УДК 539.1.076

ИСТОЧНИК РЕЛЯТИВИСТСКИХ ВИХРЕВЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ

А.С. Дятлов[1, 2], В.В. Кобец[2], М.В. Максимов[1], М.А. Ноздрин[2], К. Попов[2, 3], К.Е. Юненко[2], Д.В. Карловец[1, 4]

[1]Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация;
[2]Объединенный институт ядерных исследований,
Московская область, Дубна, 141980, Российская Федерация;
[3]Институт ядерной физики, 050032, Алматы, Казахстан;
[4]НИЦ «Курчатовский Институт» - ПИЯФ,
Ленинградская область, Гатчина, 188300, Российская Федерация
e-mail: aleksandr.dyatlov@metalab.ifmo.ru

Аннотация

В работе рассматривается генерация релятивистских вихревых электронных пучков на базе высокочастотного фотоинжектора. Описана концепция передачи орбитального углового момента и результаты моделирования динамики пучка. Представлен статус пусконаладки испытательного стенда ВЧ-фотоинжектора в ОИЯИ. Приведены результаты «холодных» измерений резонатора и первых экспериментов по получению токов фотоэмиссии.

Ключевые слова: вихревые электронные пучки, орбитальный угловой момент, ВЧ-фотоинжектор, фотоэмиссия, линейный ускоритель, динамика пучка.

Введение

Закрученные (вихревые) электронные пучки представляют собой квантовые состояния, обладающие квантованным орбитальным угловым моментом (ОУМ) [1]. Их получение при релятивистских энергиях остается нерешенной задачей, поскольку до сих пор экспериментальные реализации ограничивались электронными микроскопами с энергиями в несколько сотен кэВ [2, 3]. Подобные пучки вызывают растущий интерес в физике ускорителей, так как электроны с ненулевым ОУМ могут служить дополнительным инструментом для исследования структуры нуклона и спиновых явлений в экспериментах по рассеянию [4, 5]. В данной работе рассматривается концепция генерации таких пучков и статус создания соответствующей экспериментальной базы.

1. Концепция генерации вихревых пучков

В рамках исследования рассматривается генерация закрученных пучков МэВ-ного диапазона с использованием классического высокочастотного (ВЧ) фотоинжектора. Подход предполагает передачу ОУМ от структурированного лазерного излучения к фотоэлектронам непосредственно в момент эмиссии на катоде. [6, 7] За этим следует быстрое ускорение частиц в стандартной ВЧ-пушке на коротком расстоянии.

Данный метод обеспечивает контролируемый рабочий режим с малым зарядом сгустка (субпикокулонного уровня), что существенно снижает влияние эффектов

пространственного заряда. В ходе работы было проведено моделирование классической динамики такого пучка и выполнено теоретическое исследование эволюции электронного волнового пакета Лагерра-Гаусса в реалистичных ускоряющих ВЧ-полях.

2. Тестовый стенд ВЧ-фотоинжектора

Для практической реализации описанной концепции, а также для оценки перспектив модернизации системы инжекции линейного ускорителя электронов ЛЯП ОИЯИ, ведется монтаж и пусконаладка испытательного стенда ВЧ-фотоинжектора. Установка базируется на 1.5-ячеечной ВЧ-фотопушке, произведенной в ИЯФ СО РАН [8], и системе ультрафиолетового драйв-лазера, разработанной ИПФ РАН [9]. Основная цель стенда на текущем этапе – отработка режимов генерации стабильных электронных сгустков, что является необходимым условием для перехода к экспериментам с вихревыми пучками.

