

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ФИЗИКА

ЭЛЕКТРОННАЯ ДИСПЕРСИЯ СВЕТА С УЧЕТОМ ЗАТУХАНИЯ КОЛЕБАНИЙ В РЕАЛЬНЫХ СРЕДАХ

Рысбаев Абдурашит Сарбаевич

*д-р физ.-мат. наук, проф., каф. «Общая физика»,
Ташкентского Государственного Технического Университета,
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: rysbaev@mail.ru*

Таубалдиев Азамат Аскарлович

*лаборант каф. «Электротехника, электромеханика и электротехнологии», студент
Ташкентского Государственного Технического Университета,
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: azamat.taubaldiyev@bk.ru*

Қобилов Обиджон Файрат о‘ғли

*лаборант каф. «Альтернативные источники энергии», студент
Ташкентского Государственного Технического Университета,
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: qobilovobid919@gmail.com*

ELECTRONIC DISPERSION OF LIGHT TAKING INTO ACCOUNT OSCILLATION DAMPING IN REAL ENVIRONMENTS

Abdurashit Rysbaev

*Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
prof., department. "General Physics",
Tashkent State Technical University,
Uzbekistan, Tashkent*

Azamat Taubaldiev

*Laboratory assistant "Electrical Engineering, Electromechanics and Electrotechnology" student
Tashkent State Technical University,
Uzbekistan, Tashkent*

Obidzhon Kobilov

*Laboratory assistant "Alternative energy sources" student
Tashkent State Technical University,
Uzbekistan, Tashkent*

АННОТАЦИЯ

В данной статье рассмотрены проблемы, связанные с зависимостью показателя преломления от частоты колебаний электронов при учёте коэффициента затухания, а также комплексность коэффициента преломления. Проанализированы особенности показателя преломления при различных коэффициентах затухания колебаний электронов. Выведено уравнение дисперсии света с учетом затухания в реальных средах.

ABSTRACT

This article discusses the problems associated with the dependence of the refractive index on the frequency of electron oscillations when taking into account the damping coefficient, as well as the complexity of the refractive index. The features of the refractive index are analyzed for various damping coefficients of electron oscillations. The light dispersion equation is derived taking into account the attenuation in real media.

Ключевые слова: дисперсия света, коэффициент затухания, коэффициент преломления, диэлектрическая проницаемость, частота колебания.

Keywords: light dispersion, attenuation coefficient, refractive index, dielectric constant, oscillation frequency.

Дисперсия света – явление, обусловленное зависимостью показателя преломления от частоты волны света.

При прохождении света через две различные среды, световые волны возбуждают электроны атомов, в свою очередь эти электроны излучают вторичные волны, которые отличаются по фазе первичной волны, так как сказывается запаздывание смещения электрона из положения равновесия. Разность фаз между первичной и вторичной волнами будет постоянной. Складываясь, первичные и вторичные волны интерферируют, так получаются все наблюдаемые оптические явления, связанные с взаимодействием света с веществом.

Кроме отклонения между первичной и вторичной волной по фазе, существует в реальных средах потери энергии, обусловленное поглощением энергии электронами, то есть не вся энергия, переданная от первичной волны к электронам, возвращается во вторую среду изменяясь только по фазе.

Потери энергии необходимо учитывать для того чтобы получить точную зависимость показателя преломления от частоты волны света.

Показатель преломления зависит от диэлектрической проницаемости зависимостью $n = \sqrt{\epsilon}$, следовательно диэлектрическая проницаемость ϵ также зависит от частоты волны света ($\epsilon = f(\omega)$).

Найдём зависимость показателя преломления от частоты колебания учитывая потери энергии.

Из электростатики:

$$\epsilon = 1 + \chi = 1 + \frac{P}{\epsilon_0 + E}$$

где P - вектор поляризации.

Вектор поляризации равен: $P = Nr = Ne r$

где r - дипольный электрический момент атома;
 N - концентрация атомов; r - смещение электрона.

Тогда для показателя преломления имеем.

$$n^2 = \epsilon = 1 + \frac{Ner}{\epsilon_0 E} \quad (1)$$

Таким образом, задача сводится к нахождению зависимости $r = r(E)$.

Уравнение движения (вынужденных колебаний) электрона имеет вид:

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} + r \frac{dr}{dt} + Dr = Ee \quad (2)$$

где e , m - соответственно заряд и масса электрона,
 D - «упругая» постоянная, r - коэффициент сопротивления, Ee - внешняя сила, действующая на электрон.
Приводя уравнение к стандартной форме, получим:

$$\frac{d^2 r}{dt^2} + 2\beta \frac{dr}{dt} + \omega_0^2 r = \frac{e}{m} E \quad (3)$$

где $2\beta = \frac{r}{m}$, $\omega_0^2 = \frac{D}{m}$ (ω_0 - частота свободных колебаний электрона в атоме).

Здесь β – коэффициент затухания, которая отражает потери энергии, поглощаемые электронами атома.

Решим дифференциальное уравнение вида:

$$r'' + 2\beta r' + \omega_0^2 r = \frac{e}{m} E \quad (4)$$

Пусть $r = r_0 e^{i\omega t}$, тогда $r' = i\omega r_0 e^{i\omega t}$, $r'' = (i\omega)^2 r_0 e^{i\omega t}$.

