

*Михеев Д.А., Саввин В.Л., Ву К.Т.Ч., Егоров Р.В., Шуваев И.И.
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова*

Распространение высокоперевансных ленточных электронных потоков с циклотронным вращением в неоднородных магнитных полях

Проводится изучение динамики ленточного электронного потока с циклотронным вращением в неоднородных магнитных полях. Исследуется устойчивость ленточного пучка. Проводится поиск высокоэффективных режимов преобразования циклотронной энергии вращения пучка в энергию его поступательного движения.

Ключевые слова: ленточный электронный пучок, поперечные волны электронного потока, циклотронный резонанс, аксиально-симметричное магнитное поле, диокотронная неустойчивость.

Микроволновые устройства с ленточными электронными потоками могут обладать очевидными преимуществами по сравнению с СВЧ-устройствами с цилиндрическими электронными пучками. Ленточные пучки с широким прямоугольным (или эллипсоидальным) сечением дают возможность реализовать одновременно большой ток пучка и низкую плотность пространственного заряда, снизить уровень фокусирующего магнитного поля и обеспечить высокую эффективность СВЧ-устройств с широкой полосой частот, высокими значениями импульсной и средней мощности. Исследования последних лет наглядно продемонстрировали перспективы микроволновых устройств с ленточными электронными потоками в миллиметровом и терагерцовом диапазонах [1, 2]. Ленточные пучки с циклотронным вращением электронов весьма перспективны и для поперечно-волновых СВЧ устройств [3].

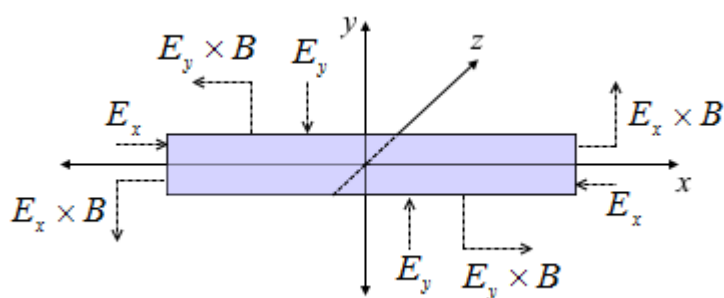


Рис.1. Сечение ленточного электронного пучка, E_x и E_y – компоненты электрического поля пространственного заряда пучка, B – внешнее магнитное поле.

Транспортировка ленточного электронного пучка в неоднородном (аксиально-симметричном) магнитном поле в канале дрейфа имеет ряд отличительных особенностей. Для ленточного электронного пучка, распространяющегося параллельно осевому однородному магнитному полю, воздействие силы дрейфа в магнитном поле приводит к сдвигу потока между верхней и нижней половинами в сечении пучка (Рис. 1).

Сдвиг и пульсации сечения потока может также привести к спонтанному экспоненциальному росту флуктуаций плотности пространственного заряда и возмущений в потоке, иными словами, к возбуждению диокотронной неустойчивости. Деформация поперечного сечения может возникнуть под влиянием E_x компоненты поля пространственного заряда, резко нарастающей к краям поперечного сечения пучка.

В рамках многопериодной 3D-модели ленточного электронного пучка [4] было проведено численное моделирование распространения вращающегося ленточного потока в реверсивном магнитном поле:

$$B_z = \frac{1}{2} B_0 \left(1 + C_0 + (1 - C_0) \cos \left(\frac{\pi z}{L_0} \right) \right), \quad (1)$$

где B_0 – величина магнитного поля на входе в область реверсивного изменения магнитного поля, $C_0 = B_1/B_0$ – параметр изменения магнитного поля (B_1 – величина магнитного поля на выходе из области реверсивного изменения магнитного поля), $L_0 = N_c \lambda_c$ – длина области реверсивного изменения магнитного поля, где N_c – число циклотронных длин волн, а $\lambda_c = \frac{2\pi v_{z0}}{\omega_{c0}}$ – циклотронная длина волны (ω_{c0} – циклотронная частота, v_{z0} – продольная скорость частиц на влёте в область реверсивного изменения магнитного поля).

