

УДК 621.376:536.89

Г.Ф. Коняхин, С.А. Косиков

Українська інженерно-педагогічна академія, Харків

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ВЛИЯНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ПЛОТНОСТИ ГАЗОВОЙ СРЕДЫ НА КОЭФФИЦИЕНТ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В статье проанализировано влияние локальных изменений плотности газовых сред, возникающих в результате возбуждения в них высокочастотных механических колебаний, на коэффициент преломления. Получены формулы для оценки изменения величины коэффициента преломления на границе раздела объект – газовая среда.

Ключевые слова: механические колебания, газовая среда, оптическое излучение, коэффициент преломления.

Введение

Постановка проблемы. Оптические методы измерения, основанные на определении разности фаз двух интерферирующих волн оптического излучения (опорного и сигнального), нашли широкое применение в промышленности как средство контроля в ходе выполнения некоторых технологических процессов, а также при проведении прикладных исследований. Наличие случайной оптической неоднородности при прохождении опорного или сигнального оптических излучений изменяет оптическую длину пути, что в ряде случаев приводит к серьезным погрешностям измерений. Причинами появления таких неоднородностей являются изменение температуры, изменение показателей преломления оптических элементов приборов, механические и акустические колебания. При проведении измерений параметров механических колебаний различных объектов следует учитывать влияние самого вибрирующего объекта на среду, в которой он расположен. Частотный диапазон механических колебаний при исследовании в газовых средах достигает 10^9 Гц, при этом, ввиду большого затухания, плотность газовой среды при удалении от вибрирующего объекта стремится к значению, равному плотности невозбужденной среды. В свою очередь, изменение плотности среды приводит к изменению коэффициента преломления и соответственно к изменению оптической длины пути, что приводит к погрешности при измерении разности фаз.

Анализ публикаций. В работе [1] излагается теория распространения механических и электромагнитных колебаний в слоистых средах. В некоторых работах проводится анализ факторов, влияющих на результаты измерений перемещений исследуемого объекта. В частности, в [2, 3] отмечается влияние температуры, давления и состояния газовой среды, в которой расположен исследуемый объект, на точность измерений. В [4] рассмотрены вопросы,

относящиеся к обработке результатов измерений амплитуды быстропеременных процессов. В [2] предлагаются некоторые рекомендации по устранению влияния факторов на точность измерений. Из рассмотрения этих работ следует, что одним из основных направлений исследований в области оптических измерений, является поиск способов устранения флуктуаций оптической длины пути, а также поиск наиболее простых средств обработки результатов измерений, обладающих достаточной простотой для практического применения. Однако все эти направления не полностью отображают результаты исследования в области высокочастотных механических колебаний объектов.

Целью данной работы является оценка влияния высокочастотных механических колебаний объекта на величину коэффициента преломления возмущающего оптического излучения.

Основная часть

Разность фаз $\Delta\varphi$ двух интерферирующих волн (опорной и сигнальной), имеющих одинаковые начальные фазы, может быть определена из формулы [5]

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi(l_1n_1 - l_2n_2)}{\lambda}, \quad (1)$$

где λ – длина волны оптического излучения в вакууме;

l_1, l_2 – расстояния, проходимые первой и второй волнами;

n_1, n_2 – коэффициенты преломления сред, проходимых соответственно опорным и сигнальным оптическими излучениями.

Зависимость коэффициента преломления газовой среды от ее плотности определяется законом Лоренц-Лоренца [5]. В соответствии с этим законом

$$\frac{1}{\rho} \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = R, \quad (2)$$

где n – коэффициент преломления газовой среды;
 ρ – плотность газовой среды;
 R – удельная молекулярная рефракция газовой среды.

Решая уравнение (2) относительно n , получим

$$n = \sqrt{\frac{1 + 2R\rho}{1 - R\rho}}. \quad (3)$$

В соответствии с [6] изменение плотности газовой среды при прохождении волны механических колебаний составляет

$$\Delta\rho = -\frac{\rho_0 \varepsilon}{1 + \varepsilon}, \quad (4)$$

где $\Delta\rho$ – изменение плотности газовой среды;

ρ_0 – плотность невозмущенной газовой среды;

ε – деформация объема газовой среды.

Пусть смещение исследуемого объекта вдоль оси x происходит в соответствии с законом

$$\xi(x, t) = \xi_0 e^{-\alpha x} \sin(2\pi ft + \frac{2\pi}{\lambda_m} x), \quad (5)$$

где ξ_0 – амплитуда смещения;

α – коэффициент затухания механических колебаний в газовой среде;

f – частота механических колебаний;

λ_m – длина волны механических колебаний;

t – время.

