

P9-2016-6

М. А. Ноздрин, Н. И. Балалыкин, В. Ф. Минашкин,  
Г. Д. Ширков

**ДИАГНОСТИКА НА СТЕНДЕ ФОТОПУШКИ  
ЛФВЭ ОИЯИ**

Ноздрин М. А. и др.

P9-2016-6

Диагностика на стенде фотопушки ЛФВЭ ОИЯИ

Качество пучка лазерного драйвера фотоинжектора непосредственно связано с качеством пучка фотоэлектронов. Для диагностики лазерного пучка на стенде фотопушки ЛФВЭ ОИЯИ реализована система «виртуального катода», позволяющая визуализировать профиль лазерного пучка на катоде. Визуализация реализована с использованием разработанного в DESY Zeuthen программного комплекса AVINE. Установлено оборудование для измерения эмиттанса электронного пучка щелевым методом; написано и протестировано на лазерном пучке оригинальное программное обеспечение EmCa для вычисления эмиттанса.

Работа выполнена в Лаборатории физики высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2016

Nozdrin M. A. et al.

P9-2016-6

Diagnostics at JINR LHEP Photogun Bench

The photoinjector electron beam quality dramatically depends on the laser driver beam quality. For laser beam diagnostics a “virtual cathode” system was realized at the JINR LHEP photogun bench. The system allows one to image laser beam profile at the cathode. The AVINE software complex developed in DESY Zeuthen is being used for imaging. Equipment for emittance measurement using the slit method was installed. The original emittance calculation software EmCa was created and tested with the laser beam.

The investigation has been performed at the Veksler and Baldin Laboratory of High Energy Physics, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2016

## ВВЕДЕНИЕ

Созданный в ЛФВЭ ОИЯИ стенд фотопушки [1,2] предназначен для разработки и совершенствования «прозрачных» фотокатодов с целью увеличения квантового выхода, времени жизни и снижения требований к вакуумным условиям. «Прозрачный» фотокатод является развитием предложенной в ОИЯИ концепции «полого» фото катода [3,4] и представляет собой сетку из металлической проволоки микронных размеров или кварцевую/сапфировую пластину, служащую подложкой для создания пленочных катодов из различных фотоматериалов — как металлов, так и полупроводников.

Важной задачей при исследовании катодов является диагностика пучка — как лазерного, так и электронного. Для этой цели на стенде создан ряд диагностических подсистем.

## 1. ОБОРУДОВАНИЕ СТЕНДА

Основными элементами стенда (рис. 1) являются фотопушка прямого действия с максимальным напряжением 30 кВ, фокусирующий магнит с корректирующими обмотками, диагностическая система и драйверный лазер. Рабочий вакуум в камере стенда — не хуже  $10^{-8}$  торр. Для измерения заряда электронных ступков используется цилиндр Фарадея (рис. 2), энергия лазерных импульсов измеряется с помощью измерителя мощности/энергии Orpik Nova II с пироэлектрическим датчиком PE25 (рис. 3).

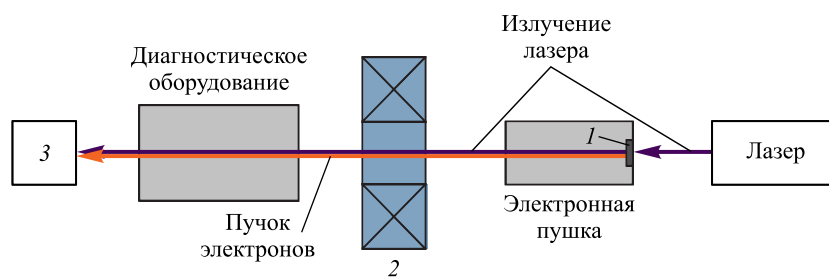


Рис. 1. Схема стенда фотопушки: 1 — «прозрачный» фотокатод; 2 — фокусирующий магнит с корректирующими обмотками; 3 — поглотитель пучка

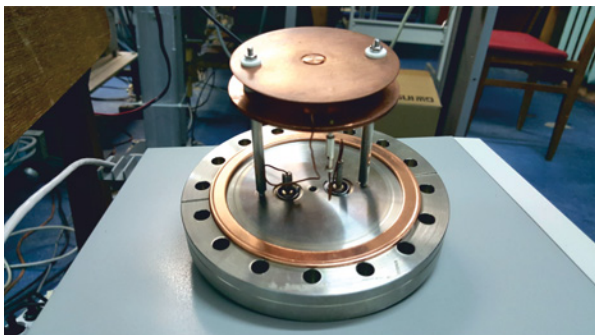


Рис. 2. Цилиндр Фарадея с двумя зонами — центральной и периферийной

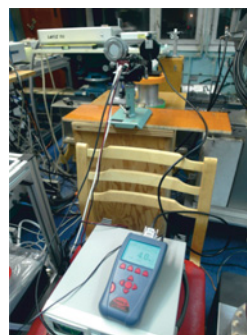


Рис. 3. Измерение энергии лазерного пучка

**1.1. Лазеры.** Основным лазерным драйвером на данный момент является LS-2134 производства LOTIS ТП (Минск). Также использовался LS-2151, а в данное время идет подготовительная работа с LS-2132 UTF той же фирмы. Следующим этапом развития должен стать новый стенд — фотоинжектора, — использующий в качестве драйвера уникальную лазерную систему [5, 6] производства ИПФ РАН (Нижний Новгород) и позволяющий ускорять электроны до максимальной энергии 400 кэВ. Параметры вышеперечисленных лазеров представлены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры лазеров

