

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Институт автоматики
и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук
Академик РАН А.М. Шалагин


«11» декабря 2012 г.



Отчет за 2012 г.

По междисциплинарному интеграционному проекту N68

Разработка физических основ микрообработки и структурирования прозрачных материалов излучением мощного фемтосекундного лазера

Организации – исполнители:

Институт автоматики и электрометрии СО РАН
Институт теоретической и прикладной механики СО РАН
Институт вычислительных технологий СО РАН

Научный координатор проекта:
С. А. Бабин, д.ф.-м.н. зав. лаб. ИАиЭ СО РАН

Ученый секретарь проекта:
М. П. Федорук, д.ф.-м.н., проф., зам. директора ИВТ СО РАН

Новосибирск
2012

Цели проекта и план исследований на 2012 г.

В рамках данного проекта предполагается смоделировать, реализовать и оптимизировать схему волоконного лазера с синхронизацией мод, генерирующего фемтосекундные (~ 100 нс) импульсы с большой энергией (≥ 0.1 мкДж) и разработать физические основы технологии формирования объёмных микро- и наноструктур в прозрачных материалах, исследовать свойства этих структур и применить их в практических устройствах фотоники (микро-волноводные лазеры, компоненты для высокоскоростных линий связи, оптоволоконные сенсоры физических параметров и биосенсоры с 3-мерной чувствительностью на основе волоконных, планарных и многосердцевинных волноводов). При этом предполагается выполнить численное моделирование и эксперимент по фс записи брэгговских и длиннопериодных решеток в волноводах с несколькими ядрами (сердцевинами). Кроме того, планируется оптимизировать параметры нано- и пикосекундных волоконных лазеров, имеющих с большой энергией (>1 мДж) в импульсе при высоком качестве пучка и применить их в обработке материалов с высокой точностью и чистотой.

План на 2012 год:

1. Сравнение поглощения фемтосекундного излучения в прозрачных материалах (кварцевое стекло и др.) на основной (1030 нм) и второй (515 нм) гармониках излучения фемтосекундного лазера. Оптимизация процесса записи периодических структур в средах различного типа (волоконных, планарных и многосердцевинных световодах).
2. Создание и программная реализация эффективных численных алгоритмов для математического моделирования (на основе распределенной или дискретной математических моделей лазеров) и оптимизации схем фемтосекундных волоконных лазеров на основе различных элементов пассивной синхронизации мод. Определение областей существования устойчивых одноимпульсных режимов генерации таких лазеров, сравнение с данными экспериментов.
3. Разработка сравнительных критериев применения нано- и пикосекундных волоконных лазеров, имеющих большую энергию (>1 мДж) в импульсе при высоком качестве пучка и мощного импульсно-периодического CO_2 -лазера для высокоточной микрообработки материалов.

РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ В 2012 г.

Моделирование и эксперименты по исследованию фемтосекундной модификации прозрачных материалов

Разработана двумерная (аксиально-симметричная) модель, использующая нелинейные уравнения Максвелла и уравнения гидродинамического типа для плазмы свободных электронов (НУМ) для решения задачи о распространения фемтосекундного лазерного импульса в стекле. Модель учитывает в полной мере частотную дисперсию, нелинейный эффект Керра, генерацию свободных электронов за счет многофотонной ионизации и ионизацию электронным ударом, ускорение свободных электронов полем лазерного излучения, потери энергии излучения на многофотонную ионизацию, рекомбинацию свободных электронов. Нелинейные эффекты приводят к тому, что задача является, строго говоря, трехмерной. Модель позволяет контролировать степень отклонения от аксиальной симметрии.

Создан код реализующий НУМ. В нем используется классическая схема на сдвинутых сетках второго порядка, имеющая точные конечно-разностные аналоги условий $\text{div}B=0$, $\text{div}(\text{rot} A)=0$. Для обеспечения приемлемой точности в уравнениях, описывающих частотную дисперсию, использовалась аппроксимация второго порядка по времени, что сделало алгоритм неявным. Как показали расчеты, при использовании этой схемы величина шага по времени практически не влияет на точность расчетов. Шаг по времени можно брать максимальным, но удовлетворяющим условию Куранта (схема условно устойчива с обычным условием Куранта).

