

УДК 535-31:535.317.681

## ОДНОЛИНЗОВЫЙ МОНОХРОМАТОР ИЗ ФТОРИДА МАГНИЯ НА ОБЛАСТЬ ДЛИН ВОЛН 113–140 НМ

Е. А. Вишняков, А. О. Колесников, А. В. Митрофанов

*Описана оптическая схема компактного фокального монохроматора с плосковыпуклой линзой из монокристалла фторида магния для получения и анализа спектров пропускания образцов в вакуумном ультрафиолете в полосах прозрачности воздуха в области длин волн 113–140 нм. Малые расстояния от источника до детектора в интервале от 5 до 40 мм позволяют работать на воздухе, используя наличие полос совместного пропускания кислорода и водяного пара на длинах волн 114.2, 116.4, 118.5, 121.2, 123.5 и 127.0 нм. Рассчитаны спектры поглощения воздушного зазора различной толщины в исследуемой области спектра. Измерены спектры дейтериевой лампы в области 113–140 нм после прохождения излучения через воздушный зазор различной толщины. Спектральная разрешающая способность монохроматора, достигающая 50 вблизи границы пропускания фтористого магния, определяется совместным вкладом дисперсии линзы и фильтрацией излучения в полосах спектрального пропускания воздуха.*

**Ключевые слова:** фокальный монохроматор, однолинзовый монохроматор, фторид магния,  $MgF_2$ , вакуумный ультрафиолет, ВУФ.

*Введение.* Монохроматоры различных типов [1] широко применяются в физических и биологических экспериментах. Диспергирующими элементами монохроматоров в вакуумной ультрафиолетовой (ВУФ) и мягкой рентгеновской областях спектра, в том числе при использовании на воздухе, служат призмы [2], дифракционные решётки [3], в том числе с неэквидистантными штрихами [4], и комбинации призм и решёток [5].

---

ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: vishnyakovea@lebedev.ru.

В данной статье мы описываем принципы работы фокального монохроматора с одиночной миниатюрной линзой из монокристалла фторида магния (линза с радиусом кривизны 2 мм и толщиной по оси 1.4 мм была изготовлена в ФИАНе В. С. Масловым [6]). Такой прибор может быть использован для исследований ВУФ спектров пропускания полимеров, трековых мембран и органических пленок [7], причем измерения можно проводить не только в вакууме, но и на воздухе при комнатных условиях.

*Оптическая схема монохроматора.* Фокальные монохроматоры известны ещё со времён Х. Рубенса и Р. Вуда [8], но в настоящее время используются редко. Фокальный монохроматор (рис. 1) состоит из фокусирующей линзы и подвижной диафрагмы перед детектором. Так как фокусное расстояние линзы зависит от  $\lambda$ , то перемещение диафрагмы позволяет эффективно выделять сигнал на определённых длинах волн, при этом регистрируя спектр. Фокальный монохроматор оказывается тем более эффективным, чем сильнее дисперсия материала линзы в рассматриваемой области спектра.

