

**Д.А. Заярный, Б.С. Ишханов, А.Н. Каманин, Н.И. Пахомов,  
В.И. Шведунов**

**СО<sub>2</sub> ЛАЗЕР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ДИФРАКЦИОННОЙ УСКОРЯЮЩЕЙ  
СТРУКТУРЫ**

Препринт НИИЯФ МГУ – 2006 – 16/815

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
им. М.В. ЛОМОНОСОВА

---

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Д.В.СКОБЕЛЬЦЫНА

**Д.А. Заярный, Б.С. Ишханов, А.Н. Каманин, Н.И. Пахомов,  
В.И. Шведунов**

**СО<sub>2</sub> ЛАЗЕР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ДИФРАКЦИОННОЙ УСКОРЯЮЩЕЙ  
СТРУКТУРЫ**

Препринт НИИЯФ МГУ – 2006 – 16/815

УДК 621.039

E-mail addresses: [dzayarny@sci.lebedev.ru](mailto:dzayarny@sci.lebedev.ru), [shved@depni.sinp.msu.ru](mailto:shved@depni.sinp.msu.ru)

**D.A. Zayarny, B.S. Ishkhanov, A.N. Kamanin, N.I. Pakhomov, V.I. Shvedunov**

**CO<sub>2</sub> LASER FOR INVESTIGATION OF DIFFRACTION ACCELERATING  
STRUCTURE**

Preprint INP MSU – 2006 – 16/815

Abstract

We describe CO<sub>2</sub> laser intended for experiments with diffraction accelerating structure, present results of laser tuning and generation of short subnanosecond pulses. Experimental estimations of accelerating structure samples transparency have been obtained.

**Д.А. Заярный, Б.С. Ишханов, А.Н. Каманин, Н.И. Пахомов, В.И. Шведун**

**СО<sub>2</sub> ЛАЗЕР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИФРАКЦИОННОЙ УСКОРЯЮЩЕЙ  
СТРУКТУРЫ**

Препринт НИИЯФ МГУ – 2006 – 16/815

Аннотация

В работе описан СО<sub>2</sub> лазер, предназначенный для экспериментов с дифракционной ускоряющей структурой, представлены результаты настройки лазера и генерации коротких субнаносекундных импульсов. Получены экспериментальные оценки прозрачности образцов ускоряющей структуры.

© Заярный Д.Ф., 2006

© Ишханов Б.С., 2006

© Каманин А.Н., 2006

© Пахомов Н.И., 2006

© Шведун В.И., 2006

© НИИЯФ МГУ, 2006 <http://www.sinp.msu.ru>

## Введение<sup>1</sup>

В работе [1] была предложена дифракционная структура для ускорения электронов в вакууме в ближней зоне на длине волны 10.6 мкм с целью достижения ускоряющего градиента до 1 ГэВ/м. Схематический вид структуры показан на Рис. 1. Структура, состоящая из двух дифракционных решеток, облучается с двух сторон плоскими волнами, сфазированными таким образом, что в медианной плоскости образуется модулированное вдоль оси  $z$  поле, обеспечивающее эффективное ускорение релятивистских частиц. Основные параметры структуры приведены в работе [2]. Для демонстрации эффекта ускорения частиц планируется достижение ускоряющего градиента 375 МэВ/м на длине ускоряющей структуры около 1 мм (100 ускоряющих периодов). Требуемая напряженность поля обеспечивается  $\text{CO}_2$  лазером мощностью около 20 МВт при условии фокусировки луча на внешней поверхности структуры в пятно размером  $1 \times 0.05 \text{ мм}^2$ . Для предотвращения теплового разрушения структуры длительность импульса лазерного излучения должна быть менее 1 нс. В настоящей работе описан  $\text{CO}_2$  лазер, предназначенный для экспериментов с ускоряющей структурой.

