

УДК 621.3.032.217

Экспериментальные исследования характеристик фотокатодов ультрафиолетового диапазона спектра

Пхайко Н. А., Кондратьев А. А., Пахомов С. Н.,
Потапов А. В., Сорокин И. А., Тищенко А. С.

*ФГУП Российский Федеральный Ядерный Центр —
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина
ул. Васильева, д. 13, г. Снежинск,
Челябинская область, 456770, Российская Федерация
dep5@vniitf.ru*

Получено: 20 июля 2022 г.

Отрецензировано: 22 июля 2022 г.

Принято к публикации: 22 июля 2022 г.

Аннотация: *Фотоэмиссионные элементы с высокой чувствительностью к квантам ультрафиолетового (УФ) диапазона спектра имеют большой круг практических применений в ускорительной технике и генераторах сверхкоротких электромагнитных импульсов СВЧ-диапазона. Потенциальные выгоды применением УФ фотокатодов в данных областях техники определяются таким сочетанием их свойств, как высокая электропрочность и большой квантовый выход. В докладе приведены результаты экспериментальных исследований характеристик фотокатодов на основе магний-бариевых (Mg-Ba) сплавов и иодида цезия (CsI). Фотокатоды изготавливались методом термического вакуумного распыления на полированные подложки из нержавеющей стали. Впервые показано, что электрическая прочность вакуумных промежутков с УФ катодами существенно выше, чем с сурьмяно-цезиевыми катодами видимого диапазона спектра (для CsI катодов — в 2,5 раза, для Mg-Ba катодов — более, чем в три раза). Квантовая эффективность Mg-Ba катодов составляет ~1 % на длине волны 247 нм, CsI катодов — 7,5 % на длине волны 196 нм. Впервые приведены результаты исследований динамики снижения квантовой эффективности фотокатодов при импульсно-периодическом облучении их лазерными импульсами с флюенсом ~6 мкДж/см². Проведено сравнение характеристик фотокатодов с точки зрения их практических применений.*

Ключевые слова: *фотоэмиссионные элементы, генераторы сверхкоротких электромагнитных импульсов, магний-бариевый сплав, иодид цезия, термическое вакуумное распыление, электрическая прочность, квантовая эффективность.*

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Экспериментальные исследования характеристик фотокатодов ультрафиолетового диапазона спектра / Н. А. Пхайко и др. // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2022. Т. 5, № 3. С. 325—341.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Экспериментальные исследования характеристик фотокатодов ультрафиолетового диапазона спектра / Н. А. Пхайко, А. А. Кондратьев, С. Н. Пахомов и др. // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2022. — Т. 5, № 3. — С. 325—341.

1. Введение

Для создания электронных пучков с высоким зарядом и малым эмитансом в ускорительной технике используется фотоинжектор [1, 2]. Компенсация сил пространственного заряда в таких устройствах достигается за счет увеличения электрического поля в катод-анодном зазоре. Но повышению электрического поля препятствует вакуумный пробой, порог напряженности поля которого зависит от материала фотокатода (ФК) и от состояния его поверхности. Помимо этого, фотокатоды должны иметь высокую квантовую эффективность (КЭ), при этом время отклика фототока для мгновенного источника излучения не должно превышать единиц пикосекунд. Важным параметром, определяющим практическое применение фотокатода, является также ресурс его работы. Поэтому исследование характеристик перспективных типов фотокатодов является актуальной задачей.

В первых инжекторных системах ускорителей электронов использовались полупроводниковые $SbCs_3$ фотокатоды. Но, несмотря на их высокую квантовую эффективность $(5—15) \cdot 10^{-2}$ эл./квант ($\lambda = 405$ нм), вакуумный промежуток с таким типом фотокатодов обладал низкой (50 кВ/мм) электрической прочностью [3, 4]. Также такие фотокатоды чувствительны к остаточной атмосфере внутри фотоинжектора, что значительно снижало время их непрерывной работы.

Более высокой электрической прочности катод-анодного зазора возможно достичь за счет использования металлических фотокатодов. Так для магниевого ФК она составляет 120 кВ/мм [5]. Он также обладает малым временем отклика фототока для мгновенного источника излучения. Существенным недостатком такого фотокатода являлась его низкая квантовая эффективность $7 \cdot 10^{-4}$ эл./квант ($\lambda = 266$ нм). Однако существуют металлические катоды на основе $Mg-Ba$ сплавов, которые обладают селективной чувствительностью в области ближнего ультрафиолета. В различных ли-

тературных источниках значения квантовой эффективности для таких ФК имеют сильное расхождение: $7 \cdot 10^{-2}$ эл./квант ($\lambda = 280$ нм) [6—8]; $6 \cdot 10^{-3}$ эл./квант ($\lambda = 249$ нм) [9]; $5 \cdot 10^{-3}$ эл./квант ($\lambda = 253$ нм) [10, 11]. Но результатов исследований электрической прочности вакуумного промежутка с *Mg-Ba* фотокатодом, а также его ресурса работы при облучении ФК импульсно-периодическим лазерным излучением (ЛИ) в литературе представлено не было.

