



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.11.5>

УДК: 537.84

17-я Международная конференция

«Газоразрядная плазма и ее применения»

Екатеринбург, Россия, 8-12 сентября 2025

СПЕКТР ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ, ФОРМИРУЮЩЕЙСЯ ПРИ ВЗРЫВЕ МИКРОНЕОДНОРОДНОСТЕЙ ПРИ СВЧ ПРОБОЕ

Е.В. Орешкин

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,
119333, Москва, Ленинский проспект 53

Статья поступила в редакцию 2 октября 2025 г.

Аннотация. В условиях воздействия сильных СВЧ электромагнитных волн на ускоряющие системы ключевую роль играют процессы взрывной эмиссии, возникающие вследствие разрушения микронеровностей на поверхности электродов. В работе представлены результаты радиационно-магнитогидродинамических расчётов взрыва медных проводников в условиях, аналогичных тем, что возникают при взрыве микронеровностей. Это означает, что плотность тока составляет порядка 10^9 А/см². Был рассмотрен СВЧ режим взрыва микронеровности. Выяснилось, что максимум спектрального распределения излучения при взрыве микронеровности приходится на ультрафиолетовый диапазон.

Ключевые слова: взрывная эмиссия, радиационно-магнитогидродинамическое (РМГД) моделирование, СВЧ пробой.

Финансирование: Работа поддержана Российским научным фондом грант № 25-19-00580.

Автор для переписки: Орешкин Евгений Владимирович, Oreshkin@lebedev.ru

Введение

В рамках международной кооперации ведётся работа над проектом по созданию компактного линейного коллайдера (CLIC) [1]. Планируемая ускоряющая структура этого коллайдера будет выполнена из меди и функционировать на частоте около 12 ГГц. Ограничением для увеличения напряжённости электрического поля, используемого для разгона частиц, служит риск вакуумного пробоя на поверхности ускоряющей структуры. На сегодняшний день предельное значение ускоряющего поля достигает 100 МВ/м, что влечёт за собой возникновение макроскопического электрического поля с напряжённостью более 200 МВ/м на поверхности ускорителя [2].

Данная работа посвящена численному анализу закономерностей электрического взрыва медных проводников в сверхвысокочастотном режиме (СВЧ), при плотности тока порядка 10^9 А/см². Выбор меди в качестве исследуемого материала обусловлен тем, что из неё изготовлена ускоряющая структура CLIC, а также наличием обширной базы данных о её теплофизических и транспортных характеристиках.

1. Численная модель

Радиационно-магнитогидродинамическое (РМГД) приближение является стандартным инструментом для теоретического описания процессов электрического взрывного испарения (ЭВИ). Численное моделирование в рамках этой модели требует предварительного определения уравнений состояния вещества для обширного диапазона термодинамических параметров, а также коэффициентов переноса – в первую очередь электропроводности. В ходе исследования использовалась цилиндрическая геометрия в однотемпературном РМГД-приближении с соответствующим набором уравнений [3]:

а) уравнения гидродинамики, описывающие законы сохранения массы, импульса и энергии, а также поток энергии:

$$\frac{d\rho}{dt} + \frac{\rho}{r} \frac{\partial v}{\partial r} = 0, \quad (1)$$

$$\rho \frac{dv}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial r} - j_z B_\phi, \quad (2)$$

$$\rho \frac{d\varepsilon}{dt} = -\frac{p}{r} \frac{\partial(rv)}{\partial r} + \frac{j_z^2}{\sigma} - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(W_r); \quad (3)$$

б) уравнений Максвелла, записанные в квазистационарном приближении (без учета токов смещения):

$$\frac{1}{c} \frac{\partial B_\phi}{\partial t} = \frac{\partial E_z}{\partial r}, \quad j_z = \frac{c}{4\pi r} \frac{\partial(rB_\phi)}{\partial r}; \quad (4)$$

в) закона Ома:

$$j_z = \sigma E_z. \quad (5)$$

В системе уравнений (1-5) приняты следующие обозначения:

$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + v \frac{\partial}{\partial r}$ – субстанциональная производная;

ρ, T – плотность и температура вещества;

v – радиальная компонента скорости;

p, ε – давление и внутренняя энергия;

B_ϕ – азимутальная компонента напряженности магнитного поля;

E_z – аксиальная компонента напряженности электрического поля;

j_z – аксиальная компонента плотности тока;

$W_r = W_r^{Rad} - \kappa \frac{\partial T}{\partial r}$ – поток тепла;

W_r^{Rad} – поток излучения;

κ, σ – коэффициент теплопроводности и проводимость, соответственно.

