

НЕЙРОСЕТЕВОЙ АНАЛИЗ КВАЗИСТАЦИОНАРНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ, ВОЗБУЖДАЕМЫХ ОПТИЧЕСКИ ПРИ ПОМОЩИ КОРОТКИХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Н. Д. Бухарский, Ю. В. Кочетков, Ф. А. Корнеев

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, г. Москва

Оптическая генерация магнитных полей в диапазоне килотесла открывает возможности для разработки перспективных технологий и проведения широкого круга фундаментальных исследований, связанных с лазерной плазмой. Для получения магнитных полей такой величины в лабораторных условиях как правило используются разрядные источники высокого напряжения на основе батарей конденсаторов, однако с развитием лазерных технологий достижение высоких значений магнитного поля становится возможным при помощи оптического метода, подразумевающего, что электрические токи возбуждаются мощным лазерным импульсом.

Первые эксперименты по оптической генерации магнитных полей проводились с использованием специально разработанных для этой задачи мишеней типа конденсатор-катушка [1], которые впоследствии стали одной из основных схем получения квазистационарных магнитных полей для различных высокотехнологических задач [2, 3]. Как правило, данные мишени имеют миллиметровый размер, а в качестве лазерного драйвера в них используются мощные наносекундные лазерные импульсы. Переход к более коротким лазерным импульсам пикосекундной и субпикосекундной длительности существенно меняет физику процесса генерации магнитного поля. Электрический разряд может претерпевать быстрые изменения, и схему мишени необходимо оптимизировать для эффективной работы в квазистационарном режиме. В то же время стоит отметить, что субпикосекундные лазерные импульсы высокой мощности по сравнению с более длительными импульсами наносекундного диапазона являются более привлекательными в задачах генерации высокоэнергетичных частиц и вторичного излучения, а также имеют больший потенциал в качестве драйверов для возбуждения сильных разрядных токов. Тем не менее, простое уменьшение масштаба системы и самой мишени является нежелательным решением, ограничивающим возможность применения подобных устройств. В данной работе на основе данных проведенного экспериментального исследования, а также результатов численного моделирования демонстрируется возможность достижения квазистационарного режима генерации в субмиллиметровых мишенях с использованием субпикосекундных лазерных импульсов в качестве драйверов.

Экспериментальное исследование возможности генерации квазистационарных магнитных полей с использованием субпикосекундных лазерных импульсов было проведено на установке PHELIX в GSI в городе Дармштадт, Германия. В качестве основной диагностики магнитных полей в эксперименте использовалась протонная радиография. Схема эксперимента представлена на рис. 1. Мишень представляет собой одновитковую спираль с характерным диаметром 100 мкм, вырезанную из медной фольги толщиной 20 мкм. Лазерный импульс (SP1) с длиной волны 1056 нм, длительностью 0,5 пс и энергией 50 Дж фокусируется на свободном конце мишени в пятно размером около 10 мкм, за счет чего достигаются релятивистские значения интенсивности Вт/см². В результате воздействия лазерного излучения создаются «горячие» электроны, которые покидают мишень, формируя сильный положительный потенциал, возбуждающий разрядный ток вдоль мишени [4, 5]. Так как длительность лазерного импульса меньше периметра мишени, разрядная волна представляет собой отдельный импульс конечной длительности. При достаточно малом размере зазора между свободным концом мишени и противоположным концом этот импульс не уходит в землю, так как сформированная в области взаимодействия плазма заполняет собой зазор до прихода фронта разрядного импульса. Это приводит к замыканию электрического контура и позволяет току сформировать самосогласованную квазистационарную структуру с магнитным полем. В эксперименте это

поле измерялось при помощи протонной радиографии. Диагностические протоны создавались в результате ускорения в приповерхностном слое нагретых электронов при облучении тонкой металлической фольги (TNSA механизм [6]) с использованием второго лазерного пучка SP2, параметры которого соответствовали основному пучку SP1. Пучок протонов проходил через исследуемую область и отклонялся в соответствии с локальными значениями электромагнитного поля, в результате чего в пучке формировалась определенная структура, которая регистрировалась при помощи стопки радиохромных пленок (RCF–Radiochromicfilm) GafchromicHD-V2.