Параметр, единица измерения	LS-2134	LS-2151	LS-2132	ИПФ РАН
Используемая длина волны, нм	266			260–266
Длительность микроимпульса, пс	15 000	75	5 000	8–12
Энергия в микроимпульсе, мкДж	15 000	5 000	30 000	1,85
Длительность макроимпульса, мкс	—			800
Число микроимпульсов в макроимпульсе	—			8 000
Частота повторения макроимпульсов, Гц	—			10

**1.2. Аппаратура измерения эмиттанса.** Эмиттанс — одна из важнейших характеристик пучка частиц, и его измерение является одной из ключевых задач при исследовании фотокатодов. На стенде создается система измерения эмиттанса щелевым методом. В состав системы входит следующее оборудование:

- щелевая маска, представляющая собой вольфрамовую пластину толщиной 1 мм с 9 щелями шириной 50 мкм, расположенными на расстоянии 3 мм друг от друга;

- вакуумный бокс, в котором размещается маска, оснащенный двухпозиционным пневматическим приводом для ввода/вывода маски в/из тракта (бокс и маска изготовлены на заказ в RadiaBeam Technologies);
- люминофорный экран (различные варианты, подробнее см. п. 3.2);
- высокочувствительная видеокамера Prosilica GC1380 для визуализации профиля пучка на экране после прохождения щелевой маски;
- компрессор на максимальное давление 7 атм для подачи сжатого воздуха на пневматический привод.

**1.3. Видеооборудование.** На стенде используется высокочувствительная цифровая видеокамера AVT Prosilica GC1380 с объективом Kowa LM50JCM. Параметры камеры приведены в табл. 2. Камера поддерживает запуск от внешнего источника по двум каналам: изолированному (задержка срабатывания триггера 5 мкс, дрожание (jitter)  $\pm 0,5$  мкс) и неизолированному (задержка срабатывания триггера 3,7 мкс, дрожание  $\pm 20$  нс). В связи с отсутствием мощных источников помех на стенде используется неизолированный выход.

**Таблица 2. Параметры камеры Prosilica**

Сенсор	2.3" Sony ICX285AL CCD
Разрешение	1360 × 1024
Размер пикселя	6,45 × 6,45 мкм
Частота кадров	20,2 кадра в секунду
Потребляемая мощность	Не больше 3,3 Вт
Аппаратный интерфейс	IEEE 802.3 1000BASE-T, 100BASE-TX
Программный интерфейс	GigE Vision Standard 1.0

## 2. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

**2.1. Программное обеспечение на основе Vimba SDK.** В доступный на сайте AVT пакет программного обеспечения Vimba SDK [7] входит предназначенная для работы с камерой программа *Vimba Viewer*, позволяющая просматривать изображение с камеры и дающая доступ к ее параметрам. Однако для работы в качестве диагностического ПО данная программа имеет достаточно слабый функционал. В связи с этим была начата разработка собственного программного обеспечения, благо, упомянутый SDK предоставляет для этого достаточно широкие возможности.

*Vimba SDK* — камеронезависимый набор средств разработки ПО для 32- и 64-битных операционных систем Windows XP, Windows 7, Windows 8

и различных дистрибутивов Linux, позволяющий работать с камерами, поддерживаемыми AVT 1394 (только Windows) и AVT GigE Vision [8]. SDK предоставляет API для языков C, C++ и .NET, причем с последним можно пользоваться любым из языков для .NET: C#, C++/cli или Visual Basic .NET. API для любого из языков реализует следующие функции:

- предоставление списка подключенных камер;
- контроль параметров камеры;
- получение изображений с камеры;
- уведомление о подключении или отсоединении камер.

