

Скейлинг времени генерации рентгеновского излучения для X-пинча

А.П. Артёмов^{1,*}, А.В. Федюнин¹, С.А. Чайковский², В.И. Орешкин¹

¹Институт Сильноточной Электроники СО РАН, Томск, Россия

²Институт Электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

*artyomov@ovpe.hcei.tsc.ru

Аннотация. В работе была экспериментально изучена динамика развития перетяжки X-пинча, состоящего из молибденовых или вольфрамовых проводников, на компактном сильноточном генераторе X-пинча (230 кА, 180 нс) и импульсном генераторе ИМРИ-5 (450 кА, 450 нс). В экспериментах были получены оптические снимки X-пинчей со временем экспозиции кадра 3 нс с помощью четырехкадровой камеры HSFC-Pro, которые позволили измерить длину перетяжки X-пинча. Получена зависимость длины перетяжки от начальной погонной массы X-пинча: $L_{\text{exp}} = 0.25 \cdot m_0 + 230$. Предложен скейлинг времени рентгеновской вспышки, который учитывает зависимость длины перетяжки от массы X-пинча.

Ключевые слова: Z-пинч, X-пинч, сильноточный импульсный генератор, диагностика плазмы

1. Введение

X-пинч является разновидностью проволочных нагрузок сильноточных импульсных генераторов. Главной особенностью X-пинча является то, что проволочки, составляющие его, скрещены между собой в форме буквы «X». При пропускании по такой нагрузке импульса тока с амплитудой не менее 100 кА и скоростью нарастания тока более 1 кА/нс в области перекрестия формируется плотная высокотемпературная плазма, ярко излучающая в мягкой области рентгеновского спектра. Размеры данного плазменного объекта составляют единицы микрон, а плотность ионов и электронная температура могут достигать значений 10^{22} см^{-3} и 1 кэВ, соответственно [1, 2]. По этой причине он получил название «горячая точка». Длительность импульса рентгеновского излучения X-пинча составляет менее 1 нс [1–3]. Основным его применением является импульсная радиография, которая, как правило, используется при исследовании структуры и распределения массы различных плазменных объектов [4–7].

Скейлинг времени генерации импульса рентгеновского излучения или иными словами зависимость момента появления рентгеновского импульса от величины тока генератора, а также от материала, диаметра и количества проволочек X-пинча, представляет важный практический интерес. Возможность предсказывать момент появления импульса рентгеновского излучения существенно помогает при создании новых радиографических систем. Не смотря на долгую историю исследований X-пинчей строго говоря обоснованного скейлинга для них не существует, что связывают со сложностью процессов, происходящих в X-пинчах, и трудностью их теоретического описания [8]. Как правило, параметры X-пинча для конкретного импульсного генератора тока устанавливаются путем подбора диаметров и количества проводников нагрузки исходя из имеющихся экспериментальных данных.

Задачей работы было понять вид скейлинга времени рентгеновской вспышки от параметров тока генератора и проводников X-пинча. В физике Z-пинчей такой скейлинг хорошо известен и имеет следующий вид [8, 9]:

$$\frac{I_f^2 t_f^2}{R_0^2 m_0 c^2} = \Pi, \quad (1)$$

где I_f – амплитуда тока в конце сжатия, t_f – время сжатия, m_0 и R_0 – начальные погонная масса и радиус оболочки, соответственно. Судя по всему, скейлинг для X-пинчей должен быть приблизительно такой же, однако величина R_0 в этом случае четко не определена.

2. Скейлинг времени генерации рентгеновского излучения X-пинча

В работе [10] описана разработанная нами полуэмпирическая модель, в которой имплозия перетяжки X-пинча сопровождается истеканием вещества из области перекрестия в обоих аксиальных направлениях, что многократно наблюдалось в экспериментах [11, 12]. Ускорение оттока вещества из области перетяжки в модели описывается уравнением [10]:

$$\frac{du}{dt} = \frac{2I^2}{c^2 L m} - \frac{2u^2}{L}, \quad (2)$$

где u – скорость вытекания вещества из перетяжки, I – ток в перетяжке, m – погонная масса перетяжки и L – длина перетяжки. А изменение погонной массы перетяжки m описывается уравнением [10]:

$$\frac{d^2 m}{dt^2} = \frac{2}{m} \left(\frac{dm}{dt} \right)^2 - \frac{4I^2}{c^2 L^2}. \quad (3)$$