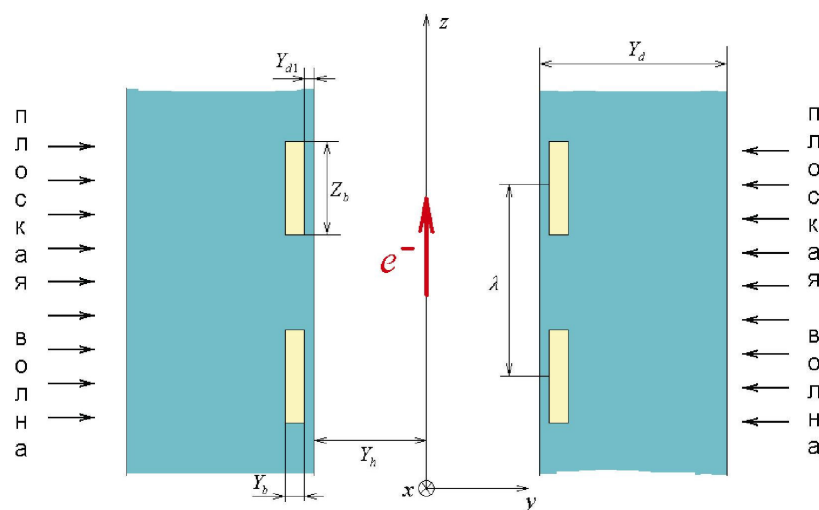


Рис.1. Дифракционная ускоряющая структура.

## §1. Лазерная установка

В качестве источника мощного монохроматического линейно поляризованного электромагнитного излучения в лазерном ускорителе электронов может быть применен газовый лазер атмосферного давления на колебательных переходах молекулы  $\text{CO}_2$  с поперечной накачкой электрическим

<sup>1</sup> Работа поддержана грантом РФФИ 05-02-16351

разрядом (ТЕА  $\text{CO}_2$  лазер) с длиной волны генерации 10.6 мкм [3]. Лазеры этого типа излучают электромагнитные импульсы мощностью до несколько десятков мегаватт, что позволяет при фокусировке излучения лазера создавать поля с напряженностью в несколько гигаВольт на метр и более.

На Рис. 2 приведена фотография ТЕА  $\text{CO}_2$  лазера использовавшегося для создания лазерного ускорителя электронов.

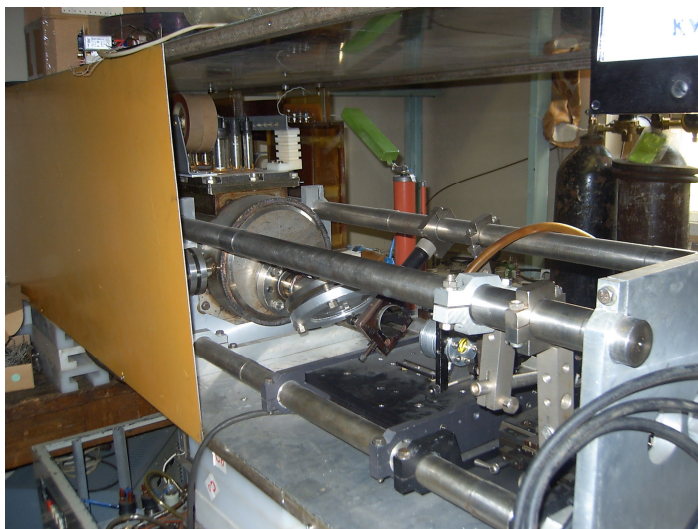


Рис.2 ТЕА  $\text{CO}_2$  лазер

Накачка лазера осуществлялась импульсным высоковольтным разрядом конденсаторной батареи заряженной до напряжения 40 кВ. Активный объем лазера имел размеры 30x50x1000 мм и ограничивался сетчатым катодом и плоским анодом, выполненным по модифицированному профилю Чанга. Для обеспечения однородности пространственного электрического разряда в лазерной смеси использовалась предыонизация лазерной смеси УФ излучением электрического пробоя по поверхности стеклянной пластины расположенной за сетчатым катодом.

