

УДК 621.385.69

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ГЕНЕРАТОРАХ ДИФРАКЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

*С. Н. Кучеренко, К. А. Лукин, Б. К. Скрынник,
Г. И. Хлопов, В. П. Шестопалов*

Рассматриваются характеристики излучения генераторов дифракционного излучения (ГДИ) миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн при анодной модуляции, когда модулирующий сигнал является суммой постоянной и импульсной составляющих. Показано, что выбор постоянной составляющей вблизи зоны генерации благоприятно сказывается на условиях развития колебаний в генераторе, а трапециевидальная форма импульса с определенной крутизной фронтов позволяет повысить быстродействие прибора. Приведенные результаты численного моделирования переходных процессов ГДИ и данные экспериментальных исследований в двухмиллиметровом диапазоне позволяют считать, что эффективное значение постоянной времени установления (срыва) колебаний ГДИ в предложенном режиме модуляции составляет 20—70 нс и зависит от режима работы прибора.

Для управления излучением в генераторах типа «О» в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах широко применяется анодная модуляция, исследование характеристик которой особенно интересно в случае генератора дифракционного излучения [1], используемого в различных областях научного приборостроения. Ранее уже рассматривались переходные процессы в ГДИ диапазона 4—8 мм в ключевом режиме [2], когда ускоряющее напряжение меняется от нулевого значения до рабочего, которое обычно соответствует максимальной генерируемой мощности. Время установления колебаний при этом существенно превышает минимально достижимое значение, в связи с чем было предложено [3, 4] использовать модулирующие импульсы сложной формы, что, однако, весьма усложняет конструкцию модулятора и значительно ограничивает практическое использование подобного режима.

Поэтому в настоящей работе нами рассмотрено компромиссное решение, которое состоит в формировании ускоряющего напряжения в виде суммы постоянного «пьедестала» и импульсной составляющей трапециевидальной формы. Оказывается, что выбор значения «пьедестала» вблизи начала зоны генерации и определенная крутизна фронтов импульсной составляющей заметно улучшают быстродействие прибора.

1. Моделирование переходных процессов. Скорость протекания переходных процессов определяется в первую очередь инкрементом нарастания α , который сложным образом зависит от параметров генератора и его режима работы. Ограничиваясь рассмотрением случая малого пространственного заряда в пучке, запишем выражение для инкремента колебаний открытого резонатора (ОР) ГДИ на его основной моде [5]:

$$\alpha = \gamma_n \left\{ \frac{I_p \varphi}{I_{st}^{\min} \varphi_{\min}} \exp \left[-\frac{1}{8} (\varphi^2 - \varphi_{\min}^2) \right] - 1 \right\}, \quad (1)$$

где I_{st}^{\min} — минимальный стартовый ток, $\gamma_n = 1/2Q_n$, Q_n — нагруженная добротность ОР, I_p — рабочий ток пучка, $\varphi = 2(h - \omega/v_0)a \approx \approx ha(U - U_0)/U_0$ — относительный угол пролета электронов через пятно поля ОР на нижнем зеркале, $h = 2\pi/L$, L — период дифракционной

решетки ГДИ, v_0 — начальная скорость электронов, U — ускоряющее напряжение, a — радиус пятна поля ОР, $U_0 = (m/2e)(Lf)$, e и m — заряд и масса электрона, φ_{\min} — значение угла пролета, при котором достигается минимум стартового тока, $f = \omega/2\pi$.

На рис. 1а показаны нормированные зависимости инкремента $\bar{\alpha} = a/\alpha_m$ и генерируемой мощности $\bar{P} = P/P_m$, рассчитанные с использованием данных работ [3, 5] при $I_p/I_{st}^{\min} = 1,5$, $\gamma_H = 6,25 \cdot 10^{-4}$ и $2a/D = 0,6$ (D — длина решетки). Видно, что изменение инкремента при перестройке ускоряющего напряжения носит экстремальный характер, причем максимальные значения инкремента α_m и генерируемой мощности P_m достигаются при различных значениях ускоряющего напряжения. Поэтому при модуляции ГДИ в ключевом режиме время установления колебаний минимально в точке максимума инкремента (рис. 1а, кривая $\tau(\varphi) = \tau(\varphi)/\tau_{\min}$), однако выходная мощность достигает лишь 40% от максимального значения P_m .

