

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Багрецова Алиса Николаевна

КУРСОВАЯ РАБОТА

«Измерение карт скоростей фотоионов кислорода»

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №20301

Научный руководитель:

Д.х.н. Бакланов Алексей
Васильевич

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

Судников Антон Вячеславович

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

к.т.н. В.Т. Астрелин

Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Новосибирск 2021

Измерение карт скоростей фотоионов

Багрецова Алиса Николаевна

Физический факультет. Электромагнитный практикум. Курсовая работа.

Группа № 20301, 3 семестр, 2021 год.

Научный руководитель:

Бакланов Алексей Васильевич

Аннотация

Целью работы являлось определение распределения по кинетической энергии для фотоионов атомов кислорода, образующихся при фотодиссоциации молекулы кислорода. Для этой цели была собрана установка, основными частями которой являются лазер на красителе и вакуумная камера, записаны имидж и масс-спектр фотоионов кислорода. На основании полученных данных построена карта скоростей атома кислорода. С помощью математических вычислений определено распределение по кинетической энергии фотоионов кислорода. Результаты хорошо согласуются с известными литературными данными.

Ключевые слова: фотодиссоциация, фотоионы, карта скоростей, лазер на красителе, вакуумная камера, атом кислорода.

Содержание

Введение.....	4
Цель	4
Описание установки.....	5
Результаты эксперимента.....	8
Обработка данных.....	10
Выводы	13
Литература	14

Введение

Кислород – одна из важнейших молекул для нашей планеты и ее жизни. Фотопроцессы с участием молекулярного кислорода применяются в различных областях жизни человека: фотоокисление в органическом синтезе, при фотодинамической терапии, в фотобиохимии, и других областях. Процессы, происходящие при фотодиссоциации кислорода, несут в себе большое значение для фотохимии, фотофизики и фотобиологии. Фотохимия молекулярного кислорода является определяющей для фотохимии атмосферы, а именно для образования озонового слоя, который поглощает разрушительную для живых клеток часть ультрафиолетового излучения. Молекулы озона (O_3) состоят из трех атомов кислорода, и образуются после диссоциации молекул кислорода (O_2) под воздействием солнечного излучения. Наиболее детальную информацию о процессе диссоциации молекулы кислорода под действием излучения дает техника измерения карт скоростей, позволяющая измерять распределение ионов по скоростям [1]. Использование этой техники дает возможность получить данные о распределении по энергии и направлениям вылета фотофрагментов, благодаря чему можно выяснить природу возбужденного состояния молекулы кислорода и механизм его распада.

Формирование карт скоростей фотоионов определяется закономерностями движения ионов в электрическом поле, формируемом используемой системой электродов. Поэтому изучение этой техники соответствует задачам практикума по электромагнетизму.

Цель

Освоить метод измерения карт скоростей фотоионов и получить их распределение по кинетической энергии, образовавшееся в результате фотодиссоциации.

Описание установки

Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 1. Вакуумная камера (номер 1 на рисунке 1) является основной частью экспериментальной установки. Она откачивается турбомолекулярным насосом до глубокого вакуума ($10^{-4} - 10^{-5}$ Па).

В стенке вакуумной камеры находится сопло, соединяющее объем камеры с клапаном (номер 2 на рисунке 1). Клапан заполняется газовой смесью, содержащей 5% кислорода и 95% гелия под давлением 1,1 Бар. Отверстие клапана открывается на 100 мкс с частотой 5 Гц.

Из сопла клапана газ вытекает в объем вакуумной камеры, тем самым формируя молекулярный пучок (номер 3 на рисунке 1). Следом скиммер (номер 4 на рисунке 1) вырезает узкую часть молекулярного пучка, таким образом фильтруя атомы с нулевой поперечной скоростью.

Отфильтрованная часть молекулярного пучка проходит через систему ускоряющих электродов (номер 5-7 на рисунке 1). Эта система представляет собой репеллер (номер 5 на рисунке 1), экстрактор (номер 6 на рисунке 1) и заземленный электрод (номер 7 на рисунке 1). Для измерения карт скоростей фотоионов используются открытые электроды, выполняющие роль электростатической линзы, благодаря чему ионы с одинаковой по направлению и величине скоростью приходят в одну точку на детекторе. Разность напряжений между репеллером и экстрактором создает вытягивающее напряжение U_1 , а разность напряжений между экстрактором и заземленным электродом создает ускоряющее напряжение U_2 . Поле между заземленным электродом и детектором отсутствует.