К стабильным на воздухе фотокатодам, имеющим высокую чувствительность в области длин волн менее 200 нм, можно отнести фотокатоды на основании щелочно-галогидного соединения *CsI* [12—15]. Исследование *CsI* в качестве материала для фотокатода инжекторов электронов проводилось в ЦЕРНе [16]. Его квантовая эффективность составляла $7.5 \cdot 10^{-2}$ эл./квант ($\lambda = 193$ нм). Были представлены результаты долговременной работы *CsI* фотокатода в переменном электрическом поле амплитудой 70 МВ/м и частотой повторения 2998.54 МГц. Длительность одиночного импульса составляла 2,5 мкс. Разовые пробои были замечены при увеличении амплитуды напряженности поля на катоде до 73 МВ/м, а при увеличении его до 80 МВ/м наблюдались постоянные пробои с разрушением чувствительного слоя. Но результатов исследований электрической прочности вакуумного промежутка с *CsI* фотокатодом при подаче на него импульсного напряжения питания, а также ресурса работы ФК при облучении его импульсно-периодическим ЛИ в литературе представлено не было.

Целью работы является исследование электрической прочности вакуумного промежутка с *CsI* и *Mg-Ba* фотокатодом, а также их ресурса работы при облучении импульсно-периодическим ЛИ.

2. Разборный вакуумный фотоэлемент

Для отработки технологии изготовления ФК и исследования их характеристик разработан и изготовлен разборный высоковольтный вакуумный фотоэлемент (ФЭ). Его конструкция представлена на рисунке 1.

Характеристики разборного фотоэлемента.

Подложка фотокатода представляет собой цилиндр диаметром 60 мм из стали 12X18H9T, рабочая поверхность которого полировалась алмазными пастами и имела шероховатость $Ra = 7 \pm 3$ нм.

Анод представляет собой набор вольфрамовых проволочек диаметром 0,05 мм, расположенных параллельно друг другу с шагом 0,5 мм и закрепленных на рамке.

Расстояние между катодом и анодом равно $0,77 \pm 0,02$ мм.

Волновое сопротивление коаксиальной линии ФЭ 75 Ом.

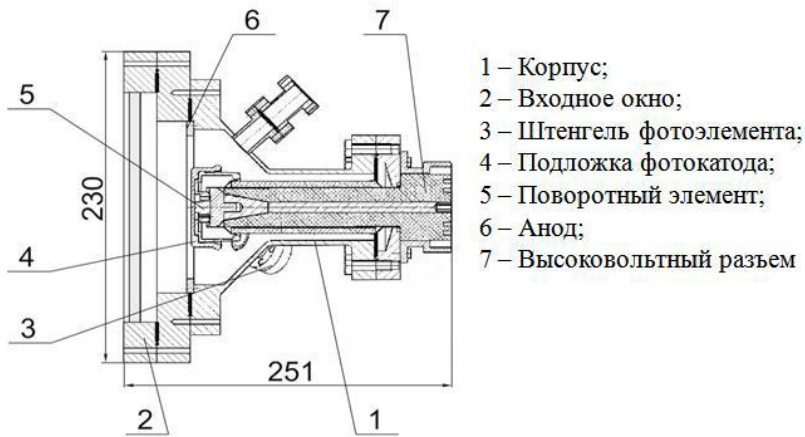


Рис. 1. Конструкция разборного фотоэлемента.

Fig. 1. The design of a collapsible photocell

Таблица 1. Коэффициент пропускания входного окна фотоэлемента.

Table 1. Transmittance of the input window of the photocell

Длина волны ЛИ, нм	Угол падения ЛИ	
	0°	45°
195,7	0,68±0,07	0,58±0,07
259,6	0,81±0,05	0,72±0,05

Измерения напряжения непосредственно на анод-катодном зазоре не представлялось возможным, поэтому для его регистрации был разработан емкостной делитель напряжения, размещавшийся в высоковольтном разьеме фотоэлемента. Расстояние от делителя до катод-анодного зазора составляло ~20 см. На рисунке 2 представлена конструкция емкостного делителя напряжения.

Коэффициент деления емкостного делителя равен 3700 ± 600 . Импульсное напряжение ($\tau \approx 5$ нс), регистрируемое емкостным делителем, отличается по амплитуде в $K = 1,2$ раза (определялось расчетно) от напряжения на анод-катодном зазоре и равно сумме напряжений проходящей и отраженной волн от емкости анод-катодного зазора.

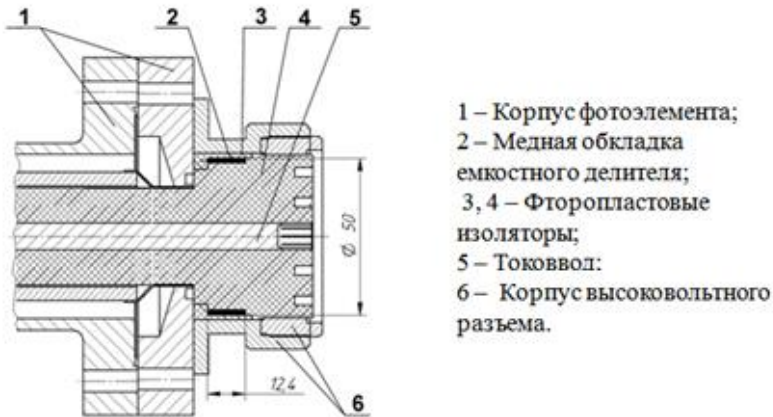


Рис. 2. Емкостной делитель напряжения.

Fig. 2. Capacitive voltage divider

3. Изготовление и исследование квантовой эффективности *CsI* фотокатода

Иодид-цезиевый фотокатод изготавливался методом резистивного распыления в установке УВН-2М с последующим переносом его через атмосферу и монтажом в разборный фотоэлемент. Для удаления воды из фоточувствительного слоя фотоэлемент прогревали до 70°C при постоянной откачке в течение 3 часов. Затем ФЭ снимали с откачного поста для проведения исследований.

