

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

Электронная пушка с прозрачным фотокатодом для фотоинжектора Объединённого института ядерных исследований

Н.И. Балалыкин, В.Ф. Минашкин, М.А. Ноздрин, Г.Д. Ширков,
В.В. Зеленогорский, Е.И. Гачева, А.К. Потемкин, Й. Гуран

Электронные пушки с фотокатодом — ключевые устройства для генерации высококачественных электронных сгустков, использующихся в качестве первичного источника электронов в современных электронных линейных ускорителях. В Объединённом институте ядерных исследований создан стенд фотопушки, на котором продолжаются работы по развитию концепции полого фотокатода, облучаемого с тыльной стороны. В процессе экспериментов полый фотокатод был заменён более технологичным прозрачным фотокатодом из металлической сетки, являющейся подложкой для различных фотоматериалов в виде плёнки. Ряд тонкоплёночных катодов на подложках из кварцевого стекла изготовлен методом фотографии. Подтверждено проявление существенно влияющего на квантовый выход векториального фотоэффекта, связанного с нормальной к поверхности материала компонентой электрического поля волны. Проведено исследование зависимости квантового выхода алмазоподобных углеродных фотокатодов от технологии их изготовления. Элементный анализ плёнок проведён с использованием одновременно метода резерфордского обратного рассеяния и детектирования упругой отдачи. Методом поперечных сечений проведена оценка эмиттанса пучка электронов пушки с зарядом до 400 пКл.

Ключевые слова: фотоинжектор прямого действия, прозрачный фотокатод, векториальный фотоэффект

PACS numbers: 29.25.Bx, 79.60.-i

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2017.03.038145>

Содержание

1. Введение (1134).
 2. Оборудование (1135).
 - 2.1. Стенд фотопушки.
 - 2.2. Диагностическое оборудование.
 - 2.3. Стенд фотоинжектора.
 3. Результаты (1136).
 - 3.1. Прозрачный фотокатод из GaAs.
 - 3.2. Фотокатоды из алмазоподобных углеродных плёнок на металлической сетке.
 - 3.3. Фотокатоды из алмазоподобных плёнок, допированных азотом, на кварцевом стекле.
 - 3.4. Фотокатоды из допированного фосфором карбида кремния на кварцевом стекле.
 - 3.5. Прочие образцы катодов.
 - 3.6. Эффективность катодов.
 - 3.7. Поперечный эмиттанс.
 4. Заключение (1141).
- Список литературы (1141).

Н.И. Балалыкин, В.Ф. Минашкин, М.А. Ноздрин, Г.Д. Ширков.
Объединённый институт ядерных исследований,
ул. Жолио-Кюри 6, 141980 Дубна, Московская обл.,
Российская Федерация
E-mail: nozdrin@jinr.ru

В.В. Зеленогорский, Е.И. Гачева, А.К. Потемкин.
Институт прикладной физики РАН,
ул. Ульянова 46, 603950 Нижний Новгород, Российская Федерация
Й. Гуран. Institute of Electrical Engineering,
Dúbravská cesta 9, 84104 Bratislava, Slovak Republic

Статья поступила 30 марта 2017 г.

1. Введение

Фотокатод — важный элемент современных электронных ускорителей. Несмотря на значительные успехи, достигнутые в этой области, работы по созданию новых и оптимизации разработанных фотопушек и фотокатодов активно продолжаются. В Объединённом институте ядерных исследований (ОИЯИ) предложена новая концепция исполнения фотокатода — облучаемый с тыльной стороны "полый" фотокатод из массивного материала в виде шайбы с цилиндрическим или коническим отверстием в центре. Рабочей поверхностью катода является образующая поверхность конуса или цилиндра. Геометрия такого катода позволяет увеличить квантовый выход за счёт векториального фотоэффекта. Кроме того, облучение с тыльной стороны намного упрощает наводку на эмиттирующую поверхность и её лазерную очистку как после первоначальной установки катода, так и в во время его эксплуатации.

В процессе экспериментальных исследований полый фотокатод был заменён "прозрачным", представляющим собой сетчатую структуру микрометровых размеров. Для изготовления таких фотокатодов использовались два типа подложек.

1. Металлическая сетка (из меди или нержавеющей стали) с ячейками 40×40 мкм из проволок диаметром 30 мкм. Сетка из бескислородной меди сама может служить фотокатодом. Сетка из нержавеющей стали яв-

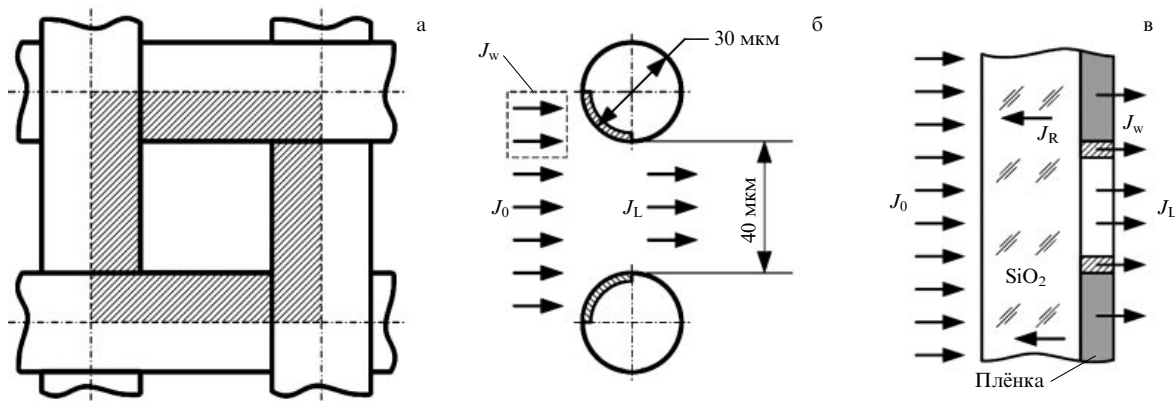


Рис. 1. Ячейка прозрачного фото катода на подложке (а, б) из металлической сетки (вид (а) сверху и (б) сбоку) и (в) из кварцевого стекла (вид сбоку). Штриховкой показана рабочая зона ячейки. J_0 — общий поток, J_w — рабочий поток, т.е. поток фотонов, имеющих возможность инициировать фотоэффект, J_L — поток потерь на пролёт, J_R — поток потерь на отражение (поток фотонов, не участвующих в фотоэффекте).

