

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2023-1-77-82>

УДК 621.384.6:535.243.2

СИСТЕМА ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ НА УСКОРИТЕЛЕ INURA

М.И. Кайканов, Д.К. Наурузбаев, А.В. Тихонов, М.У. Хасенов

Назарбаев Университет, Школа естественных, социальных и гуманитарных наук, Астана, Казахстан

E-mail для контактов: mendykan.khassenov@nu.edu.kz

Создана система вывода и транспортировки светового излучения из камеры облучения и защитного бокса ускорителя INURA. Свет за пределами защитного бокса регистрируется с помощью компактных спектрометров, фотоэлектронных умножителей, фотодетекторов в диапазоне от 300 нм до 2,1 мкм. В настоящее время ускоритель работает в режиме ускорения ионов, число решаемых задач должно возрасти при переводе в режим ускорения электронов. Система опробована при регистрации светового излучения из межэлектродного промежутка диодного узла. Зарегистрированы линии атома водорода, атома кислорода, связанные с разложением абсорбированных паров воды и разрядом по поверхности диэлектрика на аноде сильнотоочного диода ускорителя.

Ключевые слова: ускоритель, световое излучение, фотодетекторы, спектр, серия Бальмера.

ВВЕДЕНИЕ

Мощный импульсный ионный ускоритель INURA [1] предназначен для проведения исследований в области модификации различных материалов (наноматериалы, тугоплавкие сплавы, высокотемпературные керамики и др.) [2–4]. Параметры ускорителя INURA: ускоряющее напряжение 150–400 кВ, длительность импульса тока пучка ≈ 100 нс, ток ионного пучка до 10 кА, импульсная плотность мощности ионного пучка на мишени до 0,1–0,2 ГВт/см².

На ускорителе INURA планируется провести измерения спектральных и спектрально-временных параметров светового излучения в следующих исследованиях:

- измерение температуры мишени при облучении;
- исследование плазменных и приэлектродных явлений в диодной камере;
- исследование плазмохимических процессов при модификации мишеней мощным электронным пучком;
- изучение люминесценции газов при возбуждении мощным электронным пучком, особенно в инфракрасном (ИК) диапазоне.

Эти исследования должны охватывать широкий спектральный диапазон от ультрафиолетовой до ближней инфракрасной области. В настоящее время ускоритель работает в режиме ускорения ионов. Реализация двух последних задач возможна при переходе на режим ускорения электронов.

Одной из важнейших задач является измерение температуры мишеней при облучении электронными и ионными пучками ускорителя. В [5, 6] был разработан быстродействующий многоканальный радиационный пирометр для экспериментов с теплым плотным веществом (WDM) с интенсивными пучками тяжелых ионов на ускорителе GSI. Пирометр способен измерять яркостные температуры от 1 500 К до 12 000 К на шести длинах волн в видимой и ближней инфракрасной частях спектра с временным разреше-

нием 5 нс и пространственным разрешением в несколько микрометров. Температура образца определяется путем подгонки зарегистрированного теплового спектра по формуле Планка и выбранной модели коэффициента излучения. Рассматривались две модели коэффициента излучения: «серое тело», когда коэффициент излучения образца считали не зависящим от длины волн и, вторая, когда принималась линейная зависимость от длины волны. Многоволновый оптический пирометр с разложением света в спектр дифракционной решёткой и регистрацией стрип-камерой использовался для измерения температуры образцов на ускорителе NDCX-1 [7].

В большинстве случаев достаточно более простой двухволновой схемы [8]. Предполагается, что при сравнительно близких длинах волн эмиссионная способность мишени будет одинаковой, $\varepsilon(\lambda_1) = \varepsilon(\lambda_2)$. При регистрации света с помощью фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) или фотодиода интенсивность будет пропорциональна числу фотонов N , тогда:

$$T = \frac{C_2}{\Lambda} \left[\ln(N_1 \lambda_1^4) - \ln(N_2 \lambda_2^4) \right]^{-1}$$

где $C_2 = hc/k$ – вторая пирометрическая постоянная, $\Lambda = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2}$ – эффективная длина волны, h – постоянная Планка, k – постоянная Больцмана, c – скорость света.

