

02;10

Умножение частоты в автогенераторах гиротронного типа

© И.В. Бандуркин, В.Л. Братман, А.В. Савилов

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород
E-mail: savilov@appl.sci-nnov.ru

Поступило в Редакцию 1 сентября 2005 г.

Предложены схемы одновременной генерации на основной частоте и ее высокой гармонике внутри одной электродинамической системы. Гироумножители такого типа, работающие без внешнего сигнала, могут стать эффективными источниками когерентного субмиллиметрового излучения.

PACS: 84.30.Ng, 84.40.-Ik

Хорошо известно, что благодаря нелинейным свойствам электронного пучка в выходном излучении гиротронов, как и других СВЧ-приборов, содержится небольшая доля излучения на гармониках рабочей частоты. Это обусловлено тем, что одновременно с группировкой частиц на рабочей частоте происходит группировка и на гармониках, а образовавшиеся сгустки возбуждают в гиротроне вынужденные колебания на кратных частотах. Даже относительно маломощное излучение такого типа представляет интерес для приложений, но оно было бы намного привлекательнее, если бы удалось значительно повысить его эффективность. Важно, что для его получения не надо превышать стартовый ток и можно использовать менее плотные электронные пучки, чем это требуется в генераторах, работающих на высокой гармонике. В данном сообщении рассматривается умножение частоты в приборах с самовозбуждающейся низкочастотной волной.

Традиционная (клистронная) схема гироумножителя [1–7] состоит из двух резонаторных секций и пространства инерционного дрейфа частиц. В первой секции поступающая от внешнего источника низкочастотная (НЧ) волна модулирует вращательные скорости частиц в условиях основного циклотронного резонанса:

$$\omega_L \approx h_L v_{\parallel} + \Omega. \quad (1)$$

Здесь ω_L , h_L — частота и продольное волновое число НЧ волны; v_{\parallel} , Ω — поступательная скорость и циклотронная частота электронов. В пространстве дрейфа модуляция скоростей приводит к группировке электронов и появлению гармоник тока $\rho_n = \langle \exp(-in\theta_L) \rangle$ на частоте НЧ волны ω_L ($n = 1$) и ее гармониках $n\omega_L$. Здесь $\theta_L = \omega_L(t - t_0) - h_L z - \int_{t_0}^t \Omega dt - \varphi_0$ — фаза электрона относительно

НЧ волны, φ_0 , t_0 — начальная фаза гировращения и время влета электрона на вход пространства взаимодействия ($z = 0$), $\langle \dots \rangle$ означает усреднение по всему электронному ансамблю (по всему t_0 и φ_0). Во второй секции имеет место резонанс электронов с высокочастотной (ВЧ) волной на высокой ($N > 1$) циклотронной гармонике:

$$\omega_H = n\omega_L \approx h_H v_{\parallel} + N\Omega. \quad (2)$$

Для возбуждения этой волны необходимо наличие на частоте ω_H гармоники тока $\rho_1^{(H)} = \langle \exp(-i\theta_H) \rangle$, где $\theta_H = \omega_H(t - t_0) - h_H z - N \int_{t_0}^t \Omega dt - N\varphi_0$. Такая гармоника появляется вследствие группировки

частиц в поле НЧ волны: $\rho_1^{(H)} = \rho_n$, если $\theta_H = n\theta_L$. При равномерном распределении частиц по гирофазам φ_0 это означает, что фактор умножения частоты должен совпадать с номером циклотронной гармоники: $n = N$ (что не обязательно для пучка с близкими начальными фазами частиц).

