

## Плазмообразование в сильных магнитных полях на поверхности двухслойных проводников

*Н. Лабецкая<sup>1,\*</sup>, И. Дацко<sup>1</sup>, С. Чайковский<sup>1,2</sup>, В. Ванькевич<sup>1</sup>, В. Орешкин<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия*

<sup>2</sup>*Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия*

*\*natalia@ovpe2.hcei.tsc.ru*

**Аннотация.** Ранее было показано, что использование двухслойной структуры проводника с внешним слоем меньшей проводимости приводит как к задержке начала плазмообразования на его поверхности, так и к подавлению развития неустойчивостей плазмы по сравнению с однородным проводником в полях с максимальной индукцией магнитного поля 200–400 Т. В качестве внешнего слоя использовались титан и цирконий, которые наносились на медный или дюралюминиевый проводник методом вакуумного напыления. В экспериментах, проводившихся на установке МИГ (амплитуда импульса тока до 2.5 МА, фронт нарастания тока 100 нс), в качестве внешнего слоя проводника были использованы молибден и висмут, представлявшими более перспективными с точки зрения увеличения времени задержки плазмообразования и уменьшения скорости разлета уже образовавшейся плазмы. Было экспериментально показано, что использование молибдена и висмута в качестве внешнего слоя двухслойных проводников не приводит к улучшению результатов по сравнению с титаном и цирконием.

**Ключевые слова:** сильноточный генератор, скиновый взрыв проводников, двухслойные проводники, сильные магнитные поля, внешний слой меньшей проводимости, молибден, висмут.

## 1. Введение

Известно, что в быстронарастающих магнитных полях мегагауссного диапазона происходит скиновый взрыв и плазмообразование на поверхности электродов узла нагрузки [1, 2]. Разлет образовавшейся в результате взрыва плазмы может привести к досрочному перекрытию межэлектродного промежутка и снижению эффективности конверсии запасенной электрической энергии генератора в энергию, вложенную в нагрузку. Увеличение времени от начала протекания тока до начала генерации плазмы на поверхности электродов в местах, где индукция магнитного поля сравнима или превышает критическую (необходимую для поверхностного взрыва), а также уменьшение скорости ее разлета является одной из важных задач, например, при проектировании узлов нагрузки сильноточных генераторов мультимегаамперного диапазона токов.

Ранее в работах [3, 4], проводившихся на сильноточном генераторе МИГ, было показано, что использование двухслойной структуры проводника с внешним слоем толщиной до 100 мкм, обладающим меньшей проводимостью и полученным способом вакуумного напыления, приводит к задержке начала плазмообразования на его поверхности по сравнению с однородным проводником в полях с максимальной индукцией магнитного поля 200–400 Т. При увеличении индукции магнитного поля на поверхности проводника эта задержка уменьшается. Кроме того, нанесенный внешний слой подавляет развитие неустойчивостей плазмы по сравнению с однородным проводником [5]; эффективность подавления также падает с ростом индукции магнитного поля на поверхности проводника.

В качестве внешнего слоя, эффективно задерживающего начало появления плазмы на поверхности проводника, обычно использовался титан, а основной проводник изготавливался из меди или дюралюминия. Эти пары материалов позволяли обеспечить заявленную разницу в проводимости (высокопроводящий основной материал / низкопроводящий внешний слой), поскольку основная идея состояла именно в перераспределении плотности тока по сечению двухслойного проводника. Такое перераспределение тока приводило к снижению джоулевого тепловыделения на поверхности

двухслойного проводника по сравнению с однородным проводником, что и позволяло обеспечить задержку процесса плазмообразования, а также образования и дальнейшего развития неустойчивостей.

Также ранее на генераторе МИГ были проведены исследования плазмообразования на поверхности двухслойных проводников, в которых в качестве внешнего слоя использовался цирконий [6]. Проводимость и энергия сублимации вещества циркония близки к аналогичным значениям этих величин для титана, а масса иона циркония почти в 2 раза превышает массу иона титана. Было показано, что эффективность задержки появления плазмы на поверхности однородного проводника и подавление развития неустойчивостей для обоих веществ достаточно схожи. При этом, увеличение массы иона нанесенного материала в 2 раза не оказало заметного влияния на скорость разлета плазмы внешнего слоя.

