

УДК 537.533.79: 621.384.6.01
EDN: XZMORO

PACS: 41.85.-p

Компрессия импульса тока сильноточного релятивистского электронного пучка на виртуальном катоде© А. Е. Донец*, В. И. Рогожин, А. А. Раваев, А. Б. Булейко, О. Т. Лоза, Д. А. Адамянц,
И. Р. Муфтахов*АО «ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований»,
Москва, 108840 Россия
*E-mail: donets@triniti.ru**Статья поступила в редакцию 18.11.2025: после доработки 30.11.2025; принята к публикации 27.04.2026*

Аналитически определено значение предельного тока транспортировки сильноточного релятивистского электронного пучка (РЭП) в коаксиальном лайнере с сильным магнитным полем. Потенциал центрального электрода в таком лайнере принят равным потенциалу катода, формирующего пучок. Найдены условия формирования виртуального катода в коаксиальном диоде с магнитной изоляцией с двойным катодом, в котором диаметр внутреннего проводника меняется по длине. Экспериментально продемонстрировано явление временной компрессии тока РЭП. Увеличение амплитуды тока в 1,5–2 раза при сокращении длительности его импульса от 2,5 нс до ~1 нс обусловлено появлением виртуального катода. Намечены пути дальнейшего изучения динамики РЭП, его временных и энергетических параметров, приводящих к формированию виртуального катода и, как следствие, временной компрессии РЭП.

Ключевые слова: взрывоэмиссионный катод, сильноточный электронный пучок, виртуальный катод, наносекундный импульс, магнитное поле.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-2-73-81

Введение

Для генерации сильноточных релятивистских электронных пучков (РЭП) в ускорителях прямого действия при энергии электронов порядка 10^6 эВ и токах пучка $\sim 10^3$ А и более применяют взрывоэмиссионные катоды. Величина тока при этом ограничивается не эмиссионной способностью катода, а потенциалом РЭП, который определяется формой электродов и электронного потока. При фиксированной начальной энергии электронов с ростом тока потенциал электронного потока растет и при определенных условиях вырастет до напряжения катода, а скорость электронов падает практически до нуля. Такое электронное облако с потенциалом катода и

нулевой скоростью частиц получило название виртуального катода (ВК).

Виртуальные катоды, представляющие большой интерес для ускорения ионов, для генерации сильных электромагнитных волн (в частности, виркатор – это генератор микроволнового излучения на основе ВК) и ряда других приложений исследовались в течение многих лет и в разных конструкциях. Для многих целей РЭП формируют в сильном магнитном поле в виде электронного потока трубчатой формы, поэтому значительная часть исследований ВК проводилась именно в такой конфигурации. В настоящей работе мы также ограничимся аксиально-симметричным случаем формирования трубчатого РЭП и его транспортировки в сильном соленоидальном

магнитном поле в вакуумной камере круглого сечения с проводящими стенками – в полый металлической трубе.

В работе [1] было показано, что при фиксированном радиусе r_b тонкостенного трубчатого РЭП, распространяющегося вдоль оси камеры с радиусом R , его ток не может превышать предельного значения I_{lim} :

$$I_{lim} = I_0 \frac{(\Gamma^{2/3} - 1)^{3/2}}{2 \ln \frac{R}{r_b}}. \quad (1)$$

Здесь ток $I_0 = \frac{4\pi\epsilon_0 mc^3}{e} \approx 17 \text{ кА}$, а фак-

тор Γ определяется разностью потенциалов U в диоде ускорителя:

$$\Gamma = 1 + \frac{eU}{mc^2}, \quad (2)$$

где величина $\frac{mc^2}{e} \approx 511 \text{ кВ}$.

Зависящий от скорости v электронов пучка релятивистский фактор $\gamma = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1/2}$

для тока I_{lim} равен $\gamma = \Gamma^{1/3}$. Потенциал электронного потока определяется разностью между полной и кинетической энергией:

$$\Phi = (\Gamma - \gamma) \frac{mc^2}{e} = U - (\gamma - 1) \frac{mc^2}{e}. \quad (3)$$

При попытке инжектировать ток, превышающий значение I_{lim} , электронный пучок переходит в неустойчивое «сжатое» состояние [2], в котором $\gamma < \Gamma^{1/3}$ и которое быстро коллапсирует в сторону $\gamma \rightarrow 1$, превращаясь в ВК. Ток, который идет с ВК, остается в среднем равным I_{lim} [3], но становится нестационарным, а в спектре колебаний преобладают две основные группы частот. Так называемые «пролётные» частоты определяются временем движения электронов, запертых между двумя эквипотенциальными областями: катодом ускорителя и ВК. Вторая группа частот – это ленгмюровские частоты электронного облака

$\omega_{Le} = \sqrt{\frac{4\pi ne^2}{m}}$ с переменной во времени и пространстве концентрацией n .

