

# МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЛУЧА ОПТИЧЕСКОГО КВАНТОВОГО ГЕНЕРАТОРА В СИСТЕМЕ WOLFRAM MATHEMATICA

**Байстрюченко Д. А.**

Краснодарское высшее военное орденов Жукова и Октябрьской Революции  
Краснознаменное училище имени генерала армии С.М.Штеменко

*Аннотация.* В статье рассматривается математическая модель распространения луча оптического квантового генератора, аналитические зависимости, лежащие в основе формирования выражения, моделирующего лазерный луч, а также графическое представление рассматриваемой функции. Выполнено численное моделирование, направленное на расчет затухания лазерного излучения.

*Ключевые слова:* оптический квантовый генератор, световая волна, уравнение волны, интенсивность, длина волны.

*Цель статьи* — построение математической модели лазерного излучения с целью расчета затухания волны, в зависимости от входных характеристик.

Лазерное излучение не встречается в естественных источниках света, оно является видом физической энергии, вырабатываемой специальными приборами, которые называются оптическими квантовыми генераторами (далее — ОКГ). Они отличаются конструкцией и испускаемым веществом (газом, жидкостью, кристаллом, полупроводником) [1].

Под ОКГ будем понимать устройство, испускающее пучок света в узком спектральном диапазоне, которое обладает такими физическими свойствами, при которых все электромагнитные колебания потока монохроматичны, когерентны, поляризованы, а также направлены [2].

Электромагнитное излучение оптического диапазона (светового), обладающее вышеперечисленными свойствами, называется лазерным излучением, что позволяет изменять мощность воздействия на объект в различных целях.

Рассмотрим лазерное излучение как световую волну, которая представляет собой изменение среды или поля, распространяющееся в пространстве с конечной скоростью за период, равный расстоянию между двумя ближайшими точками среды, колеблющимися в одной фазе, что характеризуется на волны электромагнитного излучения оптического диапазона измеряется в нанометрах или микрометрах.

По мощности ОКГ классифицируются на:

- низкоэнергетические (плотность мощности излучения менее  $0,4 \text{ Вт/см}^2$ );
- среднеэнергетические (плотность мощности излучения  $0,4\text{--}10 \text{ Вт/см}^2$ );
- высокоэнергетические (плотность мощности излучения более  $10 \text{ Вт/см}^2$ ).

Волны могут распространяться в пространстве в различных направлениях. Свет состоит из волн, которые могут распространяться как сферически, так и направленно. В случае лазерного излучения, волны распространяются в строго определенном направлении, которое можно описать в виде следующего выражения:

$$E = E_m \cos(\omega t - kx + \varphi_0), \quad (1)$$

где

$E_m$  — амплитуда волны;

$\varphi_0$  — начальная фаза;

$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}$  — циклическая частота;

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$  — волновое число;

$t$  — промежуток времени;

$x$  — положение волны в момент времени.

От длины волны  $\lambda$  зависит видимость излучения (цвет лазера), так, ультрафиолетовое излучение при  $\lambda = 180\text{--}400$  нм, видимое излучение (свет) при  $\lambda = 400\text{--}760$  нм, инфракрасное излучение при  $\lambda = 760$  нм—30 мкм.

Интенсивность света пропорциональна квадрату амплитуды напряженности электрического поля световой волны и показателю преломления.

$$I = \frac{1}{2}nc\varepsilon_0 E_m^2, \quad (2)$$

далее имеем:

$$E_m = \sqrt{\frac{2I}{c\varepsilon_0}}. \quad (3)$$

Для расчета циклической частоты выполним:

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi c}{\lambda}. \quad (4)$$

Пусть сфокусированное излучение мощного лазера  $I = 10^{14}$  Вт/см<sup>2</sup>, длина волны  $\lambda = 660$  нм (красный лазер), скорость света  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с, электрическая постоянная  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф·м<sup>-1</sup>, начальная фаза  $\varphi_0 = 0$ , тогда подставив названные значения в вышеперечисленные формулы, построим график световой волны, который описывается формулой:

$$E = E_m \sin(\omega t + \varphi_0). \quad (5)$$

Программный код, реализующий рассматриваемую функцию, имеет вид, представленный на рисунке 1.

```

Debug In[78]:= f := 0 (*начальная фаза*)
lambda := 6.6 * 10^-7 (*длина волны соответствует красному лазеру*)
c := 3 * 10^8 (*скорость света*)
zero := 8.85 * 10^-12 (*постоянная*)
Intens := 10^14 * 10^4 (*интенсивность мощного лазера*)
w := ((2 Pi * c) / lambda) (*круговая частота*)
      [число пи
A := Sqrt[(2 * Intens) / (c * zero)] (*амплитуда волны*)
      [квадратный корень
Plot[A * Sin[w * t + f], {t, 0, 10^-14}] (*построение графика волны*)
      [график... [синус

```

Рисунок 1 — Программный код для построения графика волны

График уравнения световой волны в программе Wolfram Mathematica рассмотрен на рисунке 2.