Для проведения исследований было изготовлено два фотокатода с различными условиями напыления фоточувствительного слоя, которые представлены в таблице 2. Исследование КЭ проводилось при облучении ФК излучением 4-й гармоники *Ti:Sa* фемтосекундного лазера. Параметры проведения исследований КЭ также приведены в таблице 2.

Зависимость квантовой эффективности *CsI* фотокатода № 2 от напряженности электрического поля в анод-катодном зазоре представлена на рисунке 3.

Максимальная зарегистрированная в эксперименте квантовая эффективность составила $7,5 \cdot 10^{-2}$ эл./квант при напряженности электрического поля на катоде равном 7,8 кВ/мм. Данный результат хорошо согласуется с данными работы [12].

Таблица 2. Условия напыления фоточувствительного слоя.
Table 2. Conditions for deposition of the photosensitive layer

	Фотокатод №1	Фотокатод №2
Обезгаживание установки УВН-2М	нет	есть
Скорость напыления CsI. Å/сек	5	0,7
Толщина фотослоя, нм	500	400
Энергия ЛИ ($\lambda=195,7$), мкЛж	$1,1\pm 0,1$	$0,5\pm 0,1$
Напряженность электрического поля на катоде, кВ/мм	$1,94\pm 0,12$	$1,55\pm 0,12$
Квантовая эффективность в центре фотокатода, эл./квант	$(1,7\pm 0,3)\cdot 10^{-2}$	$(2,6\pm 0,4)\cdot 10^{-2}$

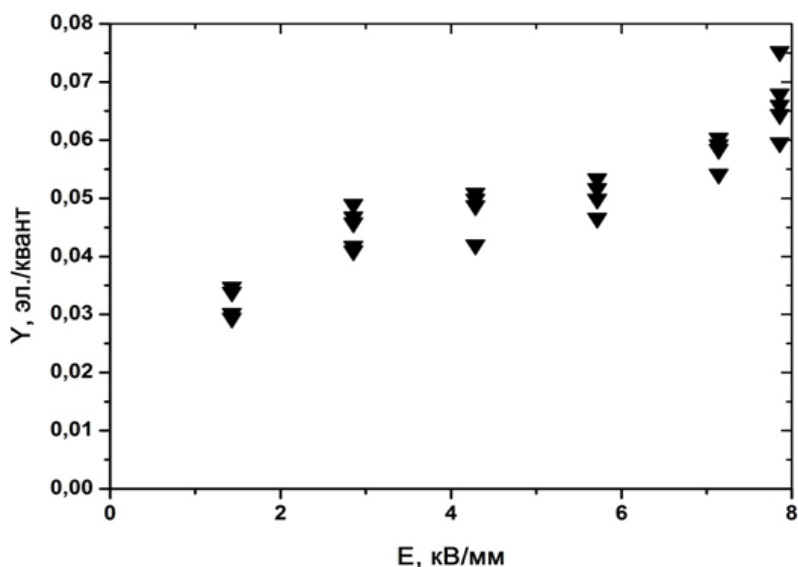


Рис. 3. Зависимость квантовой эффективности CsI фотокатода № 2 от напряженности поля в анод-катодном зазоре.

Fig. 3. Dependence of the quantum efficiency CsI of photocathode no. 2 on the field strength in the anode-cathode gap

4. Исследование электрической прочности вакуумного зазора с CsI фотокатодом

Для исследования электрической прочности катод-анодного промежутка на ФЭ подавалось импульсное напряжение от 13 кВ до максимального значения генератора импульсного напряжения (ГИН). На резистивной согласованной нагрузке 75 Ом максимальная амплитуда импульсов напряжения составляла ~105 кВ, а их длительность на полувысоте ~5 нс (рисунок 4). На рисунке 5 представлены осциллограммы импульсов, полученные с помощью емкостного делителя при различных напряжениях питания ФЭ.

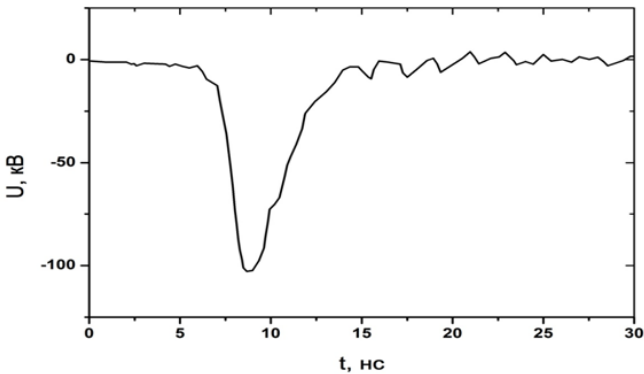


Рис. 4. Форма импульса ГИН на согласованную нагрузку 75 Ом.

Fig. 4. Impulse voltage generator pulse shape to a matched load of 75 Ohm

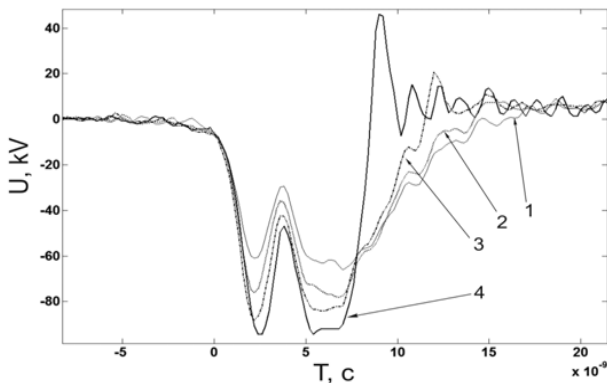


Рис. 5. Осциллограммы напряжений, зарегистрированные с помощью емкостного делителя (в скобках указаны значения напряжения на фотокатоде с учетом поправочного коэффициента $K = 1,2$): 1 – 60 кВ (72 кВ); 2 – 70 кВ (84 кВ); 3 – 84 кВ (100 кВ); 4 – 94 кВ (112 кВ).