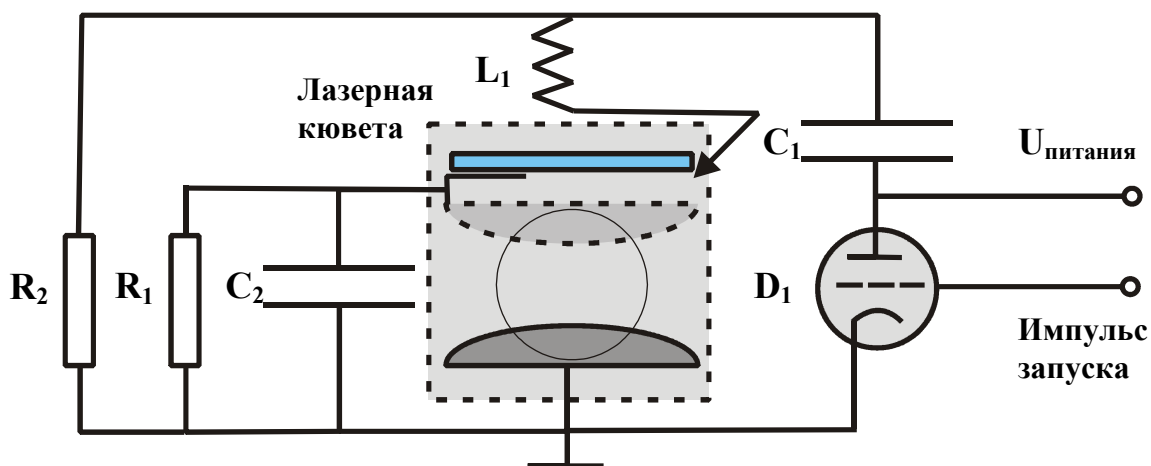


Рис.3 Схема ТЕА  $\text{CO}_2$  лазера.

Разрядный электрический контур лазера был собран по классической схеме (Рис. 3) с использованием в качестве высоковольтного коммутатора тиратрона ( $D_1$ ) ТДИ1-50к/50 производства ООО «Импульсные технологии» г.Рязань [www.pulsetech.ru](http://www.pulsetech.ru) со следующими паспортными параметрами: напряжение на аноде до 40 кВ, амплитуда тока анода 20 кА, частота повторения импульсов 0.5 Гц. Емкость низкоиндуктивного разрядного конденсатора ( $C_1$ ) КМК50-0.1 составляла 0.085 мкФ, обостряющей батареи ( $C_2$ ), набранной из конденсаторов К15-10, - 0.03 мкф. Подключение разрядного конденсатора к катоду лазера осуществлялось плоской шиной с целью минимизировать индуктивность разрядного контура. Стабилизация поверхностного разряда осуществлялась подачей высокого пробойного напряжения на 30 равноотстоящих острий через индуктивности  $L_1$ , выполненных в виде стальных пружинок диаметром 15 мм и с 10 витками. Зарядные сопротивления  $R_1$  и  $R_2$  имели значения 20 кОм.

Лазерная смесь представляла собой смесь гелия, азота и углекислого газа в соотношении  $He:N_2:CO_2 = 3:1:1$  с общим давлением от одной трети до одной атмосферы, применялись также смеси с более высоким содержанием гелия вплоть до  $He:N_2:CO_2 = 10:1:1$ . Использовались газы высокой чистоты: например гелий марки «55» с содержанием гелия 99.9995 %.

Лазерная кювета, выполненная из нержавеющей стали, откачивалась перед напуском смеси форвакуумным насосом до давления  $10^{-2}$  атм, что является вполне достаточным для ТЕА  $CO_2$  лазеров. Прокачка лазерной смеси в данной конструкции лазера предусмотрена не была, что ограничивало сверху частоту следования лазерных импульсов на уровне 0.2 Гц. Увеличение частоты импульсов выше этого уровня приводило к быстрому уменьшению энергии генерации лазера из-за нагрева электрическим разрядом лазерной смеси.

Резонатор лазера длиной  $l_p = 1.5$  м состоял из двух плоскопараллельных зеркал – глухого 100 % зеркала с золотым покрытием, установленным непосредственно на лазерной кювете и выходного зеркала – чистой Ge пластины. В торце лазерной кюветы обращенной к выходному зеркалу было установлено окно из NaCl пластины, развернутой под углом Брюстера, это позволило не только снизить потери резонатора из-за паразитных отражений на окне лазерной кюветы, но и получить на выходе лазера линейно поляризованное излучение.

Генерация лазера, регистрируемая с помощью высокочастотного полупроводникового детектора мощности, основанного на эффекте увлечения фотонами носителей тока, представляла собой импульсы с длительностью по

полувысоте 50 нсек с характерной для ТЕА СО<sub>2</sub> лазера формой (Рис. 4) – крутым передним фронтом длительностью до 20 нсек и длинным низкоэнергетичным хвостом на заднем фронте.

