

Сравнение эффективности конверсии лазерного излучения в рентгеновское излучение на металлическом и малоплотном висмуте

*Н.Г. Борисенко, А.И. Громов, Ю.А. Меркульев, А.С. Орехов,
Ш. Чаурасия, С. Трипати, Д.С. Мунда, Н.К. Гупта, Л.Дж. Даришвар.*

Аннотация

Экспериментальные исследования конверсии лазерного излучения с длиной волны 1.056 мкм и интенсивностью 10^{14} Вт/см² при длительности импульса 0.5 нс и энергии около 15 Дж в рентгеновское излучение на металлическом и на малоплотном (0.1 г/см³) висмуте показали, что коэффициент конверсии увеличивается на 10% в случае малоплотного материала, а спектр рентгеновского излучения становится мягче. Тенеграммы показывают более широкий факел короны от мишени из малоплотного висмута по сравнению со сплошным металлическим висмутом. Данные ионных коллекторов свидетельствуют о том, что быстрые ионы от металлического висмута обладают почти в 2 раза большей энергией, чем от малоплотного висмута.

Работа, инициированная Н.Г. Борисенко, выполнена на лазерной установке в Центре атомных исследований им. Баба в Индии на мишенях, изготовленных в ФИАН. Обработка полученных в Индии экспериментальных данных выполнена аспирантом А.С. Ореховым.

Comparison of laser light conversion efficiency into x-rays in solid bismuth and in low-density bismuth

N.G. Borisenko, A.I. Gromov, Yu.A. Merkuliev, A.S. Orekhov,
S. Chaurasia, S. Tripathi, D.S. Munda, N.K. Gupta, L. Dhareshwar

Abstract

Experimental study of conversion of laser radiation (wavelength 1.056 micrometers, flux 10^{14} W/cm², pulse duration 0.5 ns, pulse energy 15 J) into x-rays in solid and in low-density bismuth indicated that conversion ratio is 10% higher in case of metallic foam and the spectrum becomes softer. Shadowgraph shows wider corona flare from low-density bismuth as compared with solid bismuth. Ion collector data show fast ions from solid bismuth to have twice more energy than ions from low-density metal. This work was initiated by N.G. Borisenko, was partly supported by ILTP project A3.43, took place on the Bhabha Atomic Research Center, Mumbai, India, using targets fabricated in P.N. Lebedev Physical Institute. Data processing by PhD student A.S. Orekhov.

1. Введение

Последние 15 лет ведутся интенсивные исследования особенностей формирования лазерной плазмы в мишенях из малоплотных полимерных сред [1-2]. Оказалось, что образующаяся плазма имеет температуру почти в два раза выше, чем плазма из полноплотного того же полимера [2-4]. При отработке вариантов рентгеновской литографии от лазерного источника на мишенях из оксида олова установлено, что на структуре мишени из тонких волокон SnO_2 интенсивность излучения выше, чем на мишени из сплошного оксида олова [5]. В теоретических расчетах [6] было показано, что в конвертере не прямой мишени с внутренним слоем золота плотностью около 0.4 г/см^3 коэффициент конверсии увеличивается на 15% и температура внутри кожуха не прямой мишени увеличивается на 10-12%. В работе [7] сообщалось об экспериментах с лазерным излучением на длине волны 0.352 мкм , подтвердивших теоретические предсказания. Данная работа поставлена с целью сравнительного изучения коэффициентов конверсии лазерного излучения с длиной волны 1.056 мкм в рентгеновское излучение на поверхности металлического и порошкового висмута на плоских мишенях.

2. Описание эксперимента

Эксперименты проводились в Центре атомных исследований им. Баба (BARC) в Индии с использованием многокаскадной мощной неодимовой лазерной установки (энергия 16 Дж, длительность 300-800 пс, длина волны 1.052 мкм) при участии сотрудников ФИАН.

В экспериментах использовалась лазерная установка, разработанная в BARC на основе мощного лазера на неодимовом стекле с энергией 12 Дж и длительностью 300-500 пс. В этих экспериментах лазерная система была модернизирована для получения рабочего значения энергии до 16 Дж. Лазерная система состояла из промышленного генератора (100 мДж, 300-800 пс), двух усилителей 19 мм x 300 мм, накачиваемых шестью ксеноновыми лампами, двух усилителей 38 мм x 300 мм, одного усилителя 50 мм x 300 мм, накачиваемыми двенадцатью ксеноновыми лампами, пространственного фильтра и системы

ретрансляции для последовательного расширения пучка. Пространственный фильтр помещался между вторым и третьим каскадами усиления, а система ретрансляции между четвертым и пятым выходным каскадом. Для предотвращения разрушения генератора и оптики, из-за паразитного обратного отражения от мишени использовались две фарадеевские развязки (фарадеевские затворы). Лазерная система работала в одномодовом режиме с энергией **10 Дж** и длительностью импульса **500 пс**. На выходе лазерной линейки помещалась полуволновая пластинка для вращения поляризации согласно требованиям эксперимента. Зеркала **M3**, **M4** и **M5** обеспечивают оптическую задержку, которая необходима в ряде экспериментов для синхронизации лазерного импульса с диагностической аппаратурой. Лазерный пучок с интенсивностью порядка 10^{13} - 2×10^{14} Вт/см² фокусировался с помощью линзы **f/5** в вакуумную камеру, откачиваемую до давления 4×10^{-5} мбар.