Предусмотрен сдвиг расчетной области со временем вслед за распространяющимся импульсом и уменьшение шага сетки в областях с большими градиентами.

Реализованы выпускающие граничные условия, позволяющие избежать существенного влияния на решение отраженных от границ расчетной области волн. Они выбраны в виде условий равенства нулю инварианта Римана на входящей характеристике, как если бы задача была одномерной, и коэффициент преломления соответствовал бы линейному коэффициенту преломления на несущей частоте. Расчеты показали, что такие граничные условия обеспечивают возможность использовать достаточно маленькую расчетную область.

Проведены методические расчеты, которые позволили выявить параметры конечно-разностной сетки, размеры расчетной области, расстояние от границы входа лазерного импульса до линейного фокуса и т.п. Все эти параметры оказались вполне приемлемыми для проведения массовых физических расчетов.

Проведено сравнение моделей нелинейных уравнений Максвелла и нелинейного уравнения Шредингера. Показано, что хорошее соответствие между этими моделями наблюдается только при малых апертурах (<0.25) и большой

длительности импульса (>100 фс). Таким образом, для наиболее интересных режимов приближение НУШ не применимо.

Проведено сравнение эффективности модификации показателя преломления в кварцевом стекле на основной и удвоенной частоте фемтосекундного лазера (1030/515 нм). Показано, что размеры модифицированной области меньше для основного излучения, а эффективность модификации выше для второй гармоники. Обнаружено, что использование асимметричных импульсов приводит к уменьшению порога модификации по энергии, рис.1, при этом оптимальные параметры асимметричности зависят от энергии импульса.

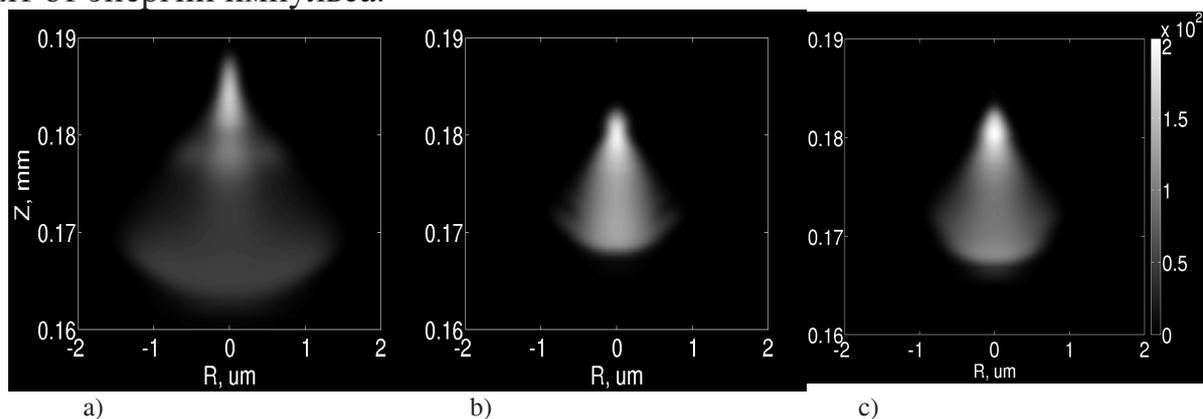


Рис. 1 Распределение плотности плазмы при энергии импульса 115 нДж для различных значений коэффициента дисперсии третьего порядка: а) $TOD = 0$ фс³; б) $TOD = -6 \cdot 10^5$ фс³, в) $TOD = 6 \cdot 10^5$ фс³

Моделирование и эксперименты по созданию мощных фемтосекундных волоконных лазеров

