

УДК 537.811:621.372

О РАБОТЕ ГЕНЕРАТОРА ДИФРАКЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ВЫСШИХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ГАРМОНИКАХ

В. К. Корнеенков, 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*

Рассмотрены выходные характеристики генератора дифракционного излучения, работающего на высших пространственных гармониках. Приведено сравнение уровней выходной мощности и пусковых токов генератора в случаях его работы на -1-й и -2-й пространственных гармониках. Показаны, в частности, преимущества генератора, работающего на -2-й пространственной гармонике в сравнении с этим же генератором, но работающим на -1-й пространственной гармонике. Предложена физическая интерпретация механизма, обуславливающего повышения КПД генераторов, работающих на высших пространственных гармониках. Ил. 2. Библиогр.: 6 назв.

Ключевые слова: пространственные гармоники, пусковой ток, периодическая структура.

Исследование характеристик генераторов дифракционного излучения, работающих на высших пространственных гармониках, представляет значительный научный интерес. Известно, что продвижение нерелятивистских сверхвысокочастотных генераторов, работающих на 1-й пространственной гармонике в терагерцевый диапазон частот, встречает серьезные трудности, обусловленные измельчением периодических структур и инерцией электронов, которая оказывается весьма существенной в этом диапазоне частот [1-3]. Переход на более высокие (выше 1-й) пространственные гармоники снимает проблему измельчения периода. Однако на этом пути возникают новые препятствия, потому что переход работы генераторов на высшие пространственные гармоники сопровождается ростом омических потерь в открытом резонаторе, содержащем периодическую структуру, которая рассчитана для работы на высшей гармонике с соответствующим повышением пусковых токов и убыванием амплитуд гармоник с ростом их номера [1, 2]. Обнаружение харьковского режима в магнетронах впервые указало на возможность преодоления этих препятствий.

Действительно, основной особенностью харьковского режима является использование случая взаимодействия электронов с одной из высших пространственных гармоник периодической структуры, а не с основной, как это осуществлялось в "классических" режимах [4]. Эффективность работы магнетронов в харьковском режиме проявилась именно в коротковолновой части миллиметрового диапазона волн (4,1-1,0 мм), где их мощность оказалась в несколько раз выше мощности классических приборов этого типа, причем при значительно меньших магнитных полях и относительно небольших скоростях вращения электронов. К настоящему времени удалось только выровнять выходные характеристики исследуемых

генераторов в случаях их работы на 1-й и 2-й пространственных гармониках в 5-миллиметровом диапазоне длин волн [1, 5]. В полном объеме физические причины, обуславливающие повышение уровня выходной мощности генераторов, работающих на высших гармониках, остаются невыясненными. Нами экспериментальным методом исследована работа генератора на 1-й и 2-й пространственных гармониках. В качестве периодической была применена сложная структура, сходная с магнетронной и рассчитанная для работы на 1-й гармонике. В случаях применения такой структуры переход работы генератора на 2-ю гармонику мог осуществляться только путем соответствующего уменьшения анодного напряжения. Исследование работы генератора именно в таком низковольтном режиме позволило выявить ряд физических причин, объясняющих случаи снижения пусковых токов и повышение выходной мощности высокочастотных генераторов, с длительным взаимодействием работающих на высших пространственных гармониках.

Эксперимент. На рис. 1 приведены дисперсионные характеристики и фрагмент сечения периодической структуры, примененной в исследуемом генераторе. Дисперсионные характеристики пространственных гармоник построены в координатах $\left(\frac{C}{V_{ph}} ; \lambda/l \right)$ по известной формуле [6]

$$\frac{C}{V_{ph}} = \frac{\varphi_n}{2\pi} \cdot \frac{\lambda}{l}, \quad (1)$$

где λ - длина волны в свободном пространстве; l - минимальный период периодической структуры ($l_{\min} = 0,75$ мм); C - скорость света в свободном пространстве; V_{ph} - фазовая скорость; $\varphi_n = \pi, 4\pi, 6\pi$ - фазовые углы, соответствующие

щие линиям равных фазовых сдвигов для 1-, 2- и 3-й пространственных гармоник.