Vimba API использует объектную модель, схема которой представлена на рис. 4. Объект `System` олицетворяет собой непосредственно API, соответственно, возможно создать только один его экземпляр. Приложение должно инициализировать этот объект, прежде чем пользоваться какими бы то ни было функциями API. Объект `System` содержит список интерфейсов и камер и служит основной точкой доступа к этим объектам. Объект `Camera` используется для взаимодействия с видеокamerой. Он предоставляет набор функций, не зависящий от используемого камерой интерфейса. Объект `Interface` служит для работы с физическим портом компьютера и используется для управления настройками соответствующего интерфейсу оборудования. Каждый из перечисленных объектов — `System`, `Camera` и `Interface` — содержит ряд объектов `Feature`, содержащих в себе настройки соответствующих объектов верхнего уровня. Для объекта `System` это глобальные настройки API — например, информация о том, какие модули транспортных уровней

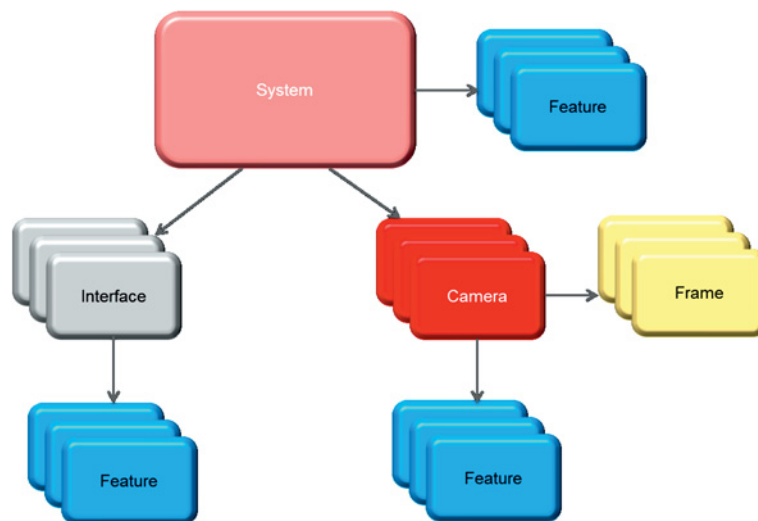


Рис. 4. Схема объектной модели Vimba API

(transport layer) загружены. Для объекта Camera — настройки конкретной камеры, такие как время экспозиции или формат изображения. Для объекта Interface — настройки интерфейсного оборудования, например, IP-адрес сетевой карты. Наконец, объекты Frame используются для получения изображений с камеры.

Создано программное обеспечение (рис. 5) в среде MS Visual Studio 2010 с использованием языка C++, имеющее следующий функционал:

- авторизацию камеры по уникальному номеру;
- асинхронный вывод видеопотока с камеры на экран компьютера;
- вывод в реальном времени распределения интенсивности пучка в указанных оператором сечениях.

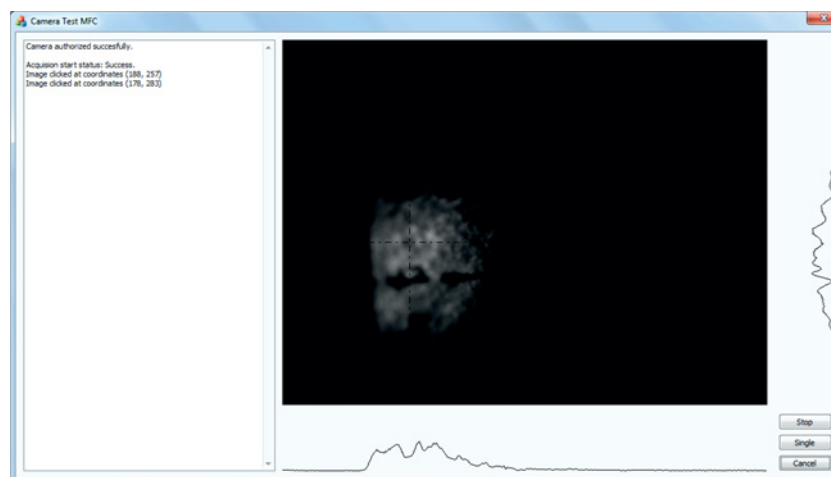


Рис. 5. Поперечный профиль пучка в ПО, созданном на основе Vimba SDK. Справа и снизу от изображения — сечения интенсивности в соответствующих плоскостях

На этом этапе разработки ПО было получено предложение от коллег из DESY Zeuthen о возможности использования разработанного там программного обеспечения AVINE, которое описывается в следующем подразделе. В связи с этим работы над собственным программным обеспечением временно прекращены.