Представляет интерес исследование других материалов, которые могут быть использованы в качестве внешнего слоя двухслойных проводников, проводимость которых ниже, а масса иона выше или сравнима с аналогичными величинами для использовавшихся ранее покрытий из титана и циркония.

## 2. Постановка эксперимента

Эксперименты проводились на сильноточном генераторе МИГ с амплитудой тока до 2.5 МА и временем его нарастания 100 нс [7]. Диагностический комплекс генератора МИГ состоял из поясов Роговского, магнитных зондов, делителей напряжения и четырехкадровой оптической камеры HSFC Pro с экспозицией каждого отдельного кадра 3 нс. Нагрузка генератора представляла собой цилиндрические проводники из меди или дюралюминия (D16T) диаметрами 2 и 3 мм, на прикатодную часть которых либо методом вакуумного дугового напыления [8], либо с использованием несбалансированной магнетронной распылительной системы [9] наносился слой вещества толщиной в несколько десятков микрон. Нанесение покрытий производилось в Лаборатории плазменной эмиссионной электроники и в Лаборатории прикладной электроники ИСЭ СО РАН. В некоторых экспериментах внешний слой был нанесен на половину боковой площади цилиндрической нагрузки по ее длине. Толщины слоев выбирались согласно оптимальным толщинам исследованных ранее титановых и циркониевых покрытий.

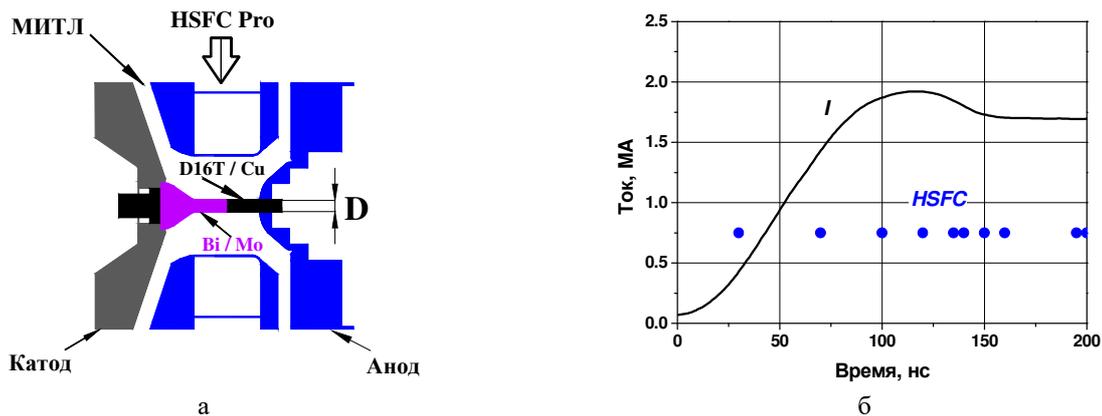


Рис.1. а) схематическое изображение узла нагрузки генератора МИГ (МИТЛ – магнитоизолированная транспортирующая линия,  $D$  – диаметр однородной части проводника); б) типичная осциллограмма тока генератора МИГ и моменты срабатывания четырехкадровой оптической камеры HSFC Pro (точки).

На Рис.1 представлены схематическое изображение узла нагрузки генератора МИГ, типичная осциллограмма тока генератора и моменты срабатывания четырехкадровой оптической камеры HSFC Pro.

### 3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

#### 3.1. Двухслойный проводник с внешним слоем из висмута

Ниже представлены экспериментальные результаты для двухслойных медных и дюралюминиевых проводников с внешним слоем из висмута, проводимость которого меньше, чем для титана, в 2.6 раза, а масса иона – больше в 4.4 раза. Такие параметры в совокупности должны были привести не только к увеличению задержки плазмообразования на поверхности двухслойных проводников с покрытием из висмута относительно покрытий из титана, но и к уменьшению скорости разлета образовавшейся на поверхности двухслойного проводника плазмы.

