



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

ЛАЗЕРНОЕ УСКОРЕНИЕ ПРОТОННЫХ ПУЧКОВ С МАЛЫМ УГЛОВЫМ РАСТВОРОМ

А.А. Бушухин, К.В. Сафронов, С.А. Горохов, В.А. Флегентов, Н.Н. Шамаева, Д.О. Замураев, А.Л. Шамраев, С.Ф. Ковалёва, Н.А. Федоров, С.Н. Пахомов, А.В. Савельев, А.В. Потапов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. Академика Е.И. Забабахина»

XVII международные «Забабахинские научные чтения»
19-23 мая 2025

При интенсивностях лазерного излучения 10^{19} – 10^{21} Вт/см² современные лазерные установки с длительностью импульса $(25 \div 100)$ фс способны генерировать протоны с максимальными энергиями ~ 40 МэВ и угловым раствором $\sim 15^\circ$ при облучении мишеней толщиной несколько микрометров^[1,2]. Такие компактные ускорители могут найти применение в различных научных областях, от исследований тепловой плотной плазмы^[3,4] до моделирования пучков заряженных частиц, присутствующих в космическом пространстве^[5]. Ранее, на фемтосекундной лазерной установке были удачно проведены эксперименты по облучению и генерации одиночных сбоев в микроэлектронных устройствах^[6,7].

В литературе показано, что повышения параметров лазер-ускоренных протонов можно добиться за счёт уменьшения толщины мишеней до значений менее 1 мкм. Для данных толщин ускорение заряженных частиц происходит за счёт дополнительных механизмов^[8–11], что позволяет получать протонные пучки с энергиями до 100 МэВ^[12–15].

В данном докладе представлены результаты экспериментов по лазер-плазменному ускорению протонов при взаимодействии ультрарелятивистских фемтосекундных лазерных импульсов с алюминиевыми мишенями толщиной 6 мкм, а также со сверхтонкими алмазоподобными углеродными (англ. *diamond-like carbon, DLC*) плёнками толщиной $(50 \div 100)$ нм.

Параметры протонных пучков



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

Лазер

- $\lambda_{\text{лаз}} = 800 \text{ нм}$,
- $E_{\text{лаз}}$ до 2 Дж,
- $\tau_{\text{лаз}} = 27 \pm 2 \text{ фс}$.

Система контраста лазерного излучения

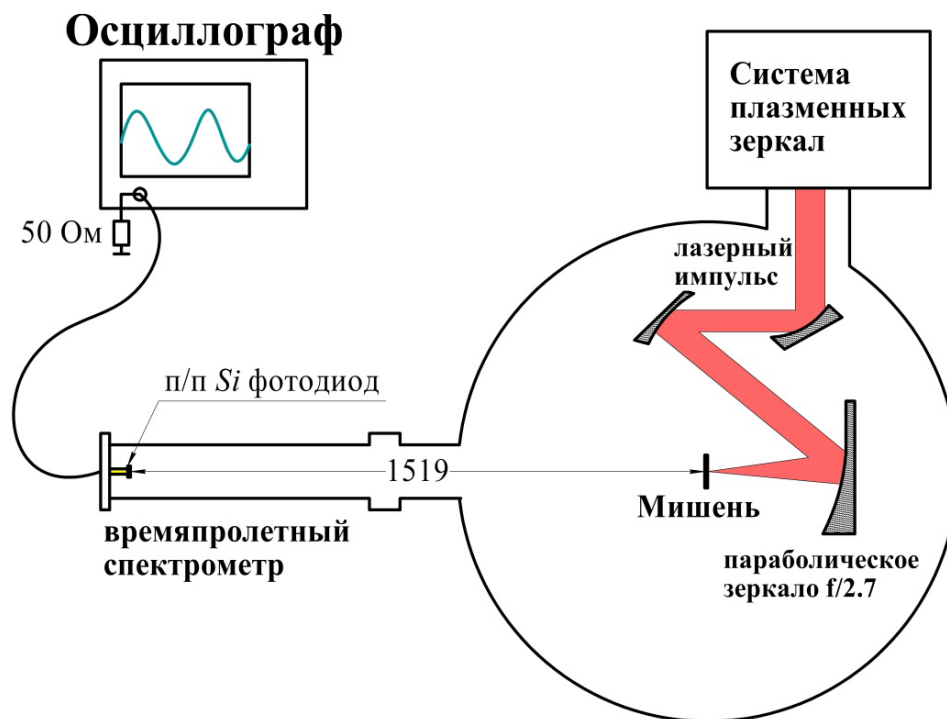
- Двойное плазменное зеркало

Мишени

- Al 6 мкм,
- Алмазоподобные углеродные мишени, DLC 100 нм.