Между репеллером и экстрактором в камеру заводится излучение лазера (номер 8 на рисунке 1). С помощью линзы лазер фокусируется в самом центре молекулярного пучка. В фокусе лазера происходит фотовозбуждение молекул кислорода, а также фотоионизация образующихся атомов кислорода. Соотношение напряжений U_1 и U_2 выставляется таким образом, чтобы ионы, образовавшиеся в области возбуждения, приходили на детектор в одно и то же время.

Ионы выталкиваются электрическим полем и попадают на детектор (номер 9 на рисунке 1), который фиксирует карту скоростей для ионов выбранной массы.

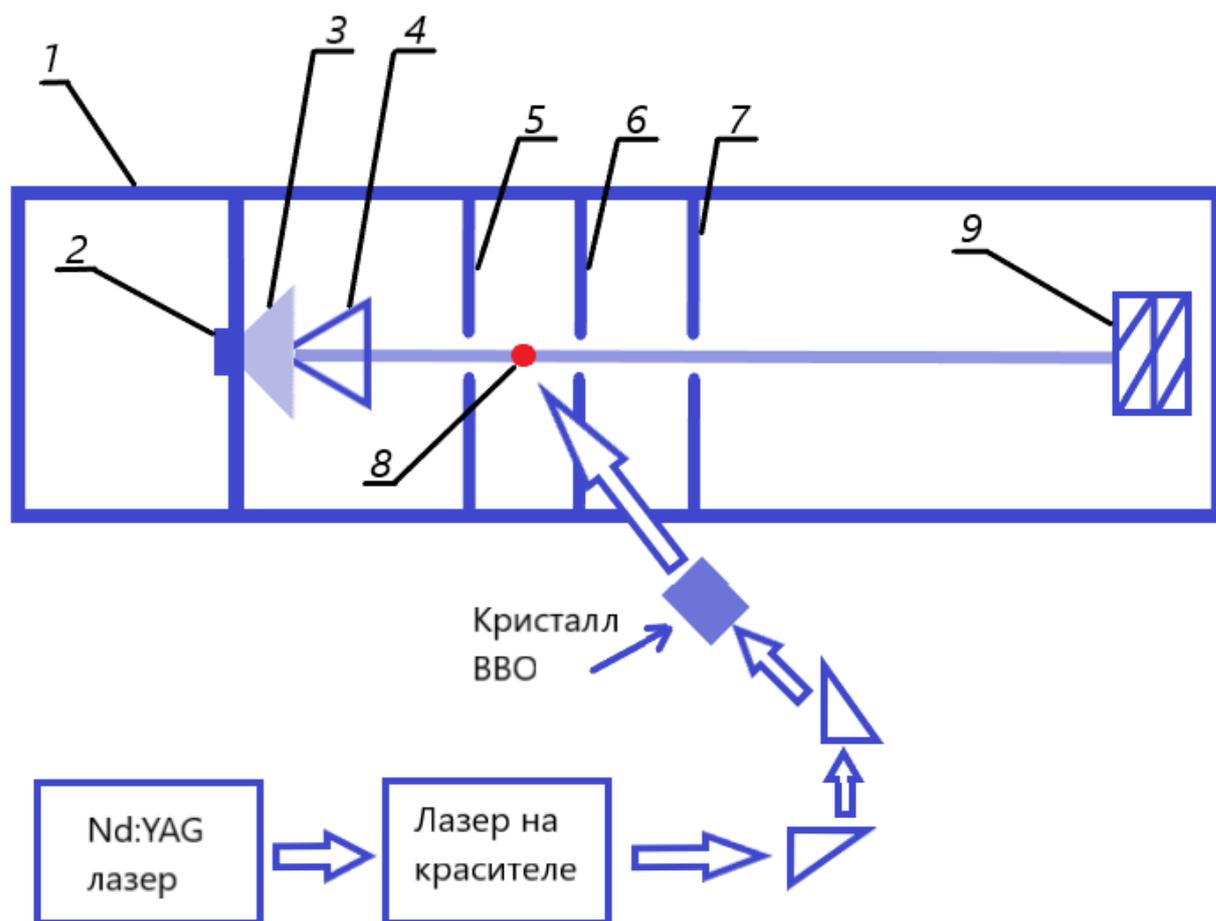


Рисунок 1. Схема экспериментальной установки. 1-вакуумная камера; 2-клапан(сопло); 3-поток газовой смеси; 4-скиммер; 5, 6, 7-система ускоряющих электродов; 5-репеллер; 6-экстрактор; 7-заземленный электрод; 8-область фотовозбуждения молекул кислорода; 9-детектор.

