

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛН ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАРЯДА В ЭЛЕКТРОННОМ ПУЧКЕ В ПРЯМОЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЕ С РЕКУПЕРАЦИЕЙ

*Э. Р. Уразов<sup>а, б, 1</sup>, Е. А. Бехтенов<sup>а</sup>, М. И. Брызгунов<sup>а, б</sup>,  
В. В. Пархомчук<sup>а</sup>, В. Б. Рева<sup>а, б</sup>*

<sup>а</sup> Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, 630090, Россия

<sup>б</sup> Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,  
Новосибирск, 630090, Россия

Распространение волн пространственного заряда влияет как на суммовый сигнал с пикап-электродов, так и на результаты измерения положения пучка. Аксиально-симметричные волны, в соответствии с теоретическими предсказаниями, могут значительно снизить суммовый сигнал и ухудшить точность измерений. Асимметрия в модуляции плотности заряда приводит к поперечному смещению возмущения плотности пространственного заряда, что может вызвать значительные ошибки в измерении положения пучка.

Space charge waves in electron beams affect both the sum signal from pickup electrodes and the beam position measurements. The lowering of the sum signal can drastically decrease the precision of the measurements. If the wave is asymmetric, the space charge modulation can propagate transversally and compromise the accuracy of the position measurements.

PACS: 29.20.–с; 29.27.–а; 52.35.–g

### ВВЕДЕНИЕ

Электронное охлаждение используется в ускорителях тяжелых заряженных частиц для повышения качества пучка и светимости [1]. Для измерения положения ионного и электронного пучков и контроля точности их совмещения используются датчики положения пучка — пикапы.

Пикапы, используемые в системах электронного охлаждения, разработанных в ИЯФ СО РАН, предназначены для измерения положения продольно-неоднородных пучков заряженных частиц. В то время как ионные пучки группируются в сгустки ускоряющей ВЧ-системой, неоднородность электронного пучка обеспечивается подачей модулирующего напряжения на управляющий электрод электронной пушки [2].

---

<sup>1</sup>E-mail: E.R.Urazov@inp.nsk.su

При проведении экспериментов в системе электронного охлаждения бустера NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility) [3] в некоторых режимах работы была обнаружена зависимость показаний пикапа от его местоположения вдоль вакуумной камеры. В работе [3] была выдвинута и проверена гипотеза о том, что обнаруженное поведение суммового сигнала вызвано волнами пространственного заряда в промодулированном электронном пучке. Данная работа посвящена дальнейшему исследованию этих волн.

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Для экспериментальной проверки влияния волн пространственного заряда на показания пикапа было решено воспользоваться уже имеющимся испытательным стендом «пушка–коллектор» (рис. 1).

Установленная на стенде электронная пушка — прототип электронной пушки высоковольтной системы электронного охлаждения коллайдера NICA. Основные компоненты пушки — катод диаметром 1 см, анод и управляющий электрод (сетка).

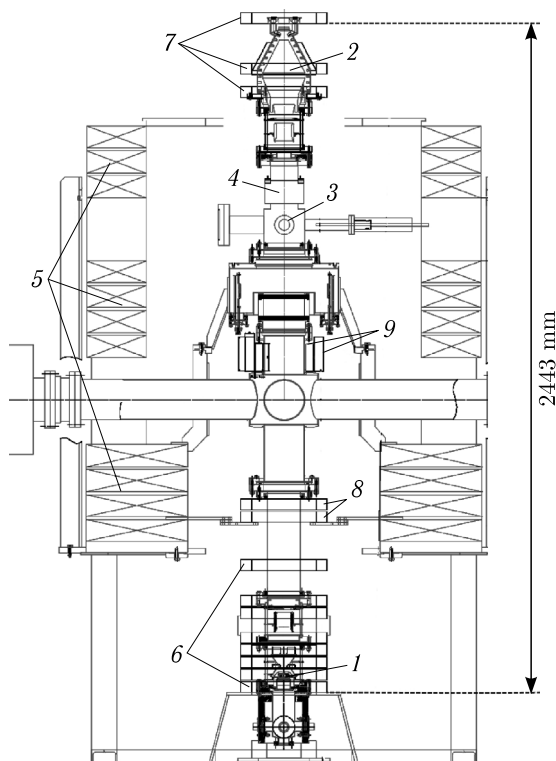


Рис. 1. Схема стенда «пушка–коллектор»: 1 — электронная пушка; 2 — электронный коллектор; 3 — диагностический узел; 4 — датчик положения пучка (пикап); 5 — большие катушки продольного поля; 6, 7 — малые катушки продольного поля; 8 — катушки вращения фазы; 9 — поперечные корректоры

Модуляция продольной плотности заряда электронного пучка проводится путем подачи модулирующего напряжения на сетку электронной пушки, причем сетка разделена на четыре независимых сектора, что позволяет подавать аксиально-асимметричную модуляцию для получения информации о форме электронного пучка и о его дрейфовом вращении.

