:

$$\frac{d}{dt} C_s(t) - [i(\omega - \omega_s) - \tilde{\omega}_s] C_s(t) + \hat{\omega}_s C_s(t - t_3) = -\tilde{J}_e(t)\,. \qquad (4)$$

В уравнениях (3), (4) использованы следующие обозначения:

$$\tilde{J}_e(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{N_s} \int_{V_e} \int_{\omega t}^{\omega t + 2\pi} \boldsymbol{j}(\boldsymbol{r}, t)\, \boldsymbol{E}_s(\boldsymbol{r})\, e^{i\omega t}\, dV d(\omega t),$$

$\omega_s = \omega_s' - i\omega_s''$ — собственная частота s-й моды ОР, $\boldsymbol{j}_e(\boldsymbol{r}, t)$ — плотность тока электронного пучка, N_s — норма колебаний s-й моды ОР, V_e — объем, занимаемый электронным потоком, $\hat{\omega}_s = \omega_s'' K_c K_1 K_2 \Gamma_0$ — комплексная поправка к собственной частоте, обусловленная отраженным сигналом, $\tilde{\omega}_s = N_0 R_2 / N_s (N_0 - R_3)$ — поправка к мнимой части собственной частоты, обусловленная наличием отверстия связи, $K_1 = \tilde{\omega}_s R_1 / R_2$ — коэффициент прохождения отраженной волны в резонатор, $K_2 = R_1/(N_0 - R_3)$ — приведенный коэффициент отражения внешнего сигнала от резонатора в отсутствие электронного потока, N_0 — норма волны H_{01}, коэффициенты $R_{1,2,3}$ зависят от геометрических размеров отверстия связи и распределения поля вдоль щели:

$$R_3 = R_1^2/R_2, \quad R_2 = (\varkappa_0 c/a) \left[\int_0^a H_s(x') f(x')\, dx'\right]^2,$$

$$R_1 = -(\varkappa_0 c/a)\int_0^a H_s(x')f(x')dx' \int_0^a H_0(x')f(x')dx',$$

H_0 — магнитное поле волны H_{01}, E_s, H_s — квазисобственные функции электрического и магнитного поля s-й моды ОР.

Если пренебречь эффектами запаздывания ($t_з=0$), то уравнение (4) совпадает с уравнением теории автодинов на классических автогенераторах [3]. В отличие от [3] уравнение (4) получено в результате решения электродинамической задачи (в самосогласованной постановке) о воздействии отраженного сигнала на ГДИ через отверстие связи. Это позволило не только определить вид уравнения (уже известный), но и рассчитать внешнюю добротность $Q_{вн}$ и коэффициент связи σ_0 ОР с нагрузкой с учетом наличия щели связи и влияния отраженного сигнала:

$$\sigma_0 = \frac{Q_{0s}}{Q_{вн}}\bigg|_{\Gamma=0} = \frac{N_0}{\omega_s' N_s}\frac{R_2}{(N_0-R_3)}, \quad \frac{1}{Q_{вн}} = \frac{\sigma_0}{Q_{0s}}(1+\Gamma\cos\delta(t)), \tag{5}$$

где $\delta(t) = \delta_1(t)+\varphi_\Gamma$, $\Gamma = K_1K_2|K_c||\Gamma_0|/\sigma_0$ — приведенный коэффициент отражения, $Q_{0s}=1/2\gamma_{0s}$ — собственная добротность резонатора.