Совместно ИАиЭ и ИВТ СО РАН проведено экспериментальное и теоретическое исследование генерации мощных фемтосекундных импульсов в волоконном лазере с положительной дисперсией резонатора и синхронизацией мод на основе нелинейной эволюции поляризации в режиме сильно-чирпованных диссипативных солитонов. Следствием теоретической модели является линейный рост параметра чирпа, длительности и энергии импульсов с увеличением длины резонатора. В эксперименте линейная зависимость наблюдается только при малых длинах резонатора (рис. 2а). После определённой критической длины резонатора рост энергии импульса (и параметра чирпа соответственно) прекращается, при этом уменьшается диапазон существования устойчивого режима синхронизации мод по мощности накачки. Насыщение по энергии импульса не описывается в рамках использовавшейся ранее скалярной модели, поэтому был проведён прямой численный расчёт с использованием векторной модели с параметрами, близкими к экспериментальным. Результаты расчёта показывают, что существует критическая длина резонатора, после которой происходит насыщение по энергии (рис. 2б) из-за поворота оси эллипса поляризации на большие углы ($\geq \pi/2$), что приводит к разрушению режима. При этом уровень максимально достижимой энергии растёт с уменьшением эллиптичности поляризации, которое ограничено снизу влиянием случайного двулучепреломления.

Предложена составная схема волоконного резонатора (короткий отрезок одномодового волокна для синхронизации мод и длинный отрезок волокна с сохранением поляризации для формирования диссипативного солитона), в которой данный эффект устраняется.

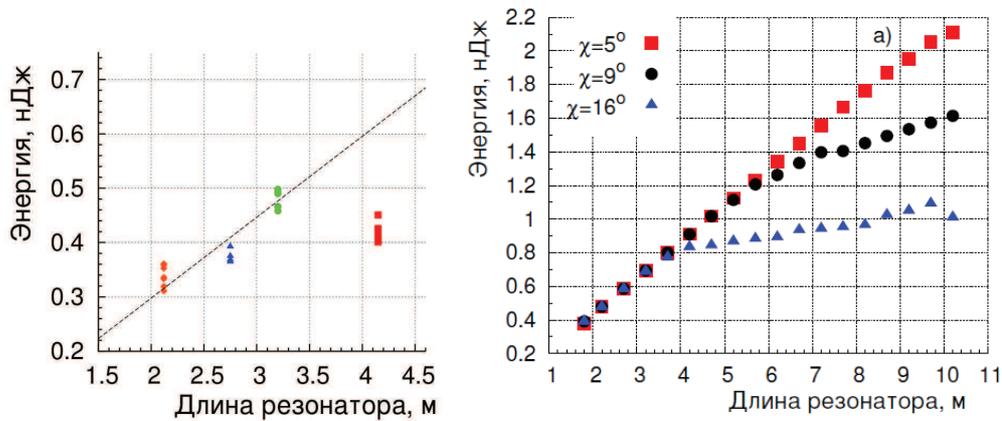


Рис. 2. а) Энергия импульса при различных длинах резонатора и мощностях накачки, б) Расчёт в векторной модели для различных углов поворота пластинки $\lambda/4$.

Реализована новая схема полностью волоконного фемтосекундного лазера с резонатором, состоящим из короткого отрезка стандартного одномодового SM-волокна и длинного PM-волокна с сохранением поляризации, позволяющая разделить эффекты, ответственные за синхронизацию мод и формирование диссипативного солитона. В предложенной схеме экспериментально продемонстрирована возможность масштабирования диссипативного солитона по энергии при удлинении PM-части резонатора за счёт большего chirпования импульса — в полностью волоконном кольцевом резонаторе длиной до 120 м получена стабильная генерация сильно-chirпованных диссипативных солитонов (СЧДС) длительностью 30-70 пс, сжимаемых внешним компрессором до 200-300 фс, т.е. примерно в ~ 200 раз. Установлено, что при увеличении длины резонатора ≥ 30 м рост энергии СЧДС ограничен эффектом ВКР: в резонаторе формируется стоксов импульс, которому передаётся значительная часть энергии СЧДС, но, несмотря на это, режим генерации остаётся стабильным. Пороговая энергия СЧДС в иттербиевом лазере на основе волокна с диаметром сердцевины ~ 5.5 мкм составляет ~ 10 нДж внутри резонатора, при этом максимальная энергия СЧДС на выходе достигает ~ 25 нДж, а форма импульса СЧДС близка к прямоугольной.

Было также проведено численное моделирование солитонного волоконного лазера с управляемой дисперсией. Схема резонатора представлена на рисунке 3. Лазер с линейным резонатором состоит из активного Tm-Но волокна длиной 1,2 м, chirпованной брэгговской решетки с chirпом 130 нм/см, работающей в режиме нормальной дисперсии, полупроводникового зеркала с насыщающимся поглотителем и пассивного волокна переменной длины.