На Рис.2 представлены снимки однородных и двухслойных проводников из меди и дюралюминия диаметром 3 мм, на которые со стороны катода был нанесен слой висмута толщиной 10–50 мкм.

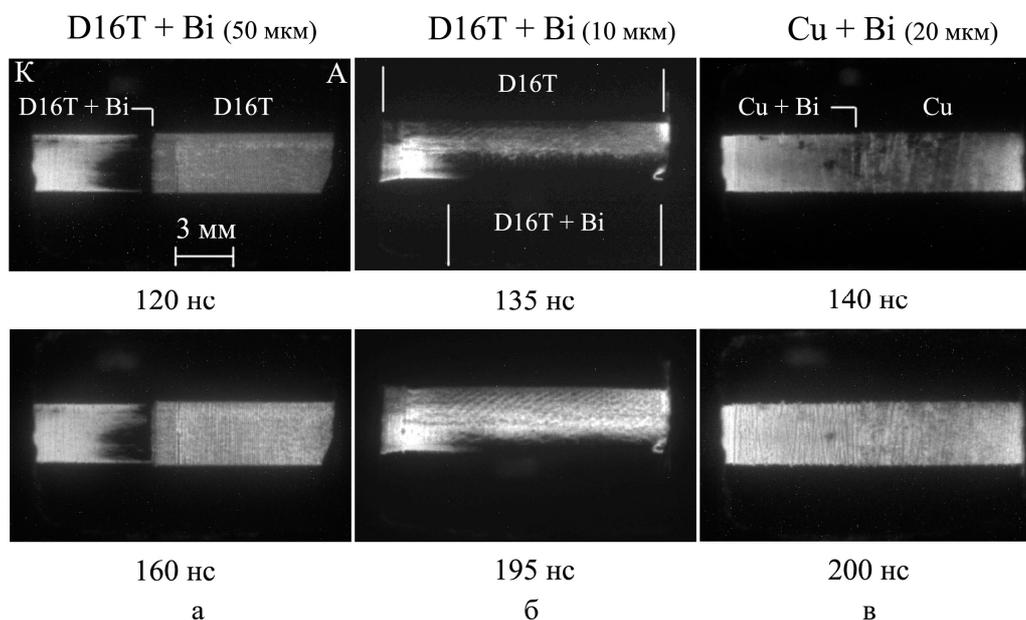


Рис.2. Оптические снимки двухслойного и однородного проводника диаметром 3 мм в собственном свечении: а) однородный проводник медь, толщина слоя висмута 20 мкм; б) однородный проводник дюралюминий, толщина слоя висмута 10 мкм (Bi нанесен на нижнюю часть проводника); в) однородный проводник дюралюминий, толщина слоя висмута 50 мкм; в разные моменты от начала протекания тока генератора. К – катод, А – анод.

Как можно видеть из Рис.2, явная задержка плазмообразования на поверхности двухслойного проводника в магнитных полях с максимальной индукцией до 300 Т отмечена только для двухслойного дюралюминиевого проводника с толщиной висмутового слоя 10 мкм (Рис.2б). Для двухслойных медного и дюралюминиевого проводников с толщиной слоя висмута 20 и 50 мкм, соответственно (Рис.2в и 2а), задержка плазмообразования практически отсутствует, а в некоторых экспериментах плазмообразование наблюдалось даже раньше, чем у однородного проводника. Тогда как для титанового внешнего слоя толщина ~50 мкм является достаточно эффективной с точки зрения, как задержки плазмообразования, так и подавления появления и развития неустойчивостей.

Одной из возможных причин такого поведения внешнего слоя висмута может являться его плохая адгезия к поверхности основного проводника, что приводит к сложности использования слоев толще 15 мкм. Плохая адгезия приводит к выделению большей части тепловой энергии во внешнем висмутовом слое, плотность энергии сублимации которого в

несколько раз меньше, чем не только плотность энергии сублимации титана, но и веществ основных проводников.