Тогда деформация элементарного объема газовой среды составит

$$\varepsilon(x, t) = \frac{d\xi(x, t)}{dx} = \frac{2\pi}{\lambda_m} \xi_0 e^{-\alpha x} \cos(2\pi ft + \frac{2\pi}{\lambda_m} x). \quad (6)$$

С учетом (4) и (6) выражение для мгновенного значения плотности $\rho(x, t)$ при начальном значении плотности ρ_0 после преобразования примет вид

$$\rho(x, t) = \frac{\rho_0}{1 + \frac{2\pi}{\lambda_m} \xi_0 e^{-\alpha x} \cos(2\pi ft + \frac{2\pi}{\lambda_m} x)}. \quad (7)$$

Подставляя (7) в (3), выражение для $n(x, t)$ после преобразования будет иметь вид

$$n(x, t) = \sqrt{\frac{1 + \frac{2\pi}{\lambda_m} \xi_0 e^{-\alpha x} \cos(2\pi ft + \frac{2\pi}{\lambda_m} x) + 2R\rho_0}{1 + \frac{2\pi}{\lambda_m} \xi_0 e^{-\alpha x} \cos(2\pi ft + \frac{2\pi}{\lambda_m} x) - R\rho_0}}. \quad (8)$$

С помощью полученного выражения можно определить значение коэффициента преломления газовой среды в локальной области на границе раздела объект – газовая среда с учетом коэффициента затухания α . Кроме того, путем интегрирования выражения (8) по dx и по dt соответственно, можно определить зависимость величины оптической длины пу-

ти $L(x)$ и $L(t)$ для фиксированных значений t и x .

На рис. 1, 2 приведены графики зависимостей $\rho(x)$ и $n(x)$ для $\lambda = 589$ нм, частоты механических колебаний $f = 5 \cdot 10^5$ Гц, $\xi_0 = 10^{-6}$ м, $\rho_0 = 1,29$ кг/м³, полученные по формуле (8).

Для рассматриваемого случая предел $n(x)$ при $x \rightarrow \infty$ равен

$$\lim_{x \rightarrow \infty} n(x) = 1,00029. \quad (9)$$

Величина оптического пути $L(x)$ с учетом условия (9) может быть представлена в виде

$$L(x) = \int_0^{\infty} n(x) dx. \quad (10)$$

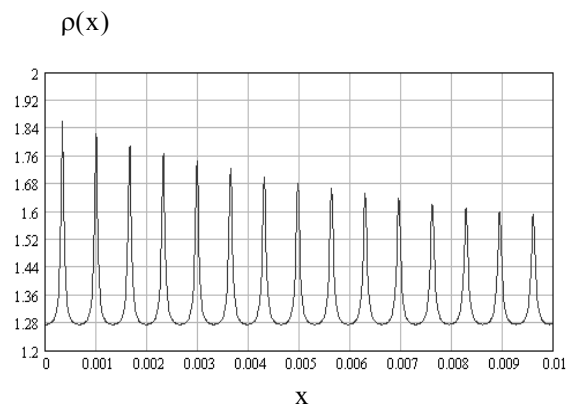


Рис. 1. График изменений плотности газовой среды $\rho(x)$

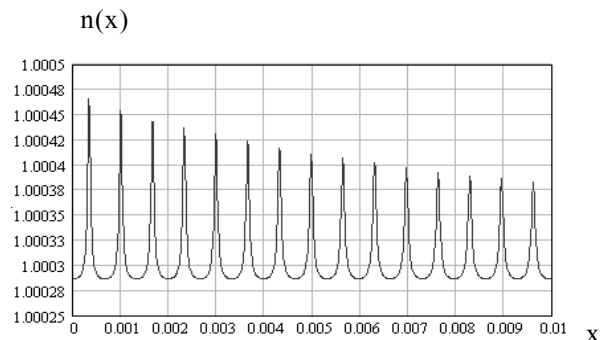


Рис. 2. График изменений коэффициента преломления газовой среды $n(x)$

В выражении (10) верхний предел интегрирования равен ∞ . На практике верхний предел интегрирования следует выбирать с учетом достижимой точности измерения разности фаз между опорной и сигнальной волнами оптических излучений и расстоянием, проходимым волной механических колебаний в газовой среде с учетом затухания.

