

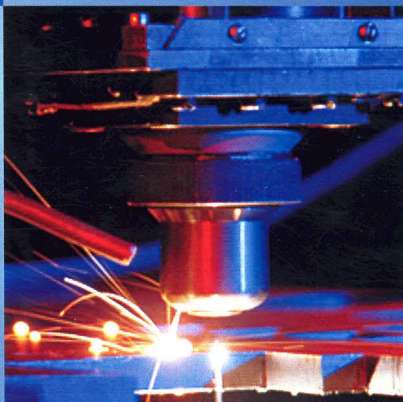
B386
B.40



**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВЫСОКОКОНЦЕНТРИРОВАННЫХ
ПОТОКОВ ЭНЕРГИИ С МАТЕРИАЛАМИ
В ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ И МЕДИЦИНЕ**

**Доклады
VI ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
Том I**

**Новосибирск, Россия
24 – 27 марта 2015 г.**



**Новосибирск
Параллель
2015**

ДАР ИТПМ им. С.А.Христиановича

B386
B.40

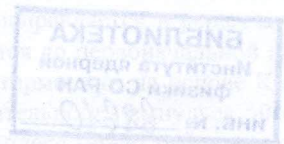
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича Сибирского отделения РАН

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВЫСОКОКОНЦЕНТРИРОВАННЫХ
ПОТОКОВ ЭНЕРГИИ С МАТЕРИАЛАМИ
В ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ И МЕДИЦИНЕ**

**Доклады
VI ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

Том I

*Новосибирск, Россия
24 – 27 марта 2015 г.*



**Новосибирск
Параллель
2015**



Проект организации и проведения VI Всероссийской конференции с приглашением иностранных участников «Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине» (Грант РФФИ № 15-08-20071 Г)

В сборник вошли доклады, представленные на VI Всероссийской конференции «Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине». На конференции обсуждались вопросы по исследованию и созданию лазеров и лазерных систем, по методам улучшения их характеристик, по исследованию физических и химических процессов при лазерном, импульсном и плазменном разряде. Широкий круг докладов посвящён практическому применению лазеров в научных исследованиях и технологических процессах, плазмохимическим технологиям переработки материалов, методам объёмного и поверхностного модифицирования с использованием порошковых материалов и аддитивным технологиям, а также вопросам исследования и оптимизации параметров плазматронов. Отдельная секция посвящена применению лазеров, плазмы и компьютерной томографии в медицине.

Материалы конференции издаются в авторской редакции



РАСПРОСТРАНЕНИЕ МОЩНОГО ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В КАПИЛЛЯРНОМ МЕТАЛЛИЧЕСКОМ ВОЛНОВОДЕ

К.В. Губин¹, В.И. Трунов¹, В.Е. Лещенко¹, К.В. Лотов², Е.В. Пестряков¹

¹Институт лазерной физики СО РАН, 630090, Новосибирск, Россия

²Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН
630090, Новосибирск, Россия

В настоящее время в мире одним из наиболее развиваемых применений мощных лазерных систем является технология лазерного кильватерного ускорения, которая рассматривается как перспективный путь к созданию компактных ускорителей заряженных частиц [1]. Одним из важных достоинств метода является высокий темп ускорения заряженных частиц (до 100 ГэВ/м по сравнению с ~ 100 МэВ/м в традиционных ускорителях), позволяющий на коротких дистанциях получать сгустки электронов с ультрарелятивистскими энергиями. При использовании сфокусированных пучков характерное расстояние, на котором происходит взаимодействие лазерного импульса с плазмой, определяется длиной Рэлея, которая ограничивает максимальную энергию ускоренных электронов. Один из способов подавления дифракционной расходимости состоит в использовании плазменного волноводного канала. В таких экспериментах используется диэлектрический капилляр, в который напускается газ и зажигается разряд. Наибольшая достигнутая энергия электронного пучка на сегодня составляет 4.2 ГэВ в капилляре длиной 9 см [2]. Другая идея, предложенная в работах [3, 4], нацелена на продвижение вверх по энергии при ограниченном энергозапасе лазерного импульса. Она состоит в подавлении дифракционной расходимости излучения узким металлическим капилляром. При этом предполагается, что, в отличие от диэлектрических волноводов, образованная в пристеночной области плазма высокой плотности будет приводить к каналированию лазерного излучения. В центральной части капилляра, в плазме с низкой плотностью, будет возникать кильватерная волна и происходить ускорение заряженных частиц (рис. 1).

