

ЗАПУСК ПРОТОТИПА DC-ФОТОИНЖЕКТОРА (ДО 400 кэВ) В РЕЖИМЕ РАБОТЫ ФОТОКАТОДА НА ПРОСВЕТ

*Н. И. Балалыкин^а, В. С. Александров^а, Е. И. Гачева^б, Й. Гуран^а,
В. В. Зеленогорский^б, Г. А. Лучинин^б, В. Ф. Минашкин^а,
М. А. Ноздрин^{а, 1}, А. К. Потемкин^б, Г. Д. Ширков^а, В. Г. Шабратов^а*

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^б Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

^а Электротехнический институт САН, Братислава

В ОИЯИ ведутся работы по созданию прототипа DC-фотоинжектора с энергией электронов до 400 кэВ для будущих электронных ускорителей (электрон-позитронных коллайдеров и лазеров на свободных электронах). В статье приводится описание создаваемого инжектора, отличительной особенностью которого является использование режима работы фотокатода на просвет. В фотоинжекторе применяется уникальная лазерная система с возможностью синхронизации частоты и фазы следования импульсов лазера (длительностью 10 пс, с длиной волны 262 нм, энергией 1,85 мкДж) с частотой работы ВЧ-системы ускорителя. Приводятся первые экспериментальные результаты работы DC-фотоинжектора, и рассматриваются дальнейшие планы по развитию установки.

A DC-photoinjector prototype with the electron energy of up to 400 keV for future electron accelerators (electron–positron colliders and free-electron lasers) is under development at JINR. The article describes the constructed injector, the distinguishing feature of which is the use of the transmission photocathode operation mode. The photoinjector implements the unique laser system with the ability to synchronize the repetition rate and the phase of laser pulses (10 ps duration, 262 nm wavelength, 1.85 μ J energy) with the frequency of the accelerator RF system. The first experimental results of the DC-photoinjector are presented and further plans for the development of the installation are considered.

PACS: 29.27.-a

ВВЕДЕНИЕ

Для создания излучения высокой мощности и высокой яркости в лазерах на свободных электронах, источниках синхротронного излучения, для будущих электрон-позитронных коллайдеров, а также для других применений требуются источники интенсивных электронных пучков со сгустками, обладающими малым эмиттансом и большим зарядом.

¹E-mail: nozdrin@jinr.ru

Такими источниками могут быть фотоинжекторы с лазерными драйверами. Благодаря фотоинжектору можно получать электронные пучки, профилированные по времени в виде пиков одинаковых коротких сгустков, синхронизированных по частоте и фазе с ускоряющим ВЧ-полем. Современные фотоинжекторы включают в себя два основных типа систем: ВЧ-фотоинжектор и фотоинжектор прямого действия (DC-фотоинжектор). В последнем часто генерацию качественных электронных пучков обеспечивает электронная пушка структуры Пирса. Обеспечение малого эмиттанса в этих пушках при увеличении извлекаемого заряда до нужных значений требует применения высоковольтного напряжения (100–500 кВ) для компенсации сил пространственного заряда. Несмотря на сложности обеспечения высоковольтного ввода, фотоинжекторы прямого действия, характеризующиеся минимальным «темновым» током, являются достаточно привлекательными. Кроме того, такие источники позволяют изменять энергию ускоренных частиц, сохраняя хорошее энергетическое разрешение. Несмотря на достигнутые значительные успехи в создании такого типа фотоинжекторов, продолжаются исследования и разработки с целью оптимизации параметров и поиска новых решений.

Взаимодействие лазерного излучения и поверхности фотокатода осуществляется двумя способами: в режиме работы на отражение или на просвет. В режиме работы фотокатода на отражение по способу введения лазерного пучка различаются два варианта. В первом варианте лазерный пучок непосредственно вводится в катодный узел через специальное окно под определенным углом, например в 70° [1]. В этой работе применялось и второе, выводное окно для отраженного лазерного пучка с целью минимизации его взаимодействия со стенками фотоинжектора. Во втором варианте на некотором расстоянии от фотоинжектора в ускорительный тракт устанавливается специальный бокс, содержащий вводное окно и зеркало для лазерного пучка. В этом случае лазерный пучок и электронный пучок используют один и тот же ускорительный тракт и только отличаются траекториями. Угол падения лазерного пучка в этом случае будет близок к 90° . Такое решение приводит к определенным требованиям по качеству пучка электронов для исключения попадания его на зеркало. Это особенно важно на стадии отладки и в аварийных ситуациях. Также могут возникнуть сложности при диагностике пучка перед этим боксом, например, с помощью цилиндра Фарадея или люминофора. Нежелательные явления может также вызвать отраженный от катода лазерный луч при взаимодействии со стенками конструкции. Следует отметить, что оба варианта приводят к усложнению конструкции фотоинжектора.

