

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ, ИНИЦИИРУЕМОГО РАЗРЯДОМ ПО ПОВЕРХНОСТИ ФЕРРИТА

С. Н. Андреев¹, А. В. Бернацкий¹, Г. А. Душкин^{1,2}, С. Н. Цхай¹,
С. А. Пикуз¹, И. Н. Тиликин¹, Т. А. Шелковенко¹, С. Ю. Савинов¹

Представлены экспериментальные результаты распределения излучения импульсного наносекундного разряда по поверхности феррита М1000НН. Разряд возбуждался высоковольтными импульсами напряжения 300 кВ, 15 нс. Изучалось пространственное распределение короткого (5 нс) рентгеновского (> 750 эВ) излучения, распространяющегося вдоль поверхности феррита. Исследуемое излучение имеет расходимость $\sim 4^\circ$ в направлении, перпендикулярном плоскости феррита.

Ключевые слова: феррит, поверхностный разряд, высоковольтный разряд.

Введение. Разряд по поверхности феррита, предложенный в [1], в ряде последующих работ применялся как источник коротковолнового излучения [2–4]. Преимущественно такие разряды применялись для оптической накачки лазеров (см., напр., [5]).

В [2] регистрировался спектр излучения в области 225–400 нм в атмосфере газов SF_6 , N_2 , Ar. В то же время отмечалось, что при давлении в камере $10^{-4} - 10^{-5}$ Торр появляются линии с длиной волны в области спектра 250 нм и возможно излучение в ВУФ и рентгеновской области спектра. В [3] исследовалось рентгеновское излучение в вакууме $10^{-5} - 10^{-2}$ Торр. Излучение длительностью ~ 2 мкс регистрировалось в момент времени, предшествующий началу тока разряда по поверхности феррита. Энергия фотонов 6.5 кэВ определялась по ослаблению интенсивности излучения при прохождении через Al фольгу разной толщины. В работах [4, 6] регистрировался спектр излучения разряда по ферриту в области 115–210 нм. В отличие от [3] излучение регистрировалось во время свечения разряда с максимальным током. Спектр ВУФ в вакууме 10^{-3} Торр соответствовал излучению элементов феррита Ni, Zn, Fe.

¹ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: bernatskiyav@lebedev.ru.

² МФТИ, 141701 Россия, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

В работах [7, 8] исследовалось излучение сильноточного (до 300 кА) разряда по поверхности феррита в вакууме 10^{-4} Торр в наносекундном диапазоне (~ 200 нс), напряжение питания до 300 кВ. С применением алмазного детектора и ослабляющих фильтров из Al, Be, полипропилена показано, что коротковолновое излучение лежит в диапазоне 10–800 эВ. Мощность ВУФ составляла ~ 0.3 ГВт.

Отметим, что во всех работах изучалось излучение в направлении перпендикулярно разряду и поверхности феррита. Исключение составляет работа [9], где исследовались свойства излучения, направленного вдоль разряда на установке [6, 7]. Была обнаружена генерация короткого (~ 2 нс) узконаправленного ($\sim 3^\circ$ – 5°) рентгеновского (> 1 кэВ) излучения с интенсивностью, квадратично-зависящей от длины разрядного промежутка.

Поскольку генерация такого излучения происходит в стадии разряда, до начала сильноточной фазы, то, по-видимому, определяющую роль в его формировании играет нарастание приложенного напряжения. В этой связи в рамках настоящей работы будут исследованы пространственные характеристики излучения, инициируемого разрядом по поверхности феррита, поддерживаемым маломощным генератором импульсного напряжения с амплитудным значением до 300 кВ и с фронтом нарастания ~ 1 нс.