Для диагностики в данной работе используется пикап, расположенный в диагностическом узле.

## ТЕОРИЯ ВОЛН ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАРЯДА

Рассмотрим однородный электронный пучок с невозмущенной плотностью частиц  $n_0$  радиусом  $a$ , движущийся со скоростью  $u_0$  в вакуумной камере радиусом  $b$  в продольном магнитном поле  $B_0$ . В пучке создается малое гармоническое возмущение частотой  $\omega$ .

Для анализа распространения возмущения в пучке удобно рассмотреть дисперсионное уравнение. Согласно работе [3] для длинных аксиально-симметричных волн оно имеет вид

$$k_{\pm} = \frac{\omega}{u_0 \pm v_p},$$

где  $v_p = (a\omega_p/2)\sqrt{2\ln b/a}$  несет смысл фазовой скорости,  $\omega_p^2 = 4\pi n_0 e^2/m$  — плазменная частота электронов,  $m$  — масса электрона.

Два значения волнового вектора,  $k_+$  и  $k_-$ , говорят о том, что для заданной частоты  $\omega$  в пучке распространяются два типа волн: быстрая ( $k_+$ ) и медленная ( $k_-$ ), они складываются друг с другом. В работе [3] задача об интерференции быстрой и медленной волн была решена для случая одинаковых амплитуд быстрой и медленной волн, однако исследование [4], а также экспериментальные данные этой работы указывают на их различие.

Рассмотрим быструю и медленную волны, распространяющиеся вдоль оси  $OZ$  с циклической частотой  $\omega$  и амплитудами  $(B + \delta)$  и  $B$  соответственно. Результирующая волна  $A$  есть сумма быстрой и медленной волн и описывается уравнением частично стоячей волны

$$A = (B + \delta) \cos(\omega t - k_+ z) + B \cos(\omega t - k_- z)$$

с огибающей

$$\tilde{A} = \sqrt{4(B^2 + B\delta) \cos^2\left(\frac{k_+ - k_-}{2}z\right) + \delta^2}. \quad (1)$$

Для расчетов были приняты следующие значения: радиус пучка  $a = 5$  мм, радиус вакуумной камеры  $b = 6$  см, расстояние от катода до пикапа  $z = 176$  см.

## МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

В данной работе измерения проводились следующим образом: сначала выставлялись потенциалы электродов пушки, затем проводились измерения для частот модуляции в заданном диапазоне (от 1,5 до 4 МГц с шагом 0,1 МГц), на каждом шаге

регистрировались измеренные пикапом положение пучка и суммовой сигнал. Для исключения влияния АЧХ электроники пикапа все результаты измерения суммового сигнала нормировались на результаты измерений относительно высокоэнергетического ( $E = 5$  кэВ) пучка малого тока ( $I = 1\text{--}2$  мА), где влияние волн пренебрежимо мало.

Для экспериментального исследования поперечной динамики волн на секторы сетки подавалась аксиально-асимметричная модуляция. В таком режиме измеренные пикапом координаты пучка показывают характер распространения возмущений в пучке.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

На рис. 2 приведены результаты определения зависимости суммового сигнала  $I_{\text{бpm}}$  на пикапе от частоты модуляции при напряжении катода  $-0,3$  кВ относительно земли в сравнении с теоретически предсказанной зависимостью (1), нормированные на значение при частоте  $f = 1,5$  МГц. При таком напряжении для достаточно больших токов значительный эффект оказывает провисание потенциала вследствие пространственного заряда пучка. Тогда нельзя считать  $E = 0,3$  кэВ, и для построения теоретических кривых подбирались некие эффективные значения энергии пучка так, чтобы как можно лучше описать экспериментальные данные.

Теоретические кривые хорошо описывают экспериментально полученные зависимости, однако подобранные значения энергии, указанные на рис. 2, не соответствуют теоретически рассчитанному по формуле  $\Delta U = 2\pi a^2 n_0 e \ln b/a$  провисанию потенциала на краю пучка. Возможное объяснение этого эффекта состоит в том, что электронный пучок ионизирует остаточный газ в вакуумной камере и положительные