Численное решение системы уравнений (1-5) было выполнено с помощью одномерной РМГД-программы EXWIRE [4-6]. В программе использована явная разностная схема для расчёта уравнений гидродинамики (1-3), при этом для корректного моделирования ударных волн в схему добавлена комбинированная псевдовязкость (линейная и квадратичная). Уравнения Максвелла (4) с учётом закона Ома (5) и уравнение теплопроводности решались с применением неявных разностных схем.

В соответствии с методикой, изложенной в работе [7], были решены уравнения переноса излучения. Данный подход предусматривает учёт трёх типов излучения: тормозного, рекомбинационного и излучения в спектральных линиях. Расчёты базировались на осреднённых по спектру коэффициентах поглощения и испускания с применением 14-группового приближения. При этом суммарная мощность ультрафиолетового излучения определялась сложением мощностей излучения в группах 3-8, а видимого излучения – в группах 9-14.

К системе РМГД-уравнений (1-5) добавлены уравнения состояния вещества. Для моделирования свойств металла применялись полуэмпирические уравнения состояния широкого диапазона [8], разработанные на основе модели [9]. Они учитывают процессы плавления и испарения при высоких температурах. Значения электропроводности меди определяли с помощью таблиц проводимости, составленных по расчётно-экспериментальной методике [6,10]. Согласно этой методике, проводимость металла зависит от типа уравнений состояния, а переход в диэлектрическое состояние происходит вблизи критической точки, то есть точки фазовой диаграммы, в которой сходятся конденсированная, двухфазная и газовая области. Для меди параметры критической точки составляют [11]: плотность вещества 2.28 г/см^3 , температура 7900° К ; давление $9 \cdot 10^3 \text{ атм}$.

2. Обсуждение результатов

Согласно данным [12], единичный эктон на медном катоде способен функционировать при минимальном токе около 1,6 А. При удвоении этого

значения на поверхности катода формируется второй эктон. Следовательно, максимальный ток, который может проходить через один эктон, составляет 3,2 А. Радиус микроострия подбирался таким образом, чтобы обеспечить плотность тока около 10^9 А/см², что близко к предельно возможной плотности тока при автоэлектронной эмиссии [13]. На основе этих параметров была создана модель взрыва медных цилиндрических проводников с начальным диаметром 0,6 мкм. Максимальная плотность тока через такой проводник определялась с учётом амплитуды тока $I_0 = 3,2$ А и начального радиуса $r_0 = 0,3$ мкм

Проводилось исследование процесса взрыва медного микропроводника под действием высокочастотного тока. Временная зависимость тока описывалась формулой:

$$\left. \begin{aligned} I(t) &= I_0 \sin 2\pi vt \\ I(i) &= 0 \end{aligned} \right\} \begin{aligned} &\text{при } \sin 2\pi vt > 0 \\ &\text{при } \sin 2\pi vt < 0 \end{aligned}, \quad (6)$$

где $\nu = \frac{1}{T}$, $\nu = 12$ ГГц – частота колебаний; T – период колебаний тока.

Особенность такого тока состояла в том, что его прохождение через проводник чередовалось с паузами, в течение которых нагрев вещества не происходил.