Диагностики

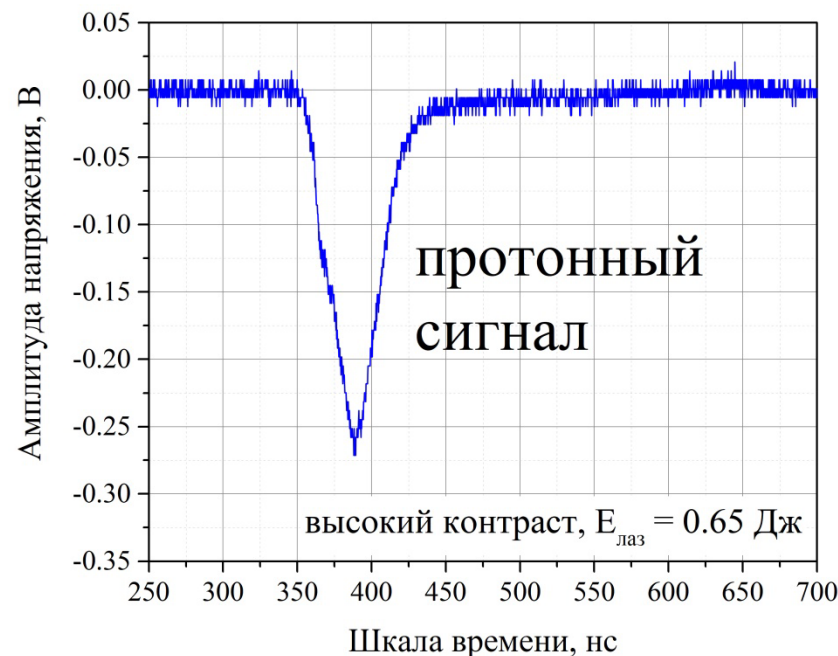
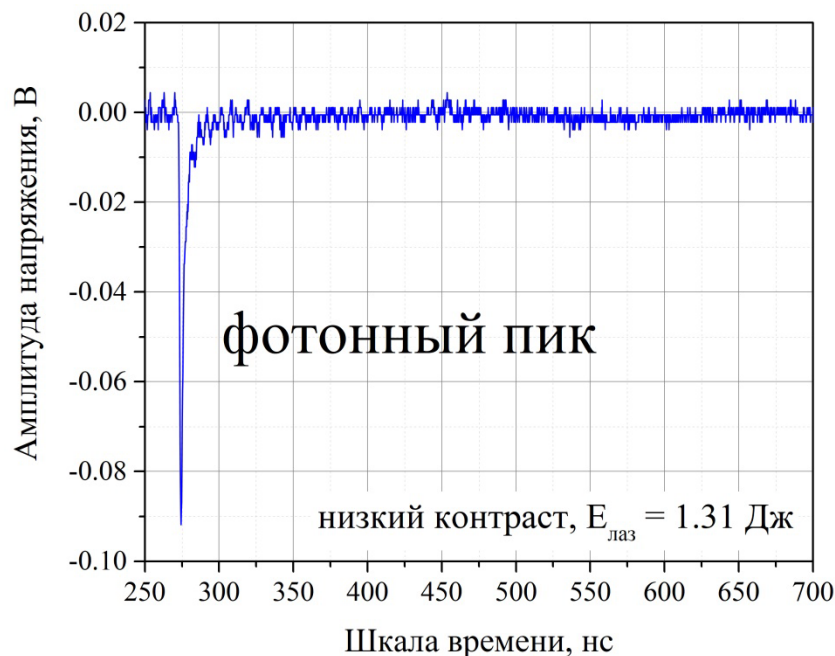
- Времяпролетный спектрометр (временное разрешение $\sim 3 \text{ нс}$).