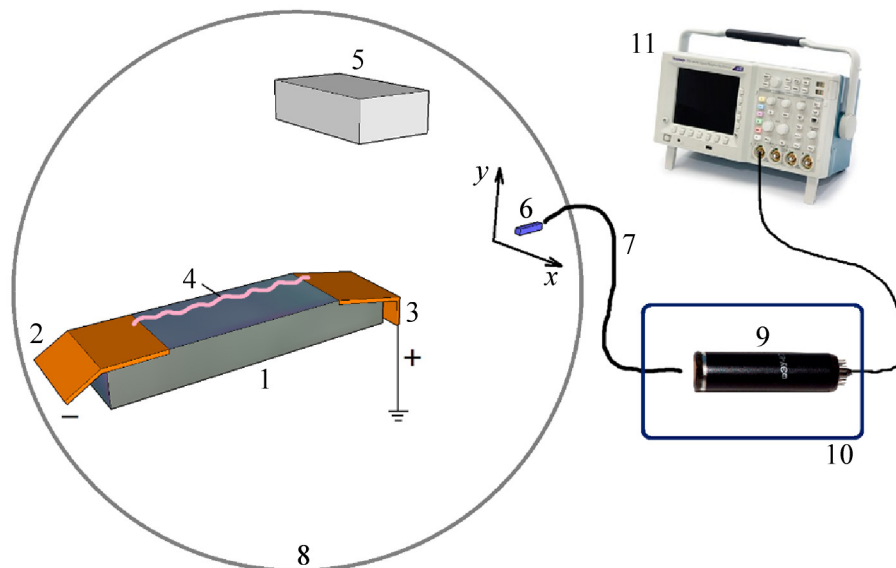


Рис. 1: Схема экспериментальной установки. 1 – феррит M1000НН; 2, 3 – медные электроды, 4 – плазменный канал, 5 – неодимовый магнит, 6 – сцинтиллятор, 7 – оптическое волокно, 8 – вакуумная камера, 9 – ФЭУ-87, 10 – металлический экран, 11 – осциллограф.

Экспериментальная техника. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

В качестве источника питания разряда применялся модифицированный блок импульсного рентгеновского аппарата Памир-300. По паспортным данным источник обеспечивает напряжение до 300 кВ с фронтом ~ 1 нс, общая потребляемая мощность < 300 Вт. Высоковольтное отрицательное напряжение прикладывалось через медный электрод к широкой плоскости прямоугольного феррита марки M1000NH с сечением 10×20 мм². Анод, также выполненный из медной пластины, монтировался в углублении на феррите на расстоянии 45 мм от катода так, чтобы он не выступал над плоскостью феррита. Излучение вдоль плоскости феррита регистрировалось со стороны анода.

Для интегральной регистрации использовалась многоцветная пластина TR Fuji imaging plate размером 3×4 см². В отдельных экспериментах пластина закрывалась майларом или алюминиевой фольгой. Измерения с временным разрешением осуществлялись с применением кварцевого оптического волокна диаметром 1.2 мм и длиной ~ 50 м, согласованным с ФЭУ. Приемник излучения ФЭУ-87, обеспечивал временное разрешение ~ 2 нс. Запись проводилась на осциллографе TDS 3032 с полосой 300 МГц. Для регистрации рентгеновского излучения конец оптического волокна, направленный в сторону разряда, стыковался со сцинтиллятором в трубке из свинцовой фольги. Сцинтиллятор длиной 1 см и сечением 2×2 мм² из полистирола, легированного π -терфенилом и РОРОР, имеет время отклика ~ 2 нс, что согласуется с временным разрешением приемного тракта. Для подавления попадания в ФЭУ видимого свечения разряда перед сцинтиллятором устанавливался фильтр из полипропилена с алюминиевым покрытием и в ряде экспериментов Al фольга толщиной 4 мкм.

Для разделения регистрации рентгеновского излучения и электронного пучка, формируемых в разряде, между ферритом и приемником излучения размещался постоянный неодимовый магнит 0.3 Тл размером $4 \times 2 \times 1$ см³. Положение и полярность магнита выбирались так, чтобы электронный пучок отклонялся “вниз” под плоскость феррита.

Пространственное распределение излучения, выходящего из разрядной зоны, измерялось с применением двухкоординатного моторизованного транслятора, управляемого программным образом с помощью компьютера. На подвижной части транслятора крепился сцинтиллятор с волноводом. Система позволяла позиционировать приемник излучения с точностью 0.1 мм по каждой координате на пространстве 10×10 см².

Разрядная часть с системой позиционирования и частью высоковольтного источника питания размещались в сферической вакуумной камере из нержавеющей стали. Диа-

метр камеры составлял 50 см. Система откачки с турбомолекулярным насосом Turbovac 350 обеспечивала остаточное давление в камере $\sim 10^{-5}$ Торр.