В параксиальном приближении поперечные компоненты аксиально-симметричного магнитного поля будут иметь следующий вид:

$$B_x \approx -\frac{x}{2} \frac{\partial B_z(z)}{\partial z}, \quad (2)$$

$$B_y \approx -\frac{y}{2} \frac{\partial B_z(z)}{\partial z}, \quad (3)$$

Параметры пучка были следующими: потенциал пучка $U_0 = 10$ кВ, сечение пучка – $2,5 \times 40$ мм², $B_0 = 0,088$ Тл (соответствует циклотронной частоте $\omega_{c0} = 2,45$ ГГц), значения микроперванса – $p_\mu = 1-20$ мкА/В^{3/2} (иными словами, значения тока пучка $I_0 = 1-20$ А). При таких значениях микроперванса мощность пучка с катода составила 10-200 кВт в непрерывном режиме.

Продольная скорость частиц существенно изменяется при транспортировке пучка вдоль области взаимодействия с магнитных полем (рис.2). Прослеживается увеличение продольной скорости от одного края к другому. Изменение продольных скоростей частиц внутри пучка происходит достаточно плавно, поэтому, несмотря на значительное различие скоростей отдельных частиц, искажения формы сечения ленточного пучка достаточны небольшие.

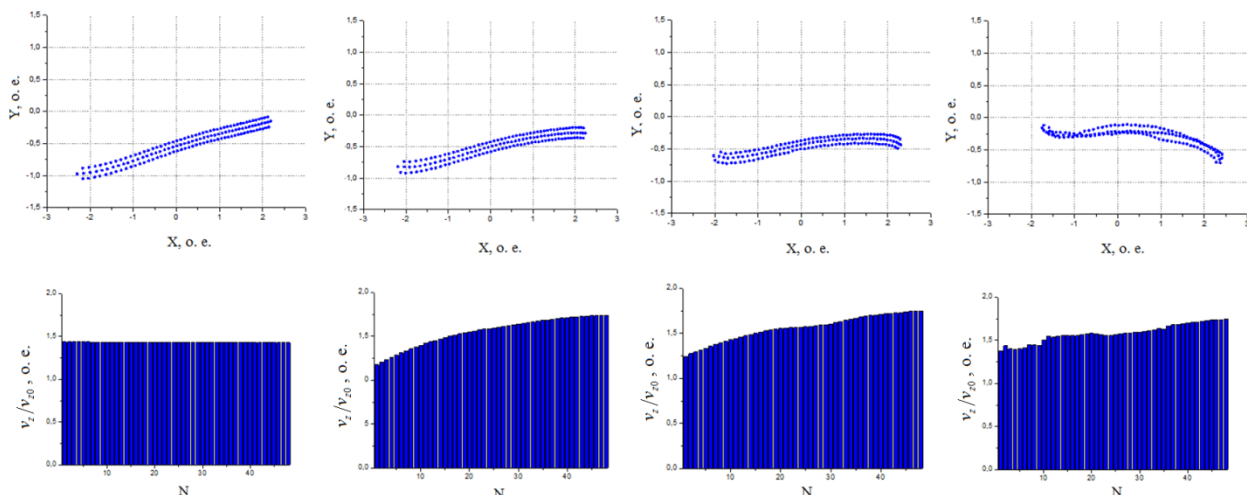


Рис.2. Поперечные сечения ленточного пучка с микропервеансом $p_\mu = 1; 5; 10; 20$ $\text{мкА/В}^{3/2}$ (слева направо) и спектр продольных скоростей на выходе из области реверсивного изменения магнитного поля.

Согласно результатам численного моделирования возможны варианты транспортировки ленточного пучка с малыми искажениями поперечного сечения вдоль области реверсивного изменения магнитного поля с микропервеансом $p_\mu = 10-20 \text{ мкА/В}^{3/2}$. Отметим, что такие большие значения первеанса пучка не должны вызывать недоумения (в вакуумной электронике принято говорить о реально достижимых значениях микропервеанса до $p_\mu = 2$). Огромные значения первеанса достигаются за счёт большего сечения ленточного пучка в сравнении с цилиндрическим пучком (и соответственно большей величины электрического тока при одинаковой для обоих пучков плотности тока).