Параметры протонных пучков



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

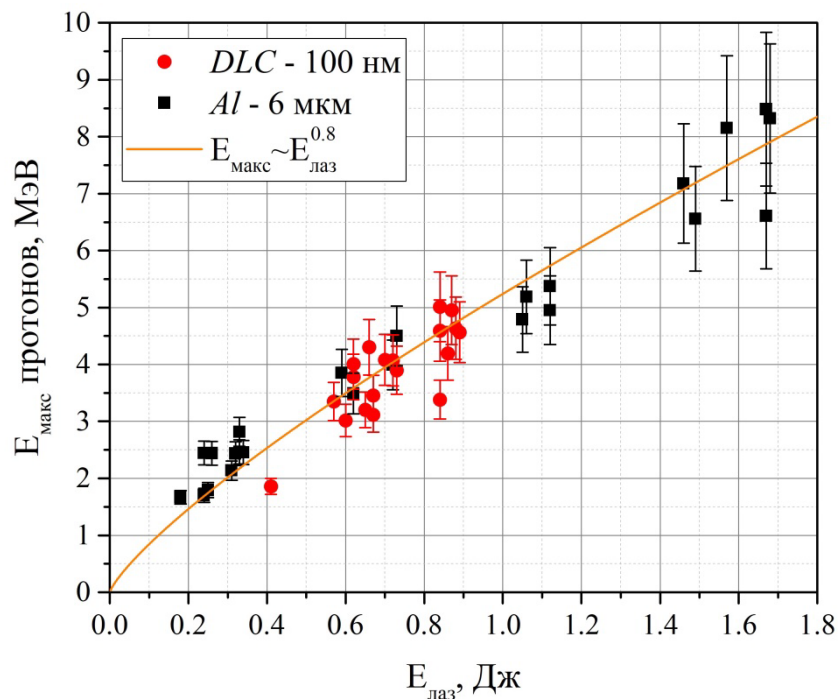


1. При облучении алмазоподобных плёнок толщиной 100 нм без применения системы повышения контраста происходит их разрушение до прихода рабочего лазерного импульса
2. Появление протонного сигнала в экспериментах с плазменными зеркалами является косвенным доказательством повышения уровня контраста лазерной установки

