

УДК 533.9.082.5

ПРИМЕНЕНИЕ ОБЪЕМНОГО АМПЛИТУДНОГО МОДУЛЯТОРА В ОПТИЧЕСКОМ СПЕКТРОМЕТРЕ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ЗАГРЯЗНЕНИЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Запорожец Д. В.¹, Яковенко Н. А.²

APPLICATION OF A VOLUMETRIC AMPLITUDE MODULATOR IN THE OPTICAL
SPECTROMETER TO MONITOR ATMOSPHERIC POLLUTION

Zaporozhets D. V., Yakovenko N. A.

The work describes a scheme of the optical spectrometer model with the application of a light volumetric amplitude modulator for the LiNbO₃ monocrystal. The calculations of the spectrometer sensibility have been carried out, and its potential characteristics and the ways to improve them have been given. The spectrometer can be widely applied to detect and test atmospheric pollution and smokiness rate indoors.

Введение

Для обнаружения и тестирования загрязнений атмосферы в виде аэрозольных выбросов (мелких частиц, продуктов сгорания, паров бензина и химических соединений) применяются спектрометры различных физических принципов функционирования и конструктивных вариантов исполнения. Широкое применение нашли оптические спектрометры благодаря возможности использования источников когерентного излучения — лазеров [1]. Поскольку лазеры обеспечивают диаграмму электромагнитного поля излучения с малым углом расходимости, удаётся получить большую длину взаимодействия оптического излучения с исследуемой средой в сравнительно небольшом объёме. Это позволяет реализовать оптимальные условия для достижения максимальной чувствительности спектрометра при приемлемых размерах области взаимодействия.

Важным обстоятельством является возможность повышения чувствительности спектрометра при применении низкочастотного объёмного модулятора на основе ниобата лития LiNbO₃. Модулятор работает в режиме возбуждения резонансных колебаний на частоте 200 кГц.

1. Блок-схема спектрометра и его чувствительность

В настоящем исследовании применяется оптический спектрометр, блок-схема которого представлена на рис. 1. Экспериментальный стенд собран на стандартной установке измерительной голографической УИГ-22К, основанной на типичной схеме исследований, описанной в [2] и дополненной некоторыми конструктивными элементами, позволяющими увеличить чувствительность устройства. Такими элементами являются быстродействующий фотодиод ФПЛ-70А (диапазон рабочих частот $\lambda=0,4-1,6$ мкм, постоянная времени протектированного сигнала $\tau=100$ нс, диаметр приёмной площадки $D = 70$ мкм) и селективный микровольтметр В6-1 (диапазон рабочих частот 150 кГц–35 МГц, полоса пропускания в широкополосном режиме приёма 10 кГц, а в узкополосном режиме 1 кГц).

Источником оптического сигнала служит гелий-неоновый лазер (1) ЛГН-208А, на выходе которого получается излучение мощностью 1 мВт с круговой поляризацией, а длина волны излучения составляет 630 нм. Модулятор света (2) устанавливается между линзой (3), стоящей после поляризатора (4), и четвертьволновой пластинкой (5), а анализатор

¹Запорожец Денис Владимирович, аспирант кафедры оптоэлектроники Кубанского государственного университета.

²Яковенко Николай Андреевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой оптоэлектроники Кубанского государственного университета.