Решением этого уравнения является скейлинг времени генерации рентгеновского излучения X-пинча, в котором длина перетяжки L представляет собой параметр масштабирования. Полученный скейлинг в практических единицах имеет следующий вид [10]:

$$\frac{L\sqrt{m_0}}{I_{\text{exp}} t_{\text{exp}}} \approx C, \quad (4)$$

где L в [мкм], I_{exp} – ток в горячей точке в [кА], t_{exp} – время генерации рентгеновского излучения в [нс], m_0 – начальная погонная масса X-пинча в [мкг/см]. Коэффициент C зависит от формы тока и угла наклона проволочек φ относительно оси X-пинча. При угле наклона проволочек $\varphi = 32^\circ$ и линейно нарастающем токе $C \approx 0.26$, а при синусоидальном токе – $C \approx 0.3$.

3. Экспериментальная установка

Чтобы подтвердить верность модели мы выполнили несколько экспериментов, в которых была измерена длина перетяжки X-пинчей с помощью оптической четырех кадровой камеры HSFC-Pro со временем экспозиции одного кадра 3 нс. В эксперименте исследовались X-пинчи, состоящие из 2, 4 или 8 проволочек, диаметр которых варьировался в диапазоне (13–50) мкм. В работе использовались проволочки из молибдена или вольфрама.

Эксперименты были выполнены на двух разных сильноточных импульсных генераторах: один – компактный генератор тока X-пинча (амплитуда тока 230 кА и время нарастания тока 180 нс) [1, 10, 12], другой – генератор ИМРИ-5 (амплитуда тока 450 кА и время нарастания тока 450 нс) [4]. Токи обоих генераторов измерялись с помощью поясов Роговского. Чтобы определить момент появления импульса рентгеновского излучения X-пинча, были использованы вакуумные рентгеновские диоды (ВРД), которые регистрировали сигнал в спектральном диапазоне $h\nu > 1$ кэВ.

4. Результаты эксперимента

На рис. 1 показан пример снимков X-пинча, состоящего из восьми молибденовых проволочек диаметром 38 мкм, сделанных с помощью четырехкадровой камеры HSFC-Pro. На снимке, полученном на 327 нс после начала тока генератора, отчетливо видна перетяжка, сформировавшаяся к этому времени, и показано, каким образом происходило измерение ее

длины. На рис. 2 показаны типичные осциллограммы импульса тока и сигнала вакуумного рентгеновского диода (ВРД), полученные в том же выстреле, что и снимки X-пинча на рис. 1. Времена, при которых были получены изображения X-пинча (Рис. 1), обозначены на рис. 2 - t_1, t_2, t_3, t_4 . Интервал между кадрами варьировался в диапазоне $20 \div 120$ нс.