В работе использовалась лазерная система, состоящая из лазера на красителе, накачиваемого третьей гармоникой твердотельного Nd:YAG лазера, длина волны которого составляет 355 нм. В качестве красителя использовался кумарин 120. Длина волны излучения лазера на красителе равняется 451,312 нм. Излучение лазера на красителе попадает на нелинейный кристалл бета бората бария, где его частота удваивается, образуя вторую гармонику с длиной волны 225,656 нм [2]. Именно при такой длине волны излучения происходит резонансное поглощение на двухфотонном переходе в процессе ионизации атома кислорода. Этот процесс схематически изображен на рисунке 2. Длительность импульса составляет 10 нс. Она определяется длительностью импульса лазера накачки. Энергия импульса второй гармоники приблизительно равна 0,5 мДж. Величина энергии выбирается достаточной для обеспечения наблюдаемого сигнала, определяется опытным путем. Частота следования импульсов 10 Гц. Далее излучение фокусируется в область молекулярного пучка.

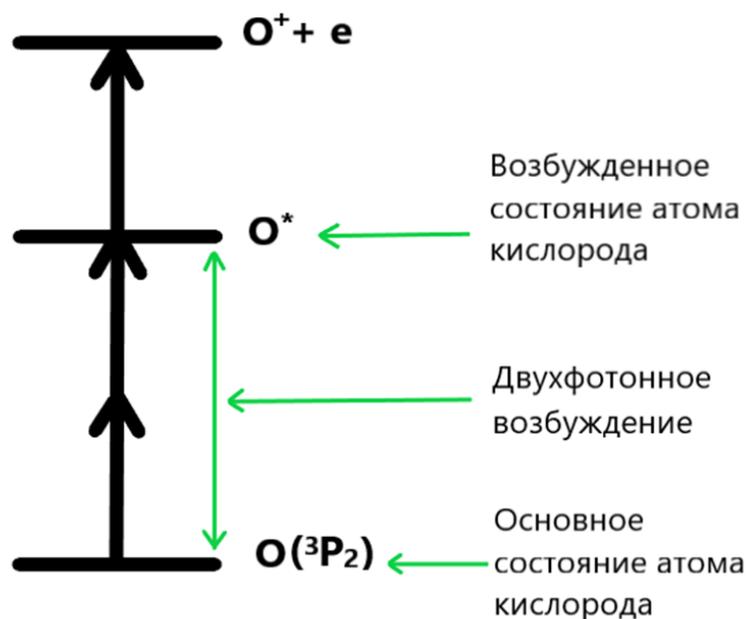


Рисунок 2. Процесс ионизации атома кислорода.

После пролета зоны свободного дрейфа ионы попадают на детектор. Детектор состоит из двух микроканальных пластин, которые представляют собой стеклянные пластины с большим количеством каналов. Схема одной такой пластины представлена на рисунке 3. Каждый канал работает как вторичный электронный умножитель – при попадании иона в канал, ион выбивает из стенки канала электрон, электрон под действием электрического поля, приложенного к микроканальным пластинам, ускоряется и, сталкиваясь со стенкой, выбивает еще один электрон. Из одного иона на выходе микроканальных пластин образуется до десяти тысяч электронов. Применение двух пластин позволяет достичь усиления до 10^7 . После двух микроканальных пластин размещен анод, на который прилетают электроны. Время прилета ионов фиксируется по скачку напряжения на аноде.

Для детектирования точки прилета иона на детектор в качестве анода используется стеклянная пластина, покрытая люминофором. Лавина электронов, образовавшаяся при попадании иона на детектор, вылетает из микроканальных пластин и ударяется об анод, вызывая его свечение. Люминесценция анода регистрируется с помощью видеокамеры и передается на компьютер для дальнейшей обработки.

Результаты эксперимента

Для получения распределения по кинетической энергии атомов кислорода использовался метод измерения карт скоростей фотоионов.

