

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ» (НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ, НГУ)

Факультет ФИЗИЧЕСКИЙ

Кафедра ФИЗИКИ ПЛАЗМЫ

Направление подготовки 03.03.02. ФИЗИКА

Образовательная программа: БАКАЛАВРИАТ

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА**

Ушковой Марии Юрьевны

(Фамилия, Имя, Отчество автора)

Тема работы **Оптический стенд для исследования нерезонансного накопления излучения в целях разработки фотонейтрализатора пучков отрицательных ионов**

**«К защите допущена»**

Заведующий кафедрой,

ученая степень, звание

место работы

...../.....

(фамилия, И., О.) / (подпись, МП)

«.....».....20...г.

**Научный руководитель**

к.ф.-м.н.

с.н.с., лаб 9-0 ИЯФ СОРАН

...../.....

(фамилия, И., О.) / (подпись, МП)

«.....».....20...г.

Дата защиты: «.....».....20...г.

Новосибирск, 2016

## Оглавление

Введение .....	3
1. Нерезонансный фотонный накопитель .....	5
2. Эксперимент по нерезонансному накоплению фотонов на сферических зеркалах .....	8
2.1. Схема эксперимента на сферических зеркалах .....	8
2.2. Определение эффективности накопления.....	9
3. Определение порога разрушения зеркал .....	15
4. Эксперименты на цилиндрических зеркалах .....	21
4.1. Схема эксперимента на линейке зеркал .....	23
4.2. Определение эффективности накопления.....	25
Выводы .....	29
Литература .....	31

## Введение

Одним из основных способов нагрева плазмы является введение в нее пучка нейтральных атомов водорода или дейтерия большой мощности. Для функционирования термоядерных реакторов необходимы пучки с высокими энергиями. Так, например, в международном исследовательском термоядерном реакторе ИТЭР, который строится во Франции, будут использоваться пучки атомов с энергией в 1 МэВ. При этом в результате синтеза должно выделяться больше энергии, чем ее расходуется на нагрев плазмы. Как минимум, плазму необходимо нагреть до очень высокой температуры: свыше 40 кэВ. [1] Чтобы это сделать, обычно ускоряют пучки отрицательных ионов, а после их нейтрализуют. Этого можно достигнуть путем фотоотрыва лишнего электрона. Если энергия фотонов превышает энергию сродства электрону атома водорода (0.754 эВ), но меньше его потенциала ионизации (13.6 эВ), основной процесс взаимодействия пучка с мишенью заключается в фотоотрыве электрона от отрицательного иона. Это делает принципиально возможным достижение выхода атомов в такой мишени близкого к единице.

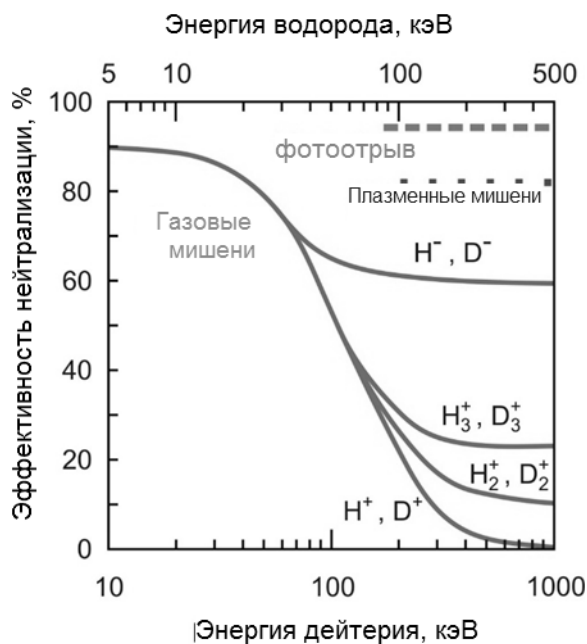


Рис. 1. Эффективность нейтрализации пучка в зависимости от энергии

На рис.1. представлена эффективность нейтрализации пучка в зависимости от энергии. Как видно, процент нейтрализации на высоких энергиях для плазменных ловушек достигает не более 80%, в то время как для фотоотрыва возможно достижение 100%. Таким образом, одним из перспективных методов нейтрализации пучков отрицательных ионов является применение фотонной мишени, в которой используется реакция фотоотрыва электрона. [2]

При фотоотрыве нет дополнительных каналов реакции, которые имеются, например, в газовых мишенях, оказывающих вследствие этого сильное влияние на параметры нейтрального пучка и вакуумные условия системы. [3] Для того, чтобы было возможно создать фотонный нейтрализатор, необходимо учесть также и то, что из-за малого сечения фотоотрыва требуется многократное пересечение фотонами ионного пучка для получения высокой степени нейтрализации (более 90%). Достичь этого можно используя систему зеркал для удержания излучения внутри нее. По такому принципу предложено множество различных схем [4], однако, все они основаны на тех или иных разновидностях оптического резонатора Фабри-Перо. Подобные системы имеют ряд существенных ограничений. Например, для усиления потока излучения с эффективностью порядка тысячи раз необходимы не только зеркала с высоким коэффициентом отражения ( $>0.999$ ) и достаточной лучевой стойкостью, но и выполнение жестких требований на качество вводимого лазерного излучения и стабилизацию оптических элементов. Эти условия необходимы для соблюдения фазового синхронизма на большом числе проходов. Кроме этого, в виду значительного уровня мощности излучения, необходимо учитывать температурную стабилизацию зеркал. Создание подобной системы на базе современных технологий возможно, но требуется серьезная проработка элементов конструкции резонатора, как, например, в интерферометре для исследования

гравитационных волн [5]. Современные достижения и проблемы в изысканиях по резонаторным схемам можно найти в [6]. Альтернативой является нерезонансное накопление фотонов. Теоретически задача создания нерезонансной фотонной ловушки подробно рассмотрена в [7,8], там же получены требования на пространственную конфигурацию зеркальной системы и начальные условия инжекции фотонного пучка.

Данная работа посвящена экспериментальной проверке принципа нерезонансного накопления в двух системах: простой, состоящей из двух сферических зеркал и в сложной вытянутой системе. Также были проведены эксперименты по проверке прочности зеркал, определению их порога разрушения и измерению эффективности накопления энергии в данной системе.

## 1. Нерезонансный фотонный накопитель

Принципиальную схему нерезонансного фотонного накопителя можно посмотреть на рис.2. Принцип его действия заключается в том, что в ловушку через отверстие в одном из зеркал вводится лазерное излучение, где оно накапливается, за счет многократного отражения фотонов. Когда пучок отрицательно заряженных ионов проходит в пространстве между зеркалами, то за счет фототрыва электрона происходит нейтрализация пучка.