Решение уравнения (4) будем искать в окрестности стационарного режима при $\Gamma=0$. Введем амплитуду и фазу колебания ОР $C_s(t)=A(t)\exp\{-i\psi(t)\}$. Тогда при условии $\Gamma \ll 1$ для установившегося автодинного режима из (4) получаем выражения для автодинных смещений амплитуды $a=A-A_0$ и частоты $\varepsilon=\omega_0-\omega=\omega_0-\omega_s'-\dot{\psi}$ генерируемых колебаний относительно своих невозмущенных значений A_0 и ω_0 [3]:

$$\begin{aligned} a(t) &= -(1/2)\Gamma K_a A_0\cos(\delta-\psi_\tau), \\ \varepsilon(t) &= \Gamma(\omega_s'/2Q_{вн})\sin(\delta) - (1/2)\Gamma K_a q\cos(\delta-\psi_\tau), \end{aligned} \tag{6}$$

где $\psi_\tau = \omega_D t_a$, $t_a = 1/p$ — время автодинного отклика, $K_a = \sigma_0\omega_s' Q_{0s}^{-1}(p^2+\omega_0^2)^{-1}$ — коэффициент автодинного усиления при внутреннем детектировании, показывающий, во сколько раз амплитуда a автодинного отклика превосходит амплитуду ΓA_0 отраженного сигнала, $p = \omega_s''(1+\sigma_0)+[\partial\,\mathrm{Re}\,\tilde{J}_e/\partial A]|_{A=A_0}$ — прочность предельного цикла ГДИ, $q=\omega_0-\omega_s'-[\partial\,\mathrm{Im}\,\tilde{J}_e/\partial A]|_{A=A_0}$ — неизохронность ГДИ.

Режим внутреннего детектирования дает возможность регистрации не только изменения амплитуды, но и приращения полного тока пучка или его гармоник, вызванного отраженным сигналом. Учитывая, что $|a(t)|\ll A_0$, приращение тока ΔI электронного потока в конце пространства взаимодействия можно представить в виде

$$\Delta I(t) = -(1/2)\Gamma K_j I_0\cos(\delta-\psi_\tau), \tag{7}$$

где $K_j = \left[\frac{\partial I}{\partial A}\Big/\frac{I}{A}\right]\Bigg|_{A=A_0} K_a$ — коэффициент автодинного усиления по току.

При внешнем детектировании измеряется мощность $P_н$, поступающая в нагрузку. Отношение изменения мощности $\Delta P_н = P_н - P_{н.о}$, вызванного отраженным сигналом, к невозмущенной мощности $P_{н.о}$ определяется отношением

$$\frac{\Delta P_н(t)}{P_{н.о}} \approx -\Gamma K_a^{вн}\cos(\delta(t)), \tag{8}$$

где $P_н = P_e(A)(1+Q_{вн}/Q_{0s})^{-1}$, $P_e(A)$ — мощность, отдаваемая пучком электронов полю ОР, $K_a^{вн} = (1-p/\omega_s'')K_a - (1+Q_0/Q_{вн})^{-1}$ — коэффициент автодинного усиления при внешнем детектировании [3].

Результаты теоретического анализа. Из (6) видно, что в ГДИ автодинный отклик представляет собой гармонический сигнал доплеровской частоты с амплитудой, зависящей от параметров генератора и характеристик облучаемого объекта и трассы. Эффективность ГДИ-автодина характеризуется коэффициентом автодинного усиления при внутреннем или внешнем детектировании.

Коэффициенты K_a и $K_a^{вн}$ существенным образом зависят от прочности предельного цикла. Для расчета этой характеристики необходимо решить задачу о стационарных автоколебаниях в ГДИ с учетом его основных параметров. Стационарные значения амплитуды и частоты колебаний, а также значения производной по амплитуде от вынуждающей силы находятся в результате численного интегрирования уравнений нелинейной теории ГДИ [9]. Для моделирования электронного потока использовался метод крупных частиц. Все расчеты выполнены для основного колебания ОР с гауссовым распределением поля вдоль пучка при следующих значениях параметров: $N=30$ — число периодов решетки на длине взаимодействия, $Q_0=1400$, $W=0{,}72$ — отношение диаметра пятна поля* к длине взаимодействия.