Измерение интегрального излучения на фотопластинке. Особенностью разряда по поверхности феррита является повторение пробоя по пути плазменного канала от импульса к импульсу. Это связано с модификацией феррита при достаточно сильном разогреве с резким увеличением электрической проводимости [1, 6, 10]. Поэтому для инициации плазменного канала в заданном положении на поверхности феррита проводились полосы графитом или медной токопроводящей пастой.

На рис. 2 представлены фотография разряда с двумя плазменными каналами по поверхности феррита (а) и отпечаток на фотопластинке (б). В данных экспериментах на поверхности феррита рисовались две графитовые полосы, затем инициировался разряд.

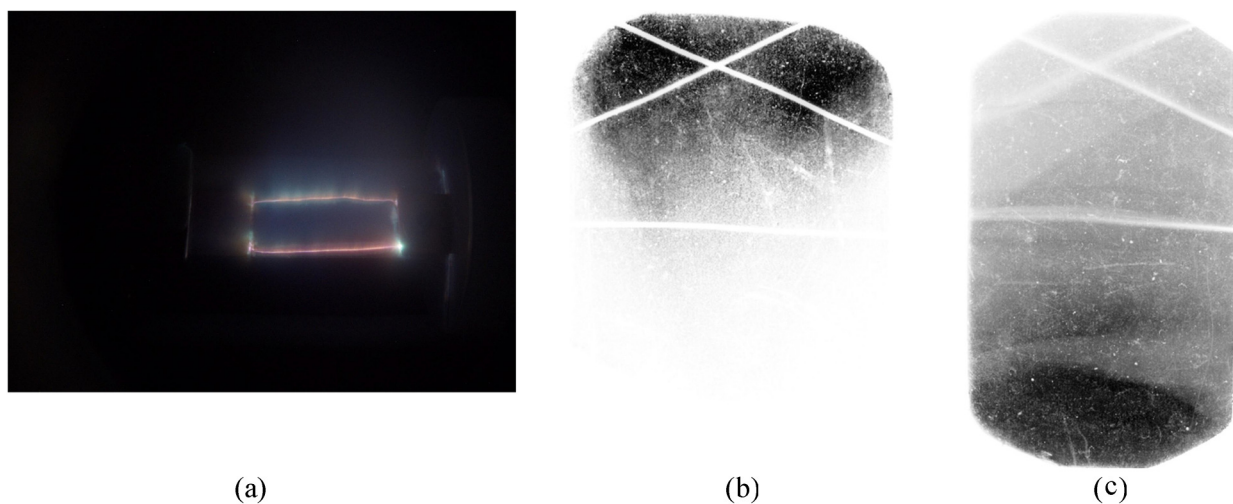


Рис. 2: Фотография разряда по поверхности феррита (а), отпечаток на фотопластинке (б), отпечаток на фотопластинке в присутствии постоянного магнита (с).

Пластина ImagePlate размером 3×4 см² размещалась на расстоянии 7 см от края феррита (в плоскости $(x; y)$ на рис. 1). Белые полосы на рис. 2((б), (с)) являются тенью от медных проволок, на которых крепилась фотопластинка. На рис. 2(б) можно отчетливо наблюдать 2 пятна, соответствующие двум плазменным каналам в разряде. В предположении, что в плазменных каналах сосредоточена основная концентрация электронов разряда, эти пятна могут быть, в том числе, результатом воздействия на пластину пучков электронов.

Для того чтобы исключить влияние электронных пучков на регистрируемый сигнал, между ферритом и пластиной размещался постоянный неодимовый магнит 0.3 Тл на

высоте ~ 2 см над плоскостью феррита (см. рис. 1). Результат регистрации с магнитом показан на рис. 2(с). Видно, что почернение пластинки сместилось в нижний край, что свидетельствует о большой составляющей в сигнале электронной компоненты. Аналогичные эксперименты были проведены с размещением магнита сбоку от фотопластинки со смещением почернения ее в противоположную сторону.

Однако в присутствии магнита почернение фотопластинки напротив плоскости феррита не наблюдалось. При записи нескольких импульсов только увеличивалась фоновая засветка. По-видимому, это связано с тем, что наблюдаемое узконаправленное рентгеновское излучение в [9] имеет относительно короткую длительность (< 2 нс) по сравнению с длительностью разряда. Излучение рентгеновского аппарата Памир-300, записанное с алмазным детектором, составляло ~ 25 – 40 нс. Таким образом, для регистрации и анализа обсуждаемого излучения требуются измерения с временным разрешением.