**2.2. Программное обеспечение AVINE.** AVINE — Advanced Video and Imaging Network Environment — разработанный в DESY Zeuthen набор программных инструментов для создания систем видеонаблюдения (в первую очередь, поперечного профиля пучка ускоренных частиц) на физических установках. Гибкость системы обеспечивается за счет компонентного подхода. Набор существующих компонентов и их взаимодействие между собой представлены на рис. 6. Серверная часть системы написана на C++ и работает

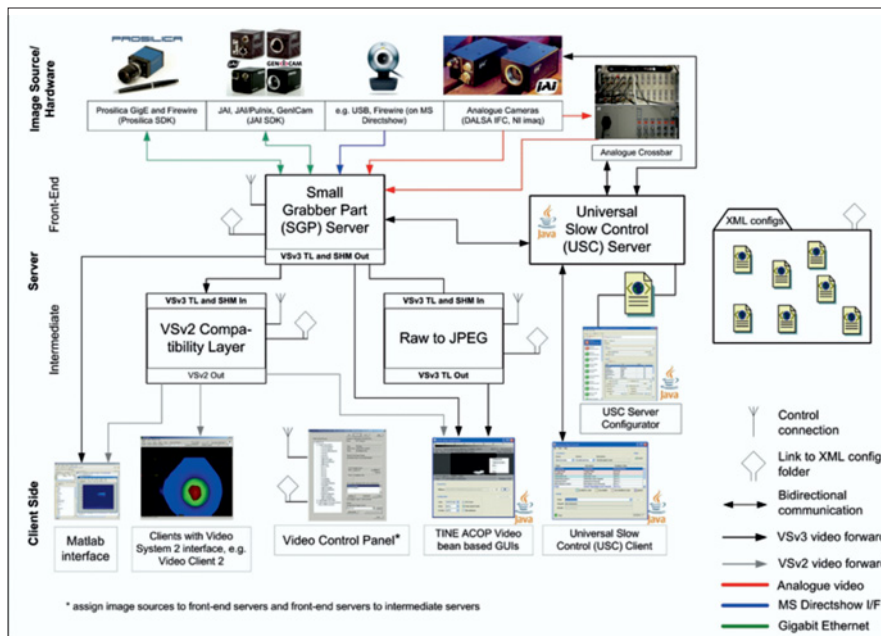


Рис. 6. Схема компонентов AVINE и их взаимодействия между собой

под управлением MS Windows XP или 7, клиентская часть имеет C++ версию, которая также работает только под управлением Windows, и Java-версию, работающую на любой платформе, поддерживающей Java Runtime Environment версии не ниже 1.6 [9]. Важной особенностью системы является то, что серверная и клиентская части могут быть установлены на одном компьютере [10]. Именно в таком варианте AVINE, установленная на ноутбуке ASUS U36S, используется на стенде фотопушки.

Основным компонентом системы, с которым взаимодействует пользователь, является видеоклиент, который, как было сказано выше, доступен в Windows- и кроссплатформенном JAVA-варианте. В нашем случае используется первый, в связи с тем, что кроссплатформенность не требуется, а Windows-версия разрабатывается давно и имеет больше возможностей. Программа Video Client 3 (рис. 7) обладает рядом функций, таких как [11]:

- Визуализация пучка в ЧБ и в двух режимах ложного цвета (classic и MATLAB JET-like).
- Сохранение фона (как одного изображения, так и нескольких с последующим объединением двумя методами: envelope и average) и его вычитание из общей картинки. Запись фона на диск. Возможность взаимодействия с лазерным затвором (shutter).



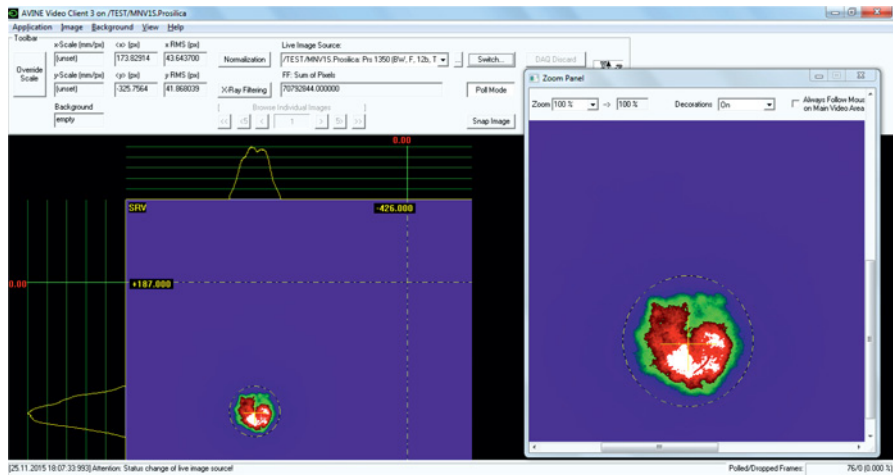


Рис. 7. Изображение поперечного профиля пучка лазера LS-2134 в Video Client 3 — основное окно программы и окно увеличения части изображения

- Запись изображения на диск в своем формате и в bmp. Быстрое сохранение по горячей клавише (включая обработку — вырезание фона, ложный цвет — в отличие от Save). Возможность одновременного сохранения фона и изображения (с помощью управления затвором лазера).
- Загрузка изображения (с возможной загрузкой фона и его вычитанием из изображения — в этом случае фон надо загрузить до изображения).
- Установка масштаба пиксель–мм по горизонтальной и вертикальной осям.
- Подсчет в реальном времени средних координат (центра) и среднеквадратичного размера пучка в соответствии с этим масштабом на основе двух методов вычисления (Fourier analysis и Straightforward statistics).
- Печать (в т. ч. в файл) изображения либо всего окна программы.
- Увеличение части изображения в отдельном окне.
- Проецирование видеосигнала по горизонтальной и вертикальной осям.
- Запись серий изображений и последующее усреднение.
- Выбор области интереса (Area of Interest), круглой или квадратной. В этом случае все вычисления делаются для этой области, а не для всего экрана.