Измерение энергетического баланса осуществлялось тремя калориметрами. Схема эксперимента и измерительного комплекса приведена на **Рис.1**.

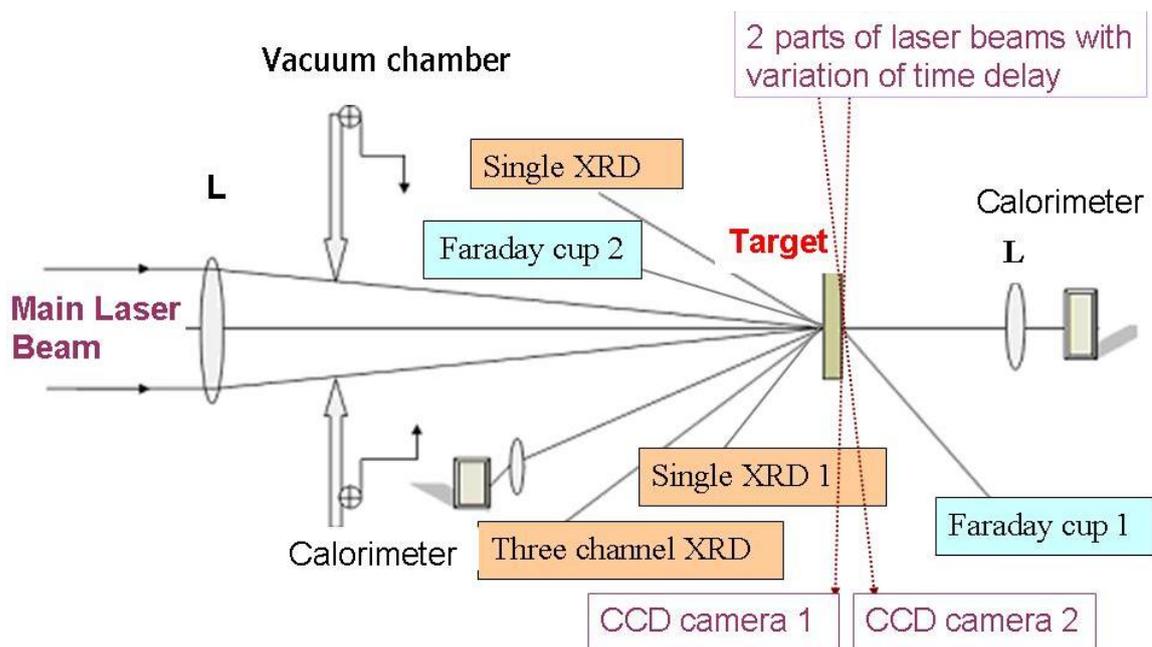


Рис.1. Схема измерительного комплекса на лазерной установке в BARC (Индия). **XRD** рентгеновский детектор, **L**- линза, перпендикулярно к лазерному лучу изображение мишени записывалось оптической стрик-камерами с разверткой около 10 нс.

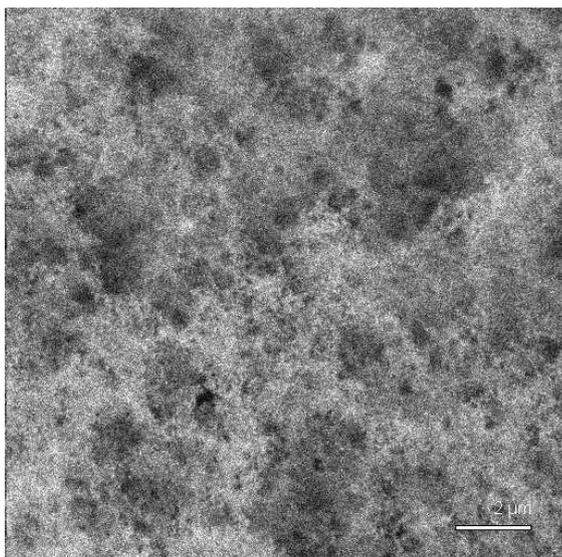


Рис. 2 Вид висмута с плотностью 0.1 г/см³. масштаб - 2 мкм.

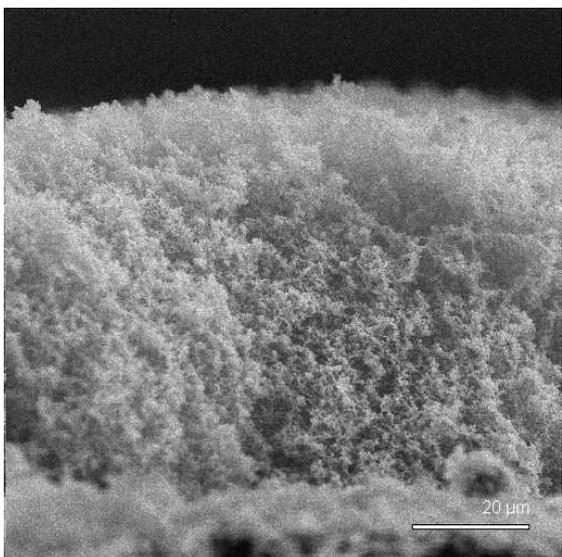


Рис. 3. Разрез слоя малоплотного висмута, Масштаб 20 мкм

Один calorimeter использовался для контроля греющего пучка, другой для измерения рассеянного в обратном направлении от мишени излучения и третий помещался за мишенью для измерения доли прошедшего через мишень основного излучения. Перед мишенью размещались пять чувствительных к рентгеновскому излучению фотодиодов, которые были

