

О выпуске и запираии флуоресцентной линии K_{α} железа самоорганизованной межэлектродной средой наносекундного вакуумного разряда

Ю. К. Куриленков, В. П. Тараканов

Ранее обсуждался эффект частичного «запираания» и вспышек рентгеновского излучения (РИ) с энергией меньше или порядка K_{α} -Pd в плотной межэлектродной полидисперсной среде наносекундного вакуумного разряда (НВР) с анодом из Pd трубок. В данной работе представлен и моделируется эксперимент в НВР с анодом из железа, где наблюдается как выпуск, так и запираание РИ межэлектродной средой квантов K_{α} -Fe, энергия которых более чем в три раза меньше, чем в палладиум. Это говорит в пользу того, что нужная энергия жёстких квантов во вспышках РИ, близкая к линии K_{α} , может быть получена выбором материала анода.

Ключевые слова: наносекундный вакуумный разряд, полидисперсная межэлектродная среда, диффузия рентгеновских квантов.

Ссылка: Куриленков Ю. К., Тараканов В. П. // Прикладная физика. 2020. № 6. С. 28.

Reference: Yu. K. Kurilenkov and V. P. Tarakanov, Applied Physics, No. 6, 28 (2020) [in Russian].

Введение

Наиболее перспективные применения рентгеновских лазеров традиционно связывают с энергией квантов ≥ 5 кэВ (хорошее распространение в воздухе и веществе, межатомные расстояния, длины связей различных соединений и т. п.) [1]. Поиски новых лазерных сред уже давно привели к идее о стохастическом резонаторе [2], которая была подтверждена и используется в видимой области спектра [3–5]. В рентгеновском диапазоне стохастический или случайный (СЛ) лазер еще не реализован. Недавно, был предложен и обсуждался стохастический резонатор в рентгеновской области спектра на основе полидисперсной межэлектродной среды наносекундного вакуумного разряда (НВР) [6, 7]. Было показано, что условия для стохастической

обратной связи могут возникать при запираии РИ за счет перерасеяния в плотных межэлектродных ансамблях наночастиц (нано-кристаллов).

Диффузионная модель В. С. Летохова [2] стохастического запираания и наработки излучения в объеме случайно расположенных отражающих частиц позволила качественно описать результаты экспериментов по регистрации запираания и вспышек флуоресцентного излучения K_{α} -Pd (21,177 кэВ) в НВР с анодом из Pd трубок и хорошо выраженным виртуальным катодом [5]. В отличие от концепции стохастического лазера (СЛ) [2], где идёт цепная реакция роста числа фотонов в усиливающей среде при превышении порога генерации, в НВР рост числа фотонов имеет предел насыщения, определяемый источником жёстких квантов [6, 7]. Таким источником является торможение энергичных электронов (≤ 70 кэВ) во всём самоорганизованном объёме полидисперсном межэлектродном объёме НВР. При всех различиях, природа самих вспышек в НВР и в гипотетическом СЛ в рентгеновском диапазоне оказывается по-своему близка – это проявление заметно бóльшей генерации диффузного РИ в объёме межэлектродных ансамблей наночастиц в НВР, или, для случая СЛ, бóльшей экспоненциальной наработке

Куриленков Юрий Константинович^{1,2}, с.н.с., к.ф.-м.н.
Тараканов Владимир Павлович¹, с.н.с., д.ф.-м.н.

¹Объединённый институт высоких температур РАН.
Россия, 125412, Москва, Ижорская ул., 13, стр. 2.
E-mail: kurilenkovyuri@gmail.com

²Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН.
Россия, 119991, Москва, Ленинский просп., 53.

Статья поступила в редакцию 25 сентября 2020 г.

© Куриленков Ю. К., Тараканов В. П., 2020

жестких фотонов в объёме активной среды, чем потери РИ с поверхности в обоих случаях.

В данной работе, в продолжение и дополнение к исследованию запираания и вспышек K_{α} -Pd в НВР [8], представлены и обсуждаются результаты экспериментов и моделирования процессов в НВР с анодом из железа, где K_{α} -Fe (6,403 кэВ) имеет в три с лишним раза менее жесткий квант.