Спектры люминесценции газовых сред в ультрафиолетовой и видимой области под действием электронных и ионных пучков исследованы во многих работах [9, 10]. В то же время нет данных по инфракрасным спектрам газов при возбуждении пучками частиц или продуктами ядерных реакций. Такие данные важны с точки зрения выявления механизмов заселения уровней атомов при возбуждении ионизирующим излучением [11].

Измерения оптического излучения образцов внутри вакуумной камеры облучения были затруднены

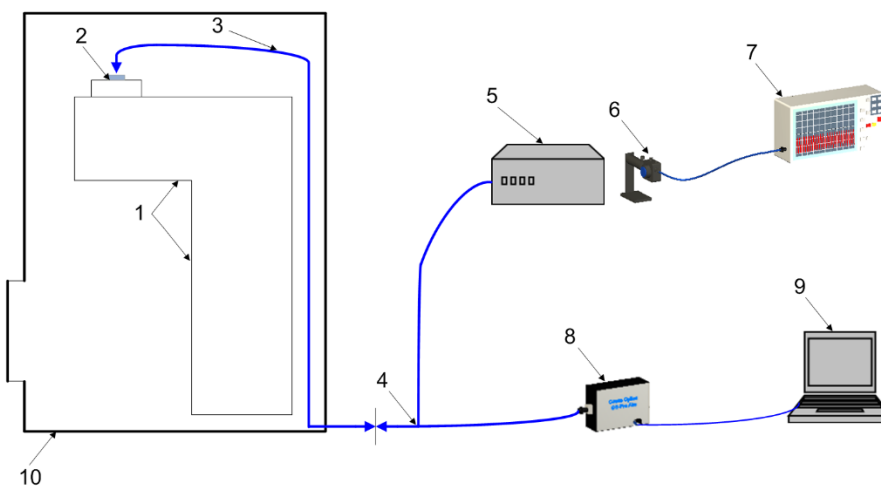
из-за рассеянного света при разряде в диодном узле. Система была опробована при исследовании светового излучения в межэлектродном промежутке диодного узла ускорителя. Дальнейшие исследования будут проведены при переводе установки в режим ускорения электронов.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Общая схема измерения показана на рисунке 1. Свет из диодной камеры или камеры облучения проходил через окно и фокусировался линзой (2) на вход волоконного световода (3) длиной 10 м (рисунок 2). Далее световой поток разветвляется по раздвоенному

световоду длиной 2 м (4), часть потока поступает на вход компактного спектрометра (8). Вторая часть попадает на щель монохроматора (5) и временную зависимость светового излучения на выбранной длине волны можно регистрировать с помощью фотоэлектронного умножителя или фотодиода (6), сигнал с фотоприёмника записывается с помощью осциллографа (7).

Возможны другие сочетания регистрирующей аппаратуры (см. таблицу), свет с помощью раздвоенных световодов может делиться на большее число лучей.



1 – ускоритель INURA; 2 – окно и конденсорная линза; 3 – 10 м световод; 4 – раздвоенный световод; 5 – монохроматор; 6 – фотодетектор; 7 – осциллограф; 8 – компактный спектрометр; 9 – ноутбук; 10 – защитный бокс

