A. N. Didenko, Microwave power generation mechanism in vircator,
Dokl. Akad. Nauk SSSR, 1991, Volume 321, Number 4, 727–729

Доклады Академии наук СССР
1991. Том 321, № 4

УДК 621.385.622.01 ФИЗИКА

© Член-корреспондент АН СССР А.Н. ДИДЕНКО

МЕХАНИЗМ ГЕНЕРАЦИИ МОЩНЫХ СВЧ-КОЛЕБАНИЙ В ВИРКАТОРЕ

Виркатор – мощный высокоэффективный СВЧ-генератор, который интенсивно исследуется в последнее время как с теоретической, так и экспериментальной точки зрения [1, 2]. В этом приборе генерация излучения происходит в результате колебаний частиц сильноточных электронных пучков вокруг анода в пространстве, ограниченном катодом и виртуальным катодом (рис. 1). Как уже отмечалось [3], виркатор является единственным сильноточным СВЧ-генератором, который просто перестает работать, когда ток пучка уменьшается, поскольку при этом не образуется виртуального катода, а следовательно, нет условий для осцилляторного движения частиц у анода.

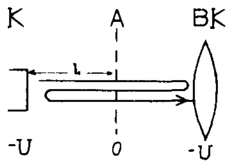

Рис. 1

Считается [1], что слаботочным аналогом виркатора является триод с отражательным катодом, который достаточно подробно исследовался в 20–30-е годы и был забыт в силу его бесперспективности[4]. Представляет интерес исследовать вопрос: чем определяются преимущества виркатора по сравнению с его бесперспективным слаботочным аналогом? Рассмотрению этого вопроса и посвящена данная работа.

В настоящее время общепринятой является точка зрения, согласно которой в виркаторе реализуются два механизма генерации: за счет колебаний частиц вокруг анода в пространстве катод–виртуальный катод и за счет колебаний виртуального катода как целого.

Длина волны первых колебаний равна примерно учетверенной длине анод-катодного зазора L, точнее:

$$\lambda = 6L\left(\frac{\gamma+1}{\gamma-1}\right)^{1/2}\frac{1}{F}, \tag{1}$$

а

$$\omega_1 = \frac{c\pi}{3L}\left(\frac{\gamma-1}{\gamma+1}\right)^{1/2}F, \tag{2}$$

где $\gamma = \dfrac{E}{m_0c^2}$, $\quad 1 \leqslant F \leqslant \dfrac{3}{2}$.

Для второго механизма частота генерируемых колебаний связана с плотностью тока J, а следовательно, и с частотой плазменных колебаний пучка ω_p:

(3) $$\omega_2 = 20{,}4\pi\sqrt{\frac{J}{\beta\gamma}} \simeq 2{,}5\,\omega_p.$$

Эта формула справедлива для одномерного случая, для трехмерного коэффициент в выражении для ω_2 немного уменьшается [5].

Обычно оба механизма проявляются одновременно, но если сделать анод достаточно толстым, то первый механизм будет подавлен, поскольку поток электронов, отраженных от виртуального катода, будет поглощаться в аноде. Такой механизм генерации колебаний реализуется в редитроне [6, 7]. Как показали достаточно подробные теоретические и экспериментальные исследования, частота генерируемых в этом приборе колебаний равна 2,5 ω_p. Это означает, что можно считать установленным, строго определенную зависимость частоты колебаний, генерируемых по второму механизму, от плазменной частоты.

Для первого же механизма генерации [1] период колебаний

$$T = 4T_0,$$

где

$$T_0 = \frac{L}{v_0}, \qquad v_0 = \sqrt{\frac{2eU}{m_0}},$$

а угол пролета

$$\theta = \omega T = 4\omega T_0 = 2\pi(l - 1/4) = 2\pi \cdot 3/4 \ \text{при} \ l = 1.$$

Это означает, что

(4) $$\omega = \frac{3\pi}{2}\,\frac{1}{4T_0} = \frac{3\pi}{2}\,\frac{v_0}{4L} = \frac{3\pi}{2}\,\frac{1}{4L}\left(\frac{2eU}{m_0}\right)^{1/2}.$$

С другой стороны, с учетом того, что плотность электронов, определяемая из формулы Чайлда–Лэнгмюра, равна

$$n = \frac{4}{9}\left(\frac{2e}{m_0}\right)^{1/2}\frac{U^{3/2}}{4\pi L^2}\,\frac{1}{ev_0},$$

частота плазменных колебаний в нерелятивистском случае

(5) $$\omega_p = \left(\frac{4\pi ne^2}{m_0}\right) = \left(\frac{4}{9}\,\frac{eU}{m_0L^2}\right)^{1/2} = \frac{\sqrt{2}}{3}\left(\frac{2eU}{m_0L^2}\right)^{1/2}.$$

