

# Взрыв поверхности алюминиевых стержней при наносекундном нарастании мегаамперного тока

*С.А. Сорокин\* , С.А. Вагайцев*

*Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия*

*\*s.sorokin@rambler.ru*

**Аннотация.** Горячая плотная плазма образуется в тонком скин-слое массивного проводника (стержня) при наносекундном времени нарастания мегаамперного тока через него. При времени нарастания тока около или менее 1 нс исходное активное сопротивление скин-слоя металлического стержня диаметром около 1 мм, а также, образовавшейся на его поверхности плазмы с температурой 50–100 эВ составляет доли Ом на 1 см длины, что при длине стержня 1–3 см обеспечивает тераваттную мощность джоулевого нагрева и генерируемого мягкого рентгеновского излучения при уровне тока в несколько мегаампер. Быстрое переключение тока в нагрузку (на стержень) реализуется путем предварительного шунтирования нагрузки инжектированной плазмой, тонкой фольгой или набором проволочек. Ток переключается на нагрузку в процессе движения ускоряемой током шунтирующей плазмы. В данной работе представлены результаты экспериментов по быстрому взрыву поверхности алюминиевых стержней диаметром 0.3–3.0 мм в конфигурации с инжекцией плазмы в область нагрузки. Показано, что генерация мощного импульса мягкого рентгеновского излучения сохраняется при увеличении диаметра стержня по крайней мере до 3 мм.

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

## 1. Введение

Плотная плазма с температурой более 100 эВ может быть сформирована пропусканием тока импульсного генератора через тонкую проволочку, набор проволочек, полую цилиндрическую оболочку из фольги, а также, оболочки, сформированные газовыми или плазменными струями. При времени нарастания тока около и более 100 нс низкое активное сопротивление плазмы одиночной проволочки не позволяет эффективно передать энергию от генератора в проволочку (в основном за счет джоулевого нагрева), а высокая индуктивность проволочной нагрузки создает проблемы с транспортировкой энергии к нагрузке по магнитно-изолированной передающей линии (МИПЛ) [1, 2]. Импеданс нагрузки близкий к импедансу генератора (единицы и доли Ом) может быть реализован применением нагрузки с исходно пространственно-распределенным веществом (цилиндрические оболочки, проволочные сборки). При имплозии вещества нагрузки магнитным полем импеданс движения ( $dL/dt$ ) может быть сравним с импедансом генератора. В этом случае масса вещества нагрузки и его пространственное распределение (например, начальный радиус для цилиндрической оболочки) должны быть выбраны так чтобы стагнация вещества (плазмы) происходила около максимума тока генератора. Эти требования создают определенные трудности в изготовлении нагрузки, а также, в формировании компактного (диаметром менее 1 мм) столба плазмы при стагнации ускоренной плазмы. В частности, при времени нарастания тока (и, следовательно, времени до стагнации плазмы) около 100 нс и токе генератора до 3–4 МА толщина металлической оболочки должна быть меньше 1 мкм. Изготовление и монтаж таких оболочек сложны, а процесс имплозии тонкой оболочки крайне неустойчив и на практике сформировать относительно однородный столб плазмы диаметром около и менее 1 мм не удается.

В работах [3, 4] показано, что горячая плотная плазма образуется так же в тонком скин-слое массивного проводника (стержня) при наносекундном времени нарастания тока через него. При времени нарастания тока около или менее 1 нс исходное активное сопротивление скин-слоя металлического стержня диаметром около 1 мм, а также образовавшейся на его

поверхности плазмы с температурой 50–100 эВ составляет доли ома на 1 см длины, что при длине стержня 1–3 см обеспечивает тераваттную мощность джоулевого энерговыделения (нагрева) и мягкого рентгеновского излучения (МРИ) при уровне тока в несколько мегаампер. Быстрый взрыв поверхности проводника сопровождается диффузией магнитного поля в плазму, а также ее тепловым расширением, что приводит к снижению сопротивления токового слоя, остыванию плазмы и ограничивает время существования горячей плотной поверхностной плазмы и длительность импульса рентгеновского излучения. Плотность тока в скин-слое (и скорость расширения плазмы против сдерживающего магнитного поля) определяется, в частности, диаметром стержня. С увеличением диаметра стержня плотность тока в скин-слое, а, следовательно, и максимальные параметры плазмы снижаются. Вместе с тем пропорциональное диаметру стержня увеличение излучающей поверхности способствует увеличению выхода рентгеновского излучения из плотной плазмы поверхности.