Совокупность этих факторов сводит на «нет» все преимущества висмута, как материала для внешнего слоя двухслойных проводников, таких как его во много раз меньшая проводимость относительно основного материала и большая масса иона. В связи с чем, использование данного перспективного покрытия, по крайней мере, полученного способом несбалансированной магнетронной распылительной системы, не представляется возможным.

### 3.2. Двухслойный проводник с внешним слоем из молибдена

Далее представлены экспериментальные результаты для двухслойных медных и дюралюминиевых проводников с внешним слоем из молибдена, масса иона и проводимость которого выше, чем для титана, в 2 и 8 раз, соответственно. Однако, хотя молибденый слой хуже с точки зрения проводимости (то есть является более проводящим) относительно титанового слоя, плотность его энергии сублимации в 1.6 раза выше, чем у титана.

На Рис.3 представлены снимки однородных и двухслойных проводников из меди и дюралюминия диаметрами 2 и 3 мм, на которые со стороны катода был нанесен слой молибдена толщиной ~50 мкм.

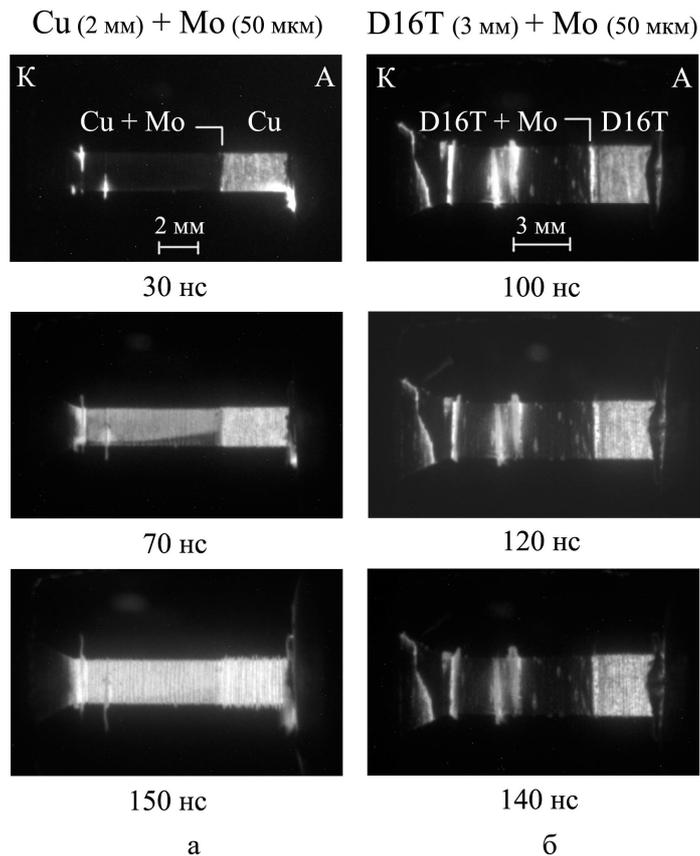


Рис.3. Оптические снимки двухслойного (толщина молибдена 50 мкм) и однородного проводника в собственном свечении: а) однородный медный проводник диаметром 2 мм и б) однородный дюралюминиевый проводник диаметром 3 мм в разные моменты от начала протекания тока генератора. К – катод, А – анод.

Напыление Мо на основной проводник представляло собой нетривиальную задачу, поскольку относительно «толстые» слои (больше десяти микрон) хотя и имели неплохую

адгезию к его поверхности, но трескались из-за внутренних напряжений и требовали аккуратного обращения из-за повышенной хрупкости.

Из Рис.3 видно, что для медного проводника диаметром 2 мм (в полях с максимальной индукцией магнитного поля до 400 Т) внешний молибденовый слой начинает светиться позже основного проводника как минимум на 30 нс, не считая «ярких» артефактов (см. Рис.3а, 30 нс), далее с течением времени свечение выравнивается по интенсивности. При этом видно, что молибденовый слой не только задерживает появление плазмы на поверхности однородного медного проводника в магнитных полях с максимальной индукцией до 400 Т, но и подавляет развитие неустойчивостей.

