

## ПРОТОТИП ФОТОИНЖЕКТОРА ЛФВЭ ОИЯИ

*Н. И. Балалыкин<sup>а</sup>, В. Ф. Минашкин<sup>а</sup>, М. А. Ноздрин<sup>а,1</sup>, Г. В. Трубников<sup>а</sup>,  
Г. Д. Ширков<sup>а</sup>, Е. И. Гачева<sup>б</sup>, Е. В. Катин<sup>б</sup>, Е. А. Хазанов<sup>б</sup>,  
Г. А. Лучинин<sup>б</sup>, А. К. Потемкин<sup>б</sup>, В. В. Зеленогорский<sup>б</sup>, Й. Гуран<sup>в</sup>*

<sup>а</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

<sup>б</sup> Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

<sup>в</sup> Электротехнический институт САН, Братислава

В ОИЯИ ведутся работы по созданию прототипа фотоинжектора для будущих электрон-позитронных коллайдеров и лазеров на свободных электронах. В статье дается обзор стенда фотопушки на энергию 30 кэВ, описываются концепция «прозрачного» (облучаемого с тыльной стороны) фотокаатода и исследования таких катодов, проводимые на стенде в коллаборации с ЭИ САН (Братислава, Словакия). Описывается состояние работ по созданию фотоинжектора на энергию электронов до 400 кэВ с уникальным 10-пс лазерным драйвером.

Photoinjector prototype for future electron–positron colliders and free electron lasers is being constructed at JINR. 30 keV bench setup, “transmissive” photocathode conception and such cathodes investigations in collaboration with IEE SAS are described. Progress report on construction of the photoinjector with the electron energy of up to 400 keV with unique 10-ps laser driver is given.

PACS: 29.25.Bx; 79.60.-i

### ВВЕДЕНИЕ

Существующие и планируемые установки для исследований в области физики частиц, для генерации излучения высокой мощности и высокой яркости в лазерах на свободных электронах, а также для других применений требуют источников интенсивных электронных пучков со сгустками, обладающими малым эмиттансом и большим зарядом. Такими источниками признаны фотоинжекционные системы. Благодаря фотоинжектору можно получать электронные пучки, профилированные по времени в виде цугов одинаковых коротких сгустков, синхронизированных с ускоряющим ВЧ-полем. Современные фотоинжекторы включают в себя два основных типа систем: ВЧ-фотоинжектор и фотоинжектор прямого действия. В последнем генерацию качественных электронных пучков и сгустков с малым извлекаемым зарядом обеспечивает электронная пушка Пирса с фотокаатодом. Обеспечение малого эмиттанса в этих пушках при увеличении извлекаемого заряда до нужных значений требует применения высоковольтного напряжения (100–500 кВ) для

---

<sup>1</sup>E-mail: nozdrin@jinr.ru

компенсации сил пространственного заряда. Сложности обеспечения высоковольтного ввода не умаляют привлекательности фотоинжекторов прямого действия в силу того, что такого типа источники характеризуются минимальным «темновым» током, возникающим вследствие полевой эмиссии. Многие исследовательские группы достигли значительных успехов в создании такого типа фотоинжекторов и продолжают исследования и разработки с целью оптимизации параметров и поиска новых решений.

В ОИЯИ предложена концепция «прозрачного» фотокатода, пронизываемого для лазерного пучка. Для исследования таких катодов был создан стенд фотопушки с энергией электронов до 30 кэВ и длительностью импульса, в зависимости от используемого драйверного лазера, 15 нс или 75 пс. В настоящее время создается стенд фотоинжектора на энергию электронов до 400 кэВ с уникальным лазерным драйвером пикосекундного диапазона, разработанным в коллаборации с ИПФ РАН.

## 1. КОНЦЕПЦИЯ «ПРОЗРАЧНОГО» ФОТОКАТОДА

Концепция «прозрачного» фотокатода — развитие предложенной в ОИЯИ концепции «полого» фотокатода [1, 2]. «Полый» фотокатод представляет собой шайбу толщиной несколько миллиметров с цилиндрическим или коническим отверстием в центре. Геометрия такого катода позволяет увеличить квантовый выход за счет поверхностного фотоэффекта, обусловленного нормальной к поверхности материала компонентой электрического поля волны фотона (так называемый векториальный фотоэлектрический эффект, [3, §10.4]).

В процессе экспериментальных исследований полый фотокатод был заменен на «прозрачный» — сетку из металлической проволоки диаметром 30 мкм и размером ячейки  $40 \times 40$  мкм. Такая сетка служит подложкой для создания пленочных катодов из различных фотоматериалов — как металлов, так и полупроводников. Алмазоподобные углеродные (АПУ) пленки наносились как методом реактивного магнетронного распыления мишени из углерода в смеси газов Ar и  $H_2(D_2)$ , так и осаждением из паровой фазы  $CH_4 + D_2(H_2) + Ar$ . Показано влияние соотношения графитовой и алмазной фаз в АПУ-пленках на квантовый выход катодов.