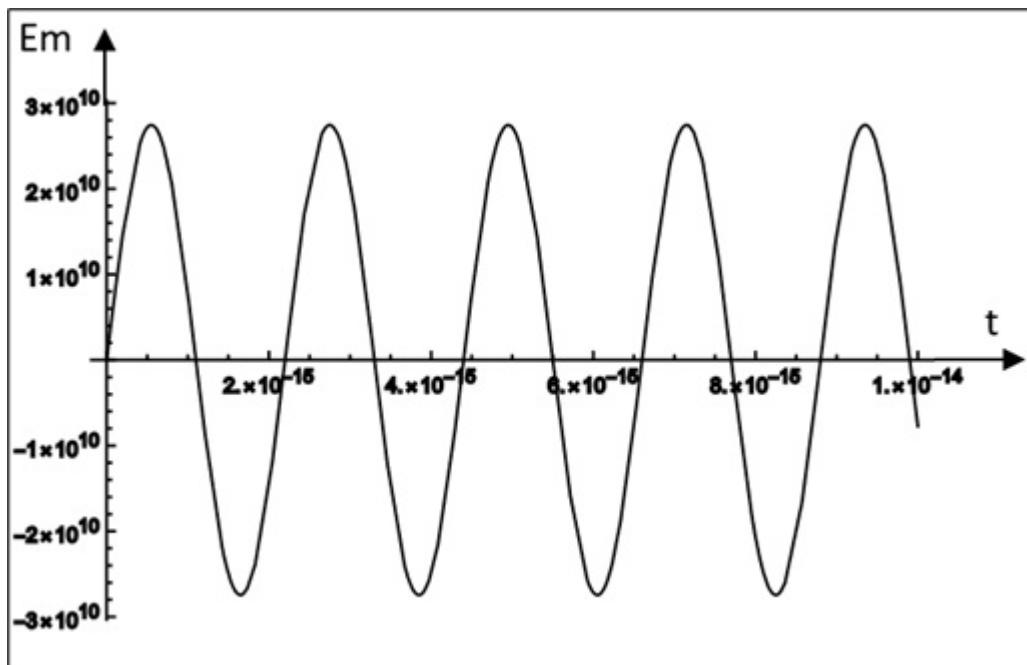


Рисунок 2 — График распространения волны

Из графика, представленного на рисунке 2 следует, что излучение ОКГ распространяется в пространстве в виде синусоиды с постоянным периодом и амплитудой.

Управляющий (модулирующий) сигнал может быть электрическим (ток, напряжение), акустическим, механическим и даже оптическим. Процесс модуляции представляет собой изменения одного из параметров колебания высокой частоты по закону управляющего низкочастотного сигнала. В зависимости от того, какой параметр (амплитуда, частота, фаза) подвергается изменению, различают амплитудную, частотную и фазовую модуляции.

Во всех методах модуляции несущей служат синусоидальные колебания угловой частоты, следовательно, лазерное излучение способно модулировать акустический сигнал с последующей демодуляцией, что и используется в средствах разведки типа «лазерный микрофон».

---

При отсутствии взаимодействия лазерного излучения со средой (например, при распространении излучения в вакууме) распределение интенсивности излучения в дальней зоне будет определяться только дифракционной расходимостью и иметь вид дифракции Фраунгофера. Однако, при распространении излучения в реальной среде, например, в атмосфере, происходит размытие энергии в пятне лазерного луча. Связано это с тем, что турбулентность среды, а также тепловое самовоздействие излучения сильно увеличивают расходимость лазерного луча, сравнительно с дифракционной. Кроме того, процессы рассеяния и поглощения на частицах среды приводят к ослаблению энергии лазерного излучения по мере прохождения трассы.

Влияние атмосферы на распространение лазерного излучения выражается:

в ослаблении энергии за счет аэрозольного поглощения и рассеяния, а также молекулярного поглощения и рассеяния атмосферными газами;

в случайном перераспределении энергии в поперечном сечении пучка за счет случайных фокусировок и дефокусировок волнового поля на турбулентных неоднородностях показателя преломления, что приводит к ухудшению пространственной когерентности излучения, случайным блужданиям пучка, как целого, и возникновению флуктуаций интенсивности;

в нелинейном взаимодействии лазерного излучения с атмосферными газами при высоких плотностях энергии, когда преодолеваются энергетические пороги возникновения нелинейных эффектов.

При умеренных плотностях электромагнитной энергии взаимодействие излучения со средой не зависит от интенсивности самого излучения, и все особенности распространения света в различных средах объясняются его ослаблением в результате рассеяния и поглощения.

Показатель, характеризующий затухание колебаний за период  $T$ , в течении времени  $t$ , называется логарифмическим декрементом затухания:

$$\vartheta = \frac{T}{t}. \quad (6)$$

Внешняя среда представляет собой совокупность изменяющихся физические свойства излучения ОКГ воздействий, в том числе отражение и рассеивание. При этом, теряется часть энергии, переносимой излучением и с течением времени, амплитуда лазерного излучения уменьшается согласно закону:

$$E(t) = E_m \vartheta. \quad (7)$$

График зависимости изображен на рисунке 3.