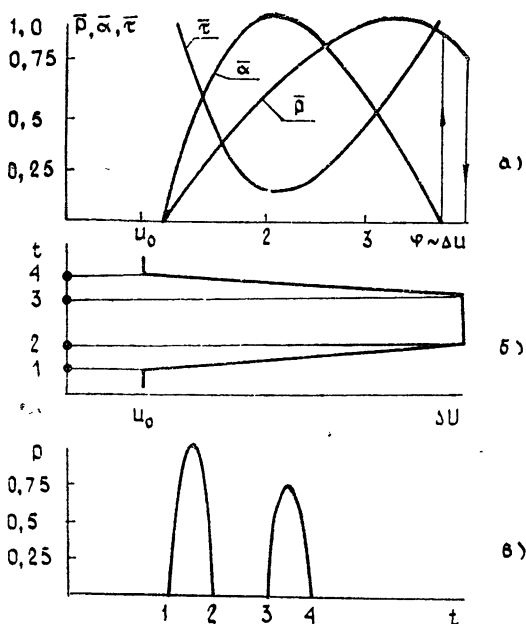


Рис. 1.

Для достижения максимальной мощности за минимальное время в [3] было предложено использовать многоступенчатые модулирующие импульсы анодного напряжения. Смысл предложения состоит в том, что вначале рабочее напряжение соответствует максимуму инкремента, а затем переключается в область максимальных значений P . В [4] отмечено, что переключение уровней напряжения целесообразно осуществлять не скачком, а по некоторому закону, обеспечивающему минимальную длительность переднего фронта выходного импульса. Однако в обоих случаях большую трудность представляет создание модуляторов, обеспечивающих требуемые формы анодного напряжения. Суть метода, предлагаемого в данной работе, состоит в том, что ускоряющее напряжение представляется в виде суммы постоянной составляющей U_0 и импульса трапецидальной формы $\Delta U(t)$ (рис. 1б). Величина постоянной «пьедестала» устанавливается на краю зоны неустойчивого состояния равновесия ($\varphi = 1$ или $3,8$ — рис. 1а), а крутизна фронта импульсной составляющей $|K| = \Delta U_m/\tau_\phi$ (ΔU_m — амплитуда импульса, τ_ϕ — длительность фронта) варьируется для получения максимальной генерируемой мощности за минимальное время.

Для определения оптимальной крутизны фронта импульсной составляющей используется следующий прием. Амплитуда трапецидаль-

ного импульса выбирается значительно больше ширины зоны генерации ΔU_3 (рис. 1), в результате чего форма огибающей СВЧ колебаний на выходе генератора имеет вид двух коротких импульсов (рис. 1в), величина которых определяется соотношением между временами перестройки ускоряющего напряжения по зоне генерации $\tau_{\Pi} = \Delta U_3 / |K|$ и постоянной времени установления колебаний в генераторе τ_y . При этих условиях и достаточно малой крутизне фронта модулирующего импульса $|K| \ll \Delta U_3 / \tau_y$ форма огибающей на выходе генератора повторяет зависимость $P(U)$ (рис. 1а), а ее амплитуда практически не отличается от максимального значения в стационарном режиме. С ростом крутизны фронта модулирующего импульса амплитуда огибающей СВЧ колебаний уменьшается вплоть до полного срыва генерации, когда время перестройки существенно меньше времени установления колебаний в генераторе. $\tau_{\Pi} \ll \tau_y$. Можно выбрать такое значение крутизны фронта трапецеидального импульса, когда мощность СВЧ на выходе генератора достигает заданной величины за минимальное время. Конечно, достигаемый минимум времени установления колебаний в генераторе не соответствует случаю оптимального возбуждающего импульса [3, 4], однако (как показано ниже в результате численного моделирования) не сильно отличается от последнего. Моделирование переходных процессов при линейном изменении анодного напряжения проводилось с помощью уравнений нелинейной нестационарной теории ГДИ [3, 6]. Результаты моделирования для различных значений приведенного времени перестройки анодного напряжения по зоне генерации $\bar{\tau}_{\Pi} = \tau_{\Pi} / \tau_{\text{пр}}$ ($\tau_{\text{пр}}$ — время пролета электронов через ОР) представлены на рис. 2 и 3 (по горизонтальной оси отложено безразмерное время $\bar{\tau} = \alpha_m \omega t$).

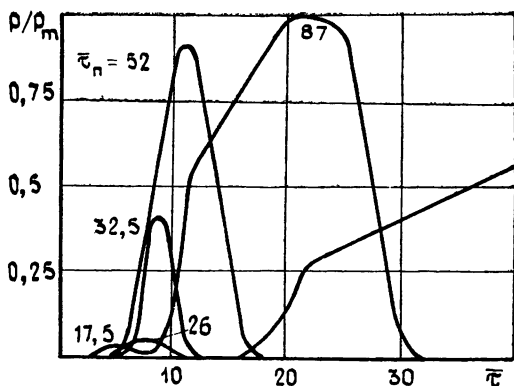


Рис. 2.