ляется хорошей подложкой для создания на ней тонкоплёночных фотокатодов как из металлов и их соединений (Cu, TiN, NbC), так и из полупроводников (алмазоподобный углерод, SiC).

2. Оптически отполированное кварцевое стекло с поперечным размером 10×10 мм и толщиной 0,4 мм.

Принципиальное различие подложек этих типов для создания прозрачных фотокатодов состоит в том, что первые обеспечивают фронтальное использование лазерного облучения с изменяющимся углом падения (рис. 1б), а вторые — облучение с тыла (рис. 1в). Именно подложки второго типа позволяют наиболее полно вызвать и использовать векториальный фотоэффект.

2. Оборудование

2.1. Стенд фотопушки

Исследования фотокатодов проводятся на стенде фотопушки. В состав стенда входят: фотопушка прямого действия с максимальным анодным напряжением 30 кВ, драйверный лазер, фокусирующий магнит и различное диагностическое оборудование. Давление в тракте стенда порядка или менее 10^{-8} Торр. Основным используемым драйверным лазером является лазер модели LS-2134 производства компании LOTIS TP (длина волны 266 нм, длительность импульса 15 нс, энергия в импульсе 15 мДж). С более подробной информацией по оборудованию стенда и используемым лазерам можно ознакомиться в [1].

2.2. Диагностическое оборудование

Заряд электронного сгустка в описываемых ниже экспериментах измерялся с помощью цилиндра Фарадея, заземлённого через измерительный конденсатор ёмкостью 560 пФ с помощью согласованного кабеля. Напряжение на конденсаторе регистрировалось 500-мегагерцевым осциллографом. Исследовалась зависимость извлекаемого заряда от энергии лазера при постоянном ускоряющем напряжении. Для расчёта квантового выхода брались значения напряжения на измерительном конденсаторе для малых извлекаемых зарядов, т.е. на том участке графика указанной зависимости, где мало влияние пространственного заряда и зависимость

заряда от энергии лазера линейна. Для фотокатодов с подложкой из металлической сетки число фотонов определялось измерением энергии падающего на катод излучения лазера с помощью измерителя мощности/энергии Ophir Nova II с пирозлектрическим датчиком PE25 с учётом прозрачности как входного окна в вакуумную камеру, так и собственно сетчатого катода. Для фотокатодов с подложкой из кварцевого стекла число фотонов определялось так же, как и для фотокатодов первого типа, но в этом случае значительная доля излучения не участвовала в процессе.

Для видеодиагностики лазерного пучка, в первую очередь на виртуальном катоде, используется видеочамера AVT (Advanced Vision Technology) Prosilica GC1380 с объективом Kowa LM50JCM и разработанным в ускорительном центре DESY (Deutsches Elektronen-Synchrotron) в Цойтене (Zeuthen) программным комплексом AVINE. Подробное описание диагностического оборудования стенда дано в [2].

Для оценки эмиттанса пучка электронов методом поперечных сечений служит система из двух разнесённых по z -координате станций с проволочными электродами (две плоскости с 15 проволочками в каждой на станцию) (рис. 2). Информация от проволочек пере-

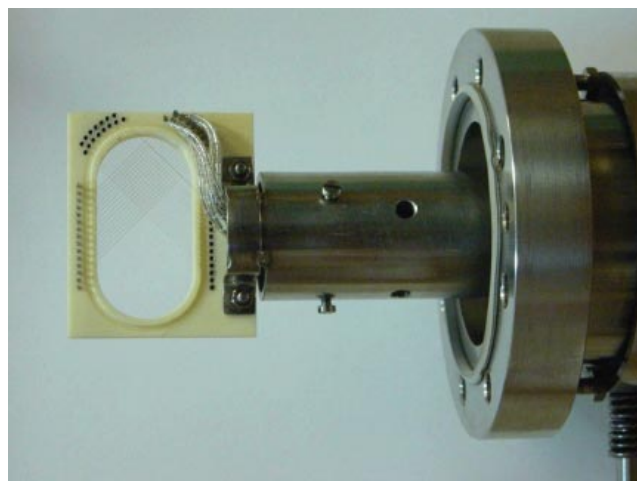


Рис. 2. Узел проволочных электродов станции измерения эмиттанса.

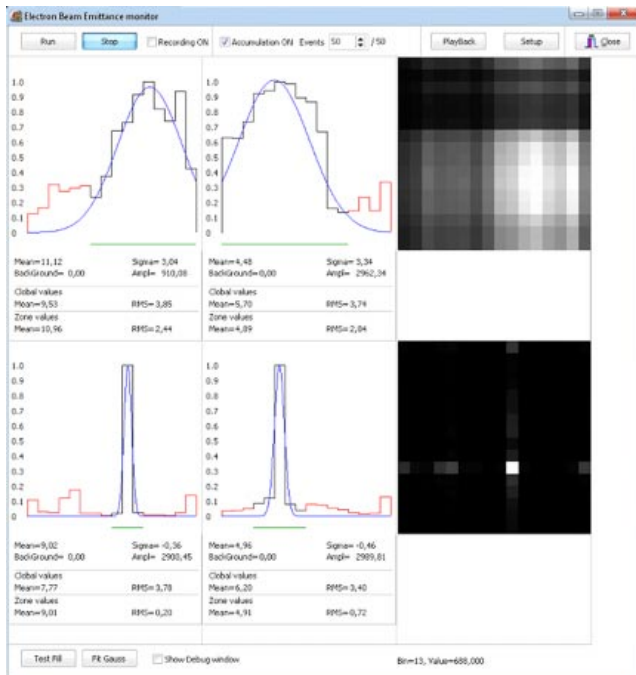


Рис. 3. Окно программы визуализации.

даётся через коаксиальные кабели на блок считывания на 60 входов и далее по интерфейсу RS-232 в персональный компьютер. В компьютере принятые данные обрабатываются и визуализируются — строятся распределения заряда по проволочкам в виде четырёх одномерных и двух двумерных гистограмм (рис. 3).