РiС моделирование условий эксперимента с НВР

Схема эксперимента по DD синтезу в НВР и его детальное описание приведены ранее в [9–12] (основные параметры разряда: $U = 70$ кВ, $I_{\max} = 1$ кА, $T_{\text{имп}} = 50$ нс, вкладываемая энергия ≈ 1 Дж). Главные отличия данного эксперимента по генерации и выходу РИ состоят в том, что использованный ранее палладиевый анод, наполненным дейтерием [9, 11], заменён на анод из железа, и помимо PIN диодов для регистрации РИ с энергией ≤ 10 кэВ (каналы 1 и 3 на рис. 2, 3 ниже) был использован лишь один канал с ФЭУ для энергий фотонов более 10 кэВ (канал 2). В настоящем эксперименте мы используем цилиндрический Fe анод диаметром 0,6 см. Торец Fe анода, обращённый к катоду, имеет выемку, близкую к параболоиду вращения. В результате, кромка торца анода представляет собой обострённое по периметру кольцо (рис. 1, а). Польный цилиндрический алюминиевый катод имеет коническую часть, обращённую к аноду. Такая геометрия анод–катод позволяет получить в межэлектродном пространстве лишь некое подобие виртуального катода, который выра-

жен не столь чётко как в случае с трубчатым Pd анодом [10, 13]. В рамках электродинамического кода КАРАТ [10, 14, 15], в частности, была получена динамика частиц и структура межэлектродного потенциала в выбранной геометрии электродов. Рис. 1, а даёт представление о геометрии использованных электродов и специфике возникающего виртуального катода. Здесь показаны 2D траектории ускоренных электронов, облучающих анод. На рис. 1, б приведен потенциал по радиусу разряда r и оси разряда Z . Глубокой потенциальной ямы (ПЯ), ускоряющей ионы по радиусу, как ранее в экспериментах по DD синтезу с анодными Pd трубками [10, 12, 13], здесь не возникает. Тем не менее, рельеф потенциала даёт представление о том, что может происходить в межэлектродном пространстве. В частности, неглубокая ПЯ по радиусу просматривается внутри выемки в торце анода (с минимумом потенциала ~ 30 кэВ при $Z = 1,5$ см). За кромкой анода, при $r > 0,3$ см, потенциал резко падает до -70 кВ на конусе катода. Начиная от дна анодной выемки (при $Z = 1$ см) и далее вдоль оси Z , имеет место плавное уменьшение потенциала. Видно, что ускоренные до энергии 70 кэВ электроны будут ударять как по внешней кромке анода, пройдя кратчайшее расстояние от конической части катода, так и бомбардировать его внутреннее пространство, попадая туда по более длинной траектории (рис. 1, а). Таким образом, поскольку энергия автоэлектронов достаточно велика, условия как возникновения эрозионной полидисперсной межэлектродной среды, так и для генерации жесткого РИ вполне существуют и в данном НВР эксперименте с Fe анодом.