При работе фотокатода на просвет существенно упрощается ввод лазерного пучка. Но при этом возникают определенные сложности, связанные с изготовлением и эксплуатацией тонкопленочного фотокатода.

В настоящее время в ОИЯИ ведутся работы по созданию прототипа DC-фотоинжектора с энергией электронов до 400 кэВ. В статье дается описание создаваемого инжектора, отличительной особенностью которого является использование режима работы фотокатода на просвет. Концепция режима работы фотокатода на просвет — развитие предложенной в ОИЯИ концепции полого фотокатода [2, 3]. В фотоинжекторе применяется уникальная лазерная система с возможностью синхронизации частоты и фазы следования импульсов лазера (длительность — 10 пс, длина волны — 262 нм, энергия — 1,85 мкДж) с частотой работы ВЧ-системы ускорителя. Приводятся первые экспериментальные результаты работы DC-фотоинжектора и рассматриваются дальнейшие планы по развитию установки.

1. СХЕМА ПРОТОТИПА ДС-ФОТОИНЖЕКТОРА

Основными частями прототипа ДС-фотоинжектора (рис. 1, 2) являются:

- фотопушка с ускоряющей структурой;
- лазерный драйвер с оптической линией транспортировки и с ослабителем мощности лазерного излучения;
- источник высоковольтного напряжения до 400 кВ (Glassman PS/OS400N3.5GE9);

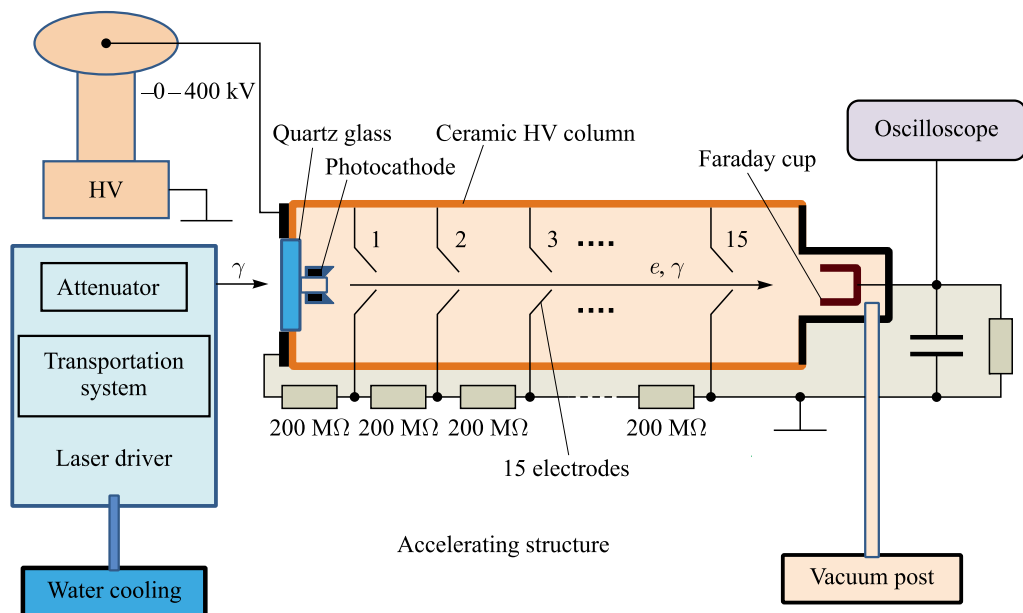


Рис. 1. Структурная схема прототипа ДС-фотоинжектора



Рис. 2. Общий вид прототипа ДС-фотоинжектора: 1 — внешняя стенка лазерной комнаты; 2 — линия транспортировки лазерного луча; 3 — ускоряющая структура с фотокаатодом; 4 — высоковольтный источник питания

- система диагностики, состоящая из цилиндра Фарадея, измерительной емкости (на ней накапливается заряд), резистора (обеспечивается разряд измерительной емкости с постоянной времени $\tau = R \cdot C$) и осциллографа (с помощью которого измеряется уровень напряжения и, следовательно, заряд макроимпульса $Q = C \cdot U$);
- система охлаждения лазерного драйвера;
- вакуумная система, обеспечивающая необходимый вакуум в ускорительной структуре (не хуже $2 \cdot 10^{-8}$ Торр).