2.3. Стенд фотоинжектора

Развитием стенда фотопушки должен стать полномасштабный стенд фотоинжектора, рассчитанный на энергию до 400 кэВ. Ультрафиолетовый (УФ) лазерный драйвер [3] для стенда разработан Институтом прикладной физики РАН (Нижегород). Лазер (рис. 4) не является моноимпульсным, как используемые на стенде фотопушки, а выдаёт серии (макроимпульсы) идентичных коротких импульсов (микроимпульсов), до 8000 в серии. Частота следования макроимпульсов 10 Гц, длина

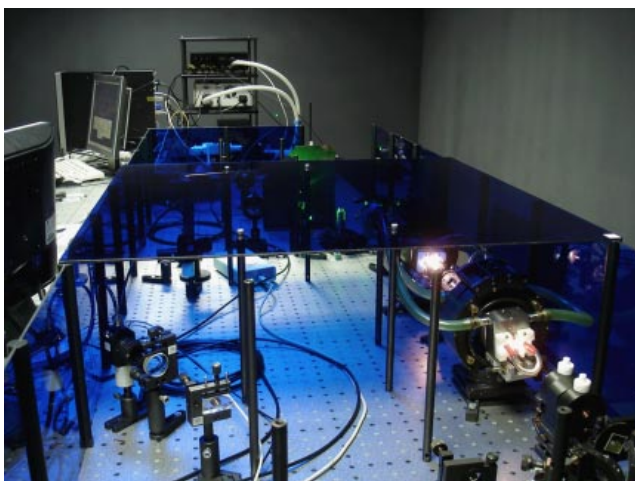


Рис. 4. Работающий лазерный драйвер.

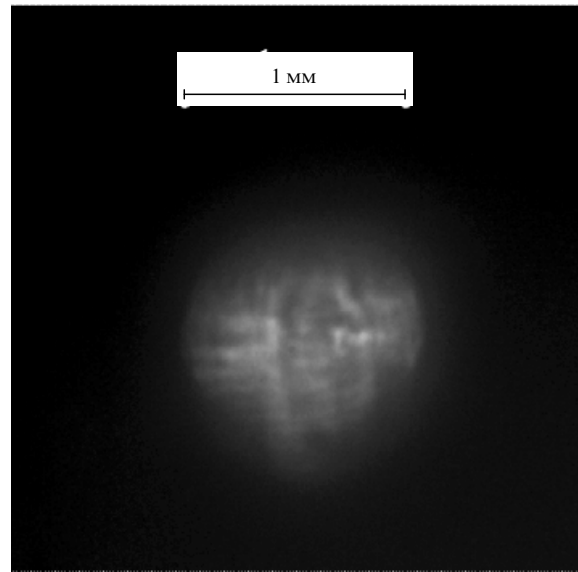


Рис. 5. Лазерный пучок в плоскости фотокатода.

волны лазера 262 нм, длительность микроимпульса 8–10 пс, энергия микроимпульса 1,5 мкДж.

Измерение частоты повторения лазерных микроимпульсов в задающем генераторе показало, что они флуктуируют в очень малом частотном интервале — около 10 Гц (проектное значение 50–100 Гц) и перестраиваются в широком диапазоне частот: $\pm 1,3$ кГц. Средняя частота повторения микроимпульсов 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 набором параметров, каждый из которых по отдельности не является рекордным. Однако их оптимальное сочетание позволяет заявить о высокой конкурентоспособности всей системы в целом на рынке лазерных драйверов для ускорительной техники.

Доставка лазерного излучения на фотокатод осуществляется с помощью оптической линии транспортировки, которая переносит на фотокатод изображение круглой диафрагмы диаметром 5 мм с уменьшением 1:5 (рис. 5). Линия транспортировки также позволяет осуществлять поворот линейной поляризации излучения на произвольный угол с помощью полуволновой пластинки и диагностику поперечного распределения пучка, формы макроимпульса и мощности УФ-излучения перед фотокатодом.

3. Результаты

3.1. Прозрачный фотокатод из GaAs

Фотокатод был изготовлен из кристаллического арсенида галлия посредством вакуумного травления в плазме фреона-12 (CCl_2F_2) при мощности 150 Вт, давлении 18 Па и потоке CCl_2F_2 30 стандартных кубических сантиметров в 1 мин (ст. $\text{см}^3 \text{мин}^{-1}$). Резистная маска, которая наносилась с помощью электронной литографии, представляла собой пластинку с квадратными отверстиями со стороной 200 мкм и с таким же расстоянием между квадратами-отверстиями в обоих направ-