При свободном разлете ионов с фиксированной скоростью из одной точки в каждый момент времени все ионы располагаются на поверхности сферы, называемой Ньютоновой сферой. Размер этой сферы равен скорости ионов, умноженной на время с момента старта ионов. Облако ионов, представляющее сферу, при попадании на детектор проецируется в виде круга (смотри рисунок 4). Радиус круга будет равен поперечной скорости ионов, умноженной на время пролета до детектора. При этом, если распределение ионов по сфере было неравномерным по углам, что определяется симметрией перехода в исходной молекуле, то это отразится на распределении интенсивностей на детекторе.



Рисунок 4. Схема и принцип работы микроканальной пластины. Заимствованно на сайте Hamamatsu [3].

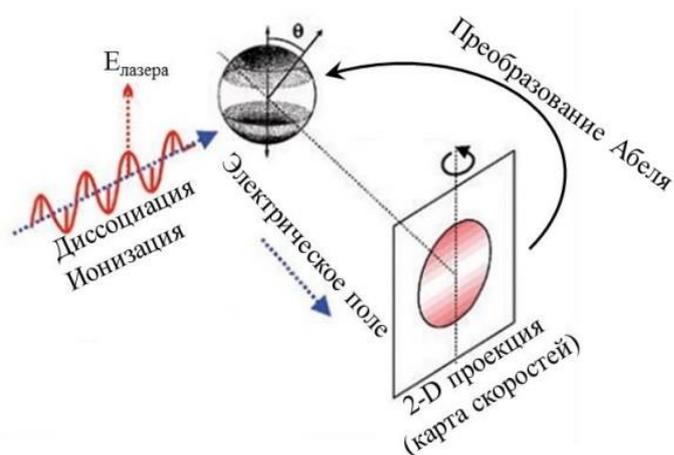
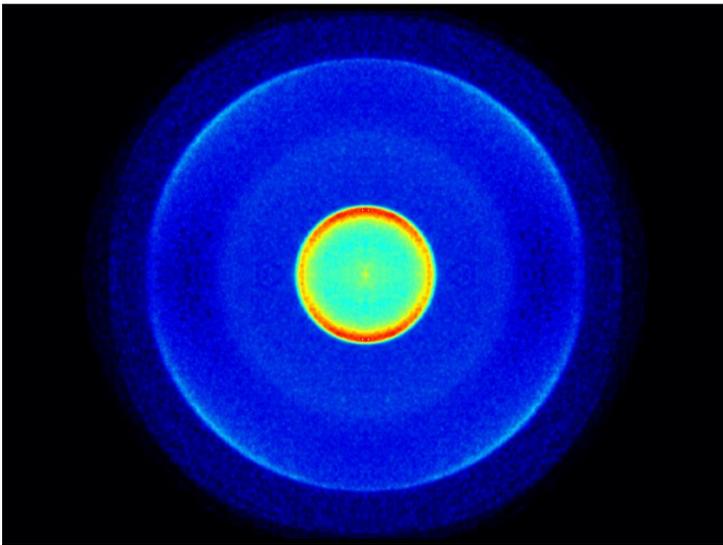


Рисунок 3. Проекция трехмерного распределения по углам на плоскость. Заимствованно из работы [4].

Поскольку трехмерное распределение по скоростям имеет цилиндрическую симметрию, возможно однозначное восстановление этого распределения по его проекции на плоскость детектора. Для решения задачи восстановления трехмерного распределения по его проекции в данной работе использовалось обратное преобразование Абеля, включенное в программу для обработки карт скоростей DaVis. Таким образом, мы получили имидж для атомов кислорода, представленный на рисунке 5.



Установка для измерения карт скоростей работает и как масс-спектрометр – время пролета иона до детектора пропорционально корню из его массы. Масс-спектр позволяет определить промежуток времени, соответствующий времени прилета фотоионов кислорода на детектор. Полученные масс-спектры представлены на рисунке 6.

Рисунок 6. Имидж атомов кислорода.

