

## Наносекундное нарастание мегаамперного тока в нагрузке, исходно закороченной тонкой фольгой

*С.А. Сорокин*

*Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия  
s.sorokin@rambler.ru*

**Аннотация.** Снижение времени нарастания тока в нагрузке сильноточного генератора до нескольких наносекунд позволяет на 2–3 порядка повысить плотность энергии в плазме Z-пинча и, в частности, снизить энергетику (ток) генератора, при которой потенциально может быть достигнуто зажигание термоядерного горения. Кроме того, при наносекундном нарастании тока в цилиндрическом проводнике диаметром до нескольких миллиметров тонкий скин-слой на его поверхности взрывается, формируя слой горячей ( $> 50$  эВ) плотной плазмы и импульс теплового рентгеновского излучения. В данной работе проведены эксперименты по быстрому переключению тока на стержень в конфигурации с установленными перед нагрузкой (стержнем) и закорачивающими межэлектродный зазор тонкой фольгой или набором проволочек.

**Ключевые слова:** сильноточный генератор, обострение фронта тока, взрыв скин-слоя, мягкое рентгеновское излучение.

### 1. Введение

В последние 50 лет сильноточные генераторы, основанные на водяных линиях, со временем нарастания тока около 100 нс широко применяются для создания высокотемпературной плотной плазмы, генерации мощных импульсов рентгеновского излучения и мегагауссных магнитных полей. Рассматриваются подходы к реализации термоядерного синтеза. В частности, проводятся исследования по сжатию предварительно нагретой дейтерий-третиевой плазмы разгоняемым током генератора сравнительно тяжелым металлическим цилиндрическим лайнером в присутствии аксиального магнитного поля [1–3].

В работах [3, 4] отмечено, что снижение времени нарастания тока в нагрузке до нескольких наносекунд позволяет при имплозии лайнеров 1) пропорционально времени нарастания тока снизить начальный радиус лайнера, 2) снизить рост возмущений, обусловленный Релей-Тейлоровской неустойчивостью, 3) на 2–3 порядка повысить плотность энергии в плазме пинча и, в частности, снизить энергетику (ток) генератора, при которой потенциально может быть достигнуто зажигание термоядерного горения [3].

В [4–6] для обострения фронта тока в нагрузке ее область заполнялась плазмой стороннего источника. Ток переключался на нагрузку в процессе сметания этой плазмы током генератора. В экспериментах на 2- МА генераторе МИГ (ИСЭ СО РАН) получены, в частности, пинчи диаметром около 50 мкм с плотностью энергии  $(3–6) \cdot 10^8$  Дж/см<sup>3</sup> [3, 7, 8]. Кроме того, при наносекундном ( $\leq 1$  нс) нарастании тока в цилиндрическом проводнике (стержне) диаметром до нескольких миллиметров обнаружено, что тонкий скин-слой на его поверхности взрывается, формируя слой горячей ( $> 50$  эВ) плотной плазмы и импульс мягкого рентгеновского излучения (МРИ) [6, 9]. Хотя подход с инъекцией плазмы показал свою применимость, он имеет некоторые недостатки. Для реализации переключения тока в нагрузку около максимума тока генератора в ряде отладочных выстрелов необходим выбор формы области инъекции плазмы и количества (массы) инжектированной плазмы. Необходима сравнительно высокая стабильность работы инжектора плазмы. Наличие инжектированной плазмы в окрестности нагрузки после переключения тока (обратный ток протекает по этой плазме) в частности ограничивает возможность использования обратного токопровода в виде многозаходовой спирали [10–12].

В данной работе проведены эксперименты по быстрому переключению тока на стержень в конфигурации с установленными перед нагрузкой (стержнем) и закорачивающими межэлектродный зазор тонкой фольгой или набором проволочек. Одним из преимуществ использования фольги и проволочек вместо инъекции плазмы является исходная определенность их массы и пространственного положения. Такой подход позволяет существенно упростить конструкцию области нагрузки и потенциально улучшить воспроизводимость момента переключения тока на нагрузку. Применение фольги и проволочек наряду с инъекцией плазмы применялось в экспериментах по формированию низкоимпедансных стержневых пинч-диодов [13–15].