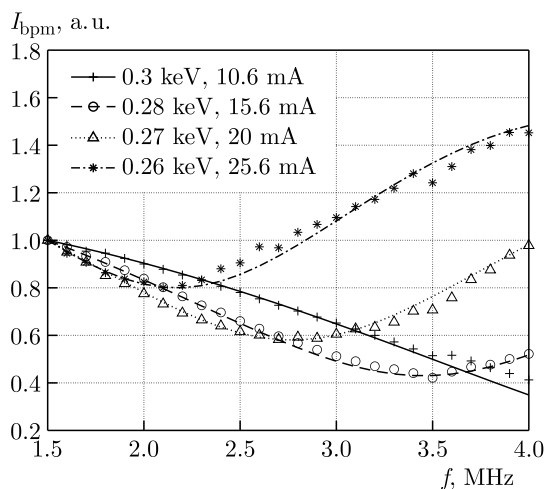


Рис. 2. Зависимость суммового сигнала от частоты модуляции при напряжении катода  $-0,3$  кВ для различных токов, нормированная на значение при  $f = 1,5$  МГц. Точками показаны экспериментальные данные, линиями — теоретические. Указаны подобранные значения энергии и измеренные значения тока пучка

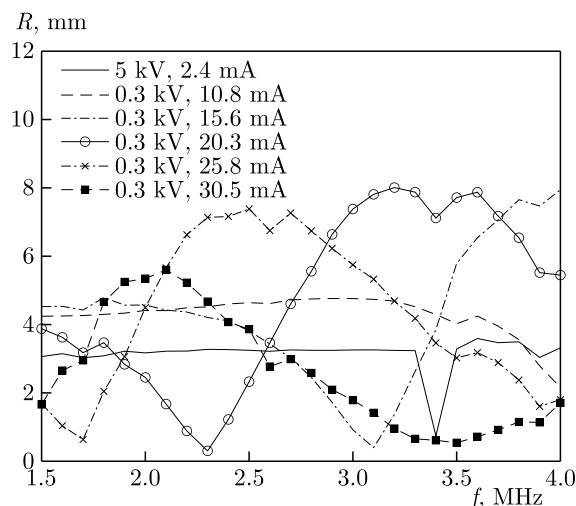


Рис. 3. Зависимость измеренного среднего расстояния до центра пучка от частоты модуляции при разных токах и энергиях пучка

ионы накапливаются в электронном пучке, в связи с чем уменьшается влияние пространственного заряда. В целом учет несовпадения амплитуды быстрой и медленной волн привел к улучшению точности теоретических предсказаний по сравнению с работой [3].

Для исследования поперечной динамики волн пространственного заряда были проведены измерения среднего расстояния до центра пучка  $(x_0, y_0)$  в зависимости от частоты  $R = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$  (рис. 3) при асимметричной модуляции, когда модулирующее напряжение подается только на один сектор.

При измерении при относительно высокой энергии пучка ( $E = 5$  кэВ), когда влияние волн ожидается пренебрежимо малым,  $R$  остается практически постоянным, за исключением резкого скачка на частоте 3,4 МГц, что, скорее всего, связано с пониженной точностью измерений в области локального минимума АЧХ электроники пикапа. Для всех измерений при низкой энергии (около  $E = 0,3$  кэВ), за исключением пучка с током  $I = 30,5$  мА, чем выше ток, тем раньше измеряемое положение приближается к центру пучка, после чего начинает отдаляться от центра. Для измерения с током  $I = 30,5$  мА начальное значение частоты модуляции 1,5 МГц, скорее всего, уже лежит в области нарастания  $R$ , поэтому не видно начального распространения возмущения к центру пучка.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При достаточно больших токах пучков низкой энергии волны плотности пространственного заряда влияют на измерения пикапа. Теоретические предсказания качественно описывают поведение экспериментальных данных, но количественная оценка провисания потенциала оказывается завышенной.

В экспериментах на низкой энергии с напряжением катода  $-0,3$  кВ минимум суммового сигнала не доходит до нуля. Это указывает на асимметрию в распространении прямой и обратной волн. Разница в амплитудах волн увеличивается с повышением тока электронного пучка.

Эксперименты по исследованию поперечной динамики волн показали, что асимметричные волны могут приводить к ошибкам при определении положения пучка, а также к неправильной выставке электронного пучка по углу.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пархомчук В. В., Скринский А. Н. Электронное охлаждение — 35 лет развития // УФН. 2000. Т. 170, № 5. С. 473–493.
2. Bubleу A. *et al.* The Electron Gun with Variable Beam Profile for Optimization of Electron Cooling // Proc. EPAC'02, Paris, 2002. P. 1356–1358.
3. Брызгунов М. И., Пархомчук В. В., Рева В. Б. Волны пространственного заряда в электронном пучке системы электронного охлаждения бустера NICA // Письма в ЭЧАЯ. 2021. Т. 18, № 4(236). С. 379–392.
4. Буров А. В. и др. Экспериментальное исследование компенсированного состояния электронного пучка. Препринт ИЯФ 89-116. Новосибирск, 1989. 83 с.

Получено 28 октября 2024 г.