

УДК 621.385.6

О ВЛИЯНИИ МАГНИТНЫХ КОМПОНЕНТ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ПОЛЯ ПРИ ПРОСТРАНСТВЕННОМ ЦИКЛОТРОННОМ АВТОРЕЗОНАНСЕ

© 2019 г. В. Л. Саввин¹, *, Г. М. Казарян¹, Д. А. Михеев¹, А. В. Пеклевский², И. И. Шуваев¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
Московский Государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

²ФГУП ЦНИИМАШ, Москва, Россия

*E-mail: vl.savvin@physics.msu.ru

Проведен численный анализ взаимодействия релятивистского электронного потока с полем прямоугольного резонатора, возбужденного на моде TE_{101} . Показано, что это взаимодействие может сопровождаться значительным нарушением резонансных условий из-за изменения циклотронной частоты и резким торможением пучка, обусловленным влиянием магнитной компоненты ВЧ-поля в резонаторе.

DOI: 10.1134/S0367676519010216

ВВЕДЕНИЕ

Среди существующих методов ускорения электронов следует выделить метод, основанный на явлении циклотронного резонанса [1]. Путем увеличения магнитного поля вдоль оси резонатора можно компенсировать рост релятивистской массы электронов и поддержать условия циклотронного резонанса на всей длине резонатора. Возможность создания источника рентгеновского излучения, основанного на ускорении электронов в условиях авторезонанса, обсуждается в [2–4]. Методом численного моделирования исследуется взаимодействие между электронным пучком и микроволной в прямоугольном резонаторе с модой TE_{102} . Показано, что исследуемая система может создать условия для ускорения пучка электронов до энергий порядка сотен кэВ в импульсном режиме. Однако при анализе циклотронного авторезонанса в мощных устройствах необходимо учитывать влияние ряда факторов, которыми нельзя пренебречь. Это не только релятивистское увеличение массы электронов и действие радиальных компонент нарастающего магнитостатического поля, но и влияние переменных магнитных компонент высокочастотного электромагнитного поля.

Целью данной работы является численный анализ взаимодействия релятивистского электронного потока с полем прямоугольного резонатора с учетом вышеприведенных факторов.

МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ, РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Предположим, что электронный пучок распространяется вдоль оси z прямоугольного резонатора с электромагнитным полем, соответствующим моде TE_{101} . Будем считать соосное стационарное магнитное поле аксиально симметричным, а его распределение $H(z)$ вдоль оси z – заданным. Для аксиальных $H_z(r, z)$ и радиальных $H_r(r, z)$ компонент стационарного магнитного поля в области взаимодействия ограничимся первыми членами разложения в параксиальном приближении. Тогда компоненты внешних полей, действующих на электронный поток, приобретают вид:

$$\begin{aligned} E_x(y, z, t) &= E_0 \cos \frac{\pi y}{a} \sin \frac{\pi z}{l} \sin \omega t, \\ E_y = E_z &= 0, \quad H_x(x, z) = -\frac{x}{2} \frac{\partial H(z)}{\partial z}, \\ H_y(y, z) &= \tilde{H}_{0y} \cos \frac{\pi y}{a} \cos \frac{\pi z}{l} \cos \omega t - \frac{y}{2} \frac{\partial H(z)}{\partial z}, \\ H_z(y, z) &= \tilde{H}_{0z} \sin \frac{\pi y}{a} \sin \frac{\pi z}{l} \cos \omega t + H(z). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь $\tilde{H}_{0y} = E_0 \sqrt{\frac{\epsilon_0 \lambda_0}{\mu_0 2l}}$, $\tilde{H}_{0z} = E_0 \sqrt{\frac{\epsilon_0 \lambda_0}{\mu_0 2a}}$ – амплитуды магнитных компонент СВЧ-поля резонатора, E_0 – амплитуда высокочастотного электрического поля в сечении $z = l/2$, $y = 0$; a, b, l – размеры

прямоугольного резонатора, ϵ_0, μ_0 – электрическая и магнитная проницаемость, $\lambda_0 = 2\pi c/\omega$ – резонансная длина волны, $\omega = \pi c\sqrt{a^{-2} + l^{-2}}$ – резонансная частота, $2a/\lambda_0 = 1.3$. Предположим, что на электроны действует также поле пространственного заряда электронного потока E_{nz} , рассчитываемое численно согласно [5].