## 2. Экспериментальная установка

Эксперименты проводились на генераторе МИГ при уровне тока перед переключением на нагрузку 1.8–2.0 МА. Длительность импульса напряжения в бегущей волне водяной передающей линии генератора составляет около 90 нс. Так как исследования носят поисковый характер, то в качестве нагрузки применялись медные и латунные стержни диаметром около 1 мм. Использование стержня удобно для фиксации реализации наносекундного нарастания тока в нагрузке, так как в этом случае на поверхности стержня генерируется мощный импульс мягкого рентгеновского излучения. Радиальный вакуумный межэлектродный зазор перед нагрузкой закорачивался алюминиевой фольгой толщиной 2.5 мкм, набором медных тонких проволочек диаметром 20 мкм или нихромовых проволочек диаметром 50 мкм (Рис. 1). Масса фольги и проволочек подбиралась так чтобы они (фольга, проволочки) ко времени максимума тока генератора  $t$  смещались у поверхности стержня на расстояние сравнимое с диаметром стержня  $d$ , достигая скорости  $v \geq 2d/t$ .

Импульс рентгеновского излучения регистрировался фотоэмиссионным вакуумным рентгеновским диодом (ВРД) с алюминиевым катодом и полипропиленовым фильтром толщиной 10 мкм. Интегральное по времени рентгеновское изображение нагрузки получали камерой-обскуры за алюминиевым фильтром толщиной 1.8 мкм.

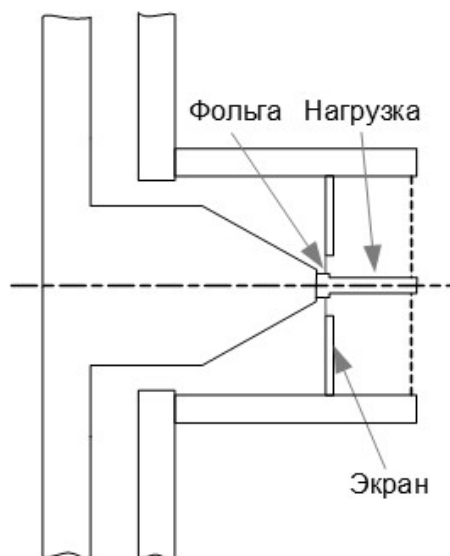


Рис. 1. Схема эксперимента с нагрузкой, исходно закороченной тонкой фольгой.

Ниже приведены результаты для нескольких выстрелов, демонстрирующие, что выбором конфигурации электродов и закорачивающего элемента может быть реализовано эффективное (с генерацией импульса МРИ на поверхности стержня) переключение тока на стержень.

### 3. Результаты и обсуждение

На рисунке 2 представлены результаты для выстрела на медный стержень диаметром 1.1 мм, закороченный алюминиевой фольгой толщиной 2.5 мкм. ВРД принимает излучение в радиальном направлении из области между фланцем с фольгой и анодной сеткой. Первый относительно слабый пик излучения на 50–60 нс (Рис. 2в) обусловлен излучением плазмы взорванной фольги. Затем следуют два сравнительно более интенсивных импульса с пиками около 68 нс и около 128 нс. По-видимому, как и в эксперименте со стержневым пинч-диодом [13, 14], после первого прерывания тока в плазме фольги (около 60 нс) происходит перезамыкание зазора с последующим отрывом плазмы фольги от стержня около 125 нс. До 125 нс плазма фольги движется вдоль поверхности стержня со скоростью около  $10^7$  см/с и смещается от исходного положения на 7–8 мм. Излучение этой плазмы и поверхности стержня за фронтом ее прохождения видно на рентгеновском изображении (Рис. 2б). Интенсивное излучение у поверхности стержня в 7–8 мм от исходного положения фольги по-видимому соответствует импульсу излучения на 125 нс и обусловлено процессами формирования вакуумного зазора между стержнем и плазмой фольги. Таким образом, при таком выборе конфигурации электродов и замыкающего объекта процессы переключения тока: а) начинаются рано (на фронте нарастания тока генератора) и б) сопровождаются перезамыканием зазора. Кроме того, раннее переключение около максимума напряжения на проходном вода-вакуум изоляторе провоцирует пробой его поверхности [9] и ограничивает максимальный ток генератора (в нагрузке) на уровне 1.6–1.65 МА.