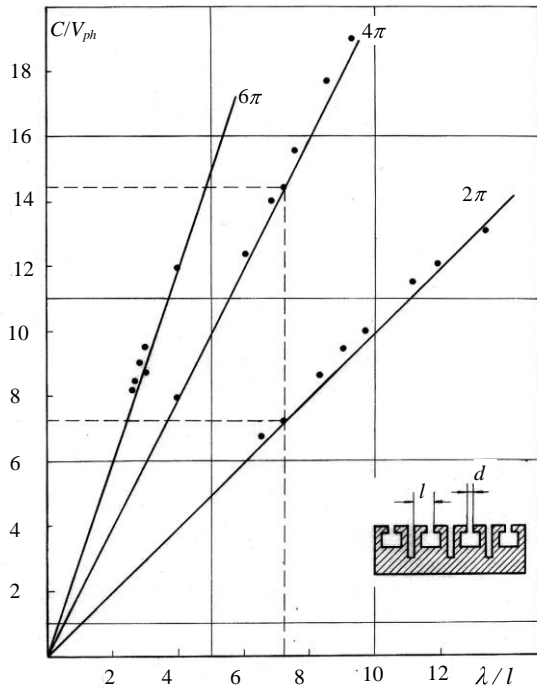


Рис. 1. Линии равных фазовых сдвигов $\varphi = n\pi$ в координатах $(C/V_{ph}; \lambda/l)$ и фрагмент продольного сечения периодической структуры. Точками нанесены результаты эксперимента

На построенные таким образом дисперсионные характеристики пространственных гармоник точками нанесены результаты измерений. Значения V_{ph} определялись по измеренной величине анодного напряжения U_a по известной формуле, в приближении:

$$V_{ph} \approx V_e = 600\sqrt{U_a}, \quad (2)$$

где V_e - скорость электронов (в км/с); U_a - анодное напряжение в вольтах. На линиях $\varphi = 2\pi$ и $\varphi = 4\pi$ экспериментальные точки соответствуют случаям работы генератора на 1-й и 2-й пространственных гармониках.

Экспериментальные точки, расположенные на линии $\varphi = 6\pi$, соответствующей третьей пространственной гармонике, оказались сильно смещенными в область высоких значений анодного напряжения (в область малых значений C/V_{ph}). Расчеты показывают, что в этой области значений C/V_{ph} генератор работает не на пространственной, а на третьей временной гармонике и на минимальной величине периода

$l_{min} = 0,75$ мм. Диапазон частот, соответствующий работе генератора на третьей временной гармонике равен 133,33-153,8 ГГц, выходная мощность при этом изменяется в диапазоне 15-70 мВт. На 1-й гармонике соответственно 44,44-51,3 ГГц и 5-12 Вт. Из графиков рис. 1 также следует, что генератор работает как на 1-й, так и на 2-й пространственных гармониках при одном и том же периоде структуры, равном $l_{min} = 0,75$ мм. Переход с одной гармонике на другую осуществляется в результате изменения C/V_{ph} . Например, выберем в качестве рабочей точку 1-й гармонике, которой соответствует значение $\lambda/l = 7,2$. Найдем, что при этой величине λ/l генератор возбуждается на 1-й гармонике при $U_a = 4,8$ кВ, а на 2-й при $U_a = 1,2$ кВ, т. е. чтобы перейти с 1-й на 2-ю пространственную гармонику, достаточно уменьшить анодное напряжение в четыре раза или уменьшить V_e в два раза.

На рис. 2,а приведены экспериментальные зависимости мощности от частоты исследуемого генератора на 1-й и 2-й пространственных гармониках. Пунктиром выделена область, где генератор возбуждается на 3-й временной гармонике. Видно, что 3-я временная гармоника выделяется в области сравнительно малых значений выходной мощности 1-й гармонике, где взаимодействие электронного потока с высокочастотным полем не оптимально. В области, где генератор работает в оптимальном режиме на 1-й гармонике ($P \rightarrow 50$ Вт), случаи выделения 3-й временной гармонике не были обнаружены. Следовательно, в оптимальном режиме в результате роста пространственного заряда пики конвекционного тока сглаживаются, что затрудняет выделение временных гармоник. В клистронных умножителях частоты для того, чтобы избежать эффектов "сглаживания" временных гармоник, прибегают к соответствующим изменениям пространства дрейфа [7].