На рис. 2 показана трансформация огибающей СВЧ импульса с изменением величины τ_{Π} при увеличении ускоряющего напряжения $U(t) = U_0 + Kt$ ($K > 0$), а на рис. 3 приведены аналогичные данные, соответствующие уменьшению ускоряющего напряжения ($K < 0$). При этом отсчет времени начинается с момента включения импульсной составляющей, а в качестве начального уровня мощности задавалась величина $P_{\Pi} = 10^{-8}$ Вт.

Неидентичность выходных характеристик ГДИ при изменении направления перестройки ускоряющего напряжения обусловлена в первую очередь тем, что максимум мощности стационарной генерации и инкремента (рис. 1) не совпадают. Видно, что для достижения максимального уровня мощности за минимальное время наиболее благоприятен случай увеличения ускоряющего напряжения ($K > 0$), так как после достижения области максимального инкремента $\varphi \approx 2$ (где скорость нарастания колебаний максимальна) дальнейшее увеличение напряжения приводит к росту выходной мощности (рис. 1) вплоть до ее максимального значения P_m . Напротив, при перестройке генера-

тора в сторону уменьшения ускоряющего напряжения ($K < 0$) после достижения области максимальных инкрементов дальнейшая перестройка сопровождается снижением уровня стационарной генерации. Поэтому для обеспечения максимальной выходной мощности необходимо уменьшать крутизну перестройки (увеличивать $\bar{\tau}_n$), позволяя колебаниям развиваться большее время, причем если максимум мощности лежит в области гистерезиса, то при $K < 0$ он вообще недостижим.

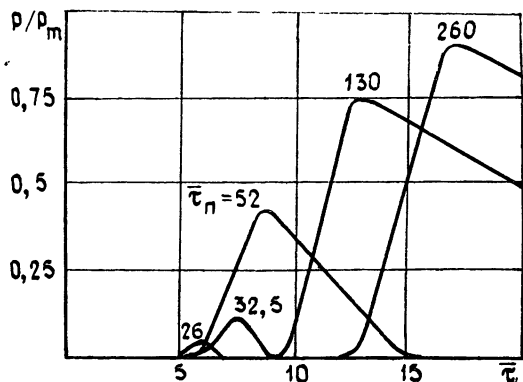


Рис. 3.

Результаты сравнения переходных характеристик, соответствующих различным способам анодной модуляции, представлены на рис. 4. Пунктирная линия изображает передний фронт СВЧ импульса при двухступенчатом модулирующем импульсе, штрихпунктирная — при ключевом режиме модуляции в точке максимума выходной мощности, а сплошной линией показана огибающая СВЧ импульса для случая линейного увеличения анодного напряжения с крутизной $K = 500$ В/мкс. Видно, что предложенный способ анодной модуляции позволяет существенно (в данном случае в два раза) уменьшить длительность переднего фронта по сравнению с ключевым режимом модуляции и дает результаты, незначительно отличающиеся от случая двухступенчатой модуляции. Следует также отметить, что при сравнении длительность фронтов модулирующих импульсов полагалась равной нулю, что невозможно реализовать на практике. В то же время реализация линейного изменения анодного напряжения возможна с достаточной степенью точности и выигрыш от применения предлагаемого способа будет еще более заметен, чем это показано на рис. 4.

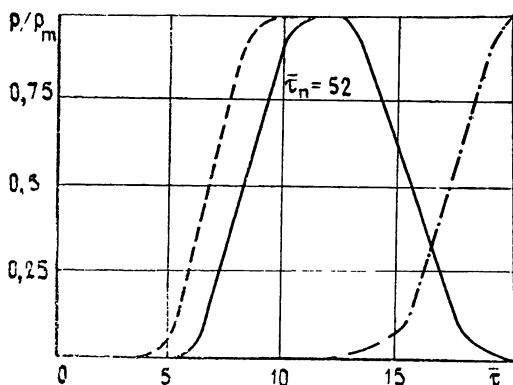


Рис. 4.

2. Экспериментальное исследование переходных процессов. Как было показано в предыдущем разделе, при подаче ускоряющего напряжения в виде суммы постоянного «пьедестала» и импульсной состав-

лящей трапецеидальной формы достаточно большой амплитуды, форма огибающей колебаний на выходе генератора имеет вид двух коротких импульсов (рис. 1в), амплитуда которых определяется соотношением между временем перестройки ускоряющего напряжения $\tau_{\text{ц}}$ и постоянной времени установления колебаний $\tau_{\text{у}}$. Это позволяет предложить простой экспериментальный метод измерения величины $\tau_{\text{у}}$ путем исследования зависимости амплитуды СВЧ колебаний от скорости нарастания фронта модулирующего импульса. При этом эффективное значение постоянной времени прибора, которое суммарным образом учитывает сложные процессы при формировании (выключении) генерации, соответствует времени перестройки $\tau_0'' = 2\tau_{\text{у}}$, при котором амплитуда огибающей импульсов СВЧ составляет 0,5 от уровня в стационарном режиме.