Релятивистские уравнения движения электронов:

$$\frac{d\vec{v}_i}{dt} = -\eta_0\sqrt{1-\beta^2}\left\{\vec{E}_i + \mu_0[\vec{v}_i\vec{H}] - \frac{\vec{v}_i}{c^2}(\vec{v}_i\vec{E}_i)\right\}, \quad (2)$$

где $\beta = \frac{|\vec{v}_i|}{c}$, $\eta_0 = \frac{|e|}{m}$, \vec{E}_i – сумма высокочастотного электрического поля и поля пространственного заряда, действующих на i -й электрон, решались численно методом последовательных приближений E_0 к значению, соответствующему заданному уровню мощности электронного потока на выходе резонатора:

$$P = \frac{I_0}{|e|}c^2\sum(m_i(l) - m_i(0)), \quad (3)$$

где $m_i(0)$ и $m_i(l)$ – релятивистские массы электронов на входе и выходе резонатора, I_0 – ток пучка.

Нагрузка, вносимая потоком в резонатор, характеризовалась эквивалентной проводимостью

$$Y_e = G_e + jB_e = \frac{I_0}{E_0b^2}\int_0^l\left[\frac{v_x}{v_z}\right]\sin\frac{\pi z}{l}dz,$$

где v_x, v_z – соответствующие компоненты скорости электронов, расположенного в центре сечения пучка.

Будем характеризовать энергоёмкость электронного пучка в резонаторе величиной $W = P/P_0$, где P_0 – мощность инжектируемого пучка. В релятивистских режимах с постоянным вдоль резонатора внешним магнитным полем H_0 энергоёмкость пучка ограничивается нарушением условий циклотронного резонанса.

Казалось бы, что изменением профиля магнитного поля вдоль оси резонатора:

$$H(z) = H_0/\sqrt{1-\beta^2(z)}, \quad (4)$$

т.е. выполнив условие пространственного циклотронного авторезонанса, можно снять это ограничение, повысить эффективность взаимодействия пучка с полем резонатора и неограниченно увеличивать W . Однако, как показали результаты численного моделирования, с ростом W возникает еще одно ограничение, вызванное торможением электронного пучка, т.е. уменьшением продольной скорости электронов v_z вдоль оси резонатора.

Основные причины торможения электронов – влияние магнитной компоненты СВЧ-поля резо-

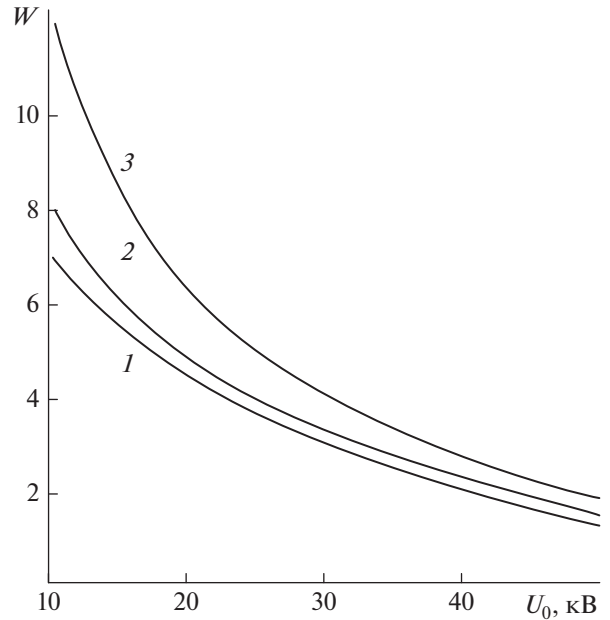


Рис. 1. Зависимость энергоёмкости от потенциала инжекции U_0 при $v_z(l) = v_{z0}/\sqrt{2}$; 1 – $H = H_0/\sqrt{1-\beta^2(0)} = \text{const}$, 2 – $H(z) = H_{0\text{опт}}$, 3 – $H(z) = H_0/\sqrt{1-\beta^2(z)}$.

натора с амплитудой \tilde{H}_{0y} и действие радиальной компоненты стационарного магнитного поля в режимах с коррекцией условий циклотронного резонанса, согласно (4), направленных навстречу оси z на выходе из резонатора и возрастающих с ростом W .