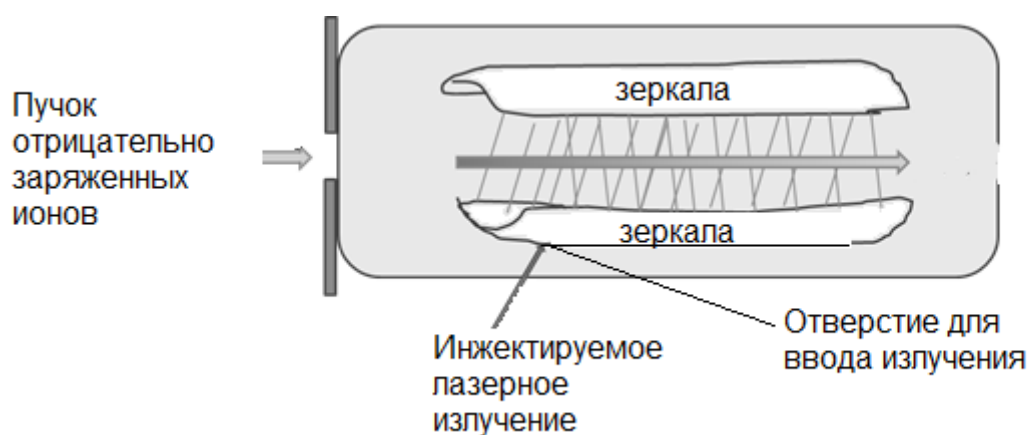


Рисунок 2. Схема нерезонансной ловушки

Подобная концепция фотонной ловушки, представляющей систему отражающих поверхностей, обеспечивает многократное возвращение лучей.

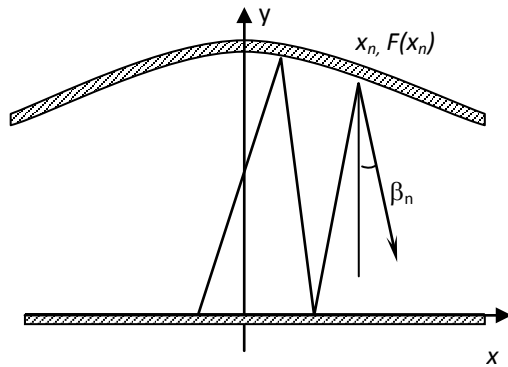


Рисунок 3. Схема квазипланарной фотонной ловушки.

Ловушка аналогична математическому бильярду, который содержит достаточно объемную область устойчивых в фазовом пространстве бильярдных траекторий. Если в такой системе зеркальных поверхностей луч запутается, то плотность энергии в этой схеме возрастет пропорционально времени жизни лучей в ней.

Предложенная в [9] концепция нерезонансного накопления вместо точных фазовых соотношений между лучами на различных стадиях эволюции внутри ловушки предполагает сохранение некоторых адиабатических инвариантов ограничивающих область занятую фотонами. Рассмотрим двумерную конфигурацию зеркал на рис. Как видно из рисунка, фотон с каждым новым отражением получает приращение горизонтального импульса в направлении максимума высоты между зеркалами. При малых отклонениях направления движения фотона от вертикали, он будет стремиться к центральному положению «равновесия». Динамику смещения фотона можно описать следующей системой. Зададим положение фотона сразу после  $n$ -го отражения абсциссой точки отражения –  $x_n$ , ее высотой –  $F(x_n)$  и углом между вертикалью и скоростью фотона –  $\beta_n$  (см. Рис.3). Тогда горизонтальное движение описывается следующей системой уравнений:

$$x_{n+1} - x_n = (F(x_{n+1}) + F(x_n)) \operatorname{tg} \beta_n \quad (1)$$

$$\beta_{n+1} - \beta_n = 2 \frac{dF(x_{n+1})}{dx} \quad (2)$$

Для исследования устойчивости линеаризуем систему (1), (2), получим

$$x_{n+1} - x_n = 2F(0)\beta_n \quad (3)$$

$$\beta_{n+1} - \beta_n = 2 \frac{d^2 F(0)}{dx^2} x_{n+1} \quad (4)$$

Комбинируя (3) и (4), получим следующее линейное рекуррентное соотношение:

$$x_{n+2} - 2x_{n+1} + x_n = 4F(0) \frac{d^2 F(0)}{dx^2} x_{n+1} = -4F(0) \frac{x_{n+1}}{R}, \quad (5)$$

где  $R$  – радиус кривизны верхнего зеркала. Условие устойчивости уравнения (5) легко находится [10]

$$F(0) < R \quad (6)$$

При выполнении (6) очевидно сохраняется адиабатический инвариант

$$F(x) \cos(\beta) = \text{const}, \quad (7)$$

ограничивающий область занятую фотонами.

Интегральное время жизни в фотонной ловушке определяется, как и в резонансном накопителе фотонов, в основном, потерями фотонов на отражениях, а также временем их ухода за пределы системы, например, через отверстие ввода мощного потока излучения. Принципиальное отличие от резонансных накопителей заключается в том, что в такой фотонной ловушке нет строгого условия на фазовые соотношения между большим количеством лучей внутри нее, а ввод излучения производится не через высокоотражающую поверхность, а через малое отверстие. Удержание обеспечивается сохранением некоторых адиабатических инвариантов. При этом эффективность накопления фотонов практически не зависит от качества инжектируемого излучения, так как ввод излучения в ловушку производится через малое входное отверстие в одном из зеркал, а не через зеркало, как у резонаторов. Это обстоятельство позволяет рассматривать в качестве

источника излучения достаточно дешёвый и высокоэффективный промышленный волоконный лазер. [11]

## 2. Эксперимент по нерезонансному накоплению фотонов на сферических зеркалах

Проверка принципа нерезонансного накопителя фотонов для лазерного нейтрализатора отрицательных ионов водорода, включает такие задачи как, измерение эффективности накопления и оценка стойкости напыления диэлектрических зеркал. Для проверки метода нерезонансного накопления фотонов, первые эксперименты были проведены на простой системе двух сферических зеркал. [8] Целью было экспериментальное подтверждение возможности адиабатического удержания излучения в системе, достаточного для фотонейтрализации пучка. В качестве источника излучения в работе применялись два лазера, маломощный YAG-лазер и иттербиевый волоконный лазер ЛС-2 с номинальной выходной мощностью 2кВт, с длиной волны излучения 1,065-1,08 мкм.