Пространственное распределение излучения с временным разрешением. Для изучения пространственного распределения излучения на поверхность феррита после полировки была нанесена проводящая дорожка, смещенная к одному из краев феррита. Это позволяет проводить измерения излучения как напротив плазменного канала, так и в стороне от него.

Оптическое волокно со сцинтиллятором крепилось в двухкоординатном трансляторе на расстоянии 76 мм от торца феррита. Сцинтиллятор размером $2 \times 2 \times 10$ мм³ присты-

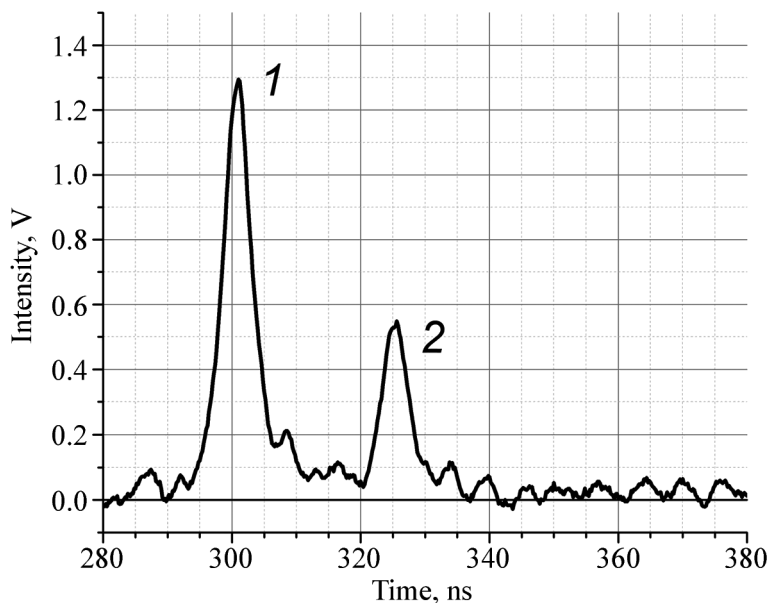


Рис. 3: Интенсивность флуоресценции сцинтиллятора.

ковывался к оптическому волокну, место соединения снаружи изолировалось свинцовым скотчем так, чтобы открытым оставался только торец, углубленный в свинцовую трубку на 2 мм. Для подавления видимого излучения от разряда торец сцинтиллятора закрывался пленкой из майлара толщиной 4 мкм, покрытого слоем алюминия. Алюминиевая фольга позволяет фильтровать излучение с энергией < 750 эВ (по уровню 10%). Возбуждаемая коротковолновым (рентгеновским) излучением флуоресценция на длине волны ~ 430 нм проходила через кварцевое волокно и регистрировалась ФЭУ-87.

На рис. 3 представлен характерный сигнал с ФЭУ, записанный на осциллографе TDS3032. Обращает внимание наличие 2-х пиков флуоресценции. Возможной причиной второго пика являются колебания напряжения (тока) при перезарядке конденсатора, и электроны при попадании на медный катод вызывают характеристическое рентгеновское излучение, которое регистрирует приемник. Временная задержка второго пика относительно первого ~ 25 нс соответствует длительности рентгеновского излучения аппарата Памир-300. Ширина пиков на полувысоте 5–6 нс, что соответствует временному разрешению регистрирующей аппаратуры. По времени первый пик относится к начальной стадии разряда и, по-видимому, соответствует излучению, наблюдаемому в [9].

На рис. 4 представлено распределение интенсивности по оси y (перпендикулярно плоскости феррита) и по оси x (вдоль поверхности феррита). Все измерения проводились в присутствии постоянного магнита. Плоскость феррита, к которой прикладывалось напряжение, располагалась по координате $y = 0$ мм, в пределах координаты $x = (-10; 10)$ мм. Зона пробоя разряда соответствовала координате $x = (-8; -4)$ мм. Сечение феррита, обращенное к сцинтиллятору, имело координаты $[x; y] = [(-10 - 10); (0 - -10)]$. Каждая точка на графике соответствует усреднению минимум по 3 измерениям.