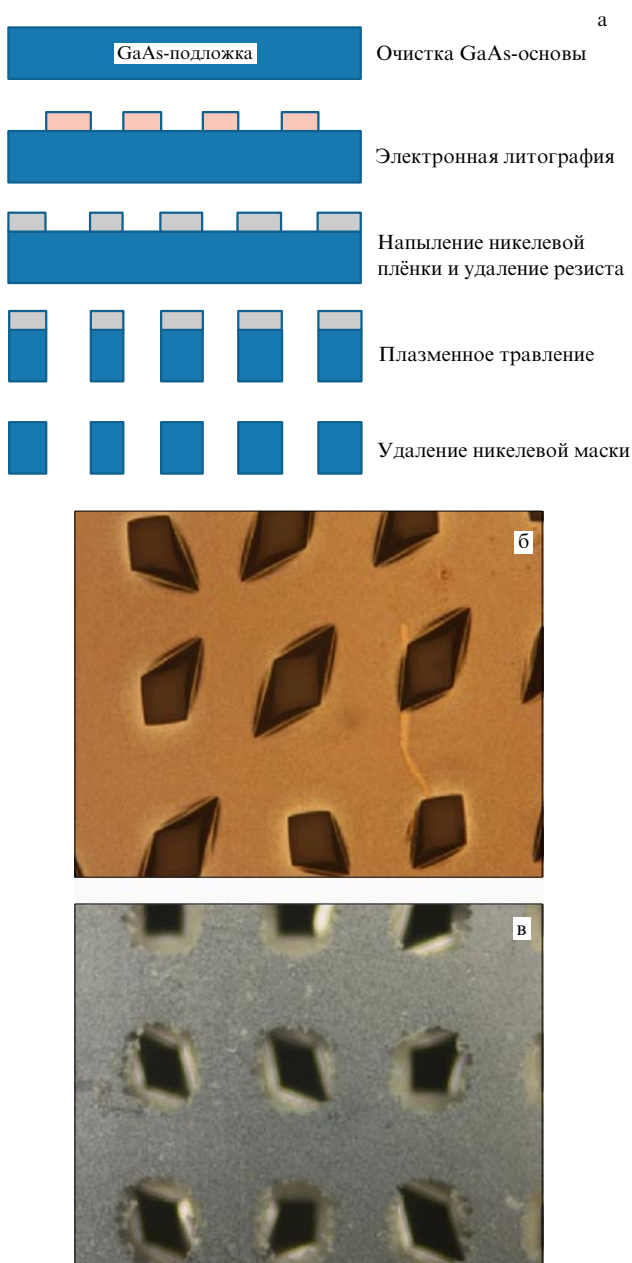


Рис. 6. (а) Схема процесса изготовления прозрачного фото катода из GaAs. Вид верхней (б) и нижней (в) поверхностей катода.

лениях. На маску напылялся слой никеля толщиной 200 нм, и после удаления резиста и излишков никеля получалась никелевая маска для травления. Травление в плазме CCl_2F_2 длилось 8 ч, затем никелевая маска удалялась травлением в растворе $\text{H}_3\text{PO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:10\text{H}_2\text{O}$ при комнатной температуре. Схема процесса изготовления катода и изображение его поверхности приведены на рис. 6.

Исследования квантового выхода проводились при анодном напряжении 12 кВ и размере пятна лазерного пучка ≤ 5 мм. Максимальный извлечённый заряд составил 2,2 нКл, что соответствовало квантовому выходу $\geq 1 \times 10^{-5}$. Надо отметить, что, поскольку исследовалась в основном техническая возможность создания прозрачного фото катода из арсенида галлия, использовался образец низкого качества, чем и обусловлен низкий квантовый выход.

3.2. Фотокатоды из алмазоподобных углеродных плёнок на металлической сетке

Алмазоподобные углеродные плёнки (DLC — Diamond-Like Carbon) наносились на подложки из кремния и на подложки-катоды из нержавеющей стали в виде сетки из проволоки диаметром 30 мкм с размером ячейки 40×40 мкм как методом реактивного магнетронного распыления (Reactive Magnetron Sputtering, RMS) мишени из углерода в смеси газов $\text{Ar} + \text{D}_2$ и $\text{Ar} + \text{H}_2$, так и методом плазмохимического газофазного осаждения (Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD) смеси $\text{CH}_4 + \text{D}_2 + \text{Ar}$ и $\text{CH}_4 + \text{H}_2 + \text{Ar}$. В процессе напыления с использованием указанных методов соблюдались стандартные процедуры и режимы, обусловленные накопленным технологическим опытом. Таким образом, исследовались четыре образца катодов: изготовленные методом RMS с водородом (MH) и дейтерием (MD) в газовой смеси и изготовленные методом PECVD с теми же газами (PH и PD).

Элементный анализ плёнок проводился одновременно по спектрам резерфордского обратного рассеяния (Rutherford Backscattering Spectroscopy, RBS) и методом детектирования упругого рассеяния атомов отдачи (Elastic Recoil Detection, ERD) [4]. Метод комбинационного (рамановского) рассеяния света использовался при анализе соотношения фаз sp^2/sp^3 (фаза графита/фаза алмаза) углерода в плёнках. Исследования проводились на микроскопе марки Thermo Fisher Scientific DXR Raman с лазерным лучом 532 нм. Пики графита и алмаза аппроксимировались гауссианами, а интенсивность вычислялась как площадь пика.

Анализ состава показал, что в состав плёнок входят углерод, водород, дейтерий и небольшое количество кислорода. Содержание этих элементов, а также отношение доли содержания фазы алмаза $I(\text{D})$ к доле содержания фазы графита $I(\text{G})$ в четырёх вышеперечисленных образцах представлено в табл. 1. Более подробная информация доступна в [5].

До определения квантового выхода алмазоподобных плёнок был исследован прозрачный катод из нержавеющей сетки-подложки. На рисунке 7 представлена зависимость заряда в ступке от энергии лазера при различных значениях ускоряющего напряжения. При ускоряющем напряжении 3 кВ заряд в ступке возрастает от 0 до 411 пКл при увеличении энергии лазера от 0 до 3 мДж. При дальнейшем увеличении энергии лазера до 4,8 мДж заряд практически не изменяется и достигает значения 413 пКл. Таким образом, фотопушка функционирует в режиме насыщения пространственного заряда при энергии лазера более 3 мДж. Аналогичная картина наблюдается при ускоряющем напряжении 5 кВ — режим насыщения наступает при энергии лазера более 3 мДж (заряд 581 пКл) и при увеличении энергии лазера до 4,8 мДж заряд слабо изменяется и достигает значения

Таблица 1. Содержание элементов (в %) и отношение $I(\text{D})/I(\text{G})$ в различных образцах DLC-плёнок

| Элемент | С | Н | Д | О | $I(\text{D})/I(\text{G})$ |
|---------|----|----|----|-----|---------------------------|
| Образец | | | | | |
| PD | 61 | 26 | 12 | 1–2 | 1,443 |
| PH | 71 | 27 | 0 | 1–2 | 1,133 |
| MD | 59 | 5 | 33 | 2–3 | 1,723 |
| MH | 64 | 33 | 0 | 2–3 | 1,473 |

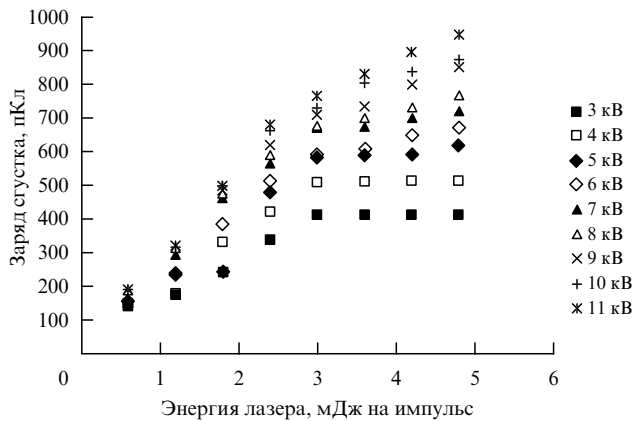


Рис. 7. Зависимость заряда сгустка от энергии лазера для различных анодных напряжений.