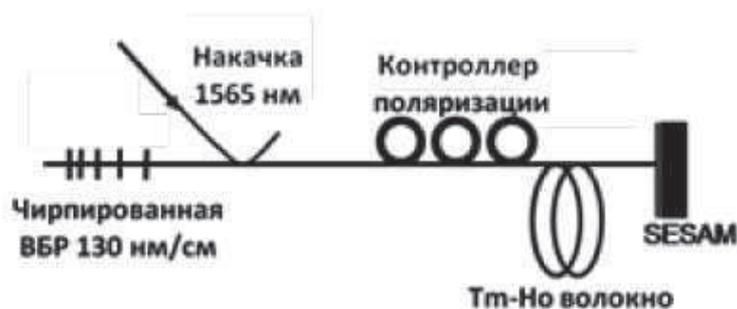


Рисунок 3. Схема резонатора лазера.

При изменении длины пассивного волокна менялась средняя дисперсия резонатора в диапазоне от 0.3 пс^2 до -0.5 пс^2 . Общая длина резонатора варьировалась от 3 до 8.5 м.

Проведено сравнение численных результатов моделирования с экспериментальными данными. На рисунке 4 представлено сравнение экспериментальных и численных спектров импульса и автокорреляционных функций для различных длин резонатора. При этом режимы (a), (b), (c) – режимы с нормальной средней дисперсией, режимы (d) и (e) – с аномальной.

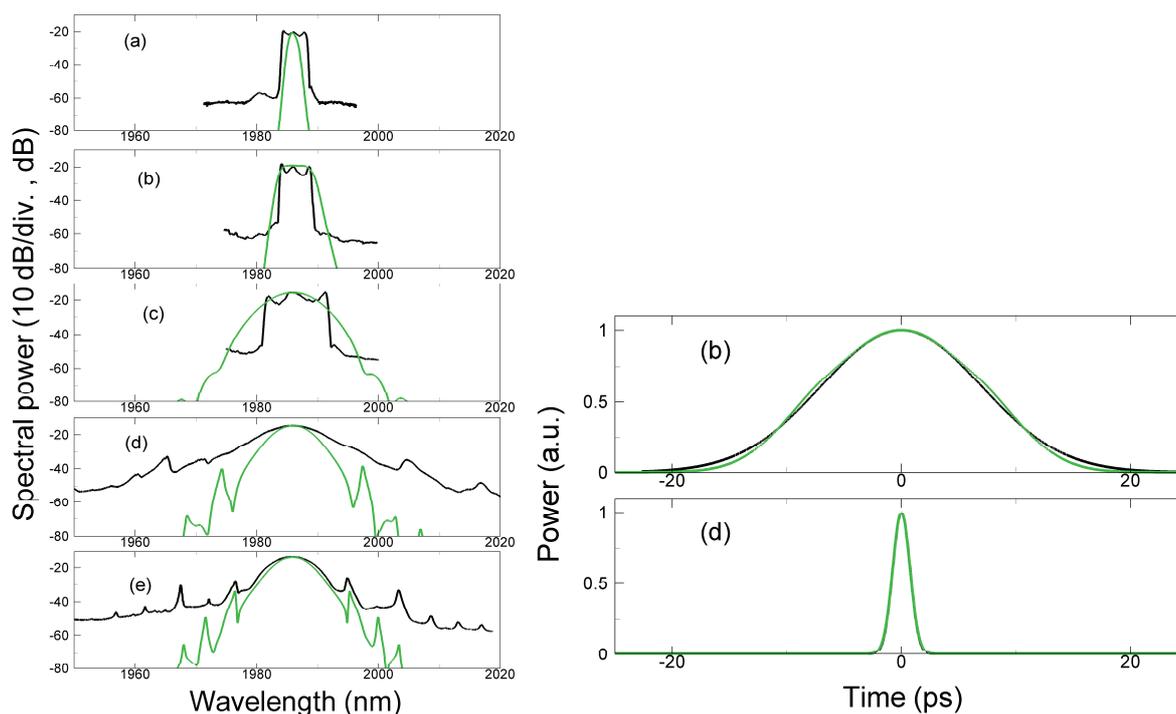


Рисунок 4. Сравнение экспериментальных и численных спектров импульса и автокорреляционных функций для различных длин резонатора.