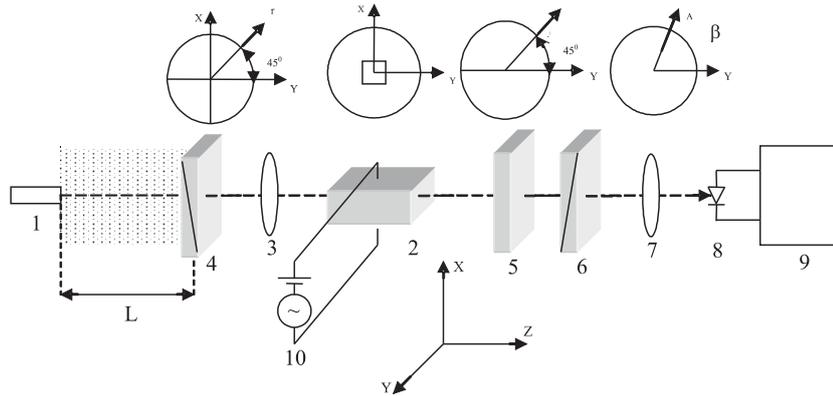


Рис. 1. Блок-схема оптического спектрометра

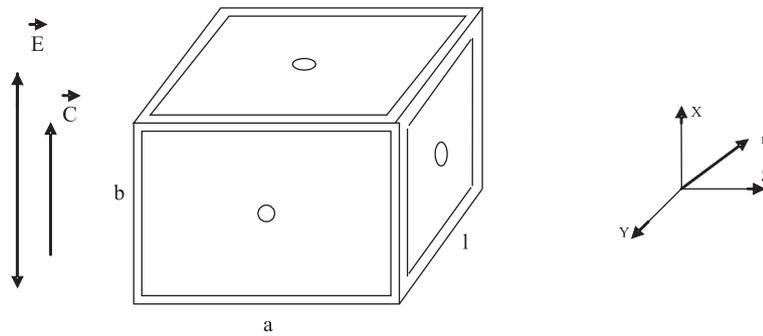


Рис. 2. Расположение образца

(6), стоящий после четвертьволновой пластинки, обеспечивает преобразование фазомодулированного оптического сигнала в амплитудномодулированный. Сигнал, сфокусированный второй линзой (7) на фотодиоде (8), после детектирования измеряется селективным микровольтметром (9) В6-1. Управляющий электрический сигнал модуляции создается стандартным генератором (10) ГЗ-56/1.

Рабочей средой в модуляторе света служит монокристалл ниобата лития, выращенный в лабораториях КубГУ. На рис. 2 показан образец, вырезанный в виде параллелепипеда с размерами боковых граней $a = 13,7$ мм, $b = 11,4$ мм, $l = 20,8$ мм, причем оптическая ось C параллельна грани размером b . Если вдоль оси C приложить электрическое поле напряженностью \vec{E} , луч света пропустить через отверстия в диафрагмах (диаметр отверстий 2,0 мм, а алюминиевые электроды нанести так, что по периметру граней остаётся неметаллизированная область шириной 1 мм), находящихся на боковых гранях, получим объёмный модулятор света, работающий на поперечном эффекте Поккельса. Для достижения полуволнового смещения фазы оптического сигнала на кристалле LiNbO_3 тре-

буется напряжение для данной конструкции объёмного модулятора с амплитудой около 1700 В. Однако, благодаря пьезоэлектрическим свойствам сегнетоэлектрического кристалла LiNbO_3 , в нём возбуждаются резонансные колебания на частоте 200 кГц, обеспечивающие 100 % модуляцию при напряжении модулирующего сигнала амплитудой около 70 В.

Как видно из рис. 1, длина области взаимодействия лазерного излучения со средой равна L . При прохождении лазерного излучения мощностью P_0 через среду, обладающую на длине волны 630 нм коэффициентом поглощения α_0 (в наших исследованиях это воздух атмосферы), в случае появления аэрозольных загрязнений с параметром потерь α_3 получаем на входе измерительной схемы (перед поляризатором (4)) величину мощности

$$P = P_0 e^{-(\alpha_0 + \alpha_3)L}. \quad (1.1)$$

Изменение мощности, обусловленное наличием загрязнений, равно

$$\begin{aligned} \Delta P &= P_0 e^{-\alpha_0 L} - P_0 e^{-(\alpha_0 + \alpha_3)L} \approx \\ &\approx \alpha_3 L P_0 e^{-\alpha_0 L}. \end{aligned} \quad (1.2)$$

Соотношения (1.2) получено в предположении, что $\alpha_3 L \ll 1$, при этом экспонента заменялась первыми двумя членами её разложения.

Чувствительностью спектрометра называется такое минимальное значение коэффициента затухания α_3^1 , при котором ещё возможно обнаружение изменения ΔP уровня протектированного сигнала за счёт изменения мощности.