### 2.1. Схема эксперимента на сферических зеркалах

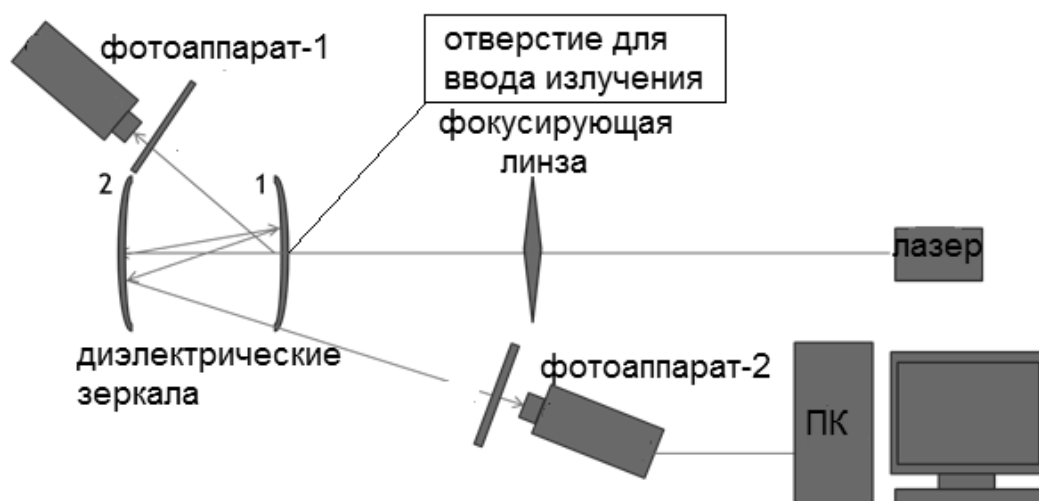


Рисунок 4. Схема эксперимента на сферических зеркалах



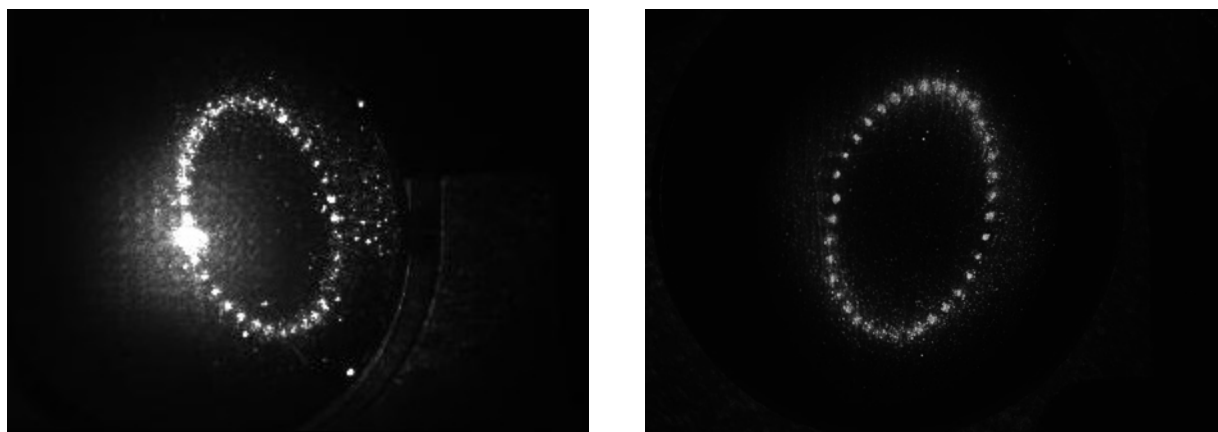
Принципиальная схема эксперимента представлена на рис.4. Луч лазера вводился в систему двух сферических вогнутых зеркал с радиусом кривизны 250 мм через отверстие диаметром 300 мкм в центре одного из них. После этого фотоны испытывали некоторое количество отражений до выхода из системы или поглощения на зеркалах. Последние выполнены напылением около 40 диэлектрических слоев на кремниевую монокристаллическую подложку диаметром 2.5 см. Пропускание контрольной пластины (свидетель) в диапазоне 1.03–1.14 мкм не превышало 0.1%. Для анализа эффективности накопления лучистой энергии в ловушке регистрировалось паразитное рассеяние световых потоков на поверхности зеркал посредством ССD-камер SDU 285 [12] с соответствующим набором светофильтров и объективов. Калибровка распределения чувствительности камер по полю зрения производилась с помощью равномерно освещенного матового экрана. Относительная калибровка чувствительности показала, что ее отклонение носило монотонный характер и ограничивалось 2% в интервале регистрируемого поля зрения, а также согласовывалось с геометрическим удалением точек поверхности зеркала при движении по полю зрения. Также при подсчете коэффициента накопления учитывался вклад фонового излучения. В ходе эксперимента расстояние между зеркалами могло существенно меняться в пределах 50–300 мм.

## **2.2. Определение эффективности накопления**

Для получения наилучшего коэффициента накопления, необходимо как можно дольше удерживать пучок в ловушке. Следовательно, задача сводится к поиску оптимальных условий входной точки для наилучшего удержания излучения.

В результате эксперимента, с помощью фотоаппаратов, были сделаны снимки поверхности зеркал, представленные ниже. На рис.5 слева показана поверхность первого зеркала, где яркая точка – входное отверстие в центре

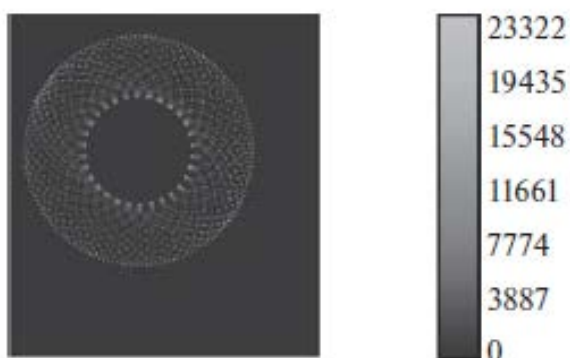
зеркала, через которое и подавалось лазерное излучение. Справа, соответственно, представлена поверхность второго зеркала. Как видно, совокупность пятен рассеяния отражений пучка образует эллипс. Аналитически последовательность точек на зеркале описывается с помощью теории в [8]. При определенных условиях также можно было добиться изображения в виде прямой или окружности. Качественно такое поведение аналогично дискретному описанию колебаний математической точки в сферической чаше. В этом случае форма траектории связана с возникновением в данной системе аналога углового момента (см. подробнее ниже). Таким образом, возникновение прямой линии соответствует равенству его значения нулю. Если же вводить излучение с ненулевым прицельным параметром относительно оси симметрии, то это приводит к возникновению прецессирующего эллипса. При этом отражения будут происходить до тех пор, пока отраженный луч вновь не попадет обратно во входное отверстие. На рис.5 видно, что эллипс быстро прерывается.



*Рисунок 5. Снимок поверхности первого(слева) и второго(справа) зеркала*

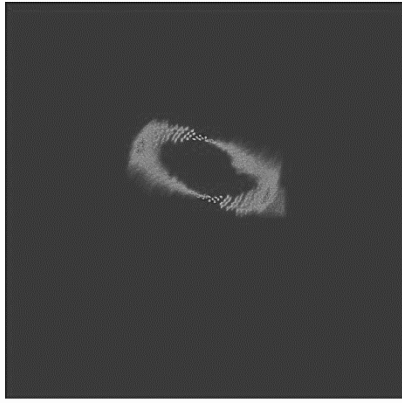
С целью поиска оптимальных условий для наилучшего удержания излучения было выполнено моделирование эксперимента с помощью программы “Zemax”. На рис. 6 представлен расчетный след точек отражений на идеальных зеркалах. Их совокупность также образовывала прецессирующий эллипс. В результате такой прецессии след лучей на

зеркале образует кольцо. При определенных углах инъекции входного излучения можно было получить прямую линию или же фигуру, близкую к окружности. В результате расчетов было определено оптимальное место ввода излучения, которое соответствует наименьшей плотности точек отражений. Из рис. 6 можно заключить, что оно должно находиться ближе к внешнему радиусу кольца, но все-таки не достигать его. Полученные результаты моделирования позволили существенно увеличить число отражений в ловушке.



*Рисунок 6. Трассировка луча между идеальными сферическими зеркалами (около 8000 отражений).*

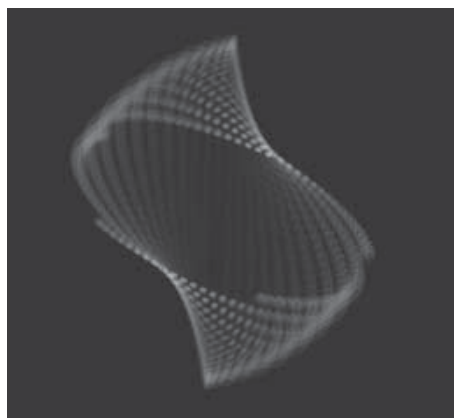
Моделирование с учетом затухания представлено на рис.7. Видно также след прецессии эллипса, однако, из-за затухания он неполный (как было показано на рис.6).