Исследовались автодинные режимы ГДИ при различных отношениях рабочего тока к минимальному по зоне генерации стартовому току $g=I/I_{st}^{min}$. Для удобства расчетов введены безразмерные параметры: $b=v_0/v_ф-1$ — относительная расстройка начальной скорости v_0 пучка электронов и фазовой скорости $v_ф=\omega_s'/h$ синхронной волны, $\varphi=2\pi Nb/(1+b)$ — относительный угол пролета электронов через ОР ($h=2\pi/l$, l — период дифракционной решетки). Эти параметры однозначно связаны с ускоряющим напряжением U_0:

$$\varphi \approx \pi N(U_0/U_s-1), \quad U_s=mv_ф^2/2e, \tag{9}$$

где e, m — заряд и масса электрона.

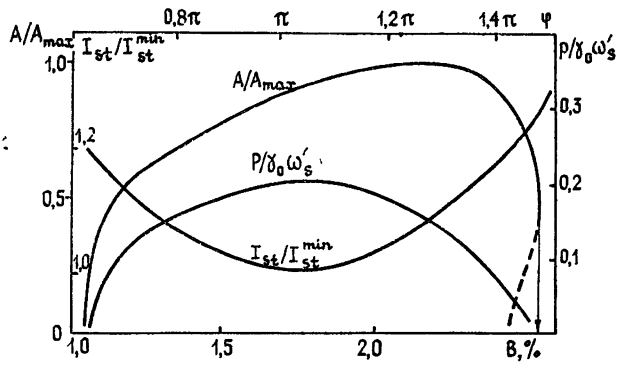

Рис. 1.

На рис. 1 и 2 показано изменение стартового тока I_{st}, амплитуды A, смещения частоты $\delta\omega=(\omega_0-\omega_s')/\gamma_0\,\omega_s'$, прочности предельного цикла p, времени автодинного отклика t_a, коэффициентов автодинного усиления при внутреннем и внешнем детектировании в пределах зоны генерации ($\sigma_0=0{,}6$). Величины p и t_a нормированы соответственно на $\gamma_{0s}\omega_s'$ и $(\gamma_{0s}\omega_s')^{-1}$. Поведение прочности предельного цикла типично для генераторов томсоновского типа [10]. Она резко уменьшается на краях зоны и имеет максимум в точке, соответствующей минимальному по зоне генерации значению стартового тока. Наибольшие значения K_a, $K_a^{вн}$ и t_a достигаются на краях зоны генерации. Видно, что коэффициент автодинного усиления может по величине быть меньше единицы. Это означает, что поступивший в приемную систему сигнал не усиливается. Однако при достаточной чувствительности приемного тракта

* Диаметр пятна поля определялся стандартным способом [6].

сигнал может регистрироваться на доплеровской частоте. В точках, где $K_a^{вн}$ превышает единичное значение, отраженный сигнал усиливается.

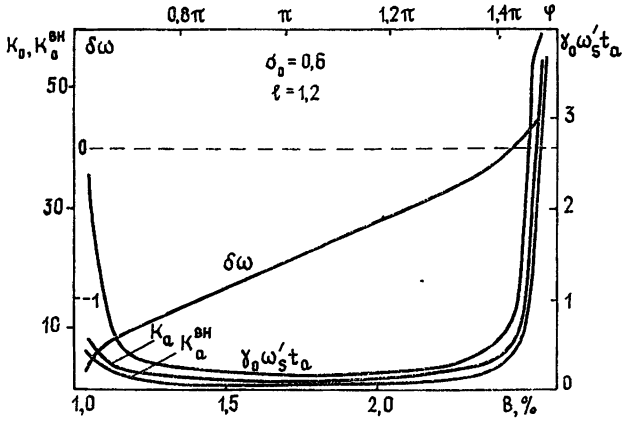

Рис. 2.