прикрыты соответствующими рентгеновскими фильтрами. Для измерения спектра рентгеновского излучения использовался детектор AXUV с фильтрами, состоящим из фольг В10 (пропускание >0,9 кэВ), никеля 5 мкм и алюминия 20 мкм. Детектор размещался на расстоянии 65 см от мишени под углом 45° и под углом близком к оси пучка. Детектор с 5-микронным алюминиевым фильтром (пропускание 0,8-1,56 кэВ и >2.4 кэВ) располагался на расстоянии 40

см с угловыми координатами $\theta=45^\circ$ и $\phi=55^\circ$ по отношению к нормали к плоскости мишени. Детектор с 12-микронным титановым фильтром (пропускание 3.0-5 кэВ) располагался на расстоянии 40,7 см под углами к нормали 45° или 10°. Для измерения параметров эмитируемых ионов использовались два ионных коллектора. Один коллектор FC1 располагался на расстоянии 54,7 см перед мишенью (45° и 35°), а другой коллектор FC2 на расстоянии 55 см сзади мишени (45° или 0°). Конструктивные особенности детекторов обсуждались ранее в работе [8]. Мишени были трех типов: из металлического полированного и неполированного висмута и мишени из наночастиц висмута со средним диаметром частиц 100 нм и средней

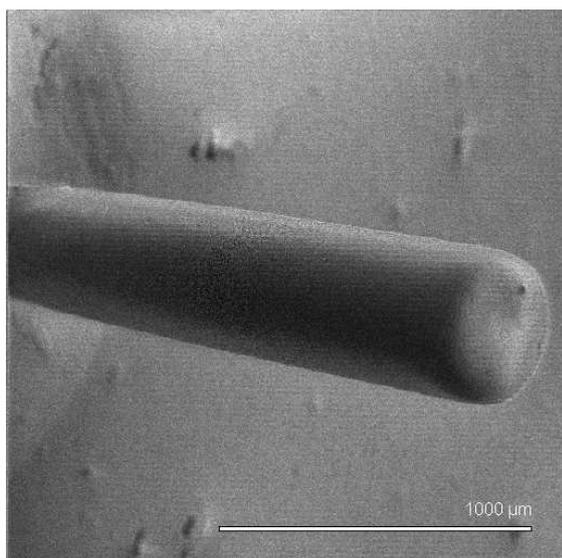


Рис.4. Микрофотография «свидетеля» до нанесения слоя наночастиц висмута

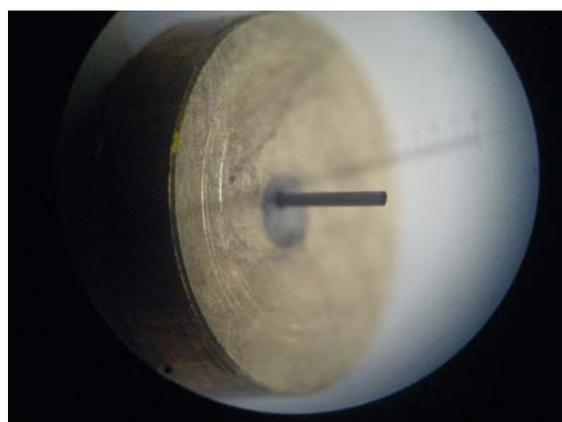


Рис. 5. Вид «свидетеля» после нанесения слоя, СЭМ, масштаб 1000 мкм

плотностью около 100 мг/см^3 . Технология изготовления малоплотного висмута в виде металлического снега описана в работе [9]. Малоплотный висмут представлял собой хаотически расположенные цепочки из наночастиц со средним расстоянием между цепочками около 3 мкм (см рис 2). Малоплотный висмут удерживался тонкой (0.2 мкм) полимерной пленкой, крепившейся к медному кольцу толщиной 0.1 мм с внешним диаметром 8 мм и внутренним отверстием 2.5 мм. Толщины

малоплотных висмутовых мишеней были от 20 мкм до 120 мкм. Погонную массу (в мг/см^2) слоя из наночастиц висмута измеряли методом рентгеновской микрорадиографии при сравнении с данными эталонов – слоев металлического висмута толщиной 0.25, 0.50, 1.0, 2.0 и 3.0 мкм.

Были получены результаты 56 выстрелов по малоплотным мишеням и 20 выстрелов по полированному висмуту и 17 выстрелов по неполированному висмуту.

