



Исследование динамики плазмообразования при поверхностном взрыве двухслойных проводников в быстроснарастающих мегагауссных магнитных полях

В.А. Ванькевич, И.М. Дацко, Н.А. Лабецкая, В.И. Орешкин,
Д.В. Рыбка, С.А. Чайковский, В.В. Шугуров

RDm@ovpe.hcei.tsc.ru

Институт сильноточной электроники СО РАН

Международная конференция

«XIII ЗАБАБАХИНСКИЕ НАУЧНЫЕ ЧТЕНИЯ»

20-24 марта 2017 г.

Снежинск, Челябинская область, Россия



Объект исследований:

2

Электрический взрыв проводников (ЭВП) в режиме **скинирования** тока.



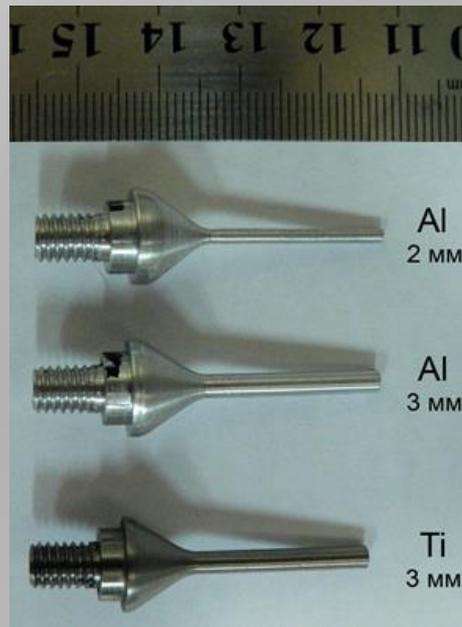
Генератор «**МИГ**»

Энергозапас ~400 кДж

Амплитуда напряжения до 2 МВ

Амплитуда тока до **2.5 МА**

Длительность фронта ~**100 нс**



Нагрузки: **Сu**, **Al**, **Ti**,
сталь3, **12Х18Н10Т**
цилиндры диаметром
1 - 4 мм

На поверхности проводника значение **индукции магнитного поля** достигает значений более **200 Тл**.

Основными процессами, протекающими при **ЭВП** в режиме **скинирования** тока, являются распространение в веществе проводника **ударной волны** и **волны нелинейной диффузии** магнитного поля, а также образование на поверхности проводника плотной низкотемпературной плазмы.



Предмет исследований:

3

В связи с проектированием мультитераваттных генераторов с уровнем тока 30-50 МА (проект «Байкал», Z 300, Z 800), которые предполагается использовать для реализации схем управляемого термоядерного синтеза на основе Z-пинчей, существенен вопрос об **эффективности транспортировки электромагнитной энергии** по вакуумным передающим линиям.

Динамика плазмообразования на поверхности проводника вследствие **скинового взрыва**, который происходит при достижении **плотности тепловой энергии** значения **плотности энергии сублимации** вещества.

При диффузии магнитного поля в проводник (в том числе и при нелинейной диффузии):

плотность тепловой энергии \approx **плотность энергии поля**.

(Г. Кнопфель, Сверхсильные импульсные магнитные поля / Г. Кнопфель.- М.:Мир, 1972. - 391 с.)

$$\Lambda_0 \approx \varepsilon_w = \int_0^t \frac{j^2}{\sigma} dt' \approx \frac{B^2(t)}{2\mu_0} = \varepsilon_m$$

$$B_s \approx \sqrt{2\mu_0 \Lambda_0}$$

Критическая величина индукции магнитного поля, необходимая для поверхностного взрыва

Вещество	Al	Cu	Ti	Fe
B_s , Тл	270	330	310	350

$$B(t) = \frac{\mu_0 I(t)}{2\pi \cdot R}$$

При $I_{\max} \sim$ **50 МА** и $B_s \sim$ 300 Тл на $\varnothing \leq$ **70 мм** определяющую роль в процессе плазмообразования на поверхности проводника играет нелинейная магнитная диффузия и рост крупномасштабных неустойчивостей



Задача:

4

Исследование возможности задержки момента перекрытия зазора вакуумной передающей линии в сверхсильных магнитных полях

Нагрузки \varnothing 1 мм	Cu	сталь3	Al	Ti
$\Delta t_{\text{ВУФ}}$	~50 нс	~40 нс	~40 нс	~30 нс

Момент взрыва проводника определялся по регистрации импульса собственного излучения плазмы в ВУФ диапазоне спектра с помощью ВРД с алюминиевым катодом.

Способы:

- Увеличение времени генерации плазмы на поверхности проводника за счет увеличения проводимости электрода вглубь проводника
(Г.А. Шнеерсон // Письма в ЖТФ, 18(6), 1992, С.18-21.)