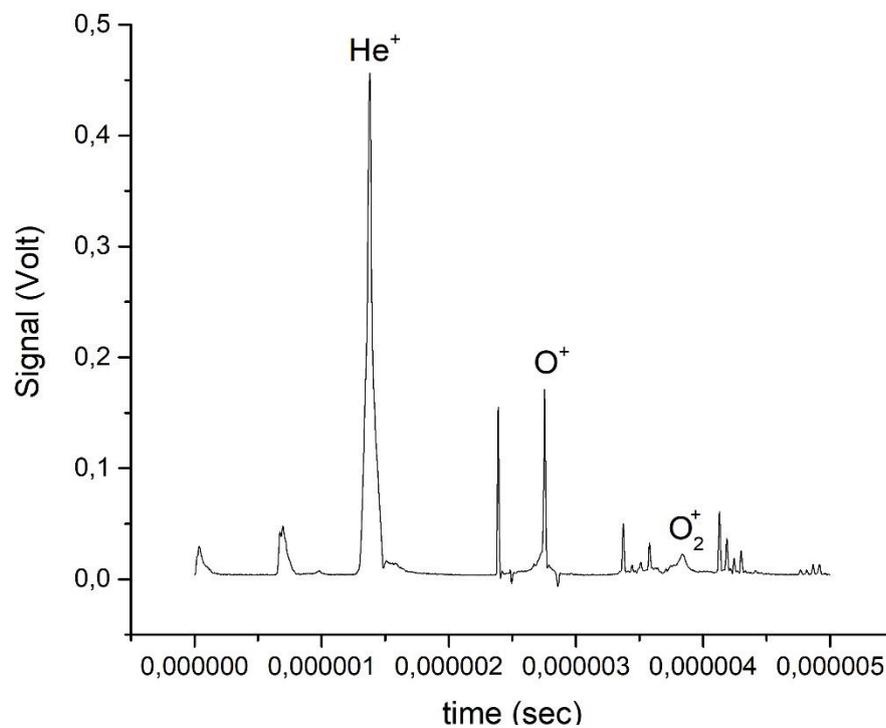


Рисунок 5. Масс-спектр газовой смеси.

Обработка данных

Карты скоростей для атомов кислорода были получены следующим образом: использовалась газовая смесь, состоящая из 5% кислорода, 95% гелия, давление газовой смеси равно 1 атм. Для фотовозбуждения использовалось лазерное излучение с длиной волны 225,656 нм. Использование излучения с указанной длиной волны позволило в однолазерном эксперименте проводить фотовозбуждение молекулы кислорода и последующую резонансную ионизацию образующихся атомов кислорода. Обработка данных производилась с помощью программы DaVis и Origin — для численного анализа данных и научной графики. При использовании описанного выше подхода получены карты скоростей, представленные на рисунке. Из представленных карт скоростей было получено распределение по энергии.

Обозначим функцию распределения атомов кислорода по скоростям как $f(V)$. Вероятность иметь скорость в диапазоне от $(V + dV)$ равна $f(V) * dV$. Представим это в терминах энергии:

$$E = \frac{m * V^2}{2} \quad (1)$$

$$dV = \frac{dE}{mV} \quad (2)$$

Значит, вероятность иметь кинетическую энергию в диапазоне от E до $(E + dE)$ равна $f(V) * \frac{dE}{mV}$. Чтобы получить правильную зависимость от энергии, необходимо поделить исходный сигнал $f(V)$ на V . Последующие вычисления и построение графиков проводились в программе Origin.

На рисунке 7 изображен график зависимости сигнала, получаемого с детектора, от скорости в пикселях. Данный график имеет два пика. Левый пик соответствует малому кругу на рисунке, то есть процессу, в котором на кинетическую энергию атома в молекуле приходится небольшая энергия. На правом пике соответственно сигнал от атомов с большей скоростью.