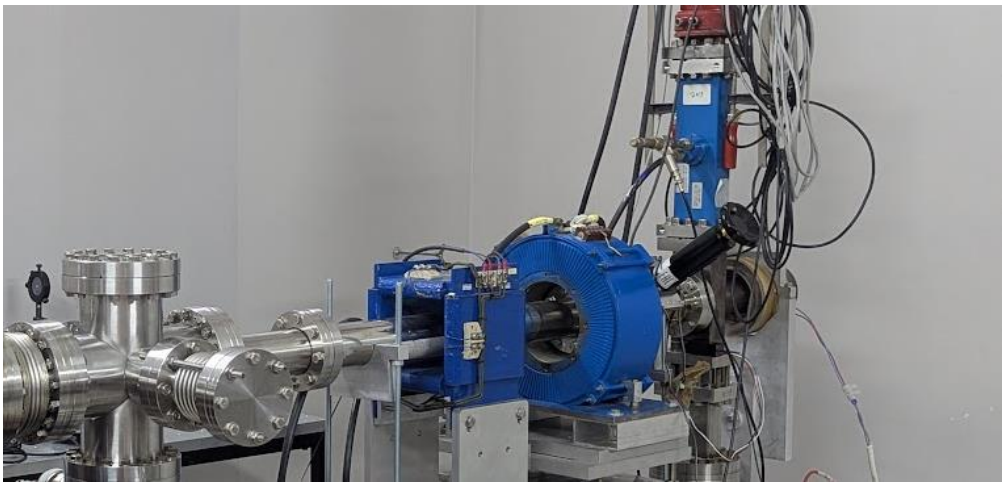


Рисунок 1 – Тестовый стенд ВЧ-фотоинжектора

3. Генерация вихревых пучков света ультрафиолетового диапазона

Ключевым условием для получения релятивистских закрученных электронов посредством фотоэмиссии является наличие ультрафиолетового лазерного излучения с хорошо контролируемым орбитальным угловым моментом. В рамках исследования была успешно продемонстрирована генерация вихревых пучков фотонов на длине волны 262 нм с ОУМ до $\ell = 64\hbar$. Для этого в оптическую систему драйв-лазера ВЧ-фотоинжектора были интегрированы изготовленные дифракционные оптические элементы четырех типов: амплитудная и фазовая спиральные зонные решетки, отражательная вилочная решетка, спиральная фазовая пластинка (СФП) и бинарные аксиконы.

Установлено, что СФП формирует моду Лагерра-Гаусса высокой чистоты с эффективностью преобразования около 80 %. Вилочные решетки обеспечивают удобный доступ к состояниям с более низкими порядками ОУМ и надежную модовую диагностику. Бинарные аксиконы, в свою очередь, генерируют слаборасходящиеся квазибесселевы пучки, выступающие как суперпозиция нескольких состояний с конечной шириной спектра ОУМ. Контроль орбитального углового момента и

структуры полученных пучков осуществлялся с помощью конверсии мод на цилиндрической линзе и анализа радиальной интенсивности.

4. Первые экспериментальные результаты

В ходе пусконаладочных работ были проведены «холодные» измерения параметров резонатора ВЧ-пушки. Результаты показали, что фактическая рабочая частота составляет около 2855 МГц, а коэффициент стоячей волны (КСВ) находится на уровне 1.8.

Также были выполнены первые успешные эксперименты с подачей ВЧ-мощности в полости резонатора. С использованием альтернативного ультрафиолетового лазера (длина волны 266 нм, длительность импульса 5 нс) на установке впервые зарегистрированы токи фотоэмиссии. Полученный сигнал соответствует нескольким десяткам фотоэлектронов с энергией около 1 МэВ и надежно отделяется детектором от сопутствующих темновых токов.

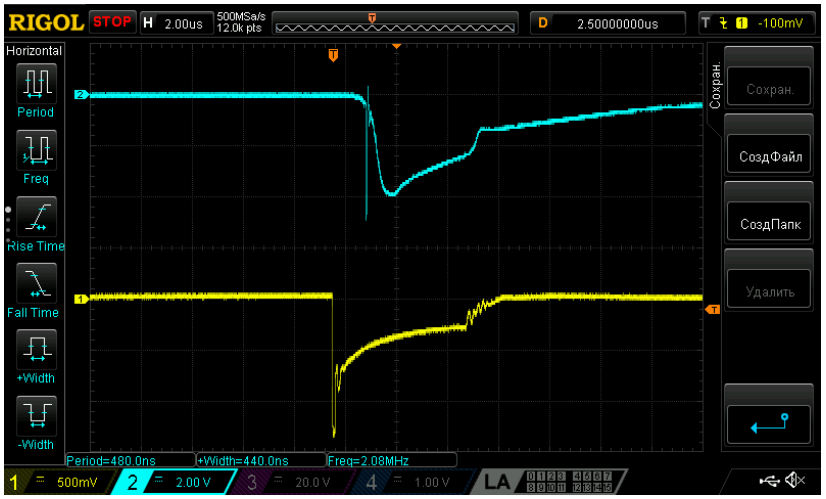


Рисунок 2 – Осциллограмма сигналов: 1 канал – сигнал отраженной ВЧ-волны; 2 канал – сигнал сцинтилляционного детектора с ФЭУ, где короткий импульс соответствует фототоку стенда ВЧ-фотоинжектора, а длинный – темновому току

