



УДК 621.373:535

## SIMULATION OF TRAVELLING-WAVE LIGHT AMPLIFIER IN THE STATIONARY MODE IN THE FRAMEWORK OF STUDENTS TRAINING FOR LASER PHYSICS

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОГО КВАНТОВОГО УСИЛИТЕЛЯ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ В СТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ ПРИ ОБУЧЕНИИ СТУДЕНТОВ ЛАЗЕРНОЙ ФИЗИКЕ

Gogoleva N.G. / Гоголева Н.Г.

с.р.м.с., As.prof. / к.ф.-мат. н, доцент

«Санкт-Петербургский Государственный Электротехнический Университет «ЛЭТИ»» им. В.И. Ульянова (Ленина) 197376, г. Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, д. 5 Saint-Petersburg state electrotechnical university «LETI», St. Petersburg, Prof. Popova 5, 197376

**Аннотация.** Представлена упрощенная модель оптического квантового усилителя бегущей волны в стационарном режиме. Широта использования оптических квантовых усилителей бегущей волны определяет актуальность моделирования физических процессов, ответственных за усиление оптического излучения. Простота предложенной модели позволяет реализовать ее в системе MathCad в рамках проведения лабораторных работ и выполнить серию параметрических расчетов.

**Ключевые слова:** оптический квантовый усилитель, численное моделирование.

#### Введение.

Компьютерный эксперимент является очень полезным и часто совершенно необходимым дополнением натурального эксперимента, а численное моделирование составляет неотъемлемую часть современной фундаментальной и прикладной науки. Поэтому будущие научные работники и инженеры обязательно должны владеть технологией численного моделирования, уметь исследовать различные физические явления и процессы с помощью методов компьютерного моделирования.

В докладе представлена упрощенная модель оптического квантового усилителя бегущей волны в стационарном режиме. При проведении лабораторных работ по дисциплине «Физика лазеров» студентам факультета электроники СПб ГЭТУ «ЛЭТИ» предлагается реализовать предложенную модель в системе MathCad, исследовать работу усилителя при различных параметрах усиливающей среды.

#### Основные сведения об ОКУ бегущей волны

Квантовые усилители служат для того, чтобы увеличить напряженность поля электромагнитной волны, поступающей на их вход. В квантовом усилителе электромагнитные колебания усиливаются при взаимодействии с квантовой системой частиц (атомов, молекул, ионов) за счёт вынужденного излучения [1]. Если число актов вынужденного излучения, вызванного падающей волной, превышает число актов вынужденного поглощения, то среда усиливает эту волну. Для этого в среде должно быть достигнуто состояние инверсной заселенности. Инверсная заселенность энергетических уровней - неравновесное состояние среды, при котором число частиц (атомов, молекул), находящихся на верхних энергетических уровнях, т. е. в возбужденном



состоянии, больше, чем число частиц, находящихся на нижних энергетических уровнях. Основная проблема создания квантовых усилителей – получение состояния рабочего вещества с инверсией населенностей. В настоящее время предложено и осуществлено очень много способов создания инверсии населенностей в различных веществах, находящихся в твердом, жидком и газообразном состоянии, и на их основе осуществлены разнообразные квантовые усилители, работающие в широком диапазоне волн. Квантовые усилители можно разделить на два класса, различающихся главным образом диапазоном частот, а следовательно, и типами активных сред и также областями применения, – это квантовые усилители СВЧ-диапазона и усилители оптического диапазона. В данной работе исследуется квантовый усилитель оптического диапазона.

Оптический квантовый усилитель (ОКУ) представляет собой устройство, позволяющее усиливать когерентное излучение оптического диапазона. Возможны два режима работы ОКУ: бегущей волны (без обратной связи) и регенеративный (с положительной обратной связью, создаваемой с помощью открытых резонаторов). В данной работе исследуется ОКУ бегущей волны.

Пусть плоская волна падает на лазерный усилитель длиной  $l$  вдоль оси  $z$ . Уравнение переноса излучения в активной среде записывается в виде [2].

$$\frac{1}{c} \frac{dI(z,t)}{dt} + \frac{dI(z,t)}{dz} = (\alpha(I) - \beta)I(z,t), \quad (1)$$

где  $I(z,t)$  – интенсивность излучения;  $t$  – время,  $z$  – координата, вдоль которой распространяется излучение;  $\beta$  – коэффициент нерезонансных потерь;  $\alpha(I)$  – зависящий от интенсивности коэффициент усиления.

В стационарном случае интенсивность не меняется со временем и первый член в уравнении переноса будет равен нулю. Тогда уравнение переноса принимает вид

$$\frac{dI}{dz} = -\beta I + \alpha(I)I,$$

где  $\alpha(I)$  – зависящий от интенсивности коэффициент усиления  $\alpha(I) = \frac{\alpha_0}{1 + I/I_s}$ . Здесь  $\alpha_0$  – линейный коэффициент усиления (коэффициент усиления слабого сигнала),  $I_s$  – интенсивность насыщения. Под интенсивностью насыщения понимают интенсивность, при которой коэффициент усиления падает в два раза по сравнению с линейным. Действительно, при  $I = I_s$  коэффициент  $\alpha(I) = \alpha_0/2$ .