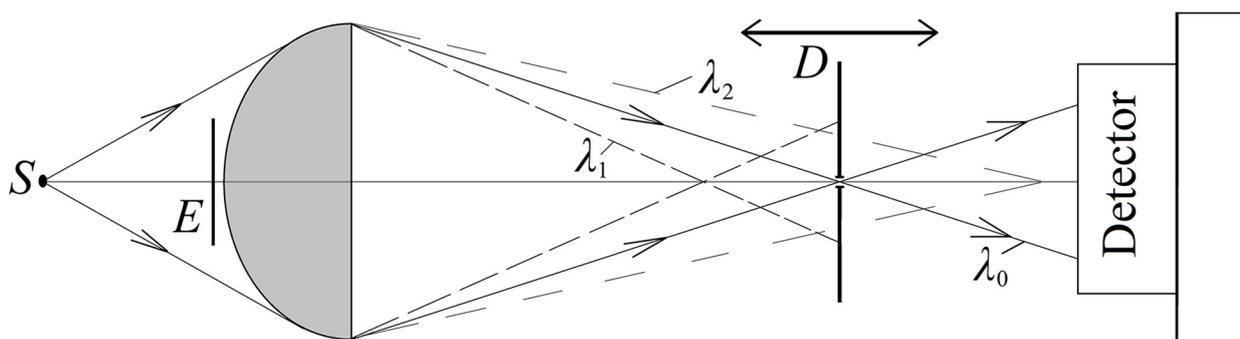


Рис. 1: Схема фокального монохроматора на основе одиночной плосковыпуклой линзы. Излучение от источника  $S$  фокусируется на различных участках оптической оси для разных  $\lambda$ . Возможны варианты как с экраном  $E$ , так и без него. Перемещение точечной диафрагмы  $D$  позволяет выделять излучение с определённой длиной волны.

В 1984 году сотрудники Белловской Лаборатории (США) Т. Чайлдс, В. Ройер и Н. Смит впервые описали простой фокальный ВУФ монохроматор на основе линзы из фтористого лития [9]. Их монохроматор был предназначен для спектральной области с энергией фотонов вблизи границы пропускания LiF ( $E < 11.7$  эВ,  $\lambda > 106$  нм).

Мы предлагаем компактный фокальный ВУФ монохроматор с миниатюрной одиночной плосковыпуклой линзой из фторида магния для работы в ВУФ полосах прозрачности воздуха в спектральной области 113–140 нм, где  $\text{MgF}_2$  обладает более сильной дисперсией, чем LiF, что позволяет достичь более высокой разрешающей способности.

Кроме того, фтористый магний не столь гигроскопичен, как LiF. Поэтому использование линзы из  $\text{MgF}_2$  и сокращение расстояния от источника до детектора до 10–20 мм может позволить проводить измерения характеристик образцов, например, прозрачности тонкоплёночных фильтров, не только в вакуумной камере, но и на воздухе при комнатных условиях в окнах прозрачности атмосферы [10].