Наиболее популярный способ создания ВК с помощью РЭП, распространяющегося в сильном магнитном поле, – это инжекция его в камеру с переменным радиусом. Из формулы (1) видно, что с ростом диаметра камеры R величина предельного тока I_{lim} падает. Поэтому РЭП инжектируют в камеру с небольшим радиусом, где его ток не превышает предельного значения. Далее по мере распространения РЭП в однородном магнитном поле камера расширяется так, что величина I_{lim} оказывается ниже значения тока, и тогда в области перехода от меньшего радиуса к большему формируется ВК.

Описанная конфигурация не является единственно возможной для создания ВК. Наши предварительные расчеты [4] показали, что при определенной конфигурации электродов и длительности импульса РЭП до нескольких наносекунд образующийся ВК сначала тормозит процесс прохождения через него электронов, а затем быстро сбрасывает накопленный заряд. Тем самым длительность импульса тока РЭП уменьшается, а его амплитуда увеличивается.

Целью настоящей работы была экспериментальная демонстрация явления увеличения тока наносекундного релятивистского электронного пучка при сокращении длительности импульса РЭП, что можно назвать компрессией импульса тока электронного пучка или, более коротко – временной компрессией электронного пучка. В настоящей работе проведены экспериментальные исследования транспортировки РЭП, формируемого в сильном магнитном поле, через область ВК в предложенной ранее конфигурации [4], а также аналитические оценки необходимых для этого условий. Конфигурация [4] позволяет легко реализовать в эксперименте варьирование предельного тока транспортировки I_{lim} при постоянстве параметров формируемого на катоде РЭП, а также расположения ВК в одном и том же сечении лайнера при постоянстве конфигурации его внешних стенок.

Аналитические расчеты

Способ формирования РЭП и образования виртуального катода показан на рис. 1. Вся конструкция обладает аксиальной симметрией и помещена в сильное однородное магнитное поле. На рис. 1 в цилиндрической камере **1** с радиусом R размещен катод **2** с бесконечной эмиссионной способностью на его эмитирующей кромке с радиусом r_c . На катоде с помощью стержня-держателя **3** с радиусом r_s закреплен цилиндр **4** с радиусом r . Труба **1**, играющая роль анода, заземлена, а катод **2**, стержень **3** и цилиндр **4** представляют собой единую проводящую конструкцию, находящуюся под одним отрицательным потенциалом U . В сильном однородном магнитном поле радиус трубчатого релятивистского электронного пучка **5** совпадает с радиусом кромки катода: $r_b = r_c$.

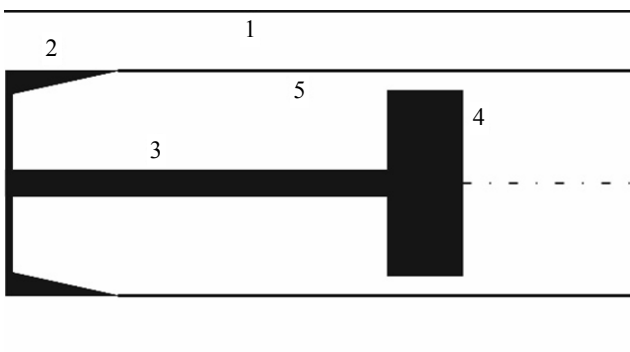


Рис. 1. Диод с виртуальным катодом:
1 – цилиндрическая камера (анод), **2** – кромка взрывоэмиссионного катода, **3** – стержень, **4** – цилиндр, **5** – траектория РЭП

В работе [5] был рассчитан ток внешнего катода, формируемый в коаксиальном диоде с магнитной изоляцией с двойным катодом, которому на рис. 1 соответствуют электроды **2** и **3**. Значение тока с катода **2** в присутствии эквипотенциального ему длинного проводящего стержня **3**, но без учета цилиндра **4** равно

$$I_N = \frac{I_0}{2 \ln \frac{R}{r_s}} \left[\frac{\Gamma - \gamma}{1 - \varkappa} - \frac{\gamma - 1}{\varkappa} \right] \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma^2}}, \quad (4)$$

где $\gamma = \frac{3}{2} \sqrt{1 + \frac{8}{9} \varkappa (\Gamma - 1)} - \frac{1}{2}$, $0 < \varkappa = \frac{\ln \left(\frac{r_b}{r_s} \right)}{\ln \left(\frac{R}{r_s} \right)} < 1$,

индекс N указывает на первого автора статьи [5], а потенциал пучка определяется по формуле (3).