Рисунок 1. Схема измерения оптического излучения

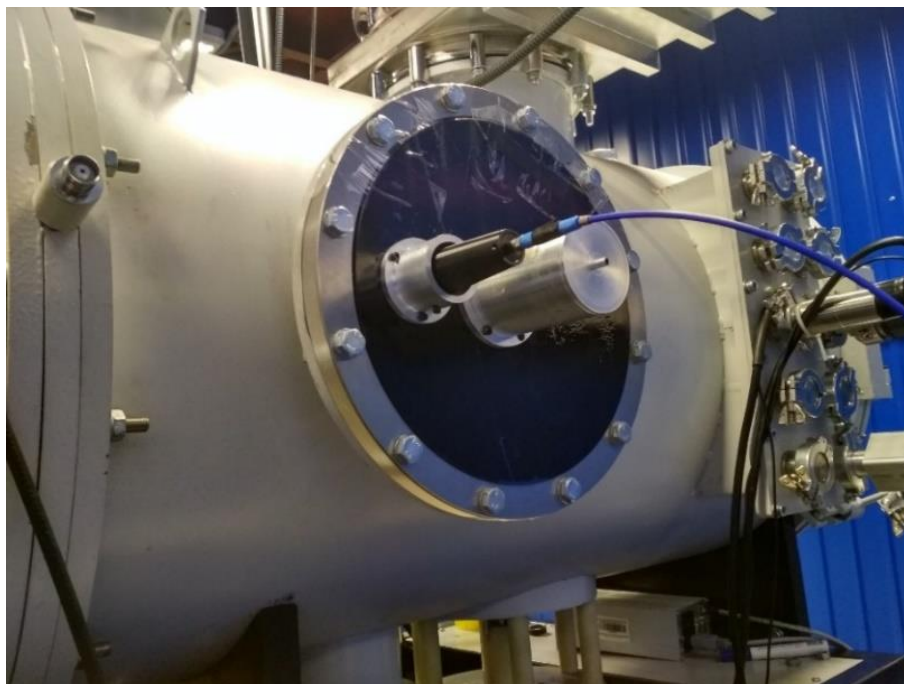


Рисунок 2. Вывод оптического излучения из вакуумной диодной камеры

Таблица. Элементы системы регистрации оптического излучения

Элемент	Модель, производитель	Параметры
Компактный спектрометр	QE65Pro-abs, Ocean Optics	Спектральный диапазон 200–975 нм
	NIRQuest 512-2.5, Ocean Optics	Спектральный диапазон 900–2500 нм
Осциллограф	DSO1024A, Keysight Technologies	Полоса пропускания 200 МГц, 4 канала
Монохроматор	DK-240, Spectral Products	Спектральный диапазон 180–3000 нм
Модуль ФЭУ	PDM04-9113-CN-A, ET Enterprises	Спектральный диапазон 280–850 нм, полоса пропускания 100 МГц
Фотодетектор	DET025A, Thorlabs	Кремниевый фотодиод, спектральный диапазон 400–1100 нм, полоса пропускания 2 ГГц
	DET01CFC, Thorlabs	InGaAs фотодиод, спектральный диапазон 800–1700 нм, полоса пропускания 1,2 ГГц
	PDA10D2	InGaAs фотодиод, спектральный диапазон 900–2600 нм, полоса пропускания 25 МГц
Линзы кварцевые	84-UV-25, Ocean Insight	Диаметр 25,4 мм, фокусное расстояние 100 мм, спектральный диапазон 185–2500 нм
	LA4078-ML, Ocean Optics	Диаметр 50,8 мм, фокусное расстояние 75 мм, спектральный диапазон 185–2100 нм
	74-UV, Ocean Insight	Диаметр 5 мм, фокусное расстояние 10 мм, спектральный диапазон 190–2500 нм
Световоды	P600-10-UV-VIS, Ocean Insight	Длина 10 м, спектральный диапазон 300–1100 нм
	P600-10-VIS-NIR, Ocean Insight	Длина 10 м, спектральный диапазон 400–2100 нм
Световоды раздвоенные	QBIF600-UV-BX, Ocean Insight	Длина 2 м, спектральный диапазон 300–1100 нм
	QBIF600-VIS-BX, Ocean Insight	Длина 2 м, спектральный диапазон 400–2100 нм
Набор полосовых фильтров	Thorlabs	От 350 до 1600 нм с шириной полосы пропускания 10-12 нм, 9 фильтров
Источник света	Галогенная лампа HL-2000-Cal, Ocean Optics	Для калибровки спектральной чувствительности в диапазоне 360–1050 нм