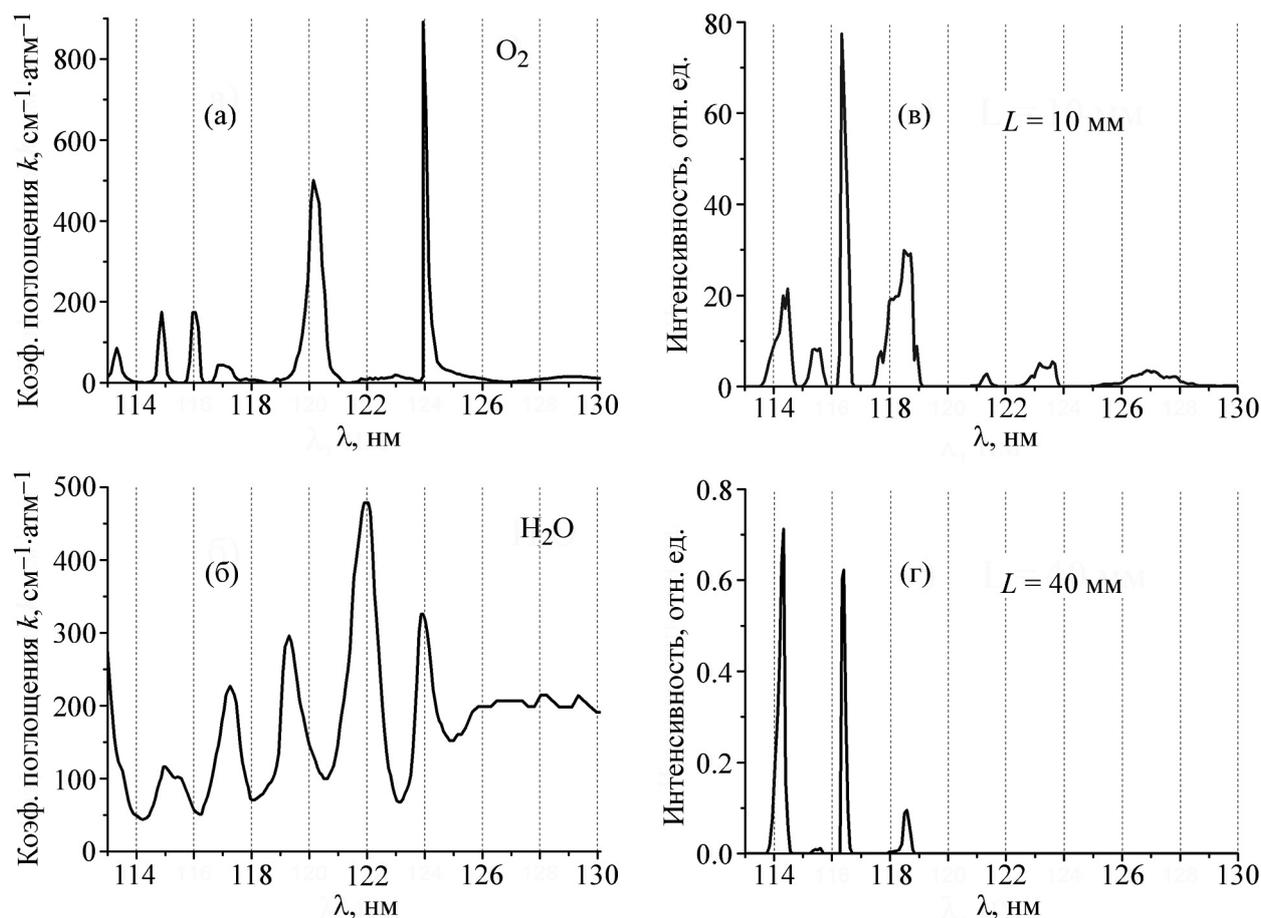


Рис. 2: Спектры поглощения молекул  $\text{O}_2$  (а) и  $\text{H}_2\text{O}$  (б) в диапазоне 113–130 нм [11, 12], а также рассчитанные спектры излучения водородной лампы после прохождения излучения через воздушный зазор длиной  $L = 10$  мм (в) и 40 мм (г).

*Результаты моделирования и эксперимента.* Основными поглощающими агентами в ВУФ в воздухе выступают молекулярный кислород и пары  $\text{H}_2\text{O}$ . На рис. 2 представлены спектры коэффициентов поглощения молекул кислорода (а) и водяного пара (б) в диапазоне 113–130 нм, а также численно смоделированные спектры излучения водородной лампы в диапазоне 113–130 нм, испытавшие поглощение воздушного зазора длиной

$L = 10$  мм (в) и  $L = 40$  мм (г) между лампой и детектором. Спектры поглощения молекул кислорода и водяного пара в ВУФ взяты нами из работ [11, 12]. Исходный спектр излучения водородной лампы для расчёта был взят из [13]. В расчётах использовались параметры воздуха в лаборатории: атмосферное давление  $p = 743$  торр, температура  $+21$  °С, отн. влажность 87%.

Совпадающие полосы прозрачности кислорода и водяного пара соответствуют длинам волн 114.2, 116.4, 118.5, 121.2 и 123.5 нм, что подтверждается приведёнными на рис. 2 смоделированными спектрами (в) и (г). Видно, что при увеличении расстояния от источника до детектора с  $L = 10$  мм до  $L = 40$  мм излучение в более слабых полосах прозрачности (121.2, 123.5 нм, а также в слабых полосах 115.4 и 127.0 нм) постепенно исчезает, а остаётся только в трёх наиболее сильных полосах: 114.2, 116.4, 118.5 нм.