Была исследована зависимость характеристик выходного импульса от средней дисперсии резонатора. На рисунке 5 приведена зависимость параметров импульса (энергия и ширина спектра) для резонаторов с нормальной (красная линия) и аномальной (черная линия) средней дисперсией. При смене знака средней

дисперсии устойчивые режимы отсутствуют. На приведенном графике наблюдается отклонение от линейной зависимости энергии импульса в районе малых средних дисперсий, что объясняется широким, относительно профиля Лоренцова усиления, спектром, что приводит к меньшему усилению.

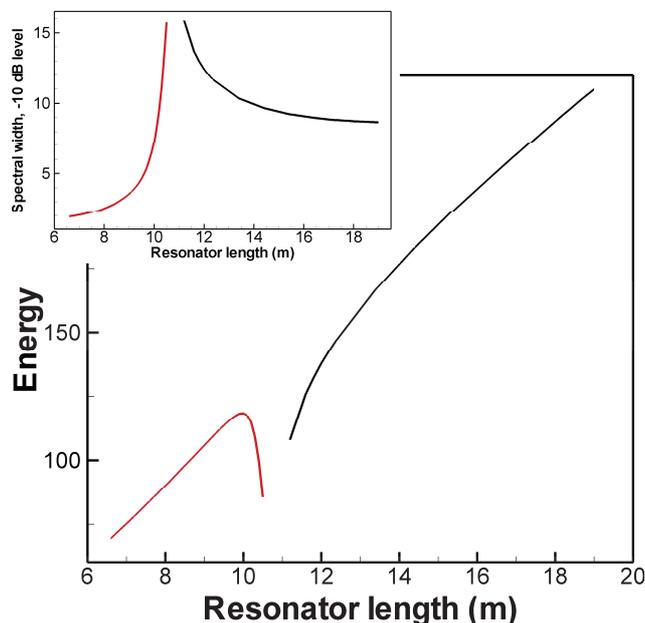


Рисунок 5. Зависимость параметров импульса от длины резонатора.

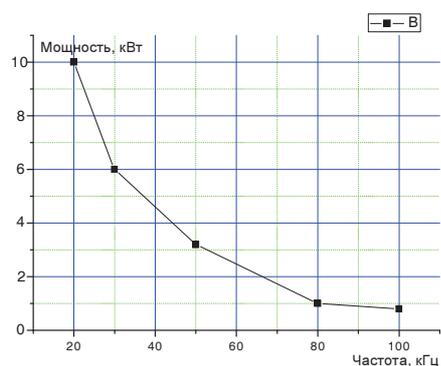
Применения нано- и пикосекундных волоконных лазеров для высокоточной микрообработки материалов

Совместно ИАиЭ и ИТПМ СО РАН проведены испытания экспериментального образца импульсного волоконного иттербиевого лазера для микрообработки поверхности различных материалов при частоте следования импульсов 20-100 кГц, средняя и пиковой мощности 1-11 Вт и 100 Вт- 10 кВт соответственно. Скорость обработки изменялась от 0,5 м/мин до 2,4 м/мин. Измерение результатов воздействия производилось с использованием сканирующего лазерного микроскопа Olympus LEXT OLS3000.

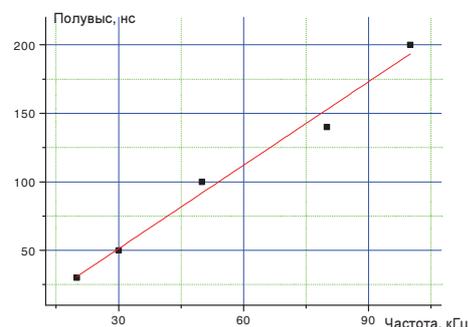
В работе использовались волоконный лазер с модуляцией добротности и длиной волны 1064 нм, разработанный в ИАиЭ СО РАН. Проводилось сравнение с результатами аналогичных экспериментов с CO₂-лазером ИТПМ СО РАН.

Измерены его характеристики:

Зависимость импульсной мощности от частоты



Зависимость длительности импульса на полувысоте от частоты



Основные выводы из этих измерений следующие:

1. При возрастании частоты увеличивается длительность импульса и падает импульсная мощность.
2. Средняя мощность генерации лазера при увеличении частоты возрастает.