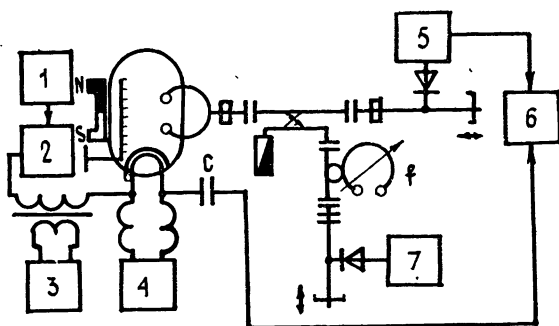


Рис. 5.

Нами разработан и создан измерительный стенд в диапазоне волн $\lambda \leq 2$ мм, блок-схема которого приведена на рис. 5. Постоянное напряжение от высоковольтного стабилизированного выпрямителя 1, контролируемое цифровым вольтметром 2, суммируется с импульсной составляющей при помощи широкополосного импульсного трансформатора, подключенного к выходу генератора трапецеидальных импульсов с регулируемой крутизной фронтов. Для уменьшения шунтирующего действия блока питания накала 4 в схему введены фильтры нижних частот, а сам блок разработан с учетом требований минимальной выходной емкости, которая в исследуемом случае не превышала 100 пФ. Наблюдение протектированных импульсов СВЧ осуществляется с помощью двухлучевого осциллографа 6 типа С1-79, подключенного к выходу широкополосного усилителя 7, причем второй канал осциллографа используется для измерения параметров модулирующего импульса, а контрольный осциллограф 7 служит для настройки измерительного стенда. Специально разработанная детекторная камера на основе структуры с ТКД имеет емкость не более 3 пФ, в результате чего собственная постоянная времени приемного канала не превышает 5 нс, а конструкция модулятора обеспечивает изменение крутизны фронтов модулирующего импульса в пределах 0,15 — 26 кВ/мкс. Указанные значения соответствуют изменению скорости перестройки ускоряющего напряжения по зоне генерации в диапазоне 1,8 — 330 нс, а с другой стороны, значительно превышают время установления колебаний в приборах типа «О». Таким образом, разработанный измерительный стенд позволяет исследовать модуляционные характеристики генераторов как в пороговом режиме, так и в режиме стационарных колебаний.

Характерный вид осциллограмм процесса установления колебаний в ГДИ показан на рис. 6; пороговый режим, предшествующий срыву генерации, соответствует рис. 6б (кривая 1 — протектированный СВЧ импульс, кривая 2 — модулирующий импульс), а случай развившихся колебаний, амплитуда которых практически не отличается от стационарных, представлен на рис. 6а. Как видно, при увеличении ускоряющего напряжения, которое соответствует заднему фронту модули-

рующего импульса, амплитуда СВЧ колебаний (рис. 6б, кривая 1) заметно превышает мощность генерации ГДИ при обратном порядке изменения ускоряющего напряжения (передний фронт модулирующего импульса). Отмеченный факт находится в полном согласии с выводами предыдущего раздела, где аналогичная ситуация соответствует положительным значениям крутизны импульсной составляющей ускоряющего напряжения $K > 0$.

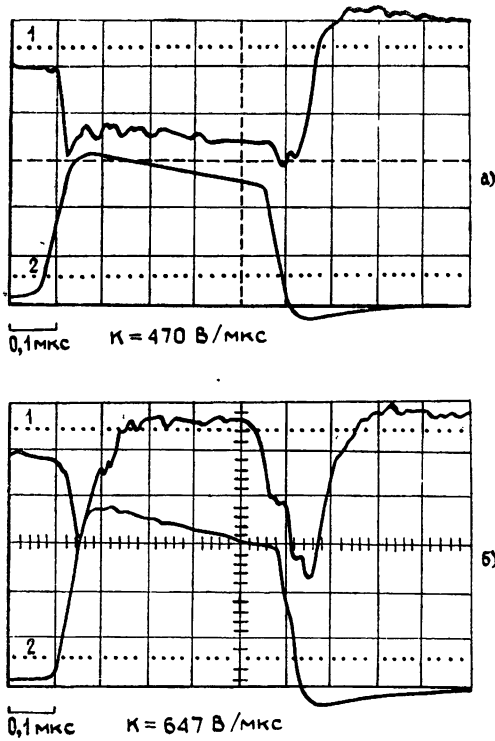


Рис. 6.