Эксперименты по наносекундному переключению тока в нагрузку проводятся на генераторе МИГ (ИСЭ СО РАН, Томск). Время нарастания тока генератора на водяных линиях составляет около 80 нс. Быстрое переключение тока в нагрузку (на стержень) реализуется путем предварительного шунтирования нагрузки инжектированной плазмой [3–5], тонкой фольгой или набором проволочек [6, 7]. Ток переключается на нагрузку в процессе движения ускоряемой током шунтирующей плазмы (Рис. 1).

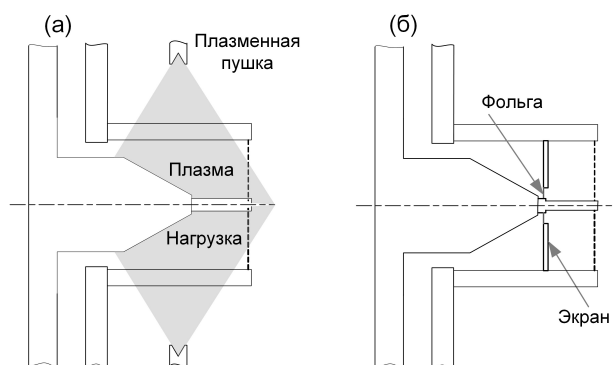


Рис. 1. Схема эксперимента с нагрузкой, исходно закороченной инжектированной плазмой (а) и тонкой фольгой (б).

В данной работе представлены результаты экспериментов по быстрому взрыву поверхности алюминиевых стержней диаметром 0.3–3.0 мм в конфигурации с инъекцией плазмы в область нагрузки (Рис. 1а). Цель экспериментов – выяснить тенденции изменения мощности и выхода рентгеновского излучения с изменением диаметра алюминиевого стержня. Отметим, что данная работа не претендует на систематическое исследование, так как проведена в условиях ограниченного количества выстрелов и практической воспроизводимости (от выстрела к выстрелу) токового импульса в нагрузке.

Мощность и полный за импульс выход мягкого рентгеновского излучения (МРИ) с энергией квантов 60–900 эВ измерялись фотоэмиссионным вакуумным рентгеновским диодом (ВРД) с графитовым фотокатодом и фильтром из полистирола толщиной около 0.4 мкм. Излучение с энергией квантов более 800 эВ регистрировалось двумя ВРД с алюминиевыми фотокатодами и фильтрами из полипропилена толщиной 10 и 20 мкм. Спектральная чувствительность таких ВРД показана на Рис. 2. Для получения интегрального по времени рентгеновского изображения стержня применялась камера-обскура с отверстием 10–40 мкм и фильтром из алюминия толщиной 1.8–2.5 мкм. Для измерения тока в нагрузке ближайший к нагрузке магнитный зонд располагался на радиусе 5 см.

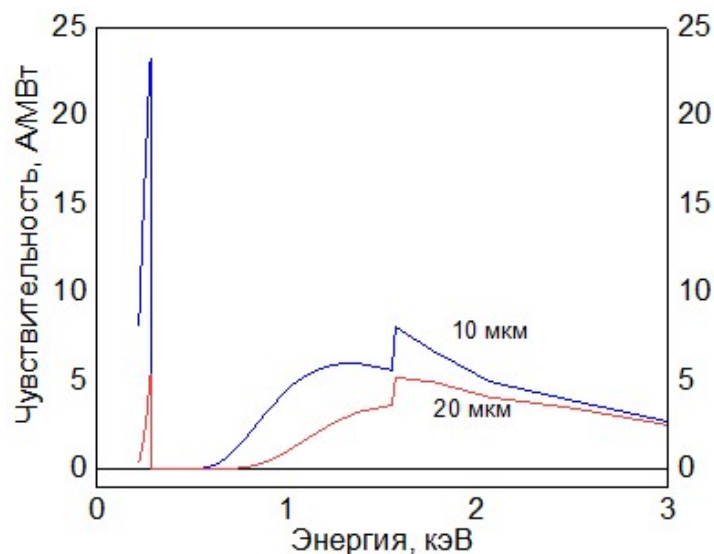


Рис. 2. Спектральная чувствительность ВРД с алюминиевыми фотокатодами и фильтрами из полипропилена толщиной 10 и 20 мкм.