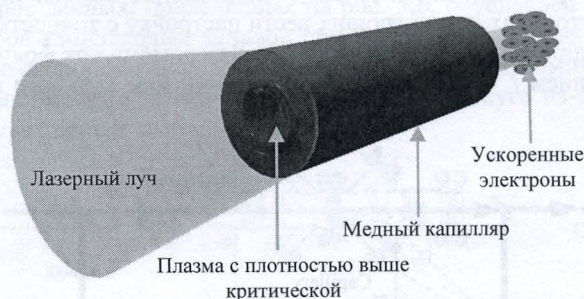


Рис. 1. Схема эксперимента по лазерному кильватерному ускорению с каналированием лазерного импульса в узком металлическом капилляре.

Распространение фемтосекундного излучения в металлическом волноводе

Для реализации предложенной схемы на первом этапе была разработана технология создания металлических капилляров из меди и бронзы (которые, согласно расчетам, должны иметь поперечный размер 40-50 мкм при длине несколько см) и исследованы

особенности прохождения через них мощных фемтосекундных (фс) лазерных импульсов.

Капиллярные каналы не “сверлятся”, а прорезаются на одной из хорошо отполированных половинок капиллярного узла. При этом волноводы имеют треугольную форму. В разработанной конструкции также имеется принципиальная возможность создания газонапускных каналов с целью формирования в капилляре необходимого продольного профиля газа и плазмы. Первоначальный выбор меди как материала для капилляра был обусловлен ее высокой проводимостью и доступностью данных о ее свойствах. Были изготовлены и протестированы капиллярные сборки с размерами каналов от 40 до 100 мкм. На рис. 2 представлен внешний вид одной из сборок и пространственный профиль прошедшего через такой волновод излучения длительностью 40 фс (830 нм) с энергией 2 мДж (пропускание 55%). В каждой сборке прорезаются несколько (до 10) каналов.

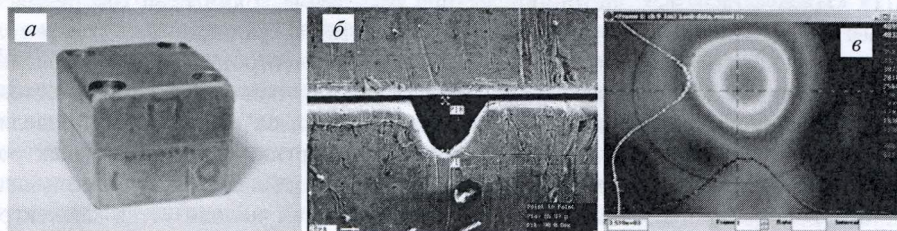


Рис. 2. Капиллярная сборка (а), входной торец капиллярного канала под микроскопом (высота треугольного профиля 56 мкм) (б) и профиль прошедшего фс-излучения (в).

Экспериментальное исследование эффективности прохождения фемтосекундных импульсов через металлические капилляры выполнялось с использованием излучения мощной лазерной системы, развиваемой в ИЛФ СО РАН. Двухканальная лазерная система создана на основе параметрического усиления фс импульсов в кристаллах β -BaV₂O₄ (ВВО) и LiB₃O₅ (LBO) при пикосекундной накачке и работает в частотном режиме (10 Гц) с энергией более 100 мДж в каждом канале при длительности импульсов ~20 фс [5].

Капиллярная сборка размещалась в вакуумной камере, закрепленной на прецизионных юстировочных столиках, позволяющих вести настройку с точностью ~5 мкм по пространственным координатам и ~0.5° по угловым. Лазерный пучок фокусировался линзой с фокусным расстоянием $f=380$ мм до размеров 35-40 мкм (диаметр по e^{-2}) на входе в капилляр (рис. 3).

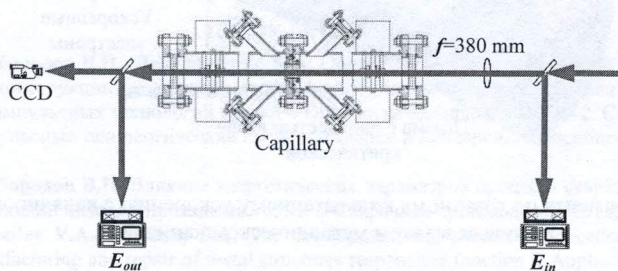


Рис. 3. Схема экспериментальной установки.