Для измерения толщины и плотности слоя малоплотного металла было предложено расположить в технологической установке рядом мишенями «свидетели» - вертикально стоящие на латунных шайбах стержни из материала слабо поглощающего рентгеновское излучение (см. рис. 4 и 5).

В качестве таких стержней («свидетелей») были выбраны графитовые стержни цанговых карандашей стержней с диаметром 0.3, 0.5 и 0.7 мм, верхняя площадка которых тщательно полировалась для получения строго горизонтальной поверхности. Таким образом, получались рабочие мишени и

образцы, на которых уже можно было оценить толщину и плотность слоя по картинкам, сделанным при облучении рентгеновским излучением сбоку.

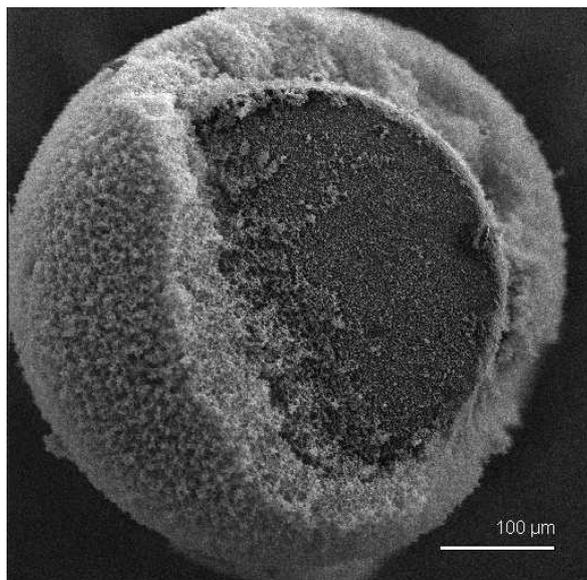


Рис. 6. Разрез слоя на верхней площадке «свидетеля» по высоте, масштаб 100 мкм

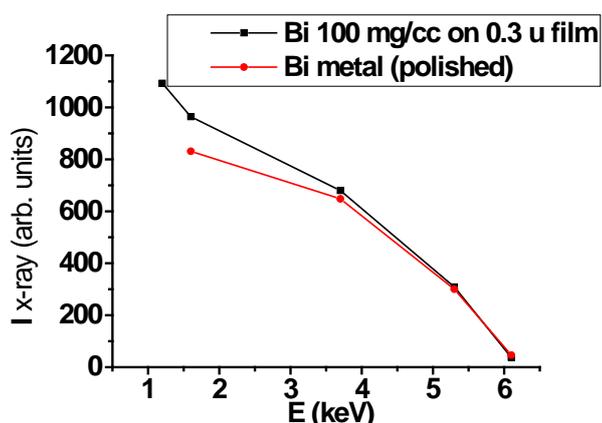


Рис. 7. Зависимость интенсивности рентгеновского излучения от энергии обрезания фильтра: 1 – порошок, 2 - металл

сравнению с толщинами создаваемых нами слоев на лазерных мишенях (40-120 мкм).

Для обработки рентгеновских изображений была разработана программа [11], которая позволила установить то, что плотность слоя плавно уменьшается снизу вверх от 120 мг/см^3 до 70 мг/см^3 .

Для получения рентгеновских изображений «свидетелей» применялся компьютерный рентгеновский микротомограф типа ScyScan 1070 [10]. Программное обеспечение прибора не позволяет получить какие-либо дополнительные сведения об образце, кроме его объемного изображения с местом размещения дефектов или полостей на экране монитора компьютера. Для определения линейных размеров, т.е. геометрических характеристик исследуемого образца надо обрабатывать вручную выдаваемые прибором таблицы данных интенсивностей в каждом пикселе камеры (в Excel).

Основная трудность измерения плотности тонких малоплотных слоев на рентгеновском микротомографе заключалась в том, что его пространственное разрешение, определяемое размером пикселя CCD-камеры $20.5 \times 20.5 \text{ мкм}$, мало по

3. Обсуждение результатов

Полученные данные рентгеновских датчиков для каждого лазерного выстрела нормировались на энергию во вспышке (приводя к одинаковой энергии лазерного импульса 10 Дж). Зависимости данных от погонной массы мишени мы не обнаружили. Поэтому далее мы приводим средние значения для мишеней из наночастиц висмута и металлического висмута (см. рис. 7). Влияние подложки (рис.8) для малоплотного висмута не обнаружено. Различия в результатах для полированного и неполированного висмута не найдено.

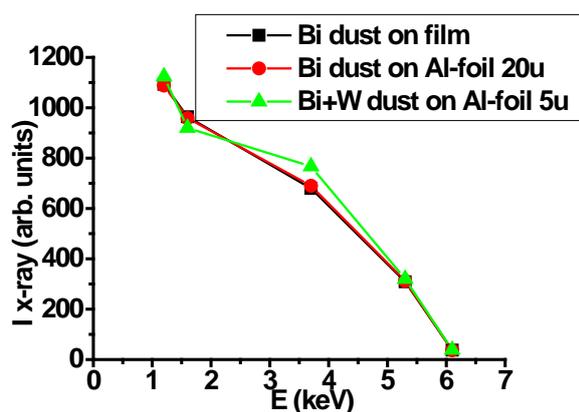


Рис. 8. Зависимость интенсивности рентгеновского излучения от энергии обрезания фильтра для порошковой мишени с разной основой: 1 – полимерная пленка толщиной 0.3 мкм, 2 - Al-фольга толщиной 20 мкм, 3 – Bi+W порошок на Al-фольге 5 мкм

измерения пропускания лазерной энергии сквозь плазму из малоплотного висмута, показавшие отсутствие пропускания.