В полях с максимальной индукцией магнитного поля до 300 Т для дюралюминиевого проводника диаметром 3 мм основная часть внешнего молибденового слоя не светится до 140 нс от начала протекания тока (см. Рис.3б). То есть, для однородного дюралюминиевого проводника диаметром 3 мм, молибденовый слой толщиной 50 мкм задерживает появление плазмы на поверхности однородного проводника и подавляет развитие неустойчивостей. Однако, это утверждение действительно только для части молибденового проводника, поскольку яркие «артефакты», представленные в случае медного проводника лишь небольшими «вкраплениями» (см. Рис.3а, 30 нс) в случае дюралюминиевого проводника большего диаметра (см. Рис.3б) занимают гораздо большую площадь покрытия и начинают светиться, как минимум, в одно и тоже время с основным проводником. По-видимому, такое поведение напыленного молибденового слоя связано с трещинами из-за внутренних напряжений, что приводит к локальным усилениям магнитного поля на краях этих трещин, и как следствие, к их яркому и раннему свечению.

#### 4. Заключение

Использование молибдена в качестве внешнего слоя двухслойных проводников в целом не приводит к улучшению результатов по сравнению с более технологичными в нанесении титаном и цирконием, хотя с точки зрения остальных параметров (проводимость, плотность энергии сублимации и масса иона) материал представлялся перспективным.

Таким образом, можно сделать вывод, что при выборе материала для нанесения в качестве внешнего слоя двухслойных проводников следует ориентироваться не только на основные показатели материала, обеспечивающие задержку начала плазмообразования и задержку появления и развития неустойчивостей, такие как отношение проводимостей основного и напыленного материалов, масса иона и плотность энергии сублимации внешнего слоя, но и учитывать как особенности как самих материалов, так и способов их нанесения: адгезию, повышенные напряжения в материале, сложность нанесения «толстых» слоев в десятки микрон и т.д.

#### Благодарности

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 20-21-00036) и в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FWRM-2021-0001). Авторы благодарят ТомЦКП СО РАН за предоставленную высокоскоростную камеру видеорегистрации HSFC PRO.

#### 5. Ссылки

- [1] Peterson K. J., Yu E.P., Sinars D.B., et al., *Phys. Plasma*, **20**, 056305, 2013; doi: 10.1063/1.4802836
- [2] Chaikovskiy S.A., Oreshkin V.I., Datsko I.M., Labetskaya N.A., Ratakhin N.A., *Phys. Plasma*, **21**, 042706, 2014; doi: 10.1063/1.4871719

- [3] Datsko I.M., Labetskaya N.A., Chaikovsky S.A., Shugurov V.V., *Tech. Phys.*, **86**(6), 855, 2016; doi: 10.1134/S1063784216060049
- [4] Datsko I.M., Labetskaya N.A., Rybka D.V., et al., *J. Phys. Conf. Ser.*, **946**(1), 012136, 2018; doi: 10.1088/1742-6596/946/1/012136
- [5] Labetskaya N.A., Chaikovsky S.A., Datsko I.M., et al., *J. Phys. Conf. Ser.*, **946**(1), 012135, 2018; doi: 10.1088/1742-6596/946/1/012135
- [6] Datsko I.M., Labetskaya N.A., Chaikovsky S.A., et al. *J. Phys. Conf. Ser.*, **1115**(1), 022008, 2018; doi: 10.1088/1742-6596/1115/2/022008
- [7] Luchinsky A.V., Ratakhin N.A., Feduschak V.F., Shepelev A.N., *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Fiz.* **40**, 67, 1997.
- [8] Krysina O.V., Koval N.N., Lopatin I.V., et al., *J. Phys. Conf. Ser.*, **669**, 012032, 2016; doi: 10.1088/1742-6596/669/1/012032
- [9] Solov'ev A.A., Sochugov N.S., Oskomov K.V., Rabotkin S.V., *Plasma Phys. Rep.*, **35**(5), 399, 2009; doi: 10.1134/S1063780X09050055