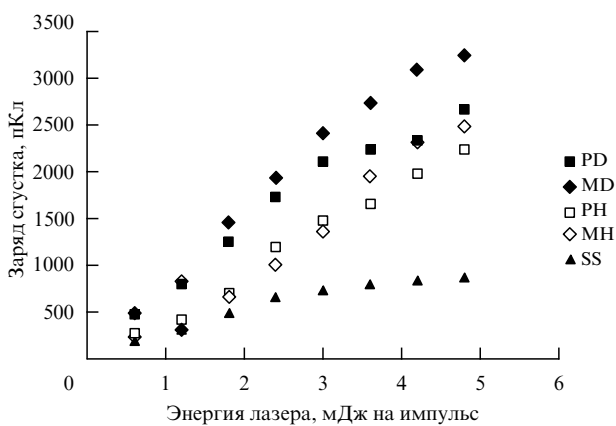


Рис. 8. Зависимость заряда сгустка от энергии лазера для различных образцов катодов, включая сетку из нержавеющей стали без напыления (SS).

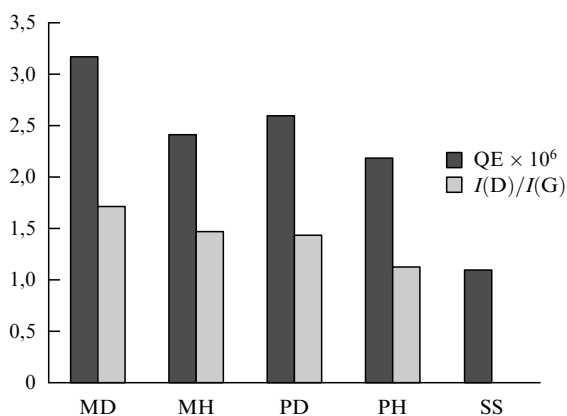


Рис. 9. Квантовый выход (QE) и отношение $I(D)/I(G)$ для различных катодов.

615 пКл. Картина меняется при увеличении напряжения от 6 до 11 кВ: наблюдается тенденция заметного нелинейного увеличения заряда при возрастании ускоряющего напряжения. Причина указанного нам не ясна. Можно лишь предположить, учитывая геометрические размеры сетки-подложки (радиус проволок 15 мкм), что к процессу фотоэмиссии начинает подключаться полевая эмиссия. Квантовый выход катода из нержавеющей стали составил $1,1 \times 10^{-6}$.

Исследования катодов с нанесёнными плёнками проводились при анодном напряжении 10 кВ. На рисунке 8 показана зависимость заряда сгустка от энергии лазера для различных образцов катодов. Для сравнения дана аналогичная зависимость для катода из сетки из нержавеющей стали без какой-либо плёнки. Увеличение энергии лазера приводит к увеличению количества фотонов, участвующих в фотоэмиссии, что в свою очередь вызывает повышение количества фотоэлектронов. Квантовый выход образцов MD, MH, PD и PH составил $3,2 \times 10^{-6}$, $2,4 \times 10^{-6}$, $2,6 \times 10^{-6}$, $2,2 \times 10^{-6}$ соответственно. На рисунке 9 показаны квантовый выход и отношение $I(D)/I(G)$ для различных образцов. Видно, что квантовый выход катода тем выше, чем больше отношение $I(D)/I(G)$.

3.3. Фотокатоды из алмазоподобных плёнок, допированных азотом, на кварцевом стекле

Плёнки из допированного азотом алмазоподобного углерода — DLC(N) — наносились на подложки из кремния, сетки из нержавеющей стали (образцы MS) и кварцевого стекла, для улучшения адгезионных свойств покрытого плёнкой из хрома толщиной 5 нм (образцы MQ), методом RMS. Магнетронная мишень представляла собой диск из графита высокой чистоты диаметром 76,2 мм. В качестве инертного газа использовался аргон высокой чистоты, в качестве реактивного газа — смесь из 90 % азота и 10 % водорода. Расход аргона для всех образцов составлял $30 \text{ ст. см}^3 \text{ мин}^{-1}$. Расход смеси 90 % N_2 + 10 % H_2 составил 2, 4 и 8 ст. $\text{см}^3 \text{ мин}^{-1}$ для образцов MQ2, MQ3 и MQ4 соответственно. DLC-плёнка для образца MQ1 напылялась без реактивного газа. Рабочее давление составляло 0,6 Па, входная мощность магнетрона складывалась из переменной (200 Вт, 13,56 МГц) и постоянной (550 В, 150 мА) компонент. Напряжение на подложкодержателе — 150 В, его температура 100 °С. Толщина плёнки на подложках из кремния и металлической сетки составляла 200–250 нм, на кварцевом стекле — около 25 нм. DLC-плёнки на кварцевом стекле методом послойной литографии (lift-off) наносилась алюминиевая сетка для натекания заряда. На рисунке 10 представлены схема технологии изготовления катодов из DLC-плёнки на кварцевом стекле и фотография такого катода.

Для исследования векториального фотоэффекта катоды на кварцевом стекле облучались интенсивными лазерными импульсами (3–4 импульса с интенсивностью 5 МВт см^{-2}) для создания перфорации микрометровых размеров в плёнках из хрома и DLC.

Использовалась методика исследования состава плёнок, аналогичная описанной в разделе 3.2. Состав образцов MS1 – MS4 и соотношение алмазной и графитной фаз приведены в табл. 2. Более детально исследования состава плёнок описаны в [6].