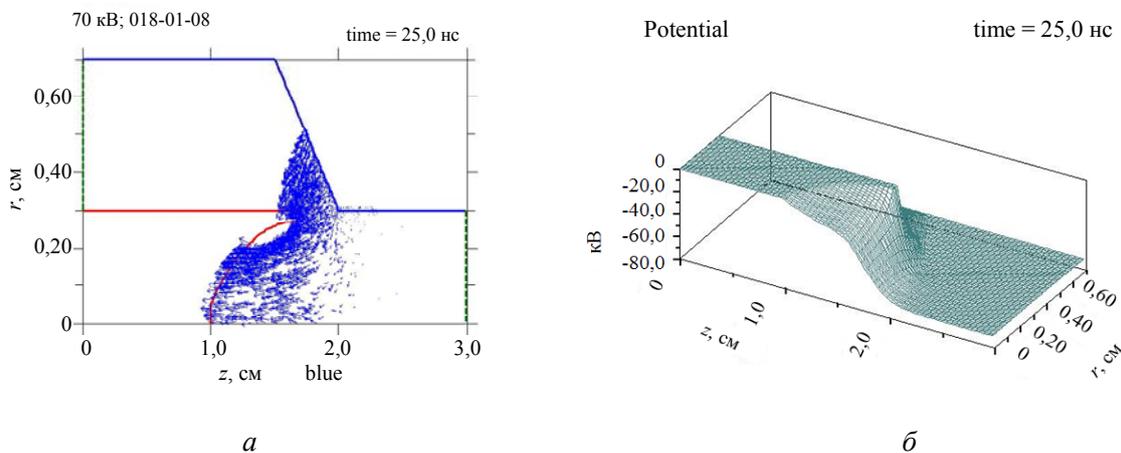


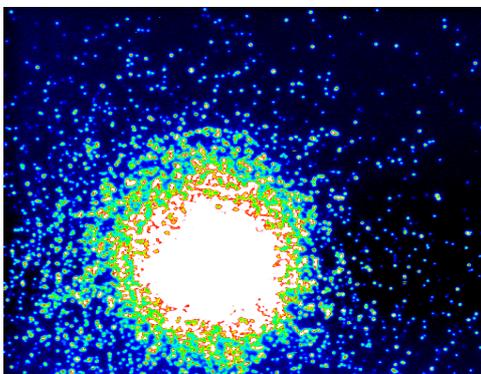
Рис. 1. РiС моделирование в выбранной геометрии электродов (Fe анод – красный. Al катод – синий): а) – динамика электронов (синие векторы) и виртуальный катод (на 25-й нс счёта); б) – рельеф потенциала вдоль оси разряда Z и по его радиусу r в межэлектродном пространстве (см. текст).

Запирание и выпуск РИ в эксперименте с Fe анодом

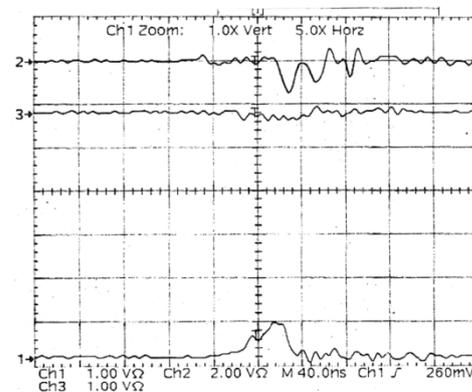
В настоящем кратком сообщении мы ограничимся лишь двумя крайними примерами зарегистрированных близких по форме межэлектродных ансамблей, но с совершенно различным выходом РИ. Как и ранее [9, 11], изображения межэлектродной среды в рентгене (≥ 1 кэВ) фиксируются CCD камерой через отверстие (обскуру) в пластине из свинца (толщина 0,2 см), покрытое алюминиевой фольгой толщиной 0,1 мм. Как уже упоминалось выше, для регистрации РИ с энергией ≤ 10 кэВ (каналы 1 и 3) были использованы PIN диоды, а для энергий фотонов около и более 30 кэВ использован ФЭУ (канал 2), сигнал с которого всегда имеет электронное время задержки на ≈ 35 нс по сравнению с почти мгновенными сигналами PIN диодов. Важно отметить, что линия K_{α} -Fe (6,403 кэВ) удачно попадает примерно в максимум чувствительности использованных PIN диодов.

На рисунке 2, а приведено CCD изображение самоорганизованного межэлектродного

ансамбля, а выход РИ показан на осциллограммах (рис. 2, б). Видно, что в целом выход РИ незначителен, но, к счастью, интенсивность РИ на канале 1 превышает триггерное значение 100 мВ [8], необходимое для регистрации осциллограмм (здесь РИ, регистрируемое PIN диодом, выходит на наблюдателя). Поучительно сопоставить практически отсутствующий выход РИ вверх (PIN диод, канал 3) со структурой хорошо зафиксированной границы межэлектродного ансамбля (вверх по радиусу CCD изображения полидисперсного «шара»). Как мы видим, выход РИ вверх практически отсутствует (канал 3), т. е. плотная среда нанокластеров (нанокристаллов) железа практически запирает выход РИ, что и зафиксировано незначительным сигналом с PIN диода. На рис. 2, а достаточно чётко зарегистрирована структура верхней границы межэлектродного кластерного ансамбля, которая и не выпускает РИ. Таким образом, можно заключить, что линия K_{α} -Fe практически заперта в данном выстреле плотной самоорганизованной полидисперсной средой.