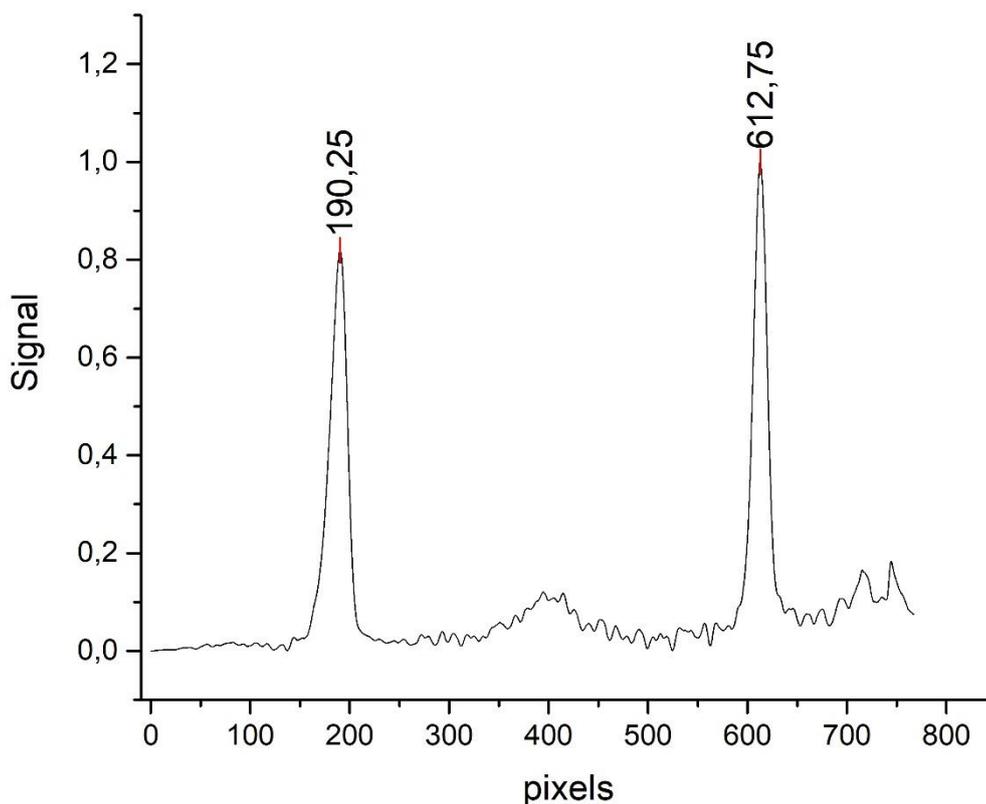


Рисунок 7. График зависимости сигнала, получаемого с детектора, от скорости.

Для того, чтобы получить карту скоростей атома кислорода, переведем ось X из пикселей в м/с. Воспользовавшись формулой (1), получим значение скорости, соответствующее правому пику. Далее вычислим коэффициент пропорциональности для всей оси X. Результат представлен на рисунке 8.

На рисунке 9 показан промежуточный результат между переходом из распределения по скоростям в распределение по энергиям, т.е. функция распределения $f(V)$ с рисунка, которая уже поделена на V . Ось X переведена из V в V^2 , но еще не откалибрована. Калибровка проводилась следующим образом: из литературных данных нам известно, что дальний пик имеет энергию 1,95 эВ. Это соответствует 375462,56 пикселям в квадрате. Отсюда мы вычисляем коэффициент пропорциональности для всей оси. Таким образом, мы определяем, чему соответствует второй пик, равный 36195,06.

