

ГЕНЕРАЦИЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК В ГЕНЕРАТОРАХ ДИФРАКЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В. Г. Курин

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

Показано, что работа исследуемого генератора в режиме генерации 2-й гармоники физически эквивалентна работе генератора на 2-й временной гармонике с последующим усилением сигнала в пространстве взаимодействия этого же прибора. Именно в эффекте усиления и заключено преимущество работы генераторов в режиме генерации, в частности, 2-й гармоники в сравнении с его работой на «чисто» временных (в режиме умножения частоты) или «чисто» пространственных гармониках. Ил. 2. Библиогр.: 9 назв.

Ключевые слова: временные и пространственные гармоники, генерация гармоник, гармонизация электронного потока.

В настоящее время проблема освоения терагерцевого диапазона частот (0,3÷3 ТГц или в длинах волн от 1 до 0,1 мм) привлекает повышенное внимание исследователей. Это обусловлено возможностью применения волн субмиллиметрового (субмм) диапазона для связи в космосе в субмм астрономии, а также информативностью спектральных характеристик биологических объектов живых тканей и твердых тел в этом диапазоне волн. Продвижение в терагерцевый диапазон нерелятивистских приборов вакуумной СВЧ-электроники, работающих на 1-ой гармонике, встречает серьезные физические и технические затруднения. Укорочение длины волны требует соответствующего измельчения периодических структур, что приводит к существенному росту потерь энергии и значительно усложняет процесс их изготовления. В связи с этим разработчиков приборов вакуумной СВЧ-электроники все больше привлекают режимы работы приборов на высоких гармониках, что устраняет, по крайней мере, часть препятствий на пути освоения терагерцевого диапазона волн нерелятивистскими электровакуумными СВЧ-генераторами [1–4]. В работах [1, 4] было показано, что исследуемый генератор может эффективно работать на 2-й гармонике с интенсивностью излучения не меньшей, чем в обычном режиме на 1-й пространственной гармонике. В работе [4] также было отмечено, что экспериментальные точки, соответствующие случаям выделения временных гармоник в системе координат $\left\{ \frac{C}{V_\phi}, \frac{\lambda}{l} \right\}$, сосредотачиваются вблизи линий постоянных фазовых сдвигов ($\varphi = 2\pi, \varphi = 4\pi, \varphi = 6\pi$), т. е. точно так же, как и точки, соответствующие работе генератора на пространственных гармониках. Совмещение областей существования свидетельствует о возможности реализации трех режимов, а именно: 1 – выделение временных гармоник, 2 – выделение пространственных гармоник, 3 – генерация выс-

ших гармоник. Третий случай в настоящее время находит широкое применение для генерации высших гармоник в α -кварце, в лазерной плазме и считается перспективным в процессе освоения с помощью лазеров дальнего УФ-диапазона [5, 6].

Рассмотрим один из возможных вариантов генерации высших гармоник в исследуемом генераторе. На рис. 1, а приведена схема умножителя частоты на клистроне. Электронный поток, промодулированный в генераторной части лампы, поступает в резонатор 1, настроенный на частоту 2-й временной гармоники. Известно, что в этом случае отбираемая энергия обратно пропорциональна квадрату номера гармоники $P_{\text{вых}} \propto 1/n^2$. Возникает вопрос, возможно ли повысить коэффициент конверсии $k = P_{\text{вых}}/P_{\text{вх}}$ такой умножительной схемы? Возможно, но лишь в частном случае, путем присоединения к 1-му резонатору цепочки идентичных, как это показано на рис. 1, а. Однако такой путь эквивалентен измельчению периодической структуры, т. е. возврату к традиционному способу продвижения работы автогенераторов в коротковолновый диапазон.

Возможно ли уйти от возврата к измельчению периодических структур генераторов? Оказывается, возможно, но только путем перехода работы генератора на 2-ю пространственную гармонику и измельчения периода бунчировки, например, как это показано на рис. 1, б. Здесь T_1 – период следования бунчей, соответствующий 1-й пространственной гармонике, а $T_2 = \frac{1}{2}(T_1)$ измельченный период, который в данном случае соответствует и выделению 2-й временной гармоники.

При работе генератора на 2-й пространственной гармонике электронный поток движется со скоростью, в два раза меньшей, что смещает рабочую точку из экстремума функции рассинхронизма в область меньших величин отрицательного сопротивления, что существенно умень-

шает энергию, передаваемую электронным потоком волне [7].