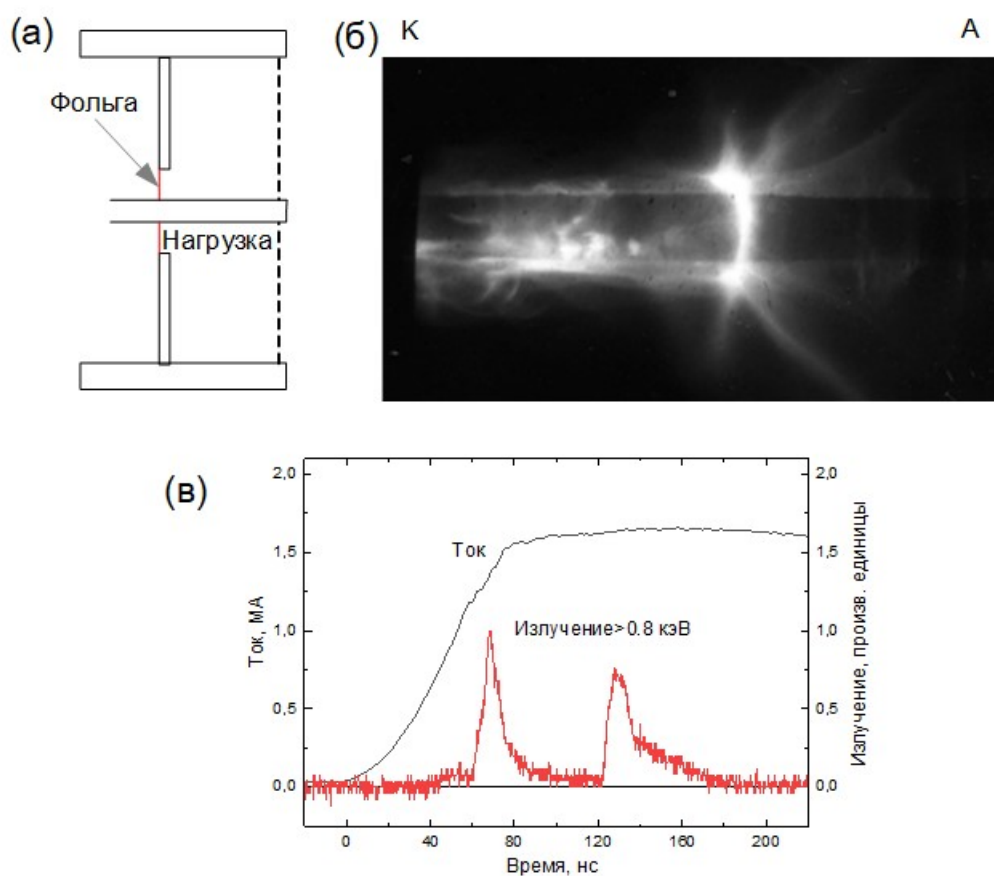


Рис. 2. Схематическое изображение области нагрузки (а), рентгеновское изображение (б) и осциллограммы тока и ВРД для выстрела на медный стержень диаметром 1.1 мм, исходно закороченный алюминиевой фольгой толщиной 2.5 мкм (в).