2. ЛАЗЕРНЫЙ ДРАЙВЕР

В качестве лазерного драйвера используется созданная совместно с ИПФ РАН система [3, 4], состоящая непосредственно из лазерного драйвера (рис. 3, таблица), линии транспортировки излучения лазерного драйвера на фотокатод и ослабителя мощности лазерного излучения VA-266 компании LOTIS ТП (что позволяет изменять мощность лазерного излучения без изменения параметров лазерного драйвера).

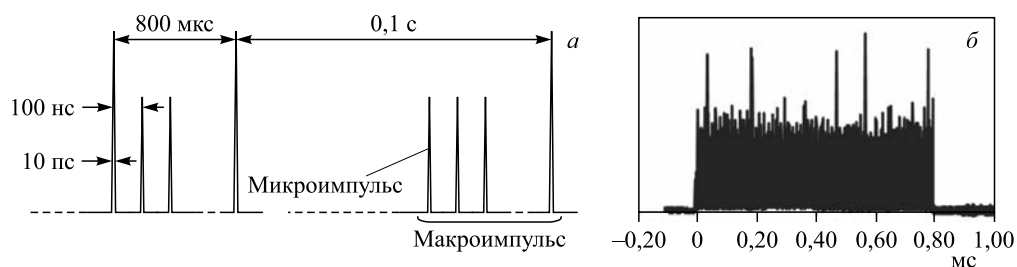


Рис. 3. Временная структура излучения лазера (а) и осциллограмма макроимпульса излучения в четвертой гармонике (б)

Основные параметры лазерного драйвера

Параметр	Значение
Длина волны, нм	260–266
Длительность микроимпульса, пс	8–12
Энергия микроимпульса, мкДж	1,85
Длительность макроимпульса, мкс	800
Число микроимпульсов в макроимпульсе	8 000
Частота повторения макроимпульсов, Гц	10

Линия транспортировки выполняет следующие функции:

- компенсирует расходимость излучения после кристалла-генератора четвертой гармоники ВВО;
- переносит изображение круглой диафрагмы диаметром 5 мм на фотокатод с уменьшением 5 : 1 (получены эффективные диаметры пучка на фотокатоде по вертикали и горизонтали 758 и 642 мкм соответственно);

— поворачивает линейную поляризацию излучения (горизонтальную после ВВО) на произвольный угол при помощи полуволновой пластинки;

— позволяет осуществлять диагностику поперечного распределения пучка, временной формы макроимпульса и мощности УФ-излучения перед фотокатодом.

В лазерном драйвере предусмотрена возможность синхронизации частоты следования и фазы микроимпульсов с рабочей частотой ВЧ-системы ускорителя.

3. КАТОДНЫЙ УЗЕЛ И УСКОРЯЮЩАЯ СТРУКТУРА

Катодный узел, который использовался в сеансах в апреле 2017 г., был сделан на базе электронной пушки структуры Пирса (рис. 4, *а*). В качестве катода использовалась медная сетка с размерами ячейки 40×40 мкм и диаметром проволоки 30 мкм.

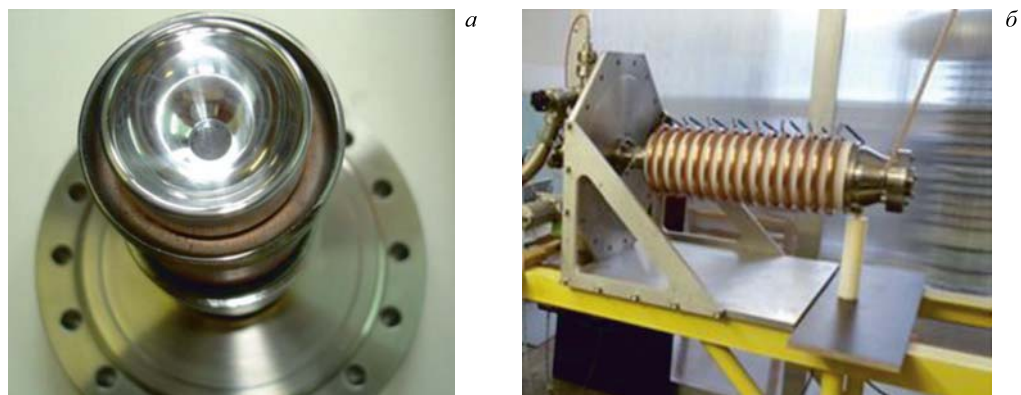


Рис. 4. Катодный узел (*а*) и ускоряющая структура (*б*)

Ускоряющая структура аналогична структуре, используемой в инжекторе ускорителя Линак-200 [5], и произведена фирмой Haimson Research Corporation (рис. 4, *б*).