Для измерений в вакуумной камере облучения световое излучение фокусировалось линзой 74-UV на световод PV600-1-VIS-NIR. Световоды PV600-1-VIS-NIR без оболочки предназначены для работы в вакууме. Далее свет выводился из камеры облучения через вакуумный оптический ввод VFT-600-VIS-16 и направлялся в систему транспортировки из защитного бокса. Измерения при регистрации света фотоэлектронным умножителем показали отсутствие заметной люминесценции кварца в линзе и световоде под действием рентгеновского излучения в камере. Также отсутствовало заметное наведённое поглощение в кварце после более 100 импульсов ускорителя (рисунок 3).

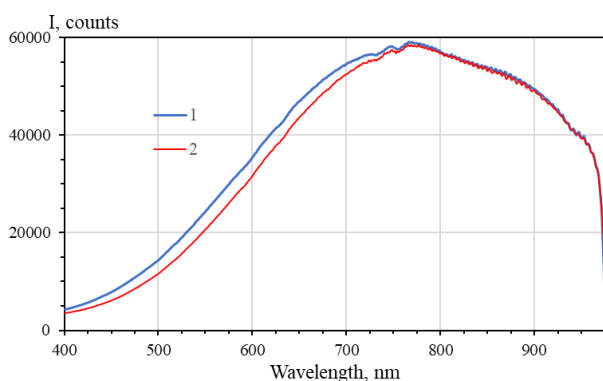
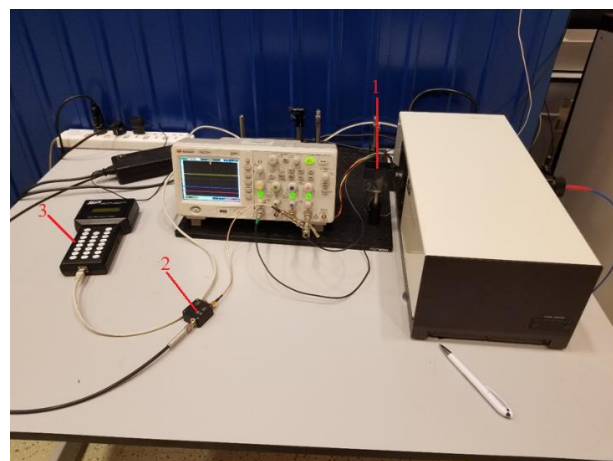


Рисунок 3. Спектры излучения галогенной лампы (1) и излучения лампы после прохождения через облученный световод (2)

На рисунке 4 показана система регистрации при исследовании светового излучения в межэлектродном промежутке. Свет регистрировался с помощью модуля ФЭУ PDM02-9113-CN, ФЭУ работал в токовом режиме с резистивной нагрузкой 105 Ом. Фото-

диод был подключен к входу осциллографа с сопротивлением нагрузки 50 Ом. Сигналы полного тока диода ускорителя, ФЭУ, фотодиода регистрировались с помощью осциллографа DSO1024A. Использовался монохроматор DK-240 с тремя автоматически сменяемыми дифракционными решетками. Ширина щелей составляла 2 мм, что соответствует спектральной ширине ≈ 7 нм. Ширина щели и длина волны выставлялись с помощью ручного контроллера. Были проведены измерения на ожидаемых длинах волн линий атомарного водорода, атомарного кислорода, полосах молекулы азота и молекулярного иона азота. Также измерения проводились на ряде точек для определения непрерывного спектра излучения.



1 – модуль ФЭУ, 2 – InGaAs фотодетектор, 3 – контроллер монохроматора

Рисунок 4. Система регистрации при исследовании светового излучения

2. Излучение в межэлектродном промежутке

Для синхронизации сигналов с фотодетекторов с током пучка на вход осциллографа подавался импульс от полного тока диода (рисунок 5). Одновременная регистрация светового излучения и тока пучка невозможна, так как цилиндр Фарадея в этом случае должен устанавливаться на место образца под пучком ионов. Ток пучка возникает со сдвигом ≈ 70 нс относительно импульса полного тока диода, длительность тока пучка на полувысоте ≈ 85 нс (см. рисунок 5). Запуск осциллографа от импульса тока диода позволяет также установить более чувствительные диапазоны измерения на каналах, регистрирующих сигналы фотодетекторов. При запуске от сигнала с ФЭУ этому препятствовал высокий уровень шума ФЭУ.