Fig. 5. Oscillograms of voltages recorded using a capacitive divider (in parentheses are the voltage values on the photocathode, taking into account the correction factor $K = 1.2$):
1 – 60 kV (72 kV); 2 – 70 kV (84 kV); 3 – 84 kV (100 kV); 4 – 94 kV (112 kV)

На рисунке видно, что при напряжении на фотокатоде 84 кВ и менее никаких изменений профиля импульса не наблюдалось. На поверхности фотокатода следов пробоев замечено также не было.

При увеличении напряжения на фотокатоде до 100 кВ за счет автоэлектронной эмиссии начинает развиваться пробой и происходит уменьшение длительности импульса. На поверхности фотокатода замечены небольшие (менее 1 мм) следы пробоев. Их появление имело несистематический характер. После нескольких десятков импульсов пробой почти полностью прекратился, произошла тренировка фотокатода.

При увеличении напряжения на фотокатоде до 112 кВ произошло значительное сокращение длительности импульса (обострение), что, вероятно, было связано с переходом автоэлектронной эмиссии во взрывную, однако амплитуда импульса при этом изменялась мало. Воздействие таких импульсов напряжения с частотой следования 1 кГц (тысячи импульсов) не привело к улучшению электрической прочности вакуумного зазора. На поверхности фотокатода замечены следы значительных разрушений, представленные на рисунке 6.

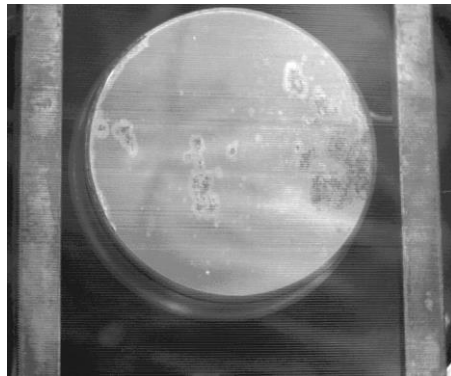


Рис. 6. Внешний вид фотокатода № 2 после исследования электропрочности.

Fig. 6. Appearance of photocathode No. 2 after the study of electric strength

С учетом расстояния като-анодного зазора, равного 0,77 мм, достигнутая электрическая прочность составила ~ 130 кВ/мм для импульсов напряжения ГИН с длительностью ~ 5 нс.

5. Исследование ресурса работы CsI фотокатода при его облучении импульсно-периодическими лазерными импульсами

Для исследования ресурса работы CsI фотокатодов их рабочую поверхность освещали излучением 4-й гармоники *Ti:Sa* фемтосекундного ла-

зера ($P_{\text{ли}} = 6,2 \text{ мкДж/см}^2$, $\lambda = 195,7 \text{ нм}$), при этом постоянно контролировали их КЭ. Надо отметить, что исследование ресурса работы ФК проводилось после исследований электрической прочности вакуумного зазора, где их рабочая поверхность была повреждена пробоями. На рисунке 7 представлена зависимость квантовой эффективности CsI фотокатодов от числа лазерных импульсов.

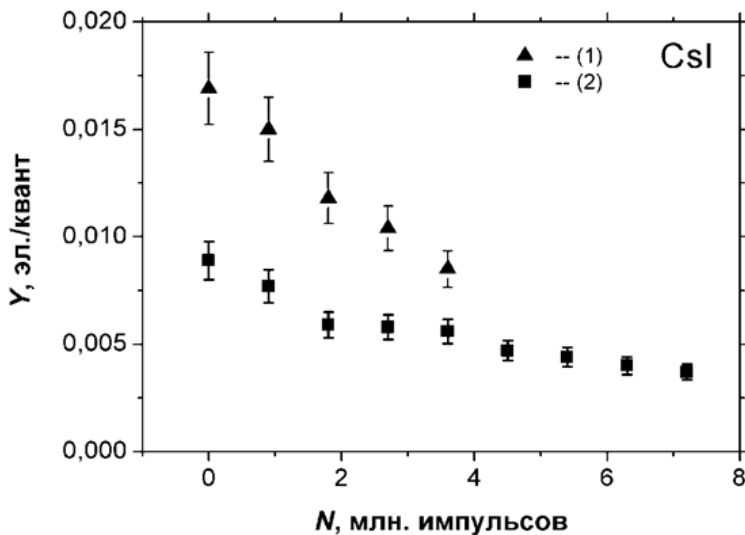


Рис. 7. Зависимость КЭ CsI фотокатода № 1 (1) и № 2 (2) от числа импульсов ЛИ.

Fig. 7. Quantum efficiency of CsI photocathode no. 1 (1) and no. 2 (2) as a function of the number of laser pulses

6. Изготовление и исследование Mg-Ba фотокатодов

Изготовление и исследование Mg-Ba фотокатодов проводили в разборном фотоэлементе. Предварительно перед нанесением фоточувствительного слоя он проходил процедуру обезгаживающего отжига. Затем на подложку ФК методом резистивного распыления слитков из Mg или Mg-Ba сплава наносили фоточувствительный слой. После чего ФЭ снимали с откачного поста. Слитки Mg-Ba изготавливались спеканием навесок из Mg и Ba в атмосфере аргона. Состав готового сплава контролировали методом рентгено-флуоресцентного анализа. Состав готовых слитков представлен в таблице 3.