На рис. 2,б приведены зависимости $P = \Phi$ и $\eta = \Phi$ для 1-й пространственной гармонике при $U_a = 4,8$ кВ = const и для 2-й, соответственно, при $U_a = 1,2$ кВ = const. Причем эти зависимости снимались в оптимальном режиме $f \approx 56$ ГГц. На рис. 1 этому режиму соответствует значение $\lambda/l = 7,2$, $l = l_{min} = 0,75$ мм (показано пунктиром). Видно, что в случае работы генератора на 1-й гармонике с ростом тока наблюдается насыщение по КПД, при этом мощность растет линейно. На 2-й пространственной гармонике из-

за низкого анодного напряжения ($U_a = 1,2$ кВ) рабочий ток оказался ограниченным $I_p \leq 110$ мА.

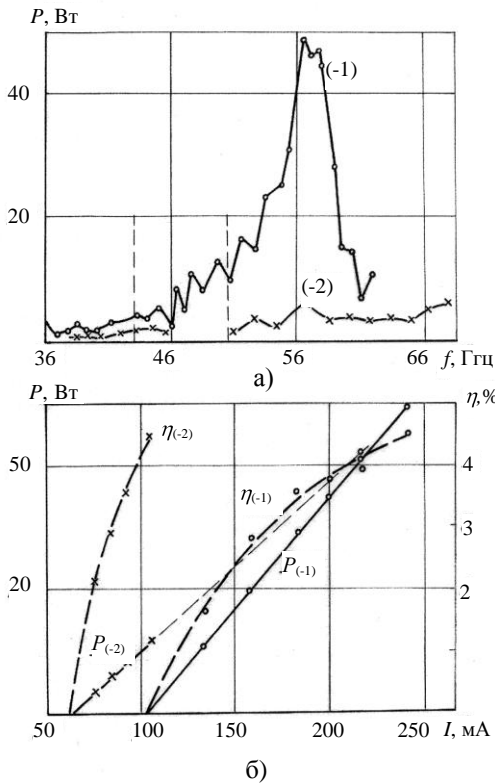


Рис. 2. Изменение уровня выходной мощности генератора, работающего на -1-й и -2-й пространственных гармониках в диапазоне перестройки по частоте (а); изменение КПД η и мощности P генератора, работающего -1-й и -2-й пространственных гармониках в диапазоне изменения рабочего тока ($f \approx 56$ ГГц). Пунктиром показана аппроксимация изменения мощности генератора, работающего на -2-й пространственной гармонике в диапазоне рабочего тока от $I_p \approx 100$ мА до $I_p \approx 200$ мА (б)

Учитывая линейность изменения мощности, зависимость $P = \Phi(I)$ для 2-й гармоники была продолжена в область больших рабочих токов (пунктирная прямая). Видно, что с ростом тока уровень выходной мощности генератора на 2-й гармонике превышает уровень мощности этого же генератора при его работе на 1-й пространственной гармонике. В работах [1, 5] было показано, что в генераторах дифракционного излучения путем оптимизации открытой резонансной системы можно скомпенсировать рост омических потерь при переходе его работы на высшие гармоники и, соответственно, выровнять пусковые токи. В рассматриваемом случае, как это следует из рис. 2,б, результат оказался неожиданным: переход на вторую пространственную гармонику сопровождается не выравниванием, а уменьшением пусковых токов почти в два раза, от 105 до 58 мА. Оценим приближенно причины, которые могут привести к такому эффекту. В качестве