Это приведет к снижению плотности джоулева тепловыделения на поверхности и увеличит время генерации плазмы. Наибольшая разница в проводимости у **меди** и **титана**: удельное сопротивление титана при нормальных условиях примерно в **27 раз** выше, чем у меди.

Проводники из меди с внешним слоем из титана наиболее предпочтительны, как априорный тестовый объект

- Использование материалов внешней оболочки электродов с большей атомной массой
(Yu.L. Bakshaev, A.V. Bartov, P.I. Blinov and etc. // Plasma Physics Reports, 2007, V. 33, No. 4, pp. 259-270.)

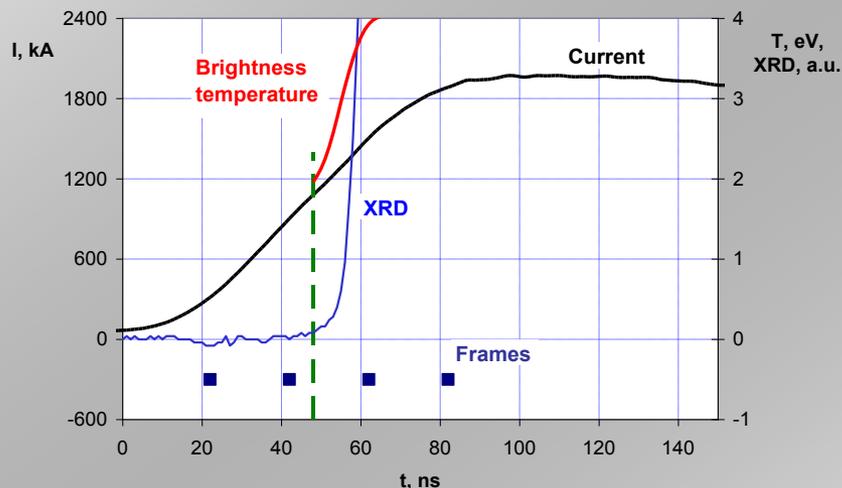
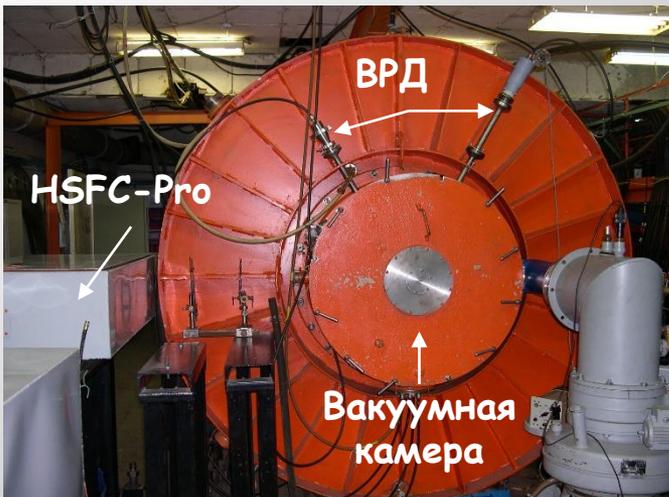
Это позволит снизить скорость разлета плазмы



Экспериментальная техника:

5

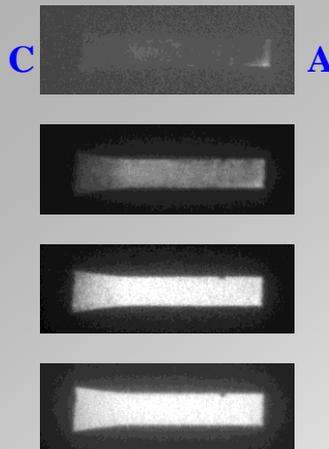
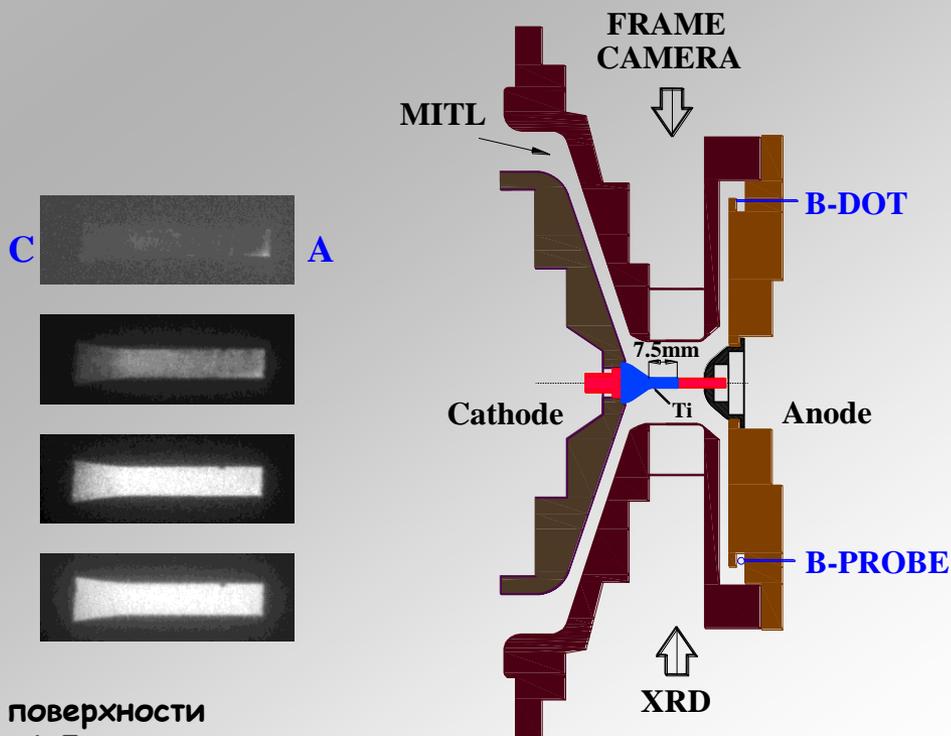
Генератор «МИГ»