В рассматриваемом примере геометрическая длина пути $l_0 = 0,3$ м, тогда

$$\int_0^{0,3} n(x) dx = 0,300091.$$

Оптическая длина пути L_0 без учета изменений плотности при коэффициенте преломления $n_0 = 1.00029$, геометрической длине пути $l_0 = 0,3$ м составляет

$$L_0 = n_0 l_0 = 1,00029 \cdot 0,3 = 0,300087 \text{ м.}$$

С учетом (1) разность фаз двух оптических излучений, имеющих одинаковые начальные фазы и длину волны $\lambda = 589$ нм, для представленного примера составляет

$$\Delta\varphi = 3,19 \text{ рад.}$$

Как видно из примера, локальное изменение плотности газовой среды на границе раздела объект-газовая среда приводит к погрешностям измерения разности фаз двух оптических излучений, имеющих одинаковые начальные фазы.

Если не происходит локального изменения плотности газовой среды ($n = \text{const}$), то, исходя из (1), разница геометрических путей двух оптических излучений равна

$$l_1 - l_2 = \frac{\Delta\varphi\lambda}{2\pi n}. \quad (11)$$

Отсюда для рассматриваемого примера, исходя из (11), при $n = 1.00029$, $\Delta\varphi = 3,19$ рад, $\lambda = 589 \cdot 10^{-9}$ м

$$l_1 - l_2 = \frac{3,19 \cdot 589 \cdot 10^{-9}}{2 \cdot 3,14 \cdot 1,00029} = 0,229 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

Таким образом, при $\xi_0 = 10^{-6}$ м погрешность измерения составляет $0,229 \cdot 10^{-6}$ м или 22,9% от амплитуды смещения механических колебаний.

Из выражения (8) следует, что $n(x)$ зависит от смещения ξ и λ_m , вследствие чего определенный интерес представляет зависимость n от соотношения скорости изменения смещения V и скорости распространения механических колебаний в газовой среде V_c .

Скорость изменения смещения $V(x, t)$ механических колебаний с учетом выражения (5) может быть определена из формулы

$$V(x, t) = \frac{d\xi(x, t)}{dt} = 2\pi f \xi_0 e^{-\alpha x} \cos\left(2\pi f t + \frac{2\pi}{\lambda_m} x\right). \quad (12)$$

Связь между скоростью распространения механических колебаний в среде, скоростью изменения смещения механических колебаний и изменением плотности газовой среды для адиабатического процесса выполняется в соответствии с формулой [7]

$$\rho_0 V_c = (\rho_0 + \Delta\rho)(V_c - V). \quad (13)$$

С учетом (12) и (13) выражение для $\Delta\rho(x, t)$ имеет вид

$$\Delta\rho(x, t) = \frac{\rho_0 2\pi f \xi_0 e^{-\alpha x} \cos\left(2\pi f t + \frac{2\pi}{\lambda_m} x\right)}{V_c - 2\pi f \xi_0 e^{-\alpha x} \cos\left(2\pi f t + \frac{2\pi}{\lambda_m} x\right)}. \quad (14)$$

Подставляя (14) в (3), выражение для $n(x, t)$ примет вид

$$n(x, t) = \sqrt{\frac{V_c - (1 - 2R\rho_0) 2\pi f \xi_0 e^{-\alpha x} \cos\left(2\pi f t + \frac{2\pi}{\lambda_m} x\right)}{V_c - (1 + R\rho_0) 2\pi f \xi_0 e^{-\alpha x} \cos\left(2\pi f t + \frac{2\pi}{\lambda_m} x\right)}}. \quad (15)$$

На рис. 3, 4 представлены графики зависимости $n(x)$, полученные по формуле (15) при различных значениях $\frac{V_c}{V}$ когда $V_c = 331$ м/с.