### 3. ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

Для наблюдения электронного пучка использовалось два варианта: с экраном, расположенным под углом 45 и 90° по отношению к оси пучка.

**3.1. Экран под углом 45°.** Этот вариант использовался до установки станции измерения эмиттанса щелевым методом. Видеокамера была установлена на боковом фланце отдельного вакуумного бокса с люминесцентным экраном, расположенным под углом 45° к оси пучка. Стенд с этим вариантом диагностики и изображение на видеокамере представлены на рис. 8. Цифрами обозначены: 1 — лазер LS-2134, 2 — фокусирующий магнит, 3 — профилометр, 4 — вакуумный бокс с люминесцентным экраном, 5 — видеокамера, 6 — изображение лазерного пучка, 7 — изображение электронного пучка. Однако в связи с намагничиванием вакуумного бокса от этого варианта пришлось отказаться, несмотря на то, что пока этот вариант единственный, в котором удалось выделить электронный пучок.

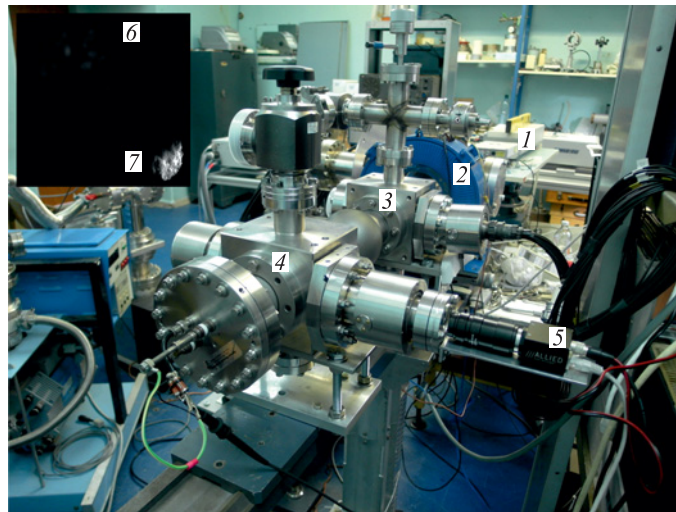


Рис. 8. Вариант диагностики поперечного профиля электронного пучка с экраном, расположенным под углом 45° к оси пучка

**3.2. Экран под углом 90°.** В этом варианте на выходном фланце вакуумного бокса с щелевой маской закреплен люминофорный экран (использовались два варианта: фосфор и калиевое стекло), а за ним размещена видеокамера (рис. 9).

**3.3. Засветка люминофора лазером.** Основной проблемой для наблюдения пучка электронов является засветка люминофора лазером (усугубляющаяся малой яркостью люминофора из-за низкой энергии электронов). В частности, выделить электронный пучок в варианте с расположением люминофора под углом 90° пока не удастся. Ниже перечислены планируемые варианты минимизации влияния фактора засветки лазером в порядке убывания приоритета.

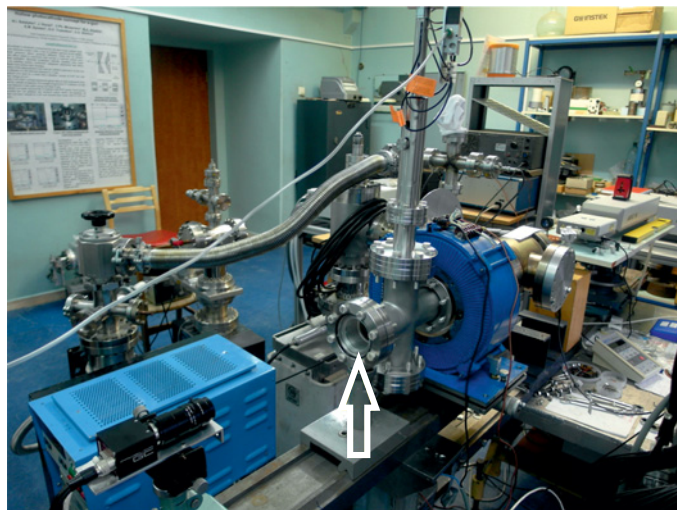


Рис. 9. Вариант размещения видеокамеры за станцией измерения эмиттанса. В центре — вакуумный бокс системы измерения эмиттанса щелевым методом. Стрелкой показано размещение люминофора (калиевое стекло). Остальное оборудование аналогично представленному на рис. 8

- Ожидающаяся в июле 2016 г. поставка диагностического узла RadiaBeam Technologies с еще двумя типами экранов: АИГ и фосфор Р-22 (предполагается, что эти люминофоры будут слабее засвечиваться лазером).