Ток генератора, сигнал ВРД, яркостная температура поверхности проводника и его изображение. Титановый цилиндр $\varnothing 1.5$ мм.

Диагностика

1. Пояса Роговского и магнитные зонды.
2. Открытый ВРД (момент плазмообразования и оценка температуры плазмы).
3. Четырехкадровая оптическая камера HSFC-Pro с временем экспозиции 3 нс (динамика поверхностной плазмы).





Экспериментальная техника:

6

Автоматизированная вакуумная ионно-плазменная установка КВИНТА

Лаборатория плазменной эмиссионной электроники ИСЭ СО РАН



метод вакуумного напыления позволяет нанести внешний слой меньшей проводимости толщиной **менее 100 мкм** на проводник и дает возможность изготавливать двухслойные электроды сложной конфигурации



- Размер вакуумной камеры: 750×600×600 мм³;
- Манипулятор - 12позиций;
- Рабочее давление - 10⁻¹±1 Па;
- Ток плазменного источника «ПИНК» - до 120 А;
- Ток плазменного источника «ПИНК-ПТ» - до 120 А;
- Ток дугового испарителя «ДИ-1» - до 200 А;
- Ток дугового испарителя «ДИ-1-ПТ» - до 200 А;
- Напряжение смещения - до 1000 В;
- Скорость осаждения - до 1-20 мкм/ч;
- Потребляемая мощность - до 50 кВт;
- Водяное охлаждения - 2 м³/ч;
- Система управления основана на ПК и промышленном контроллере ADAM 5000E

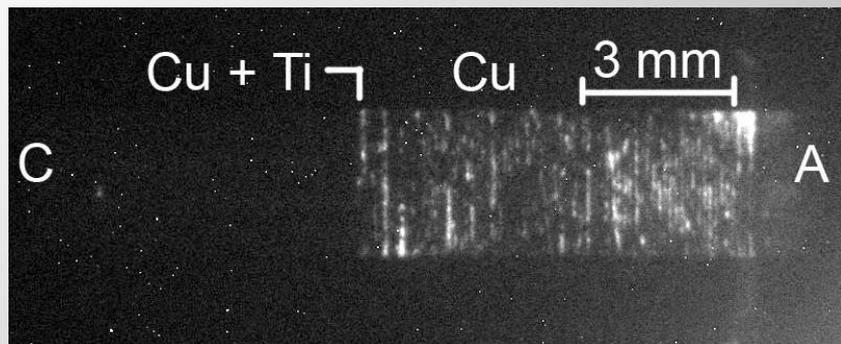
Двухслойный проводник		Однородный проводник
внешний слой	внутренний слой	Cu Ø 2 и 3 мм
Ti	Cu	
8, 20, 50, 60, 80, 100 мкм	Ø 2 и 3 мм	