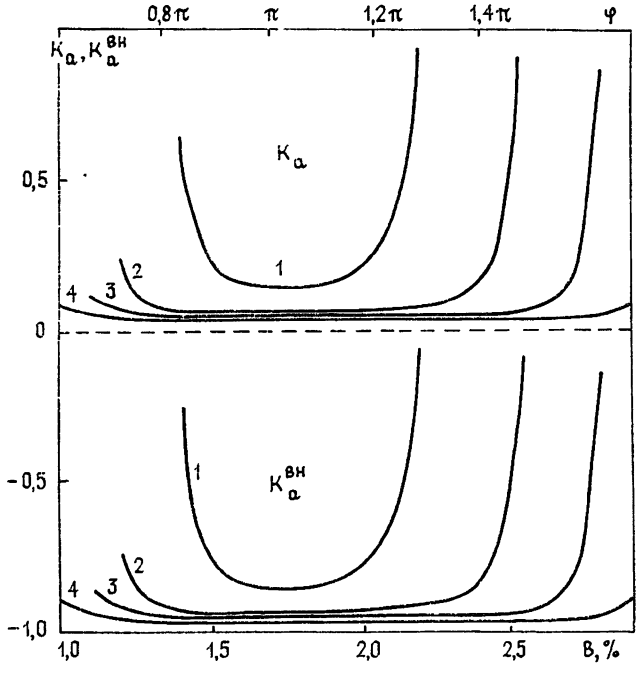

Рис. 3.

На рис. 3 показано изменение K_a, $K_a^{вн}$ в пределах зоны генерации при слабой связи с нагрузкой (σ_0=0,01). Расчеты проведены для g=1,05; 1,17; 1,29; 1,4 (кривые *1, 2, 3, 4*). С ростом g коэффициент автодинного усиления заметно уменьшается в центре зоны генерации. На краях зоны K_a, $K_a^{вн}$ изменяются незначительно и остаются сравнимыми по величине. Наличие области отрицательных значений $K_a^{вн}$ означает, что в этом случае фаза сигнала в канале регистрации противоположна фазе принятого сигнала. Приведенные на рис. 3 графики иллюстрируют случай слабой связи ОР с нагрузкой, когда влияние отраженного сигнала мало и его усиления не происходит. Для повышения коэффициента автодинного усиления необходимо увеличивать связь ОР с нагрузкой. Однако с ростом коэффициента связи σ_0 уменьшается нагруженная добротность ОР, что приводит к нежелательному увели-

чению стартовых, а значит и рабочих токов ГДИ. Это говорит о существовании оптимальных значений коэффициента σ_0. Для практики представляет интерес зависимость коэффициента автодинного усиления от σ_0 при фиксированном отношении рабочего тока к минимальному стартовому. Соответствующие графики для $g=1{,}2$ приведены на рис. 4.

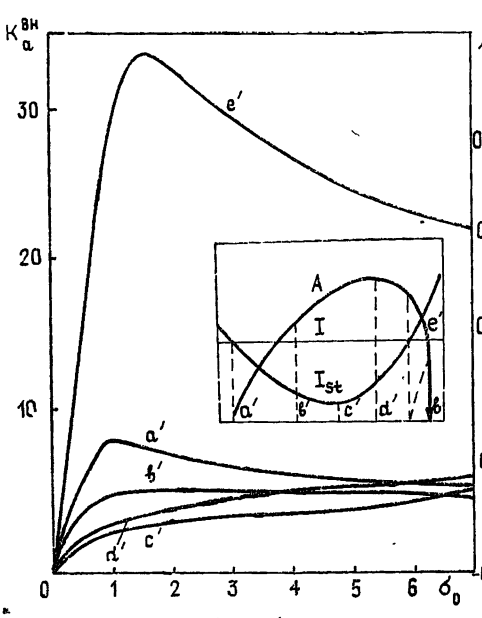

Рис. 4.