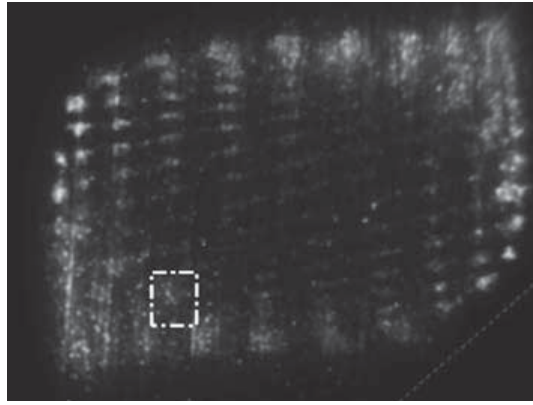
*Рисунок 7. Моделирование в Zemax: изображение полученного профиля на втором зеркале (эллипс)*

Если бы система была линейной, прецессия отсутствовала бы, однако, на Рис.8. видно, что эллипс все же прецессирует и начинает сжиматься. Похожий результат получается при моделировании на системе асфирических зеркал, которое представлено на Рис.8. Из этого можно сделать вывод, что наша система зеркал также асфирична и прецессия эллипса связана с возникновением разности угловых моментов в ней.

*Рисунок 8. Моделирование на асферических зеркалах.*



Далее в программе Matlab производилась обработка данных с поверхности второго зеркала, на котором и происходило первое отражение лазерного пучка (Рис.5). Учет чувствительности показал, что в интервале регистрируемого поля зрения отклонение носило монотонный характер, ограничивалось 2% и согласовывалось с геометрическим удалением точек поверхности зеркала при движении слева на право. При последующих вычислениях распределения интенсивности на поверхности зеркала, неоднородностью чувствительности пренебрегалось. Типичный профиль потока накопленного излучения на поверхности зеркала представлен на рис.9.



*Рисунок 9. Пример профиля потока накопления лазерного излучения на зеркале. Прямоугольный контур – область первого отражения.*

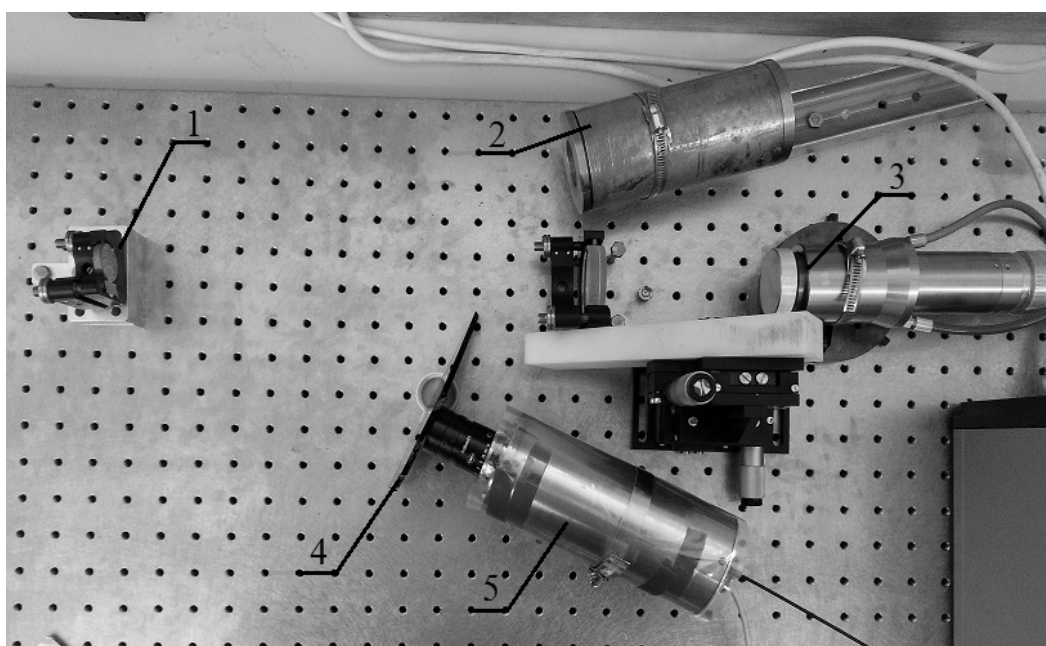


*Рисунок 10. След первого прохода излучения.*

Для измерения эффективности накопления бралось удвоенное (для учета потока туда-обратно) отношение интеграла профиля потока накопленного излучения на рис. 10 к интегралу от первого прохода на рис. 10. Наилучшее значение эффективности накопления (отношение накопленной мощности излучения к входной) составило величину  $315 \pm 10$ . Это значение соответствует коэффициенту отражения  $R \approx 0.9968$ . Вероятно, существенная часть излучения все же выходила в отверстие ввода. Полностью этого избежать нельзя вследствие теоремы Пуанкаре о возвращении [13]. Из-за этого эффективность накопления оказалась меньше, чем величина  $10^3$ , получаемая из заявленного производителем коэффициентом отражения  $R \geq 0.999$ .

### 3. Определение порога разрушения зеркал

Следующая серия экспериментов была посвящена определению порога разрушения зеркал на кремневой подложке. Это было необходимым, для того чтобы убедиться, что предоставленные зеркала смогут выдержать достаточную мощность лазера в будущих экспериментах и не будут разрушены. Измерения порога разрушения напыления на зеркале заключались в получении видимых изменений или разрушений поверхности при подаче концентрированного светового потока с пошаговым увеличением плотности тока фотонов.



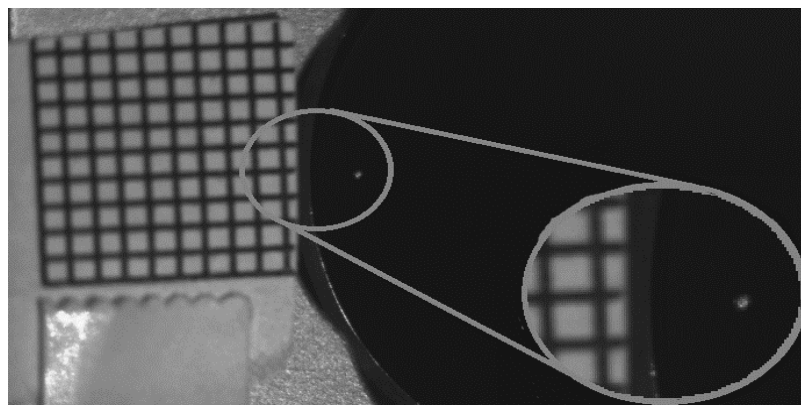
*Рисунок 11. Экспериментальная схема для определения порога разрушения: 1- диэлектрическое зеркало, 2 – поглотитель, 3 – лазер, 4- ИК фильтр, 5 – CCD-камера.*

Как упоминалось выше, в эксперименте использовались диэлектрические зеркала на кремниевой подложке, а как известно отражающая способность таких зеркал формируется благодаря покрытию из нескольких десятков чередующихся тонких слоев из разных диэлектрических материалов. При надлежащем выборе материалов и толщины слоев можно создать оптические покрытия с требуемым коэффициентом отражения на выбранной длине волны. Также необходимо обеспечить достаточно гладкую поверхность на подложке, чтобы нанести ровные слои.

Схема определения порога разрушения показанна на рис.11. В работе использовался иттербиевый волоконный лазер (3) ЛС-2 с максимальной мощностью выходного излучения 2 кВт на длине волны 1069 нм. Диаметр освещенной области устанавливался с помощью перестройки фокусирующей линзы. Рабочим образцом служило диэлектрическое зеркало (1) диаметром 30 мм кривизной 250 мм, с измеренным коэффициентом отражения более 0.997(см. выше). С помощью фотокамеры (5) фиксировался профиль интенсивности и амплитуда рассеяния, сброс мощного пучка производился на поглотитель.