Параметры протонных пучков

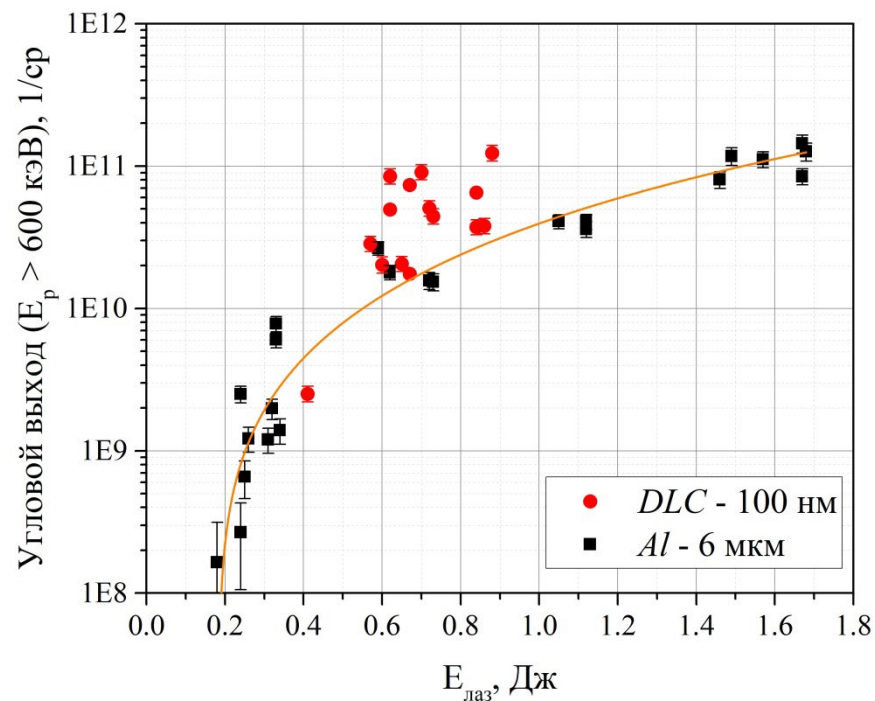


РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

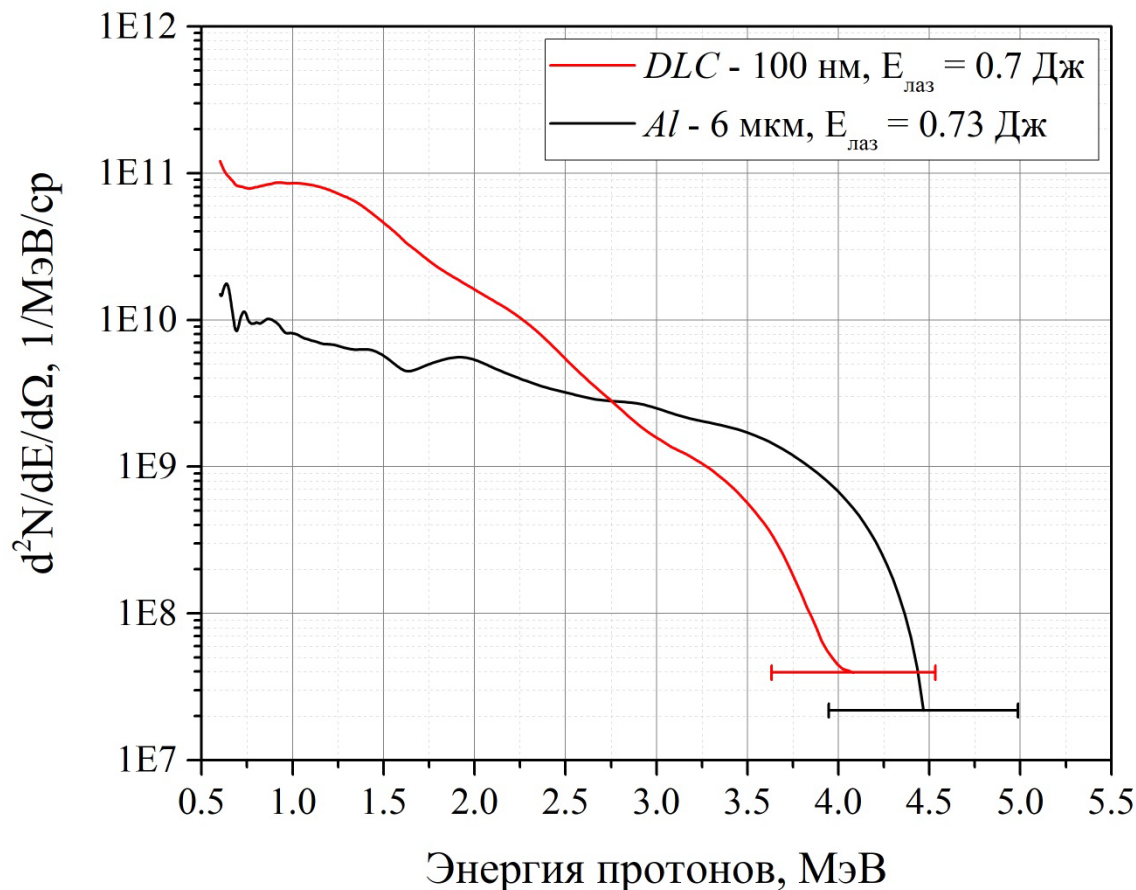


При уменьшении толщины мишеней с 6 мкм до 100 нм не отмечено увеличение максимальных энергий протонов

Наблюдается увеличение углового выхода протонов до 5 раз при облучении сверхтонких мишеней