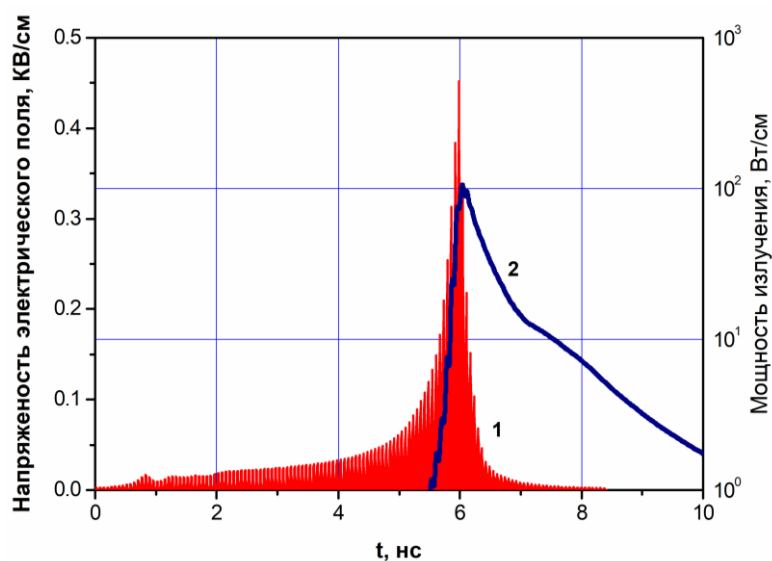


Рис.1. Зависимость от времени напряженности электрического поля на проводнике (кривая 1) и мощности излучения (кривая 2).

На рисунках 1 и 2 показаны изменения ключевых параметров взрыва в СВЧ режиме. Рисунок 1 демонстрирует, как изменяются со временем напряжённость электрического поля на микровыводнике и мощность излучения. Рисунок 2 иллюстрирует динамику средней (по массе) температуры металла и концентрации ионов. При СВЧ взрыве зафиксированы следующие параметры: длительность процесса до достижения максимального напряжения – 6 наносекунд; энергия, поглощённая проводником к моменту пика напряжения, – 0,3 мДж/см (или 8 эВ на один атом металла); максимальная мощность излучения – 10^2 Вт/см.

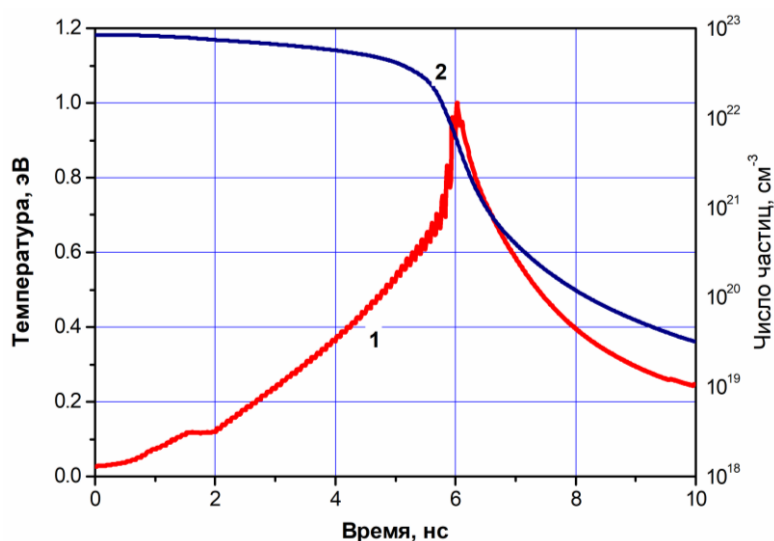


Рис. 2. Зависимость от времени средней температуры металла (кривая 1) и средней концентрации ионов (кривая 2).

Таблица 1. Распределение по длинам волн в спектральных группах.

№ группы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$\lambda_{\min}$ (нм)	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650
$\lambda_{\max}$ (нм)	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700
Энергия излучения, мкДж/см	1.74	6.86	7.2	9.9	7.4	3.2	4	2.08	1.89	1.53	1.05	1.05	0.824	0.577

Спектральные распределения (проинтегрированные по времени) собственного излучения металла приведено в таблице 1. Из нее можно видеть, что максимум спектрального распределения приходится на ультрафиолетовый диапазон. Отклонение от планковского спектра связано с колебаниями средней температуры микровыводника в процессе его нагрева, которые можно видеть на рис.2 (кривая 1).