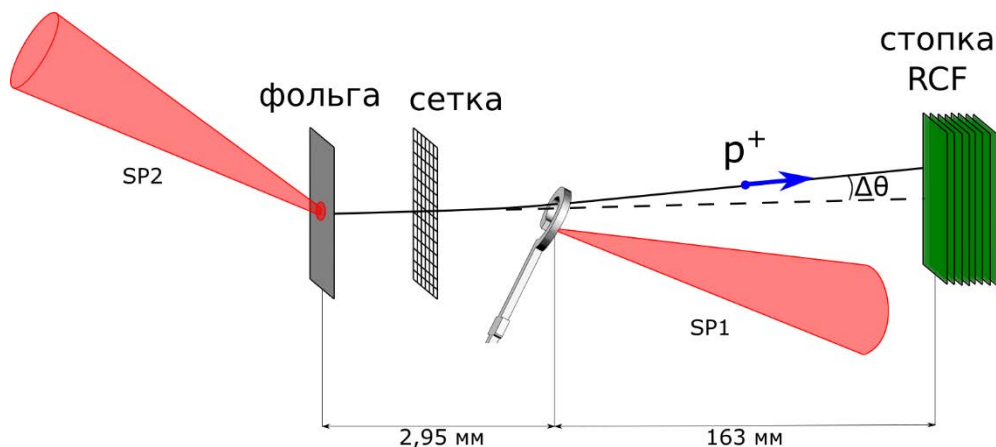


Рис. 1. Схема эксперимента по оптической генерации магнитного поля и протонной радиографии с использованием двух лазерных пучков – SP1 и SP2

Анализ полученных радиограмм представляет собой сложную обратную задачу, не имеющую универсального алгоритма решения. Недавно для анализа радиограмм было предложено использовать подход, основанный на использовании искусственных нейронных сетей [7]. Изложенная в данной работе методология является дальнейшим развитием этой идеи. Подробно ознакомиться с ней можно в статье [8].

Согласно предложенной методике, инверсия радиограмм, т. е. восстановление соответствующих полученным протонным изображениям параметров электромагнитных полей, осуществляется при помощи свёрточной нейронной сети, которая обучается на синтетических данных, генерируемых при помощи баллистического кода. В баллистическом коде симулируется пролет протонов через область электромагнитных полей заданной структуры с варьируемыми параметрами. В данном случае предполагается, что электрическое поле соответствует электростатическому полю от мишени, заряженной до определенного потенциала, а магнитное поле соответствует магнитостатическому полю, создаваемому определенным током с геометрией, определяемой формой катушки. Таким образом, электромагнитные поля описываются двумя параметрами – током в катушке и электрическим потенциалом мишени. Свёрточная нейронная сеть обучается восстанавливать эти два параметра для синтетического набора данных, где эти параметры являются заведомо известными.

Архитектура сети представлена на рис. 2,а. В качестве входных данных используются черно-белые изображения структуры, которая формируется в протонном пучке под воздействием электромагнитных полей. В качестве выходных данных служат два искомого параметра – электрический ток в контуре и электрический потенциал мишени. Нейронная сеть содержит три свёрточных слоя, три субдискретизирующий слоя и один плотный слой, содержащий 10 нейронов. Пример кривых обучения, отражающих уменьшение среднеквадратичной ошибки восстановления искомого параметра с номером итерации как для тренировочной выборки, непосредственно используемой для оптимизации весовых коэффициентов в промежуточных узлах нейронной сети, так и для валидационной выборки, используемой для проверки способности нейронной сети к обобщению при работе с «новыми» для нее данными, приведён на рис. 2,б. После стремительного уменьшения ошибок на первых итерациях кривые постепенно начинают выходить на постоянный уровень, и на 500 эпохе обучение останавливается. На рис. 2,в представлено сравнение радиограммы, синтезированной для восстановленных нейронной сетью параметров, с реальным экспериментальным изображением.

Изображения имеют высокую степень сходства, имеющиеся отличия могут быть связаны с неидеальностью экспериментальных данных, а также отличием реальной структуры электромагнитных полей от предполагаемой.