Параметры протонных пучков

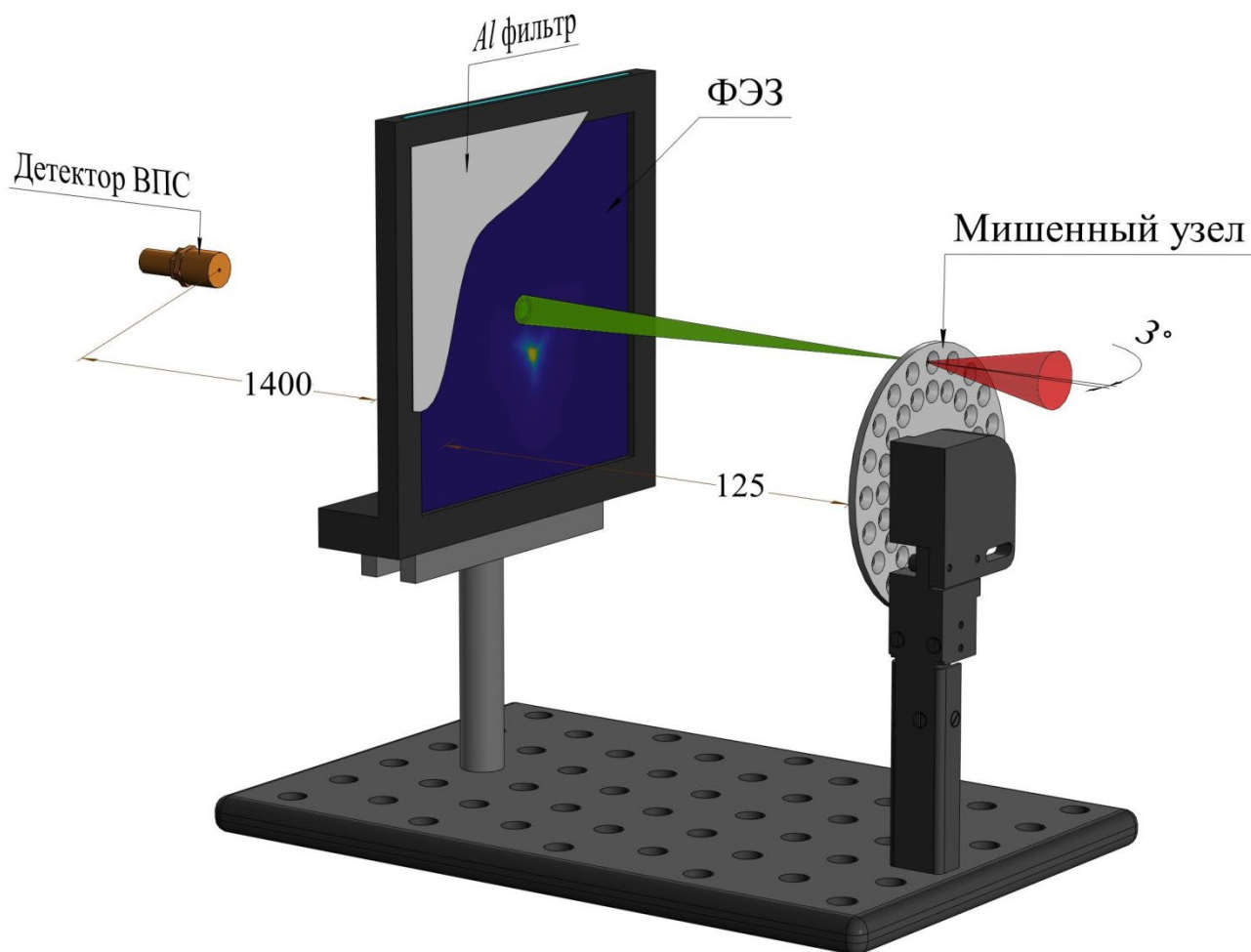


При сравнении спектров протонов видно, что рост углового выхода протонов обусловлен возросшим количеством протонов с энергиями менее 2.5 МэВ до 10 раз

Данный эффект может быть объяснён изменением характера ускорения протонов^[16-17]:

$TNSA \rightarrow TNSA +$
кулоновский взрыв

Измерение углового раствора



Мишень – DLC 50 нм,

Детектор –
Фотолюминесцентный экран
с запоминанием (ФЭЗ) типа
image plate,

Защита ФЭЗ – фольга из Al
(5.5 ± 0.5) мкм + защитный
слой (6 мкм C_2H_2O),

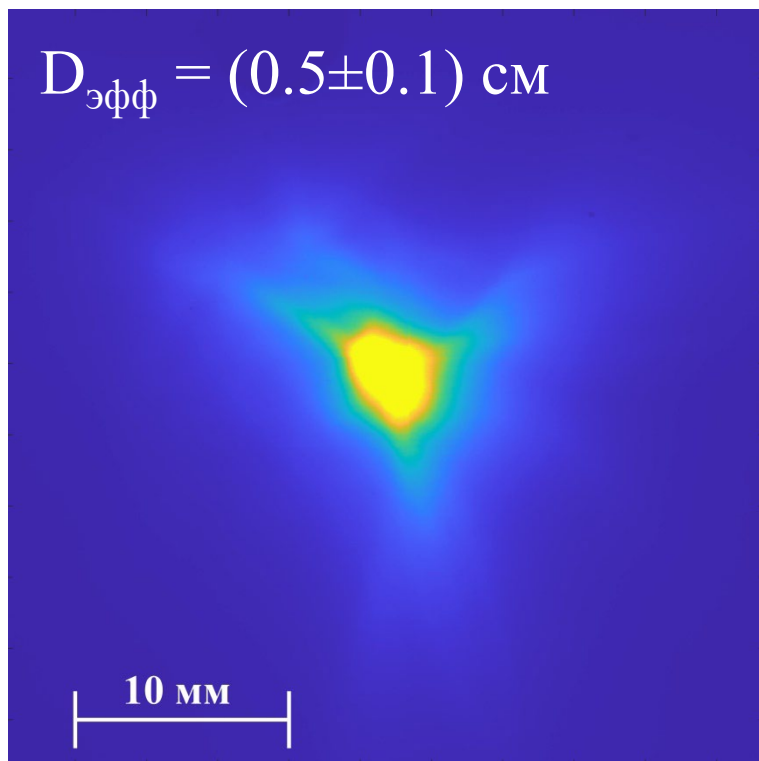
Защита от: p^+ до 730 кэВ,
 C^{n+} до 10.5 МэВ, O^{n+} до 14.5
МэВ,

$E_{\text{лаз}} = 1.04$ Дж на мишени,
 $\tau_{\text{лаз}} = (27 \pm 0.4)$ фс,
угол падения на мишень - 3°

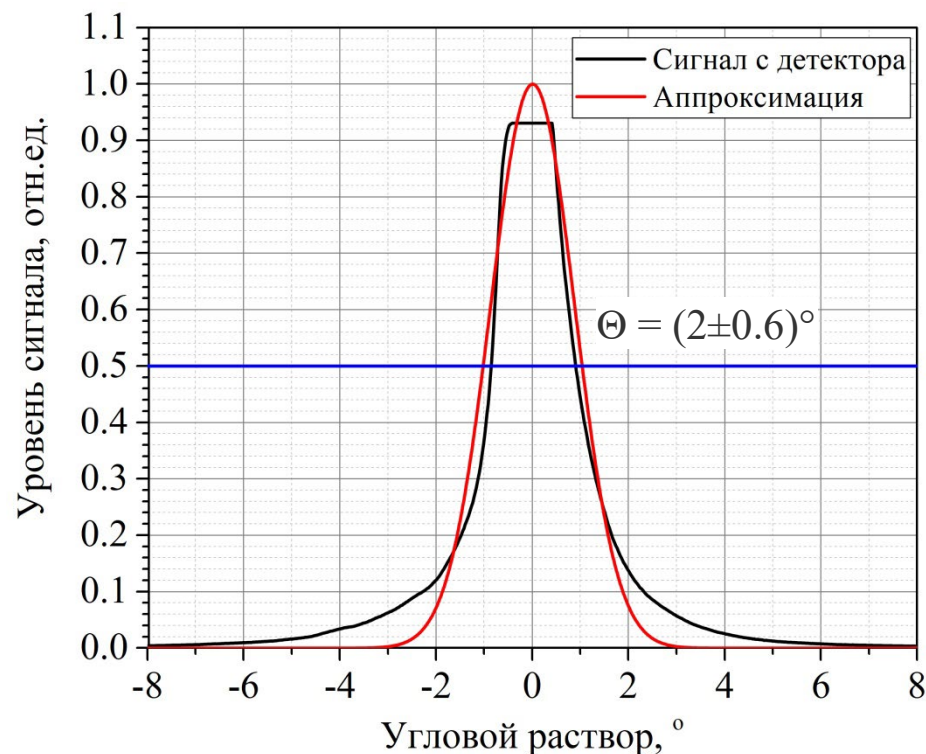
Измерение углового раствора



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ



Изображение протонного
отпечатка на *image plate* детекторе
(12.5 см от мишени)



Усреднённое распределение
сигнала вдоль горизонтального
среза протонного отпечатка