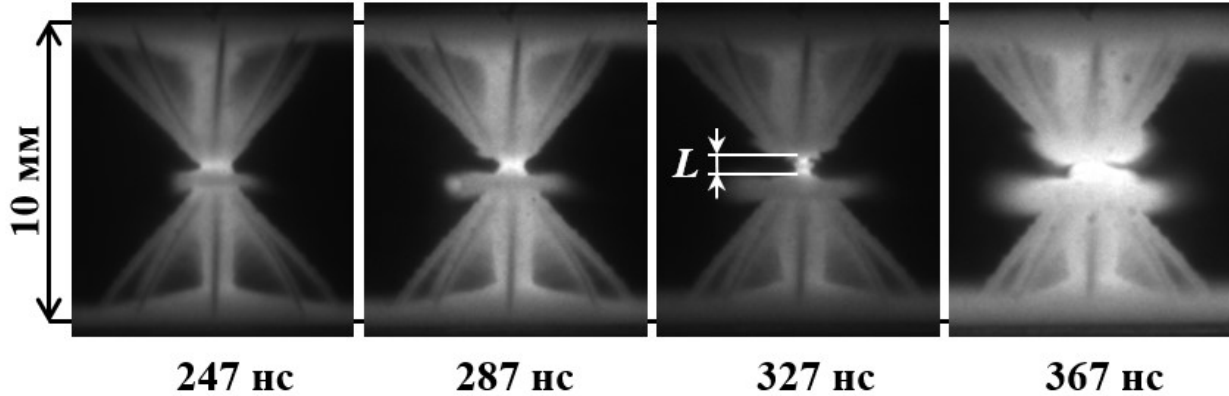


Рис. 1. Изображения X-пинча (8×38 мкм Мо), полученные с помощью четырехкадровой оптической камеры HSFC-Pro. Момент появления импульса рентгеновского излучения 340 ± 2 нс.

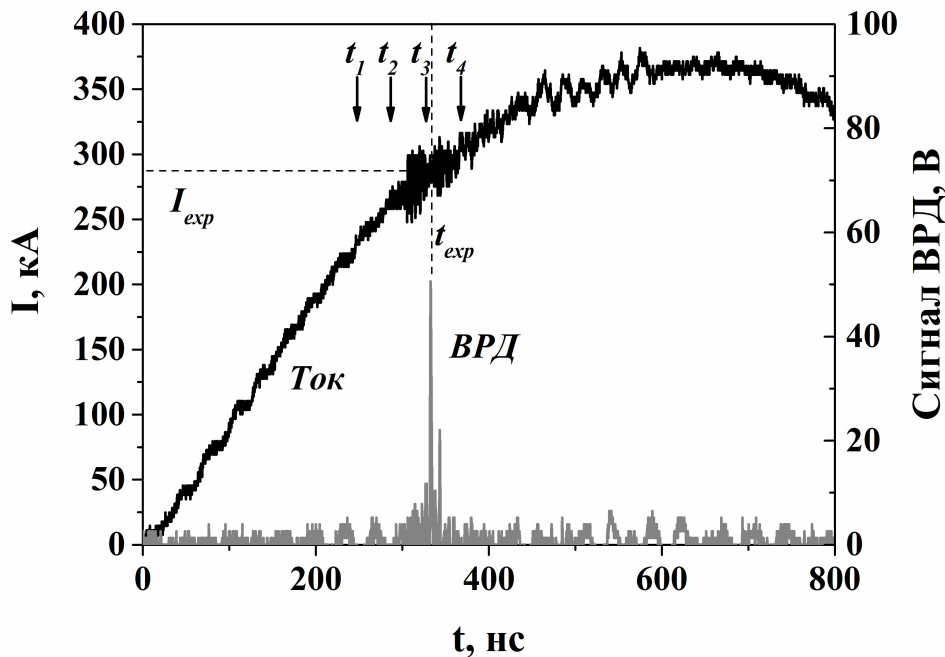


Рис. 2. Осциллограммы импульса тока генератора ИМРИ-5 и импульса рентгеновского излучения X-пинча, состоящего из восьми молибденовых проводников диаметром 38.1 мкм.

Значения тока I_{exp} и времени появления импульса рентгеновского излучения t_{exp} (Рис. 2), полученные из осциллограмм, были использованы при вычислении длины перетяжки по формуле (4). Так как в экспериментах импульс рентгеновского напряжения всегда появлялся на фронте тока, то при вычислении длины перетяжки использовалось значение коэффициента $C \approx 0.26$. По полученным данным была построена зависимость длины перетяжки от погонной массы X-пинчей. На рис. 3 показано сравнение зависимостей экспериментально измеренных значений длины перетяжки L_{exp} от погонной массы X-пинчей m_0 со значениями L_{calc} , рассчитанными по формуле (4). Из рис. 3 видно, что расчетная и экспериментальная зависимость имеют одинаковую линейную форму в диапазоне масс от

200 до 1200 мкг/см, хотя при этом они несколько различаются по абсолютной величине. Значение величины L_{calc} в среднем превышает значение величин L_{exp} на 40%. Это свидетельствует о том, что момент появления импульса рентгеновского излучения определяется длиной перетяжки, как это следует из результатов, полученных в работе [10].