Для исследования чувствительности Mg-Ba фотокатодов в ультрафиолетовом диапазоне длин волн использовались осветители со светодиодами UVTOP. Их характеристики представлены в таблице 4.

Таблица 3 — Table 3

Номер слитка	Mg, %	Ba, %	Примеси, %
1	99,96	0	0,04
2	86,82	12,91	0,27
3	69,40	30,31	0,29
4	36,40	63,22	0,38

Таблица 4 — Table 4

	UVTOP240TO39	UVTOP255TO39	UVTOP270TO39
P, мкВт	80	80	450
λ_0 , нм	247	264	273
Ширина спектра на полувывсоте $\Delta\lambda$, нм	9	9	12

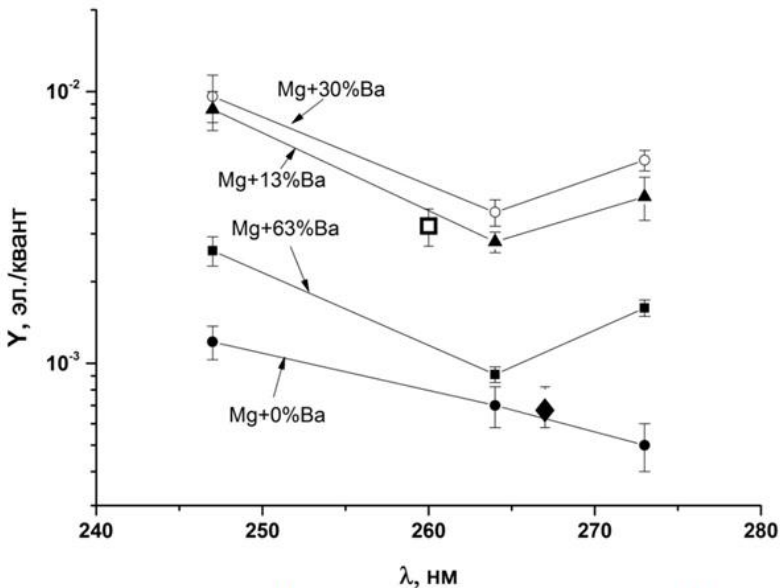


Рис. 8. Зависимость спектральной чувствительности фотокатодов от концентрации бария в расплавленном слитке. (-■-) — значение квантовой эффективности для ФК, изготовленных из слитка № 3 и (-♦-) — для слитка № 1, зарегистрированные в экспериментах на лазерном стенде.

Fig. 8. Dependence of the spectral sensitivity of photocathodes on the concentration of barium in the sputtered ingot. (-■-) is the value of the quantum efficiency for photocathodes made from ingot no. 3 and (-♦-) for ingot no. 1, registered in experiments on a laser bench

На рисунке 8 представлена спектральная чувствительность фотокатодов в зависимости от концентрации бария в слитке. Также на графике представлены данные по КЭ, зарегистрированной на лазерном стенде для фотокатодов, изготовленных из слитков № 1 и № 3.

Максимальной квантовой эффективностью $(1 \pm 0,2) \cdot 10^{-2}$ эл./квант обладал ФК, изготовленный из слитка № 3 при освещении его излучением с длиной волны 247 нм.

7. Исследование ресурса работы *Mg-Ba* фотокатода при его облучении импульсно-периодическими лазерными импульсами

Постановка эксперимента по исследованию ресурса работы *Mg-Ba* фотокатода была аналогичной, как и при исследовании *CsI* фотокатода, с той лишь разницей, что облучение ФК проводили с помощью излучения 3-й гармоники *Ti:Sa* фемтосекундного лазера ($P_{ли} = 6,2$ мкДж/см², $\lambda = 259,6$ нм). Результаты исследований ресурса работы ФК изготовленного из слитка № 3 представлены на рисунке 9.

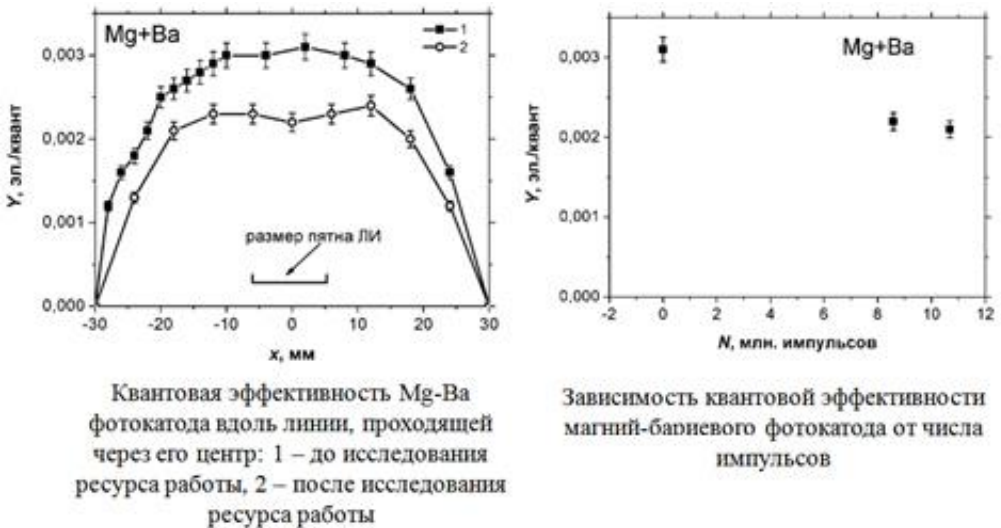


Рис. 9. Результаты исследований ресурса работы *Mg-Ba* фотокатода.