## 2. Результаты эксперимента и обсуждение

На рисунке 3 показаны ток в нагрузке и сигналы ВРД1 (энергия квантов 60–900 эВ) и ВРД2 (фильтр из пропиленна 20 мкм, энергия квантов > 800 эВ), а на Рис. 4 – рентгеновское изображение (фильтр – алюминий 2.5 мкм) для выстрела на стержень диаметром 0.3 мм и длиной 15 мм. Ток в нагрузке к 83 нс нарастает до почти 2 МА. Последующее спадание тока обусловлено движением инжектированной плазмы (импеданс  $dL/dt$ ) и конечным сопротивлением токового скин-слоя на поверхности стержня. Заметим, что энергия генератора поступает в область МИПЛ и нагрузки до ~ 120 нс. Переключение тока на стержень и, соответственно, импульс излучения начинается на 88–90 нс. Ширина на полувысоте (FWHM) импульса излучения (> 800 эВ) составляет около 3 нс. Отношение амплитуд импульса двух идентичных ВРД с фильтрами из полипропилена 10 и 20 мкм соответствует энергии «среднего кванта» излучения около 1.1 кэВ. Основной вклад в сигнал этих ВРД дает рекомбинационное излучение  $L$ -оболочки и линейчатое и рекомбинационное излучение  $K$ -оболочки ионов алюминия. Пиковая мощность излучения (0.8–3.0 кэВ) составляет около  $8 \cdot 10^{10}$  Вт. На рентгеновском изображении (Рис. 4) наблюдается взрыв поверхности и разлет плазмы с нее.

Импульс МРИ (энергия квантов 60–900 эВ) имеет длинный «хвост» с характерным временем спадания около 60 нс. По-видимому, процесс расширения (и остывания) плазмы останавливается магнитным полем и излучает плазма сформировавшейся вокруг стержня «шубы». Пиковая (около 100 нс) мощность МРИ составляет около 0.4 ТВт, а интегральный выход излучения около 34 кДж (20 кДж за первые 80 нс). Наблюдаемое на изображении несимметричное распределение излучения очевидно обусловлено длительной эволюцией плазмы «шубы» и возможным развитием перегретной неустойчивости (шнурованием токового слоя). Длительное протекание тока в нагрузке реализуется в результате захвата тока в области МИПЛ и нагрузки при пробое вакуумной поверхности разделительного вода-вакуум секционированного изолятора. Перекрытие поверхности изолятора происходит после смены полярности (около 120 нс в этом выстреле) напряжения на изоляторе.

Заметим, что применение тонкого фильтра (0.3–0.4 мкм) требует существенного снижения плотности потока излучения на его поверхность, что снижает уровень сигнала ВРД. В результате сигнал искажен паразитными осцилляциями (особенно после 140 нс), которые сохраняются и в тестовом выстреле с отключенным ВРД.

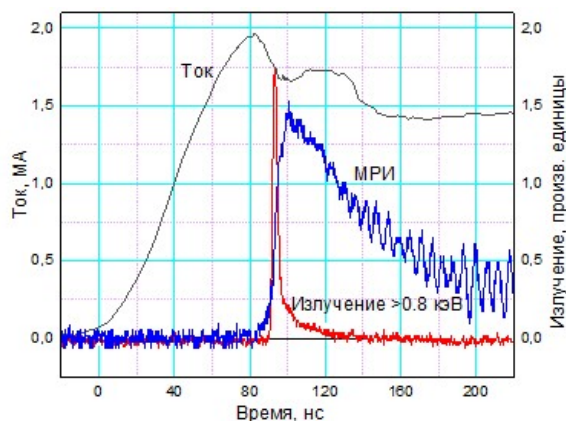


Рис. 3. Ток в нагрузке и сигналы ВРД1 (энергия квантов 60–900 эВ) и ВРД2 (фильтр из пропилена 20 мкм, энергия квантов > 800 эВ) для выстрела на алюминиевый стержень диаметром 0.3 мм и длиной 15 мм.