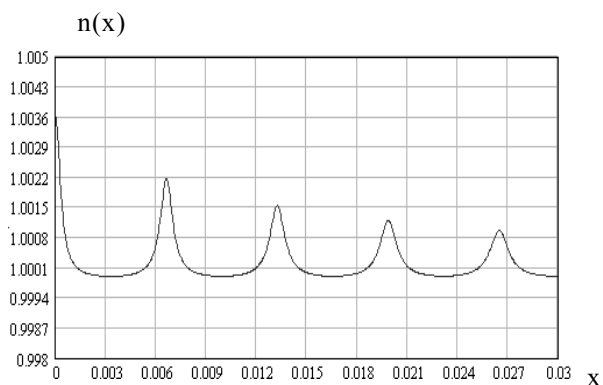


Рис. 3. График зависимости $n(x)$ при $\frac{V_c}{V} = 10$

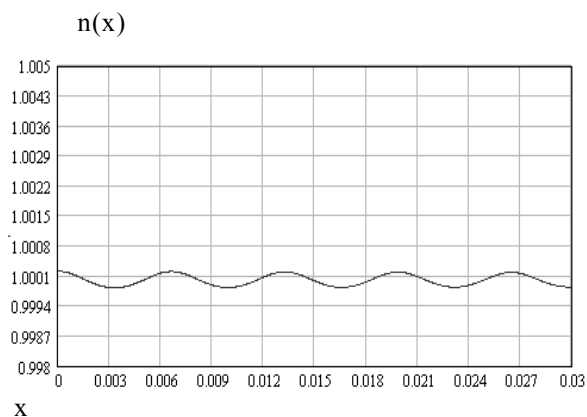


Рис. 4. График зависимости $n(x)$ при $\frac{V_c}{V} = 100$

Как видно из представленных графиков, уменьшение отношения $\frac{V_c}{V}$ приводит к росту коэффициента преломления оптического излучения в газовой среде.

Выводы

1. Получено соотношение, определяющее распределение коэффициента преломления оптического излучения в локальной области на границе разде-

ла колеблющийся объект-газовая среда в зависимости от частоты механических колебаний объекта, длины волны оптического излучения и плотности невозмущенной газовой среды.

2. Получено соотношение, определяющее распределение коэффициента преломления оптического излучения в локальной области на границе раздела объект-газовая среда в зависимости от соотношения скорости распространения механических колебаний и скорости изменения их смещения.

Список литературы

1. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах.- М.: Наука, 1973. – 343 с.
2. Лазерный интерферометрический измеритель наноперемещений / С.А. Дарзбек, Ж. Желкобаев, В.В. Календин и др. // Труды института общей физики им. Прохорова. – 2006. – Т. 62.

3. Карташов А.И. Методы измерения малых изменений разности фаз в интерференционных устройствах / А.И. Карташов, И.Ш. Эцин // Успехи физических наук. – 1972. – Т. 106, Вып. 4. – С. 42-45.

4. Морозов Г.В. Метод многократных отражений для электромагнитных волн в слоистых диэлектрических структурах / Г.В. Морозов, Р.Г. Маев, Г.В. Дрейк // Квантовая электроника. – 2001. – № 9. – С. 56-62.

5. Поль Р.В. Оптика и атомная физика / пер.с нем.: под ред. Н.А. Толстого. – М.: Наука, 1966. –Т. 3. – 552 с.

6. Горелик Г.С. Колебания и волны / Г.С. Горелик. – М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит-ры, 1959. – 572 с.

7. Алешикевич В.А. Дедеко Л.Г. Караваев В.А. Механика твердого тела / В.А. Алешикевич, Л.Г. Дедеко, В.А. Караваев. – М.: Физический факультет МГУ, 1997. – 72 с.

Поступила в редколлегию 15.02.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.М. Сотников, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

ДЕЯКІ РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІЗА ВПЛИВУ ЛОКАЛЬНИХ ЗМІН ЩІЛЬНОСТІ ГАЗОВОЇ СЕРЕДИ НА КОЕФІЦІЄНТ ЗАЛОМЛЕННЯ ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Г.Ф. Коняхін, С.А. Косіков

У статті проаналізовано вплив локальних змін щільності газової середовища, що виникає в результаті збудження в них високочастотних механічних коливань, на коефіцієнт заломлення. Отримані формули для оцінки зміни величини коефіцієнта заломлення на межі розділу об'єкт – газове середовище.

Ключові слова: механічні коливання, газова середовища, оптичне випромінювання, коефіцієнт заломлення

SOME RESULTS OF THE ANALYSIS OF THE IMPACT OF LOCAL CHANGES IN THE DENSITY OF THE GAS ENVIRONMENT ON THE REFRACTIVE INDEX OF OPTICAL RADIATION

G.F. Konyahin, S.A. Kosikov

In the article influence is analysed of local changes the closeness of gas environments, arising up as a result of excitation in them of high-frequency mechanical vibrations, on the coefficient of refraction. Formulas are got for the estimation of change of size of coefficient of refraction on the border of section an object is a gas environment.

Keywords: mechanical vibrations, gas medium, optical radiation, the refractive index.