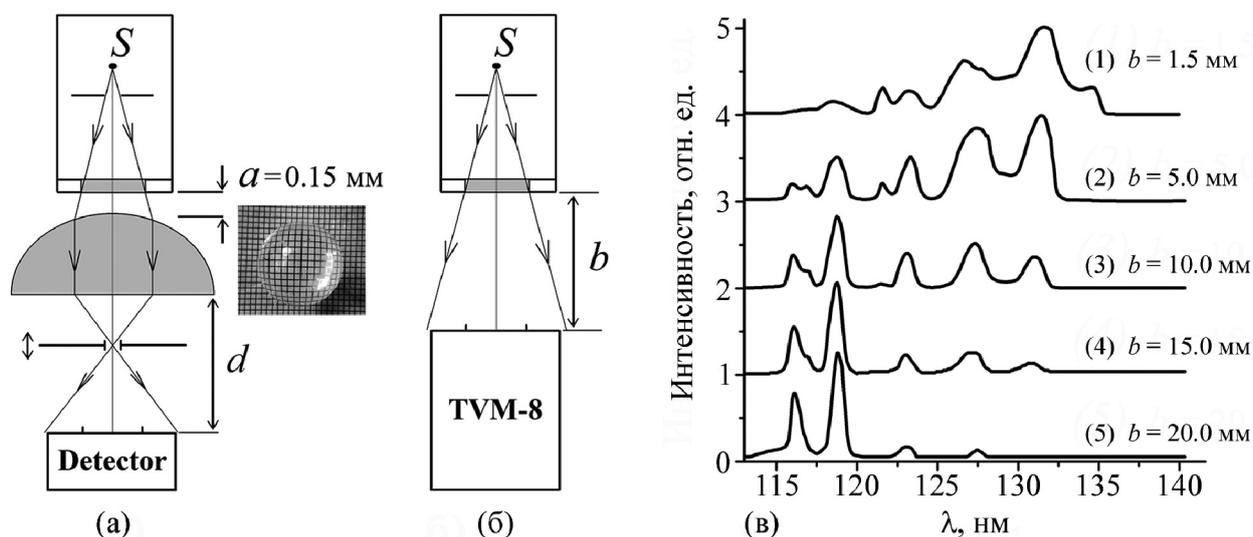


Рис. 3: (а) Схема фокального монохроматора с миниатюрной линзой  $MgF_2$  (внешний вид на врезке) и подвижной диафрагмой; (б) эксперимент по регистрации влияния поглощения воздуха в зазоре  $b$  на спектр дейтериевой лампы ЛД-3 (источник  $S$ ) при помощи двухрешётчатого монохроматора TVM-8; (в) спектры, зарегистрированные в диапазоне 113–140 нм в схеме (б) при различных значениях зазора  $b$ . Спектр (3) приведён в натуральную величину, спектры (1) и (2) уменьшены в 27 раз и в 4 раза, соответственно, а спектры (4) и (5) увеличены в 2 и в 4 раза, соответственно.

Спектральная область 113–140 нм удобна для проведения исследований, так как здесь расположены сильные линии излучения молекул водорода и дейтерия [13–15]. В эксперименте по регистрации влияния поглощения воздуха в зазоре различной длины

$b$  на спектр в области 113–140 нм мы использовали дейтериевую лампу ЛД-3 с выходным окном  $\text{MgF}_2$  и двухрешёточный вакуумный монохроматор TVM-8 со спектральным разрешением 0.8 нм (рис. 3). Монохроматор TVM-8 построен по двукратной схеме Джонсона–Онака с вычитанием дисперсии, детектор – солнечно-слепой ФЭУ-142.