Ширина на полувысоте распределения по координате y излучения первого пика (см. рис. 4(a)) в зоне напротив плазменного канала ($x = -7$) ~ 9 мм. Оценивая угловую расходимость по аналогии с [9], получим $\sim 4^\circ$, в зоне без разряда ($x = 7$, рис. 4(b)) эти параметры 7 мм, 3° , соответственно. Эти значения хорошо согласуются с результатами, полученными с сильноточным разрядом [9]. Учитывая, что в плазменном канале концентрация электронов существенно выше, чем вне его, можно предположить, что более широкое распределение (рис. 4(a)) связано с тормозным или характеристическим рентгеновским излучением на элементах феррита. По отношению интенсивностей в максимумах распределений этот дополнительный вклад составляет $\sim 20\%$. Высокая интенсивность регистрируемого сигнала в зоне плазменного канала видна и на распределении

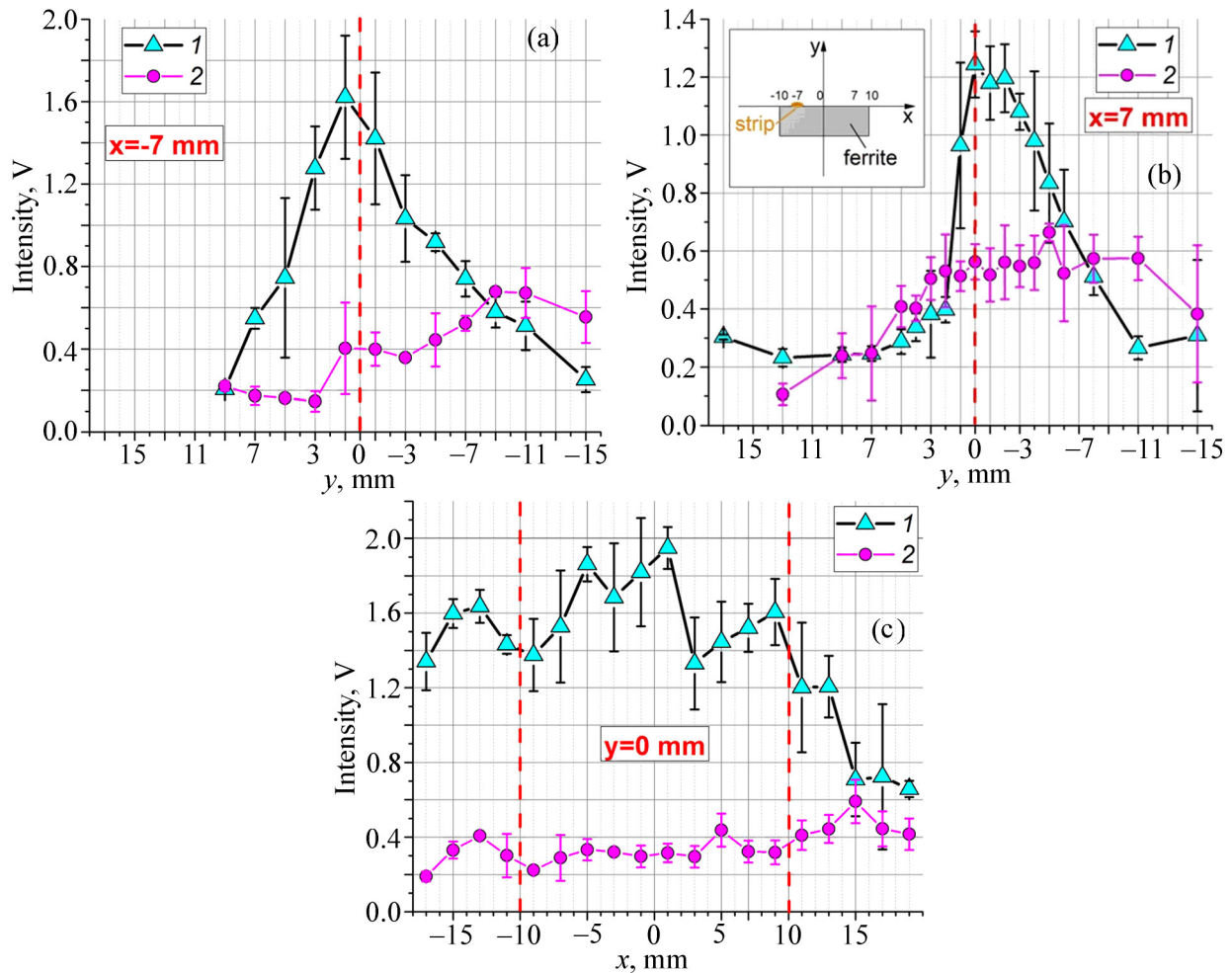


Рис. 4: Пространственные распределения излучения вдоль поверхности феррита. ((a), (b)) перпендикулярно плоскости феррита, (c) вдоль поверхности феррита, перпендикулярно разряду; (a) напротив разряда, (b) в зоне отсутствия разряда. 1 – интенсивность 1-го пика; 2 – 2-го.

по координате x (рис. 4(c)). Если угловое распределение излучения по координате y , перпендикулярной плоскости феррита, соответствует результатам [9], то вдоль поверхности феррита это распределение не имеет узкой направленности. Пространственное распределение второго пика во всех плоскостях имеет пологий характер.

Заключение. Исследовалось излучение, инициируемое высоковольтным (300 кВ) разрядом по поверхности феррита М1000НН. Изучено пространственное распределение рентгеновского излучения >750 эВ, направленного вдоль разряда. Несмотря на переход к существенно более слабому источнику импульсного напряжения, чем в [9], в

начальной фазе разряда наблюдался интенсивный пик излучения длительностью ~ 5 нс с узкой угловой расходимостью $\sim 4^\circ$ в направлении, поперечном плоскости феррита. Высокая направленность излучения при отсутствии фокусирующих или ограничивающих устройств с большой вероятностью указывает на его когерентный характер. Результаты согласуются с ранними исследованиями излучения в сильноточном разряде по поверхности феррита [9].