В экспериментах регистрировались энергии падающего (E_{in}) и прошедшего (E_{out}) через капилляр импульсов и пространственный профиль прошедшего излучения на расстоянии 680 мм от выхода капилляра (CCD камерой). Энергия лазерного импульса варьировалась в диапазоне 1-80 мДж (мощность в импульсе до 4 ТВт, пиковая плотность

энергии в импульсе до 1200 Дж/см^2). Измерения велись в двух режимах: «одиночном» и «частотном». «Одиночный» режим представлял собой серии по 8-10 импульсов с частотой 10 Гц, при котором каждая серия имела свою входную энергию лазерного импульса. Измерения в частотном режиме выполнялись с частотой 10 Гц при фиксированной входной энергии до примерно десятикратного снижения коэффициента прохождения фс-излучения.

Для всех капилляров при всех режимах не наблюдалось плазменного перекрытия входа каналов, что объясняется высоким контрастом лазерных импульсов [5].

При распространении в капиллярах фс-излучения с начальной энергией до 60 мДж на выходе капилляра достигнут одномодовый режим прохождения (рис. 4), параметры которого слабо изменялись при варьировании энергии импульсов на входе.

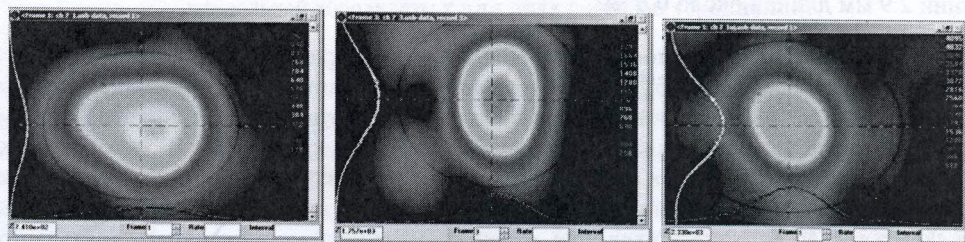


Рис. 4. Профиль прошедшего излучения через один и тот же капилляр при различных значениях энергии импульсов на входе: слева – 60 мДж, в центре – 40 мДж, справа – 15 мДж.

При этом в экспериментах наблюдалось систематическое падение коэффициента пропускания с увеличением энергии импульсов на входе в волновод. Для всех каналов коэффициент пропускания в «одиночном» режиме падал с 45-55% при энергии импульса 2-10 мДж до 10-15% при энергии импульса ~ 80 мДж. Представленные на рис. 5 зависимости для ряда каналов имеют линейный характер в полулогарифмической шкале и позволяют аппроксимировать область энергий, при которых должно наблюдаться нулевое пропускание. Разброс данных, приведенных на рис. 5,б, обусловлен различиями геометрических параметров капиллярных каналов при изготовлении. Одна из причин падения коэффициента пропускания волновода с увеличением энергии импульсов связана с деградацией пространственного качества пучка в области фокуса из-за проявления нелинейных эффектов в материале линзы.

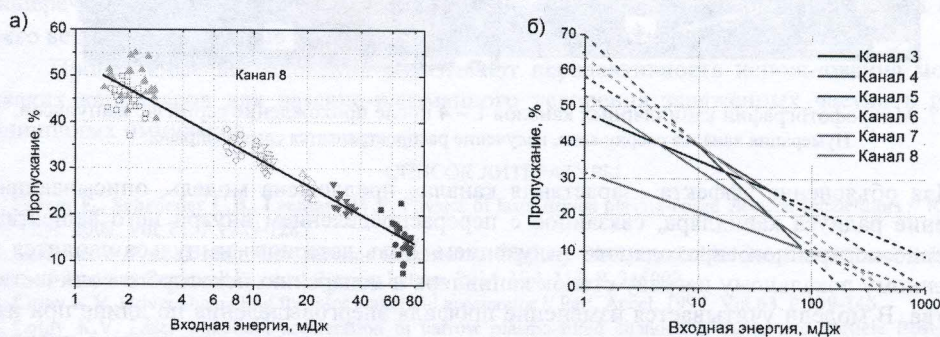


Рис. 5. Зависимость пропускания волновода от входной энергии для разных каналов. а – экспериментальные данные с аппроксимацией для канала 8 сборки, б – расширенная аппроксимация для ряда каналов сборки (сплошные линии – область экспериментальных данных).