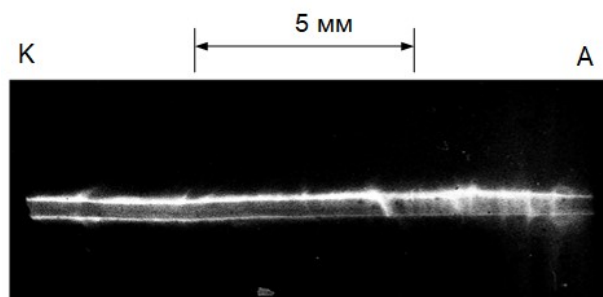


Рис. 4. Рентгеновское изображение (фильтр – алюминий 2.5 мкм) для выстрела на стержень диаметром 0.3 мм и длиной 15 мм.

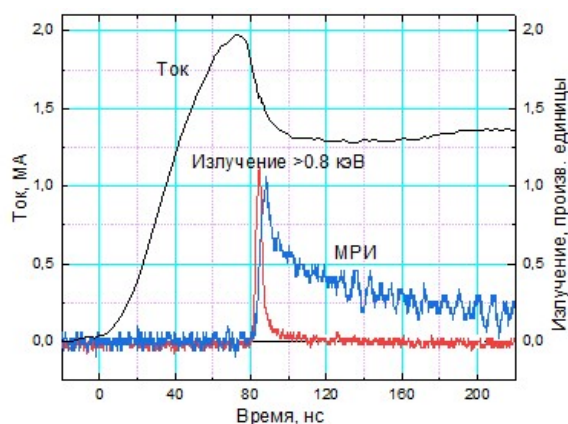


Рис. 5. Ток в нагрузке и сигналы ВРД1 (энергия квантов 60–900 эВ) и ВРД2 (фильтр из пропилена 20 мкм, энергия квантов > 800 эВ) для выстрела на алюминиевый стержень диаметром 0.65 мм и длиной 14 мм.

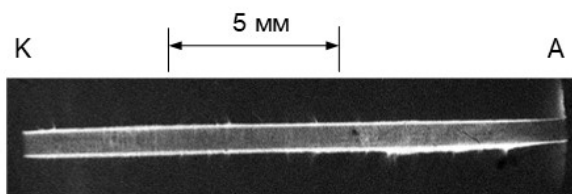


Рис. 6. Рентгеновское изображение (фильтр – алюминий 2.5 мкм) для выстрела на стержень диаметром 0.65 мм и длиной 14 мм.

На Рис. 5 и 6 представлены результаты для выстрела на стержень диаметром 0.65 мм и длиной 14 мм. В этом выстреле водяная формирующая линия переключилась на передающую линию позднее, чем в рассмотренном выше выстреле. В результате в бегущей волне передающей линии сформировался более короткий импульс напряжения, и энергия поступает в область МИПЛ и нагрузки только до ~ 100 нс. Переключение тока на стержень начинается около 80 нс. Сигналы двух ВРД с фильтрами из полипропилена 10 и 20 мкм хорошо совпадают по форме, а их отношение соответствует коэффициенту пропускания полипропилена толщиной 10 мкм для квантов с энергией около 1.1 кэВ. Мощность излучения (0.8–3.0 кэВ) достигает около  $5 \cdot 10^{10}$  Вт, а длительность импульса – 4 нс. Пиковая (около 88 нс) мощность МРИ достигает 0.28 ТВт, а интегральный выход излучения около 19 кДж (10 кДж за первые 80 нс). Наблюдаемое на изображении излучение поверхности стержня довольно однородно. Некоторая неоднородность наблюдается в прианодной части стержня на длине около 3 мм. Видно разбиение поверхностной плазмы на страты с шагом около 0.1 мм.