В предположении идеального преобразования оптического излучения в электрический сигнал детектором (8) и отсутствия потерь на элементах схемы (2–7) возможно провести оценку чувствительности спектрометра.

Мощность шума, выделяющегося на идеальном фотодетекторе в полосе частот $\Delta\nu$, в случае идеального согласования равна при отсутствии излучения от лазера [3]

$$P_\omega = 2h\nu\Delta\nu, \quad (1.3)$$

где h – постоянная Планка, ν – частота излучения лазера.

Соотношение, учитывающее флуктуации напряжения на выходе идеального детектора при подаче на него оптического излучения мощностью P , можно получить, исходя из выражения

$$U^2 = 2ZP, \quad (1.4)$$

где U – амплитуда выделившегося на детекторе напряжения, Z – сопротивление фотодетектора.

Шумовые флуктуации напряжения ΔU из (1.3) и (1.4) имеют вид

$$\Delta U = \pm\sqrt{2ZP_\omega} = \pm 2\sqrt{Zh\nu\Delta\nu}. \quad (1.5)$$

С учетом шумовых флуктуаций (1.4) и (1.5) при определении мощности шума электрического сигнала, выделившегося на детекторе, нетрудно представить

$$\begin{aligned} \frac{(U \pm \Delta U)^2}{2Z} &= \frac{U^2}{2Z} \pm \frac{\Delta U U}{Z} + \frac{\Delta U^2}{2Z} = \\ &= P \pm 2\sqrt{2h\nu\Delta\nu P} + P_\omega. \end{aligned} \quad (1.6)$$

Из соотношения (1.6) следует, что флуктуации мощности, вызванные шумовым излучением, определяются вторым членом суммы. Отсюда критерий чувствительности спектрометра можно определить, учитывая (1.2) и (1.6), из уравнения

$$\alpha_3^1 L P_0 e^{-\alpha_0 L} = 2\sqrt{2h\nu\Delta\nu P}. \quad (1.7)$$

Учитывая (1.1) и полагая, что $\alpha_3 \ll \alpha_0$, из (1.7) находим

$$\alpha_3 = \frac{2}{L} \sqrt{\frac{2h\nu\Delta\nu}{P_0 e^{-\alpha_0 L}}}. \quad (1.8)$$

Из (1.8) можно определить оптимальную длину L_0 пути взаимодействия лазерного луча с загрязнённой средой (определив экстремум функции (1.8) по переменной L)

$$L_0 = \frac{2}{\alpha_0}. \quad (1.9)$$

Подставим (1.9) в (1.8) и найдём формулу для определения чувствительности спектрометра α_3^{11} в случае оптимальной длины области взаимодействия

$$\alpha_3^{11} = e\alpha_0 \sqrt{\frac{2h\nu\Delta\nu}{P_0}}, \quad (1.10)$$

где e – основание натурального логарифма.

Пусть $\alpha_0 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$ (согласно данным измерений, приведенным в [1], в условиях хорошей видимости ослабление излучения гелий-неонового лазера вдоль земной поверхности составляет около 10 дБ/км). Принимаем $L_0 = 1000 \text{ м}$, $P_0 = 10^{-3} \text{ Вт}$, а полосу пропускания – равной $\Delta\nu = 10^4 \text{ Гц}$. Считая $\nu = 5 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$ и учитывая, что $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$, из (1.10) найдём значение чувствительности спектрометра $\alpha_3^{11} = 1,4 \cdot 10^{-8} \text{ м}^{-1}$.

Реально построенный спектрометр имеет чувствительность значительно меньшую, что связано с рядом факторов, проявляющихся в процессе экспериментальных исследований. В реальном спектрометре следует учесть следующие факторы: 1) шумы фотодетектора; 2) потери при преобразовании оптического излучения в низкочастотный сигнал; 3) потери на элементах схемы (2–7); 4) шумы лазера, изменяющие уровень P_0 ; 5) шумы усилителя В6-1; 6) флуктуации коэффициента модуляции модулятора при воздействии на него температурных изменений; 7) трудности обеспечения оптимальной длины взаимодействия оптического излучения с окружающей средой.