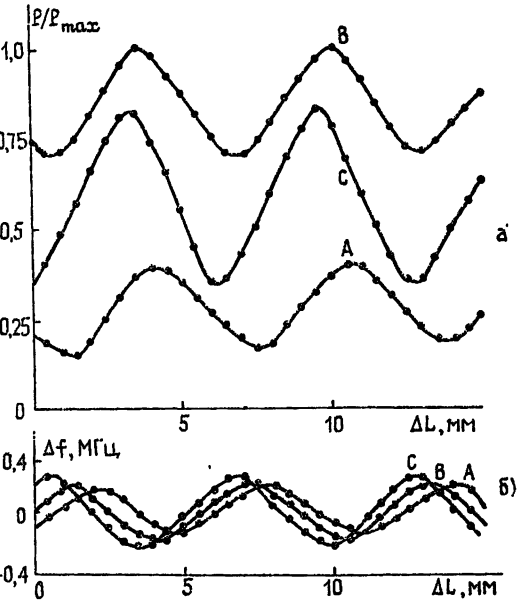

Рис. 5.

Показано изменение $K_a^{вн}$ с ростом σ_0 для различных точек зоны генерации (a' — начало зоны генерации, b' — промежуточная точка в низковольтной части зоны, c' — минимум стартового тока, d' — максимум амплитуды и кпд, e' — высоковольтный край зоны). Видно, что коэффициент связи ОР с нагрузкой оказывает влияние не только на величину $K_a^{вн}$, но и на качественный режим работы ГДИ-автодина, несмотря на то, что остается фиксированным параметр g. Увеличение σ_0 вызывает смену режима противофазного приема на синфазный и затем на режим усиления отраженного сигнала (это соответствует переходу K_a через нулевое и единичное значения). Как было отмечено ранее, максимальные значения $K_a^{вн}$ достигаются на краях зоны генерации, причем при $\sigma_0 > 0{,}5$ величина $K_a^{вн}$ существенно больше на правом краю зоны. В центральной части зоны генерации увеличение $K_a^{вн}$ с ростом σ_0 происходит плавно и без насыщения. Для низковольтной области зоны генерации характерно насыщение $K_a^{вн}$ с последующим его уменьшением при увеличении связи. Значение σ_0, при котором наступает насыщение, тем больше, чем ближе к точке минимума стартового тока производится наблюдение. Видно, что верхний предел рабочих значений σ_0 равен 1,0 на низковольтном и 1,5 на высоковольтном крае зоны генерации. Дальнейшее увеличение коэффициента связи нецелесообразно по указанным выше причинам.

Из графиков на рис. 4 можно также определить величины σ_0, при которых осуществляется переход $K_a^{вн}$ через нуль и единицу в каждой точке зоны генерации. При $\sigma_0 \gtrsim 0{,}08$ усиление становится возможным на краях зоны, а при $\sigma_0 \gtrsim 0{,}55$ — по всей зоне генерации.

Экспериментальное исследование ГДИ-автодина. Для сравнения автодинных характеристик ГДИ и других генераторов СВЧ методика эксперимента выбрана аналогичной [3]. Проведено экспериментальное исследование амплитуды и формы сигнала автодинного отклика, зависимости коэффициента автодинного усиления от режима работы ГДИ

и его связи с нагрузкой при внешнем детектировании по изменению выходной мощности и генерируемой частоты. Величина коэффициента отражения по мощности $\Gamma_м$ изменялась аттенюатором.