Заключение

Выполнено моделирование магнитогидродинамических процессов, сопровождающих взрыв медных проводников в условиях, схожих с разрушением микроострий на катоде в сильных электромагнитных полях (при плотности тока $\sim 10^9$ А/см²). В расчётах использовались полуэмпирические уравнения состояния, описывающие высокотемпературные фазовые переходы (плавление и испарение). Электропроводность меди оценивалась по таблицам, составленным с помощью расчётно-экспериментальной методики, учитывающей критическую плотность вещества как порог перехода в диэлектрическое состояние.

РМГД расчеты показали, что максимум спектрального распределения приходится на ультрафиолетовый диапазон спектра. В СВЧ режиме потери энергии на излучение составляют менее 0.1 % от вложенной в проводник энергии, при этом более 95 % излученной энергии приходится на долю рекомбинационного излучения. Поэтому учёт излучения не оказывает существенного влияния на процесс и динамику взрыва. Однако излучение, генерируемое при взрыве катодных микроострий, может существенно влиять на процессы ионизации в межэлектродном пространстве, а также на формирование плазмы на аноде. Если предположить, что высота микроострия составляет несколько микрон, то мощность излучения одного эктона в СВЧ режиме можно оценить в 0.02-0.05 Вт.

Финансирование: Работа поддержана Российским научным фондом грант № 25-19-00580.

Литература

1. A 3 TeV e⁺ E⁻ Linear Collider Based on CLIC Technology / CERN. – 2000. – 9290831685.
2. Advances in the understanding of the physical processes of vacuum breakdown, Reports No / CERNOPEN-2014-028 and No. CLIC-Note-1025. – 2013.

3. Samarsky A., Popov Y. P. Difference Solution Methods of Gas-Dynamic Problems // Book Difference Solution Methods of Gas-Dynamic Problems / Editor Nauka, Moscow, 1992.
4. Oreshkin E., Barengolts S., Oreshkin V. The specific current action integral for conductors exploded by high-frequency currents // Physics of Plasmas. – 2024. – V. 31. – № 3. – P. 033904.
5. Oreshkin V. I., Barengol'ts S. A., Chaikovsky S. A. Numerical calculation of the current specific action integral at the electrical explosion of wires // Technical Physics. – 2007. – V. 52. – № 5. – P. 642-650.
6. Oreshkin V. I., Baksht R., Labetsky A. Y. et al. Study of metal conductivity near the critical point using a microwire electrical explosion in water // Technical Physics. – 2004. – V. 49. – № 7. – P. 843-848.
7. Oreshkin V., Oreshkin E., Shmelev D. A method for calculating the radiation characteristics of nonequilibrium laboratory plasmas // Physics of Plasmas. – 2023. – V. 30. – № 11. – P. 113301.
8. Tkachenko S. I., Khishchenko K. V., Vorob'ev V. S. et al. Metastable states of liquid metal under conditions of electric explosion // High Temperature. – 2001. – V. 39. – № 5. – P. 674-687.
9. Bushman A., Fortov V. Wide-range equation of state for matter under extreme conditions // Sov. Tech. Rev. B. – 1987. – V. 1. – P. 219.
10. Bakulin I. D., Kuropatenko V., Luchinskii A. Magnetohydrodynamic computation of exploding conductors // Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki. – 1976. – V. 46. – P. 1963-1969.
11. Fortov V., Khishchenko K., Levashov P. et al. Wide-range multi-phase equations of state for metals // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 1998. – V. 415. – № 3. – P. 604-608.
12. Cathode Phenomena in a Vacuum Discharge: The breakdown, the spark, and the arc. / Mesyats G. – Moscow: Nauka, 2000.

13. Fursey G., Zhukov V., Baskin I. Limiting Densities of FEE Current and Pre-Explosive Effects // Emission Electronics. – 1984. – P. 21-41.

Для цитирования:

Орешкин Е.В. Спектр излучения плазмы, формирующейся при взрыве микронеоднородностей при СВЧ пробое. // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – №. 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.11.5>