а



б

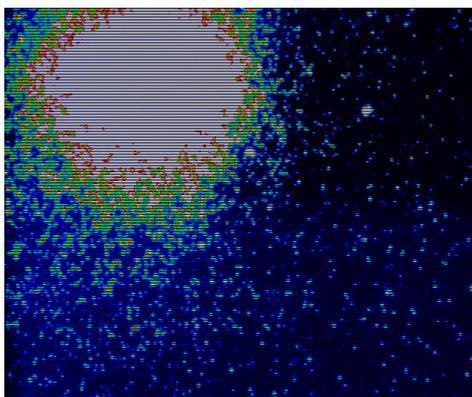
Рис. 2. Динамика выхода РИ в режиме 1: а – CCD изображение межэлектродного полидисперсного ансамбля; б – осциллограммы интенсивности выхода РИ во времени (одна большая клетка – 40 нс). Низкая интенсивность выходящего РИ означает, что фотоны с энергией, близкой к K_{α} -Fe (6,403 кэВ) (каналы 1, 3) практически заперты (в первую очередь это относится к крайне низкому выходу РИ вверх, канал 3).

На рисунке 3, а приведено CCD изображение самоорганизованного межэлектродного ансамбля для другого выстрела в той же экспериментальной серии, а на рис. 3, б приведены соответствующие осциллограммы выхода РИ. Здесь межэлектродный полидисперсный ансамбль примыкает к верхней части кромки торца анода. В данном случае РИ не заперто, и

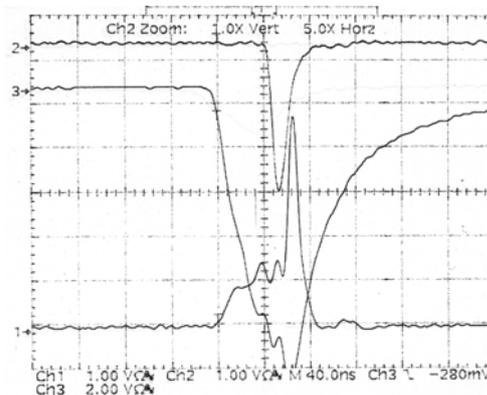
его выход оказывается сильно анизотропным. Действительно, поскольку чувствительность канала 3 в данном выстреле в два раза ниже, чем на канале 1 (рис. 3, б), РИ в области энергий ≤ 10 кэВ выходит, в основном, вверх (интенсивность РИ, выходящего вверх, канал 3, примерно в 3–5 раз выше, чем на канале 1, где РИ выходит на наблюдателя). Отметим

наблюдаемые здесь пульсации интенсивности выходящего анизотропного РИ, которые нарастают во времени. Более жёсткое РИ (канал 2) выходит одновременно с самым началом роста сигналов с PIN диодов (для сравнения с ними в реальном времени, надо мысленно сместить максимум жёсткого РИ, канал 2, на ≈ 35 нс влево). Длительность выхода фотонов (на полувысоте интенсивности) с энергией, близкой к K_{α} -Fe, почти в 3–4 раза больше, чем жёсткого РИ (≥ 30 кэВ), и достигает ~ 80 нс (каналы 1, 3). По-видимому, эта величина и близка к времени диффузии K_{α} -Fe в межэлектродном ансамбле. Из интенсивности выхода РИ видно (рис. 3, б), что первые примерно 50 нс (включая два маленьких пика, каналы 1 и 3) диффузные фотоны K_{α} -Fe распространяются в

объёме полидисперсного ансамбля, «пробиваясь» к его поверхности, и чуть позже (10–30 нс) полностью выходят наружу (интенсивный третий пик, каналы 1 и 3). С другой стороны, высокая интенсивность выхода РИ вверх (канал 3) может указывать и на то, что основной вклад в интенсивность РИ может соответствовать K_{α} -Fe и тормозному излучению непосредственно с верхней правой кромки анода, облучаемой электронами (рис. 1, а), которая, судя по положению межэлектродного ансамбля в пространстве (рис. 3, а), очень близка к его границе. В направлении наблюдателя, по-видимому, полидисперсная среда оказывается плотнее и толще, и РИ выходит с меньшей интенсивностью (рис. 3, б, канал 1) из-за потерь в процессе диффузии фотонов в среде.



