

УДК 532.629

## **ПРИКЛАДНАЯ ПРОГРАММА МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕРАВНОВЕСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЛАБОРАТОРНОМ ПРАКТИКУМЕ ПО ОБЩЕЙ ФИЗИКЕ**

**В.А. Юревич, Ю.В. Юревич**

Могилевский государственный университет продовольствия, г. Могилев, Республика Беларусь

**Е.В. Тимошенко**

Могилевский государственный университет им. А.А.Кулешова, г. Могилев, Республика Беларусь

### **1 Важность и место предложенной тематики практикума**

Компьютерное сопровождение процессов преподавания и обучения физике (равно как и многим другим дисциплинам естественного и технического циклов), безусловно, открывает их новые дидактические возможности. Применение компьютерных расчетов позволяет смоделировать основные явления и процессы и перейти от натурального, иногда затратного во многих отношениях, эксперимента к упрощенным и обобщенным схемам, которые концентрируют внимание на физических принципах. Будем это особо утверждать о неравновесном излучении, объяснение энергетического баланса которого основано на квантовых представлениях о поведении молекул в высокочастотном электромагнитном поле.

В курсах физики, адаптированных для ВУЗов технического профиля, довольно ограниченно представлен один из важных разделов физики, разрабатываемый ныне во многих исследовательских направлениях с актуальными техническими и технологическими приложениями. Речь идет о физике лазеров – именно в механизмах действия этих источников света (в более раннем названии – квантовых генераторов) особым образом задействована микроструктура вещества. Ее элементарные компоненты (активные центры) в процессе излучения совершают вынужденные и релаксационные переходы в возбужденное и затем – из возбужденного неравновесного состояния в основное. Формирование лазерного оптического поля в условиях неравновесного излучения может представлять выраженный автоколебательный процесс. Режимов автоколебаний интенсивности стремятся достичь в лазерах специального назначения с излучением в режимах испускания контрастных серий коротких пульсаций, используемых в системах передачи информации. Подобные регулярные последовательности оптических сигналов способны нести цифровую информацию.

Рассмотрение излучательных автоколебательных процессов, происходящих в испускании света неравновесными оптическими системами, при изучении раздела «Оптика и квантовая физика» можно рекомендовать ввиду определенной простоты их теоретической модели. Нелинейная балансная модель явления представлена системой дифференциальных уравнений с вполне доступной для понимания студентов интерпретацией физической природы компонентов и параметров расчетной схемы. Постигание закономерностей динамики неравновесного излучения также представляется важным для понимания волновой природы света и квантового характера его излучения, нелинейности реакции оптической

среды на световое воздействие. Последнее свойство означает зависимость от интенсивности света таких материальных характеристик как показатель преломления или коэффициент поглощения (по бытовым представлениям и в первом приближении расчетных оценок эти параметры для данной среды считаются постоянными величинами). Именно нелинейность неравновесной среды способна стимулировать автоколебательный характер его динамики.

Авторами сообщения предложены два связанных единым контекстом методических пособия [1, 2], использующих алгоритмы моделирования нелинейной динамики излучения.

## **2 Основные понятия**

Прежде всего следует подчеркнуть, что практике чаще всего имеют дело с тепловым излучением. Это – электромагнитное излучение, испускаемое веществом за счет энергии, заключенной в его внутренней структуре (кинетической энергии движения атомов или молекул и энергии их взаимодействия). В случае, если излучение находится в термодинамическом равновесии с веществом, то такое излучение называется равновесным.

Веществам со сложной молекулярной структурой и, соответственно, со сложной энергетической структурой электронов в составляющих среду активных центрах (атомах, молекулах, ионах или мета-атомах – микрообразованиях с квантовыми свойствами типа экситонов) свойственна эмиссия (испускание) оптического излучения, которая происходит после прекращения действия возбуждения и избыточна над тепловым. Нетепловую эмиссию света веществом, совершающуюся в течение некоторого времени после поглощения им энергии возбуждения, относят к неравновесным процессам излучения. Среди них – люминесценция и вынужденное излучение.

Люминесценцией называют свечение, превышающее уровень температурного излучения тела, в том случае, если это избыточное излучение обладает конечной длительностью примерно  $10^{-10}$  секунды и более. Важной особенностью люминесценции является то, что она способна проявляться при значительно более низких температурах, так как не использует тепловую энергию излучающей системы. За это люминесценцию часто называют «холодным свечением». Интенсивность люминесцирующего объекта в спектральном диапазоне частот его излучения существенно больше, чем интенсивность света, испускаемого нагретым телом в этом же спектральном диапазоне, имеющим ту же температуру, что и люминесцирующее тело. Физическая природа люминесценции состоит в излучательных переходах электронов в оболочках атомов или молекул из возбужденного состояния в основное. Причиной первоначального их возбуждения могут служить различные факторы: внешнее излучение, термический нагрев, газовый разряд или химические реакции. Существенно, что переход в основное состояние совершается как самопроизвольный (спонтанный) с испусканием фотонов (квантов электромагнитного излучения) в относительно широком спектральном диапазоне.