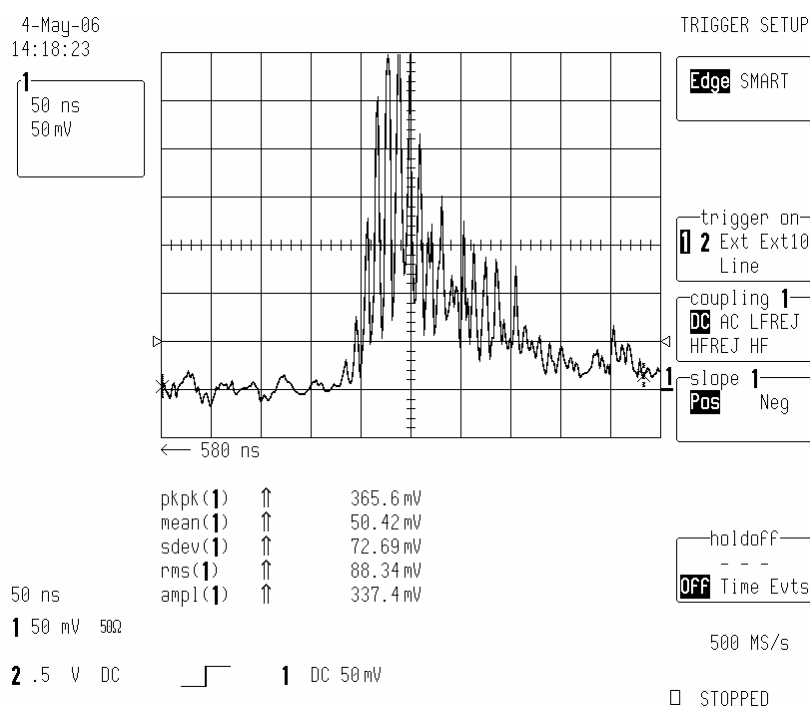


Рис. 4 Импульс генерации ТЕА СО<sub>2</sub> лазера.

Кроме того, что также свойственно ТЕА СО<sub>2</sub> лазеру, импульс генерации был сильно промодулирован в результате самосинхронизации мод лазерного излучения с периодом  $T_0$  соответствующим двойному проходу излучения по длине резонатора лазера  $T_0 = 2l_p/c$  ( $c$  – скорость света). Длительность отдельного пика в цуге лазерного излучения при самосинхронизации мод СО<sub>2</sub> лазера может достигать 2 – 5 нс, однако в нашей работе точное значение длительности пиков не определялось.

Измерение энергии генерации лазера осуществлялось при помощи калориметра ВЧД, инструментального усилителя INA 131BP с фиксированным коэффициентом усиления  $k = 100$  и цифрового компьютерного осциллографа BORDO 221. Энергия генерации лазера в импульсе составляла 0.9 Дж для оптимизированной по составу и давлению лазерной смеси (He:N<sub>2</sub>:CO<sub>2</sub> = 5:1:1,  $p_{смеси} = 0.5$  атм) и воспроизводилась от импульса к импульсу с точностью не хуже 10 %. Средняя мощность ТЕА СО<sub>2</sub> лазера, определяемая как отношение энергии генерации лазера в импульсе к длительности импульса, составила 18 МВт, а

пиковая мощность с учетом скважности модулированного в результате самосинхронизации импульса генерации лежит в диапазоне 140 – 360 МВт.