При $r_s \rightarrow 0$ ($\varkappa \rightarrow 1$) значения тока электронного пучка по формуле (4) и фактора γ , определяющего потенциал Φ по формуле (3), принимают соответствующие значения федосовского тока I_F [6], и фактора γ трубчатого РЭП, формируемого коаксиальным диодом с магнитной изоляцией в полом волноводе круглого сечения:

$$I_F = I_0 \frac{1}{2 \ln \frac{R}{r_b}} \frac{(\Gamma - \gamma) \sqrt{\gamma^2 - 1}}{\gamma},$$

где $\gamma = \sqrt{\frac{1}{4} + 2\Gamma} - \frac{1}{2}$. (5)

Цилиндр **4** на рис. 1 с радиусом $r > r_s$ и потенциалом U может стать причиной образования виртуального катода. Ток трубчатого РЭП за виртуальным катодом равен предельному току транспортировки электронного пучка [3]. Поэтому виртуальный катод образуется, если ток с катода при наличии стержня с радиусом r_s превышает предельный ток транспортировки электронного пучка в области расположения цилиндра **4**. Расчет тока бесконечно тонкого трубчатого РЭП в бесконечно сильном магнитном поле в указанных условиях не представляет трудностей в предположении, что продольные размеры системы существенно превышают поперечные.

Повторяя процедуры, аналогичные проделанным в работах [1, 5, 6], можно получить зависимость предельного тока транспортировки трубчатого тонкостенного электронного пучка в показанной на рис. 1 коаксиальной конфигурации от параметра γ :

$$I_{coax} = \frac{I_0}{2} \left[\frac{\Gamma - \gamma}{\ln \frac{R}{r_b}} - \frac{\gamma - 1}{\ln \frac{r_b}{r}} \right] \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma^2}}. \quad (6)$$

Максимум этой функции, то есть предельный ток транспортировки, достигается при:

$$\frac{dI_{coax}}{d\gamma} = 0, \quad \gamma = \sqrt[3]{\frac{\ln \frac{R}{r_b} + \Gamma \ln \frac{r_b}{r}}{\ln \frac{R}{r_b} + \ln \frac{r_b}{r}}}. \quad (7)$$

При $r \rightarrow 0$ величина $\gamma \rightarrow \Gamma^{1/3}$, а ток по формуле (1) принимает значение предельного тока [1] транспортировки трубчатого РЭП в полем волноводе круглого сечения: I_{lim} .

На рис. 2 показаны две зависимости токов от радиусов. Обращаем внимание, что по оси абсцисс отложены значения радиусов разных электродов, но такое сравнение помогает лучше понять особенности процесса. Верхняя кривая 1 по формулам (6, 7) показывает зависимость предельного тока I_{coax} транспортировки РЭП от радиуса цилиндра r . В данном случае $R = 24$ мм, $r_b = 10$ мм и параметр $\Gamma = 1,5$. При $r = 0$, то есть в отсутствие цилиндра, ток равен предельному току [1] в полем волноводе: $I_{coax} = I_{lim}$.

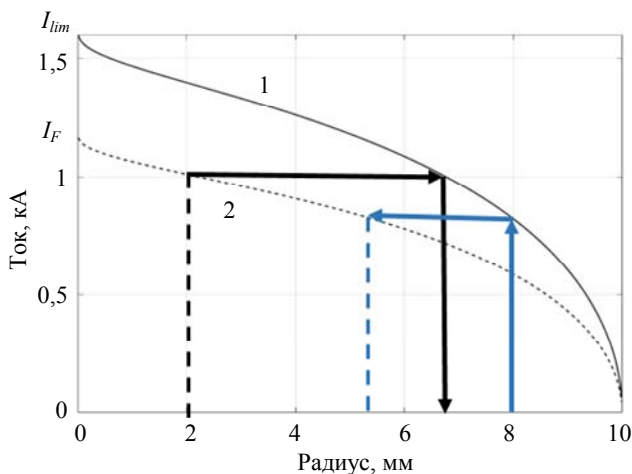


Рис. 2. Зависимости: 1 – предельного тока транспортировки РЭП в коаксиальной конфигурации $I_{coax}(r)$ по формуле (6); 2 – тока внешнего электрода двойного катода $I_N(r_s)$ по формуле (4)