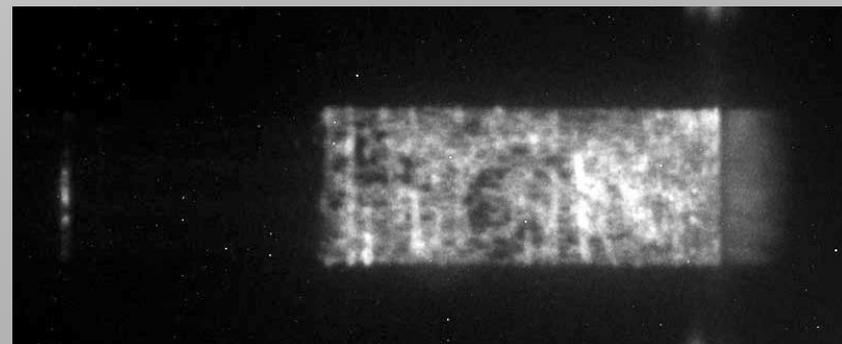
Плазмообразование на поверхности проводников:

7

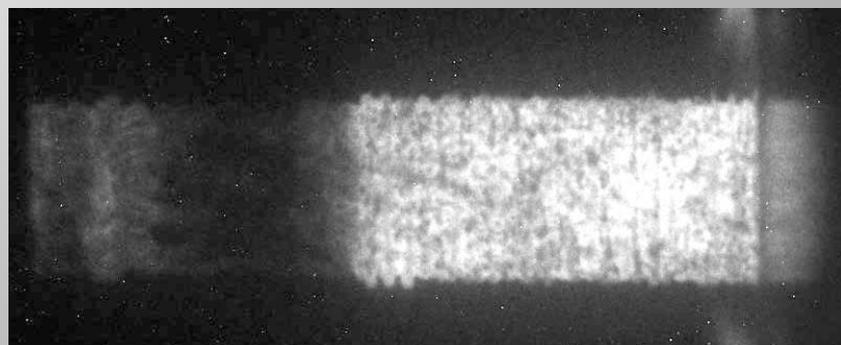
Проводник из **Cu** и двухслойный проводник (**Cu + Ti**). V_{max} до 300 Тл; **Ti** 20 мкм



90 нс



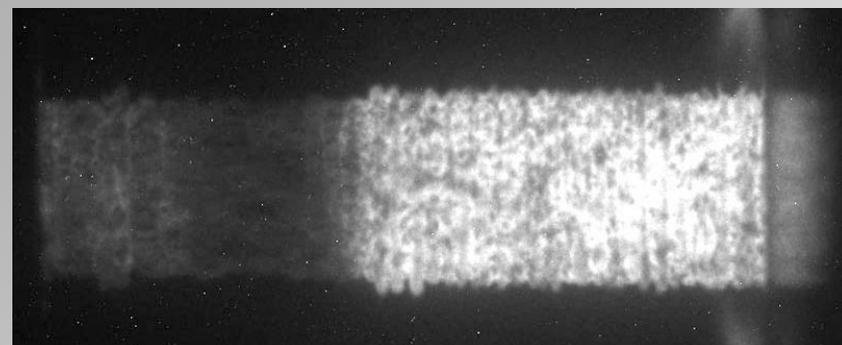
150 нс



290 нс

Свечение однородного проводника не наблюдается

- до 90 нс



350 нс

Свечение двухслойного проводника не наблюдается

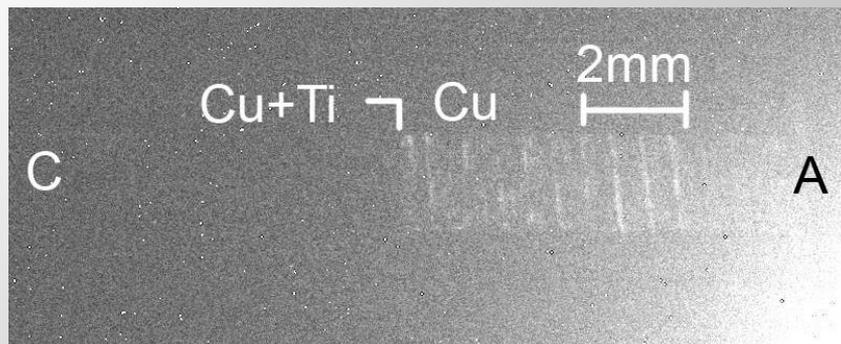
- до 280 нс (**Ti** 20 мкм)
- до 300 нс (**Ti** 50 мкм)
- до 500 нс (**Ti** 80 мкм)



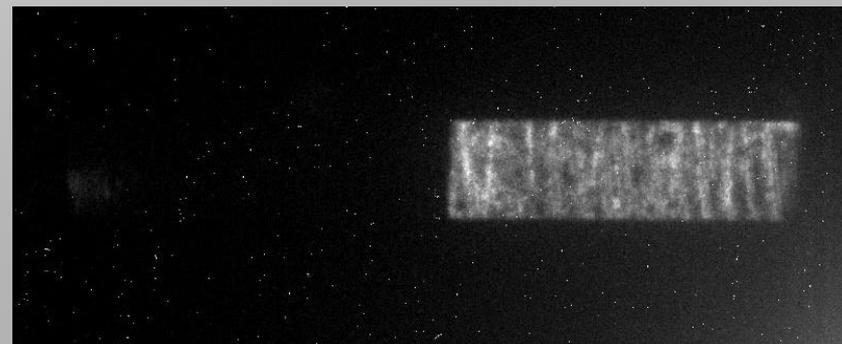
Плазмообразование на поверхности проводников:

8

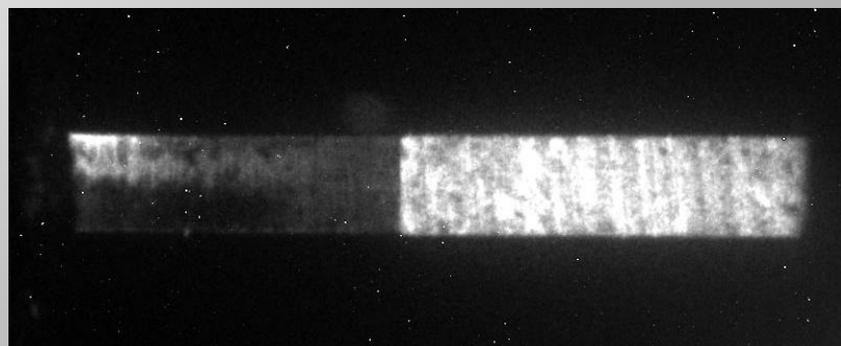
Проводник из **Cu** и двухслойный проводник (**Cu + Ti**). V_{\max} до **400** Тл; **Ti** 20 мкм



75 нс



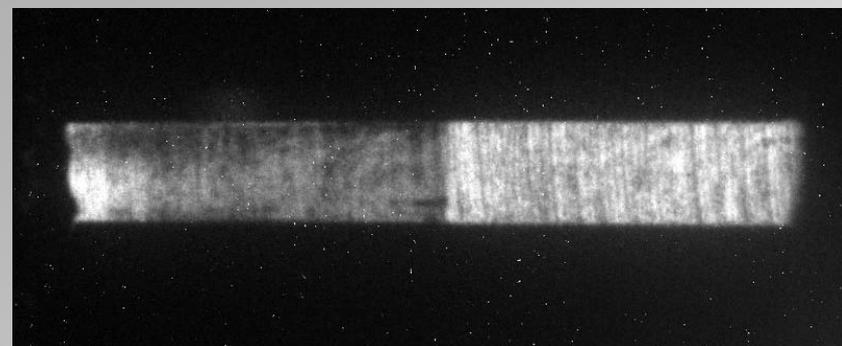
85 нс



115 нс

Свечение однородного проводника не наблюдается

- до 75 нс



125 нс

Свечение двухслойного проводника не наблюдается

- до 95 нс (**Ti** 8 мкм)
- до 110 нс (**Ti** 20 мкм)
- до 115 нс (**Ti** 60 мкм)
- до 85 нс (**Ti** 100 мкм)



Численное моделирование:

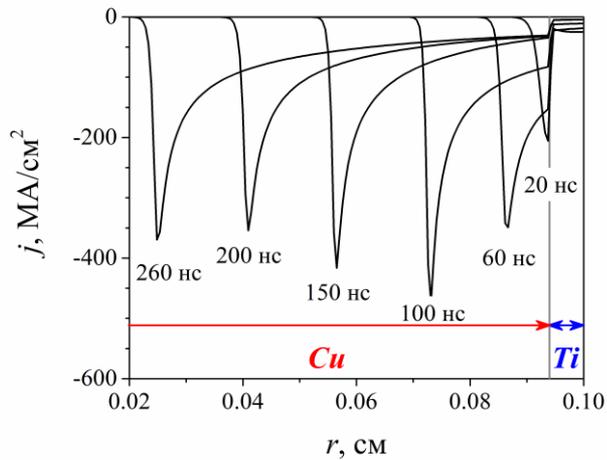
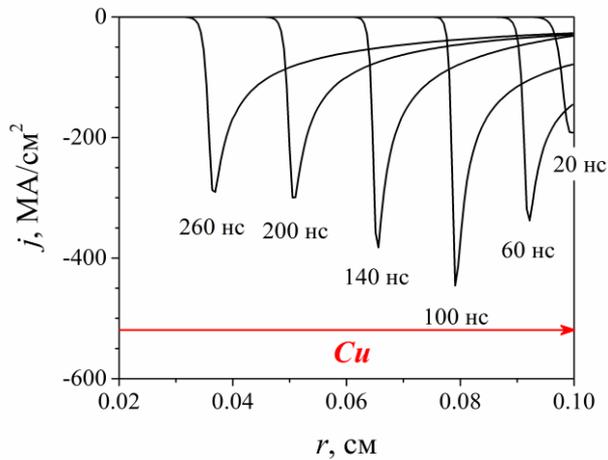
Распределение тока по сечению проводника, плотностей энергии магнитного поля и джоулева тепловыделения в условиях скин-эффекта