По полученным тенеграммам в 2 разных момента времени для излучения длиной волны 0.536 мкм (см. рис. 9-14) оценивалась однородность короны и скорость разлета плазмы в сторону падающего лазерного излучения от мишеней из малоплотного и металлического висмута.

Усреднение по заметному числу вспышек позволило утверждать, что данные для малоплотного висмута имеют среднюю относительную ошибку измерений 2%, а для металлического висмута 4%.

Общий вывод заключается в том, что интенсивность рентгеновского излучения от мишени с наночастицами висмута выше на 10% чем от мишени из металлического висмута. Причем превышение характерно для мягкой части спектра рентгеновского излучения.

Параллельно с рентгеновскими измерениями были выполнены

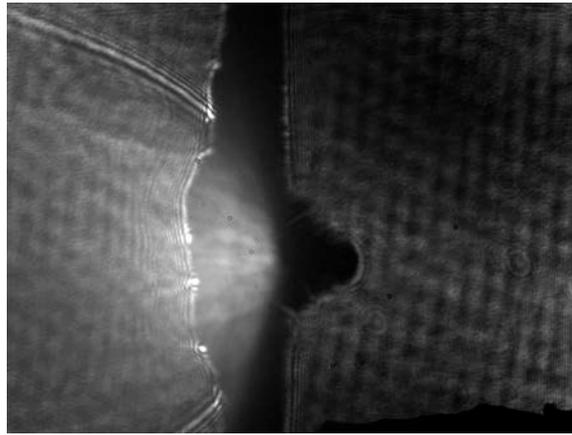
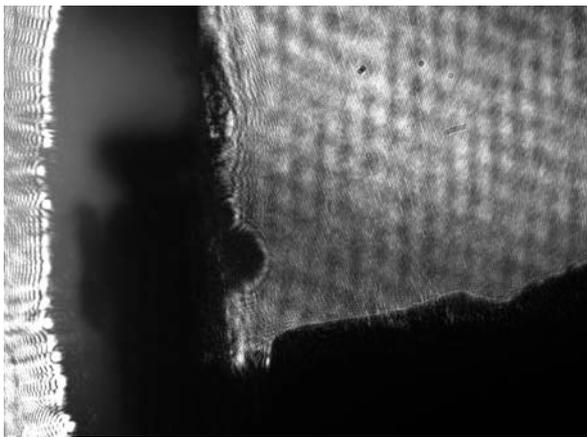


Рис. 9. Теневые картины движения плазмы из слоя наночастиц висмута толщиной 30 мкм и плотностью 80 мг/см³ на пластике толщиной 0.5 мкм, время задержки 4.8 нс и 8.3 нс, $E_L=10.85$ Дж

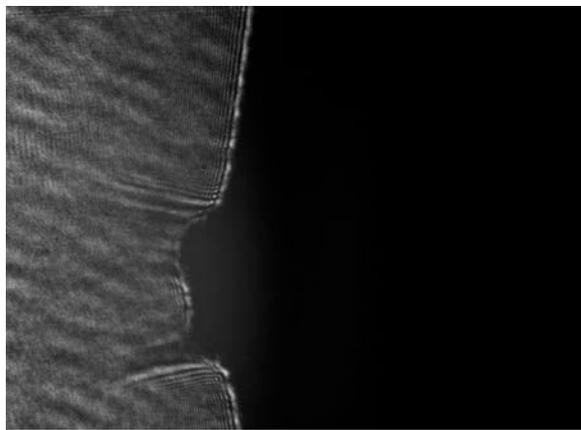
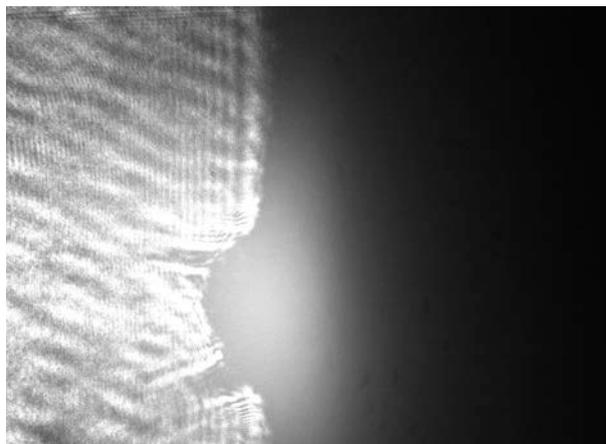


Рис. 10. Теневая картина короны от висмута с плотностью 100 мг/см³ и толщиной 100мкм. Энергия лазера 9.5 Дж. Задержка 8.3 нс.

