

Қазақстан Республикасы Тәуелсіздігінің 30 жылдығына арналған «Сейфуллин оқулары – 17: «Қазіргі аграрлық ғылым: цифрлық трансформация» атты халықаралық ғылыми – тәжірибелік конференцияға материалдар = Материалы международной научно – теоретической конференции «Сейфуллинские чтения – 17: «Современная аграрная наука: цифровая трансформация», посвященной 30 – летию Независимости Республики Казахстан.- 2021.- Т.1, Ч.3 - С. 83 – 86

МОДЕЛЬ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА НА ОСНОВЕ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТОК

*Мадиди¹ П.Ш., аспирант 3 курса,
Национальный исследовательский Томский политехнический университет¹,
г. Томск*

*Алькина² А.Д., старший преподаватель,
Карагандинский технический университет², г. Караганда*

*Мехтиев^{1,3} А.Д., к.т.н., профессор,
Казахский агротехнический университет имени Сакена Сейфуллина³,
Национальный исследовательский Томский политехнический университет¹,
г. Томск*

В настоящее время в наиболее технологически развитых странах мира волоконно-оптические системы (ВОС) передачи сигналов получили широкое распространение и внедрены практически на всех этапах информационно-коммуникационной инфраструктуры [1]. В отличие от существующих аналогов систем связи, оптическое волокно обладает рядом преимуществ которые описаны в работе [2]. Один волоконно-оптический тракт с нужным количеством каналов и возможностью их модернизации можно организовать за счет широкой полосы пропускания. К дополнительным преимуществам можно отнести потенциально низкую стоимость оптического кабеля, значительную экономию меди, возможность организации дальнедействующих регенерационных участков, малое километровое затухание, высокую степень защиты системы от нежелательных внешних электромагнитных воздействий (помех) и т.д. [3, 4].

Цель данной работы вывести математическую модель геометрических параметров, оптических характеристик волны, как волновой вектор, длина волны, также температуру T на основе дифракционной решетки. В работе рассматриваются датчики с внешним чувствительным элементом, физический механизм преобразования параметров сигнала которых основан на эффекте дифракционной решетки. Дифракционная решетка является оптическим устройством, принцип работы которого основывается на явлениях дифракции и интерференции. Представляют собой комплекс прозрачных и поглощающих полос (зон), чередующихся с периодом s и имеют периодическую структуру (рис. 1).

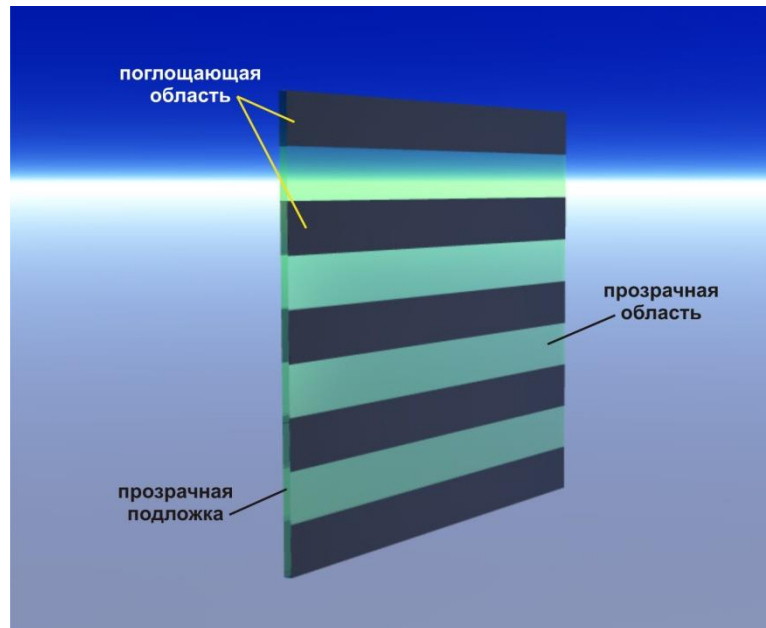


Рисунок 1 – Базовая структура решётки

Дифракционные решетки используются для измерения, как интенсивности, так и длины волны. Принцип работы решеток основан на модуляции, проявляющаяся в изменении длины волны и интенсивности. Но прежде чем делать анализ свойства оптических решеток, следует рассмотреть дифракцию. Самый простой случай - дифракция на одной щели, это когда свет, проходя через узкую щель, проецируется на экран.