Результаты измерений, приведённые на рис. 3(в), демонстрируют ослабление излучения в относительно слабых полосах прозрачности воздуха (115.4, 121.2, 123.5 и 127.0 нм) при увеличении воздушного зазора  $b$  от 1.5 мм до 20 мм. Лишь в полосах прозрачности 116.4 нм и 118.5 нм остаются относительно сильные линии излучения при  $b = 20$  мм. Из-за сильного поглощения материала окна дейтериевой лампы, в зарегистрированном спектре отсутствуют линии излучения в полосе прозрачности 114.2 нм, а интенсивность в полосе 116.4 нм оказывается ниже, чем в полосе 118.5 нм (ср. рис. 3(в) для дейтериевой и рис. 2(г) для водородной лампы).

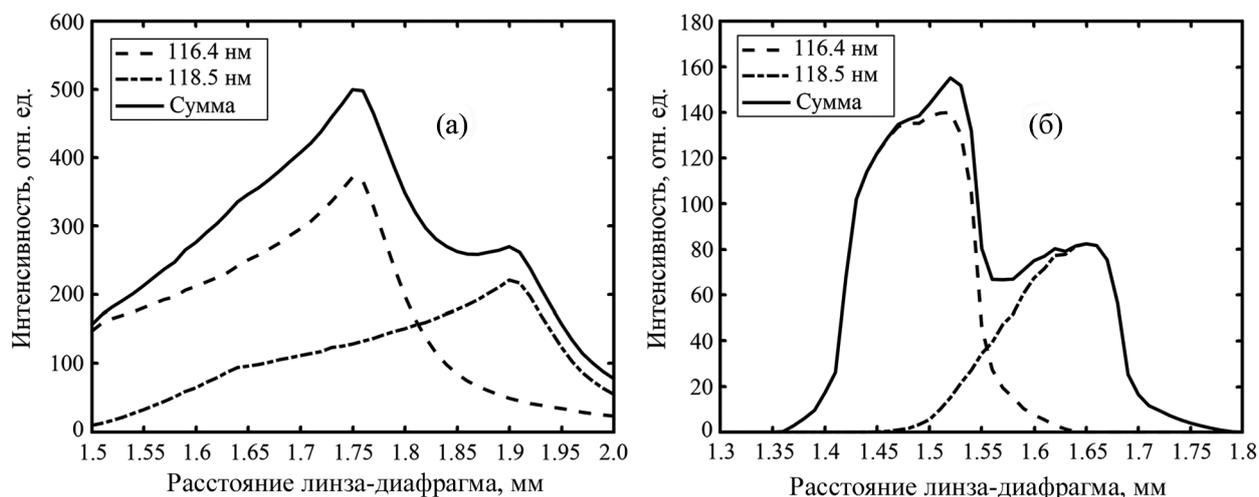


Рис. 4: Численно смоделированные спектры, регистрируемые на детекторе в схеме фокального монохроматора (а) при отсутствии экрана  $E$  на рис. 1 и (б) при наличии экрана  $E$  диаметром 2 мм, закрывающего параксиальные лучи. Спектры рассчитаны на случай дейтериевой лампы при расстоянии от линзы до детектора  $d = 20$  мм.

На рис. 4 представлены расчёты спектров, которые будут зарегистрированы при помощи фокального монохроматора с расстоянием  $d = 20$  мм от линзы до детектора, при перемещении диафрагмы  $D$  на рис. 1 в двух случаях: при отсутствии экрана  $E$ , который перекрывает параксиальные лучи, и при его наличии. В расчётах использован диаметр отверстия диафрагмы 5 мкм, положение диафрагмы отсчитывается от плоской поверхности линзы. В качестве источника взята дейтериевая лампа, расчёты проведены

с учётом поглощения материала  $\text{MgF}_2$ -линзы [16]. В имеющейся схеме разрешающая способность монохроматора на длине волны 116.4 нм составляет  $R \approx 55$ . Отметим, что фторид магния обладает двулучепреломлением, однако это не заметно при  $R < 100$ .