Рис. 11. Теневая картина короны от полированного висмута с плотностью 8.9 г/см³. Энергия лазера 9.5 Дж. Задержка 8.3 нс.



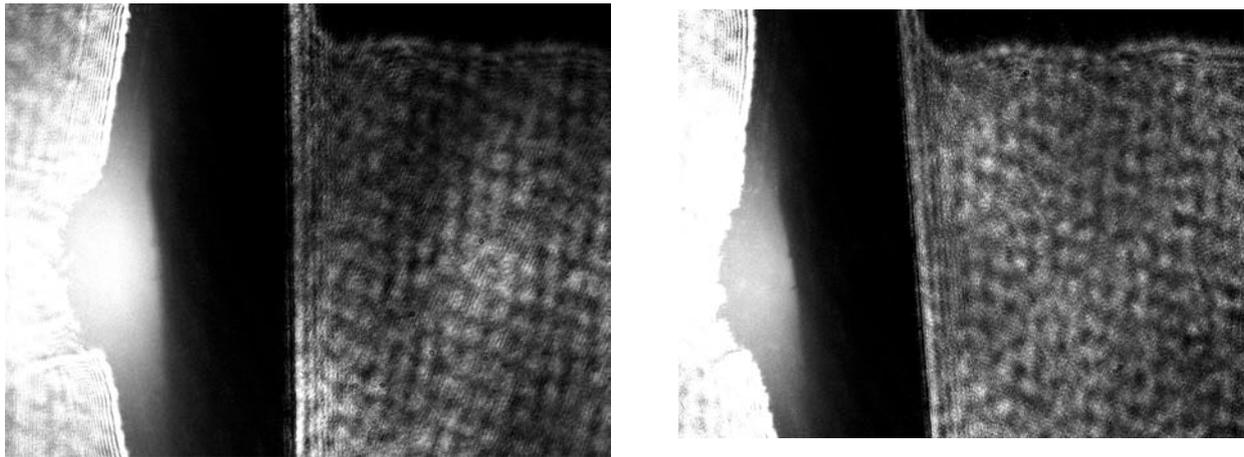


Рис. 13. Теневые картины движения плазмы из слоя наночастиц висмута толщиной 60 мкм и плотностью 100 мг/см³, время 2.92 нс и 6.28 нс $E_L=6.9$ Дж

Заметно на теневых картинах, что корона из малоплотного висмута быстрее расширяется, чем корона от металла (рис. 11 и 12). Различие картин от полированного и неполированного висмута не существенное.

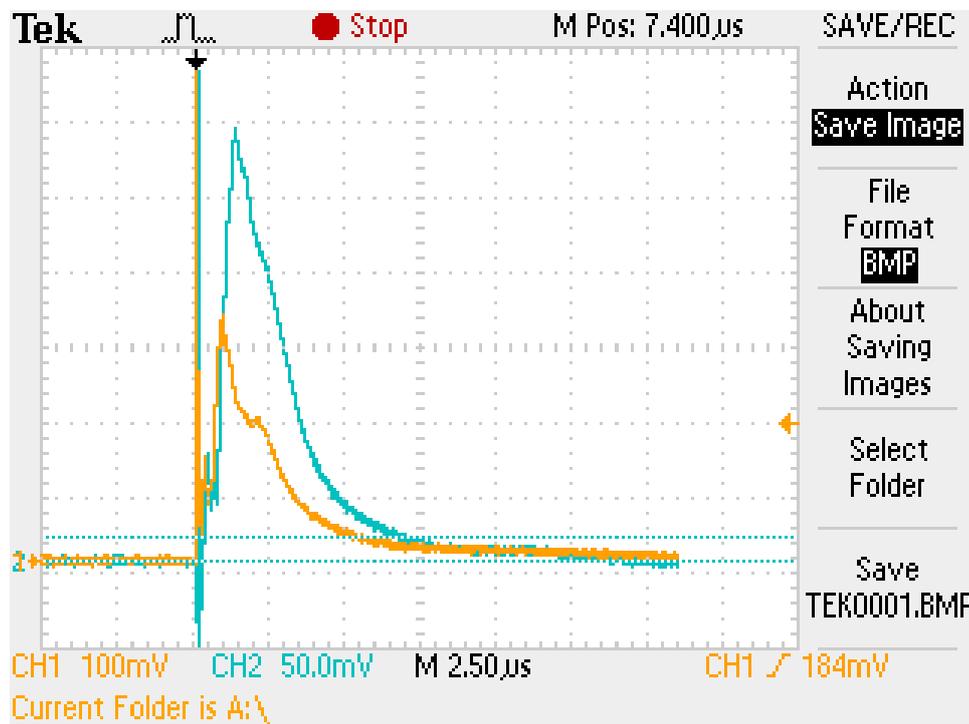


Рис.14. Данные ионного коллектора для мишени из висмута с плотностью 80 мг/см^3 толщиной 40 мкм и Al-фольги толщиной 5 мкм. Выстрел №2 от 26.07.10. Энергия 7.89 Дж. CH1 – канал с тыльной стороны мишени, CH2 – канал с лицевой стороны мишени под углом 45° к поверхности мишени