Катоды исследовались при анодном напряжении 20 кВ. На рисунке 11а представлена зависимость заряда сгустка от энергии лазера для образцов MQ1 – MQ4 после микрометровой перфорации. Величина заряда, извлечённого из образцов MS1 – MS4, была примерно в три раза меньше. На рисунке 11б показан квантовый выход всех исследованных образцов. Видно, что квантовый выход возрастает при увеличении концентрации

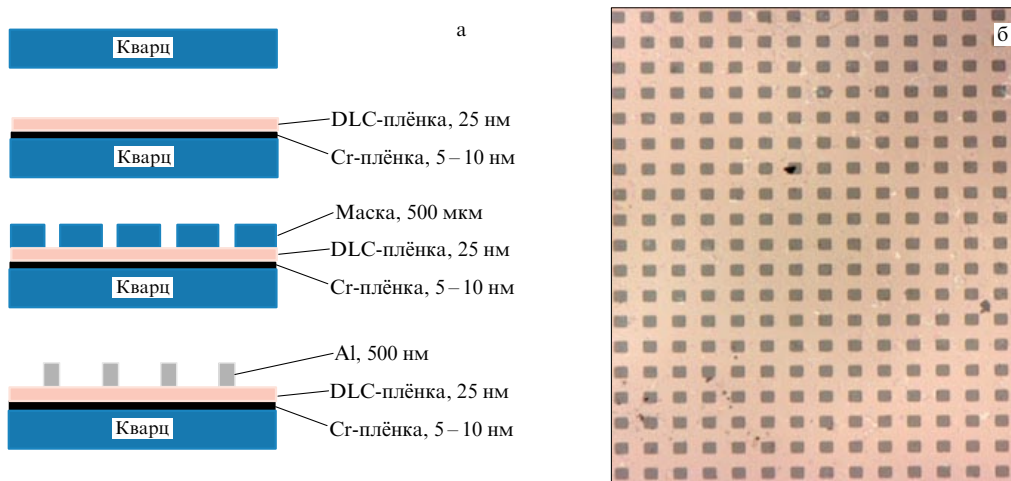


Рис. 10. (а) Технология изготовления прозрачного фотокатода на кварцевом стекле, покрытом DLC-плёнкой. (б) Внешний вид такого катода.

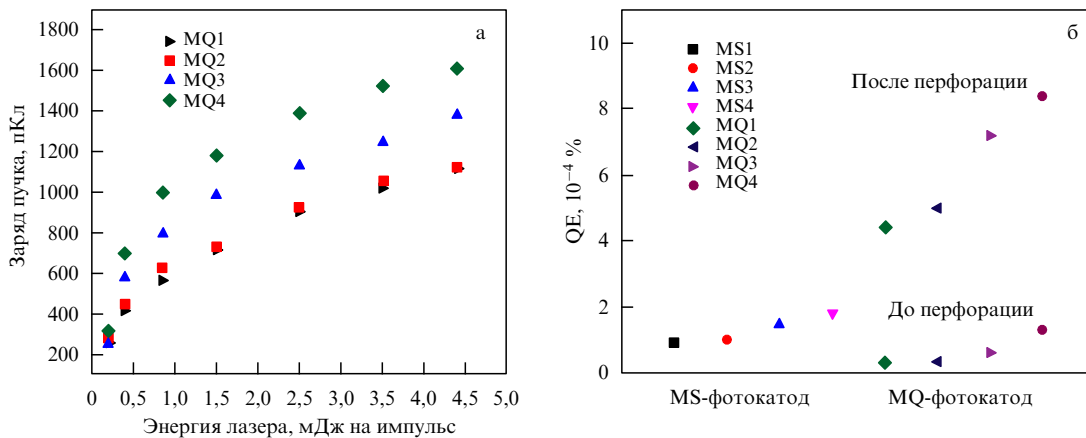


Рис. 11. (а) Зависимость заряда сгустка от энергии лазера. (б) Квантовый выход для образцов MS и MQ до и после перфорации.

Таблица 2. Содержание элементов (в %) и отношение $I(D)/I(G)$ в различных образцах DLC(N)-плёнок

| Образец \ Элемент | C | N | H | O | $I(D)/I(G)$ |
|-------------------|----|-----|----|-----|-------------|
| MS1 | 90 | 1–2 | 7 | 1–2 | 1,49 |
| MS2 | 70 | 15 | 14 | 1–2 | 0,45 |
| MS3 | 64 | 21 | 14 | 1–2 | 0,78 |
| MS4 | 61 | 23 | 15 | 1–2 | 1,49 |

азота в плёнке. Также наблюдается значительное увеличение квантового выхода после перфорации в MQ-фотокатодах из-за векториального фотоэффекта.

3.4. Фотокатоды из допированного фосфором карбида кремния на кварцевом стекле

Плёнки из допированного фосфором карбида кремния (SiC(P)) наносились на кремниевую подложку для исследования их состава и на отполированное с обеих сторон кварцевое стекло (10 × 10 мм) для изготовления прозрачных фотокатодов методом PECVD. Технические особенности подготовки различных образцов приведены в табл. 3.

Для получения перфорации в плёнке использовался метод сухого травления в плазме SF₆. Травление производилось на установке Oxford Instruments Plasmalab

Таблица 3. Технологические данные подготовки различных образцов SiC(P)-плёнок

| Образец | Поток газа, стандартные см ³ мин ⁻¹ | | | | T, °C | P, Па | W, Вт |
|---------|---|------------------|----------------|-----------------|-------|-------|-------|
| | CH ₄ | SiH ₄ | H ₂ | PH ₃ | | | |
| QP1 | 20 | 5 | 100 | 10 | 350 | 100 | 100 |
| QP2 | | | | 30 | | | |
| QP3 | | | | 20 | | | |
| QP4 | | | | 50 | | | |
| QP5 | | | | 100 | | | |

System100 ICP-RIE со следующими параметрами процесса: поток SF₆ — 20 ст. см³ мин⁻¹, мощность и частота источника индуктивно-связанной плазмы 400 Вт и 13,56 МГц соответственно, давление 10 мТорр, температура электрода 20 °C. Время травления составляло 4–6 мин в зависимости от толщины плёнки. В качестве маски использовалась нанесённая с помощью фотолитографии и послойной литографии алюминиевая сетка, которая удалялась после травления. Затем также с помощью послойной литографии наносилась контактная сетка из алюминия. Схема технологии изготовления