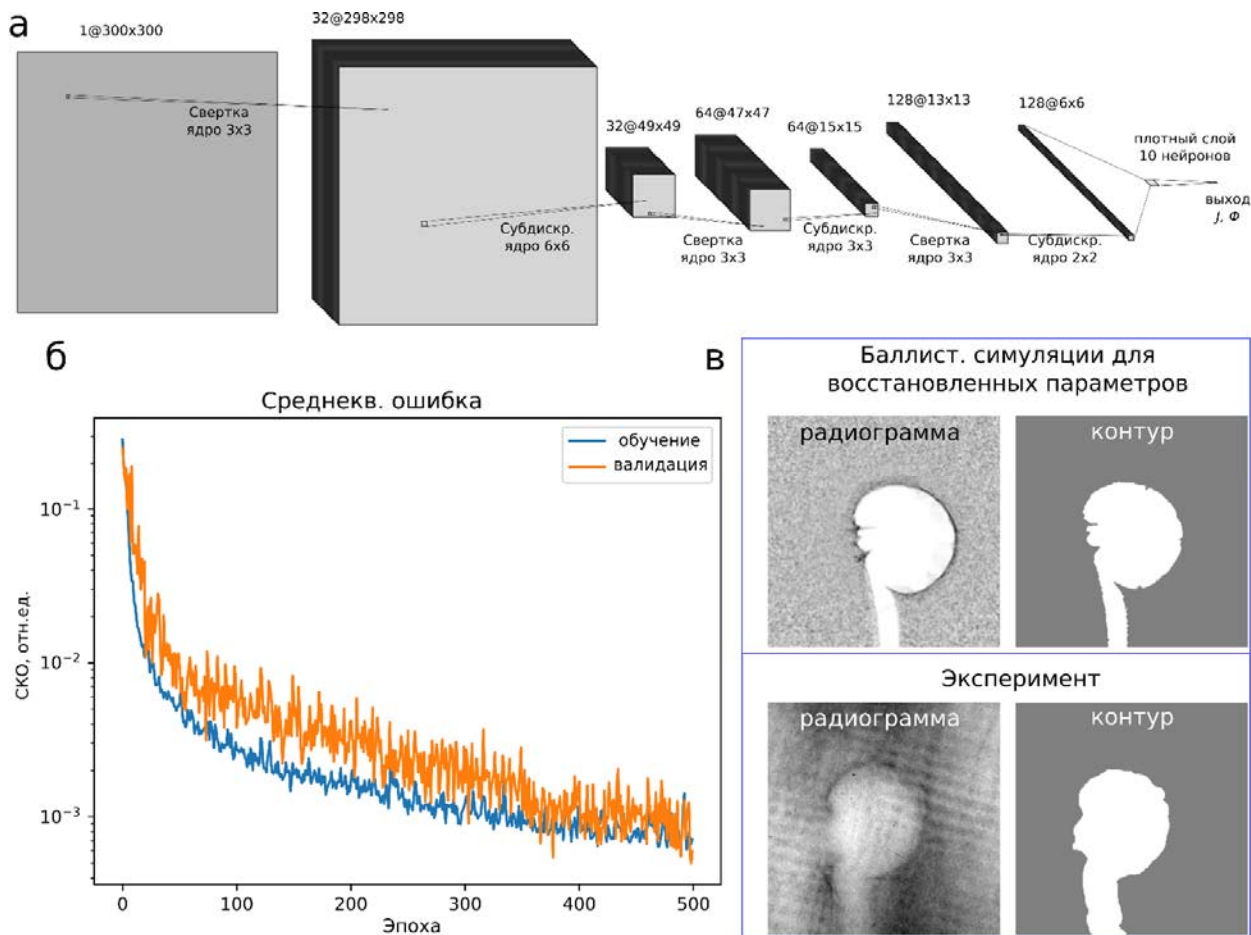


Рис. 2. а – архитектура свёрточной нейронной сети для восстановления параметров электромагнитных полей по протонным радиограммам; б – кривые обучаемости, отражающие уменьшение среднеквадратичной ошибки восстановления с номером итерации для тренировочного и валидационного набора данных; в – сравнение протонной радиограммы, синтезированной для восстановленных нейронной сетью параметров, с реальной радиограммой, полученной в эксперименте

Полученное при помощи нейронной сети значение тока для приведенной на рис. 2,в экспериментальной радиограммы соответствует значению магнитного поля в центре мишени в $\approx (210 \pm 50)$ Тл. При этом протоны, формирующие анализируемое изображение, проходят мишень через ≈ 25 пс после окончания лазерного импульса, имеющего длительность 0,5 пс. На основании полученных результатов можно подтвердить, что в мишени генерируются долгоживущее магнитное поле, существующее на временном интервале, существенно превышающем длительность лазерного драйвера.

Кроме того, для лучшего понимания происходящих в эксперименте физических явлений процесс оптической генерации в мишени квазистационарного магнитного поля исследовался численно при помощи симуляций типа «частица в ячейке». Для этого использовался открытый код Smilei [9]. Для снижения вычислительной ёмкости расчетов симуляции осуществлялись в двумерной геометрии с уменьшенным в несколько раз относительно реального размером мишени. Подробное описание проведенных расчетов и использованных в них исходных параметров приведено в работе [8]. Основным полученным в ходе результат представлен на рис. 3, где представлено пространственное

распределение магнитного поля после ухода лазерного импульса и зависимость магнитного поля в центре мишени от времени.