На рис. 5 изображены амплитудная и частотная характеристики ГДИ в зависимости от перемещения ΔL отражающего объекта для $n=L/\lambda=253$. Характеристики получены для трех точек зоны генерации при $\Gamma_м=0{,}001$ и $\lambda=8$ мм (A, C — низковольтный и высоковольтный участки зоны генерации соответственно, B — максимум генерируемой мощности). Видно, что форма амплитудного сигнала автодинного отклика ГДИ близка к синусоидальной и остается такой во всех точках зоны генерации. Это подтверждает справедливость пренебрежения малой автодинной поправкой к частоте генератора при теоретическом анализе и согласуется с выводами [3]. Для расчета $K_a^{вн}$ по измеряемому значению мощности (8) необходимо знать приведенный коэффициент отражения Г. Учитывая наличие на трассе излученного и отраженного сигнала только волноводного участка, его малую протяженность и близкий к идеальному характер отражения волны от исследуемого объекта, можем положить $K_c \approx 1$. Тогда, по известному значению коэффициента $\Gamma_м=\Gamma_0^2$ нетрудно определить $\Gamma=K_1K_2\sqrt{\Gamma_м}/\sigma_0$. При этом $K_a^{вн}$ рассчитывается по формуле

$$K_a^{вн}=\chi\,(\Delta P_н^{max}/P_{н.о})/\sqrt{\Gamma_м}, \qquad (10)$$

где $\chi=-\sigma_0/K_1K_2=1-N_0/R_3$. Для ГДИ, исследованного в данной работе, $\chi\approx3{,}46$.

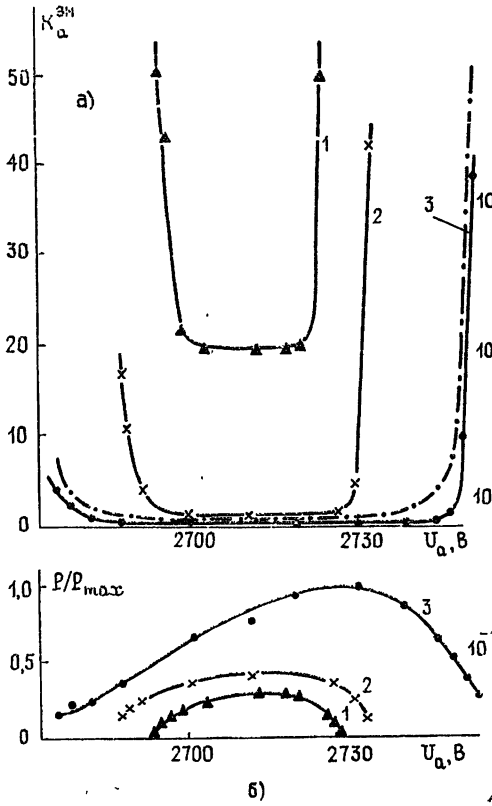

Рис. 6.

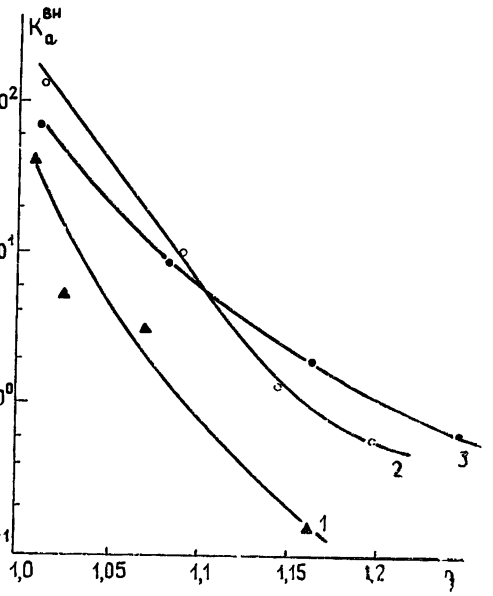

Рис. 7.

Типичные зависимости $K_a^{вн}$ от ускоряющего напряжения приведены на рис. 6. Там же для наглядности показаны кривые выходной мощности ГДИ, нормированные на P_{max} при $g=1{,}16$. Из графиков видно, что $K_a^{вн}$ достигает максимальных значений на краях зоны генерации,

вблизи точек срыва генерации. Минимальным значениям $K_a^{вн}$ соответствуют напряжения, при которых стартовые токи минимальны. Измерения проведены при различных значениях g ($g_1=1{,}02$; $g_2=1{,}06$; $g_3=1{,}2$). Величина коэффициента связи $\sigma_0=0{,}6$ измерялась по методике, описанной в [6].