Нижняя кривая 2 по формуле (4) иллюстрирует зависимость нечаевского тока I_N [5] с внешнего электрода двойного катода 2 на рис. 1 от радиуса стержня r_s . Применительно к рис. 1 это ток с катода 2 в зависимости от радиуса r_s стержня 3 при отсутствии цилиндра 4. При $r_s = 0$, то есть в отсутствие внутреннего электрода (стержня), этот ток (5) совпадает с федосовским током [6] с катода в полем волноводе: $I_N(r_s = 0) = I_F$. В обеих зависимостях $I_{coax}(r)$ и $I_N(r_s)$, при приближении радиусов внутренних электродов r и r_s к радиусам катода и электронного пучка ($r_c = r_b$) токи формируемого пучка I_N и транспортируемого пучка I_{coax} обращаются в нуль.

В зависимости $I_{coax}(r)$ по формуле (6) никак не участвует параметр r_s и, наоборот, в $I_N(r_s)$ по формуле (3) отсутствует зависимость тока от радиуса r , что дает возможность сравнивать эти зависимости на рис. 2, а также оптимизировать эксперимент по созданию ВК. Фиксируя размер цилиндра r , можно подбирать необходимый радиус стержня r_s , и наоборот. Примеры такого выбора показаны на рис. 2 стрелками. Кривая 2 показывает, что при радиусе стержня $r_s = 2$ мм ток с катода равен 1 кА. Горизонтальная линия от нее вправо и вертикальная линия от точки ее пересечения с кривой 1 обозначает радиус цилиндра $r \approx 6,7$ мм, при превышении которого транспортируемый ток становится меньше тока с катода. Иначе говоря, ВК образуется при $r_s = 2$ мм и $r > 6,7$ мм, то есть при расстоянии от РЭП до цилиндра $r_b - r < 3,3$ мм. В обратном случае вертикальная линия от $r = 8$ мм до пересечения с кривой 1 показывает, что цилиндр такого радиуса не пропускает ток свыше 0,8 кА. Горизонтальная линия от этой точки к кривой 2 определяет максимальный радиус стержня для образования ВК при фиксированных размерах цилиндра: при $r = 8$ мм, то есть при $r_b - r = 2$ мм, радиус стержня $r_s < 5,3$ мм.

Описанная схема создания ВК предоставляет более простые способы изменения параметров эксперимента (изменения стержня и цилиндра) по сравнению с традиционной конфигурацией РЭП в трубе с расширяющи-

мися стенками. Однако, как будет показано ниже, можно оптимизировать параметры ВК вообще в течение одной серии экспериментов без замены деталей и даже их положения.

Экспериментальная установка

На рис. 3 показана схема использованной в работе аксиально-симметричной экспериментальной установки по исследованию ВК.

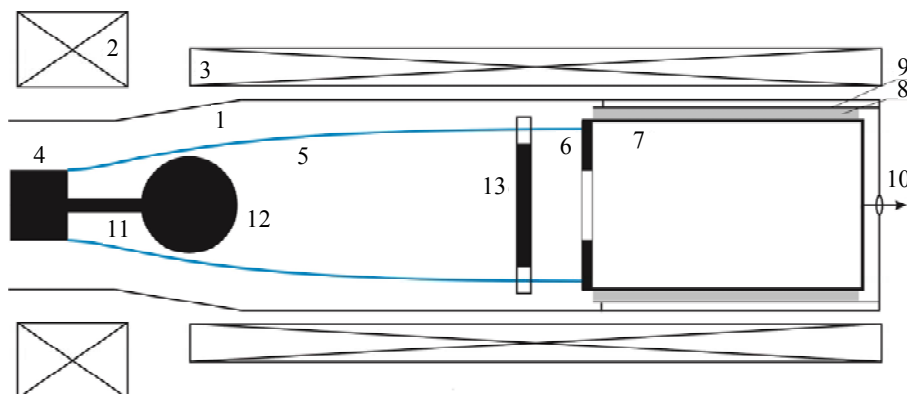


Рис. 3. Экспериментальная установка для исследования ВК: 1 – вакуумная камера; 2 – катушка; 3 – соленоид; 4 – катод; 5 – РЭП; 6 – коллектор; 7 – внутренний металлический цилиндр измерителя тока; 8 – диэлектрик; 9 – внешний металлический цилиндр измерителя тока; 10 – коаксиальный вакуумно-плотный разъем; 11 – стержень с резьбой; 12 – шарообразный электрод; 13 – щелевая диафрагма