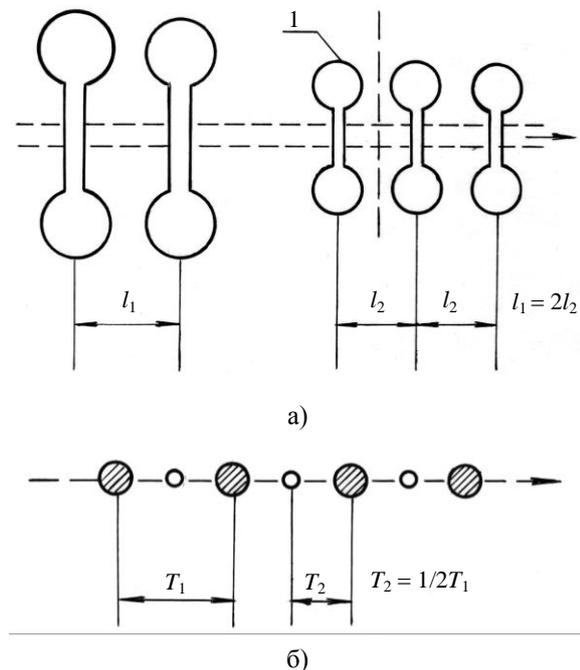


Рис. 1. Один из способов реализации умножителя частоты на клистроне (а); гармонизированный электронный поток (б)

Это один из недостатков работы генераторов на высших пространственных гармониках. Гармонизация электронного потока, соответствующая случаю, приведенному на рис. 1, б, исключает этот недостаток. Действительно, в этом случае при работе на 2-й пространственной гармонике электронный поток движется в два раза медленнее, но число бунчей в два раза больше, что смещает рабочую точку в экстремум функции рассинхронизма, где модуль отрицательного сопротивления максимален. Однако этот режим уже не является режимом работы генератора на 2-й пространственной или 2-й временной гармонике. Это уже соответствует работе генератора в режиме генерации 2-й гармоники. Необходимым условием работы генератора в таком режиме является выполнение равенства $T_2 = 1/2(T_1)$.

В лазерах реализация режимов генерации высших гармоник достигается, в частности, путем подстройки длины волны гармоник к резонансным переходам ионов лазерной плазмы [6]. В исследуемых генераторах аналогичного эффекта можно достигать путем выполнения решетки с узкими щелями: $d \ll l$. Действительно, в этом случае при ширине щели $d \rightarrow 0$ импульсы наведенного тока стремятся к δ -функциям, следовательно, импульсы наведенного тока на щелях будут содержать более четко выраженный набор

гармоник: $\omega_1, 2\omega_1, 3\omega_1, \dots$. А это означает, что в процессе бунчировки участвуют все гармоники с соответствующими им фазовыми сдвигами, т. е. бунчировка электронного потока будет изменяться. Дискретизация электронного потока приоритетна еще и потому, что она уменьшает число остальных электронов, заполняющих промежутки между сгустками, которые попадают в ускоряющие фазы поля и снижают электронный КПД генераторов [8]. Разумеется, этот эффект будет положительным только в определенных условиях. Например, в случае работы генератора в режиме генерации 2-й гармоники таким условием будет выполнение равенства $T_2 = 1/2(T_1)$. Известно, что магнетроны в харьковском режиме [9] в коротковолновой части миллиметрового диапазона $4,1 \div 1,2$ мм эффективно работали при отношении $(l-d)/d \geq 5$, т. е. при весьма узких щелях d в сравнении с периодом l . Следовательно, есть основания утверждать, что магнетроны в харьковском режиме работали именно в режиме генерации высших гармоник. В рассматриваемом эксперименте в силу технологических условий соотношение между периодом и шириной щели решетки было подчинено условию $(l-d)/d \leq 4$.

Эксперимент. На рис. 2 приведены результаты эксперимента (точки) в системе координат $\left\{C/V_\phi, \lambda/l\right\}$. Здесь C – скорость света в свободном пространстве, V_ϕ – фазовая скорость синхронной гармоники (при этом предполагается выполнение приближенного равенства $V_\phi \approx V_e$, где V_e – скорость электронов, вычисляемая по величине измеряемого анодного напряжения), λ – длина волны в свободном пространстве. В данном эксперименте период дифракционной решетки был равен $l=0,75$ мм, глубина щели $h=1,2$ мм, ширина $d=0,15$ мм. Прямые $\varphi=2\pi$ и $\varphi=4\pi$ представляют собой области существования гармоник 1-й и 2-й соответственно. Теперь выберем на линии $\varphi=2\pi$ точку 1 и, опустив из нее перпендикуляр, найдем частоту ω_1 ($f_1 \approx 34,5$ ГГц). Далее через точку 1 проведем горизонтальную прямую, пересекающую линию $\varphi=4\pi$ в точке 3. Опустив из нее перпендикуляр, найдем частоту ω_2 ($f_2 \approx 69$ ГГц). При этом точка 2 будет соответствовать работе генератора на частоте ω_2 на 1-й пространственной гармонике. Как следует из построения, точка 3 соответствует выделению 2-й пространственной гармоники и одновременно выделению 2-й временной гармоники $\omega_2 = 2\omega_1$ ($f_2 = 2f_1 = 69$ ГГц). Однако для работы генерато-