Относительная стабильность пучка при таком разбросе продольных скоростей (до 40 %) поддерживается за счёт уменьшения фактора $\vec{E} \times \vec{B}$, ответственного за деформацию поперечного сечения ленточного пучка. Во-первых, за счёт увеличения площади сечения пучка в расширяющемся реверсивном магнитном поле уменьшается поле пространственного заряда \vec{E} . Во-вторых, за счёт уменьшения фокусирующего магнитного поля \vec{B} (в 5-10 раз на длине области).

При расчётах эффективности преобразования циклотронной энергии пучка в энергию его поступательного движения использовался ленточный электронный пучок с микропервеансом $p_\mu = 10 \text{ мкА/В}^{3/2}$ ($U_0 = 10 \text{ кВ}$, $I_0 = 10 \text{ А}$).

Расчёт эффективности преобразования проводился в зависимости от параметров C_0 , N_c и W (рис. 3), где W – отношение циклотронной энергии вращения пучка к его продольной энергии при влёте пучка в область реверсивного изменения магнитного поля (расчёт по рис.2 проводился для $W = 1$).

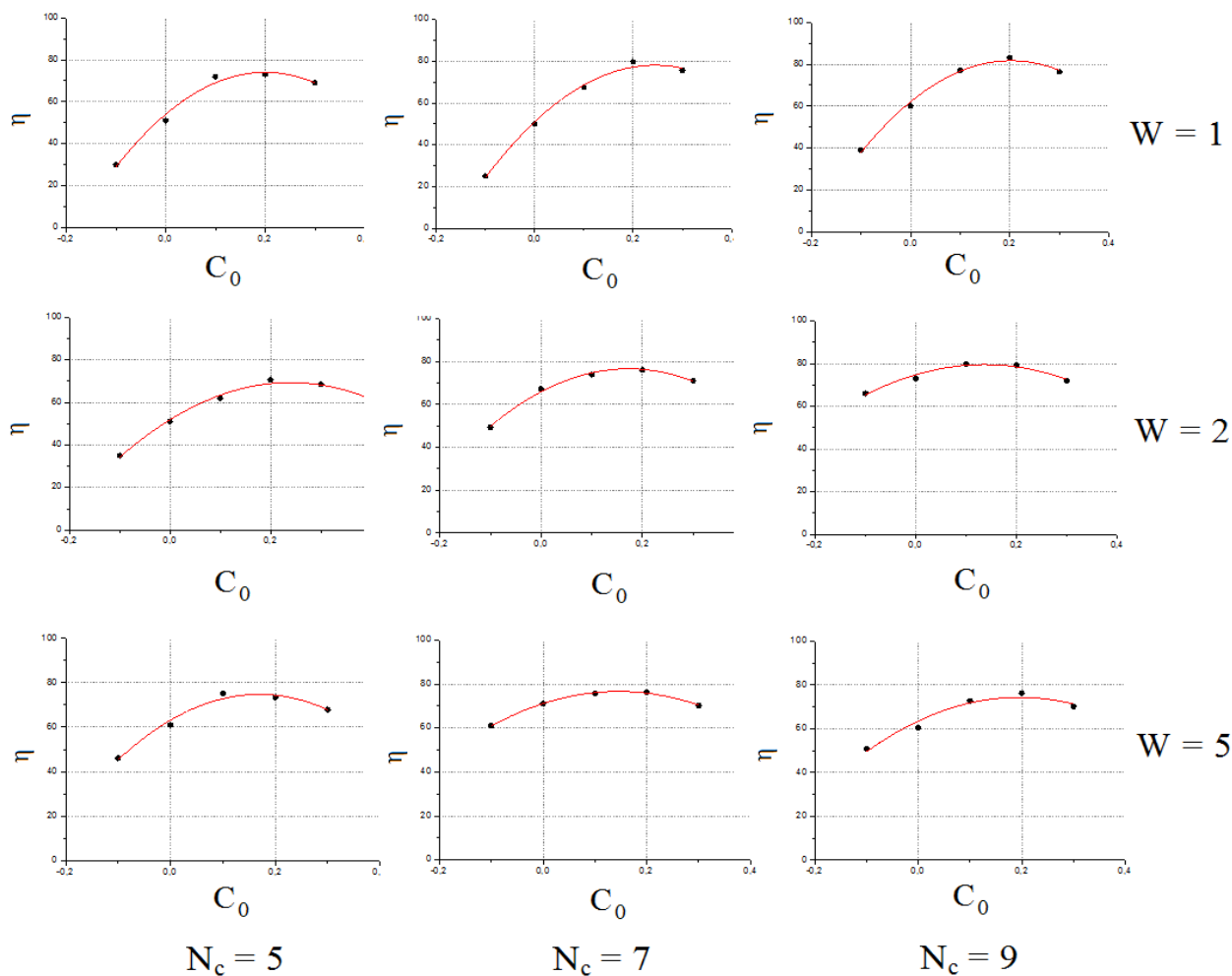


Рис. 3. Эффективность преобразования η энергии циклотронного вращения ленточного пучка в его продольную энергию в зависимости от C_0 , N_c и W .

Согласно рис. 3 области высоких значений η (не менее 65%) соответствуют значения $C_0 = 0,0-0,3$. При данных значениях C_0 при увеличении длины области взаимодействия $L_0 = N_c \lambda_c$ максимум значений η увеличивается (например, для $W = 1$ от 73 до 81 %). Также отметим, что при увеличении W максимум значений η уменьшается (например, для $N_c = 9$ с 81 до 75 %). Однако при больших значениях W может быть преобразовано большее количество циклотронной энергии вращения пучка. Например, для случая $W = 5$, $C_0 = 2$, $N_c = 9$ преобразованная мощность (в непрерывном режиме) может теоретически составить до $P = \eta W U_0 I_0 = 375$ кВт при входной продольной мощности пучка $P_0 = U_0 I_0 = 100$ кВт. В то же время для случая $W = 1$, $C_0 = 2$, $N_c = 9$ преобразованная мощность составит $P = 81$ кВт, для случая $W = 1$, $C_0 = 2$, $N_c = 9$ – $P = 158$ кВт. Вместе с тем, при увеличении W растёт разброс продольных скоростей в пучке, что будет накладывать дополнительные сложности на конструкцию узлов СВЧ-устройств при решении коллекторной задачи.