1. Шумы фотодетектора можно связать с эффективной шумовой температурой [3]

$$T_n = \frac{h\nu}{k}, \quad (1.11)$$

где k – постоянная Больцмана.

Это соотношение даёт температуру источника шума, эквивалентного квантовому шуму,

т. е. имеющего ту же плотность энергии в единичной полосе частот.

Далее, используя уровень шума при комнатной температуре 293 К в качестве начального уровня, можно с каждым значением температуры сопоставить вполне определённый уровень шума. Шум-фактор F (взятый в разгах) связан с эффективной шумовой температурой следующим соотношением

$$F = 1 + \frac{T_n}{T_g}, \quad (1.12)$$

где T_g — эффективная шумовая температура антенны. Из (1.11) видно, что коэффициент шума в оптическом диапазоне велик. Например, при $\nu = 5 \cdot 10^{14}$ Гц; $T_n = 25\,000$ К, а $F = 86$.

Коэффициент шума N_F , взятый в децибелах, равен

$$N_F = 10 \lg F. \quad (1.13)$$

В рассматриваемом примере $N_F = 19$ дБ.

2. Реальные приёмники имеют более высокий уровень шума. Если квантовая эффективность фотоприёмника равна 0,1 (на один испущенный фотоэлектрон приходится 10 принимаемых фотонов), то в этом же диапазоне частот $T_n = 2,5 \cdot 10^5$ К, $F = 860$, а $N_F = 29$ дБ.

3. Потери на элементах схемы (2–7) составляют около 10 дБ.

4. Шумы уровня мощности излучения лазера P_0 могут быть уменьшены применением более качественных источников питания.

5. В цепи шумов приёмной части спектрометра вклад шума усилителя В6-1 достаточно небольшой — добавка к N_F около 3 дБ.

6. При термостатировании модулятора из LiNbO_3 удаётся получить стабильный во времени сигнал. Однако в течение времени установления температуры образца (порядка 30 мин) спектрометр должен прогреваться.

7. Как следует из приведенных выше оценок, оптимальная длина участка взаимодействия составляет около 1 000 м. При изменении параметра α_0 она также должна изменяться. Проблема решается применением открытого интерферометра Фабри-Перо. При его добротности 20 000 и расстоянии между зеркалами, равном 5 см, получается эквивалентная длина пути взаимодействия 1 000 м,

а объём пространства взаимодействия составляет величину около 100 см^3 .

Эксперимент по оценке чувствительности спектрометра проводился в двух вариантах — при расстоянии $L = 1$ м и с применением интерферометра Фабри-Перо.

В первом случае сигнал, зарегистрированный на частоте модуляции 200 кГц, имел величину 10 мВ на выходе селективного вольтметра. Уровень шума без включения лазера составлял 1,1 мкВ, а при включённом лазере — 1,9 мкВ.

Во втором случае сигнал модуляции имел уровень около 1,5 мВ, уровень шума при включённом источнике излучения равнялся 1,5 мкВ. Показания спектрометра были подвержены дрейфу, обусловленному отсутствием термостабилизации интерферометра Фабри-Перо — показания выходного прибора изменялись за 30 с на 10–15 %.

Заключение

Разработан макет спектрометра для мониторинга загрязнений окружающей среды. Благодаря применению объёмного амплитудного модулятора оптического излучения, работающего на частоте 200 кГц, удалось достичь чувствительности, достаточной для регистрации и тестирования загрязнений атмосферы в виде аэрозольных выбросов. Анализ теоретических расчётов чувствительности спектроскопа показал пути его совершенствования — применение интерферометра Фабри-Перо с последующей термостабилизацией модулятора и интерферометра.

Литература

1. Квантовая электроника. Маленькая энциклопедия / Под ред. Жаботинского М. Е. М.: Сов. энциклопедия, 1969. 432 с.
2. Запорожец Д. В., Яковенко Н. А. Расчёт электродинамической системы для широкополосных оптических модуляторов // ЖТФ. 2003. Т. 73. Вып. 10. С. 88–92.
3. Павлов А. В. Оптико-электронные приборы. М.: Энергия, 1974. 359 с.