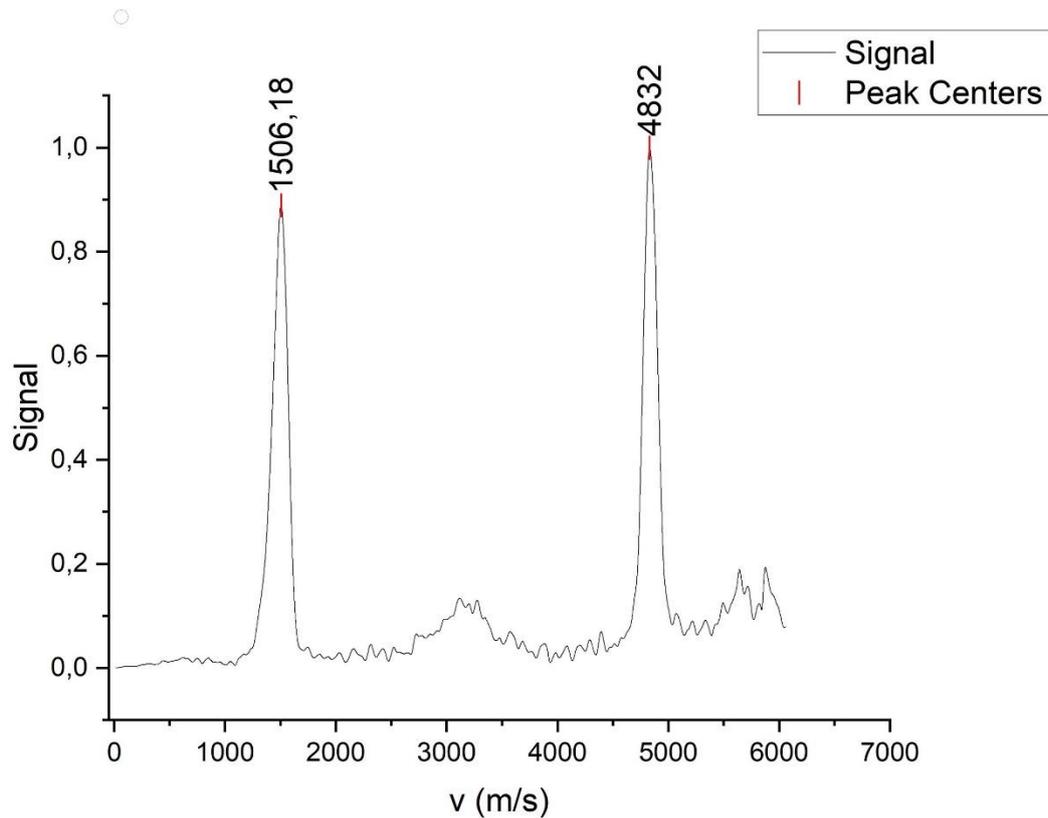


Рисунок 8. Карта скоростей атома кислорода.

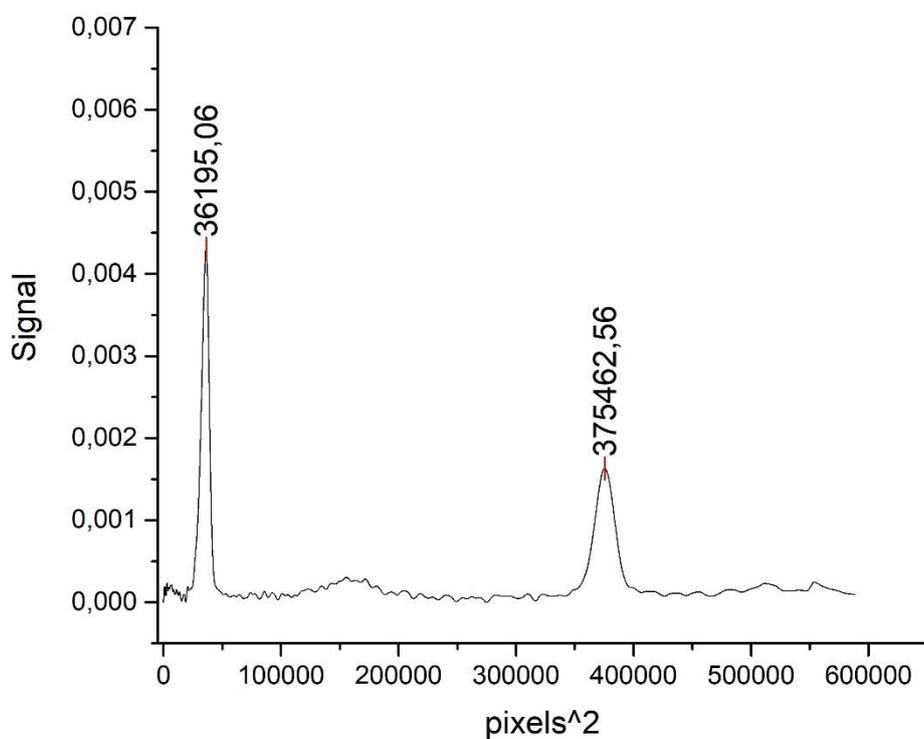


Рисунок 9. График зависимости сигнала, получаемого с детектора, от скорости, возведенной в квадрат.

Распределение по кинетической энергии изображено на рисунке 10. Правый пик априори 1,95эВ. Значение левого пика получилось равным 0,187 эВ.