Вакуумная камера 1 с системой вакуумной откачки обеспечивает давление не выше 0,1 Па. Катушка 2 и соленоид 3 с независимыми источниками питания создают квазистационарное магнитное поле: катушка – до 3,5 Тл, соленоид – до 1 Тл. В области сильного магнитного поля катушки 2 расположен взрывоэмиссионный катод графитовый 4 диаметром 20 мм, а камера 1 около катода имеет диаметр 48 мм. На катод приходит импульс отрицательного потенциала от генератора высоковольтных импульсов «Радан-303» [7] с дополнительным блоком формирования импульсов. Импульсы генератора после формирования имеют длительность фронта 0,3 нс и плато в течение 2 нс с амплитудой 250 кВ при общей длительности 2,5 нс на полувысоте (см. Рис. 4). Калиброванный емкостной делитель (на рисунке не показан), измеряющий импульсное напряжение, расположен в заполненной маслом передающей коаксиальной линии с импедансом 50 Ом на расстоянии около ~ 60 см от катода.

Цилиндрический электронный пучок 5 распространяется вдоль линий магнитного поля из области катушки 2 в область соленоида 3, плавно увеличиваясь в диаметре от 20 до

~ 34 мм. Характерная длина области изменения магнитного поля составляет ~ 15 см. Вакуумная камера 1 также имеет переменный диаметр, меняющийся в соответствии с линиями магнитного поля и равный 60 мм в области соленоида 3. Электронный пучок 5 оседает на коллекторе 6, который одновременно является частью описанного ниже измерителя тока сильноточных РЭП пикосекундной длительности [8].

На катоде 4 закреплен стержень 11 диаметром 5 мм с резьбой, на который навинчивается электрод 12. Этот электрод имеет форму шара диаметром 30 мм, в отличие от функционально аналогичного ему цилиндрического электрода 4 на рис. 1. Шарообразная форма электрода, находящегося под потенциалом катода, и его полированная поверхность предотвращают электронную эмиссию с него в течение импульса с длительностью ~ 2 нс.

Из рис. 2 ясно, что возникновение ВК в нашем случае фактически определяется расстоянием от траектории РЭП до эквипотенциального катода шара 12. Грубая регулировка этого расстояния в эксперименте осуществляется изменением положения шара вдоль стержня 11. При изменении радиусов траектории РЭП при переходе из области сильного

в область слабого магнитного поля на 7 мм на характерной длине 15 см нетрудно осуществить такую регулировку с точностью не более 1 мм. Кроме того, независимые системы питания катушки **2** и соленоида **3** предоставляют дополнительные возможности для управления радиусом РЭП. Если положение шара **12** и ток пучка в соленоиде **3** фиксированы, то ослабление поля катушки **2**, то есть магнитного поля на катоде, приводит к уменьшению расстояния от электронных траекторий до шара. Более того, эту оптимизацию расстояния можно осуществить при разных положениях шара (и связанном с ним положении ВК) вдоль оси, существенно изменяя дистанцию от него до катода.

Выбор способа измерения тока определила малая длительность импульса РЭП, делающая проблематичной использование традиционных шунтов и поясов Роговского. Показанный справа на рис. 3 измеритель тока [8] представляет собой длинный коаксиальный волновод и состоит из внутреннего **7** и внешнего **9** металлических цилиндров, разделенных диэлектриком **8**. Внешний электрод волновода заземлен на камеру **1**, внутренний электрод со стороны РЭП соединен с коллектором **6**, а с противоположной стороны с центральным проводником коаксиального вакуумно-плотного разъема типа SMA **10**. Ток РЭП с амплитудой ~ 1 кА индуцирует на измерительной линии с входным импедансом $\sim 1,5$ Ом напряжение около 1,5 кВ. Для передачи сигнала через коаксиальные разъемы SMA и аттенюаторы без угрозы пробоя измеряемый ток и результирующее напряжение на линии заранее уменьшались более, чем на порядок, для чего пучок **5** проходил на коллектор **6** через щелевую диафрагму **13**. Длина измерителя тока 40 см позволяла уверенно регистрировать сигналы до появления переотражений в линии через ~ 4 нс. Регистрация сигналов потенциала на катоде и токов осуществлялась с помощью осциллографа с частотой дискретизации 50 Гвыб/с и рабочей полосой частот 10 ГГц.