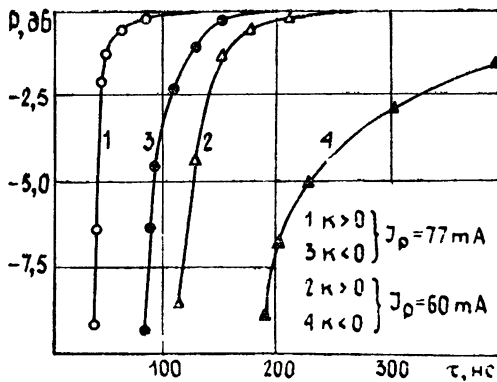


Рис. 7.

Используя описанную методику, экспериментально измерена зависимость амплитуды СВЧ импульса при анодной модуляции ГДИ от времени перестройки ускоряющего напряжения по зоне генерации (рис. 7). Как и ранее, быстрое действие прибора выше при изменении ускоряющего напряжения в сторону его увеличения ($K > 0$, кривые 1 и 2) по сравнению со случаем обратного изменения $U(t)$ ($K < 0$, кривые 3 и 4). Таким образом, указанная полярность изменения ускоряющего напряжения обеспечивает не только большую мощность СВЧ

колебаний, но также приводит к заметно более высокому быстродействию прибора. Причём эта закономерность не зависит от величины рабочего тока (кривые 1 и 3 соответствуют отношению $I_p/I_{st}^{min} = 1,5$, а кривые 2 и 4 — $I_p/I_{st}^{min} = 1,3$). При этом увеличение рабочего тока также приводит к улучшению быстродействия генератора в связи с увеличением значения инкремента α . В результате оказалось, что для рекомендованного режима эксплуатации ГДИ $I_p/I_{st}^{min} = 1,3 \div 1,5$ эффективное значение постоянной времени прибора меняется в пределах $\tau_y = 20 \div 70$ нс и соответствует оптимальной крутизне фронта модулирующего импульса $K = 0,3 \div 1,0$ кВ/мкс. Интересно отметить, что для импульсных генераторов М-типа указанная величина достигает 100—300 кВ/мкс.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования подтвердили правильность сделанных предположений относительно механизма протекания переходных процессов в ГДИ при численном моделировании и позволили получить простые оценки свойств прибора в режиме анодной модуляции. Важным следствием полученных данных является простота технической реализации предложенного способа модуляции ГДИ, позволяющего получить быстродействие генератора, близкое к максимально достижимому, причем выходная мощность прибора практически не отличается от стационарного значения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шестопалов В. П. Дифракционная электроника. — Харьков: Вища школа, 1976. — 231 с.
2. Бадаклицкий И. М., Воробьев Г. С., Цвык А. И., Шестопалов В. П. — Изв. вузов — Радиофизика, 1978, 21, № 12, с. 1853.
3. Лукин К. А. — Изв. вузов — Радиофизика, 1979, 22, № 12, с. 1514.
4. Ваврив Д. М., Третьяков О. А. Тезисы докладов III Всесоюзного симпозиума по миллиметровым и субмиллиметровым волнам. — Горький, 1980, 1, с. 12.
5. Евдокименко Ю. И., Лукин К. А., Ревин И. Д. и др. Препринт ИРЭ АН УССР № 191. — Харьков, 1982.
6. Бакай А. С., Лукин К. А., Шестопалов В. П. — Изв. вузов — Радиофизика, 1979, 22, № 9, с. 1117.

Институт радиофизики и электроники
АН УССР

Поступила в редакцию
13 декабря 1985 г.

INVESTIGATION OF TRANSIENT PROCESSES IN DIFFRACTION RADIATION GENERATORS

*S. N. Kucherenko, K. A. Lukin, B. K. Skrynnick, G. I. Khlopov,
V. P. Shestopalov*

Characteristics of diffraction radiation generators (DRG) for an extremely high-frequency band are discussed for plate modulation, when the modulated voltage is the sum of the direct current and the pulse. If the volume of the direct current stage near of generation zone and transconductance of the pulse modulation is specially estimated, an excitation of radiation in the DRG is formed more rapidly. The results of theoretical performance are experimental data in 2-mm band are given. It is estimated that time constant of the DGR is equal to $(2 \div 7) \cdot 10^{-8}$ s and depends on the behaviour of the generator.