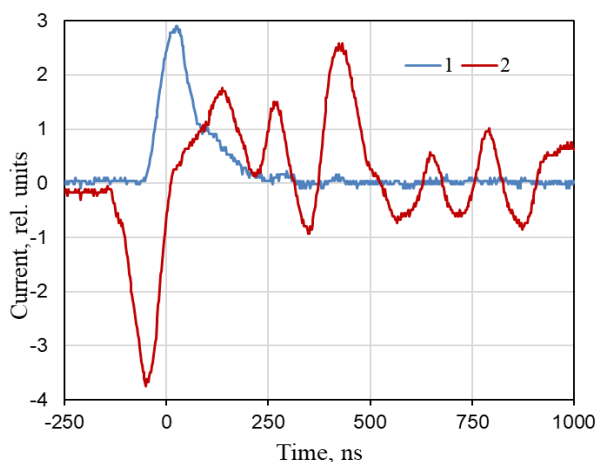


Рисунок 5. Осциллограммы тока пучка (1) и полного тока диода (2)

На рисунке 6 показана осциллограмма полного тока диода и светового излучения в межэлектродном промежутке, регистрируемого с помощью ФЭУ в области 280–850 нм. Световое излучение возникает практически одновременно с разрядом в межэлектродном промежутке, то есть полным током диода, максимальный сдвиг составил 40 нс.

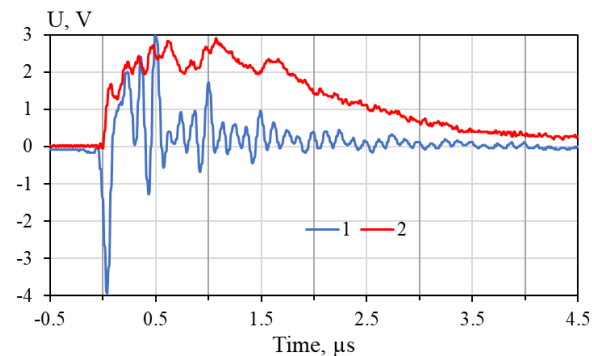


Рисунок 6. Осциллограммы тока диода (1) и свечения в межэлектродном промежутке (2)

2.1 Атомарные линии

Наиболее яркие наблюдавшиеся спектральные линии (рисунок 7) связаны с переходами серии Бальмера в атоме водорода (на 656,3, 486,1, 434,0 нм).