Результаты эксперимента и обсуждение

На рис. 4 показаны осциллограммы потенциала катода (*a*) и токи: (*б*) – в класси-

ческой схеме без ВК, (*в*) – при формировании ВК. Предварительная точная синхронизация импульсов потенциала и токов была затруднена не только из-за большого расстояния между датчиками ~ 1 м. На этом пути скорость сигнала определялась скоростями распространения волны в передающей коаксиальной линии ускорителя и измерительной коаксиальной линии, а также скоростью электронов формируемого пучка, которая менялась постепенно от нуля до максимальной. Однако сигналы токов – рис. 4 (*б*) и (*в*) – получены с одного датчика, поэтому об их взаимной задержке можно судить уверенно.

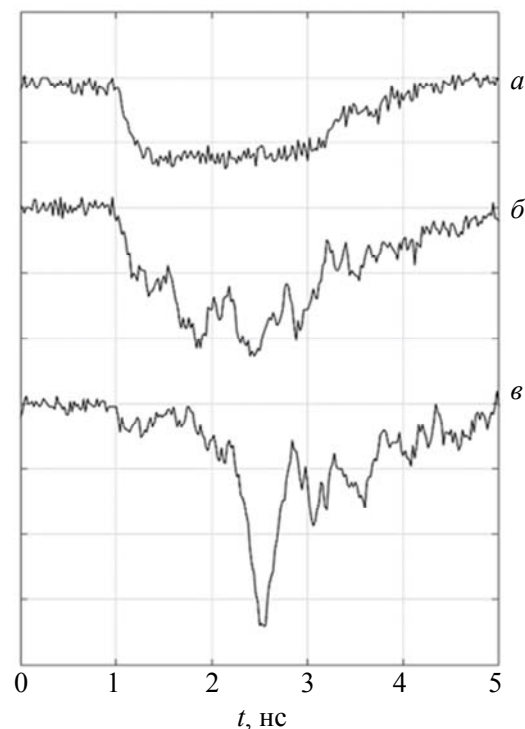


Рис. 4. Осциллограммы: а – потенциал катода; б – ток РЭП при отсутствии стержня и шарообразного электрода на катоде; в – ток РЭП после ВК

В отсутствие на катоде стержня и шарообразного электрода, то есть при формировании РЭП в классическом коаксиальном диоде с магнитной изоляцией [6], импульсы напряжения (Рис. 4а) и тока (Рис. 4б) совпадают по длительности и равны приблизительно 2 нс от начала фронта до начала спада импульсов. Схожесть формы этих импульсов после 2 нс – резкий спад примерно до половины амплитуды в течение $\sim 0,4$ нс и более плавный спад после этого позволяет предположить, что им-

пульсы напряжения и тока начинаются одновременно с точностью до 0,2 нс.

Осцилляции тока с периодом 0,6 нс, видимые на осциллограммах, могут иметь, как минимум, две причины происхождения. Во-первых, они могут быть следствием работы взрывоэмиссионного катода на начальной стадии развития эмиссии электронов с рождающихся и исчезающих катодных микрофакелов. Во-вторых, причиной может быть использование щелевой диафрагмы, ограничивающей полный ток РЭП. Известно, что в замагниченных трубчатых РЭП развивается конвективная диокотронная неустойчивость [9], которая на нелинейной стадии развития проявляется в виде филаментации пучка. Число филаментов (нитей) тем больше, чем тоньше трубка тока. В условиях описываемого эксперимента при толщине стенки РЭП до 1 мм после прохождения расстояния $\sim 0,5$ м от катода до измерителя тока число филаментов составляло несколько десятков: «автограф» на мишени отчетливо демонстрировал неоднородности тока с шагом ~ 1 мм по периметру. Несколько таких токовых филаментов проходило через щелевую диафрагму. В скрещенных полях – аксиальном магнитном поле и радиальном электростатическом поле заряда электронного потока – нити тока имеют форму спиралей, угол закрутки которых линейно зависит от тока РЭП. При небольших флуктуациях тока с катода через щелевые диафрагмы проходит разное число токовых нитей, поэтому регистрируемый ток после диафрагмы меняется намного сильнее. Эту картину ранее наблюдали авторы [8], поэтому для регистрации полного тока РЭП без щелевых диафрагм применяли более сложные методы ослабления электрического сигнала с измерителя тока непосредственно в вакуумной камере.

При сближении траектории распространения электронов пучка **5** и электрода **12** на определенное расстояние формировался ВК. Сигнал с датчика тока (Рис. 4в) начинался с задержкой более 1 нс по сравнению со случаем отсутствия ВК, но его амплитуда в $\sim 1,5$ раза превышала показанную на Рис. 4б без ВК. Примерно такой же эффект наблюдали в расчетах с помощью программного кода CST [4] в конфигурации диода с однородным магнитным полем, как на рис. 1, но с электродом шарообразной формы, как на рис. 3.