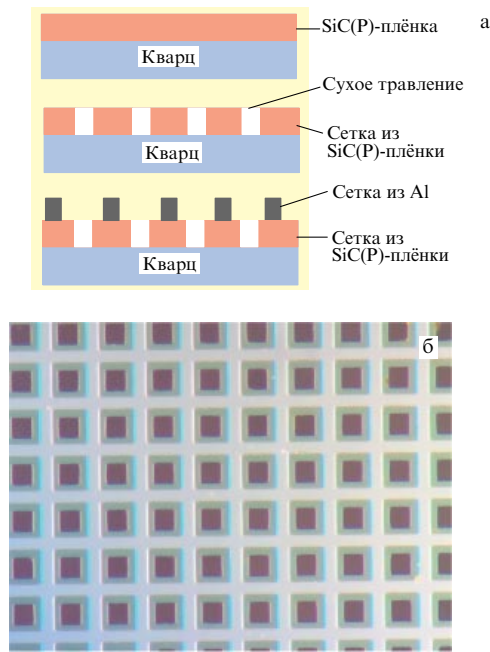


Рис. 12. Технология изготовления прозрачного фотокатода на кварцевом стекле, покрытом SiC(P)-плёнкой (а), и внешний вид такого катода (б).

Таблица 4. Содержание элементов (в ат. %) в различных образцах SiC(P)-плёнок

| Образец \ Элемент | Si | C | H | P |
|-------------------|----|----|----|----|
| QP1 | 35 | 32 | 32 | 1 |
| QP2 | 35 | 32 | 31 | 2 |
| QP3 | 34 | 30 | 31 | 5 |
| QP4 | 33 | 29 | 28 | 10 |
| QP5 | 31 | 26 | 28 | 15 |

прозрачного катода и внешний вид получившейся сетки приведены на рис. 12. В результате изготовленные катоды представляют собой сетку из SiC(P) с квадратными ячейками 20×20 мкм и расстоянием 20 мкм между ячейками.

Методика исследования состава плёнок аналогична описанной в разделе 3.2. Результаты исследования приведены в табл. 4. Все плёнки содержали, помимо указанных элементов, небольшое количество кислорода и азота вследствие адсорбции из стенок камеры во время напыления.

Квантовый выход различных образцов прозрачных фотокатодов из допированного фосфором карбида кремния приведён на рис. 13. Как видно, квантовый выход возрастает с увеличением содержания фосфора до 10 ат.% и при дальнейшем повышении содержания фосфора резко убывает. Причиной этого может быть существенное изменение свойств катода, в результате которого энергия сродства к электрону начинает увеличиваться.

3.5. Прочие образцы катодов

Помимо описанных выше, исследовались катоды на подложках обоих вариантов (сетка из нержавеющей стали и кварцевое стекло) из нитрида титана, карбида ниобия, допированного фосфором карбида кремния, а

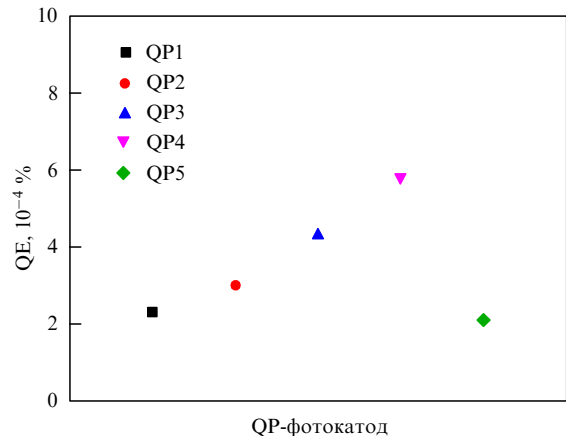


Рис. 13. Квантовый выход различных образцов SiC(P)-катода.

также катод из медной сетки без напыления. Максимальный извлечённый заряд и квантовый выход катода из медной сетки составили 840 пКл и $9,8 \times 10^{-6}$ соответственно.

В целом, максимальный квантовый выход катодов на подложках из кварцевого стекла был в 2–5 раз выше максимального квантового выхода катодов на подложках из металлической сетки. Так, для TiN на сетке из нержавеющей стали максимальный квантовый выход составил $1,8 \times 10^{-6}$, а на кварцевом стекле — $5,0 \times 10^{-6}$ (извлечённый заряд 410 пКл), а для NbC — $1,5 \times 10^{-6}$ и $7,2 \times 10^{-6}$ (заряд 570 пКл) соответственно. Для катода из SiC(P) на кварцевом стекле максимальный извлечённый заряд и квантовый выход составили соответственно 800 пКл и $9,0 \times 10^{-6}$.

3.6. Эффективность катодов

Можно заметить, что измеренный квантовый выход заметно ниже, чем для "традиционных" фотокатодов, облучаемых с передней стороны. Это связано с методикой оценки количества фотонов, попадающих на катод. В нашем случае за это количество принимаются все фотоны, не пролетевшие сквозь катод, что составляет около 50 % от их общего числа в случае пологого и 75 % в случае прозрачных катодов. Однако в действительности фотоэффект могут инициировать только те фотоны, которые, наоборот, пролетают сквозь катод, а именно фотоны, которые проходят насквозь почти всю плёнку и выбивают фотоэлектроны из её задней части, а также те, которые пролетают в непосредственной близости от стенок ячейки сетки (на расстоянии 20 нм и менее) (рис. 14). Площадь этой 20-нанометровой зоны при размере ячейки 30×30 мкм (речь идёт о перфорированных плёнках на кварцевом стекле; в случае проволочной сетки векториальный эффект вносит заметно меньший вклад в связи с изогнутостью поверхности ячейки) около $1,2 \text{ мкм}^2$, тогда как площадь зоны поглощения намного больше — 2700 мкм^2 . Исходя из сравнения этих площадей можно предположить уменьшение величины фотоэффекта в 2250 раз — более чем на три порядка. Однако такая довольно грубая оценка является заниженной (в частности, в связи с тем, что в ней не учтён вклад фотонов, прошедших сквозь плёнку и выбивших фотоэлектроны из её задней части), реальная оценка количества электронов, имеющих возможность инициировать фотоэффект, крайне затруднительна.