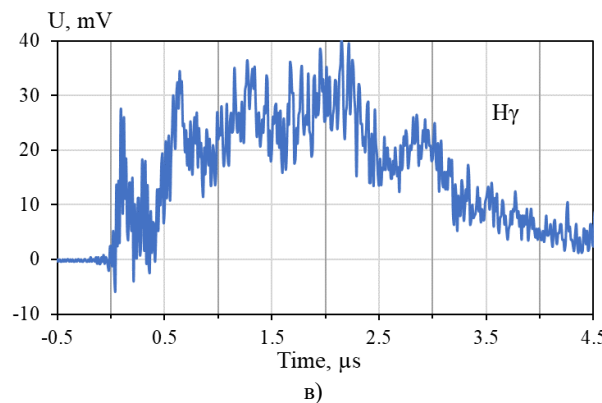
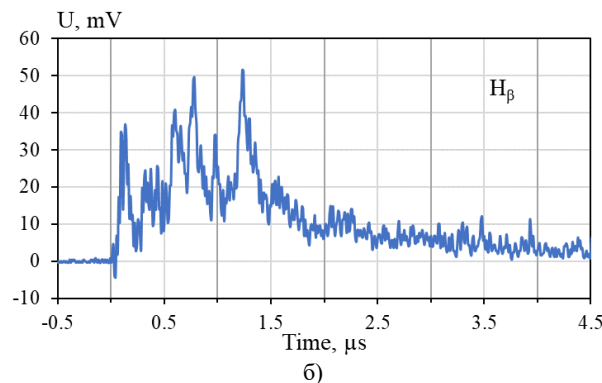
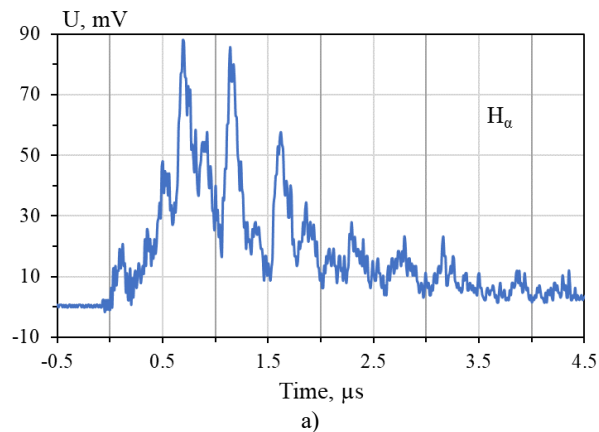


Рисунок 7. Осциллограммы излучения на линиях атома водорода: 656 нм (а), 486 нм (б) и 434 нм (в)

Эти линии соответствуют переходам $n\text{-}2s$ и, возможно, $n\text{-}2p$ (где $n=3, 4, 5$, соответственно) атома водорода. Первый пик в излучении атома водорода на всех трёх линиях соответствует импульсу тока пучка.

На рисунке 8 показана осциллограмма излучения на линии атома кислорода 777 нм ($3p\text{-}3s$). Необходимо отметить низкую чувствительность ФЭУ в ИК-области спектра.

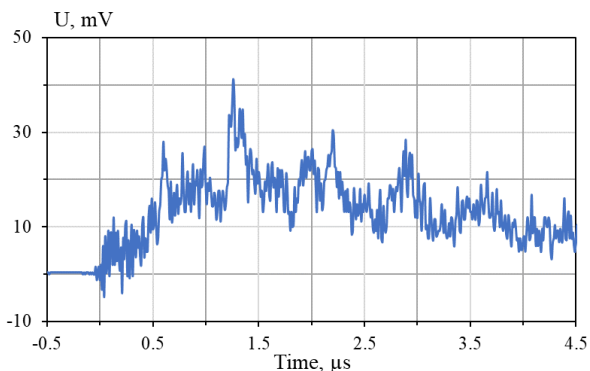


Рисунок 8. Осциллограмма излучения на длине волны 777 нм

2.2 Молекулярные полосы и непрерывный спектр

Сигнал с ФЭУ на длинах волн 391,4 (полоса излучения молекулярного иона азота N_2^+), 358 нм (вторая положительная полоса молекулы азота) не превышал уровня шума.

Максимум непрерывного излучения разряда приходится на 550 нм (рисунки 9, 10).