а



б

Рис. 3. Динамика выхода РИ в режиме 2: а) – CCD изображение межэлектродного полидисперсного ансамбля; б) – осциллограммы интенсивности регистрирующий пульсирующий анизотропный выход РИ в области K_{α} -Fe (каналы 1 и 3).

Заключительные замечания

Геометрия использованного в данном эксперименте железного анода оказывается ближе к случаю Pd анода из 13 трубок, где мы ранее [8] часто получали в эксперименте довольно плотные межэлектродные ансамбли, имели хорошее запираение РИ и его малый выход с поверхности, но плохо выраженный ВК из – за большого числа анодных Pd трубок, не позволяющих пучкам электронов свободно проникать внутрь анодного пространства по радиусу, и, как следствие, – отсутствие вспышек РИ.

Ранее также отмечалось [7], что, по-видимому, выбор материала анода в НВР поз-

волит реализовать запираение или вспышку с флуоресцентной линией K_{α} того элемента, из которого сделан анод, в соответствующей ему плотной эрозионной анодной полидисперсной плазме. В данном эксперименте межэлектродный объём НВР, как и ранее с Pd анодом [7, 8], естественно, оказывается также без усиления, но мгновенно заполняется квантами K_{α} -Fe (6,403 кэВ) и тормозными фотонами за счёт торможения энергичных автоэлектронов в полидисперсной среде с плотной оболочкой (рис. 2, а). Поэтому, на рис. 3, б наблюдается не вспышка СЛ, а просто выход РИ из межэлектродного ансамбля, по-видимому, не столь плотного и самоорганизованного, чтобы полностью «запереть» K_{α} -Fe как в выстреле

на рис. 2. Вопрос о том, как сделать межэлектродную среду усиливающей, пока остаётся открытым [6]. Поскольку в данном эксперименте зарегистрированы как хорошее запираение РИ в области K_{α} -Fe (6,403 кэВ), так и его выпуск, а ранее то же самое наблюдалось для K_{α} -Pd (21,177 кэВ) [6–8], можно предположить, что данный эффект имеет место в достаточно широком диапазоне K_{α} (≈ 5 –25 кэВ) для анодов из других элементов (Al, Ti, Ni, Cu и др.). Лабораторная астрофизика на основе НВР, касающаяся выхода флуоресцентной линии K_{α} -Fe [16] и других сопутствующих вопросов [17, 18], заслуживает отдельного обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Elton C. X-rays lasers. – New York: Academic Press, 1990.
2. Летохов В. С. // ЖЭТФ. 1967, т.53, с.1442.
3. Wiersma D. S. // Nat. Phys. 2008. Vol. 4. № 5. P. 359.
4. Cao H. // J. Phys. – Math. Gen. 2005. Vol. 38. № 49. P. 10497.
5. Noginov M. Solid State Random Laser. – Springer, 2005.
6. Курилеников Ю. К., Сметанин И. В., Огинов А. В., Самойлов И. С. // Прикладная физика. 2020. № 5. С. 23.
7. Smetanin I. V., Kurilenkov Yu. K., Oginov A. V., Samoylov I. S. // J. Russian Laser Res. 2020. Vol. 41. № 6. P. 607.
8. Kurilenkov Yu. K., Smetanin I. V., Oginov A. V., Samoylov I. S. // J. Russian Laser Res. 2020. Vol. 41. № 5. P. 491.
9. Kurilenkov Yu. K., Tarakahov V. P., Gus'kov S. Yu., et al. // J. Phys. A: Math & Theor. 2009. Vol. 42. P. 214041.
10. Kurilenkov Yu. K., Tarakahov V. P., Gus'kov S. Yu. // Plasma Physics Reports. 2010. Vol. 36. № 13. P. 1227.
11. Kurilenkov Yu. K., Tarakanov V. P., Gus'kov S. Yu., et al. // J. Physics: Conf. Series. 2015. Vol. 653. P. 012026.
12. Kurilenkov Yu. K., Tarakanov V. P., Gus'kov S. Yu., Oginov A. V., Samoylov I. S. // Journal of Physics: Conf. Series. 2019. Vol. 1147. P. 012103.
13. Kurilenkov Yu. K., Tarakanov V. P., Gus'kov S. Yu., Oginov A. V., Karpukhin V. T. // Contributions to Plasma Physics. 2018. Vol. 58. № 10. P. 952.
14. Tarakanov V. User's manual for code KARAT. – Springfield VA, USA: Berkeley research associates, 1992.
15. Tarakanov V. // EPJ Web of Conferences. 2017. Vol. 149. P. 04024.
16. Churazov E., Sunyaev R., Sazonov S., et al. // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2005. Vol. 357. № 4. P. 1377.
17. Летохов В. С. // Квантовая электроника. 2002. Т. 32. № 12. С. 1065.
18. Varaksin A. Y. // High Temperature. 2020. Vol. 58. № 4. P. 595; 646.