Fig. 9. Results of studies of the life of the *Mg-Ba* photocathode

На рисунке видно, что уменьшение квантовой эффективности ФК произошло не только в месте его облучения, но и по всей его площади. Вероятной причиной этого является отравление катода газами, выделяющимися в результате десорбции с поверхности корпуса фотоэлемента.

8. Исследование электрической прочности вакуумного зазора с *Mg-Ba* фотокатодом

Исследование электрической прочности вакуумного зазора с *Mg-Ba* фотокатодом проводилось также как в экспериментах с *CsI*. При повышении напряжения питания ФЭ с 13 кВ до максимального значения ГИН 105 кВ пробоев замечено не было. На рисунке 10 представлена осциллограмма напряжений, зарегистрированная с помощью емкостного делителя при максимальном значении ГИН.

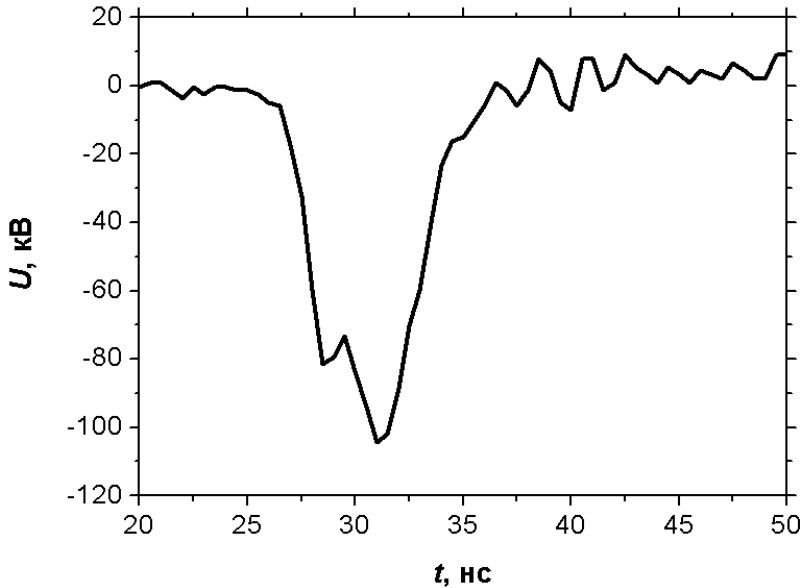


Рис. 10. Осциллограмма напряжения, полученная емкостным делителем при максимальном значении ГИН.

Fig. 10. Voltage waveform obtained by a capacitive divider at the maximum value from a pulse voltage generator

С учетом поправочного коэффициента $K = 1,2$ напряжение на фотокатоде составило 125 кВ, что соответствует напряженности поля в вакуумном промежутке фотоэлемента равном ~ 160 кВ/мм. Следов пробоя на фотокатодe обнаружено не было.

9. Заключение

Для отработки технологии изготовления и исследования перспективных типов фотокатодов разработан и изготовлен разборный высоко-

вольтный вакуумный фотоэлемент. Отработан способ изготовления *CsI* и *Mg-Ba* фотокатодов.

Квантовая эффективность *CsI* и *Mg-Ba* фотокатодов составила $7,5 \cdot 10^{-2}$ эл./квант ($\lambda = 195,7$ нм) и $1 \cdot 10^{-2}$ эл./квант ($\lambda = 247$ нм) соответственно.

Впервые проведены исследования электрической прочности вакуумного зазора с *CsI* и *Mg-Ba* ФК. При подаче на ФЭ импульсного питания ($\tau \approx 5$ нс) оно составляет для *CsI* фотокатода ~ 130 кВ/мм, а для *Mg-Ba* фотокатода более 160 кВ/мм. Это существенно выше, чем значение электропрочности вакуумного зазора ФЭ с сурьмяно-цезиевым фотокатодом видимого диапазона спектра (для *CsI* катодов — в 2,5 раза, для *Mg-Ba* катодов — более чем в три раза).

Впервые проведены исследования ресурса работы *CsI* и *Mg-Ba* фотокатодов при облучении их фемтосекундными лазерными импульсами с флюенсом $6,2$ мкДж/см². Показано, что падение квантовой эффективности *CsI* фотокатода в два раза происходит при облучении его 5,4 млн. лазерных импульсов ($\lambda = 195,7$ нм), а облучение *Mg-Ba* фотокатода — 11 млн. лазерными импульсами ($\lambda = 259,6$ нм), т. е. заметно не повлияли на его квантовую эффективность.

С учетом представленных данных и при использовании для инициирования электронов лазерных систем с эксимерными усилителями, которые позволяют свести к минимуму различие в квантовой эффективности между *CsI* и *Mg-Ba* фотокатодами, наиболее перспективным для дальнейшего применения является *Mg-Ba* фотокатод.