Заключение

Экспериментальные данные подтверждают принципиальную работоспособность стенда ВЧ-фотоинжектора в ЛЯП ОИЯИ. Текущие работы сосредоточены на оптимизации частотных характеристик ВЧ-ввода пушки и завершении модернизации основного драйв-лазера. Важным этапом является ведущаяся разработка системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), необходимой для прецизионной синхронизации лазерного импульса с фазой ВЧ-волны в резонаторе. Совокупность этих мер обеспечит стабильную генерацию электронных пучков с требуемым зарядом, что станет фундаментом для реализации экспериментов по получению релятивистских вихревых электронов.

Благодарности

Работа была выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, грант № 23–62–10026.

Список использованных источников

1. Andrews, D. L. The Angular Momentum of Light. 1-st ed. / D. L. Andrews, M. Babiker. – Cambridge: Cambridge University Press, 2012.

2. Uchida, M. Generation of electron beams carrying orbital angular momentum / M. Uchida, A. Tonomura // Nature. – 2010. – V. 464. – P. 737–739.

3. Verbeeck, J. Production and application of electron vortex beams / J. Verbeeck, H. Tian, P. Schattschneider // Nature. – 2010. – V. 467. – P. 301–304.

4. Twisted particle collisions: A new tool for spin physics / I. P. Ivanov, N. Korchagin, A. Pimikov [et al.] // Phys. Rev. D. – 2020. – V. 101. – P. 096010.

5. High-precision physics experiments at Huizhou large-scale scientific facilities / F. An, D. Bai, H. Cai [et al.] // Chinese Physics Letters. – 2025. – V. 42. – P. 110102.

6. Pavlov, I. I. Generation of vortex electrons by atomic photoionization / I. I. Pavlov, A. D. Chaikovskaia, D. V. Karlovets // Phys. Rev. A. – 2024. – V. 110. – P. L031101.

7. Kazinski, P. O. Surface photoelectric effect by twisted photons as a source of twisted electrons / P. O. Kazinski, M. V. Mokrinskiy, V. A. Ryakin // Proceedings of the Royal Society A. – 2025. – V. 481.

8. Simulation of a radio-frequency photogun for the generation of ultrashort beams / D. A. Nikiforov, A. E. Levichev, A. M. Barnyakov [et al.] // Electrophysics, Electron and Ion Beams, Physics of Accelerators. – 2018. – V. 63. – P. 585–592.

9. Laser driver for a photoinjector of an electron linear accelerator / E. I. Gacheva, A. K. Poteomkin, E. A. Khazanov [et al.] // IEEE Journal of Quantum Electronics. – 2014. – V. 50. – P. 522–529.

SOURCE OF RELATIVISTIC ELECTRON VORTEX BEAMS

A.S. Dyatlov[1, 2], V.V. Kobets[2], M.V. Maksimov[1], M.A. Nozdrin[2], K. Popov[2, 3], K.E. Yunenko[2], D.V. Karlovets[1, 4]

[1]School of Physics and Engineering, ITMO University, St. Petersburg, 197101, Russian Federation;
[2]Joint Institute for Nuclear Research, Moscow Region, Dubna, 141980, Russian Federation;
[3]Institute of Nuclear Physics, 050032, Almaty, Kazakhstan;
[4] Petersburg Nuclear Physics Institute of NRC "Kurchatov Institute", Leningrad Region, Gatchina, 188300, Russian Federation

Abstract

This paper considers the generation of relativistic electron vortex beams based on a radiofrequency (RF) photoinjector. The concept of orbital angular momentum transfer and the results of beam dynamics simulations are described. The status of the commissioning of the RF photoinjector test bench at JINR is presented. The results of "cold" cavity measurements and the first experiments on obtaining photoemission currents are reported.

Keywords: electron vortex beams, orbital angular momentum, RF photoinjector, photoemission, linear accelerator, beam dynamics.