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rB) = \mu_0 j; \quad \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{j}{\sigma} \right) = \frac{\partial B}{\partial t}; \quad \frac{\partial \epsilon_w}{\partial t} = \frac{j^2}{\sigma};$$

$$\sigma \approx \frac{\sigma_0}{1 + \beta \epsilon_w}; \quad B_0 = \sqrt{\frac{8\pi}{\beta}} \approx \sqrt{\frac{6\mu_0 \cdot k \cdot \gamma_0}{\alpha \cdot m_i}};$$

$$B^{out}(t) = \frac{\mu_0 I(t)}{2\pi \cdot R}; \quad B^{inner}(t) = 0;$$

Уравнения Максвелла в цилиндрической системе координат, записанные в квазистационарном приближении (без учета токов смещения) и дополненные законами Ома и Джоуля-Ленца. Проводимость выражалась через плотность тепловой энергии. B - индукция азимутального магнитного поля, j - плотность аксиального тока, σ - проводимость металла, ϵ_w - плотность энергии джоулева тепловыделения; μ_0 - магнитная постоянная, β - тепловой коэффициент, который связан с индукцией характеристического магнитного поля B_0 , при которой удельное сопротивление среды возрастает в два раза, α - температурный коэффициент сопротивления, γ_0 - плотность металла, m_i - масса атома, k - постоянная Больцмана, $I(t)$ - ток, протекающий через проводник, R - внешний радиус проводника.



Взрыва поверхности у двухслойного проводника может и не происходить.

$$\epsilon_w(\text{Cu}, 100\text{-я нс}) \sim 67 \text{ кДж/см}^3, \quad \Lambda_0(\text{Cu}) \sim 43 \text{ кДж/см}^3$$

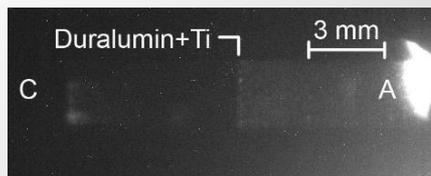
$$\epsilon_w(\text{Ti}, 100\text{-я нс}) \sim 13 \text{ кДж/см}^3, \quad \Lambda_0(\text{Ti}) \sim 39 \text{ кДж/см}^3$$



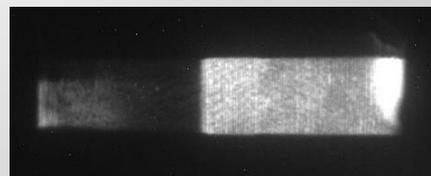
Плазмообразование на поверхности проводников Al и Al+Ti:

10

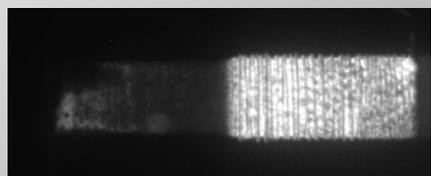
V_{\max} до 300 Тл; Ti 20 мкм



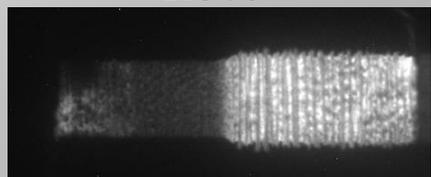
80 нс



120 нс



215 нс

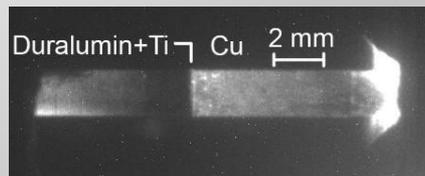


275 нс

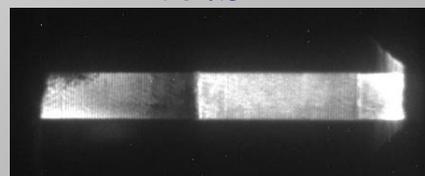
Свечение однородного проводника не наблюдается до 80 нс, двухслойного:

- до 90 нс (Ti 10 мкм)
- до 275 нс (Ti 20 мкм)
- до 275 нс (Ti 50 мкм)
- до 300 нс (Ti 70 мкм)