В завершении отметим ключевые моменты работы. Проведённый траекторный анализ показал возможность транспортировки высокоперевансных (с микропервансом

p_{μ} до 20 мкА/В^{3/2}) ленточных пучков с циклотронным вращением с малыми искажениями поперечного сечения в неоднородных аксиально-симметричных магнитных полях. При этом эффективность преобразования энергии циклотронного вращения пучка в его продольную энергию может достигать величин более 75%. Кроме того, теоретически могут быть преобразованы сотни кВт циклотронной энергии. Полученные результаты важны для разработки практических конструкций поперечно-волновых СВЧ-устройств.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках выполнения работ по научному проекту № 16-32-00826 мол_а.

Библиографический список

1. J. Pasour, E. Wright, K. T. Nguyen, A. Balkcum, F. N. Wood, R. E. Myers, B. Levush. Demonstration of a Multikilowatt, Solenoidally Focused Sheet Beam Amplifier at 94 GHz. // – IEEE Trans. Electron Devices. – 2014. – Vol. 61. – №6. – pp. 1630-1636.
2. D.E. Pershing, K.T. Nguyen, D.K. Abe, E. Wright, P. B. Larsen, J. Pasour, S.J. Cooke, A. Balkcum, F.N. Wood, R. E. Myers, B. Levush. Demonstration of a Wideband 10-kW Ka-Band Sheet Beam TWT Amplifier. // – IEEE Trans. Electron Devices. – 2014. – Vol. 61. – №6. – pp. 1637-1642.
3. В. А. Ванке. Поперечные волны электронного потока в микроволновой электронике // – УФН. – 2005. – Т. 175. – №9. – сс. 957–978.
4. Д. А. Михеев, В. Л. Саввин, А. В. Коннов, Г. М. Казарян, Ю. А. Пирогов. Дискретная математическая модель ленточного электронного пучка в спадающем магнитном поле // – Известия РАН. Серия физическая. – 2016. – Т. 80. – №2. – сс. 243–246.