Анализ эмиссионных свойств различных образцов пленок из алмазоподобного углерода подтвердил, что процесс электронной эмиссии локализуется на границах триплета графит/алмаз/вакуум и квантовой эффективностью управляет соотношение фаз  $sp^2$  (графит) и  $sp^3$  (алмаз). Таким образом, имеющийся в настоящее время экспериментальный материал [4–7], подтверждающий автоэмиссию электронов в вакуум из микроструктурированных поликристаллических алмазоподобных пленок, предоставляет возможность создания на их базе радиационно стойкого и стабильного фотокатода, эффективно работающего в широкой спектральной области и не требующего ультравакуумных условий.

Катоды на основе GaAs позволяют получать электроны со степенью поляризации более 80%, в силу чего такой катод, к примеру, планируется использовать в источнике поляризованных электронов ИС. Сеточный катод (рис. 1) из GaAs-пластинки толщиной 0,4 мм был изготовлен методом травления в плазме  $CCl_2F_2$  [8]. Исследование квантового выхода такого катода позволило обсудить возможности и ограничивающие стороны технологии.



Рис. 1. Катодный узел пушки с «прозрачным» фотокатодом из перфорированного ( $200 \times 200$  мкм) арсенида галлия

Планируется создание «прозрачных» фотокатодов на подложках из кварца и сапфира с использованием методов вакуумной тонкопленочной технологии.

## 2. СТЕНД ФОТОПУШКИ

Для исследования параметров термо- и фотокатодов (как «полых» и «прозрачных», так и «традиционных») был создан стенд фотопушки [9]. Основными элементами стенда (рис. 2) являются фотопушка прямого действия, фокусирующий магнит с корректирующими обмотками, диагностическая система и два Nd:YAG драйверных лазера LOTIS TP с длиной волны 266 нм: LS-2134 ( $\tau_{\text{imp}} = 15$  нс,  $E = 15$  мДж) и LS-2151 ( $\tau_{\text{imp}} = 75$  пс,  $E = 3$  мДж). Рабочий вакуум в камере стенда — не хуже  $10^{-8}$  торр.

В 2014–2015 гг. в диагностическую систему были добавлены блок видеонаблюдения (люминесцентный экран, высокочувствительная видеокамера «Prosilica GC1380») и станция измерения эмиттанса с использованием многопроволочных детекторов. Катодное напряжение пушки было увеличено с 12 до 30 кВ. Ведутся работы по созданию на базе стенда станции измерения эмиттанса щелевым методом, которая в дальнейшем будет перенесена на стенд фотоинжектора.

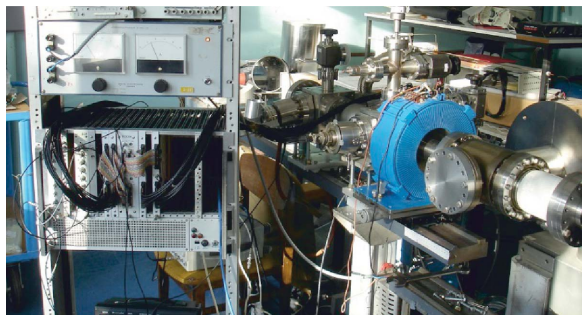


Рис. 2. Общий вид стенда фотопушки

### 3. СТЕНД ФОТОИНЖЕКТОРА

Развитием стенда фотопушки является создаваемый стенд фотоинжектора прямого действия на энергию электронов до 400 кэВ. В качестве драйверного лазера на нем будет использоваться созданная совместно с ИПФ РАН система [10, 11] с параметрами, указанными в таблице.

**Основные параметры лазерного драйвера**

Параметр	Значение
Длина волны, нм	260–266
Длительность микроимпульса, пс	8–12
Энергия в микроимпульсе, мкДж	1,85
Длительность макроимпульса, мкс	800
Число микроимпульсов в макроимпульсе	8000
Частота повторения макроимпульсов, Гц	10

Измерение частоты повторения лазерных микроимпульсов в задающем генераторе драйвера показало, что они флуктуируют в очень узком интервале — около 10 Гц (проектное значение 50–100 Гц) — и перестраиваются в широком диапазоне частот:  $\pm 1,3$  кГц. Средняя частота повторения импульсов после получасового прогрева изменяется незначительно и только в случае изменения температуры окружающей среды.

Уникальность драйвера заключается в том, что он обладает нетипичным для лазерного приборостроения наличием параметров, каждый из которых не является рекордным. Однако оптимальное их сочетание позволяет заявить о высокой конкурентоспособности всей системы в целом на рынке лазерных драйверов для ускорительной техники. Общий вид лазерного драйвера представлен на рис. 3.