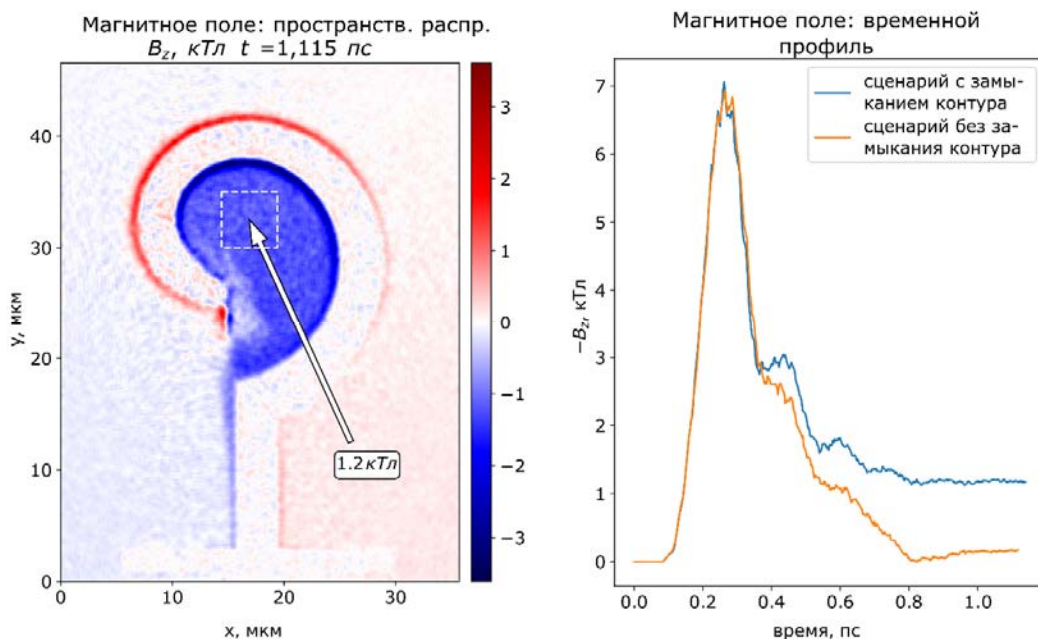


Рис. 3. Результаты двумерных симуляций типа «частица в ячейке»: пространственное распределение магнитного поля после окончания лазерного импульса (слева) и зависимость магнитного поля в центре мишени от времени (справа)

Согласно приведенным графикам, в центре мишени после окончания лазерного импульса действительно формируется квазистационарное магнитное поле, структура которого определяется геометрией поверхностных токов в мишени. Полученное значение магнитного поля в кТл качественно согласуется с экспериментальными результатами. Как видно на синей кривой, магнитное поле в центре мишени после стремительных изменений на ранней стадии взаимодействия после окончания лазерного импульса выходит на постоянный уровень, и в дальнейшем скорость его изменения невелика. Это связано с замыканием электрического контура через расширяющуюся плазму, сформированную вблизи свободного конца мишени в результате воздействия лазерного импульса. Именно благодаря ей в мишени формируется квазистационарное магнитное поле. В случае же, если скорость ее разлета оказывается недостаточной, замыкания не происходит и магнитное поле спадает практически до нулевого уровня, что видно на оранжевой кривой. В симуляции для достижения этого эффекта масса ионов была искусственно увеличена в 36 раз.

Таким образом, в работе на основе анализа полученных экспериментальных данных и результатов численных расчетов подтверждена возможность генерации квазистационарного магнитного поля с использованием субпикосекундных лазерных драйверов и субмиллиметровых мишеней. Как показали численные расчеты, ключевым эффектом в контексте генерации с помощью данной схемы квазистационарного магнитного поля, существующего на временно интервале, существенно превышающем длительность лазерного импульса, является замыкание электрического контура через расширяющуюся из области взаимодействия плазму. Разработанный для анализа экспериментальных данных метод подтвердил свою состоятельность, позволив выполнить адекватную оценку значения тока в мишени и магнитного поля в центральной области по протонной радиограмме, полученной в эксперименте. В перспективе предложенный метод может быть адаптирован для анализа более сложных распределений магнитного поля, описываемых тремя и более параметрами, что позволит рассматривать более сложные геометрии лазерно-плазменного воздействия.

Список литературы

1. Daido H., Miki F., Mimaet K. *al.* Phys. Rev. Lett. **56**, 846 (1986).
2. Santos J. J., Bailly-Grandvaux M., Giuffridaet L. *al.* New J. Phys. **17**, 083051 (2015).
3. Santos J. J., Bailly-Grandvaux M., Ehretet M. *al.* Phys. Plasmas **25**, 056705 (2018).
4. Quinn K., Wilson P. A., Cecchettiet C. A. *al.* Phys. Rev. Lett. **102**, 194801 (2009).
5. Dubois J.-L., Lubrano-Lavaderci F., Raffestinet D. *al.* Phys. Rev. E **89**, 013102 (2014).
6. Roth M., Schollmeier M. CERN Yellow Reports 1, doi: 10.5170/CERN-2016-001.231 (2016).
7. Chen N. F. Y., Kasim M. F., Ceurvorstet L. *al.* Phys. Rev. E **95**, 043305 (2017).
8. Kochetkov I. V., Bukharskii N. D., Ehretet M. *al.* Sci. Rep. **12**, 13734 (2022).
9. Derouillat J., Beck A., Pérezet F. *al.* Comput. Phys. Commun. **222**, PP. 351-373 (2018).