## §2. Формирование короткого лазерного импульса

Прямая фокусировка излучения  $\text{CO}_2$  лазера с перечисленными выше параметрами на поверхность применяемой нами для лазерного ускорения электронов структуры, приводит к ее разрушению в результате тепловой абляции. Порог абляции напрямую зависит от энергии падающего лазерного импульса и может быть существенно повышен по мощности при укорочении лазерного импульса. Одним из самых простых и эффективных способов получения коротких импульсов  $\text{CO}_2$  лазера является использование быстродействующих оптических затворов. Нами была использована схема так называемого плазменного затвора [4-5]. Плазменный затвор представляет собой расположенные последовательно друг за другом две короткофокусные линзы. В результате фокусировки плотность излучения ТЕА  $\text{CO}_2$  лазера за первой линзой достигает значения оптического пробоя воздуха, если эти линзы расположены на воздухе, или любого другого газа, если оптическая схема плазменного затвора расположена в его среде. Образовавшаяся в фокусе первой линзы плазма обладает высоким коэффициентом отражения и не пропускает вперед излучение лазера, при этом скорость образования плазмы крайне велика и быстродействие такого оптического затвора достигает нескольких пикосекунд. На выходе оптического затвора будет наблюдаться лазерный импульс с очень коротким задним фронтом и амплитудой, зависящей от величины порога оптического пробоя используемого в затворе газа. При этом следует отметить, что оптический затвор практически не вносит потерь в мощность проходящего через него лазерного импульса. Как показал опыт различных авторов, исследовавших такой тип затворов для  $\text{CO}_2$  лазеров, более эффективно использовать газ  $\text{N}_2$ , прокачиваемый через фокальную плоскость первой линзы под давлением слегка превышающим атмосферное. В нашем случае порог оптического пробоя  $\text{N}_2$  ( $W_{\text{азот}} = 10^{13}$  Вт/см<sup>2</sup>) оказывается даже выше плотности лазерного излучения в фокусе первой линзы ( $\sim 5 \cdot 10^{11}$  Вт/см<sup>2</sup>) и для образования плазмы может использоваться не пробой газа, а оптический пробой на поверхности расположенной вблизи фокуса металлической диафрагмы. Изменяя размер диафрагмы, становится возможным регулировать амплитуду прошедшего через оптический затвор лазерного импульса в пределах амплитуды первоначального импульса. Именно такая схема плазменного оптического затвора



и была применена в нашей работе. Две просветленные на длину волны  $\text{CO}_2$  лазера линзы LPX-ZC-25.4-25.4 производства «Опто-Технологической лаборатории» г. Санкт-Петербург [www.optotl.ru](http://www.optotl.ru) из ZnSe с фокусным расстоянием 25.4 мм и таким же диаметром были конфокально расположены в герметичном алюминиевом корпусе с двумя штуцерами для подвода и вывода  $\text{N}_2$ . В центре этой ячейки была установлена алюминиевая диафрагма 4 мм. На Рис.5 приведена осциллограмма лазерного импульса на выходе нашего оптического затвора. Энергия лазерного импульса на выходе оптического затвора составляла примерно 10 % от первоначальной энергии генерации лазера.

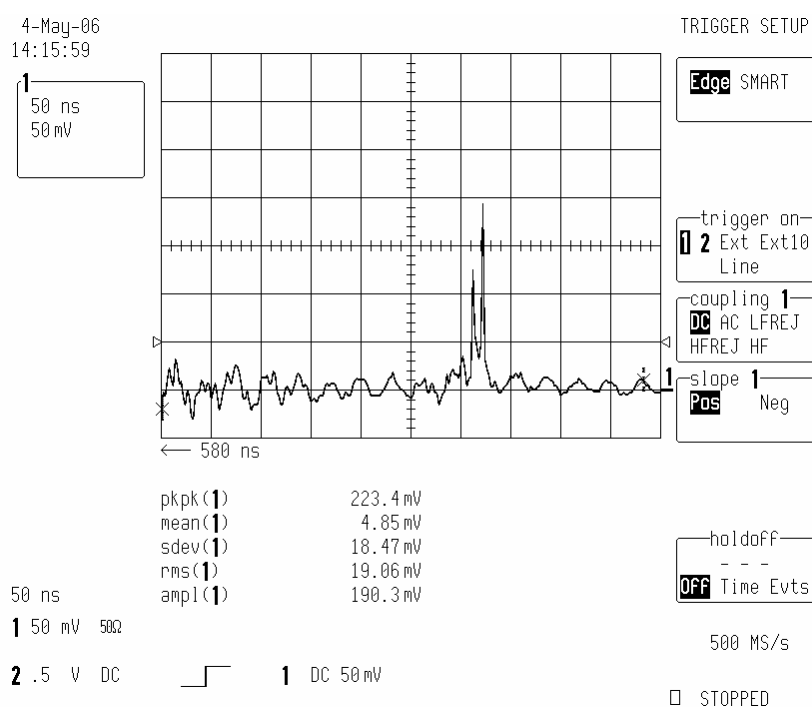


Рис.5 Лазерный импульс на выходе оптического затвора.