ра в режиме генерации 2-й гармоники еще необходима «подстройка» периода следования бунчей, т. е. выполнение условия $T_2 = \frac{1}{2}T_1$ (см. рис. 1).

Работа генератора в режиме генерации 2-й гармоники наблюдалась в верхней заштрихованной полосе (рис. 2). В этой же полосе работа генератора на 1-й гармонике не была обнаружена.

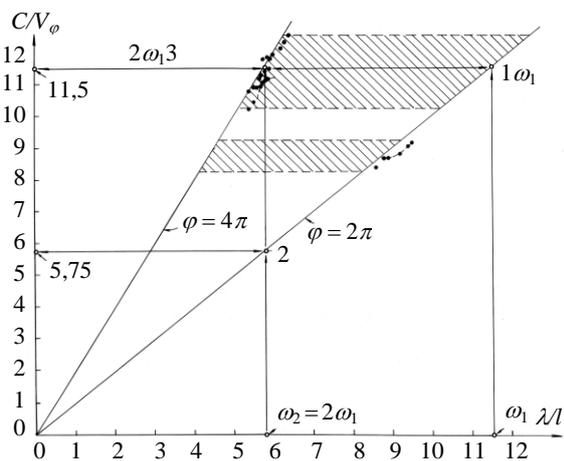


Рис. 2. Области существования генерации на 1-й $\varphi = 2\pi$ и 2-й $\varphi = 4\pi$ пространственных гармониках. Точками нанесены результаты эксперимента. Видно, что точки сходятся к соответствующим областям существования генерации: линиям $\varphi = 2\pi$ и $\varphi = 4\pi$

Работа генератора на 1-й гармонике была обнаружена в области второй заштрихованной полосы, при этом режим генерации 2-й гармоники не был обнаружен. Причина в том, что в верхней полосе генерации 2-й гармоники ячейка гребенки оказалась резонансной $h \approx \lambda/4$, а в нижней полосе не резонансной $h > \lambda/4$, $\lambda/4 \approx 0,82$ мм, а $h = 1,2$ мм. Максимальная мощность, полученная в данном эксперименте (в окрестности точки 3), была равной $P = 1$ Вт. Пусковой ток в случаях работы генератора на 1-й гармонике был $I_{\Pi} > 90$ мА, в то время как в режиме генерации 2-й гармоники он был существенно меньшим $I_{\Pi} < 70$ мА. Такое снижение пускового тока в режиме генерации 2-й гармоники обусловлено выполнением равенства $T_2 = \frac{1}{2}T_1$ (рис. 2).

Выводы. Генераторы дифракционного излучения могут эффективно работать в режимах генерации гармоник. Работа генератора на 2-й пространственной гармонике физически эквивалентна работе генератора на 1-й гармонике (их частоты тождественны), но с подпиткой поля резонансной системы электронным потоком через один раз (или с частотой подпитки, в два раза

меньшей). Например, если на 1-й гармонике поле подпитывается один раз в секунду, то на 2-й это же поле будет подпитываться один раз в две секунды. Следовательно, поле резонансной системы при работе генератора на 1-й гармонике будет затухать (без подпитки поле затухает) в течение одной секунды, в то время как на 2-й это поле будет затухать в течение двух секунд, что и обуславливает рост омических потерь при переходе работы генератора на 2-ю гармонику. Разумеется, в действительности период между подпитками измеряется не в секундах, а в единицах наносекунд. Время установления колебаний в генераторах дифракционного излучения не превышает 10 нс, в ЛОВ 2÷3 нс. Следовательно, работа генератора дифракционного излучения, в частности, на 2-й пространственной гармонике, более продуктивна, чем работа лампы обратной волны. В связи с тем что в генераторах дифракционного излучения при $C/V_{\Phi} = \text{const}$ всегда выполняется условие $\omega_2 = 2\omega_1$ (см. рис. 2), источником частоты 1-й гармоники является временная гармоника с частотой $2\omega_1$ или в общем случае субгармоники рабочей частоты.