Слева от снимка (Рис. 12) расположена масштабная «миллиметровка», для сопоставления размеров и определения диаметра пучка излучения лазера.





*Рисунок 12. Соотношение размера пучка к масштабной бумаге после фокусировки на мощности 495 Вт.*

Эксперимент по определению порога разрушения напыления на зеркале, проводился в два этапа. На первом этапе снимается интенсивность излучения на малой мощности лазера после его фокусировки на зеркале, что позволяет оценить мощность излучения. Второй этап эксперимента -- получение видимого разрушения на поверхности зеркала, после ввода излучения лазера мощностью 2кВт с пошаговым увеличением длительности импульса.

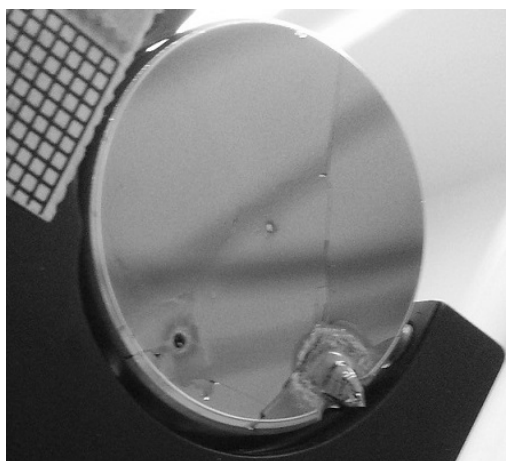
Первый эксперимент проводился на размере пучка 1 мм. На диэлектрическое зеркало подавалось излучение мощностью в 55 Вт, распределение потока которого на зеркале фиксировалось с помощью камеры. Следующим этапом, произведена подача излучения мощностью 2 кВт.

Максимальная мощность (2кВт) в первом заходе начинала подаваться с длительностью 700 мс, видимых разрушений замечено не было. После ряда выстрелов длительность излучения достигла 10 секунд. Порог разрушения напыления зеркала достигнут не был.

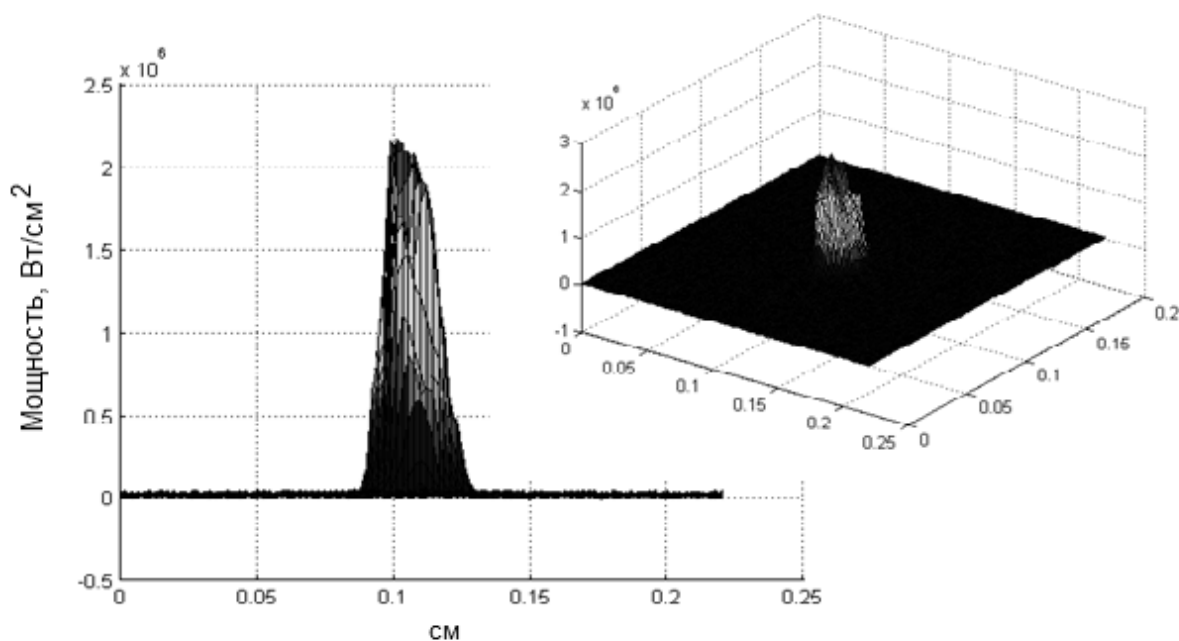
Во втором заходе была увеличена интенсивность излучения. Настройка камеры проводилась при мощности излучения 495 Вт, выбор такого номинала мощности, связан со стабильной работой модулей лазера. В данном эксперименте, настройкой фокусировки достигнут диаметр пучка равный 0,2 мм. Перед камерой устанавливались дополнительные фильтры, для защиты

от засветки. В таком режиме на мощности 2 кВт и длительностью более 1 с диэлектрическое напыление на зеркале было разрушено (Рис.13).

*Рисунок 13. Видимое разрушение напыления зеркала.*



Полученный результат был обработан написанной в пакете “MatLab” программой, построен профиль распределения мощности излучения лазера на зеркале (Рис.14), значение мощности на полувысоте-полуширине

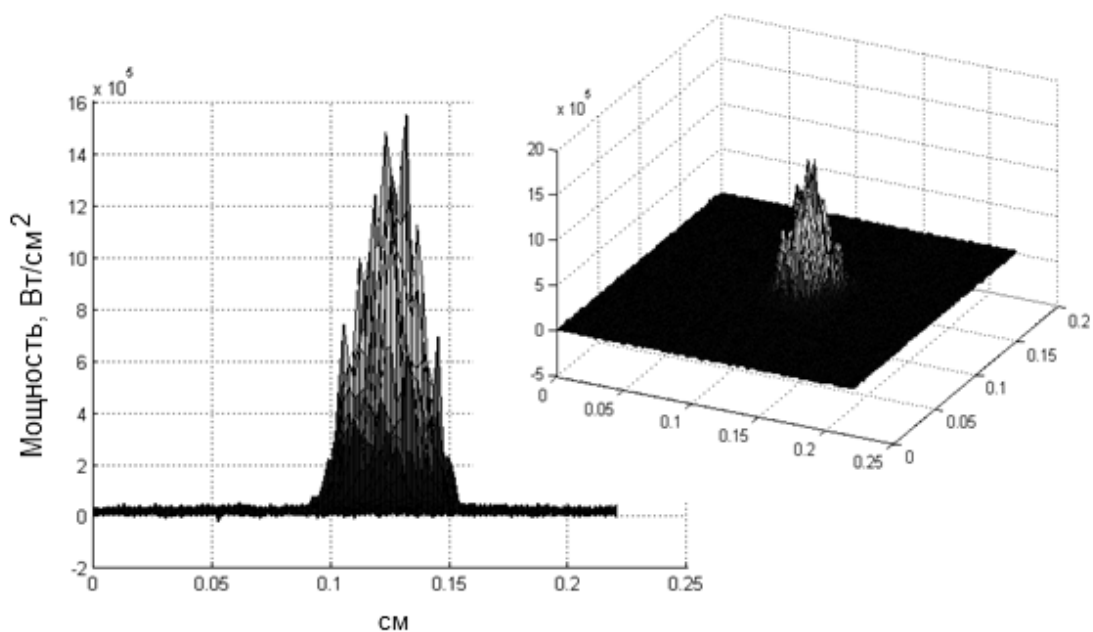


*Рисунок 14. Распределение мощности излучения при превышении порога разрушения*

составило около 1 МВт/см<sup>2</sup>.