Список литературы

1. Photocathodes for free electron lasers / S. H. Kong, J. Kinross-Wright, D. C. Nguyen, R. L. Sheild // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A. 1995. Vol. 358. P. 272—275.
2. Michelato P. Photocathodes for RF photoinjectors // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A. 1997. Vol. 393. P. 455—459.
3. Shefer E. et al. Laboratory Production of Efficient Alkali-Antimonide photocathodes // Nucl. Instr. Meth. A. 1998. Vol. 411. P. 383—388.
4. Mete O. Study and Experimental Characterisation of a Novel Photo Injector for the CLIC Drive Beam. PhD thesis. EPFL, 2011.
5. Srinivasan-Rao T. et al. Performance of magnesium cathode in the S-band RF gun // Proceedings of the 1997 Particle Accelerator Conference. 1997. P. 2790—2792.
6. Лифшиц Т. М., Кокина Н. Г. Фотокатоды для регистрации ультрафиолета на основе сплавов магния с барием // Радиотехника и электроника. 1958. № 9. С. 1199—1203.
7. Лифшиц Т. М., Кокина Н. Г., Политова Н. М. Фотоэлектрические свойства сплавов магния с барием // Радиотехника и электроника. 1960. № 8. С. 1267—1274.
8. Кокина Н. Г., Лифшиц Т. М. Способ изготовления фотокатода для регистрации ультрафиолетового излучения. А. с. 118425 (СССР). МПК : H01J 1/34, H01J 9/121958. Оpubл. 01.01.1958.

9. Фотокатод, работающий в ультрафиолетовой области спектра / А. М. Бишаев и др. А. с. 1758704A1 (СССР). МПК : H01J 40/06. Оpubл. 30.08.1992. Бюл. № 32.
10. Tkachenko V. G., Kondrashev A. I., Maksimchuk I. N. Advanced metal alloy systems for massive high-current photocathodes // *Applied Physics*. B. 2010. Vol. 98. P. 839—849.
11. Photoemissive properties of binary magnesium–barium and aluminium–lithium metallic alloys / V. G. Tkachenko et al. // *Appl. Phys A*. 1996. Vol. 62. P. 285—287.
12. Breskin A. CsI UV photocathodes : history and mystery // *Nucl. Instr. Meth. A*. 1996. Vol. 371. P. 116—136.
13. Бузулицков А. Ф. Газовые фотодетекторы с твердыми фотокатодами // *Физика элементарных частиц и атомного ядра*. 2008. Т. 39. Вып. 3. С. 813—869.
14. Philipp H. R., Taft E. A. J. Photoelectric emission from the valence band of cesium iodide // *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 1956. Vol. 1, no. 3. P. 159—163.
15. Соммер А. Фотоэмиссионные материалы. Пер. с англ. М. : Энергия, 1973. 177 с.
16. Suberlucq G. Photocathodes en iodure de césium utilisées à fort courant, CERN-PS-92-29-LP, CLIC-Note-162, mai 1992. URL: <https://cds.cern.ch/record/236701/files/CM-P00058088.pdf>.

Информация об авторах

Пхайко Николай Анатольевич, начальник группы ФГУП «РФЯЦ — ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина, Российская Федерация.

Кондратьев Александр Александрович, начальник группы ФГУП «РФЯЦ — ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина, Российская Федерация.

Пахомов Сергей Николаевич, инженер-исследователь второй категории ФГУП «РФЯЦ — ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина, Российская Федерация.

Потапов Анатолий Васильевич, кандидат физико-математических наук, начальник отдела ФГУП «РФЯЦ — ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина, Российская Федерация.

Сорокин Илья Александрович, инженер-исследователь второй категории ФГУП «РФЯЦ — ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина, Российская Федерация.

Тищенко Александр Станиславович, начальник группы ФГУП «РФЯЦ — ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина, Российская Федерация.

Experimental Studies of the Characteristics of Photocathodes of the Ultraviolet Range of the Spectrum

N. A. Pkhaiko, A. A. Kondratyev, S. N. Pakhomov,
A. V. Potapov, I. A. Sorokin, and A. S. Tishchenko

Russian Federal Nuclear Center –

*All-Russian Research Institute of Technical Physics n. a. acad. E. I. Zababakhin
13, Vasilyeva st. PO box 245, Snezhinsk, Chelyabinsk reg., 456770, Russian Federation
dep5@vniitf.ru*

Received: July 20, 2022

Peer-reviewed: July 22, 2022

Accepted: July 22, 2022

Abstract: Photoemission cells with high sensitivity to photons in the ultraviolet (UV) range of the spectrum have a wide range of practical applications in accelerator technology and generators of ultrashort electromagnetic pulses in the microwave range. The potential benefits of using UV photocathodes in these areas of technology are determined by such a combination of their properties as high electrical strength and high quantum efficiency. The report presents the results of experimental studies of the characteristics of photocathodes based on magnesium-barium (Mg-Ba) alloys and cesium iodide (CsJ). Photocathodes were fabricated by thermal vacuum sputtering on polished stainless steel substrates. It is shown that the dielectric strength of vacuum gaps with UV cathodes is significantly higher than with antimony-cesium cathodes in the visible range of the spectrum (for CsJ cathodes – 2.5 times, for Mg-Ba cathodes – more than three times). The quantum efficiency of Mg-Ba cathodes is ~1% at a wavelength of 247 nm, and that of CsJ cathodes is 7.5% at a wavelength of 196 nm. The results of studies of the dynamics of a decrease in the quantum efficiency of photocathodes under repetitively pulsed irradiation with laser pulses with a fluence $6 \mu\text{J}/\text{cm}^2$. The characteristics of photocathodes are compared from the point of view of their practical applications.