При малой амплитуде внешнего НЧ сигнала поведение гармоник тока в пространстве дрейфа описывается известной формулой $\rho_n(z) \propto J_n(Xnz)$, где J_n — функция Бесселя, а X определяется интенсивностью воздействия НЧ волны на частицы в первой секции. Соответственно насыщение гармоники происходит тем раньше, чем выше ее номер: координата z_n^{\max} , где $\rho_n(z)$ достигает максимума и где следует поместить ВЧ секцию, уменьшается с ростом n . Такое поведение характерно для всех приборов с инерционной (типа О) группировкой электронов, и этот эффект присущ также и схеме с самовозбуждающейся первой секцией, где внешний сигнал отсутствует (рис. 1). Более или менее эффективное возбуждение высокой гармоники возможно, когда самовозбуждающаяся НЧ секция работает далеко от насыщения (близко к стартовому режиму). Проиллюстрируем это важным примером самовозбуждающейся НЧ секции в виде гиротронной

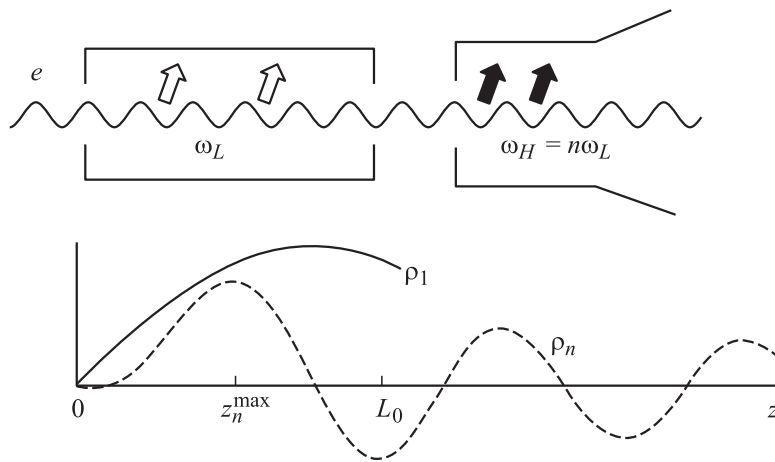


Рис. 1. Гироумножитель с самовозбуждающейся НЧ секцией. Показаны гармоники тока на частоте НЧ волны $\rho_1(z)$ и на кратной частоте $\rho_n(z)$.

лампы обратной волны (гиро-ЛОВ), перестройка частоты излучения которой позволяет легко добиться синхронизации НЧ и ВЧ секций ($\omega_H = n\omega_L$). Гиро-ЛОВ удобна также и для анализа, так как в рамках асимптотических уравнений [8] режим ее работы определяется единственным параметром $\hat{L} \sim L\sqrt{I}$, пропорциональным длине системы и кубическому корню из тока (в большинстве случаев коротковолновых приборов относительные изменения энергий частиц невелики и использование асимптотических уравнений оправдано). Амплитуда волны и частота генерации в рабочем режиме являются собственными значениями пространственно-временной задачи. Гиро-ЛОВ работает в стационарном одночастотном режиме в диапазоне между стартовым значением $\hat{L}_s = 1.95$ и порогом автомодуляции $\hat{L}_a = 2.82$ [9]. При существенном превышении стартового значения первая гармоника близка к насыщению на выходе из первой секции: $L_0 \approx z_1^{\max}$. Высокие гармоники во всем диапазоне $\hat{L}_s < \hat{L} < \hat{L}_a$ насыщаются внутри первой секции: $z_n^{\max} < L_0$, а затем быстро осциллируют и убывают с координатой, что соответствует исчезновению группировки и очень низкому КПД на кратных частотах из-за перемешивания электронов (рис. 2).

Из приведенных рассуждений ясно, что при совместном возбуждении гармоник ВЧ секцию выгоднее расположить не после, а

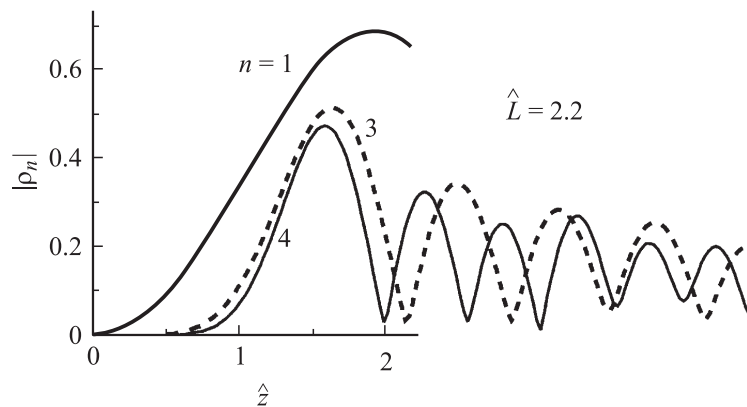


Рис. 2. Распределение первой и высоких гармоник тока при использовании самовозбуждающейся секции в виде giro-ЛОВ.