Пиковая мощность МРИ для выстрела на стержень диаметром 1.7 мм (Рис. 7) практически соответствует (0.28 ТВт) выстрелу на стержень диаметром 0.65 мм. Полный

выход МРИ – 16 кДж. Однако спектр излучения более мягкий. Отношение сигналов ВРД с фильтрами из полипропилена 10 и 20 мкм соответствует коэффициенту пропускания полипропилена толщиной 10 мкм для квантов с энергией около 0.96 кэВ и 0.28 кэВ (так называемое «углеродное окно», см. Рис. 2). Мощность излучения (0.8–3.0 кэВ) не превышает  $1 \cdot 10^{10}$  Вт. С увеличением диаметра стержня увеличивается ширина импульса излучения (0.8–3.0 кэВ). При диаметре стержня около и более 1 мм на импульсе выделяется второй пик. Первый пик (около 95 нс в этом выстреле) обусловлен взрывом скин-слоя и расширением плазмы. Он имеет время нарастания не более 1 нс. Второй пик (около 102 нс) по-видимому обусловлен последующим сжатием плазмы в процессе установления квазиравновесного состояния плазмы у поверхности стержня. При диаметре стержня менее 1 мм временной интервал между пиками становится сравним с временным разрешением осциллографа и временем переключения (около 1 нс) тока на нагрузку и, следовательно, не наблюдается.

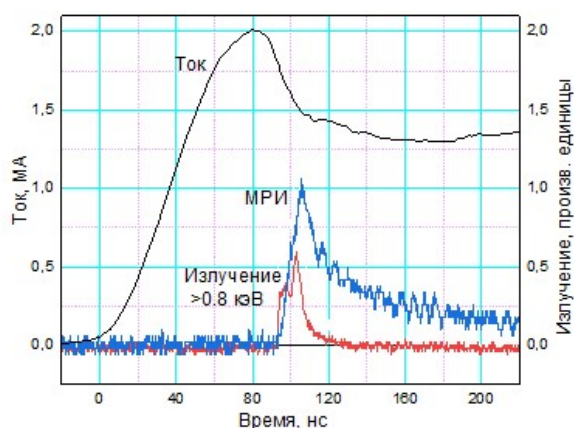


Рис. 7. Ток в нагрузке и сигналы ВРД1 (энергия квантов 60–900 эВ) и ВРД2 (фильтр из пропиленна 20 мкм, энергия квантов > 800 эВ) для выстрела на алюминиевый стержень диаметром 1.7 мм и длиной 14 мм.

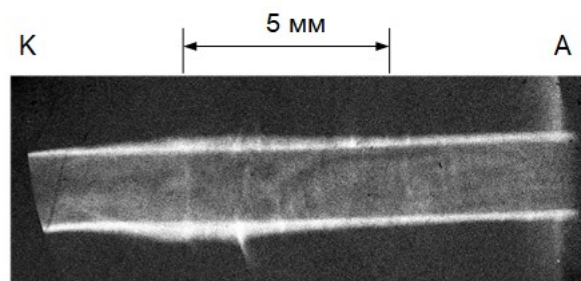


Рис. 8. Рентгеновское изображение (фильтр – алюминий 2.5 мкм) для выстрела на стержень диаметром 1.7 мм и длиной 14 мм.

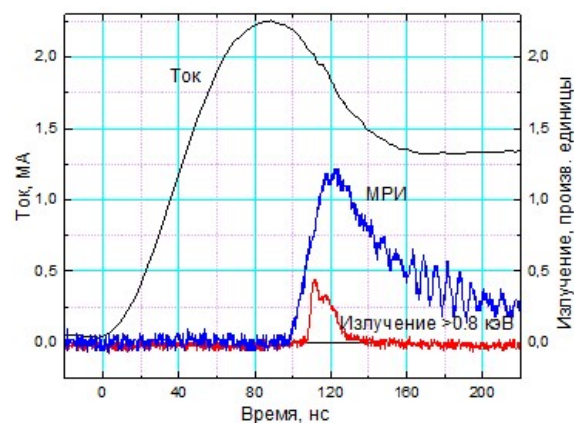


Рис. 9. Ток в нагрузке и сигналы ВРД1 (энергия квантов 60–900 эВ) и ВРД2 (фильтр из пропиленна 20 мкм, энергия квантов > 800 эВ) для выстрела на алюминиевый стержень диаметром 2.3 мм и длиной 14 мм.