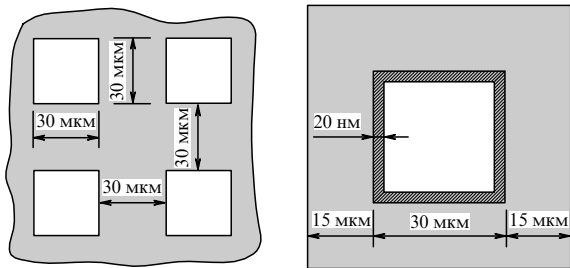


Рис. 14. Иллюстрация рабочей зоны прозрачного фотокатода.

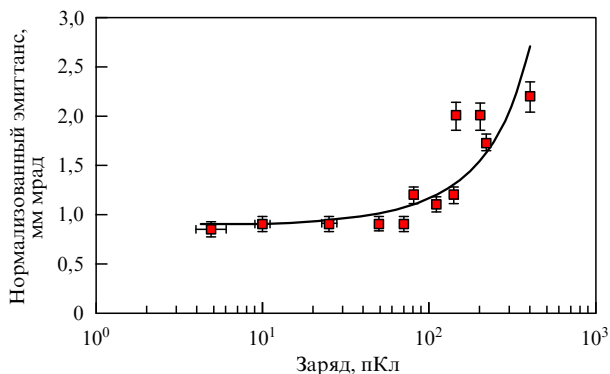


Рис. 15. Зависимость поперечного эмиттанса от заряда сгустка.

Толщина наносимых на металлическую сетку плёнок определяется с учётом технологических требований и не лимитируется снизу, обычно она составляет 100–150 нм. В случае плёночных фотокатодов на кварцевом стекле для увеличения эффективности толщина плёнки должна быть как можно меньше глубины оптического скина. Например, расчётная глубина скин-слоя меди для излучения на длине волны 266 нм составляет около 20 нм и толщина плёнки должна быть не более 4–5 нм. Подготовка и исследование фотокатодов на основе перфорированных плёнок такой толщины являются одним из основных направлений наших дальнейших исследований.

Electron gun with a transmission photocathode for the Joint Institute for Nuclear Research photoinjector

N.I. Balalykin⁽¹⁾, V.F. Minashkin⁽¹⁾, M.A. Nozdrin⁽¹⁾, G.D. Shirkov⁽¹⁾, V.V. Zelenogorskii⁽²⁾, E.I. Gacheva⁽²⁾, A.K. Potemkin⁽²⁾, J. Huran⁽³⁾

⁽¹⁾ Joint Institute for Nuclear Research, ul. Joliot-Curie 6, 141980 Dubna, Moscow region, Russian Federation

⁽²⁾ Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences, ul. Ul'yanova 46, 603950 Nizhny Novgorod, Russian Federation

⁽³⁾ Institute of Electrical Engineering, Dúbravská cesta 9, 84104 Bratislava, Slovak Republic

E-mail: ⁽¹⁾ nozdrin@jinr.ru

Photocathode electron guns are key to the generation of high-quality electron bunches which are currently the primary source of electrons for linear electron accelerators. The photogun test bench built at the Joint Institute for Nuclear Research (JINR) is currently being used to further develop the hollow (backside irradiated) photocathode concept. A major result was the replacement of the hollow photocathode by a technologically more feasible transmission photocathode made from a metal mesh which serves as a substrate for films of various photomaterials. A number of thin-film cathodes on quartz glass substrates are fabricated by photolithography. Vectorial photoeffect (related to the surface-normal component of the wave electric field) is observed and found to significantly affect the quantum yield. The dependence of the quantum yield of diamond-like carbon photocathodes on the manufacturing technology is investigated. The Rutherford backscattering and elastic recoil detection techniques are combined to carry out the elemental analysis of the films. An estimate of the emittance of a 400 pC electron beam is obtained using the cross-section method.

Keywords: DC photoinjector, transmissive photocathode, vectorial photoeffect

PACS numbers: 29.25.Bx, 79.60.–i

Bibliography — 6 references

Uspekhi Fizicheskikh Nauk 187 (10) 1134–1141 (2017)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2017.03.038145>

3.7. Поперечный эмиттанс

Была экспериментально оценена величина поперечного эмиттанса пучка электронов с катода из медной сетки. На рисунке 15 приведена зависимость нормализованного поперечного эмиттанса от заряда сгустка для зарядов от 5 до 400 пКл. Ожидается дальнейшее уменьшение эмиттанса при повышении качества (гладкости) поверхности плёнки.

4. Заключение

Проведены исследования прозрачных фотокатодов в виде тонких плёнок на подложках из металлической сетки микрометровых размеров и кварцевого стекла. Максимальный квантовый выход катода из медной сетки без плёнки составил $9,8 \times 10^{-6}$, катода с плёнкой из соединения металла — $7,2 \times 10^{-6}$ (NbC), полупроводниковых катодов — $8,4 \times 10^{-6}$ (DLC(N)) и $9,0 \times 10^{-6}$ (SiC(P)) — все на подложках из кварцевого стекла. Показана перспективность использования векториального фотоэффекта.

Основные направления дальнейших исследований связаны с повышением эффективности катодов путём изготовления плёнок толщиной не более 4–5 нм и использованием лазеров с длиной волны менее 200 нм.

Список литературы

1. Балалыкин Н И и др. *Письма в ЭЧАЯ* 13 1398 (2016); Balalykin N I et al. *Phys. Part. Nucl. Lett.* 13 897 (2016)
2. Ноздрин М А и др., Сообщение ОИЯИ Р9-2016-6 (Дубна: ОИЯИ, 2016)
3. Gacheva E I et al. *IEEE J. Quantum Electron.* 50 522 (2014)
4. Kobzev A P et al. *Vacuum* 83 S124 (2009); in *Proc. of the Seventh Intern. Conf. on Ion Implantation and Other Applications of Ions and Electrons, ION 2008, 16–19 June 2008, Kazimierz Dolny, Poland*
5. Balalykin N I et al., in *2nd Intern. Conf. on Emission Electronics, Saint-Petersburg, Russia, 30 June–4 July 2014, ICEE 2014* (Piscataway, NJ: IEEE, 2014) p. 1
6. Balalykin N I et al. *J. Phys. Conf. Ser.* 700 012050 (2016)

Received 30 March 2017

Physics–Uspekhi 60 (10) (2017)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2017.03.038145>