Обрабатывались сталь, дюралюминий с химическим покрытием и без покрытия, стекло темное сварочное, стекло прозрачное.

Использовались все допустимые режимы работы лазера как по частоте следования импульсов, так и по току накачки, в плоскости близкой к фокальной а именно:

Частота следования импульсов 20-100 кГц

Средняя мощность 1-11 Вт

Импульсная мощность 100 Вт- 10 кВт

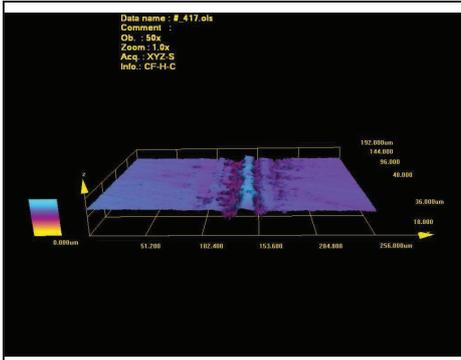
Скорость обработки изменялась от 0,5 м/мин до 2,4 м/мин

Измерение результатов воздействия производилось с использованием сканирующего лазерного микроскопа Olympus LEXT OLS3000.

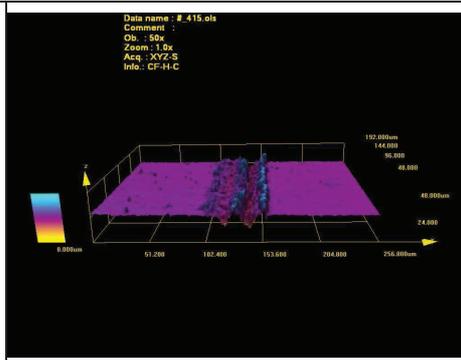
В указанном диапазоне визуально наблюдается изменение структуры материалов при воздействии лазерного излучения. В основном зафиксировано вскипание материала.

Процесса целенаправленного удаления (фрезерования) материала в большинстве случаев не зафиксировано.

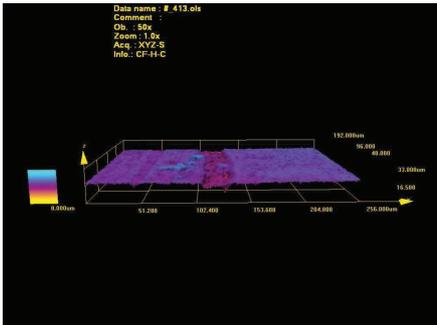
Некоторые фотографии результатов воздействия приведены ниже.