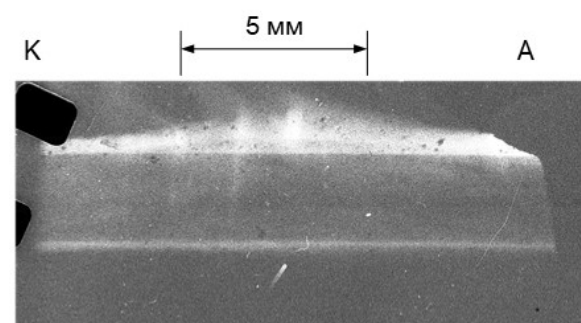


Рис. 10. Рентгеновское изображение (фильтр – алюминий 2.5 мкм) для выстрела на стержень диаметром 2.3 мм и длиной 14 мм.

В выстреле на стержень диаметром 2.3 мм (Рис. 9) благодаря более позднему (около 107 нс) переключению тока на нагрузку ток достигает (около 90 нс) 2.25 МА. Более раннее и сравнительно медленное нарастание сигнала МРИ связано с тем что датчик принимал

излучение как со стержня, так и с кончика конусного держателя стержня, поверхность которого также взрывается и излучает. Пиковая мощность МРИ – 0.32 ТВт, а выход МРИ – 25 кДж. Пиковая мощность излучения (0.8–3.0 кэВ) –  $2 \cdot 10^{10}$  Вт, а длительность импульса – около 12 нс. То есть с увеличением диаметра стержня время генерации такого излучения увеличивается, а мощность снижается. Выход же излучения за импульс существенно не изменяется. Значительная азимутальная неоднородность излучения (Рис. 10) наблюдается на интегральном изображении практически во всех выстрелах с диаметром алюминиевого стержня  $d$  более 2 мм (когда длина  $\pi d$  сравнима с длиной стержня).

### 3. Заключение

На сильноточном генераторе МИГ при уровне тока около 2 МА проведены эксперименты по наносекундному переключению тока на нагрузку в виде алюминиевого стержня диаметром 0.3–3 мм. Измерены параметры генерируемых в результате токового взрыва поверхности стержня импульсов мягкого рентгеновского излучения (60–900 эВ) и киловольтного излучения (0.8–3 кэВ). При быстром взрыве и расширении плазмы поверхности длительность импульса киловольтного излучения растет от 3 нс до 12 нс с увеличением диаметра стержня от 0.3 мм до 3 мм. Импульс МРИ (энергия квантов 60–900 эВ) имеет длинный «хвост» с характерным временем спада около 60 нс. По-видимому, процесс расширения (и остывания) плазмы останавливается магнитным полем, и излучает плазма сформировавшейся вокруг стержня «шубы». Ток в нагрузке поддерживается в результате пробоя поверхности проходного изолятора и захвата магнитной энергии в области МИПЛ и нагрузки. Значительная часть этой энергии конвертируется в МРИ.

### Благодарность

Авторы благодарят 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/>

### 4. Список литературы

- [1] C. Stallings, K. Nielsen, and R. Schneider, Multiple-wire array load for high-power pulsed generators, *Appl. Phys. Lett.*, vol. **29**, 404, October 1976; doi: 10.1063/1.89121
- [2] S. 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
- [3] 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
- [4] 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
- [5] S.A. Sorokin, Fast implosion of foil liners, *Phys. Plasmas*, vol. **26**, 082706, 2019; doi: 10.1063/1.5110651
- [6] 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
- [7] H. Shi, C. Zhang, P. Zhang, Y. Wang, W. Yuan, L. Chen, X. Li, J. Wu, and A. Qiu, Sub-millimeter hard X-ray source based on wire-shortened low-impedance rod pinch diode, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. **51**, 1142, 2023; doi: 10.1109/TPS.2023.3254654