Подставив в выражение (4) и приняв электрическое поле напряженностью $E = E_0 e^{i\omega t}$ получим:

$$r_0 = \frac{eE_0}{m} \cdot \frac{1}{(i\omega)^2 + 2\beta i\omega + \omega_0^2}$$

Произведя некоторые преобразования получим:

$$r_0 = \frac{eE_0}{m} \cdot \frac{1}{(\omega_0^2 - \omega^2) + i2\beta\omega} \quad (5)$$

Полученное выражение (5) подставим в выражение (1) получим:

$$\epsilon = 1 + \frac{N \cdot e^2}{\epsilon_0 \cdot m} \frac{1}{(\omega_0^2 - \omega^2) + i2\beta\omega} \quad (6)$$

Так как, в поглощающих средах диэлектрическая проницаемость ϵ содержит мнимую компоненту, показатель преломления n является комплексным:

$$(\tilde{n})^2 = (n - ik)^2 = \tilde{\epsilon} = \epsilon_1 - i\epsilon_2 \quad (7)$$

где n характеризует преломление, а k - поглощение
 $n^2 - 2ikn - k^2 = \epsilon_1 - i\epsilon_2$

$$-2ikn = -i\epsilon_2 \Rightarrow k = \frac{\epsilon_2}{2n};$$

$$n^2 - k^2 = \epsilon_1 \Rightarrow n = \sqrt{\frac{\epsilon_1 + \sqrt{\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2}}{2}}$$

$$\tilde{\epsilon} = \epsilon_1 - i\epsilon_2 = 1 + \frac{N \cdot e^2}{\epsilon_0 \cdot m} \frac{\omega_0^2 - \omega^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2} - i \frac{N \cdot e^2}{\epsilon_0 \cdot m} \frac{2\beta\omega}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2}; \quad (8)$$

Уравнение (8) включает в себя элементарную классическую электронную теорию дисперсии. Комплексность ϵ означает, что в веществе происходят два процесса: изменяется скорость распространения волны и возникает ее поглощение.

Отметим, что если затуханием пренебречь ($\beta=0$), то уравнение (8) перейдет в обычное уравнение зависимости показателя преломления от частоты, что доказывает правильность вывода уравнения.

Проанализируем зависимость n от частоты ω :

Зависимость будем брать для электрона e зарядом равным $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл и массой $m=9,1 \cdot 10^{-31}$ кг, концентрация $N=2 \cdot 10^{23}$ м³. Интервал изменения частоты падающей волны ω от 0 до 10^{15} Гц, а коэффициент затухания β от 0,05 до 2. Собственная частота колебаний частицы $\omega_0=5 \cdot 10^{15}$ Гц.

Подставляя значения уравнения (9) в уравнение (8), варьируя значение коэффициента затухания

в диапазоне β от 0,05 до 2 с использованием программы Dispersion можно построить зависимость $n=f(\omega)$ для сред с различным коэффициентом затухания. Отметим что ответственными за затухание электромагнитных волн будут отклонения среды от однородности, это может быть из-за плотности вещества, а в случае твердых тел – дефекты кристаллической структуры.

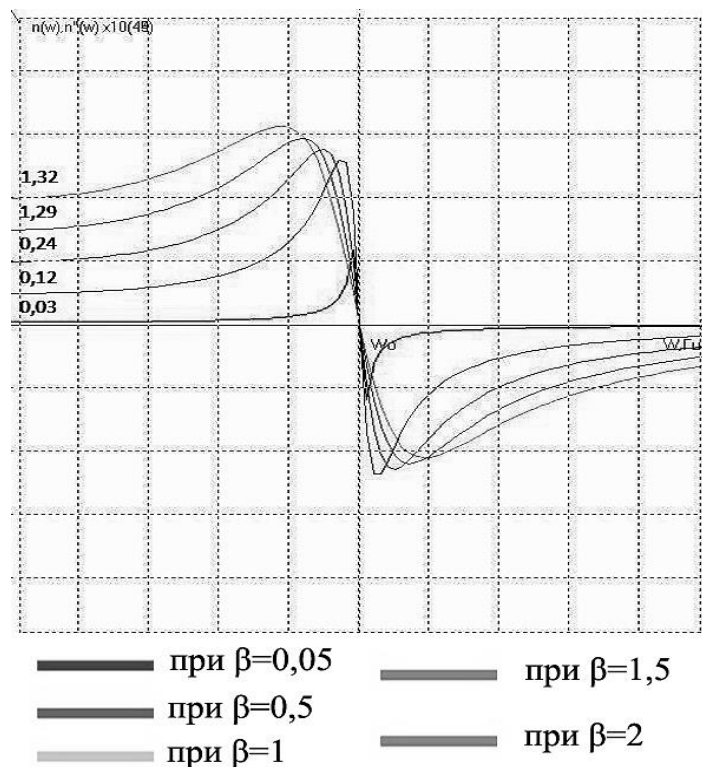


Рисунок 1. График зависимости коэффициента преломления от частоты световой волны

Из при приведённых расчётов и графика (рис.1) можно отметить, то что коэффициент затухания значительным образом влияет на показатель преломления.

Это связано с тем, что часть энергии в процессе колебаний переходит в тепло.

Список литературы:

1. Аллен Л., Эберли Д. Оптический резонанс и двухуровневые атомы. / пер. с англ., М.: Мир, 1978, 223 с.
2. Борн М., Вольф Основы оптики. / пер. с англ., 2 изд., М.: Наука 1973,713 с.
3. Виноградова М. Б., Руденко О. В., Сухоруков А. П. Теория волн. / М.: Мир, 1979, 250 с.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е. М. Квантовая механика. Нерелятивистская теория 4- изд., испр. –М. Наука. 1989. - 768 с.
5. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Курс теоретической физики: в 10 т.: Электромагнетизм. – М.: Физматлит, 2002. – Т. 4. – 224 с.
6. Ландсберг Г. С. Оптика. / 5 изд. М.: Наука, 1976, 928 с.