В следующем представленном выстреле латунный стержень имеет ступенчатый переход с диаметра 2 мм на диаметр 1 мм (Рис. 3а). Зазор исходно закорочен четырьмя нихромовыми проволочками диаметром 50 мкм, установленными в 2.5 мм до перехода. После сравнительно слабого импульса излучения около 70 нс, связанного со взрывом проволочек (Рис. 3в), наблюдается последовательность из 4-х пиков с интервалом около 10 нс. На рентгеновском изображении (Рис. 3б) в прикатодной части видно интенсивное излучение плазмы проволочек. Далее в направлении к аноду наблюдается диффузное свечение плазмы. По-видимому, в такой конфигурации (с проволочками) в области уменьшения диаметра стержня с 2 мм до 1 мм не происходит существенного отрыва плазмы проволочек от стержня. Плазма проволочек движется вдоль стержня. Ток протекает как по этой плазме, так и по поверхности стержня. Цуг импульсов возможно обусловлен последовательностью прерываний и перезамоканий тока плазмой проволочек. При этом диссипация магнитной энергии в нагрузке незначительная. Характерный для эффективного переключения тока в нагрузку спад тока практически отсутствует. Вместе с тем импульсы излучения начинаются около максимума тока генератора (около 80 нс), то есть диаметр стержня в области закорачивающих проволочек 2 мм и масса проволочек близки к оптимальным.

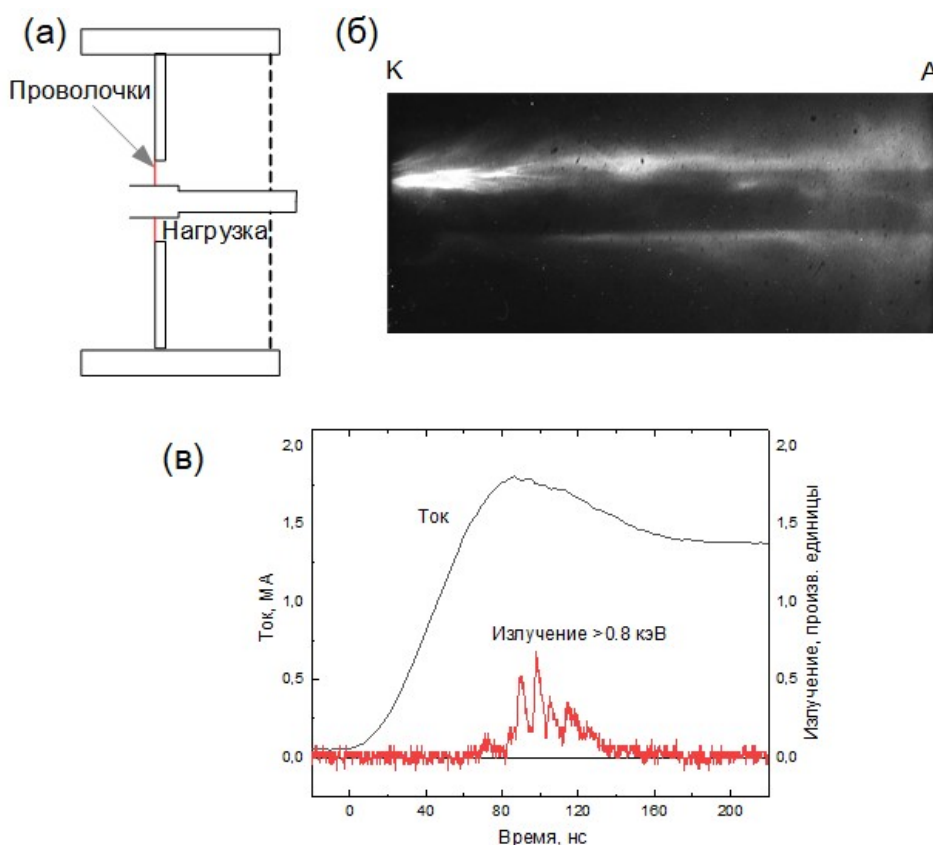


Рис. 3. Схематическое изображение области нагрузки (а), рентгеновское изображение (б) и осциллограммы тока и ВРД для выстрела на латунный стержень со ступенчатым переходом с диаметра 2 мм на диаметр 1 мм, исходно закороченный четырьмя нихромовыми проволочками диаметром 50 мкм (в).