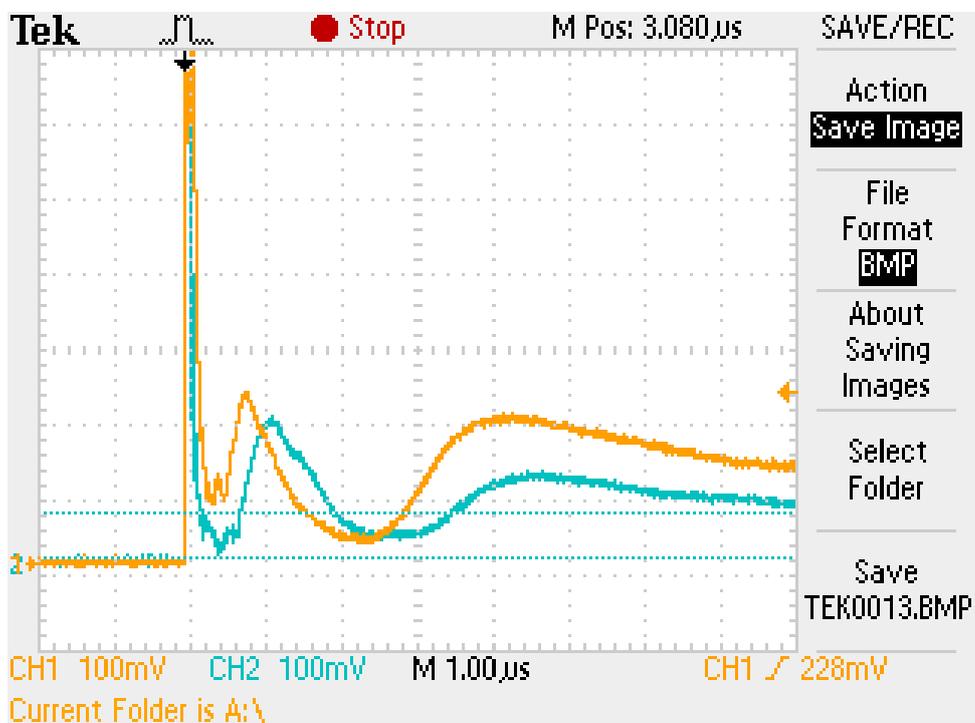


Рис.15. Данные ионного коллектора для мишени из висмута с плотностью 80 мг/см^3 толщиной и Al-фольги толщиной 5 мкм. Выстрел №14 от 28.07.10. Энергия 10.1 Дж. CH1 – канал с тыльной стороны мишени, CH2 – канал с лицевой стороны мишени под углом 45° к поверхности мишени

4. Заключение

Экспериментальные исследования конверсии лазерного излучения с длиной волны 1.056 мкм и интенсивностью 10^{14} Вт/см^2 при длительности импульса 0.5 нс и энергии около 15 Дж в рентгеновское излучение на металлическом и малоплотном (0.1 г/см^3) висмуте показали, что коэффициент конверсии увеличивается на 10%, а спектр рентгеновского излучения становится мягче.

Оптические датчики, фиксирующие пропускание лазерной энергии сквозь мишень, давали результаты близкие к фону. Пропускание сквозь малоплотный висмут с плотностью около 100 мг/см^3 отсутствует.

Тенеграммы показывают более широкий факел короны от мишени из малоплотного висмута по сравнению с металлическим висмутом.

Данные ионных коллекторов свидетельствуют о том, что быстрые ионы от металлического висмута обладают в 2-3 раза большей энергией, чем ионы от малоплотного висмута.

Работа, инициированная Н.Г. Борисенко, выполнена на лазерной установке в Центре атомных исследований им. Баба в Индии на мишенях, изготовленных в ФИАН. Исследования проводились по проекту А3.43 программы межакадемического сотрудничества ILTP.

Литература

1. A. E. Bugrov, I. N. Burdonskiy, V. V. Gavrilov, *et al.*, *Zh. Eksp. Teor. Fiz.*, **111**, 903–918 (1997)
2. L. Ge, K. Nagai, T. Norimatsu *et al.* A New Method to prepare Minimum-Mass tin EUV targets. // *Journal of Physics: Conference Series* (2008) V. 112, 032065
3. S.Yu.Gus'kov, Yu.A.Merkul'ev. Effective laser absorber – converter to x-ray. // *Quantum Electronics*. (Russian) 2001, т. 31, №4, pp. 311-317.
4. M.D. Rosen and J.H. Hammer. Analytic expressions for optimal inertial-confinement-fusion wall density and wall loss. *Phys. Rev.* (2005), **E 72**, 056403, 5 p.
5. P.E. Young, M.D. Rosen, J.H. Hammer, W.S. Hsing, S.G. Glendinning, R.E. Turner, R. Kirkwood, J. Schein, C. Sorce, J.H. Satcher Jr., A. Hamsa, R.A. Reibold, R. Hibbard, O. Landen, A. Reighard, S. McAlpin, M. Stevenson, B. Thomas. Demonstration of the Density Dependence of X-Ray Flux in a Laser-Driven Hohlraum. *Phys. Rev. Let.* (2008), **101**, 035001, 4 p.
6. O.N. Rosmej, V. Bagnoud, U. Eisenbarth, *et al.* Heating of low-density CHO-foam layers by means of soft X-rays. // *Nuclear Instr. & Methods in Phys. Research A*. (2011) (in press)
7. N.G. Borisenko, I.V. Akimova, A.I. Gromov, A.M. Khalenkov, Yu.A. Merkuliev, V.N. Kondrashov, J. Limpouch, V.G.Pimenov, The influence of underdense