Основные выводы

1. Реализованная на установке Сокол-Ф система повышения временного контраста позволяет проводить эксперименты со сверхтонкими плёнками толщиной до 50 нм.
2. Уменьшение толщины мишеней с 6 мкм до 100 нм при соответствующем изменении уровня контраста приводит к увеличению углового выхода протонов до 6 раз без изменения максимальных энергий протонов.
3. Данный эффект связан с увеличением количества протонов в низкоэнергетической части спектров, что может быть обусловлено изменением характера ускорения протонов из сверхтонких мишеней.
4. По измерениям с использованием детектора *image plate* получено значение углового раствора протонного пучка из сверхтонких плёнок, которое составляет $\sim 2^\circ$.

Список литературы



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

1. Poole P.L. et al. Laser-driven ion acceleration via target normal sheath acceleration in the relativistic transparency regime // New. J. Phys. – 2018. – Vol. 20. – P. 013019.
2. Prasad R. et al. Proton acceleration using 50 fs, high intensity ASTRA-Gemini laser pulses // Nuc. Instrum. and Meth. in Phys. Res. A. – 2011. – Vol. 653. – P. 113-115.
3. Feldman S., Dyer G., Kuk D., Ditmire T. // Phys. Rev. E. - 2017. - V. 95. - P. 031201.
4. Dyer G.M., Bernstein A.C., Cho B.I., Osterholz J., Grigsby W., Dalton A., Shepherd R., Ping Y., Chen H., Widmann K., Ditmire T. // Phys. Rev. Lett. - 2008. - V. 101. - P. 015002.
5. Hidding B. et al. Laser-plasma-based Space Radiation Reproduction in the Laboratory // Sci. Rep. - 2016. - Vol. 7. - P. 42354.
6. Сафронов К.В. и др. Применение лазер-плазменного ускорителя протонов для исследования одиночных радиационных эффектов в микроэлектронном устройстве // Приборы и Техника Эксперимента. - 2024. – Т.67(5). - С.106-112.
7. Марчук М.В. и др. Определение доминирующего механизма сбоев в оперативном запоминающем устройстве микроконтроллера 0.18 μm при импульсном воздействии протонов низких энергий // ЖТФ. - 2024. - Т.94(2). - С.248.
8. Esirkepov T., Borghesi M., Bulanov S.V., Mourou G., Tajima T. Highly Efficient Relativistic-Ion Generation in the Laser-Piston Regime // Phys. Rev. Lett. - 2004. - V. 92. - P. 175003.
9. d'Humieres E., Lefebvre E., Gremillet L., Malka V. Proton acceleration mechanisms in high-intensity laser interaction with thin foils // Phys. Plasmas. - 2005. - V. 12. - P. 062704.
10. Yin L., Albright B.J., Hegelich B.M., Fernandez J.C. GeV laser ion acceleration from ultrathin targets: The laser break-out afterburner // Laser Part. Beams. - 2006. - V. 24. - P. 291.
11. Macchi A., Borghesi M., Passoni M. Ion acceleration by superintense laser-plasma interaction // Rev. Mod. Phys. - 2013. - V. 85. - P. 751.
12. Higginson A. et al. Near-100 MeV protons via a laser-driven transparency-enhanced hybrid acceleration scheme // Nature communications. – 2018. – Vol. 9, №1. – P. 1-9.
13. Wagner F. et al. Maximum Proton Energy above 85 MeV from the Relativistic Interaction of Laser Pulses with Micrometer Thick CH₂ Targets // Phys. Rev. Lett. – 2016. – Vol. 116. – P. 205002.
14. Dover N.P. et al. Enhanced ion acceleration from transparency-driven foils demonstrated at two ultraintense laser facilities// Light Sci. Appl. - 2023. - V. 12. - P. 71.
15. Ziegler T. et al. Laser-driven high-energy proton beams from cascaded acceleration regimes// Nature Phys. 2024. V. 20. P. 1211.
16. Ter-Avetisyan S. et al. Ion acceleration with few-cycle relativistic laser pulses from foil targets // Plasma Phys. Control. Fusion. – 2023. – V. 65. – P. 085012.
17. Green J.S. et al. High efficiency proton beam generation through target thickness control in femtosecond laser-plasma interactions // Appl. Phys. Lett. – 2014. – V. 104. – P. 214101.