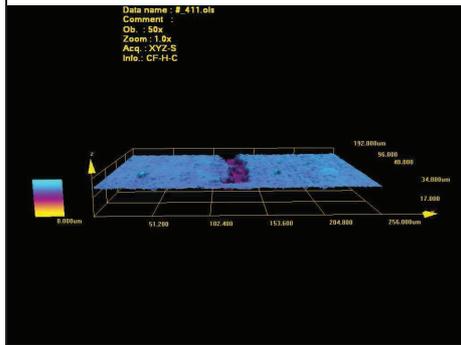
100 кГц сталь Волок. лазер



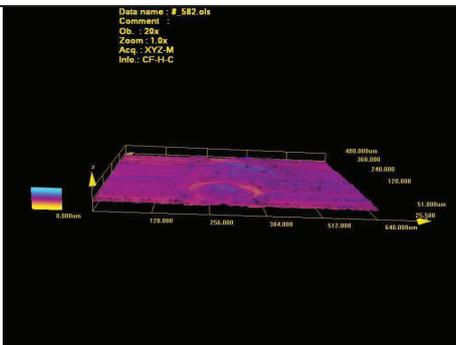
30 кГц сталь Волок. лазер



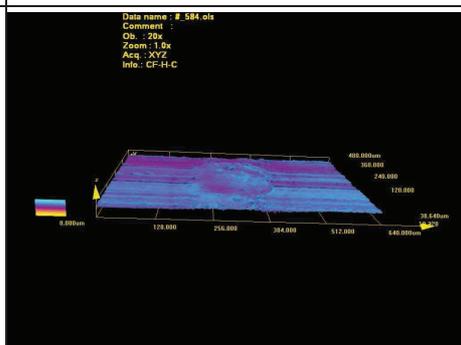
Алюминий 30 кГц Волок. лазер



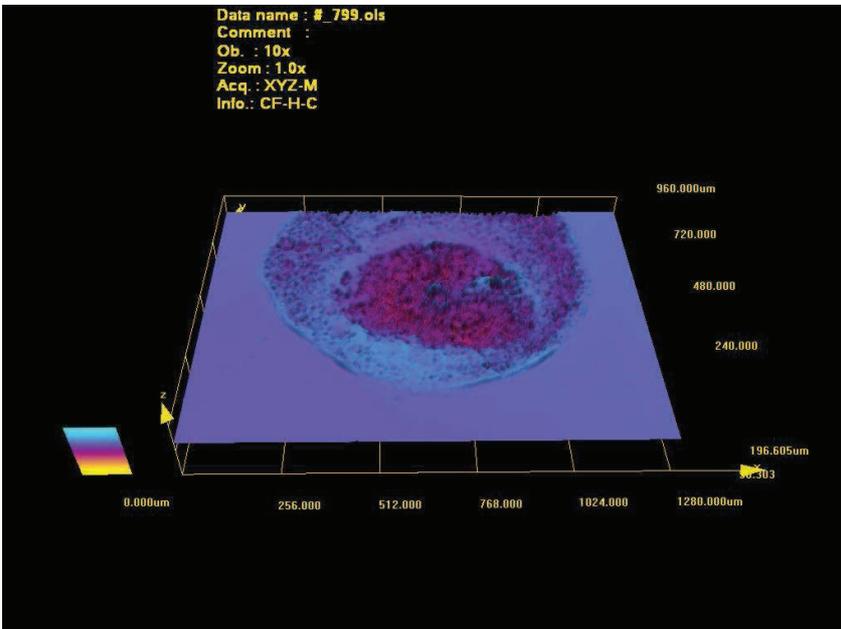
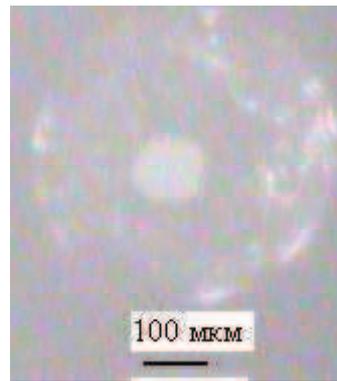
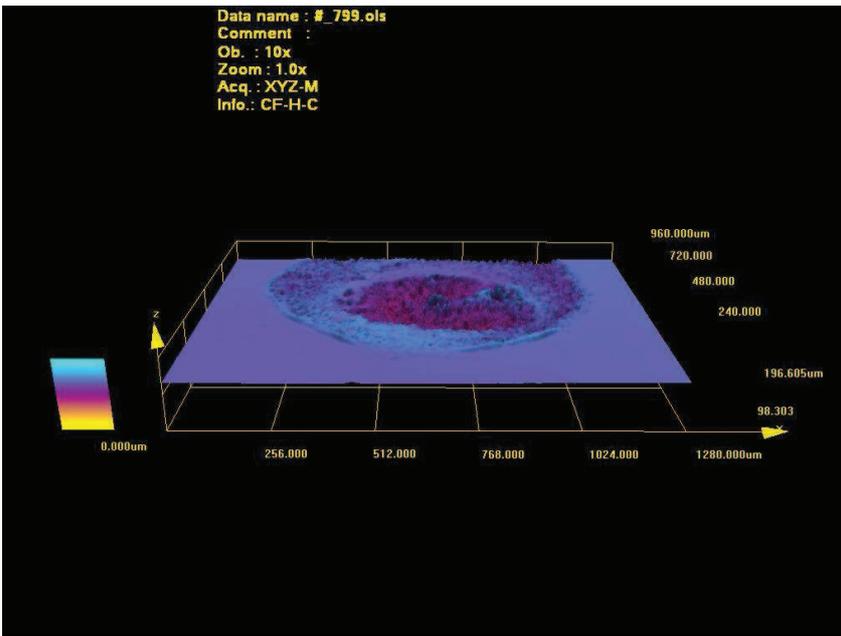
Алюминий 100 кГц Волок. лазер