Авторы выражают благодарность Мозговому Александру Григорьевичу и Богаченкову Виктору Анатольевичу за помощь в создании высоковольтного источника напряжения на базе рентгеновского аппарата Памир-300.

Работа выполнена за счет средств гранта Российского научного фонда (проект №19-79-30086).

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] K. Watanabe, S. Kashiwabara, and R. Fujimoto, *Appl. Phys. Lett.* **50**, 629 (1987). DOI: 10.1063/1.98102.
- [2] S. Kashiwabara, K. Watanabe, and R. Fujimoto., *Journal of Applied Physics* **63**, 2514 (1988). DOI: 10.1063/1.341031.
- [3] K. Watanabe, K. Furusho, S. Kashiwabara, and R. Fujimoto, *Journal of Applied Physics* **68**, 5059 (1990). DOI:10.1063/1.347068.
- [4] M. L. Sentis, F. Chazaud, Ph. C. Delaporte, and W. I. Marine, *Appl. Phys. Lett.* **63**, 2333 (1993). DOI:10.1063/1.110517.
- [5] С. В. Митько, В. Н. Очкин, А. В. Парамонов, А. П. Широких, *Краткие сообщения по физике ФИАН*, № 11, 47 (1989). https://ksf.lebedev.ru/outputfile_mainpage.php?id=2647.
- [6] V. I. Tcheremiskin, M. L. Sentis, Ph. C. Delaporte, et al., *Journal of Applied Physics* **80**, 2094 (1996). DOI: 10.1063/1.363116.
- [7] И. Н. Тиликин, С. Н. Цхай, Т. А. Шелковенко и др., *Физика плазмы* **44**, 526 (2018). DOI: 10.7868/S0367292118060100.
- [8] I. N. Tilikin, S. N. Tzhai, T. A. Shelkovenko, et al., *IEEE Transactions on Plasma Science* **46**, 3982 (2018). DOI:10.1109/TPS.2018.2873065.
- [9] I. N. Tilikin, N. V. Pestovskii, S. A. Pikuz, et al., *Coherent x-ray radiation induced by high-current breakdown on a ferrite surface*. arXiv:1910.13851v1 <https://arxiv.org/abs/1910.13851v1>.

- [10] С. В. Митько, В. Н. Очкин, П. Л. Рубин, Журнал технической физики **63**(8), 32 (1993). <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/15700>.

Поступила в редакцию 22 июня 2021 г.

После доработки 3 сентября 2021 г.

Принята к публикации 4 сентября 2021 г.