исходного допущения возьмем явление изменения омических потерь при переходе от 1-й ко 2-й гармонике, учитывая, что в обоих случаях генератор работает на одной и той же резонансной моде. В этом случае длина пятна поля на решетке и энергия, накопленная в поле моды, сохраняются постоянными. Также считается, что вся энергия, сосредоточенная в пятне поля, проникает в ячейки гребенки. При $l \ll \lambda$ и $h \ll \lambda$ гребенка будет представлять реактивную нагрузку, падение волн на которую будет сопровождаться зарядкой ее ячеек (щелей). Тогда соотношение между омическими потерями и энергией в одной ячейке можно записать в виде [8]

$$R \int_0^{\infty} i^2 dt = \frac{C \varepsilon^2}{2}, \quad (3)$$

где C – емкость ячейки; ε – потенциал, до которого окажется заряженной эта ячейка. Если переход на 2-ю гармонику осуществлять путем увеличением периода структуры в два раза (как это, например, делалось в работах [1, 5]), то число периодов в пятне поля резонансной моды, соответственно, уменьшится в два раза. Так, если для 1-й гармоники их окажется N , то для 2-й их будет $N/2$. Следовательно, суммарная энергия, проникающая в ячейки в случае 1-й гармоники, будет равна $W_{(-1)} = N \cdot C \varepsilon^2 / 2$. В связи с тем, что на 2-й гармонике периодов структуры в том же пятне резонансной моды в два раза меньше, то энергия, приходящаяся на одну ячейку, окажется равной $W = C \varepsilon^2 / 2 = 4 \cdot C \varepsilon^2 / 2$, а суммарная энергия будет равна

$$W_{(-2)} = (C \varepsilon^2 / 2) \cdot N / 2 = 2 \cdot N C \varepsilon^2 / 2.$$

Таким образом, при переходе на 2-ю гармонику путем увеличения периода в два раза энергия, захватываемая решеткой, оказывается в два раза большей, чем на 1-й гармонике. Но согласно закону сохранения (3) накопленная энергия равна энергии потерь, и переход работы генератора на 2-ю гармонику сопровождается увеличением в два раза омических потерь. Таким образом, находим, что в генераторах дифракционного излучения в случаях их перехода на 2-ю пространственную гармонику путем увеличения периода решетки в два раза омические потери растут по причине роста концентрации энергии резонансной моды в ячейках периодической структуры, охваченных пятном поля этой моды.

Как оказалось, в этом случае рост пусковых токов генератора может быть скомпенсирован путем оптимизации резонансной системы [5]. Однако в рассматриваемом эксперименте переход на 2-ю гармонику осуществляется не путем уве-

личения периода решетки в два раза, а путем уменьшения скорости электронов в два раза при $l = \text{const}$. В этом случае омические потери и пусковые токи генератора на 1-й и 2-й гармониках должны были выровняться. Но в действительности этого не происходит: пусковые токи генератора на 2-й гармонике оказались в два раза меньше, чем на 1-й. Учитывая, что в условиях рассматриваемого перехода на 2-ю гармонику число периодов в пятне поля остается неизменным, можно предположить, что снижение пусковых токов обусловлено уменьшением анодного напряжения. Действительно, формула пускового тока имеет вид [9]

$$I_{\text{п}} = \frac{s_0 \sqrt{\frac{2e}{m}} U_0^{3/2}}{2\pi \Gamma D^2} \varphi_{\text{р}}^{2(n)}, \quad (4)$$

где s_0 - поперечное сечение электронного потока; Γ - коэффициент депрессии сил пространственного заряда; D - геометрическая длина пространства взаимодействия; $\varphi_{\text{р}}$ - параметр, учитывающий влияние сил пространственного заряда на функцию рассинхронизма; U_0 - анодное напряжение.

Из формулы (4) видно, что при определенных значениях указанных параметров путем уменьшения анодного напряжения можно снижать пусковой ток генератора. Если суть этого положительного эффекта заключена в уменьшении анодного напряжения, то его можно достигать в низковольтных генераторах. Однако, как показывают эксперименты, в низковольтных генераторах получить пусковые токи ниже, чем в высоковольтных, не представляется возможным. Они даже не выравниваются, а сохраняются в 1,5-2 раза выше, чем у высоковольтных [10]. Следовательно, уменьшение пусковых токов обусловлено не столько уменьшением скорости электронов, сколько увеличением времени пролета электронами периода решетки.