В продолжении был проведен эксперимент, с уменьшенной интенсивностью излучения лазера, при такой фокусировке диаметр пучка достигает 0,3 – 0,4 мм. Также произведена настройка камеры на мощности 76 Вт. На максимальной мощности излучения 2кВт, видимых разрушений не появилось. Длительность экспозиции достигла 40 с. Распределение интенсивности показано на рис.15.

Рисунок 15. Распределение мощности излучения



Полученные данные показывают, что пороговое значение мощности находится в диапазоне 1,5-2 МВт/см<sup>2</sup>, при превышении которого происходит разрушения диэлектрического напыления зеркала, что превышает имеющиеся аналоги в мире [14] благодаря более теплопроводной подложке.

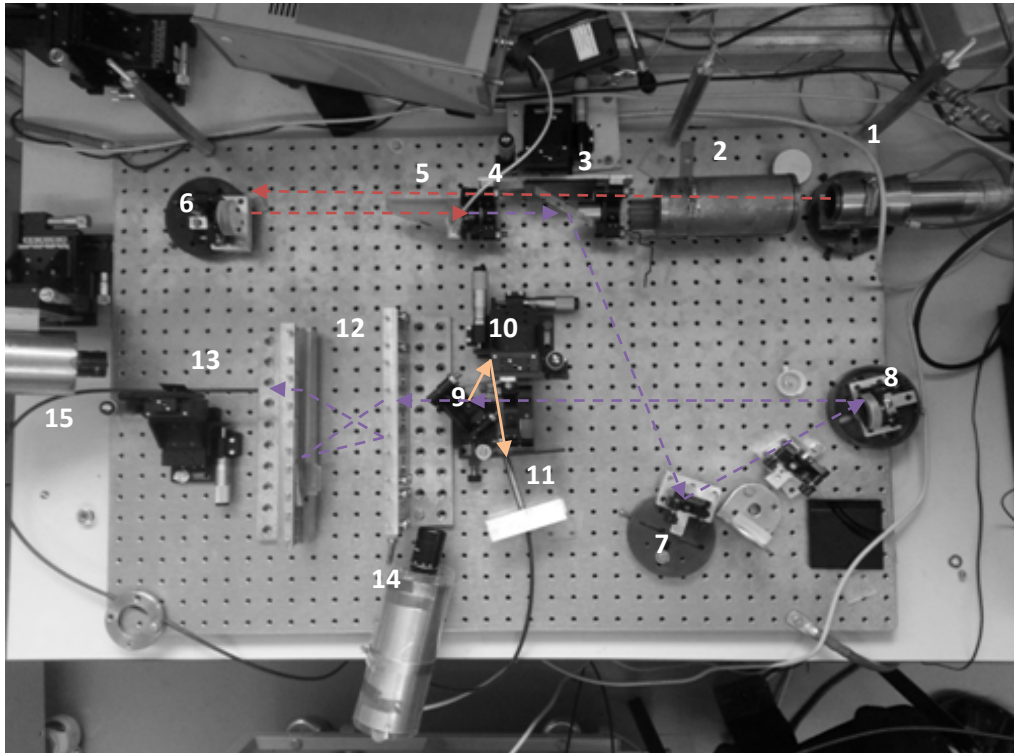
#### 4. Эксперименты на цилиндрических зеркалах

Мы уже подтвердили принципиальную возможность адиабатического удержания фотонов в ловушке из пары сферических зеркал. Для практического применения нерезонансной оптической ловушки в нейтрализаторе более интересна некоторая вытянутая конфигурация с большим объемом области накопления мощности. Действительно, чем больше время пересечения частицами насыщенной излучением области пространства, тем выше эффективность нейтрализации. Так как на данный момент принципиально невозможно изготовление цельного зеркала сложной формы с необходимым высоким коэффициентом отражения (0.999) достаточно большого размера, была создана сложная система, состоящая из набора цилиндрических и сферических сегментов (см. Рис. 16). К тому же такая конфигурация [7] обладает размещивающими свойствами в продольном направлении, что делает поток мощности в ловушке более плавным без «паразитных» фокусировок [8]. Подобную ловушку уже можно будет использовать в экспериментальной установке по нейтрализации пучков отрицательных ионов. Каждая линейка представляет собой цилиндрическую поверхность с сопряженными на концах со сферическими зеркалами, для продольного удержания излучения в системе при многократном отражении. Главный недостаток подобной сборки состоит в стыках, между сегментами зеркал. На них происходят потери излучения, что при высоких мощностях приводит к угрозе разрушения поверхности при длительной лучевой нагрузке.



*Рисунок 16. Схематическое изображение вытянутой ловушки из цилиндрических и сферических зеркал*

Ввиду особенностей геометрии цилиндрических зеркал, необходимо было экспериментально подтвердить эффективность накопления излучения в подобной ловушке. В отличие от сферических зеркал, в цилиндрической системе метод наблюдения, который использовался в прошлом эксперименте, не сработал бы из-за рассеяния излучения на стыках и вытянутой геометрии. Действительно, из-за размеров ловушки и системы зеркал снимок поверхности имел бы сильные искажения, а уменьшить их, удаляя фотокамеру на большое расстояние не представлялось возможным. Поэтому для определения эффективности накопления в подобной ловушке, был использован другой подход, в котором эффективность накопления рассчитывалась по степени влияния различных аттенюаторов на накапливаемое в ловушке излучение. Для этого анализировался уровень стационарно накопленного излучения и скорость его диссипации при быстром выключении накачки накопителя.



*Рисунок 17. Изображение оптического стенда: 1 – иттербиевый волоконный лазер, 2 – аттенюатор-формирователь, 3 – пластина под углом Брюстера, 4 – ячейка Погкельса, 5 – поляризатор, 6, 7, 8 – зеркала, 9 – ИКС, 10 – зеркало, 11 – световод монитора, 12 – ловушка из цилиндрических зеркал, 13 – сигнальный световод, 14, 15 – CCD камера.*

#### **4.1. Схема эксперимента на линейке зеркал**

Фотография стенда представлена на рис 17. В качестве ловушки в нем использовалась система из цилиндрических и сферических зеркал, описанная выше (см . рис. 16).

Для измерения декремента затухания необходимо было обеспечить достаточно быстрое перекрытие излучения на входном отверстии в ловушку (см. рис. 18), чтобы переходной процесс из-за недостаточно быстрого выключения не оказывал влияния на затухание.

В качестве затвора использовался узел, состоящий из ячейки Погкельса, поляризатора и пластины Брюстера, (см. рис. 18).