- polymer target with/without high-Z nanoparticles on laser radiation absorption and energy transport. // *Journal de Physique IV (France)*, June 2006, Vol. 133, pp. 305-308.
8. N. G. Borisenko, S. Chaurasia, S. Tripathi, D. S. Munda, N. K. Gupta, L. J. Dhareshwar, and V. G. Pimenov, *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*. (in press).
 9. D.A. Callahan, M.C. Herrmann and M. Tabak. Progress in heavy ion target capsule and hohlraum design. // *Laser and particle beams*. (2002), V. 20, pp. 405-410.
 10. N. G. Borisenko, A. A. Akunets, A. M. Khalenkov, D. Klir, V. Kmetik, E. Krousky, J. Limpouch, K. Masek, Yu. A. Merkuliev, M. Pfeifer, V. G. Pimenov, and J. Ullschmied, *J. Russ. Laser Research*, **28(6)**, 500–518 (2007).
 11. J. Limpouch, P. Adamek, N. G. Borisenko, N. N. Demchenko, T. Kapin, M. Kalal, A. M. Khalenkov, D. Klir, V. Kmetik, E. Krousky, M. Kucharik, R. Liska, K. Masek, W. Nazarov, M. Pfeifer, M. Sinor, and J. Ullschmied, in: *33rd EPS Conference on Plasma Physics*, Rome 19–23 June 2006, ECA **30I**, P-5.001 (2006).
 12. C. Labaune, S. Depierreux, D. T. Michel, M. Grech, P. Nicolai, C. Stenz, V. T. Tikhonchuk, S. Weber, C. Riconda, N. G. Borisenko, W. Nazarov, S. Huller, D. Pesme, J. Limpouch, P. Loiseau, G. Raizuelo, M. Casanova, C. Meyer, P. Di-Nicola, R. Wrobel, E. Alozy, P. Romary, G. Thiell, G. Soullie, C. Reverdin, and B. Villette, in: *35th EPS Conference on Plasma Physics*, Hersonissos 9–13 June 2008, ECA **32D**, O-2.013 (2008).
 13. S. Depierreux, C. Labaune, D. T. Michel, V. T. Tikhonchuk, V. Tassin, C. Stenz, N. G. Borisenko, W. Nazarov, M. Grech, S. Huller, J. Limpouch, P. Loiseau, P. Nicolai, D. Pesme, W. Rozmus, C. Meyer, P. Di-Nicola, R. Wrobel, E. Alozy, P. Romary, G. Thiell, G. Soullie, C. Reverdin, B. Villette, M. Rabec-le-Gloahec, and C. Godinho, *IFSA 2007, Journal of Physics: Conference Series*, **112**, 022041 (2009).
 14. S. Depierreux, C. Labaune, D. T. Michel, C. Stenz, P. Nicolai, M. Grech, G. Raizuelo, S. Weber, V. T. Tikhonchuk, P. Loiseau, N. G. Borisenko, W. Nazarov, S. Huller, D. Pesme, M. Casanova, J. Limpouch, C. Meyer, P. Di-Nicola, R. Wrobel, E. Alozy, P. Romary, G. Thiell, G. Soullie, C. Reverdin, and B. Villette, *Phys. Rev. Lett.*, **102**, 195005 (2009).

15. J. Limpouch, N. G. Borisenko, N. N. Demchenko, S. Yu. Gus'kov, M. Kalal, A. Kasperczuk, *et al.*, in: *32nd EPS Conference on Plasma Physics*, Tarragona, 27 June – 1 July 2005, ECA Vol. 29C, O-2.022 (2005).
16. A. M. Khalenkov, N. G. Borisenko, V. N. Kondrashov, J. Limpouch, Yu. A. Merkuliev, and V. G. Pimenov, *Laser Particle Beams*, **24**, 283–290 (2006).
17. N. G. Borisenko, I. V. Akimova, A. I. Gromov, A. M. Khalenkov, V. N. Kondrashov, J. Limpouch, E. Krousky, J. Kuba, K. Masek, Yu. A. Merkuliev, W. Nazarov, and V. G. Pimenov, *Fusion Sci. Technol.*, **49(4)**, 676–685 (2006).
18. I. A. Artyukov, N. G. Borisenko, A. V. Vinogradov, Yu. S. Kasyanov, V. G. Pimenov, R. M. Feshchenko, and A. M. Kholenkov, *Kratk. Soobsh. Fiz. FIAN*, **4**, 46–51 (2006).
19. N. G. Borisenko, A. M. Khalenkov, V. Kmetik, J. Limpouch, Yu. A. Merkuliev, and V. G. Pimenov, *Fusion Sci. Technol.*, **51**, 655–664 (2007).