Период решётки s , прозрачный фрагмент каждого периода a являются ключевыми характеристиками решётки. Общее количество энергии, проходящий через ближнее поле пропорционально отношению $\frac{a}{s}$.

В виртуальной лабораторной среде, как правило, на основе измерения интенсивности результирующего оптического сигнала, определяемой в зависимости от параметров решетки $I(\xi) = I_0 k(\xi)$ рассматриваются и моделируются датчики, где $k(\xi) = \frac{a(\xi)}{s(\xi)}$ – коэффициент ослабления суммарной интенсивности интерферированных в решетке волн, которые выражены через отношение ширины $a(\xi)$ и периода $s(\xi)$ решетки, и являются функциями на множестве $\xi = \{\xi_j\}$ варьируемых параметров системы. К параметрам в рассмотренной *нелинейной* математической модели, можно отнести геометрические параметры (оптические характеристики волны - волновой вектор, длина волны, температуру T)[3].

В частном случае, при $s(\xi) = \text{const}$, интенсивность модулированного проникшего света равна $I(\xi) = I_0 \frac{a(\xi)}{s}$. Такое выражение модуляции можно получить в результате относительного движения двух решеток, расположенных одна к другой в непосредственной близости. В датчиках, где используются дифракционные решетки, расположенные близко друг от

друга, имеются сверхчувствительные элементы. Одна, из них подвижна, а другая не подвижна. Когда решетки расположены близко друг другу, то они кажутся как одна решетка к проникающему свету и период решетки s остается постоянным. В зависимости от положения подвижной решетки доля пропускающей площади будет изменяться от 0,5 до 0.

В результате установлено, что 100% изменение интенсивности происходит тогда, когда решетки сдвинуты друг от друга на величину $a(\xi)$. Чувствительность к смещению, и динамический диапазон будут регулироваться вместе. Датчики на основе оптического волокна с подвижными решетками можно применить для любого параметра, которые проявляются за счет перемещения и движения решеток.

Дифракционные решетки также можно использовать в виде устройства, которые регулируются на длину волны. Если соотношение $k(\xi_1, \xi_2) = \frac{a(\xi_1)}{s(\xi_2)} = \text{const}$, то период решетки будет модулироваться параметром ξ_2

. Во входном сигнале регистрируемый цвет будет связан с параметром ξ_2 при однородном распределении энергии по длинам волн, при постоянном угле регистрации θ , входном угле.

Решетка должна быть встроенная или прикрепленная к основанию (подложке), которая была выбранная для измерения деформации, также обусловленная исследуемым параметром. В случае выбранной подложки с наибольшим коэффициентом теплового расширения, то тогда период решетки определяется из выражения $s = s_0[1 + \alpha(T - T_0)]$, где α – коэффициент теплового расширения, а s_0 – период решетки при T_0 [3].

Под постоянным углом θ_1 дифракция света зависима от периода решетки s и угла регистрации θ_2 с периодически отражающими и поглощающими зонами широкополосным светом при освещении отражательной решетки выражение в соответствии с уравнением решетки будет равна

$$s(\sin \theta_0 + \sin \theta_1) = \pm m\lambda \quad (1)$$

где θ_1, θ_2 – измерены в плоскости падения света относительно нормальной

решетке;

m – порядок дифракции, который задается целым числом.

В результате исследований установлено, что этот метод имеет возможность проводить с помощью волоконной оптики высокочастотные измерения линейных смещений.

Технические характеристики универсального измерительного прибора должны соответствовать достаточно высокой степени точности разработанной ранее схемы численной оптимизации, основанной на методе минимизации функции сравнения теории с экспериментами, приведенными в работе [4].

Амплитуду суммарного сигнала от интерферированных в решетке волн, с полным числом штрихов в решетке N , вычисляем, с использованием

условия максимума интерференции от двух волн, дифрагированных на одной щели $\Delta_{1,2} = s \cdot \sin \varphi$, где Δ – разность хода, а φ – угол наблюдения интерференции от двух волн, в виде

$$\Xi = \Xi_1 \frac{\sin\left(\frac{N \varphi_{1,2}}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\varphi_{1,2}}{2}\right)}. \quad (2)$$

Здесь $\varphi_{1,2} = k \cdot \Delta = \frac{2\pi s \cdot \sin \varphi}{\lambda}$ и соответственно, $\frac{\varphi_{1,2}}{2} = \pi s \zeta$ – половина разность хода фаз двух когерентных волн, где $\zeta = \frac{\sin \varphi}{\lambda}$; $\Xi_1 = \Xi_0 \sin\left(\frac{\varphi_{1,2}}{2}\right)$ – суммарная интенсивность волны, полученной в результате интерференции от двух когерентных волн, в модели одной щели; $\Xi_0 = 2L$ – удвоенный радиус окружности описанной вокруг многоугольника характеристических векторов фазовой диаграммы интерференционной картины.