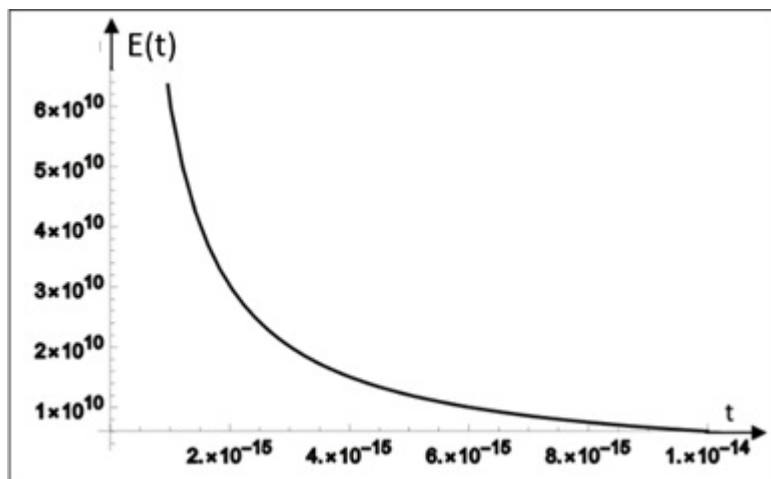


Рисунок 3 — Зависимость амплитуды волны от времени

Тогда уравнение волны (1) будет иметь следующий вид:

$$E = E_m A \cos(\omega t + \varphi_0), \quad (8)$$

где

$$A = E_m \frac{T}{t} \text{ — амплитуда затухающей волны.}$$

Подставив ранее принятые значения, получим график (рисунок 4):

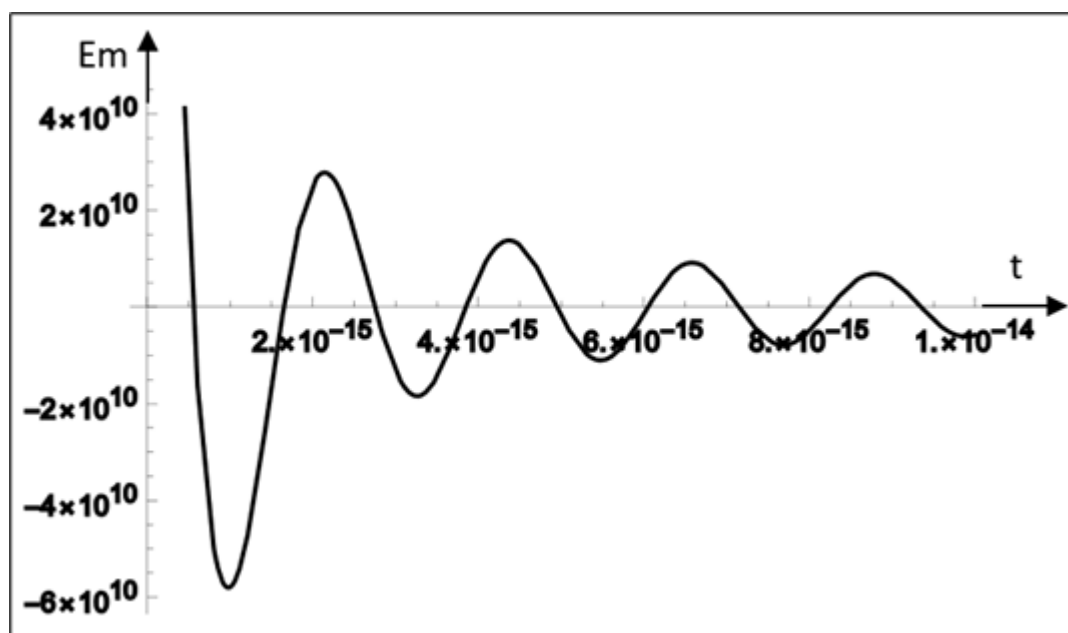


Рисунок 4 — График распространения затухающей волны

Из рисунка 4 следует, что под воздействием атмосферы уменьшается амплитуда световой волны лазерного излучения, что приводит к её затуханию в течении времени.

*Вывод:* под воздействием окружающей среды, в частности, при отражении и рассеивании, в течении времени и пройдя определенное расстояние, лазерное излучение меняет

---

свои характеристики и затухает, что является показателем осложнения ведения акустической речевой разведки с применением устройств типа «лазерный микрофон».

### **Литература**

1. **Щербаков, И. А.** Большая российская энциклопедия. Электронная версия. / Щербаков И. А. — Текст : электронный // ЛАЗЕР — 2017. — URL: <https://bigenc.ru/physics/text/4341828> (дата обращения: 10.10.2021).

2. **Тимченко, Е. В.** Оптика лазеров: Электронное учебное пособие / Е. В. Тимченко // Министерство образования и науки РФ — Самара : СГАУ, 2013. — Текст : электронный.