Можно предположить следующую последовательность событий. Вначале потенциал шарообразного электрода задерживает на определенное время прохождение электронов РЭП, и происходит накопление объемного заряда в пространстве между катодом и шаром. При запираии тока потенциал катода увеличивается до более высоких значений, чем в отсутствие электрода (12), поскольку сигнал с передающей линии ускорителя с импедансом 45 Ом встречает нагрузку с большим импедансом. В определенной степени такое простое объяснение согласуется с результатами численного моделирования рассматриваемого процесса [4].

Заключение

Целью настоящей работы была экспериментальная демонстрация явления увеличения тока наносекундного релятивистского электронного пучка при сокращении длительности импульса РЭП, что можно назвать временной компрессией электронного пучка. Конструкция реализует в эксперименте варьирование предельного тока транспортировки I_{lim} при постоянстве параметров формируемого на катоде РЭП, что немаловажно, и что отличает работу от предшествующих – ВК образуется или не образуется в одном и том же сечении лайнера при постоянстве конфигурации его внешних стенок и соленоидов, создающих магнитное поле. Кроме того, предложены способы грубой и тонкой регулировки для подбора параметров образования ВК. Грубая настройка осуществлялась передвижением центрального электрода с помощью резьбового соединения при развакуумации установки, а тонкая подстройка – при небольшом изменении профиля магнитного поля путем изменения тока в одном из двух соленоидов в течение одной серии экспериментов.

Обоснование и последовательное объяснение физических процессов, происходящих в диоде с описанной конфигурацией электродов, требует дополнительных экспериментов и 3D численного моделирования. В частности, во-первых, необходимо получение более достоверных экспериментальных результатов, в которых будет исключено влияние щелевой диафрагмы (и диокотронной неустойчивости

РЭП) на результаты измерений полного тока пучка. Во-вторых, необходимо численное моделирование процессов в диоде с параметрами, не только повторяющими условия проводимого эксперимента, но и при использовании преимуществ численного эксперимента, не ограниченного рамками возможной непосредственной реализации.

Работа выполнена в рамках государственного контракта № Н.4к.241.09.25.1066 от 20.05.2025.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богданкевич Л. С., Рухадзе А. А. / УФН. 1971. Т. 103. № 4. С. 609–640.
2. Ignatov A. M., Tarakanov V. P. / Phys. Plasmas. 1994. Vol. 1. № 3. P. 741–744.

3. Беломытцев С. Я., Гришков А. А., Кицанов С. А., Коровин С. Д., Полевин С. Д., Рыжов В. В. / Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. № 2. С. 22–26.

4. Донец А. Е., Рогожин В. И., Раваев А. А. / Всероссийская молодежная конференция по управляемому термоядерному синтезу, плазменным технологиям и высокотехнологичной медицине ВМКТ-2925. – Москва, г. Троицк. 2025. С. 161–162. ISBN 978-5-521-24626-7. https://www.triniti.ru/upload/pdf/vmkt_theses_web.pdf

5. Нечаев В. И., Солуянов Е. И., Фукс М. И. / Письма в ЖТФ. 1979. Т. 5. № 2. С. 113–117.

6. Федосов А. И., Литвинов Е. А., Беломытцев С. Я., Бугаев С. П. / Известия вузов СССР. Сер. Физика. 1977. № 10. С. 124–135.

7. Шпак В. Г., Шунайлов С. А., Яландин М. И., Дядьков А. Н. / ПТЭ. 1993. № 1. С. 149.

8. Месяц Г. А., Яландин М. И., Реутова А. Г., Шарыпов К. А., Шпак В. Г., Шунайлов С. А. / Физика плазмы. 2012. Т. 38. № 1. С. 34–51.

9. Еремеев А. И., Кабанов В. С., Стрелков П. С., Федотов А. В., Шкварунец А. Г. / Физика плазмы. 1988. Т. 14. № 8. С. 958–964.