Хорошо видно, что с уменьшением рабочего тока коэффициент автодинного усиления возрастает значительно быстрее по сравнению с падением мощности генерации. Для значений рабочего тока, близких к пусковым, изменение $K_a^{вн}$ носит нарастающий характер. Степень роста $K_a^{вн}$ с уменьшением g на порядок превышает изменение выходной мощности. На рис. 7 показано изменение $K_a^{вн}$ в зависимости от g для различных значений σ_0 ($\sigma_{01}=0{,}24$; $\sigma_{02}=0{,}33$; $\sigma_{03}=1{,}05$), измеренных в точках зон генерации с максимальной мощностью. Видно, что $K_a^{вн}$ значительно возрастает при увеличении связи. Так, увеличению связи в четыре раза соответствует увеличение $K_a^{вн}$ более чем в пятнадцать раз. Это хорошо согласуется с результатами теоретического анализа. Следует отметить, что увеличению коэффициента связи сопутствует рост пускового тока, особенно сильный для ГДИ, работающих в коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн. Для таких ГДИ при $\sigma_0>2$ пусковые токи приближаются к предельно возможным для применяемых электронных пушек. Это накладывает ограничение на величину коэффициентов связи, реализуемых на практике.

На рис. 6 штрихпунктиром показана теоретическая зависимость $K_a^{вн}$ от ускоряющего напряжения, рассчитанная для $\sigma_0=0{,}6$ и $g=1{,}2$. Видно хорошее качественное соответствие с результатами измерений. Количественное расхождение связано с погрешностями измерения стартового тока генератора и коэффициента связи с нагрузкой, а также выходной мощности прибора.

Режим внутреннего детектирования. ГДИ-автодин в режиме внешнего детектирования отличают простота конструкции и хорошая чувствительность к принимаемому сигналу. Однако возможности режима внешнего детектирования ограничены характеристиками полупроводниковых диодов, используемых в качестве детекторов сигналов. Это становится особенно заметно в коротковолновой части миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн, где полупроводниковые детекторы имеют значительные потери преобразования, малый динамический диапазон и неустойчивость параметров.

Задача улучшения характеристик ГДИ-автодина может быть решена с помощью изменения его конструкции для реализации режима внутреннего детектирования, основанного на изменении тока в цепи питания генератора при воздействии на него отраженного сигнала. Как видно из (7), автодинное приращение тока электронов в конце пространства взаимодействия и связанный с ним коэффициент автодинного усиления ГДИ по току могут достигать большой величины в случае, если производная от тока по амплитуде в области коллектора будет значительно превышать единицу.

Для реализации этого режима необходимо повысить отношение сигнал/шум в цепи регистрации тока. Это достигается с помощью специально разработанных электронных детекторов типа модифицированных диодов [11], целесообразность использования которых в автодинах подтверждается результатами работы [12]. Конструктивно они представляют собой промежуток, образованный двумя электродами, один из которых прозрачен для электронов пучка. Расположены они в конце пространства взаимодействия. Вольт-амперная характеристика модифицированного диода сходна с характеристикой полупроводниковых диодов, а по таким характеристикам, как ширина динамического диапазона, стабильности и возможности регулировки параметров они значительно превосходят последние.

Исследования ГДИ-автодина с электронным детектором показали, что в режиме внутреннего детектирования он обладает более высокой

чувствительностью по сравнению с режимом внешнего детектирования [13].

В работе проведены теоретические и экспериментальные исследования ГДИ-автодина. Получены уравнения динамики ГДИ в неавтономном режиме работы при произвольном уровне амплитуды внешнего сигнала, отраженного от исследуемого объекта, а также формулы расчета внешней добротности ОР ГДИ и коэффициента связи с нагрузкой.