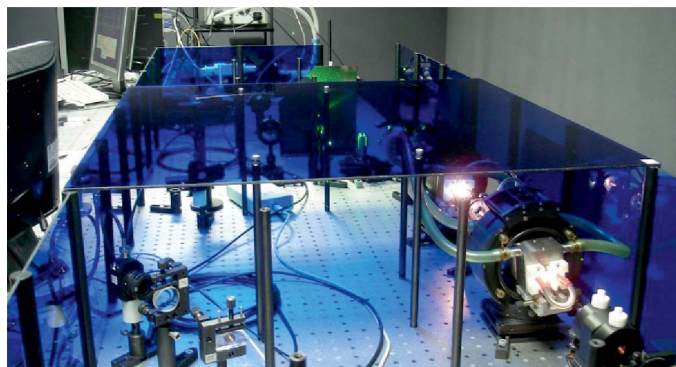


Рис. 3. Работающий лазер для стенда фотоинжектора



Рис. 4. Высоковольтный источник



Рис. 5. Ферма станда фотоинжектора

В качестве источника высокого напряжения будет использоваться высоковольтный источник «Glassman PS/OS400N3.5GE9» (рис. 4). Ферма станда, подготовленная к установке ускоряющей структуры, представлена на рис. 5.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

После проведенных в 2014–2015 гг. работ энергия электронов на стенде фотопушки увеличилась до 30 кэВ, в систему диагностики были добавлены станция измерения эмиттанса на основе многопроволочных детекторов и видеомонитор. Планируется добавление еще одной станции измерения эмиттанса с использованием щелевого метода.

Ведутся работы по созданию станда фотоинжектора на энергию электронов до 400 кэВ, первые фотоэлектроны на стенде ожидаются в конце 2016 – начале 2017 гг.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Nozdrin M. A. et al.* Hollow Photocathode Conception for *e*-Gun // Proc. of the XXII Russ. Part. Accel. Conf. (RUPAC2010), Protvino, Russia, Sept. 27 – Oct. 1, 2010 / Ed. by M. Kuzin, V. R. Schaa. 2010. P. 59–61.
2. *Nozdrin M. A. et al.* Hollow Photocathode Prototype for *e*-Gun // Proc. of the 10th Eur. Workshop on Beam Diagnostics and Instrumentation for Particle Accelerators (DIPAC2011), Hamburg, Germany, May 16–18, 2011 / Ed. by M. Marx et al. 2011. P. 242–244.

3. *Ворончев Т. А., Соболев В. Д.* Физические основы электровакуумной техники. М.: Высш. шк., 1967. 352 с.
4. *Huran J. et al.* Photocathode Based on Deuterated Diamond Like Carbon Films Prepared by Reactive Magnetron Sputtering and PECVD Technology // Proc. of the Ninth Intern. Conf. on Advanced Semiconductor Devices & Microsystems (ASDAM2012), Smolenice, Slovakia, Nov. 11–15, 2012. P. 263–266.
5. *Huran J. et al.* Structural and Physical Characteristics of PECVD Nanocrystalline Silicon Carbide Thin Films // Phys. Procedia. 2012. V. 32. P. 303–307.
6. *Balalykin N. I. et al.* Detailed Investigation of the DLC Films in the Transmissive Photocathode DC Gun Application // 2nd Intern. Conf. on Emission Electronics (ICEE2014), Saint-Petersburg, Russia, June 30 – July 4, 2014. P. 1–5. DOI: 10.1109/Emission.2014.6893973.
7. *Huran J. et al.* Transmission Photocathodes Based on Stainless Steel Mesh Coated with Deuterated Diamond Like Carbon Films // Nucl. Instr. Meth. A. 2014. V. 753. P. 14–18.
8. *Huran J. et al.* GaAs Mesh Type Transmission Photocathode Prepared by Inductively Coupled Plasma  $\text{CCl}_2\text{F}_2$  Etching of GaAs Substrate // Proc. of the 1st Intern. Conf. on Advances in Electronic and Photonic Technologies. 2013. P. 233–236.
9. *Balalykin N. I.* Researching the Characteristics of Photo- and Thermoemission Cathodes // Phys. Part. Nucl. Lett. 2008. V. 5, No. 7. P. 605–608.
10. *Balalykin N. et al.* JINR Powerful Laser Driver Applied for FEL Photoinjector // Proc. of the 5th Intern. Part. Accel. Conf. (IPAC2014), Dresden, Germany, June 15–20, 2014 / Ed. by C. Petit-Jean-Genaz et al. 2014. P. 2906–2908.
11. *Gacheva E. I. et al.* Laser Driver for a Photoinjector of an Electron Linear Accelerator // IEEE J. Quant. Electronics. 2014. V. 50, No. 7. P. 522–529.