Действительно, в низковольтных генераторах, например, уменьшение периода в два раза влечет за собой уменьшение в два раза скорости электронов, т. е. время пролета электронами периода для заданной частоты остается постоянным. В рассматриваемом эксперименте при переходе на 2-ю гармонику период остается постоянным, а скорость электронов уменьшается в два раза, что влечет за собой увеличение времени пролета периода решетки также в два раза. Значит, в нашей работе уменьшение пускового тока генератора как-то связано с увеличением времени пролета электронами периода решетки. Аналогичный эффект имеет место и в магнетронах, работающих в харьковском режиме. Действительно,

магнетроны в указанном режиме работают при значительно меньших магнитных полях и скоростях вращения электронов [4]. Таким образом, увеличение времени пролета электронами периода структуры является общим принципом, обуславливающим эффективную работу генераторов с длительным взаимодействием на высших (выше 1-й) пространственных гармониках. Увеличение времени пролета сопровождается улучшением фазовой группировки электронов, и его можно рассматривать как один из способов преодоления инерционности электронных процессов, являющейся фундаментальной физической причиной и препятствующей продвижению сверхвысокочастотных генераторов в терагерцевый диапазон частот [3]. Увеличение времени характерно и для случаев перехода генератора на 2-ю гармонику путем увеличения периода решетки в два раза при $U_{\text{а}} = \text{const}$. При этом генератор работает на 2-й гармонике без существенного увеличения пускового тока относительно пускового тока для 1-й гармоники [1, 5].

В нашем эксперименте, как уже отмечалось выше, пусковой ток генератора на 2-й гармонике был почти в два раза меньше, чем на 1-й. Причиной такого снижения пускового тока мог быть многоступенчатый заряд ячеек гребенки. В этом случае формула, характеризующая потери в ячейке, имеет вид [8]

$$R \int_0^{\infty} i^2 dt = \frac{C \varepsilon^2}{2n}. \quad (5)$$

При многоступенчатом заряде ячейка заряжается не за один раз до некоторого конечного потенциала ε , а ступеньками

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \dots + \varepsilon_n \approx \varepsilon.$$

Такой процесс может происходить по причине многократного переотражения волн между зеркалами резонатора в пределах конечного времени зарядки. В нашем случае такой заряд стимулируется по причине увеличения объема (энергоемкости) ячейки. Сравнение формул (1) и (5) показывает, что одноразовый заряд ячейки периодической структуры энергетически не выгоден. Действительно, при одноразовой зарядке энергия потерь оказывается равной энергии, запасаемой в ячейке, а КПД зарядки $\eta_3 = 0,5$, в то время как в случае многоступенчатого заряда при $n \rightarrow \infty, \eta_3 \rightarrow 1$, что сопровождается уменьшением омических потерь. Однако при этом время зарядки увеличивается (процесс зарядки замедляется). В случаях согласования замедления скорости электронов с замедлением скорости зарядки ячеек гребенки возможна автоматическая мини-

мизация омических потерь, что вообще характерно для физических процессов.

Выводы. Таким образом, проведенный анализ экспериментальных результатов показал, что в генераторах дифракционного излучения в случаях перехода их работы на 2-ю пространственную гармонику омические потери и пусковой ток увеличиваются с повышением концентрации энергии резонансной моды в ячейках периодической структуры, рассчитанной для работы на 2-й гармонике. Рост пусковых токов может быть скомпенсирован: оптимизацией открытой резонансной системы генератора [1, 5], реализацией перехода на 2-ю гармонику путем уменьшения скорости электронов при неизменном периоде решетки, рассчитанной для работы на 1-й пространственной гармонике, а также стимуляцией многоступенчатого заряда гребенки, например, путем увеличения их объема, как это было реализовано в данном эксперименте. В любом случае переход на 2-ю пространственную гармонику (путем увеличения периода в два раза или уменьшением в два раза скорости электронов) сопровождается увеличением времени пролета электронами периода гребенки на заданной частоте генерации. Этот эффект физически эквивалентен уменьшению инерционности электронных процессов, которая является фундаментальной физической причиной, ограничивающей продвижение сверхвысокочастотных генераторов в терагерцевый диапазон частот.