*Заключение.* В работе предложен фокальный монохроматор на основе одиночной плосковыпуклой сферической  $\text{MgF}_2$ -линзы для работы на воздухе в ближнем ВУФ диапазоне спектра вблизи границы пропускания  $\text{MgF}_2$  (в области 113–140 нм). При сравнительно небольших расстояниях от выходного окна источника (дейтериевой или водородной лампы с окнами из фтористого магния [14, 15]) до детектора излучения в пределах от 2 мм до 20–40 мм сигнал на некоторых длинах волн в областях совместного пропускания молекул кислорода и водяного пара (114.2, 116.4, 118.5, 121.2 и 123.5 нм) оказывается достаточно интенсивным для детектирования и последующего анализа.

Описываемый компактный фокальный монохроматор с подвижной точечной диафрагмой может быть использован для экспресс-анализа спектров пропускания тонких плёнок, фильтров и других образцов на воздухе с умеренной спектральной разрешающей способностью  $\sim 50$ .

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] А. С. Топорец, Успехи физических наук **XL**(2), 255 (1950). DOI: 10.3367/UFNг.0040.195002с.0255.
- [2] А. Г. Турьянский, О. В. Коновалов, С. С. Гижга, Н. Д. Бейлин, Письма в ЖЭТФ **100**(8), 601 (2014). DOI: 10.1134/S0021364014200119.
- [3] А. О. Колесников, Е. А. Вишняков, Е. Н. Рагозин, А. Н. Шатохин, Квант. электроника **50**(10), 967 (2020). DOI: 10.1134/S1063784220110109.
- [4] Е. А. Вишняков, А. О. Колесников, Е. Н. Рагозин, А. Н. Шатохин, Опт. спектроск. **125**(5), 687 (2018). DOI: 10.1134/S0030400X18110346.
- [5] Sh. Hashimoto, T. Ikeda, H. Takeuchi, I. Harada, Appl. Spectrosc. **47**(8), 1283 (1993). DOI: 10.1366/0003702934067775.
- [6] В. С. Маслов, А. В. Митрофанов, Труды Шестой Всероссийской конференции по физике вакуумного ультрафиолетового излучения и взаимодействию излучения с веществом, с. 236 (1982).
- [7] A. V. Mitrofanov, D. N. Tokarchuk, T. I. Gromova, et al., Radiat. Meas. **25**(1-4), 733 (1995). DOI: 10.1016/1350-4487(95)00234-6.
- [8] H. Rubens, R.W. Wood, XXVII. Focal isolation of long heat-waves. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science **21**:122, 249 (1911). DOI: 10.1080/14786440208637025.

- [9] T. T. Childs, W. A. Royer, N. V. Smith, *Rev. Sci. Instr.* **55**(10), 1613 (1984). DOI: 10.1063/1.1137626.
- [10] А. Н. Зайдель, Е. Я. Шрейдер, *Спектроскопия вакуумного ультрафиолета* (М., Наука, 1967), с. 349.
- [11] Х. Окабе, *Фотохимия малых молекул* (М., Мир, 1981), с. 214.
- [12] K. Watanabe, and M. Zelikoff, *J. Opt. Soc. Amer.* **43**(9), 753 (1953). DOI: 10.1364/JOSA.43.000753.
- [13] В. М. Тийт, Р. В. Шацкина, *Атлас многолинейчатого спектра молекулярного водорода: область 102.5–165 нм* (Таллин, Бит, 1981).
- [14] Л. П. Шишацкая, С. А. Яковлев, Г. А. Волкова, *Оптический журнал* № 7, 72 (1995).
- [15] И. А. Невяжская, В. А. Тяпков, Н. В. Шилина, В. Б. Шилов, *Оптический журнал* **79**(8), 108 (2012). DOI: 10.1364/JOT.79.000521.
- [16] M. W. Williams, E. T. Arakawa, *Appl. Opt.* **18**(10), 1477 (1979). DOI: 10.1364/AO.18.001477.

Поступила в редакцию 17 февраля 2022 г.

После доработки 25 апреля 2022 г.

Принята к публикации 25 апреля 2022 г.