внутри НЧ секции, где соответствующая гармоника $\rho_n(z)$ имеет максимум. Для этой цели, в частности, может быть использован НЧ генератор с пространством взаимодействия секционированного (клистронного) типа, в котором возбуждение ВЧ волны происходит на участке НЧ группировки. Для реализации удобна более простая схема, использующая в НЧ giro-ЛОВ рассмотренный в [10] эффект группировки частиц в поле нерезонансной волны. В этом случае электродинамическая система представляет собой отрезок регулярного волновода с закритическим сужением на входном конце, отражающим обе волны, который помещен в магнитное поле ступенчатого профиля (рис. 3). Клистронное взаимодействие частиц с НЧ волной обеспечено, если волна относительно далека от резонанса с частицами в первой части пространства взаимодействия ($z < L_b$) и находится в резонансе с ними во второй части [10]. При определенных условиях работа первой секции ($z < L_b$) аналогична работе модулирующей и группировочной секций клистрона, а именно, в ней происходит группировка частиц без существенного изменения их энергии. Короткий входной участок $0 < z < L_0$, где $L_0 \sim v_{\parallel} / (\omega_L - h_L v_{\parallel} - \Omega)$ и взаимодействие с НЧ волной является резонансным, играет роль модулирующей секции, а участок $L_0 < z < L_b$ является аналогом пространства дрейфа: здесь формируются гармоники тока ρ_n на частотах $n\omega_L$. При $z > L_b$, где

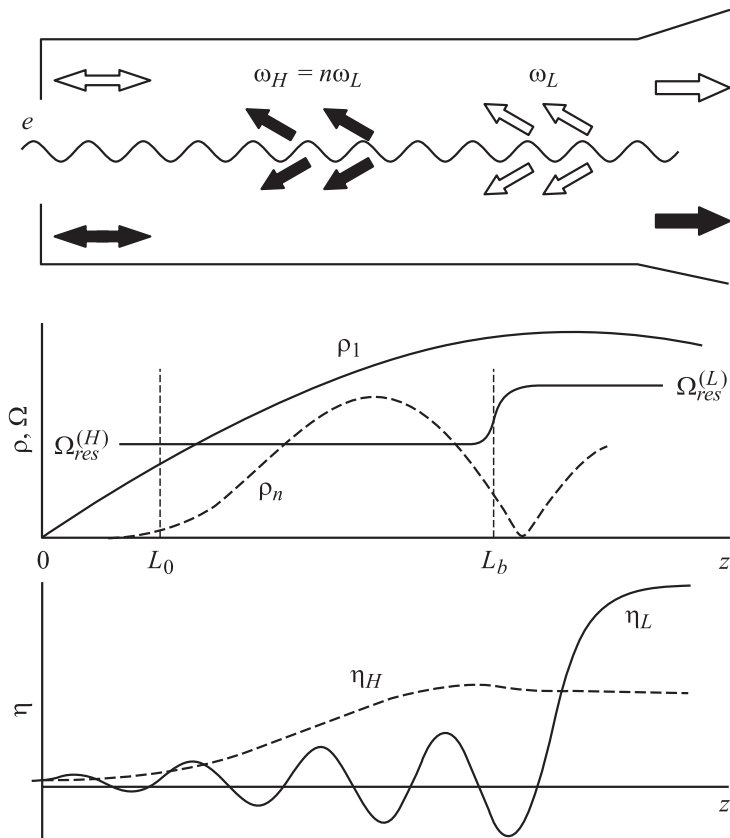


Рис. 3. Гироумножитель в конфигурации ЛОВ–ЛОВ: схема с ВЧ секцией, встроенной внутрь НЧ генератора. Показаны профиль циклотронной частоты $\Omega(z)$, распределения гармоник тока на частоте НЧ волны ρ_1 и на кратной частоте ρ_n , а также эффективностей взаимодействия электронов с НЧ (η_L) и ВЧ (η_H) волнами.