- Отклонение электронного пучка с помощью дипольного магнита. Так как этот вариант позволяет полностью избавиться от засветки в отличие от предыдущего, он, вероятнее всего, будет реализован независимо от того, насколько будет снижена засветка при использовании новых экранов.

- Установка на пути пучка фольги, проницаемой для электронов и непроницаемой для лазерного луча. Для этого варианта требуется бóльшая, чем имеющиеся на стенде фотопушки 30 кэВ, энергия электронов. Поэтому он, вероятнее всего, будет реализован на создающемся стенде фотоинжектора, где энергия электронов будет составлять 100–400 кэВ.

- Размагничивание имеющегося бокса (п. 3.1). Это наименее перспективный вариант в связи с тем, что размагничивание придется проводить регулярно.

**3.4. Поперечный эмиттанс электронного пучка.** При измерении эмиттанса щелевым методом на пути пучка электронов устанавливается маска с тонкими щелями, разделяющая пучок на небольшие «подпучки» — бимлеты. Зная размеры бимлетов и их координаты, ширину щелей маски и расстояние между ними и расстояние между маской и экраном, можно вычислить поперечный эмиттанс пучка [12].

На данный момент реализовано и протестировано на лазерном пучке оборудование и программное обеспечение для расчета поперечного эмиттанта пучка в вертикальной плоскости. В зависимости от результатов тестирования с электронным пучком планируется либо заменить пневматический привод на трехпозиционный (с двумя масками со взаимно перпендикулярными щелями), либо использовать метод Реррег-рот, при котором вместо щелевой маски используется маска с несколькими рядами отверстий.



Рис. 10. Программное обеспечение EmCa

Для расчета эмиттанта щелевым методом было создано программное обеспечение EmCa (рис. 10). Программа написана в среде MS Visual Studio 2010 на языке C++ и работает с изображениями, сохраненными в видеоклиенте AVINE. Для вычисления эмиттанта используется формула, выведенная в [12]. Алгоритм работы программы следующий:

1. Открытие файла с изображением (кнопка `Load image...`), вывод изображения и его параметров (размеры, физическое и эффективное число бит на пиксель, масштабный коэффициент) на экран. На данный момент поддерживается только формат `*.imn` (без сжатия) с разрешением 8 бит на пиксель.

2. Фильтрация изображения — если эта опция включена, все пиксели, имеющие значение от 0 до 15, становятся черными (получают значение 0).

3. Выбор бимлетов. Бимлеты выбираются вручную путем нажатия кнопки `Mouse select`, соответствующей каждому из бимлетов, и выбора рамкой. Тестирование программы проводилось на изображении лазерного пучка, разделенного на три бимлета, в связи с чем число бимлетов пока фиксировано (и, соответственно, равно трем).

4. Собственно вычисление эмиттанса, осуществляемое при нажатии на кнопку Calc.

Планируется следующее развитие программы:

- работа с произвольным количеством бимлетов;
- отображение изображения пучка в фазовом пространстве;
- работа с разрешением до 16 бит на пиксель и с форматом \*.img (используется сжатие с помощью библиотеки zlib);
- автоматическое выделение бимлетов;
- реализация вычисления общего поперечного эмиттанса (в двух плоскостях) — после аппаратной реализации.

#### 4. ДИАГНОСТИКА ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА

Профиль лазерного пучка может наблюдаться в двух местах: за станцией измерения эмиттанса и в позиции катода (т. н. виртуальный катод).

**4.1. За станцией измерения эмиттанса.** Описание расположения оборудования в этом варианте дано в п. 3.1. Изображение пучка на рис. 7 сделано именно при таком варианте размещения оборудования (использовался фосфорный люминофор). Этот вариант использовался при тестировании ПО EmCa.

**4.2. Виртуальный катод.** Виртуальный катод представляет собой такое расположение диагностического оборудования, при котором профиль пучка на люминофорном экране соответствует профилю пучка на катоде. Достигается это расположением экрана таким образом, что расстояние между лазером и экраном равно расстоянию между лазером и катодом (рис. 11). Расположение реального оборудования и изображение профиля пучка представлены на рис. 12.