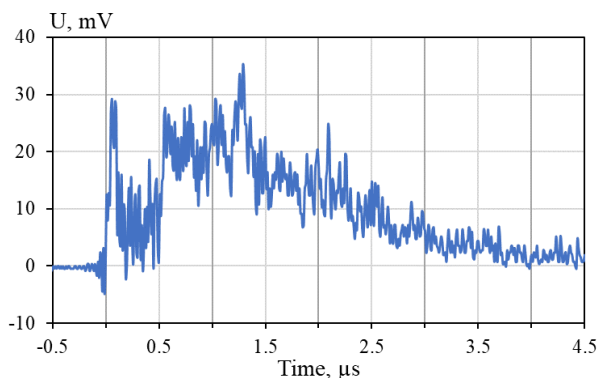


Рисунок 9. Осциллограмма излучения на длине волны 550 нм

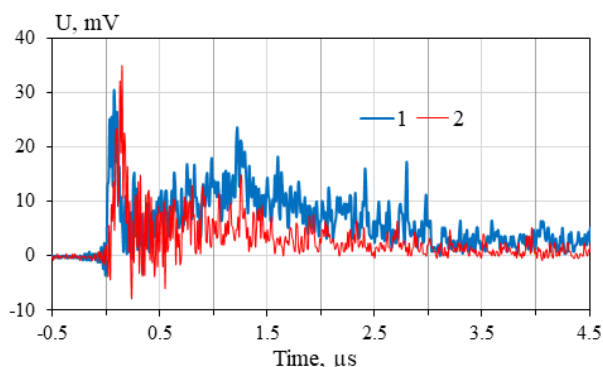


Рисунок 10. Осциллограммы излучения на длинах волн 530 нм (1) и 570 нм (2)

Осциллограммы, аналогичные полученным на 570 нм, зарегистрированы на $\lambda=600$ нм. Сигнал с ФЭУ на 700 и 800 нм не превышал уровень шума, однако чувствительность ФЭУ в этой области также сравнительно низкая.

Выводы

Создана система вывода и регистрации светового излучения из камеры облучения ускорителя INURA. Система позволяет зарегистрировать световой поток в диапазоне от 300 до 2100 нм. Показано отсутствие заметной люминесценции и заметного наведённого поглощения кварцевой линзы и кварцевой основы световодов в поле рентгеновского излучения в камере облучения.

В излучении межэлектродного промежутка диодного узла преобладают линии бальмеровской серии атома водорода. Также наблюдается характерная линия атома кислорода при 777 нм. Излучение полос молекулы азота и молекулярного иона азота N_2^+ практически отсутствует. Таким образом, эмиссия связана, в основном, с наличием остаточного водяного пара в диодной камере, а также с плазмообразованием на поверхности анода, покрытого углеводородным диэлектриком, при эмиссии ионного пучка. Полоса ОН с максимумом при 308 нм, характерная для возбуждения паров воды, находится за пределами области пропускания оптических волокон VIS-NIR. Разложение водяного пара в разряде является источником протонов ускорителя. Непрерывный спектр с максимумом при 550 нм относительно слабый.

Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта AP13067604, финансируемого Министерством Науки и высшего образования Республики Казахстан.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Kaikanov M., Baigarin K., Tikhonov A. et al. An Accelerator Facility for WDM, HEDP, and HIF Investigations in Nazarbayev University // *J. Phys. Conf. Ser.* – 2016. – V. 717, 012099. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/717/1/012099>
2. Kaikanov M., Amanzhulov B., Demeuova G., Akhtanova G., Bozheyev F., Kemelbay A., Tikhonov A. Modification of Silver Nanowire Coatings with Intense Pulsed Ion Beam for Transparent Heaters // *Nanomaterials.* – 2020. – V. 10. – No. 11, 2153. <https://doi.org/10.3390/nano10112153>
3. Kaikanov M., Kozlovskiy A.L., Abduvalov A. et al. Study of using pulsed beams to increase the radiation resistance of nitride ceramics to helium swelling // *Appl. Phys. A.* – 2019. – V. 125, 555. <https://doi.org/10.1007/s00339-019-2857-5>
4. Abduvalov A., Kaikanov M., Atabaev T., Tikhonov A. Improving Photoelectrochemical Activity of Magnetron-Sputtered Double-Layer Tungsten Trioxide Photoanodes by Irradiation with Intense Pulsed Ion Beams // *Nanomaterials.* – 2022. – V. 12, 2639. <https://doi.org/10.3390/nano12152639>
5. Ni P.A., Kulish M.I., Mintsev V. et al., Temperature measurement of warm-dense-matter generated by intense heavy-ion beams // *Laser and Particle Beams.* – 2008. – V. 26. – P. 583–589. <https://doi.org/10.1017/S0263034608000645>