CO₂ лазер Сталь 80Вт, 50 кГц



CO₂ лазер Сталь 40 Вт 50 кГц



Отверстия в кремнии толщиной 1,5 мм
 CO2 лазер 40 Вт, 50 кГц

Публикации (совместные публикации выделены жирным):

1. A. Dostovalov, S. Babin, M. Dubov, M. Bagegheh, and V. Mezentzev. Comparative numerical study of energy deposition in femtosecond laser microfabrication with fundamental and second harmonics of Yb-doped laser. *Laser Physics*, 2012, Vol. 22, No. 5, pp. 930–936.
2. А.В. Достовалов, А.А. Вольф, С.А. Бабин, М.В. Дубов, В.К. Мезенцев, "Численное исследование влияния временной формы импульса на модификацию плавленого кварца фемтосекундными импульсами", *Квант. электроника*, 2012, **42** (9), 799–804.
3. D. S. Kharenko, E. V. Podivilov, A. A. Apolonski, and S. A. Babin. 20 nJ 200 fs all-fiber highly chirped dissipative soliton oscillator. *Optics Letters*, Vol. 37, Issue 19, pp. 4104-4106 (2012).
4. **D.S. Kharenko, O.V. Shtyrina, I.A. Yarutkina, E.V. Podivilov, M.P. Fedoruk, and S.A. Babin. Generation and scaling of highly-chirped dissipative solitons in an Yb-doped fiber laser. *Laser Phys. Lett.* 9, No. 9, 662–668 (2012).**
5. Харенко Д.С., Бабин С.А., Подивилов Е.В., Штырина О.В., Яруткина И.А., Федорук М.П. Экспериментальная проверка аналитической модели генерации сильночирпованных диссипативный солитонов в волоконном лазере. **Материалы Российского семинара по волоконным лазерам 2012, стр. 117-118, март 2012.**
6. **A. Bednyakova, O. Gorbunov, M. Politko, S. I. Kablukov, S. V. Smirnov, D. V. Churkin, M. Fedoruk, S. K. Turitsyn, S. A. Babin, «Experimental measurement and numerical modelling of narrow-bandwidth Yb-doped fiber laser spectrum and time dynamics», Proc. of the 17th Annual Symposium of the IEEE/LEOS Benelux Chapter, (November 29-30, 2012, Mons, Belgium), Tech. digest, 2102 (4 pages).**
7. Bednyakova A.E., Fedoruk M.P. Spatially cascaded cavities for power saving distributed Raman amplification. *Optics Communications* (принята в печать).
8. Жуков В.П., Н.М. Булгакова, Федорук М.П. Численное моделирование распространения фемтосекундного лазерного импульса в нелинейных средах. *Вычислительные технологии*. 2012. Т. 17. N 4. С. 14-28.
9. **А. Н. Малов, А. М. Оришич, С. А. Бабин, А. Г. Кузнецов. Сравнительные характеристики применения волоконного и CO₂ – лазера для микрообработки материалов.// Материалы Российского семинара по волоконным лазерам 2012 (Новосибирск, 27-30 марта 2012 г.), ИАиЭ СО РАН, 2012, с.141-142.**

АДРЕСНЫЕ ДАННЫЕ НАУЧНОГО КООРДИНАТОРА, ОТВЕТСТВЕННЫХ ИСПОЛНИТЕЛЕЙ БЛОКОВ И УЧЕНОГО СЕКРЕТАРЯ

Бабин Сергей Алексеевич, тел. (383) 330-69-39 (сл.); факс 333-3863 babin@iae.nsk.su Новосибирск, пр. Коптюга 1, ИАиЭ СО РАН (*научный координатор, отв. исп. блока ИАиЭ*);

Федорук Михаил Петрович, тел. 334-91-05, факс.330-63-42, mife@ict.nsc.ru, г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева 6, ИВТ СО РАН (*учёный секретарь, отв. исп. блока ИВТ*)

Оришич Анатолий Митрофанович, тел. 330-73-42, факс.330-72-68, orishich@itam.nsc.ru г. Новосибирск, ул. Институтская 4/1, ИТПМ СО РАН (*отв. исп. блока ИТПМ*)