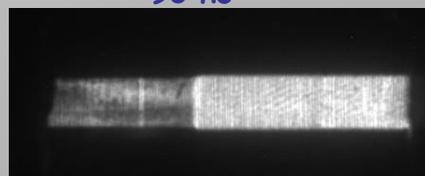
V_{\max} до 400 Тл; Ti 20 мкм



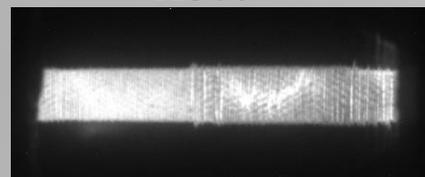
70 нс



90 нс



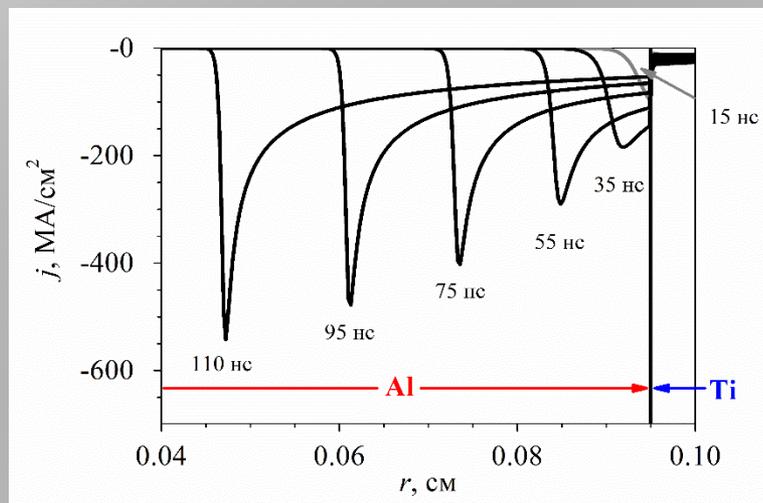
125 нс



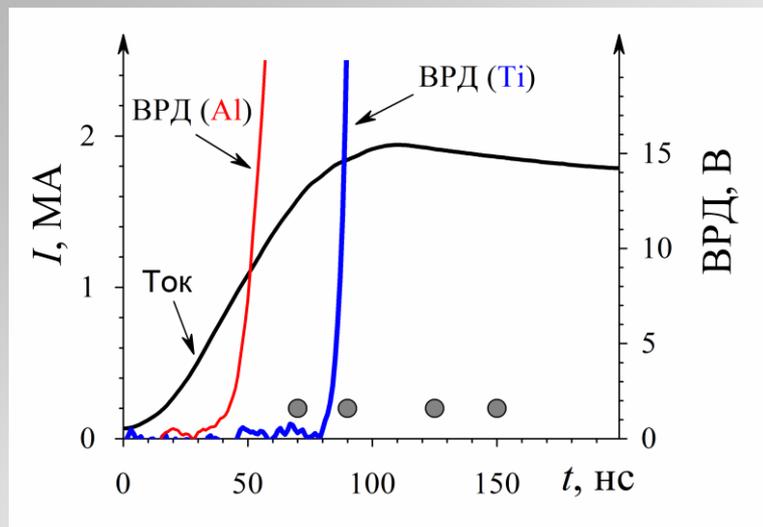
150 нс

Свечение однородного проводника не наблюдается до 50 нс, двухслойного:

- до 75 нс (Ti 10 мкм)
- до 75 нс (Ti 20 мкм)
- до 90 нс (Ti 50 мкм)
- до 90 нс (Ti 70 мкм)



ϵ_w (Ti, 100-я нс) ~ 29 кДж/см³,
 Λ_0 (Ti) ~ 39 кДж/см³

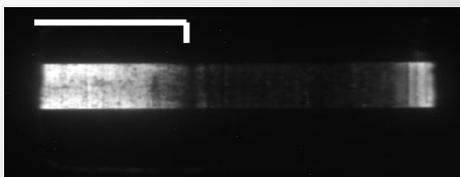




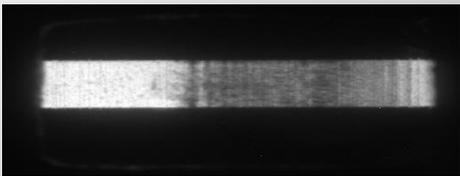
Плазмообразование на поверхности проводников **Сталь3** и **Сталь3+Ti**:

V_{max} до 300 Тл;

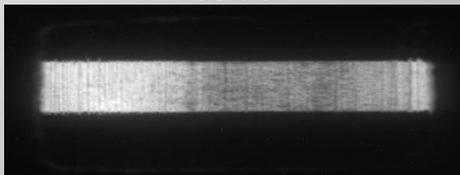
Сталь3+Ti 30 мкм **Сталь3 \varnothing 3 мм**