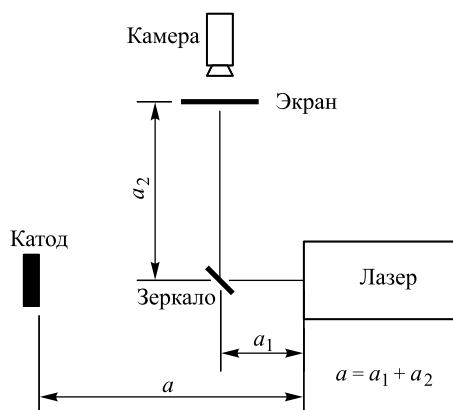


Рис. 11. Схема виртуального катода

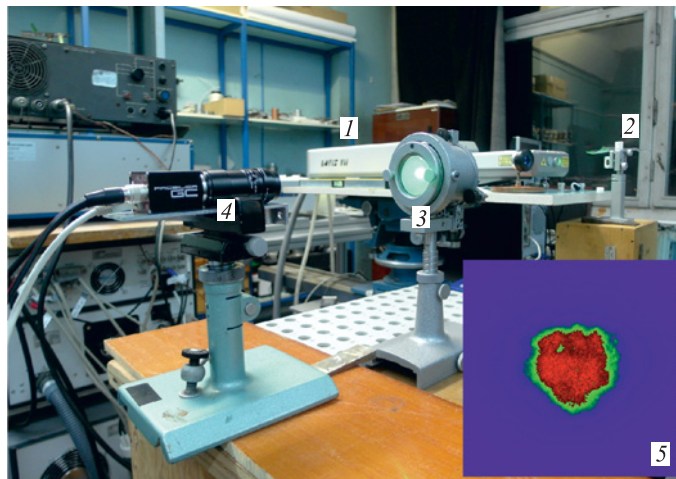


Рис. 12. Оборудование виртуального катода: 1 — лазер LS-2134; 2 — зеркало; 3 — фосфорный люминофор; 4 — видеокамера; 5 — изображение пучка лазера на виртуальном катоде

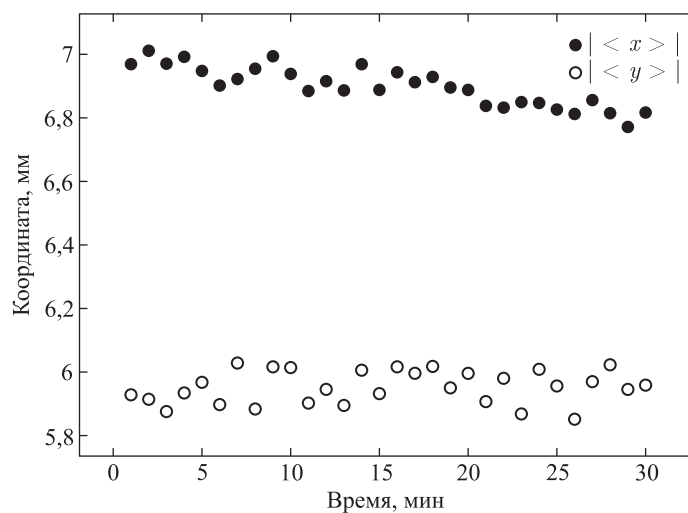


Рис. 13. Изменение средней координаты пучка лазера на виртуальном катоде во времени

Были проведены измерения стабильности координаты пучка и его средне-квadrатичного размера. Значения измерялись ежеминутно в течение 30 мин. Результаты измерений представлены на рис. 13 и 14. Как видно, пучок имеет

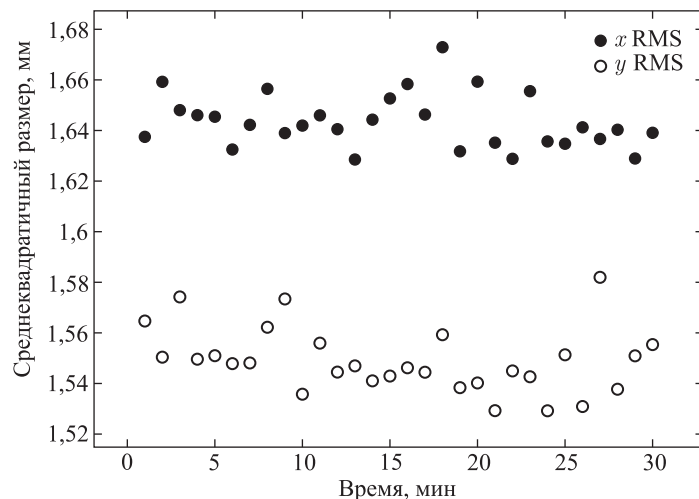


Рис. 14. Изменение среднеквадратичного размера пучка лазера на виртуальном катоде во времени

тенденцию к горизонтальному сдвигу. Для определения причин этого планируется провести более продолжительные исследования.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для диагностики лазерного пучка на стенде фотопушки ЛФВЭ ОИЯИ реализована система «виртуального катода», позволяющая визуализировать профиль лазерного пучка на катоде. Визуализация реализована с использованием разработанного в DESY Zeuthen программного комплекса AVINE. Установлено оборудование для измерения эмиттанса электронного пучка щелевым методом; написано и протестировано на лазерном пучке оригинальное программное обеспечение EmCa для вычисления эмиттанса.