Дальнейшее укорочение лазерного импульса возможно при прохождении излучения, вышедшего из плазменного затвора, через длинную ( $> 1$  м) поглощающую газовую ячейку, заполненную  $\text{CO}_2$  давлением 200 Торр при температуре  $400^\circ\text{C}$ . Наличие очень короткого заднего фронта в импульсе позволяет эффективно сформировать отраженный назад от газовой ячейки импульс длительностью менее 30 псек. Однако применение такой техники укорочения лазерного импульса возможно, только если на выходе лазера формируется плавный, немодулированный в результате самосинхронизации импульс генерации. Это условие существенно усложняет конструкцию ТЕА  $\text{CO}_2$  лазера, так как требует установки в резонатор лазера лазерной кюветы маломощного непрерывного  $\text{CO}_2$  лазера, что позволяет получить на выходе

лазерной системы одномодовое излучение, а, следовательно, и импульс генерации с плавной огибающей.

В то же время полученный нами импульс на выходе оптического затвора уже вполне может быть использован для последующих исследований, так как плотность энергии излучения на поверхности ускоряющей структуры при фокусировке на нее излучения цилиндрической линзой оказывается ниже порога абляции.

### **§3. Прохождение лазерного излучения через ускоряющую структуру**

Ускоряющая структура лазерного ускорителя электронов представляет собой плоскую металлическую дифракционную решетку, погруженную в субстрат ZnSe, с периодом решетки, совпадающим с длиной волны генерации лазера (Рис. 1). Обычная металлическая решетка, напыленная на подложку, в случае совпадения ее периода с длиной волны падающего на нее нормально монохроматического излучения резонансно отражает это излучение. Исследуемая нами модифицированная дифракционная решетка, как показывают расчеты, должна эффективно пропускать лазерное излучение. Именно этот вопрос и исследуется нами экспериментально.

Образец ускоряющей структуры, выполненный в субстрате ZnSe, габаритными размерами 4 x 2.5 мм и размерами дифракционной решетки 4 x 1.5 мм был размещен в центре диафрагмы с диаметром 1.5 мм. Аналогичная диафрагма без установленной в ней ускоряющей структуры использовалась для определения общего потока лазерного излучения за диафрагмой. Лазерное излучение, укороченное оптическим затвором, фокусировалось просветленной на длине волны генерации CO<sub>2</sub> лазера цилиндрической линзой LC-ZC-25-12-25.4 изготовленной из ZnSe с фокусным расстоянием 25.4 мм. Поперечный размер фокального пятна не превышал 0.2 мм. Плотность излучения лазера в фокальной плоскости линзы оказывалась ниже порога оптического пробоя неочищенного воздуха  $W_{\text{воздух}} = 2 \cdot 10^9 \text{ Вт/см}^2$ . Перечисленные выше условия эксперимента позволяли избежать возникновения плазмы на поверхности ускоряющей структуры. Регистрация прошедшего через диафрагмы излучения осуществлялась полупроводниковым детектором мощности и цифровым осциллографом. Фотография оптической схемы представлена на Рис. 6.

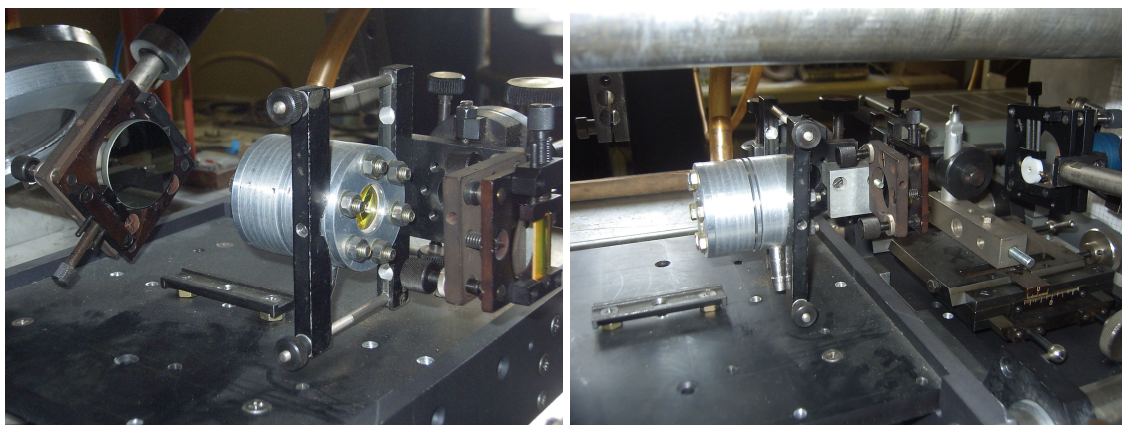


Рис.6 Плазменный затвор, цилиндрическая фокусирующая линза и диафрагма с установленной в центре ее ускоряющей структуры.