Если предположить, что продольная скорость электронов на выходе из резонатора уменьшается в $\sqrt{2}$ раз по отношению к начальной, т.е. $v_z(l) = v_{z0}/\sqrt{2}$, то можно найти зависимость максимальной энергоёмкости электронного пучка W от его потенциала в момент инжекции U_0 при различном профиле магнитного поля (см. рис. 1). Кривые 1 и 2 здесь соответствуют постоянному вдоль z стационарному магнитному полю, для кривой 1 условие циклотронного резонанса выполнено в начале области взаимодействия (т.е. при $z=0$). Для кривой 2 резонанс обеспечивается внутри области взаимодействия, при этом напряженность магнитного поля оптимальна, т.е. соответствует максимально возможному W . Для этих случаев (кривые 1 и 2 на рис. 1) ограничение W связано, в основном, с эффектом нарушения условий циклотронного резонанса, продольная скорость электронов при этом изменяется слабо. В случае пространственного авторезонанса (кривая 3) максимальная энергоёмкость пучка ограни-

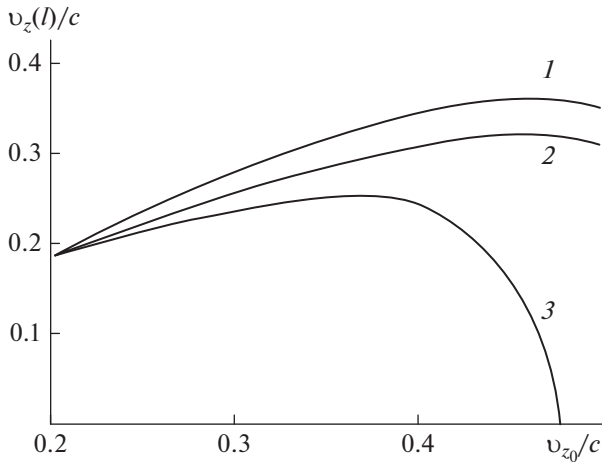


Рис. 2. Изменение продольной скорости электронов в зависимости от начальной скорости пучка для $H(z) = H_0/\sqrt{1-\beta^2(z)}$; 1 – $W=2$, 2 – $W=4$, 3 – $W=6$.

чена торможением электронов, испытывающих действие поперечных магнитных полей.

Изменение продольной скорости для режима с коррекцией резонансных условий согласно (4) показано на рис. 2. При небольших значениях W изменение v_z мало, однако с ростом W эффект торможения становится существенным и может даже приводить к полной остановке электронов (см. случай с $W=6$, $v_{z0}/c = 0.48$ на рис. 2).

В более сложных резонансных системах, например в резонаторах с ламелями и конденсаторным зазором [6], интенсивность магнитных компонент ВЧ-поля в области распространения электронного пучка может быть ослаблена на порядок за счет концентрации магнитного поля вокруг ножек ламелей. При этом максимальное значение энергоемкости резонатора W может достигать 15–20 при потенциале инжекции пучка 10–12 кВ.

Рассмотрим эквивалентную схему резонатора, где $Y_k = G_k + jB_k$ – проводимость самого резонатора $Y_e = G_e + jB_e$, $Y_n = G_n + jB_n$ – проводимости, вносимые электронным потоком и внешней нагрузкой (источником сигнала). Будем считать, что все три проводимости включены параллельно. Тогда полоса частот взаимодействия поля резонатора с электронным потоком будет определяться условием согласования проводимостей:

$$Y_n = Y_e^* + Y_k^*, \quad (5)$$

а коэффициент передачи мощности сигнала в электронный поток равен:

$$R(\omega) = \frac{4G_n G_e(\omega)}{|Y_e(\omega) + Y_k(\omega) + Y_n|^2}. \quad (6)$$