Величину интенсивности полного светового потока, полученного в результате интерференции когерентных волн, от всех N щелей решетки, под угол наблюдения интерференции φ , вычисляем в виде

$$I = I_1 \frac{\sin^2(\pi s \zeta N)}{\sin^2(\pi s \zeta)}, \quad (3)$$

где $I_1 = I_0 \frac{\sin^2(\pi a \zeta)}{(\pi a \zeta)^2}$; I_0 – интенсивности светового потока, полученного в результате интерференции когерентных волн, от одной щели, под угол наблюдения интерференции $\varphi = 0$.

При выборе круглых отверстий, в результате дифракции Фраунгофера на одном круглом отверстии диаметром d , имеем

$$I = I_1 \frac{J_N(\pi d \zeta N)}{J_1(\pi d \zeta)}, \quad (4)$$

где $I_1 = 2I_0 \frac{J_1(\pi d \zeta)}{\pi d \zeta}$; $J_1(\pi d \zeta)$ – функция Бесселя 1 – го порядка, вычисляемая от аргумента $\frac{\varphi_{1,2}}{2} = \pi d \zeta$;

$J_N(\pi d \zeta N)$ – функция Бесселя N – го порядка, вычисляемая от аргумента $\frac{\varphi_{1,2} N}{2} = \pi d \zeta N$.

При исследовании функций Бесселя будем использовать ряд известных выражений. В случае $z = \pi d \zeta N < 1$ можно применять разложения в бесконечные степенные ряды [5]

$$J_N(z) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k! \Gamma(N+k+1)} \left(\frac{z}{2}\right)^{N+2k}, \quad (5)$$

где гамма-функция вычисляется из равенства $\Gamma(N+k+1) = (N+k)!$.

Предлагаемые в данной работе методы могут использоваться для регистрации и управления физическими характеристиками (длина волны, интенсивность сигнала, мощность и энергии потока оптического излучения и др.) оптоволоконных структур, применяемых в оптоволоконной технике радиотехнике, и в технологиях телефонной и телевизионной связи с широким диапазоном частот и амплитуд сигналов различного функционального назначения. В качестве прикладных технических решений можно допустить применение данной методологии для регистрации и регулирования и прогнозирования данных по механическим деформациям и неупругим смещениям плоскостей горных пород (борты карьера и бермы), что актуально для современной горнорудной и угольной добывающей промышленности.

Развиваемые в работе математический аппарат на основании специальной функций типа Бесселя, Ханкеля или гипергеометрических функций ранее опробован при разработке физико-математической модели нелинейных электрофизических и магнитных явлений для автоматически управляемых систем на основе протонных полупроводников и диэлектриков [6]

Список литературы

1. Boutiques E.I., 2003 Optics (BHV-Petersburg).
2. Yurchenko A.V., Mekhtiyev A.D., Bulatbaev F.N., Neshina Y.G., Alkina A.D. and Madi P.Sh.. 2019. Investigation of additional losses in optical fibers under mechanical action Published under licence by IOP Publishing Ltd. Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 516, Number 1. doi:10.1088/1757-899X/516/1/012004.
3. Madi P.Sh., Kalytka V.A., Alkina A.D. and Nurmaganbetova M. T. Development of a model fiber-optic sensor of the external action on the basis of diffraction gratings with variable parameters of the system. Published under licence by IOP Publishing Ltd. Journal of Physics: Conference Series, Volume 1327, Number 1. doi: 10.1088/1742-6596/1327/1/012036
4. Kalytka V.A, Neshina Y.G, Madi P Sh and Naboko Y P 2019 Methods of theoretical researches the non-linear electrophysical properties of solid dielectrics with compound crystalline structure *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering: Series 698 022002* DOI:10.1088/1757-899X/698/2/022002
5. Korn G., Korn T. 1973. Handbook of mathematics (Moscow. Publishing House "Science").
6. Kalytka V.A., Korovkin M.V., Mekhtiev A.D., Yurchenko A.V. 2018. Non-linear polarizing effects in dielectrics with hydrogen bonds. *Russian Physics Journal*. - Vol. 61, No.4. pp. 757- 769. DOI: 10.1007/s11182-018-1457-8.