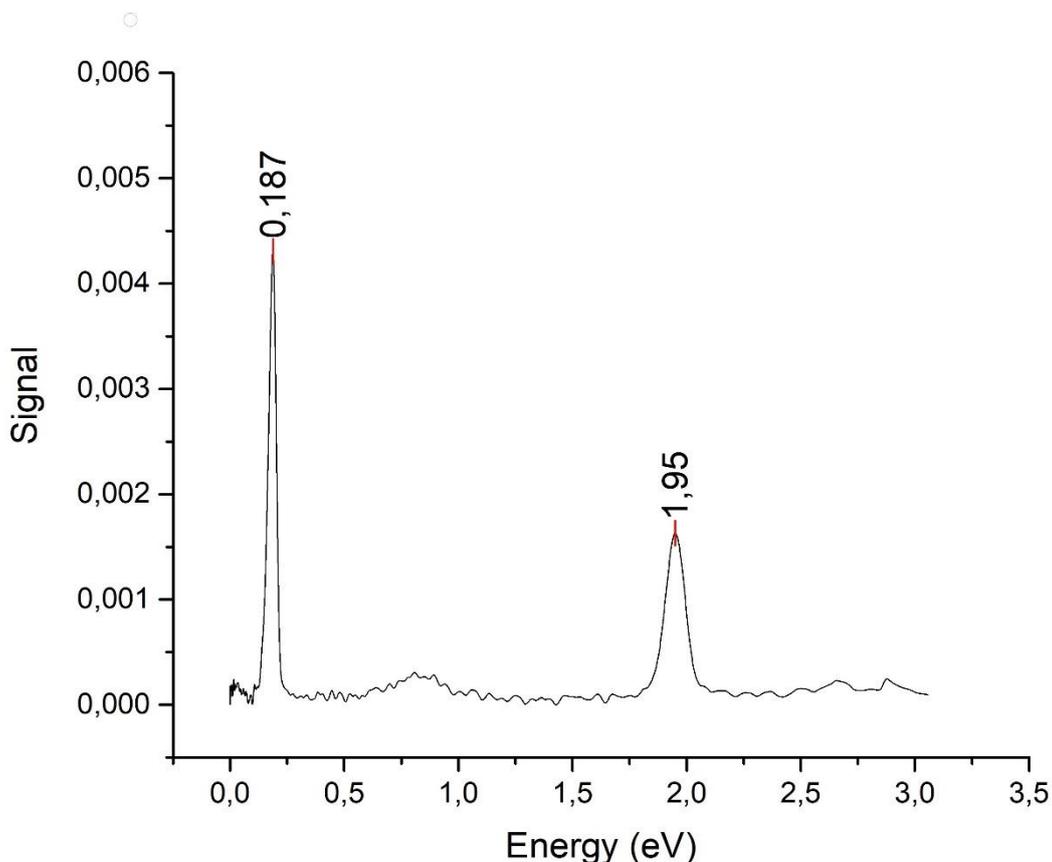


Рисунок 10. Распределение по кинетической энергии молекулы кислорода.

Следует также упомянуть, что при вытекании газа в вакуум через сопло могут образовываться кластеры (димеры) из нескольких молекул кислорода. Мы можем оценить их примерное количество. По литературным данным оно составляет около 0,1%, следовательно вкладом кластеров можно пренебречь.

Выводы

В настоящей курсовой работе проведено исследование механизма образования фотоионов кислорода при фотовозбуждении. По результатам эксперимента удалось вычислить распределение по кинетической энергии атома кислорода. Используя для калибровки значение кинетической энергии 1,95эВ для правого пика, соответствующего большому кругу на рисунке 5, мы получили значение 0,187 эВ для левого пика, соответствующего малому кругу на рисунке 5. Полученные нами результаты совпадают с литературными данными.

Литература

1. Eppink A. T. J. B., Parker D. H. Velocity map imaging of ions and electrons using electrostatic lenses: Application in photoelectron and photofragment ion imaging of molecular oxygen // *Review of Scientific Instruments*. – 1997. – Т. 68, № 9. – С. 3477-3484.
2. Богомолов А. С. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук «Изучение механизма образования сигнелентного кислорода при фотовозбуждении Ван-дер-Ваальсовых комплексов молекулярного кислорода X-O₂ с использованием техники измерения карт скоростей фотофрагментов».
3. Hamamatsu Photonics. MCP (microchannel plate) and MCP assembly. – 2016. – URL.
4. Ashfold M. N. R., Nahler N. H., Orr-Ewing A. J., Vieuxmaire O. P. J., Toomes R. L., Kitsopoulos T. N., Garcia I. A., Chestakov D. A., Wu S. M., Parker D. H. Imaging the dynamics of gas phase reactions // *Physical Chemistry Chemical Physics*. – 2006. – Т. 8, № 1. – С. 26-53.