1. *Мирошниченко В. С., Сенкевич Е. Б., Корнеев В. К.* Влияние омических потерь на возбуждение колебаний в ГДИ на высших пространственных гармониках // 17-я Межд. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, 10-14 сентября 2007 г.) - Т.1. - С. 179-180.
2. *Мясин Е. А., Ильин А. Ю., Евдокимов В. В.* Генерация электромагнитных колебаний в оротроне в диапазоне 110...190 ГГц на второй пространственной гармонике // Электромагнитные волны и электронные системы. - 2007. - 12, № 4. - С. 41-44.
3. *Пожидаев В. Н.* Возможности применения терагерцевого диапазона радиоволн // Радиотехника. - 2006. - № 5. - С. 5-8.
4. *Усиков А. Я.* Современные достижения радиофизики и электроники. - Киев: Знание, 1981. - 64 с.
5. *Miroshnichenko V. S., Korneenkova V. K.* Modes Excitation in Diffraction Radiation Oscillator on high space Harmonics of the Periodic Structure MSMW'07 Symposium Proceedings. Kharkov Ukraine, June 25-30 2007. - V.2. - P. 526-528.

6. *Тараненко З. И., Трохименко Я. К.* Замедляющие системы. - Киев: Техника, 1965. - 289 с.
7. *Лебедев И. В.* Техника и приборы СВЧ. - М.: АН СССР, 1955. - Т.4. - 512 с.
8. *Мандельштам Л. И.* Полное собрание трудов. - М.: АН СССР, 1955. - Т.4. - 512 с.
9. *Ревин И. Д., Скрынник Б. К., Сысоев А. С. и др.* К линейной теории генераторов дифракционного излучения // Изв. Вузов. Радиофизика. - 1977. - 20, № 5. - С. 764-776.
10. *Мирошниченко В. С., Демченко М. Ю., Лопатин И. В. и др.* Низковольтные генераторы дифракционного излучения миллиметрового диапазона // Радиофизика и электроника. - Харьков: Ин-т радиофизики и электроники НАН Украины. - 2006. - 11, № 3. - С. 23-29.

ABOUT WORK OF A DIFFRACTION RADIATION OSCILLATOR OPERATING ON THE HIGHER SPACE HARMONICS

V. K. Korneenkova, V. G. Kurin

Output characteristics of a diffraction radiation oscillator operating on the higher space harmonics are considered. Comparison of the output power levels and the oscillator inrush currents for operation on the minus first and second space harmonics is given. In particular, the advantages of the oscillator operating on the minus second spatial harmonic in comparison with one operating on the minus first harmonic are shown. Physical interpretation of the high efficiency regimes of the oscillator operation on the higher space harmonics is proposed.

Key words: space harmonic, starting current, periodic structure.

ПРО РОБОТУ ГЕНЕРАТОРА ДИФРАКЦІЙНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА ВИЩИХ ПРОСТОРОВИХ ГАРМОНІКАХ

В. К. Корнеев, В. Г. Курин

Розглянуто вихідні характеристики генератора дифракційного випромінювання, що працює на вищих просторових гармоніках. Приведено порівняння рівнів вихідної потужності та пускових струмів генератора у випадках, коли він працює на -1-й та -2-й просторових гармоніках. Показано, зокрема, перевагу генератора, що працює на -2-й просторовій гармоніці в порівнянні з цим же генератором, що працює на -1-й просторовій гармоніці. Запропоновано фізичну інтерпретацію механізму, який обумовлено реалізацією випадків підвищення ККД генераторів, що працюють на вищих просторових гармоніках.

Ключові слова: просторові гармоніки, пусковий струм, періодична структура.

Рукопись поступила 7 апреля 2008 г.