Для обеспечения точного позиционирования ускоряющей структуры относительно сфокусированного цилиндрической линзой лазерного излучения оптический затвор и цилиндрическая линза размещались на подвижном оптическом двухкоординатном столике с микрометрической подачей. Контроль точности позиционирования осуществлялся по максимуму сигнала от детектора мощности, размещавшегося непосредственно за диафрагмой. Кроме этого исследовалась прозрачность ускоряющей структуры в плоском фронте падающего лазерного излучения. Для этого излучение лазера, минуя оптический затвор и цилиндрическую линзу, направлялось непосредственно на диафрагму с ускоряющей структурой. Это позволяло сравнить прозрачность ускоряющей структуры для сходящегося и плоского лазерного пучка. В случае сходящегося пучка было измерено, что прозрачность ускоряющей структуры лежит в диапазоне  $0.5 \pm 0.15$ . Прозрачность для плоского лазерного пучка составила  $0.6 \pm 0.1$ . При этом расчетная прозрачность исследуемой ускоряющей структуры, определяемая как отношение расстояния между металлическими полосками дифракционной решетки к периоду решетки равна 0.7. Таким образом, экспериментально показано, что предложенная нами ускоряющая дифракционная структура обладает достаточной степенью прозрачности позволяющей создавать ускоряющее электромагнитное с градиентом на уровне 1 ГэВ/м за ней. Следует также отметить, что более высокая степень прозрачности ускоряющей структуры для плоского лазерного пучка связана с наличием на задней поверхности ускоряющей структуры просветляющего покрытия на длину волны генерации лазера 10.6 мкм. Это просветляющее покрытие оказывается недостаточно эффективным в случае острой фокусировки излучения лазера на ускоряющую структуру.

Авторы выражают благодарность В.М. Гордиенко и И.А. Кудинову за консультации по проблеме стабильности работы CO<sub>2</sub> лазера.

### **Литература**

1. С.В.Абрамов, Ю.К.Алексеев, Д.А.Заярный, Б.С.Ишханов, В.И.Шведунов. Дифракционная ускоряющая структура рi-вида. Письма в ЖТФ, том 30, вып. 12 (2004), стр. 44-49.
2. В.И.Шведунов, Ю.К.Алексеев, А.А.Ветров, Д.А.Заярный, Б.С.Ишханов, А.А.Косарев, А.В.Лукин, А.К.Лукашевич, Т.А.Миронова, Н.И.Пахомов, А.В.Посеряев, Линейный дифракционный ускоритель заряженных частиц, Препринт НИИЯФ МГУ-2004-25/764, 50 стр.
3. Г.А.Месяц, Ю.Д.Королев. Объемные разряды высокого давления в газовых лазерах. УФН, том 148, вып. 1 (1986), стр. 101-122.
4. Eli Yablonovitch. Spectral Broadening in the Light Transmitted through a Rapidly Growing Plasma. Phys.Rev.Letters, vol. 31, N 14 (1973), pp. 877-879.
5. G. McClelland, A.Miller, J.Dempsey and S.D.Smith. Intensity Dependence of the Rapidity of a CO<sub>2</sub> Laser Plasma Shutter. Optics Communications, vol. 31, N 1 (1979), pp. 85-88.

**Дмитрий Альбертович Заярный<sup>1</sup>**  
**Борис Саркисович Ишханов<sup>2</sup>**  
**Андрей Николаевич Каманин<sup>2</sup>**  
**Николай Иванович Пахомов<sup>2</sup>**  
**Василий Иванович Шведунов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 119991, Москва, ленинский проспект 53

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ, 119899, Москва, Ленинские горы

## **СО<sub>2</sub> ЛАЗЕР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИФРАКЦИОННОЙ УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ**

Препринт НИИЯФ МГУ – 2006 – 16/815

Работа поступила в ОНТИ 8 октября 2006 г.