Показано, что без учета эффекта запаздывания уравнение возбуждения ОР при наличии в волноводе нагрузки отраженного сигнала сводится к известному уравнению автодинных генераторов. Получены выражения для автодинного отклика и коэффициентов автодинного усиления ГДИ при внутреннем и внешнем детектировании, а также формула для автодинного приращения тока пучка электронов, регистрируемого в цепи коллектора.

Изучено поведение автодинных характеристик ГДИ в зависимости от его основных параметров. Показано, что коэффициент автодинного усиления достигает максимальных значений на краях зоны генерации при минимальных отношениях рабочего тока к стартовому. Наибольший эффект достигается в области гистерезиса зоны электронной перестройки. Проведен расчет оптимальных областей изменения коэффициента связи, обеспечивающих максимальное усиление, а также расчет минимальных значений коэффициента связи, при которых становится возможным усиление отраженного сигнала в различных точках зоны генерации. Результаты теоретических и экспериментальных исследований находятся в хорошем соответствии.

Полученные результаты позволяют улучшить характеристики автодинного режима ГДИ и рассчитывать его параметры. Проведенные исследования показали высокую эффективность работы ГДИ в автодинном режиме.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алахов Е. К. — Изв. вузов — Приборостроение, 1953, 2, с. 28.
2. Богомолов А. Ф. Основы радиолокации. — М: Сов. радио, 1954, с. 303.
3. Гершензон Е. М., Туманов Б. Н., Бузыкин В. Т., Калыгин В. М., Левит Б. И. — Радиотехника и электроника, 1982, 27, № 1, с. 104.
4. Туманов Б. Н., Бузыкин В. Т. — Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ, 1983, вып. 2 (350), с. 3.
5. Ермак Г. П., Лебедев А. Б., Лукин К. А., Скрынник Б. К., Шестопалов В. П. Препринт ИРЭ АН УССР № 262. — Харьков, 1984.
6. Шестопалов В. П. Дифракционная электроника. — Харьков: Вища школа, 1976, с. 231.
7. Вайнштейн Л. А., Солнцев В. А. Лекции по сверхвысокочастотной электронике. — М.: Сов. радио, 1973, с. 400.
8. Фельд Я. Н. Основы теории щелевых антенн. — М. Сов радио, 1948, с. 230.
9. Бакай А. С., Лукин К. А., Шестопалов В. П. — Изв. вузов — Радиофизика, 1979, 22, № 9, с. 1117.
10. Малахов А. Н. Флуктуации в автоколебательных системах. — М.: Наука, 1967, с. 660.
11. Костиенко А. И., Девятков М. Н., Пирогов Ю. А. — Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ, 1967, № 2, с. 146.
12. Туманов Б. Н. — Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ, 1971, № 9, с. 11.
13. Шестопалов В. П., Скрынник Б. К., Ермак Г. П. В кн.: Физика и техника миллиметровых и субмиллиметровых волн. — Киев: Наукова думка, 1983, с. 3.

Институт радиофизики и электроники
АН УССР

Поступила в редакцию
4 февраля 1985 г.,
после сокращения
1 октября 1985 г.

AUTODYNE EFFECT IN THE DIFFRACTION RADIATION GENERATOR

G. P. Ermak, A. B. Lebedev, K. A. Lukin, B. K. Skrynnik, V. P. Shestopalov

Theoretical and experimental investigation of a diffraction radiation generator (DRG) in autodyne regime has been carried out. Nonlinear nonstationary equations of the DRG dynamics under effect of the external HF signal reflected from the object under investigation have been obtained. The expressions for the autodyne DRG characteristics are obtained, and their dependence on the main parameters of the generator is investigated. Regimes of external and internal DRG-autodyne detecting are considered. Theoretical results are confirmed by the experiment.