При исследованиях в «частотном» режиме наблюдалось существенное падение коэффициента пропускания за характерное количество импульсов от нескольких сотен до нескольких тысяч, зависящее от их энергии на входе волновода (рис. 6). При анализе состояния поверхностей волновода (рис. 7) после прохождения серии импульсов обнаружен эффект «зарастания каналов», приводящий к падению пропускания волноводов. Канал 1 (контрольный) – не облучался. В каналах 2 (входная энергия 30-35 мДж, ~1300 импульсов) и 4 (входная энергия 8-10 мДж, ~3500 импульсов) наблюдалось начало образования двух пробок (метки 1, 4 и 2, 5) на приблизительно одинаковых расстояниях от входа 1.8-1.9 мм и 7.1-7.3 мм соответственно. При этом пропускание снизилось с 30% до 3.5% для канала 2 и с 40% до 4% для канала 4. В канале 3 (входная энергия 35-40 мДж, падение пропускания в 10 раз за ~1300 импульсов) наблюдалась пробка (метка 3) на расстоянии 2.9 мм длиной около 0.8 мм.

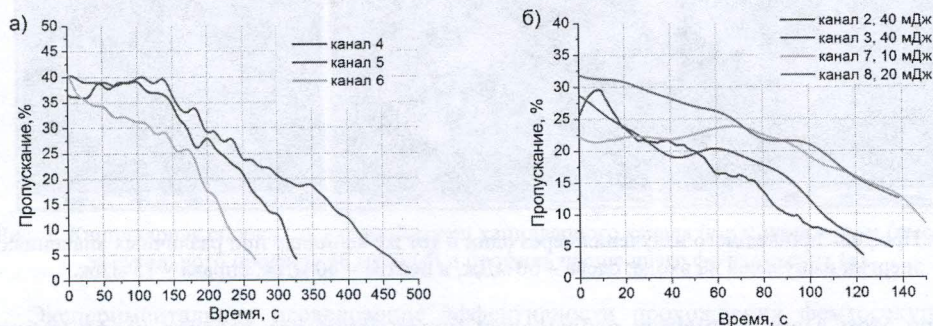


Рис. 6. Зависимость коэффициента пропускания ряда каналов от времени при различных значениях энергии в импульсах.

а – 10 мДж, б – 10-40 мДж.

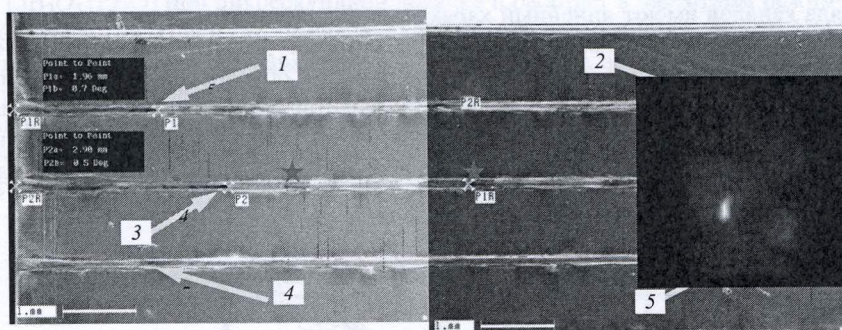


Рис. 7. Микрофотографии капиллярных каналов 1 – 4 после прохождения серии фс импульсов. Нумерация каналов сверху вниз, излучение распространяется слева-направо.

Для объяснения эффекта «зарастания канала» предложена модель, описывающая изменение радиуса капилляра, связанное с перераспределением внутри него вещества, мгновенно испаренного проходящим излучением. Роль лазерного импульса сводится к мгновенному локальному нагреву стенок капилляра и испарению некоторого количества вещества. В модели учитывается изменение профиля энерговыделения по длине при изменении радиуса волновода и перераспределение вещества внутри капилляра в предположении, что количество испаренного вещества пропорционально локально поглощенной погонной мощности.

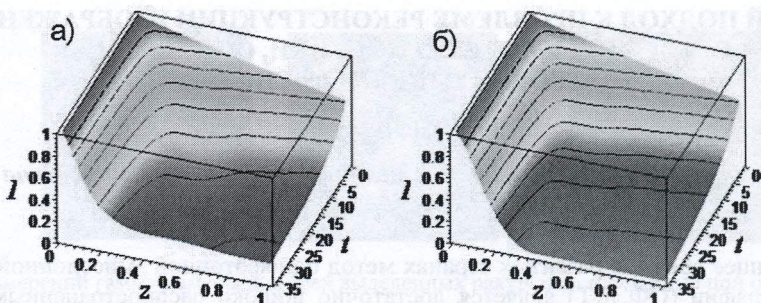


Рис. 8. Качественная зависимость проходящей по капилляру мощности излучения I от времени t и продольной координаты z для двух способов усреднения.