В результате при появлении в резонансной системе частоты 1-й гармоники в зависимости от потерь генератор может работать в режиме выделения 2-й пространственной гармоники или в режиме генерации 2-й гармоники. Последний режим является более продуктивным. Это объясняется тем, что в этом случае электронный поток содержит субгармонику модуляции с периодом $T_2 = (\frac{1}{2})T_1$. Следовательно, при движении электронного потока со скоростью, в два раза меньшей (или при движении с той же скоростью, но вдоль гребенки с периодом в два раза большим), число бунчей в два раза больше. Такое состояние физически эквивалентно смещению рабочей «точки» генератора в область первого рабочего экстремума функций рассинхронизма (см., например [8]), т. е. в область, где модуль отрицательного сопротивления пространства взаимодействия максимален. Гармонизация электронного потока в данном случае осуществлялась путем уменьшения щели d периодической структуры. Оптимизация режима генерации гармоник осуществляется выбором отношений $(l-d)/d$, C/V_{Φ} и глубины h периодической структуры.

1. Мирошниченко В. С. Влияние омических потерь на возбуждение колебаний в ГДИ на высших пространственных гармониках / В. С. Мирошниченко, Е. Б. Сенкевич, В. К. Корнеев // 17-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии»: материалы конф. – Севастополь, 2007. – Т. 1. – С. 179–180.

2. Мясин Е. А. Генерация терагерцевого диапазона в оротроне при резонансе дифракционного излучения / Е. А. Мясин // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2007. – 12, № 9. – С. 72–75.
3. Возбуждение резонансного клинотрона при очень низких анодных напряжениях / М. В. Мильчо, А. С. Тищенко, В. В. Завертаный, И. В. Лопатин // Радиофизика и электроника: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2008. – 13, № 1. – С. 79–86.
4. Корнеев В. К. О работе генератора дифракционного излучения на высших пространственных гармониках / В. К. Корнеев, В. Г. Курин // Радиофизика и электроника: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2008. – 13, № 2. – С. 227–231.
5. Новые нелинейно-лазерные эффекты в α -кварце: генерация двухоктавной гребенки стоксовых и антистоксовых частот и каскадный лазинг в спектральной области второй и третьей гармоник / А. А. Каминский, Л. Богати, П. Беккер и др. // Успехи физ. наук. – 2008. – 179, № 9. – С. 935–946.
6. Ганеев Р. А. Генерация высших гармоник излучения мощных лазеров в плазме, образованной при воздействии предимпульса на поверхности твердотельных мишеней / Р. А. Ганеев // Успехи физ. наук. – 2009. – 179, № 1. – С. 65–90.
7. Шевчик В. Н. Анализ обмена энергии между электронным потоком и электромагнитной волной / В. Н. Шевчик // Радиотехника и электрон. – 1957. – 2, № 1. – С. 104–110.
8. Формирование дискретной структуры электронного потока усилительного клистрона с применением субгармоник рабочей частоты / Н. Д. Девятков, Е. Д. Науменко, А. А. Рухадзе и др. // Докл. Российской АН. – 1995. – 340, № 6. – С. 763–767.
9. Усиков А. Я. Современные достижения радиофизики и электроники / А. Я. Усиков // Общество «Знание» УССР в лабораториях ученых. – Сер. УПН. – 1981. – № 12. – 64 с.

HIGHER HARMONICS GENERATION IN DIFFRACTION RADIATION OSCILLATORS

V. G. Kurin

It is shown that the investigated oscillator operating in a 2-nd harmonic oscillating mode is physically equivalent to oscillator operating on the 2-nd time harmonic with the subsequent signal amplification in an interaction space of the same device. The advantage of oscillators operating in the oscillating mode, in particular, a 2-nd harmonic in comparison with its operating on “purely” time harmonic (frequency multiplication mode) or “purely” space ones, is concluded in amplification effect.

Key words: time and space harmonics, harmonic generation, electronic beam harmonization.

ГЕНЕРАЦІЯ ВИЩИХ ГАРМОНІК У ГЕНЕРАТОРАХ ДИФРАКЦІЙНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

В. Г. Курин

Показано, що робота досліджуваного генератора в режимі генерації 2-ї гармоніки фізично еквівалентна роботі генератора на 2-й часовій гармоніці з подальшим підсиленням сигналу в просторі взаємодії цього ж приладу. Саме в ефекті підсилення є перевага роботи генераторів у режимі генерації, зокрема, 2-ї гармоніки порівняно з його роботою на «чисто» часових (у режимі множення частоти) або «чисто» просторових гармоніках.

Ключові слова: часові та просторові гармоніки, генерація гармонік, гармонізація електронного потоку.

Рукопись поступила 16 ноября 2009 г.