Полученная аппроксимация длины перетяжки от погонной массы $L = 0.25 \cdot m_0 + 380$ позволила исключить параметр L из скейлинга момента генерации излучения X-пинча и получить его более простой вид:

$$t_x \approx 0.26 \frac{\sqrt{m_0} (0.25m_0 + 380)}{I} \quad (5)$$

Зависимость экспериментально измеренного времени до появления импульса рентгеновского излучения t_{exp} от рассчитанного по скейлингу времени t_x для X-пинчей, состоящих из четырех и более проволок, показана на рисунке 4.

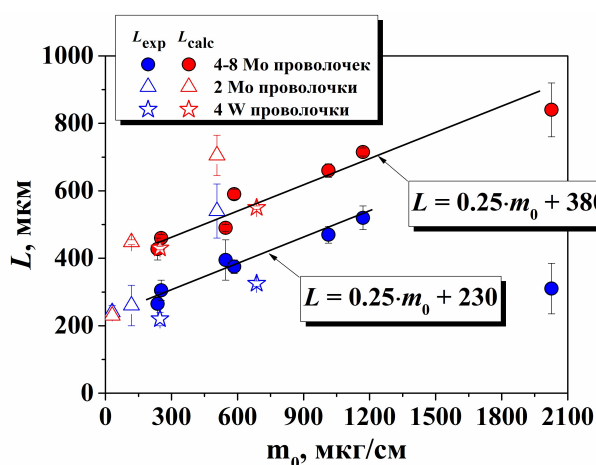


Рис.3. Зависимость наблюдаемой и вычисленной длины перетяжки L_{exp} и L_{calc} от погонной массы X-пинча m_0 для молибденовых и вольфрамовых проволок.

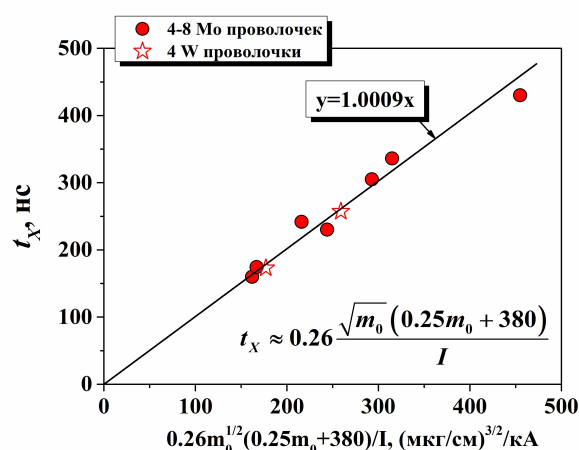


Рис.4. Скейлинг времени генерации импульса рентгеновского излучения X-пинча.

Полученные результаты являются продолжением ранее предложенного оригинального подхода по изучению динамики X-пинча [10] и показывают хорошее согласие теории с экспериментом. Полученный вид скейлинга времени рентгеновской вспышки позволяет без труда подобрать необходимые параметры X-пинча исходя из характеристик импульсного генератора тока.

5. Заключение

В ходе экспериментов по исследованию динамики формирования перетяжки и «горячей точки» X-пинча были получены оптические снимки X-пинчей различной начальной погонной массы с помощью четырехкадровой камеры HSFC-Pro со временем экспозиции кадра 3 нс. Используя полученные в эксперименте снимки, была измерена длина перетяжки X-пинча и построена зависимость длины перетяжки L от начальной погонной массы X-пинча m_0 : $L_{exp} = 0.25 \cdot m_0 + 230$. Полученная зависимость носит одинаковый линейный характер с зависимостью $L_{calc}(m_0)$, рассчитанной по скейлингу времени рентгеновской вспышки (4), предложенному в работе [10], и отличается только по абсолютной величине: $L_{calc} = 0.25 \cdot m_0 + 380$. Построенная зависимость $L_{calc}(m_0)$ позволила исключить длину перетяжки X-пинча из формулы (4) и упростить вид скейлинга.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00686, <https://rscf.ru/project/22-19-00686/>