В следующем выстреле (Рис. 4) на такой же латунный стержень со ступенчатым переходом проволочки заменены на алюминиевую фольгу толщиной 2.5 мкм. Первый пик излучения около 70 нс (Рис. 4в) обусловлен излучением взорванной фольги. Отрыв плазмы фольги от стержня и переключение тока на стержень начинается на 80 нс и сопровождается мощным импульсом излучения. Спад тока за время импульса излучения с 1.75 МА до 1.5 МА

соответствует диссипации около 12 кДж магнитной энергии (в размыкателе и поверхности стержня). Кроме того, за это время от генератора поступает около 4 кДж энергии. Оценка потерь энергии в размыкателе в предположении сохранения магнитного потока за время переключения тока на стержень дает около 8 кДж. То есть в поверхности стержня (длиной 9 мм) выделение энергии составляет около 8 кДж. Длительность импульса излучения (ширина на полувысоте) составляет около 6 нс. На рентгеновском изображении видно излучение поверхности стержня. В прикатодной части также видна плазма фольги (к сожалению часть изображения не попала на пленку). Полученные результаты свидетельствуют в пользу быстрого переключения тока на стержень.

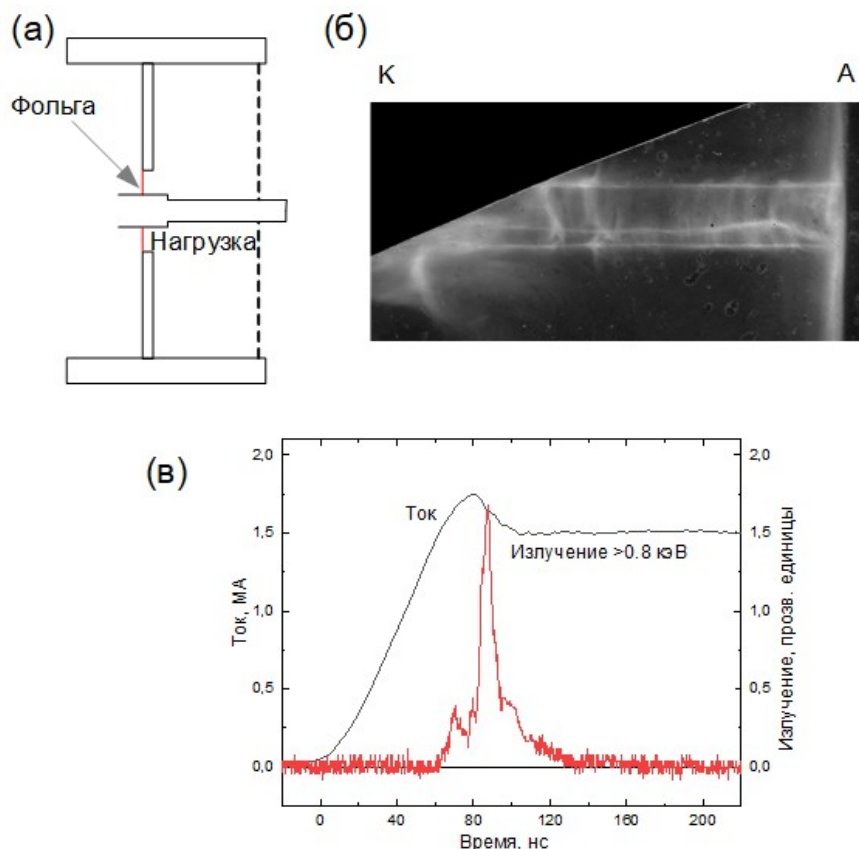


Рис. 4. Схематическое изображение области нагрузки (а), рентгеновское изображение (б) и осциллограммы тока и ВРД для выстрела на латунный стержень со ступенчатым переходом с диаметра 2 мм на диаметр 1 мм, исходно закороченный алюминиевой фольгой толщиной 2.5 мкм (в).

#### 4. Заключение

Предварительное заполнение области нагрузки плазмой стороннего источника позволяет снизить время нарастания тока в нагрузке до нескольких наносекунд. Хотя подход с инъекцией плазмы показал свою применимость он имеет некоторые недостатки. В этой работе для закорачивания нагрузки на стадии нарастания тока генератора МИГ (2 МА) применялась тонкая алюминиевая фольга или набор проволочек. Одним из преимуществ использования фольги (проволочек) вместо инъекции плазмы является исходная определенность ее массы и пространственного положения, которые предопределяют время переключения тока на нагрузку. В эксперименте показана возможность быстрого переключения тока на нагрузку при использовании фольги вместо инъекции плазмы. В частности, в конфигурации со стержнем со ступенчатым переходом и радиальной

алюминиевой фольгой толщиной 2.5 мкм реализовано быстрое переключение тока на стержень диаметром 1 мм.