6. Ni P., Temperature measurement of high-energy-density matter generated by intense heavy ion beam // *Thesis*, Darmstadt, 2006, 87 p.
7. Ni P.A., Bieniosek F.M., Henestroza E., Lidia S.M. A multi-wavelength streak-optical-pyrometer for warm-dense matter experiments at NDCX-I and NDCX-II // *Nuclear Instruments and Methods A*. – 2014. – V. 733. – P. 12–17. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900213007134>
8. Rakhman A., Blokland W. Non-contact surface temperature measurements of nanocrystalline diamond foil under intense ion beams // *Proc. of SPIE*. – 2020. - V. 11502, 115020D. <https://doi.org/10.1117/12.2568927>
9. Ulrich A. Light emission from particle beam induced plasma: An overview // *Laser and Particle Beams*. – 2012. – V. 30. P. 199–205. <https://doi.org/10.1017/S0263034611000838>
10. Gordienko Yu., Khasenov M., Batyrbekov E., Amrenov A., Samarkhanov K., Ponkratov Yu. Luminescence of Noble Gases and Their Mixtures Under Nanosecond Electron-Beam Excitation // *Journal of Applied Spectroscopy*. – 2018. - V. 85. – No. 4. – P. 600–604. <https://doi.org/10.1007/s10812-018-0692-7>
11. Melnikov S.P., Sizov A.N., Sinyanskii A.A., Miley G.H. Lasers with Nuclear Pumping // Heidelberg:Springer, 2015. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-08882-2>

INURA ҮДЕТКІШІНДЕГІ ОПТИКАЛЫҚ ДИАГНОСТИКА ЖҮЙЕСІ

М.И. Кайканов, Д.К. Наурузбаев, А.В. Тихонов, М.У. Хасенов

Назарбаев Университеті, Жаратылыстану, әлеуметтік және гуманитарлық ғылымдар мектебі. Астана, Қазақстан

Сәулелену камерасынан және INURA үдеткішінің қорғаныс қорабынан жарық сәулесін шығару және тасымалдау жүйесі құрылды. Қорғаныс қорабының сыртында жарық 300 нм-ден 2,1 мкм-ге дейінгі диапазондағы ықшам спектрометрлер, фотокөбейткіштер, фотодетекторлар көмегімен тіркеледі. Қазіргі уақытта үдеткіш иондық үдеу режимінде жұмыс істейді, электронды үдеу режиміне ауысқанда шешілетін мәселелердің саны артуы керек. Жүйе диодтық блоктың электродаралық саңылауынан жарық сәулеленуін тіркеуде сынақтан өтті. Сіңірілген су буының ыдырауымен және жоғары ток үдеткіш диодтың анодындағы диэлектрлік беттегі разрядпен байланысты сутегі атомы мен оттегі атомының сызықтары тіркелді.

Түйін сөздер: *үдеткіш, жарық сәулеленуі, фотодетекторлар, спектр, Бальмер сериясы.*

OPTICAL DIAGNOSTICS SYSTEM AT THE INURA ACCELERATOR

M.I. Kaikanov, D.K. Nauruzbayev, A.V. Tikhonov, M.U. Khasenov

Nazarbayev University, School of Sciences and Humanities, Astana, Kazakhstan

A system has been created for extracting and transporting light radiation from the irradiation chamber and the protective box of the INURA accelerator. Light outside the protective box is recorded using compact spectrometers, photomultipliers, photodetectors in the range from 300 nm to 2.1 μm . At present, the accelerator operates in the ion acceleration mode; the number of problems to be solved should increase when switching to the electron acceleration mode. The system was tested in the registration of light radiation from the interelectrode gap of the diode assembly. Lines of a hydrogen atom and an oxygen atom associated with the decomposition of absorbed water vapor and the discharge over the dielectric surface at the anode of the high-current accelerator diode have been registered.

Keywords: *accelerator, light emission, photodetectors, spectrum, Balmer series.*