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В апреле 2017 г. на стенде прототипа DC-фотоинжектора (рис. 5) был получен первый пучок фотоэлектронов.

В этом эксперименте были зарегистрированы макроимпульсы тока с суммарным зарядом в 15 нКл, что соответствует току микроимпульса порядка 200 мА, макроимпульса — 20 мкА и среднему току 150 нА при частоте повторения 10 Гц. Напряжение на катоде в этом случае было -80 кВ. В данном эксперименте использовался фотокатод из медной сетки с размерами ячейки 40×40 мкм и диаметром проволоочки 30 мкм. Заряд электронного сгустка измерялся с помощью цилиндра Фарадея, соединенного с землей через измерительный конденсатор емкостью 1 нФ. Напряжение на конденсаторе регистрировалось осциллографом TDS 2024В. Заряд макроимпульса вычислялся по формуле

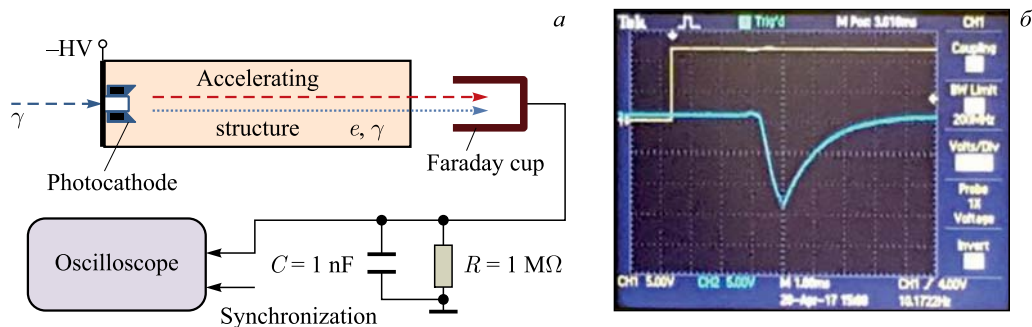


Рис. 5. Схема эксперимента (а) и осциллограмма напряжения на цилиндре Фарадея, нижний луч (б)

$Q = CV$, где C — емкость измерительного конденсатора (1 нФ), V — максимальное значение напряжения на этой емкости (15 В) и Q — заряд (15 нКл).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, на стенде фотоинжектора ЛФВЭ ОИЯИ был создан прототип DC-фотоинжектора с энергией электронов до 400 кэВ. Отличительной особенностью созданного фотоинжектора является использование режима работы фотокатода на просвет. В фотоинжекторе применена уникальная лазерная система с возможностью синхронизации частоты и фазы следования микроимпульсов лазера (длительность микроимпульса — 10 пс, длина волны — 262 нм, энергия микроимпульса — 1,85 мкДж, число микроимпульсов в макроимпульсе — 8000) с частотой работы ВЧ-системы ускорителя. В апреле 2017 г. был получен пучок электронов с энергией 80 кэВ и зарядом в 15 нКл с фотокатода из медной сетки.

В ближайших планах на прототипе DC-фотоинжектора предлагается доведение энергии электронного пучка до проектного значения в 400 кэВ, развитие системы диагностики лазерного пучка и электронного пучка (в частности, измерение эмиттанса), создание системы управления и контроля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gavrilov N. G. et al. Project of High Brightness Photoinjector for Free Electron Laser // Nucl. Instr. Meth. A. 1993. V. 331. P. ABS17–ABS19.
2. Balalykin N. I. et al. Hollow Photocathode Prototype for e-Gun // Proc. of the XXII Russ. Part. Accel. Conf. (RUPAC'2010), Protvino, Russia, Sept. 27–Oct. 1, 2010 / Ed. by M. Kuzin and V. R. Schaa. 2010. P. 59–61.
3. Балалыкин Н.И. и др. Электронная пушка с прозрачным фотокатодом для фотоинжектора Объединенного института ядерных исследований // УФН. 2017. Т. 187, №10. С. 1134–1141.
4. Gacheva E. I. et al. Laser Driver for a Photoinjector of an Electron Linear Accelerator // IEEE J. Quant. Electron. 2014. V. 50, No. 7. P. 522–529.
5. Balalykin N. I. et al. Control System of Injector for Linear Electron Accelerator LINAC-800 // Phys. Part. Nucl. Lett. 2010. V. 7, No. 7. P. 525–528.