Отсюда для частоты генерируемых колебаний (4) справедливо следующее выражение:

(6) $$\omega = \frac{3\pi}{2}\,\frac{3\sqrt{2}}{2}\,\omega_p \simeq 2{,}5\omega_p.$$

Таким образом, и при генерации колебаний по первому механизму частота генерируемых колебаний из-за зависимости амплитуды колебаний от плотности тока также будет равна $\omega_1 = 2{,}5\omega_p$, т.е. точно совпадать с частотой колебаний, генерируемых по второму механизму. По-видимому, возможны случаи, когда эти частоты не совпадают, но наиболее оптимальным будет такой режим генерации, когда $\omega_1 = \omega_2$.

Полученный результат означает, что виркатор можно отнести к параметрическим генераторам, когда на генератор действует вынуждающая сила не удвоенной, как обычно, а той же частоты. Это соответствует случаю, когда вынуждающая сила действует на маятник не дважды за период, а только один раз, что и наблюдается в нашем случае. Источником накачки является энергия колебаний виртуального катода. Поскольку при этом будет происходить раскачка колебаний на этой частоте, то спектр излучения при $\omega_1 = \omega_2$ станет более монохроматичным.

Строго говоря [8], если имеются два резонансных контура с собственными частотами ω_1 и ω_3, то для реализации параметрического резонанса необходимо, чтобы частота накачки ω_2 равнялась сумме этих частот, т.е. $\omega_2 = \omega_1 + \omega_3$. Если $\omega_1 = \omega_3$, то выполняются условия для обычного, хорошо изученного параметрического резонанса, когда $\omega_2 = 2\omega_1$. В нашем случае роль третьего контура с частотой ω_3 выполняет камера, в которой расположен виркатор. Размеры этой камеры достаточно большие, т.е. $\omega_3 \ll \omega_1$, и поэтому возможно выполнение условий для параметрического резонанса при $\omega_1 \simeq \omega_2$, о чем говорилось выше.

Связь же частоты накачки ω_2 с частотой плазменных колебаний, т.е. соотношение $\omega_{1,2} = 2{,}5\,\omega_p$, можно объяснить следующим образом. Как известно [8], быстрые волны пространственного заряда, распространяющиеся по пучку, имеют частоты $\omega_q = \omega_p$ для пучков с бесконечными поперечными размерами и $\omega_q = 2\,\omega_p$ для бесконечно тонких пучков. В реальных условиях для пучков конечных размеров [8] $\omega_q = (1{,}2 - 1{,}3)\,\omega_p$ и поэтому, учитывая осцилляторный характер движения пучков, нетрудно показать, что эта частота должна быть удвоена, т.е. что частота возбуждаемых плазменных колебаний в осциллирующих пучках (т.е. частота колебаний виртуального катода) должна быть $\sim(2{,}4 - 2{,}6)\,\omega_p$, что и наблюдается и в эксперименте, и следует из расчетов.

Таким образом, слаботочным аналогом виркатора является триод с отражательным катодом, если на отражательный катод подавать дополнительное напряжение, изменяющееся с той же частотой, с которой электроны совершают осцилляции вблизи анода, т.е. триод, работающий в режиме усиления. Если напряжение не подавать, это обусловит малую эффективность таких генераторов, но, по-видимому, если такое напряжение подавать, то выполнить условия равенства частот будет довольно трудно. В виркаторе же это условие выполняется автоматически, т.е. можно сказать, что виркатор является параметрическим генератором, работающим в режиме автогенерации.

Московский инженерно-физический
институт

Поступило
4 X 1991

ЛИТЕРАТУРА

1. High-Power Microwave Sources / Ed. V. Granatstein, I. Alexeeff. Boston; L., 1987. 2. *Диденко А.Н., Григорьев В.П., Жерлицын А.Г.* В сб.: Плазменная электроника. Киев: Наук. думка, 1989. 3. *Диденко А.Н.* – ДАН, 1990, т. 312, № 1, с. 89. 4. *Barkhausen H., Kurz K.* – Phys. Z., 1920, Bd. 21, S. 1. 5. *Диденко А.Н., Ращиков В.И.* – ДАН, 1990, т. 313, № 3, с. 597. 6. *Fulton R.D., Davis H.A., Sherwood E.G., Kwan T.J.T.* – Proc. 7 Intern. Conf. on high-power particle beams. Karlsruhe, 1988, p. 1396. 7. *Kwan T.J.T., Davis H.A., Fulton R.D., Sherwood E.G.* – Ibid., p. 447. 8. *Люиселл У.* Связанные и параметрические колебания в электронике. М.: ИЛ, 1963.