Keywords: photoemissive elements, generators of ultrashort electromagnetic pulses, magnesium-barium alloy, cesium iodide, thermal vacuum sputtering, electrical strength, quantum efficiency.

For citation (IEEE): N. A. Pkhaiko, A. A. Kondratyev, S. N. Pakhomov, A. V. Potapov, I. A. Sorokin, and A. S. Tishchenko, “Experimental Studies of the Characteristics of Photocathodes of the Ultraviolet Range of the Spectrum,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 3, pp. 325–341, 2022, doi: 10.29039/2587-9936.2022.05.3.24. (In Russ.).

References

- [1] S. H. Kong, J. Kinross-Wright, D. C. Nguyen, and R. L. Sheffield, "Photocathodes for free electron lasers," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 358, no. 1–3, pp. 272–275, Apr. 1995, doi: 10.1016/0168-9002(94)01425-6.
- [2] P. Michelato, "Photocathodes for RF photoinjectors," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 393, no. 1–3, pp. 455–459, Jul. 1997, doi: 10.1016/s0168-9002(97)00545-7.
- [3] E. Shefer, A. Breskin, A. Buzulutskov, R. Chechik, M. Klin, and M. Prager, "Laboratory production of efficient alkali-antimonide photocathodes," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 411, no. 2–3, pp. 383–388, Jul. 1998, doi: 10.1016/s0168-9002(98)00350-7.
- [4] O. Mete, *Study and Experimental Characterisation of a Novel Photo Injector for the CLIC Drive Beam*. PhD thesis, EPFL, 2011.
- [5] T. Srinivasan-Rao et al., "Performance of magnesium cathode in the S-band RF gun," *Proceedings of the 1997 Particle Accelerator Conference*, 1997, vol. 3, pp. 2790–2792, doi: 10.1109/PAC.1997.752767.
- [6] T. M. Lifshitz and N. G. Kokina, "Photocathodes for ultraviolet detection based on magnesium-barium alloys," *Radiotekhnika i elektronika*, 1958, no. 9, pp. 1199–1203. (In Russ.).
- [7] T. M. Lifshits, N. G. Kokina, and N. M. Politova, "Photoelectric properties of magnesium alloys with barium," *Radiotekhnika i elektronika*, vol. 1960, no. 8, pp. 1267–1274. (In Russ.).
- [8] N. G. Kokina, T. M. Lifshits, "Method for manufacturing a photocathode for recording ultraviolet radiation," A. c. 118425 (USSR), IPC: H01J 1/34, H01J 9/121958. Published 01/01/1958. (In Russ.).
- [9] A. M. Bishaev et al. "Photocathode operating in the ultraviolet region of the spectrum," A. c. 1758704A1 (USSR), IPC: H01J 40/06. Published 08/30/1992. Bull. No. 32. (In Russ.).
- [10] V. G. Tkachenko, A. I. Kondrashev, and I. N. Maksimchuk, "Advanced metal alloy systems for massive high-current photocathodes," *Applied Physics B*, vol. 98, no. 4, pp. 839–849, Jan. 2010, doi: 10.1007/s00340-009-3887-z.
- [11] V. G. Tkachenko, I. N. Maksimchuk, V. V. Shklover, G. A. Katrich, and V. V. Klimov, "Photoemissive properties of binary magnesium-barium and aluminium-lithium metallic alloys," *Applied Physics A Materials Science & Processing*, vol. 62, no. 3, pp. 285–287, Mar. 1996, doi: 10.1007/bf01575096.
- [12] A. Breskin, "CsI UV photocathodes: history and mystery," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 371, no. 1–2, pp. 116–136, Mar. 1996, doi: 10.1016/0168-9002(95)01145-5.
- [13] A. F. Buzulutskov, "Gas photodetectors with solid photocathodes," *Physics of elementary particles and atomic nucleus*, 2008, vol. 39, iss. 3, pp. 813–869. (In Russ.).
- [14] H. R. Philipp and E. A. Taft, "Photoelectric emission from the valence band of cesium iodide," *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, vol. 1, no. 3, pp. 159–163, Nov. 1956, doi: 10.1016/0022-3697(56)90023-3.
- [15] A. Sommer, *Photoemission materials*, Moscow: Energiya, 1973.
- [16] G. Suberluçq, *Photocathodes en iodure de césium utilisées à fort courant*, CERN-PS-92-29-LP, CLIC-Note-162, mai 1992. URL: <https://cds.cern.ch/record/236701/files/CM-P00058088.pdf>.

Information about the authors

Nikolai A. Pkhaiko, head of the group of the Federal State Unitary Enterprise "RFNC – VNIITF n. a. academ. E. I. Zababakhin," Russian Federation.

Alexander A. Kondratyev, head of the group of the Federal State Unitary Enterprise “RFNC – VNIITF n. a. academ. E. I. Zababakhin,” Russian Federation.

Sergey N. Pakhomov, research engineer of the second category of the Federal State Unitary Enterprise “RFNC – VNIITF n. a. academ. E. I. Zababakhin,” Russian Federation.

Anatoly V. Potapov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of Department, Federal State Unitary Enterprise “RFNC – VNIITF n. a. academ. E. I. Zababakhin,” Russian Federation.

Ilya A. Sorokin, research engineer of the second category of the Federal State Unitary Enterprise “RFNC – VNIITF n. a. academ. E. I. Zababakhin,” Russian Federation.

Alexander S. Tishchenko, head of the group of the Federal State Unitary Enterprise “RFNC – VNIITF n. a. academ. E. I. Zababakhin,” Russian Federation.