PACS: 41.85.-p

Pulse current compression of high-current relativistic electron beam on a virtual cathode

A. E. Donets*, V. I. Rogozhin, A. A. Ravaev, A. B. Buleyko, O. T. Loza, D. A. Adamyants, and I. R. Muftakhov

Joint Stock Company State Research Center of the Russian Federation Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research (JSC SRC RF TRINITI), Moscow, Troitsk, 108840 Russia

*E-mail: donets@triniti.ru

Received 18.11.2025; revised 30.11.2025; accepted 27.04.2026

The limit transport current of a high-current relativistic electron beam (REB) in a strong magnetic field in a coaxial liner with the potential of the central electrode equal to the potential of the cathode forming the REB has been analytically calculated. The conditions for the virtual cathode formation in a coaxial diode with magnetic isolation and a double cathode, in which the diameter of the inner conductor changes along its length, have been found. The phenomenon of temporal compression of the REB current has been experimentally demonstrated. The current amplitude increase by 1.5–2 times with pulse duration decrease from 2.5 ns to ~1 ns is due to the appearance of the virtual cathode. The directions for further study of the REB dynamics, its temporal and energy parameters contributing to the virtual cathode formation and, as a result, temporal compression of the REB, have been outlined.

Keywords: Explosive emission cathode, high-current electron beam, virtual cathode, nanosecond pulse, magnetic field.

REFERENCES

1. Bogdankevich L. S. and Rukhadze A. A., *Sov. Phys. Usp.* **14**, 163–179 (1971).
2. Ignatov A. M. and Tarakanov V. P., *Phys. Plasmas*. **1** (3), 741–744 (1994).
3. Belomytsev S. Ya., Grishkov A. A., Kitsanov S. A., Korovin S. D., Polevin S. D., and Ryzhov V. V., *Technical Physics Letters* **31** (1), 55–57 (2005). <https://doi.org/10.1134/1.1859500>
4. Donecz A. E., Rogozhin V. I., and Ravaev A. A. *Vserossijskaya molodezhnaya konferenciya po upravlyаемому termoyadernomu sintezu, plazmennym texnologiyam i vy`sokotexnologichnoj medicine VMKT-2925*. Moscow, g. Troiczsk, 2025. pp. 161–162. ISBN 978-5-521-24626-7. https://www.triniti.ru/upload/pdf/vmkt_theses_web.pdf
5. Nechaev V. I., Soluyanov E. I., and Fuks M. I., *Pis'ma v ZhTF* **5** (2), 113–117 (1979).
6. Fedosov A. I., Litvinov E. A., Belomytsev S. Y. et al., *Soviet Physics Journal* **20**, 1367–1368 (1977). <https://doi.org/10.1007/BF00898924>
7. Shpak V. G., Shunailov S. A., Yalandin M. I., and Dyadkov A. N., *Instruments and Experimental Techniques* **36** (1), 106–111 (1993).
8. Mesyats G. A., Yalandin M. I., Reutova A. G., Sharypov K. A., Shpak V. G., and Shunailov S. A., *Plasma Physics Reports* **38** (1), 29–45 (2012).
9. Eremeev A. I., Kabanov V. S., Strelkov P. S., Fedotov A. V., and Shkvarunets A. G., *Sov. J. Plasma Phys.* **14** (8), 958–964 (1988).

Об авторах

Донец Александра Евгеньевна, младший научный сотрудник, АО «ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований» (108840, Москва, г. Троицк, ул. Пушкиных, вл. 12). E-mail: donets@triniti.ru, SPIN-код: 7676-9276

Рогожин Василий Ильич, младший научный сотрудник, АО «ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований» (108840, Москва, г. Троицк, ул. Пушкиных, вл. 12). E-mail: rogozhin@triniti.ru

Раваев Александр Александрович, ведущий научный сотрудник, АО «ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований» (108840, Москва, г. Троицк, ул. Пушкиных, вл. 12). E-mail: aravaev@mrtiran.ru SPIN-код: 9461-0294, AuthorID: 123902

Булейко Алла Борисовна, начальник лаборатории, АО «ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований» (108840, Москва, г. Троицк, ул. Пушкиных, вл. 12). E-mail: buleyko@triniti.ru SPIN-код: 5470-6692, AuthorID: 1092022

Лоза Олег Тимофеевич, научный консультант, АО «ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований» (108840, Москва, г. Троицк, ул. Пушкиных, вл. 12). E-mail: OTLoza@triniti.ru SPIN-код: 3536-2581, AuthorID: 25260

Адамянц Диана Ануаровна, стажер, АО «ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований» (108840, Москва, г. Троицк, ул. Пушкиных, вл. 12). E-mail: daadamyants@triniti.ru

Муфтахов Ильяс Рашидович, стажер, АО «ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований» (108840, Москва, г. Троицк, ул. Пушкиных, вл. 12). E-mail: irmuftakhov@triniti.ru