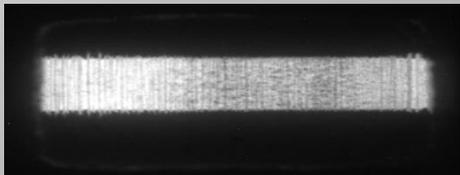
95 нс



135 нс



175 нс



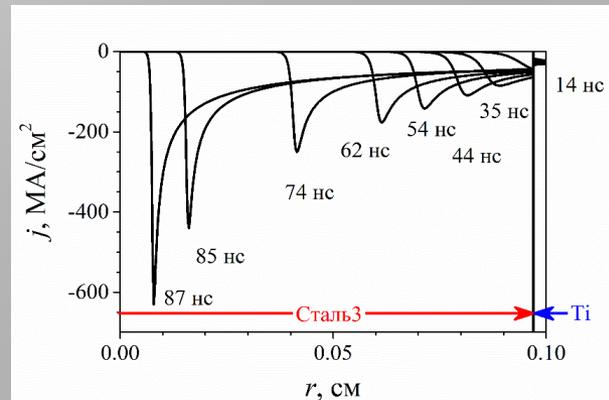
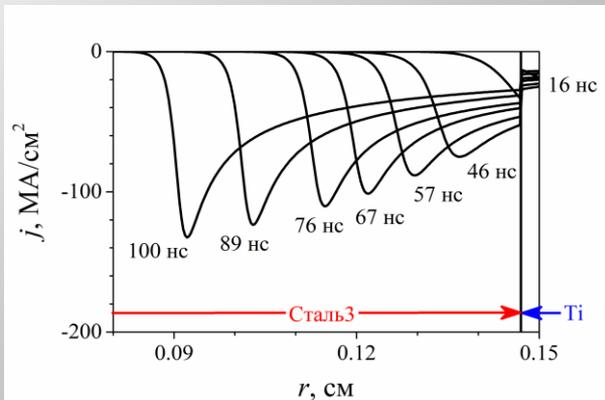
215 нс

Сигнал ВРД (**Сталь3+Ti**)

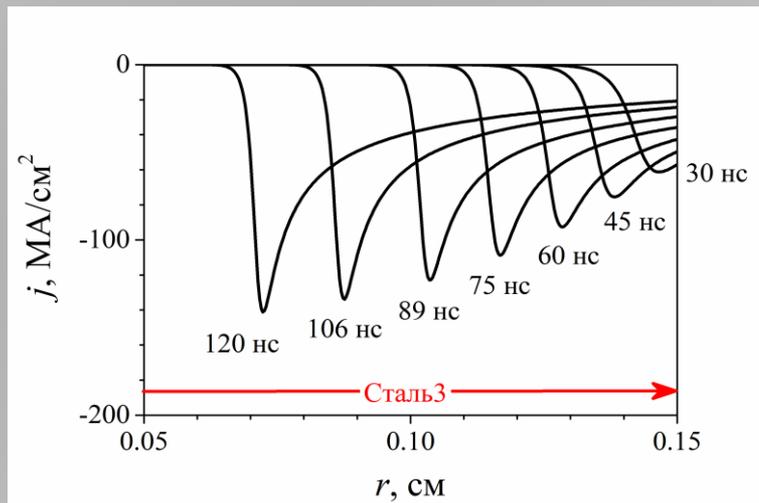
80 нс от начала тока

Сигнал ВРД (**Сталь3**)

100 нс от начала тока



ϵ_w (**Сталь3+Ti**, 100-я нс) \sim **23 кДж/см³**, ϵ_w (**Сталь3+Ti**, 74-я нс) \sim **38 кДж/см³**
 Λ_0 (Ti) \sim **39 кДж/см³**



t нс	ϵ_w кДж/см ³
30	1.84
45	6.14
60	13.65
75	23.61
89	35.28
106	47.16
120	56.38

Λ_0 (Fe) \sim **49 кДж/см³**



- В экспериментах, проведенных на сильноточном генераторе «МИГ», исследовалась динамика плазмообразования на поверхности проводников с двухслойной структурой в сверхсильных магнитных полях. Внешний слой с меньшей проводимостью получен технологичным способом вакуумного напыления (толщина 20 - 80 мкм).
- Для таких проводников наблюдается задержка плазмообразования на их поверхности на 200 - 400 нс по сравнению с однослойным проводником при полях до 300 Тл. При увеличении магнитного поля до 350 Тл и более задержка плазмообразования уменьшается до 30 - 80 нс.

Таким образом, применение двухслойных электродов, изготовленных из меди и дюралюминия с нанесенным технологичным методом вакуумного напыления слоем титана, в перспективе позволит улучшить ситуацию с плазмообразованием в передающих вакуумных линиях мощных импульсных установок следующего поколения.