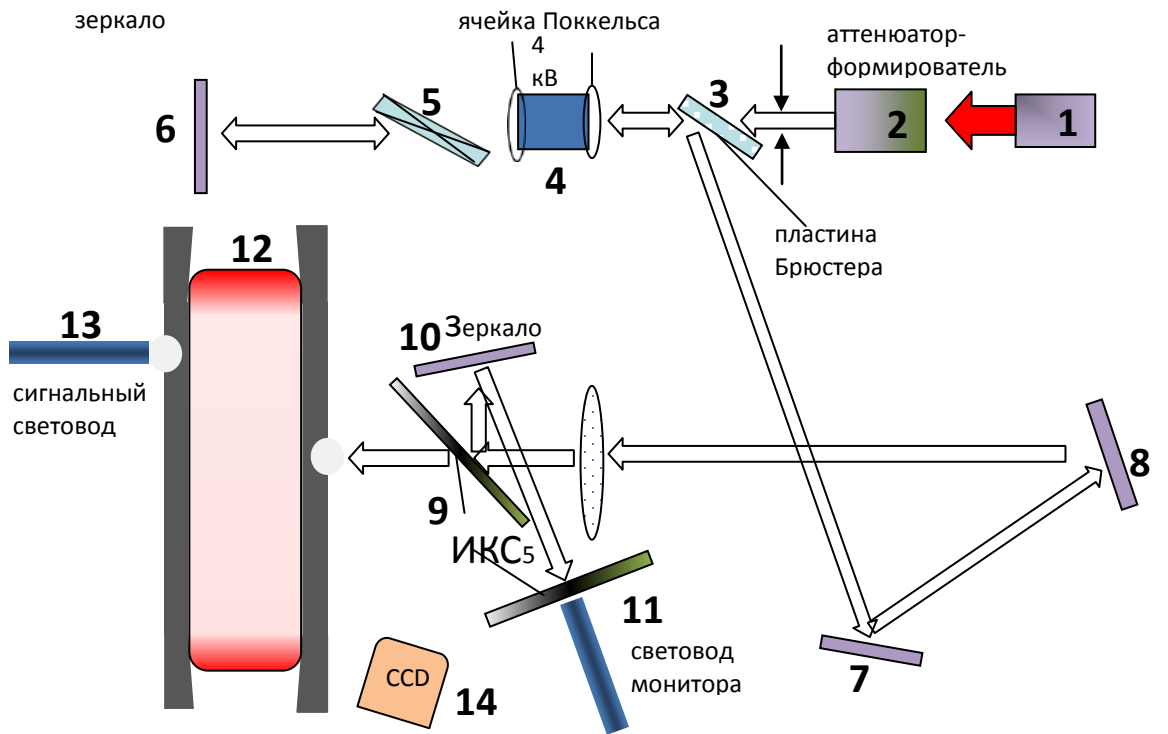


Рисунок 18. Принципиальная схема эксперимента. Изображение оптического стенда: 1 – иттербиевый волоконный лазер, 2 – attenuator-формирователь, 3 – пластина под углом Брюстера, 4 – ячейка Погкельса, 5 – поляризатор, – 6, 7, 8 – зеркала, 9 – ИКС, 10 – зеркало, 11 – световод монитора, 12 – ловушка из цилиндрических зеркал, 13 – сигнальный световод, 14 – CCD камера.



Вначале, неполяризованный лазерный пучок проходит через аттенюатор-формирователь (2), пластину, расположенную под углом Брюстера (3) и ячейку Поக்கельса (4). После двухкратного прохождения поляризатора (5) получается более высокая степень линейной поляризации пучка, с которой тот почти полностью проходит через пластину Брюстера при выключенном напряжении на ячейке Поக்கельса. Если же напряжение подано, то ячейка Поக்கельса меняет поляризацию так, что достаточная часть излучения отражается на пластине под углом Брюстера и проходит дальше по схеме и с помощью двух зеркал направляется ко входу в ловушку. С помощью фокусирующей линзы, получившийся поляризованный пучок подавался на вход ловушки, в которой и происходило накопление излучения. Для точного прицеливания использовалась CCD камера. С помощью сигнального световода, фиксировалось излучение, накопившееся в ловушке, а с помощью световода монитора – входное.

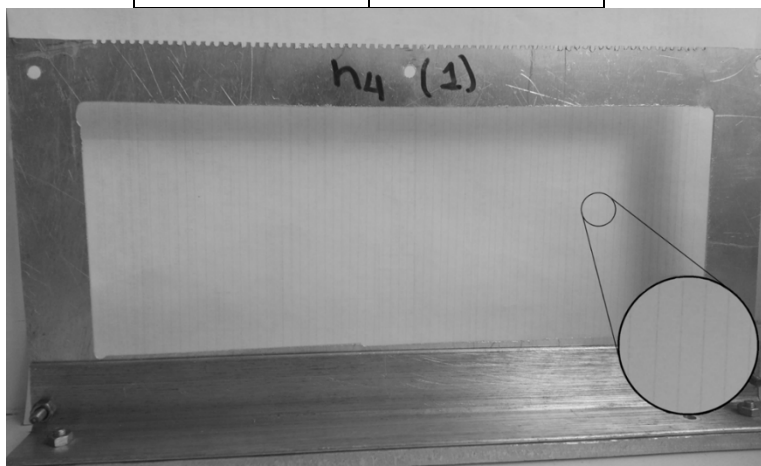
#### 4.2. Определение эффективности накопления

В качестве дополнительных аттенюаторов использованы решетки из вольфрамовой проволоки диаметром  $d=15$  мкм (см. Рис. 19). Каждый аттенюатор представляет собой рамку с вертикально натянутыми вольфрамовой проволокой. Коэффициент ослабления принимался равным  $\alpha = nd$ , где  $n$  – частота проволочек на единицу длины. В таблице 1 приведен список используемых ослабителей.

*Таблица 1. Используемые ослабители*

n - ослабитель, мм	
n1	1/7,5
n2	1/10

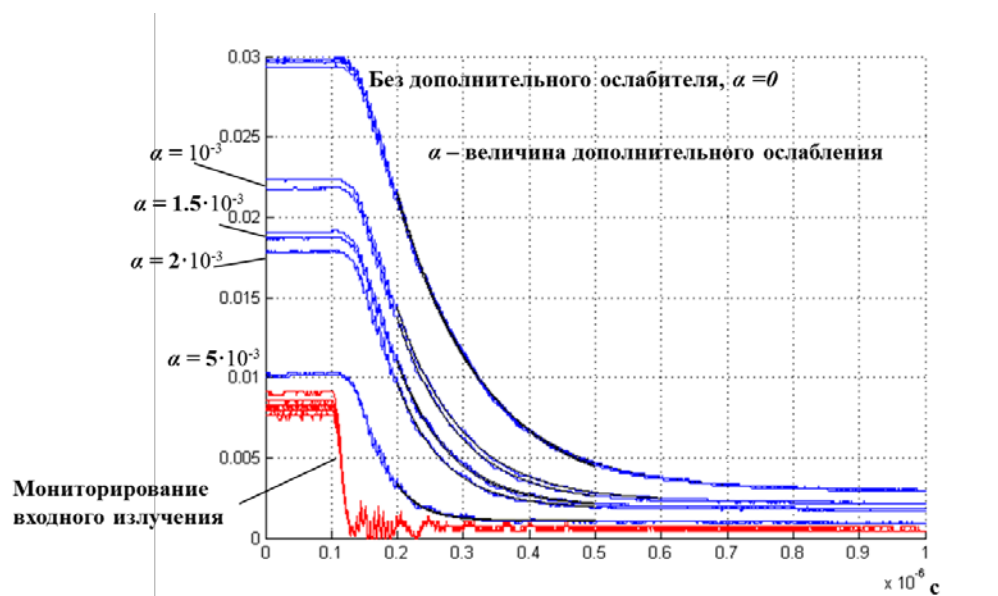
n3	1/15
2 x n4	1/3



*Рисунок 19. Вид проволочного аттенюатора. Вольфрамовая проволока 15 мкм,  $n=0.33 \text{ см}^{-1}$ , 25 см в длину.*

Для того, чтобы рассчитать величину ослабления, с помощью световодов были сняты графики мониторингового сигнала(входного излучения) и диссипации накопленного излучения при выключении ячейки Поккельса(см. Рис. 20). Как видно сигнал без ослабителя имеет более высокий стационарный уровень и медленный декремент затухания, по сравнению с сигналами с ослабителем. Чем выше величина ослабления, тем соответственно ниже стационарный уровень энергии и быстрее затухание.