Таким образом, уравнение переноса можно записать как

$$\frac{dI}{dz} = -\beta I + \frac{\alpha_0}{1 + I/I_s} I.$$

Проанализируем это выражение. Рассмотрим три случая для различных диапазонов интенсивностей:



$$1. I \ll I_s.$$

В этом случае  $I/I_s \ll 1$ . Тогда  $1 + I/I_s \sim 1$  и  $\frac{dI}{dz} \approx -\beta I + \alpha_0 I = (\alpha_0 - \beta)I$ .

Решив это уравнение с начальным условием  $I(z = 0) = I_0$ , получим  $I(z) = I_0 \exp((\alpha_0 - \beta)z)$ . Таким образом, при малых уровнях сигнала наблюдается экспоненциальный рост выходной энергии (линейное усиление).

$$2. I \gg I_s.$$

В этом случае  $I/I_s \gg 1$ . Тогда  $1 + I/I_s \sim I/I_s$  и  $\frac{dI}{dz} \approx -\beta I + \alpha_0 I_s$ .

При значительных входных сигналах рост выходной энергии замедляется и, начиная с некоторой интенсивности, вообще прекращается. Стационарное значение интенсивности излучения достигается, когда все, что может излучить единичный отрезок длины активного вещества в режиме полного насыщения, поглощается за счет нерезонансных потерь в том же отрезке. Этот баланс поглощенной и излученной энергий приводит к исчезновению дальнейшего усиления по мере распространения вдоль усилителя. Если интенсивность достигает предельного значения  $I_{\text{пред}}$ , то это значит, что дальнейшего усиления нет и  $dI/dz = 0$ . Тогда можем записать:  $0 = -\beta I_{\text{пред}} + \alpha_0 I_s$ . Отсюда получаем,

что  $I_{\text{пред}} = \frac{\alpha_0 I_s}{\beta}$ . Таким образом, в усилителе бегущей волны предельная выходная интенсивность не зависит от входного сигнала, а определяется интенсивностью насыщения, коэффициентом линейного усиления и коэффициентом нерезонансных потерь.

$$3. I \sim I_s.$$

Проинтегрировав уравнение переноса  $\frac{dI}{dz} = -\beta I + \frac{\alpha_0}{1 + I/I_s} I$  по длине  $l$ , получим:

$$(\alpha_0 - \beta)l = \ln \left( \frac{I_{\text{ВЫХ}}}{I_{\text{ВХ}}} \right) - \frac{\alpha_0}{\beta} \ln \left( \frac{\alpha_0 - \beta \left( 1 + \frac{I_{\text{ВЫХ}}}{I_s} \right)}{\alpha_0 - \beta \left( 1 + \frac{I_{\text{ВХ}}}{I_s} \right)} \right). \quad (2)$$

Это уравнение в общем виде не имеет аналитического решения и решается только численно.

### Порядок выполнения лабораторной работы

В процессе выполнения данной лабораторной работы студенты должны:

- записать уравнение (2) для нормированной величины  $I/I_s$
- численно решить полученное уравнение в среде Маткад в разных диапазонах  $I/I_s$
- убедиться, что в предельных случаях ( $I/I_s \gg 1$  и  $I/I_s \ll 1$ ) численное



решение совпадает с результатами, полученными по аналитическим формулам.

-построить графики полученных зависимостей

### **Заключение и выводы.**

В докладе представлена упрощенная модель оптического квантового усилителя бегущей волны. Выделены три режима работы ОКУ бегущей волны: когда интенсивность падающего излучения много больше, много меньше и сравнима с интенсивностью падающего излучения. В первых двух случаях оптическое усиление может быть описано простыми аналитическими формулами. В последнем случае необходимо численное моделирование.

Простота предложенной модели позволяет реализовать ее в системе MathCad в рамках проведения лабораторных работ и выполнить серию параметрических расчетов.

### **Литература:**

1. Звелто О. Принципы лазеров. СПб, Лань, 2008
2. Гоголева Н.Г. Квантовая и оптическая электроника: Методические указания к проведению практических занятий. СПб, Изд-во «СПбГЭТУ ЛЭТИ», 2014

### **References:**

1. Svelto O. Principles of Lasers. St. Petersburg, Lan, 2008
2. Gogoleva N.G. Quantum and optical electronics. Methodical instructions for conducting practical exercises. St. Petersburg, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", 2014

**Abstract.** *Introduction. The simplified model of travelling-wave light amplifier in stationary mode is presented. The breadth of use of travelling-wave light amplifiers defines the relevance of modeling of physical processes responsible for nonlinear light amplifying.*

*Basic information about travelling-wave light amplifier*

*Three modes of operation of a amplifier are singled out, - when the intensity of the incident radiation is much greater, much less than and comparable to the intensity of the incident radiation*

*Order of performance of laboratory work*

*Order of performance of laboratory work is presented*

*Conclusions*

*The simplicity of the proposed model makes it possible to implement it in MathCad in the framework of laboratory works and perform a series of parametric calculations*

**Key words:** *light amplifier, numerical simulation*

Статья отправлена: 20.06.2018 г.

© Гоголева Н.Г.