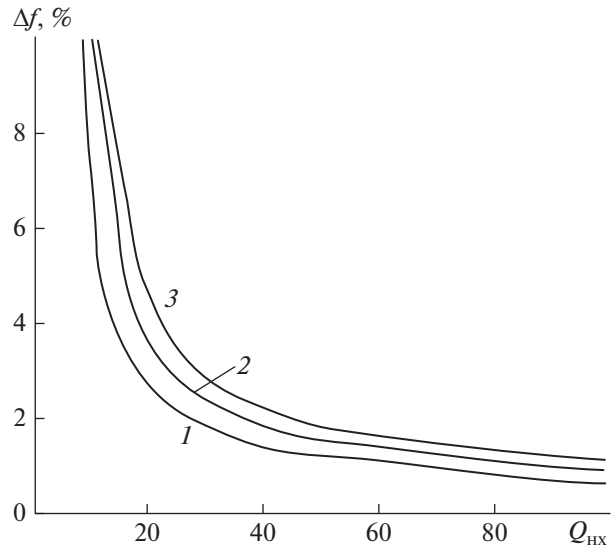


Рис. 3. Зависимость рабочей полосы от нагруженной добротности “холодного” резонатора. Коэффициент передачи СВЧ-мощности в поток $R(\omega)$ на границах полосы равен – 0.95 (1), 0.9 (2), 0.85 (3), угол пролета – 26 рад.

В нерелятивистском случае проводимость, вносимая электронным пучком, вычислена аналитически [7]. Для релятивистского пучка проведенный численный анализ показал, что в режимах с авторезонансом максимумы активной и реактивной компонент электронной проводимости G_e и B_e смещаются на 3–5% в область отрицательных расстройек по частоте.

Для достаточно высоких коэффициентов передачи СВЧ-мощности в электронный поток необходимо помимо взаимной компенсации реактивностей B_k и B_e иметь $G_e \gg G_k$. При характерных значениях собственной добротности $Q_0 = (5-6) \cdot 10^3$ и типовых значениях волнового сопротивления прямоугольного резонатора $\rho \sim (40-50)$ Ом величина проводимости потерь в стенках резонатора $G_k = \frac{1}{\rho Q_0} \leq 5 \cdot 10^{-6}$ См.

Тогда для того, чтобы обеспечить коэффициент передачи СВЧ-мощности в электронный поток в центре полосы пропускания $R \geq 0.98$, необходимо иметь $G_e \geq 2.5 \cdot 10^{-4}$ См. Это можно реализовать для цилиндрических и ленточных пучков с микропервансом $p_\mu > 1.5$ мкА/В^{3/2} при потенциалах инжекции $V_0 < 20$ кВ.

Зависимость полосы пропускания от нагруженной добротности “холодного” резонатора иллюстрирует рис. 3. Проведенные численные оценки показывают, что при углах пролета 20–30 рад и

значениях микропервеанса электронного потока $p_\mu > 0.5-1.5 \text{ мкА} \cdot \text{В}^{3/2}$ рабочая полоса резонатора оказывается равной 1–5%.

ВЫВОДЫ

Таким образом, взаимодействие релятивистского электронного пучка с полями прямоугольного резонатора имеет сложный характер: может сопровождаться значительным нарушением резонансных условий из-за изменения циклотронной частоты и резким торможением пучка, обусловленным влиянием магнитного компонента ВЧ-поля в резонаторе.

Однако в режимах с $v_{z0}/c \leq 0.3$ и $W \leq 10$ оба эти эффекта допускают высокоэффективную (95–98%) передачу ВЧ-мощности при уровнях до десятков и сотен киловатт, если микропервеанс

электронного пучка превышает значение $p_\mu \geq 0.5-1 \text{ мкА} \cdot \text{В}^{-3/2}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gardner H.R. et al. // Rev. Sci. Instrum. 1990. V. 61. № 2. P. 724.
2. Dugar-Zhabon V., Orozco E., Herrera A. // J. Phys. Conf. Ser. 2016. V. 687. P. 012076.
3. Dugar-Zhabon V., Orozco E. // IEEE Trans. Plasma Sc. 2010. V. 38. № 10. P. 2980.
4. Dugar-Zhabon V., Orozco E., Umnov A. // Phys. Rev. Spec. Topics – Accelerators and Beams. 2008. V. 11. P. 041302.
5. Саввин В.Л., Пеклевский А.В. // Изв. РАН. Сер. физ. 2008. Т. 72. № 1. С. 139.
6. Саввин В.Л., Михеев Д.А., Казарян Г.М. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2014. Т. 78. № 2. С. 249.
7. Барденков В.А., Ванке В.А., Саввин В.Л. // Радиотехника и электроника. 1977. Т. 22. № 4. С. 863.