Рисунок 20. Графики затухания стационарного сигнала с ослаблением и без (синие) и входного излучения (красный).



Чтобы посчитать эффективность накопления, сделаем оценку для стационарных уровней излучения:

$$P_n = P_{n-1}R, \quad (8)$$

Где  $P_n$  — мощность n-го прохода, а  $R$  — величина отражения.

Где выражения для нулевого уровня (без ослабления) представим в виде суммы ряда:

$$S = \sum P = P_0 \cdot \frac{1}{1-R}, \quad (9)$$

В присутствии ослабителя коэффициент накопления будет можно оценить:

$$1 - R' = 1 - (R - \alpha), \quad (10)$$

- где  $\alpha$  – величина дополнительного ослабления. Тогда, для стационарных уровней излучения отношение будет:

$$\frac{S_\alpha}{S} = \frac{1-R}{1-R+\alpha} \quad (11)$$

Так как скорость затухания напрямую связана с накопленным изучением, то для отношения декрементов получаем аналогичное выражение:

$$\frac{\tau_\alpha}{\tau} = \frac{1-R}{1-R+\alpha} \quad (12)$$

Из (11) получим формулу для эффективности накопления:

$$1 - R = \frac{\alpha \cdot S_\alpha}{S - S_\alpha} \quad (13)$$

Вычисления показали хорошую эффективность накопления:

$$(1 - R) = (2,3 \pm 0,5) \cdot 10^{-3}, \quad (14)$$

в пространственной геометрии удобной для нейтрализации пучков отрицательных ионов. Для вычисления эффективности накопления, а также определения погрешности, ставилась серия экспериментов с различными решетками и их комбинациями, по результатам которых и находилось среднее значение.

*Таблица 2. Пример экспериментальных данных полученных для определения эффективности накопления: n – тип ослабителя, A – уровень стационарного сигнала, A0 – уровень стационарного сигнала без ослабителя, (1-R) – посчитанное значение эффективности накопления.*

n	A	A0	(1-R)·10 <sup>3</sup>
n1	2,5377	3,4258	3,71
n2	2,2907	3,6099	2,6
n3	2,2445	3,7244	1,51
n4	1.3404	3.9074	2.61

Как видно из Таблицы 1 и Рис. 20, уровень стационарного сигнала без ослабителя имеет различное значение. По-видимому, основной вклад в погрешность вносит нестабильность чувствительности фотодиодов, особенно, мониторингового канала. Кроме этого возможно некоторое случайное влияние постановки аттенюаторов на первые проходы излучения в ловушке, когда пучок света еще недостаточно расширился. В этом случае ослабление пучка света на этих проходах может сильно варьироваться. Число таких проходов определяется расстоянием, на котором ширина пучка превысит дистанцию между соседними проволочками. В данном случае эта величина порядка 10 проходов. Так же существенными могут оказаться случайные потери на взвешенной в воздухе между зеркалами пыли. Специальных мер по ее фильтрации не предпринималось.

## **Выводы**

Установлено, что эффективность накопления определяется в основном отражательной способностью зеркал и возможно влиянием стыков между отдельными элементами. Таким образом, в отличие от резонаторов типа Фабри-Перо предложенный накопитель не требует сверхточной юстировки и стабилизации оптических элементов и высокого качества используемого излучения, однако, напрямую зависит от отражающей способности зеркал.

Эксперименты проводились в несколько этапов. В первой серии была посчитана нижняя граница коэффициента отражения используемых сферических зеркал, которая составила 99.7%. Также определен их порог разрушения, который подтвердил возможность использования зеркал на кремниевой подложке в стационарных фотонных накопителях с потоком мощности порядка  $100 \text{ кВт/см}^2$ .

В последующих экспериментах, на вытянутой системе зеркал, была разработана и реализована методика определения эффективности накопления на основе анализа процесса затухания излучения в ловушке с дополнительным ослаблением. Проведенные эксперименты показали достаточно высокую эффективность накопления. Это делает возможным использование данной ловушки для экспериментов по нейтрализации пучков.

## Литература

---

- 1 И.А. Котельников, Г.В. Ступаков, Лекции по физике плазмы // НГУ Новосибирск, 1996, с. 8-11
- 2 W. Chaibi, C. Blondel, L. Cabaret, C. Delsart, C. Drag, A. Simonin, Photoneutralization of negative ion beam for future fusion reactor. // E. Surrey, A. Simonin (Eds.), Negative Ions Beams and Sources: 1st International Symposium, AIP Conference Proceedings. — 2009. — Vol. 1097. — P. 385–394.
- 3 J.H. Fink, A.M. Frank. Photodetachment of electrons from negative ions in a 200 keV deuterium beam source. // Lawrence Livermore Natl. Lab. — 1975. — Report UCRL-16844.
- 4 M. Kovari, B. Crowley. Laser photodetachment neutraliser for negative ion beams// Fusion Engineering and Design. — 2010. — Vol. 85. — P. 745–751
- 5 J. Aasi et al., Classical Quantum Gravity 32, 074001 (2015).
- 6 Vanek V., Hursman T., Copeland D., et al., Technology of a laser resonator for the photodetachment neutralizer. // Proc. 3rd Int. Symposium on Production and Neutralization of Negative Ions and Beams, Brookhaven. — 1983. — P.568-584.
- 7 Попов С.С., Бурдаков А.В., Иванов А.А., Котельников И.А. Препринт: <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1504/1504.07511.pdf>
- 8 С.С. Попов, М.Г. Атлуханов, А.В. Бурдаков, М.Ю. Ушкова. Экспериментальное исследование нерезонансного накопления фотонов в системе сферических зеркал. // Оптика и спектроскопия, 2016, том 121, № 1, с. 167–170
- 9 С.С. Попов, М.Г. Атлуханов, А.В. Бурдаков и др. Нерезонансный фотонный нейтрализатор мощных пучков отрицательных ионов. Тезисы XLII международной конференции по физике плазмы и УТС. 9 – 13 февраля 2015 г. – 2015. С. – 395.
- 10 В.В. Козлов, Д.В. Трещев. Биллиарды. Генетическое введение в динамику систем с ударами. – М: Изд-во МГУ, 1991. – 168 с
- 11 Промышленные волоконные лазеры. Электронный ресурс: [http://www.ntoire-polus.ru/products\\_powerful.html](http://www.ntoire-polus.ru/products_powerful.html)
- 12 СпецТелеТехника. Электронный ресурс: <http://www.sptt.ru/sptt/catalog.php?mod=sdu285>
- 13 Арнольд В.И. Математические методы классической механики. Изд. 5-е, стереотипное. М.: Едиториал УРСС, 2003. 62 с. ISBN 5-354-00341-5.
- 14 Диэлектрические зеркала. Электронный ресурс: <http://www.newport.com/High-Performance-SuperMirrors/141095/1033/info.aspx>