



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; β – 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 α_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.