Основные планы по развитию оптической диагностики электронного пучка связаны с минимизацией засветки люминофора лазерным пучком с помощью установки проницаемого для электронного пучка и непроницаемого для лазера окна либо с помощью отклонения электронного пучка магнитом. После решения этой задачи планируется завершение работ по созданию станции измерения поперечного эмиттанса пучка щелевым/Pepper-pot методом.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Balalykin N.I., Minashkin V.F., Nozdrin M.A., Shirkov G.D., Shabratov V.G. Researching the Characteristics of Photo- and Thermoemission Cathode // Phys. Part. Nucl. Lett. 2008. V. 5, No. 7. P. 605–608.

2. *Balalykin N. I., Minashkin V. Ph., Nozdrin M. A., Trubnikov G. V., Shirkov G. D., Gacheva E. I., Katin E. V., Khazanov E. A., Luchinin G. A., Poteomkin A. K., Zelenogorskii V. V., Huran J.* JINR LHEP Photoinjector Prototype // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2016 (to be published).
3. *Nozdrin M. A., Balalykin N. I., Minashkin V. F., Syresin E. M., Trubnikov G. V., Shirkov G. D.* Hollow Photocathode Conception for *e*-Gun // *Proc. of the XXII Russian Particle Accelerator Conference (RUPAC'2010, Protvino, Russia, Sept. 27–Oct. 1, 2010)* / Ed. by M. Kuzin and V. R. Shaa. 2010. P. 59–61.
4. *Nozdrin M. A., Balalykin N. I., Feshchenko A. A., Minashkin V. F., Shirkov G. D., Trubnikov G. V.* Hollow Photocathode Prototype for *e*-Gun // *Proc. of the 10th European Workshop on Beam Diagnostics and Instrumentation for Particle Accelerators (DIPAC'2011, Hamburg, Germany, May 16–18, 2011)* / Ed. by M. Marx, J. Chrin, I. Martin, R. Mueller, V. R. Shaa. 2011. P. 242–244.
5. *Balalykin N., Nozdrin M., Shirkov G., Syresin E., Trubnikov G., Gacheva E., Khazanov E., Luchinin G., Mironov S., Potemkin A., Zelenogorsky V.* JINR Powerful Laser Driver Applied for FEL Photoinjector // *Proc. of the 5th Intern. Particle Accelerator Conference (IPAC'2014, Dresden, Germany, June 15–20, 2014)* / Ed. by C. Petit-Jean-Genaz, G. Arduini, P. Michel, V. R. Shaa. 2014. P. 2906–2908.
6. *Gacheva E. I., Poteomkin A. K., Khazanov E. A., Zelenogorskii V. V., Katin E. V., Luchinin G. A., Balalykin N. I., Minashkin V. F., Nozdrin M. A., Trubnikov G. V., Shirkov G. D.* Laser Driver for a Photoinjector of an Electron Linear Accelerator // *IEEE Journal of Quantum Electronics.* 2014. July. V. 50, No. 7. P. 522–529.
7. Vimba 1.4 — The SDK for Allied Vision Cameras / Allied Vision Technologies GmbH. — URL: <https://www.alliedvision.com/en/products/software.html>
8. AVT Vimba: User Guide for Windows : V1.2 / Allied Vision Technologies GmbH. Stadtroda, Germany, Aug. 28, 2103.
9. *Weisse S., Melkumyan D., Duval P.* Advanced Video and Imaging Network Environment (AVINE): Overview / DESY. Jan. 17, 2013. URL: <http://adweb.desy.de/mcs/tine/VideoSystem/vsOverview.shtml>
10. *Weisse S., Melkumyan D., Duval P.* Status, Recent Developments and Perspective of TINE-Powered Video System, Release 3 // *Proc. of the 13th Intern. Conf. on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems (ICALEPCS'2011, Grenoble, France, Oct. 10–14, 2011)* / Ed. by M. Robichon, C. Cassady, C. Finlay, L. Graham, M. Marx, R. Müller, M. Power, V. R. Shaa, T. Thuillier, E. Vernay. 2011. P. 405–408.
11. *Weisse S., Melkumyan D., Duval P.* AVINE Video Client 3: Quick Reference : Service Release 1 (SR1) / DESY. Oct. 2013. URL: <http://adweb.desy.de/mcs/tine/VideoSystem/VideoClient3/Quick-Reference/videoClient3.html>
12. *Zhang M.* Emittance Formula for Slits and Pepper-Pot Measurement. Oct. 1996. FERMILAB-TM-1988.

Получено 3 февраля 2016 г.



Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 19.02.2016.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,06. Уч.-изд. л. 1,31. Тираж 190 экз. Заказ № 58756.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: [publish@jinr.ru](mailto:publish@jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)