6. Список литературы

- [1] S.A. Pikuz, T.A. Shelkovenko, and D.A. Hammer, X-Pinch. Part II, *Plasma Phys. Rep.*, vol. **41**, 445–491, 2015, doi: 10.1134/S1063780X15060045
- [2] A.P. Artyomov, S.A. Chaikovsky, V.I. Oreshkin, A.V. Fedunin, A.G. Rousskikh, and N.A. Ratakhin, On the Size of the Soft X-Ray Radiation Source Based on an X-Pinch, *Russ Phys J.*, vol. **62**(12), 2194–2203, 2020, doi:10.1007/s11182-020-01966-z
- [3] A.P. Artyomov, A.V. Fedunin, S.A. Chaikovsky and N.A. Ratakhin, X-pinch soft x-ray source dynamics at a subnanosecond time resolution, *J. Phys. Conf. Series.*, vol. **653**, 012144, 2015, doi:10.1088/1742-6596/653/1/012144
- [4] A.G. Rousskikh, A.V. Fedyunin, A.P. Artyomov, A.S. Zhigalin, and V.I. Oreshkin, X-ray radiography of aluminum cathodes eroded in high-current vacuum arcs, *Curr. App. Phys.*, vol. **19**, 704–708, 2019, doi: 10.1016/j.cap.2019.03.015
- [5] J. Wu, L.P. Wang, J.J. Han, M. Li, L. Sheng, Y. Li, *et al.*, X-pinch radiography for the radiation suppressed tungsten and aluminum planar wire array, *Phys. Plasmas*, vol. **19**, 022702, 2012, doi: 10.1063/1.3677777
- [6] A.P. Artyomov, A.S. Zhigalin, I.V. Lavrinovich, V.I. Oreshkin, N.A. Ratakhin, A.G. Rousskikh, *et al.*, A synchronized X-pinch driver, *Instr. Exp. Tech.*, vol. **57**(4), 461–474, 2014, doi:10.1134/S0020441214040010
- [7] J.D. Douglass, and D.A. Hammer, COBRA-STAR, a five frame point-projection x-ray imaging system for 1 MA scale wire-array Z pinches, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. **79**, 033503, 2008, doi: 10.1063/1.2884707
- [8] G.A. Mesyats, T.A. Shelkovenko, G.V. Ivanenkov, A.V. Agafonov, S.Yu. Savinov, S.A. Pikuz, *et al.*, X-pinch source of subnanosecond soft X-ray pulses based on small-sized low-inductance current generator, *J. Exp. Theor. Phys.*, vol. **111**, 363–370, 2010, doi: 10.1134/S1063776110090049
- [9] A.L. Velikovich, J. Davis, V.I. Oreshkin, J.P. Apruzese, R.W. Clark, J.W. Thornhill, and L.I. Rudakov, High energy photon radiation from a Z-pinch plasma, *Phys. Plasmas*, vol. **8**, 4509–4517, 2001, doi: 10.1063/1.1398572
- [10] V.I. Oreshkin, S.A. Chaikovsky, A.P. Artyomov, N.A. Labetskaya, A.V. Fedunin, A.G. Rousskikh, and A.S. Zhigalin, X-pinch dynamics: Neck formation and implosion, *Phys. Plasmas*, vol. **21**, 102711, 2014, doi: 10.1063/1.4900644
- [11] G.V. Ivanenkov, S.A. Pikuz, T.A. Shelkovenko, J. Greenly, D.B. Sinars, and D.A. Hammer, Formation, Cascade Development, and Rupture of the X-Pinch Neck, *J. Exp. Theor. Phys.*, vol. **91**, 469–478, 2000, doi: 10.1134/1.1320079
- [12] A.P. Artyomov, S.A. Chaikovsky, A.V. Fedunin, N.A. Labetskaya, A.G. Rousskikh, A.S. Zhigalin, and V.I. Oreshkin, Experimental study of the neck formation in an X pinch, *J. Phys. Conf. Series.*, vol. **552**, 012011, 2014, doi: 10.1088/1742-6596/552/1/012011