PACS: 52.58.Ei, 52.58 Qv

On release and trapping of the K_{α} -Fe line by the interelectrode medium of nanosecond vacuum discharge

Yu. K. Kurilenkov^{1,2} and V. P. Tarakanov¹

Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences
Bd. 2, 13 Izhorskaya st., Moscow, 125412, Russia

² Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences
53 Leninskii Prospect, Moscow 119991, Russia

Received September 25, 2020

Previously, we discussed the effect of partial trapping and X-ray bursts with energies less than or of the order of K_{α} -Pd in a dense interelectrode polydisperse medium of a nanosecond vacuum discharge (NVD) with an anode of Pd tubes. In this work, we present and simulate an experiment in an NVD with an iron anode, where both the release and trapping of the X-ray radiation by the interelectrode medium of K_{α} -Fe quanta, the energy of which is more than three times less than in palladium, is observed. This speaks in favor of the fact that the required en-

ergy of hard quanta in X-ray flares, close to the Ka line, can be obtained by choosing the anode material.

Keywords: nanosecond vacuum discharge, polydisperse interelectrode medium, diffusion of X-ray quanta.

REFERENCES

1. C. Elton, *X-rays lasers* (New York, Academic Press, 1990).
2. V. C. Letokhov, JETP **53**, 1442 (1967).
3. D. S. Wiersma, Nat. Phys. **4** (5), 359 (2008).
4. H. Cao, J. Phys. – Math. Gen. **38** (49), 10497 (2005).
5. M. Noginov, *Solid State Random Laser* (Springer, 2005).
6. Yu. K. Kurilenkov, I. V. Smetanin, A. V. Oginov, and I. S. Samoylov, Applied Physics, No. 5, 23 (2020) [in Russian].
7. I. V. Smetanin, Yu. K. Kurilenkov, A. V. Oginov, and I. S. Samoylov, J. Russian Laser Res. **41** (6), 607 (2020).
8. Yu. K. Kurilenkov, I. V. Smetanin, A. V. Oginov, and I. S. Samoylov, J. Russian Laser Res. **41** (5), 491 (2020).
9. Yu. K. Kurilenkov, V. P. Tarakahov, S. Yu. Gus'kov, et al., J. Phys. A: Math & Theor **42**, 214041 (2009).
10. Yu. K. Kurilenkov, V. P. Tarakanov, and S. Yu. Gus'kov, Plasma Physics Reports **36** (13), 1227 (2010).
11. Yu. K. Kurilenkov, V. P. Tarakanov, S. Yu. Gus'kov, et al., J. Physics: Conf. Series **653**, 012026 (2015).
12. Yu. K. Kurilenkov, V. P. Tarakanov, S. Yu. Gus'kov, A. V. Oginov, and I. S. Samoylov, Journal of Physics: Conf. Series **1147**, 012103 (2019).
13. Yu. K. Kurilenkov, V. P. Tarakanov, S. Yu. Gus'kov, A. V. Oginov, and V. T. Karpukhin, Contributions to Plasma Physics **58** (10), 952 (2018).
14. V. Tarakanov, *User's manual for code KARAT* (Springfield VA, USA: Berkeley research associates, 1992).
15. V. Tarakanov, EPJ Web of Conferences **149**, 04024 (2017).
16. E. Churazov, R. Sunyaev, S. Sazonov, et al. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society **357** (4), 1377 (2005).
17. V. S. Letokhov, Quantum Electron **32** (12), 1065 (2002).
18. A. Y. Varaksin, High Temperature **58** (4), 595; 646 (2020).