### Благодарности

Автор благодарит Е.Н. Волкова и Ю.А. Суковатицына за техническую помощь при проведении эксперимента на генераторе МИГ.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-22-00024, <https://rscf.ru/project/24-22-00024/>

### 5. Список литературы

- [1] S.M. Golberg, M.A. Liberman, and A.L. Velikovich, Plasma compression, heating and fusion in megagauss Z- $\theta$  pinch systems, *Plasma Phys. Control. Fusion*, vol. **32**, 319, 1990, doi: 10.1088/0741-3335/32/5/002
- [2] S.A. Slutz, M.C. Herrmann, R.A. Vesey, A.B. Sefkow, D.B. Sinars, D.C. Rovang, K.J. Peterson, and M.E. Cuneo, Pulsed-power-driven cylindrical liner implosions of laser preheated fuel magnetized with an axial field, *Phys. Plasmas*, vol. **17**, 056303, 2010, doi: 10.1063/1.3333505
- [3] S.A. Sorokin, Magnetic implosion of thin aluminum foil liners, *Plasma Phys. Control. Fusion*, vol. **64**, 065005, 2022, doi: 10.1088/1361-6587/ac688f
- [4] S.A. Sorokin, Fast implosion of foil liners, *Phys. Plasmas*, vol. **26**, 082706, 2019, doi: 10.1063/1.5110651
- [5] S.A. Sorokin, Sharpening of the front of the current through a cylindrical foil liner, *Plasma Phys. Rep.*, vol. **43**, 542, 2017, doi: 10.1134/S1063780X17050087
- [6] S.A. Sorokin, Explosion of the thick metallic surface during ultrafast rise of a multimegagauss magnetic field, *Phys. Plasmas*, vol. **25**, 082704, 2018, doi: 10.1063/1.5045810
- [7] S.A. Sorokin, Foil liner implosions with a nanosecond rise time of current through the liner, *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. **1393**, 012059, 2019, doi:10.1088/1742-6596/1393/1/012059
- [8] Sergey Sorokin, Imploding foil liner experiments on the MIG pulse generator, *7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects*, Tomsk, Russia, Sept. 2020, doi: 10.1109/EFRE47760.2020.9241920
- [9] Sergey Sorokin, Ultrafast wire loading with multi-megaampere current, *7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects*, Tomsk, Russia, Sept. 2020, doi: 10.1109/EFRE47760.2020.9241993
- [10] S.A. Sorokin, S.A. Chaikovsky, Imploding liner stabilization experiments, *AIP Conf. Proc.* vol. **299**, 83, 1994, doi: 10.1063/1.2949228
- [11] S.A. Sorokin, S.A. Chaikovsky, Achieving high degrees of stable radial compression of plasma liners, *Plasma Phys. Rep.*, vol. **19**, 444, 1993.
- [12] S.A. Sorokin, Gas-puff liner implosion in the configuration with helical current return rods, *Plasma Phys. Rep.*, vol. **39**, 139, 2013, doi: 10.1134/S1063780X13010042
- [13] S.A. Sorokin, Generating high-power hard X-ray pulses in a rod-pinch diode with radial foil, *Tech. Phys. Lett.*, vol. **40**, 687, 2014, doi: 10.1134/S1063785014080264
- [14] S.A. Sorokin, Formation of a pinched electron beam and an intense x-ray source in radial foil rod-pinch diodes, *Phys. Plasmas*, vol. **23**, 043110, 2016, doi: 10.1063/1.4947029
- [15] S.A. Sorokin, Radial wire-array rod-pinch diodes, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. **45**(8), 2268, 2017, doi: 10.1109/TPS.2017.2714186