В случае капилляра, закрытого с торцов и остывающего медленно, давление газа выравнивалось бы вдоль капилляра, и количество осевшего вещества было бы пропорционально сечению в этом месте. В случае открытого капилляра, выравнивания давлений не происходит. В модели, предполагающей, что продольный профиль давления не успевает полностью выровняться, а сглаживается только на коротких отрезках с некоторым характерным размером, канал не перекрывается полностью даже при больших временах воздействия. Интенсивность прошедшего сквозь капилляр излучения падает с появлением узкой области (рис. 8,а), но не до нуля. Это связано с предположением одновременности остывания капилляра во всех сечениях. В действительности же, узкие области должны остывать быстрее и вещество из широких областей должно свободно в них проникать и осажаться на стенках. Такому распространению вещества соответствует другой закон усреднения, пропорциональный только локальному энерговыделению. В этом случае с течением времени канал полностью перекрывается (рис. 8,б). Подобная картина качественно согласуется с полученными экспериментальными данными.

Закключение

В работе впервые экспериментально исследованы особенности прохождения через металлические капилляры импульсов длительностью 20-40 фс мультитераваттной мощности. Показана возможность достижения одномодового режима прохождения фемтосекундного излучения с эффективностью до 50% в «одиночном» режиме.

Обнаружен эффект «зарастания» металлического капилляра в частотном режиме, приводящий к снижению его пропускания. Предложена модель, описывающая изменение поперечных размеров капилляра по его длине, связанное с перераспределением внутри него вещества, мгновенно испаренного проходящим излучением.

Проведенные исследования показывают перспективность использования металлических капилляров для лазерно-плазменного ускорения заряженных частиц в режиме одиночных импульсов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Esarey E., Schroeder C.B., Leemans W.P. Physics of laser-driven plasma-based electron accelerators // Rev. Mod. Phys. 2009. Vol. 81. P.1229-1285.
2. Leemans W.P. et al. Multi-GeV Electron Beams from Capillary-Discharge-Guided Subpetawatt Laser Pulses in the Self-Trapping Regime // Physical Review Letters. 2014. Vol. 113. P. 245002.
3. Lotov K.V. Driver channeling for laser wakefield accelerator // Part. Accel. 1999. Vol.63. P.139-146.
4. Lotov K.V. Laser wakefield acceleration in narrow plasma-filled channels // Laser and Particle Beams. 2001. Vol. 19. P. 219-222.
5. Leshchenko V.E., Trunov V.I., Frolov S.A. et. al. Coherent combining of multimillijoule parametric-amplified femtosecond pulses // Laser Physics Letters. 2014. Vol. 11. P. 095301.

54. <i>Тарасенко В.Ф., Ерофеев М.В., Шулепов М.А.</i> Диффузные разряды атмосферного давления, формируемые за счет убегающих электронов, и их применение	248
55. <i>Ульяницкий В.Ю., Батраев И.С., Коваленко А.И., Дудина Д.В., Ломовский О.И.</i> Фазообразование в покрытиях при детонационном напылении металлов в восстановительных условиях	253
56. <i>Федоров А.И., Шиянов Д.В.</i> Оптимизация параметров излучения CuVg-лазера, работающего в режиме сдвоенных импульсов возбуждения	257
57. <i>Филонов А.Г., Шиянов Д.В.</i> Особенности работы двухсекционного лазера на парах бромида меди	262
58. <i>Шоев С.А., Булушев Е.Д.</i> Моделирование микросекундной и наносекундной лазерной 3D микрообработки металлов	265

Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине: Доклады VI Всероссийской конференции. Т. 1. Новосибирск: Параллель, 2015. 274 с.

Ответственный за выпуск В.В. Бублик

Подписано в печать 16.03.2015

Формат бумаги 70 × 100/16, Усл. печ. л. 22.0

Уч.-изд. л. 21.3, Тираж 150 экз., Заказ № 1603-1

Отпечатано в типографии ООО "Параллель"

630090, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1