гармоника ρ_1 достигает максимума, происходит эффективная генерация НЧ волны сгруппированным пучком. В такой схеме высокие гармоники насыщаются раньше, чем основная, т.е. в области $L_0 < z < L_b$. Там выбором магнитного поля следует обеспечить резонанс электронов с

Результаты численного моделирования гироумножителей

Конфигурация системы	ЛОВ-ЛОВ	ЛОВ-гиротрон
Электронный пучок	Трубчатый приосевой, 80 kV/10 A, питч-фактор — 1.3, разброс осциляторных скоростей — 20%	
Фактор умножения частоты	4	
НЧ/ВЧ моды	TE _{1,1} /TE _{4,2}	
Длины НЧ/ВЧ секций	6.16 mm / 1.54 mm	6.23 mm / 1.56 mm
Групповые скорости НЧ/ВЧ волн	0.62 s / 0.14 s	0.61 s / 0.02 s
Радиус волновода	2.3 mm	
Профиль магнитного поля	0 < z < 2.2 cm : 2.09 T 2.2 cm < z < 3.0 cm : 2.34 T	0 < z < 2.5 cm : 1.98 T 2.5 cm < z < 3.5 cm : 2.26 T
КПД генерации НЧ волны	8%	5%
КПД генерации ВЧ волны	1%	3%
Полоса перестройки частоты	2%	—

ВЧ волной, $\Omega(z < L_b) \approx \Omega_{res}^{(H)} = (\omega_H - h_H v_{\parallel})/n$, и тем самым создать условия для ее эффективного возбуждения. Такой гироумножитель особенно привлекателен в конфигурации ЛОВ-ЛОВ, когда и НЧ-, и ВЧ-генерация происходят в режиме лампы обратной волны. Изменяя магнитные поля в секциях, можно осуществить небольшую перестройку частоты ВЧ генерации при сохранении синхронизации $\omega_H = n\omega_L$. КПД генерации достигает 1% от мощности электронного пучка при умножении частоты в 4 раза (см. таблицу), что приемлемо для многих приложений. Более высокой эффективности мешает ограничение длины L_b , вызванное опасностью самовозбуждения на основном резонансе в режиме „обычной“ гиро-ЛОВ. Увеличения КПД можно добиться переходом к конфигурации ЛОВ-гиротрон (см. таблицу), когда генерируемая ВЧ волна близка к отсечке. В этом случае, однако, частота ВЧ секции практически фиксирована, что лишает систему такого важного достоинства, как перестройка частоты генерации.

Работа поддержана РФФИ (проекты 04-02-17118 и 05-02-16852), Фондом содействия отечественной науке и Программой Президиума РАН „Электромагнитное излучение терагерцового диапазона“.

Список литературы

- [1] Гапонов А.В., Петелин М.И., Юлпатов В.К. // Изв. вузов. Радиофизика. 1967. Т. 10. № 9–10. С. 1414–1453.
- [2] Жураховский В.А. Нелинейные колебания электронов в магнитонаправленных потоках. Киев: Наук. думка, 1972. 303 с.
- [3] Ергаков В.С., Моисеев М.А. // Радиотехника и электроника. 1977. Т. 22. № 4. С. 789–794.
- [4] Белоусов В.И., Ергаков В.С., Моисеев М.А. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1978. № 9. С. 41–50.
- [5] Hirshfield J.L. // Phys. Rev. A. 1991. V. 44. P. 6845–6853.
- [6] Guo H., Chen S.H., Granatstein V.L. et al. // Phys. Rev. Lett. 1997. V. 79. P. 515–518.
- [7] Walter M.T., Nusinovich G.S., Lawson W.G. et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2000. V. 28. P. 688–694.
- [8] Братман В.Л., Гинзбург Н.С., Ковалев Н.Ф. и др. Релятивистская высокочастотная электроника. Горький: ИПФ АН СССР, 1979. С. 249–274.
- [9] Гинзбург Н.С., Кузнецов С.П. Релятивистская высокочастотная электроника. Вып. 2. Горький: ИПФ АН СССР, 1982. С. 101–144.
- [10] Бандуркин И.В., Савилов А.В. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 1. С. 12–19.