Вынужденное излучение как вид неравновесного, также избыточного над тепловым, свечения тел, особо важен, поскольку лежит в основе такого универсального оптического объекта, нашедшего широкое применение в современной технике, как лазер. Вынужденное излучение отличается от люминесценции и свойственного ей спонтанного испускания тем, что в результате взаимодействия возбужденного активного центра, в наиболее упрощенной модели представляемого элементарным двухуровневым диполем, с некоторым фотоном, который соответствует световому полю определенной частоты, испускается еще один фотон той же самой частоты, распространяющийся в том же направлении.

На языке волновой теории это означает, что активным центром испускается электромагнитная волна с частотой, фазой, поляризацией и направлением распространения, точно такими же, как и у иницирующей волны. В результате вынужденного испускания фотонов амплитуда волны, распространяющейся в среде с люминесцентными свойствами, возрастает. При этом излучение происходит в крайне узком спектральном диапазоне – условие вынужденного испускания представляет собой требование резонанса (практического совпадения частот иницирующего и эмитированного излучения). Чтобы проходящая через слой вещества электромагнитная волна усиливалась, нужно искусственно создать условия,

при которых возможно усиление – обусловить инверсную заселенность уровней возбуждением среды. К известным материалам, где достигается инверсия, относят, например, ряд люминесцентных кристаллов, газовые и полупроводниковые среды, флуоресцентные растворы.

Инвертированное состояние среды означает, что вещество становится термодинамически неравновесным, среда возбуждена – активные центры в процессе их возбуждения накопили электромагнитную энергию. Факторы возбуждения, как и в случае люминесценции, могут иметь различную природу, сам процесс именуют накачкой. Для поддержания излучения с непрерывными характеристиками, в схеме лазера необходимо использовать обратную связь – частично возвратить сигнал назад в устройство для его дальнейшего усиления. Лазерная система обратной связи представляет собой оптический резонатор.

### **3 Описание модели**

Временной ход неравновесного излучения приближенно можно описать в представлениях так называемой балансно-вероятностной модели взаимодействия электромагнитного поля оптического излучения, усиливаемого в люминесцентной среде, помещенной внутри резонатора. Схема расчета, формирующая при выполнении заданий [1,2] зависимость интенсивности свечения, представляет нелинейную систему двух дифференциальных уравнений. Образующими ее соотношениями устанавливается баланс мощности, выделившейся в виде светового излучения, и мощности, запасенной в инвертированной среде в ходе накачки.

В случае люминесценции уравнениями описывается либо апериодический процесс излучения, либо квазипериодическая серия колебаний интенсивности, по амплитуде быстро затухающих к стационарному значению мощности свечения. Оба варианта развертки процесса воспроизводят динамику излучательного перехода неравновесной физической системы в основное (установившееся) состояние, которая анализируется в ходе выполнения заданий лабораторной работы, предложенных в пособии [1]. Влияние обратной связи при моделировании люминесценции не учитывается – среда в течение некоторого периода возбуждается, набирая инверсию, затем разворачивается процесс ее сброса. Скорость перехода к стационарному состоянию зависит от уровня возбуждения и материальных параметров среды.

При моделировании автоколебательного режима свечения лазеров, разворачивающегося в условиях обратной связи требуемый для старта генерации уровень усиления должен превышать сумму потерь из-за рассеяния и поглощения энергии усиливаемого излучения в активной среде и так называемых полезных потерь из-за снижения энергии при выходе излучения сквозь полупрозрачные зеркала резонатора. Необходимо, таким образом, учесть резонатора в общем балансе энергии в схеме взаимодействия поля излучения и инверсной среды.

В условиях незначительного превышения усиления над потерями должна стартовать генерация. Скорость усиления будет определяться разностью показателя усиления, обусловленного инверсной заселенностью, и обоих видов потерь. Добротность резонатора характеризует его способность обеспечить обратную связь, давая возможность поддерживать непрерывным процесс генерации. Величина потерь является, в свою очередь, основной характеристикой добротности. Потери в резонаторе могут управляться самим излучением, его добротность изменяется в условиях размещения вместе с усиливающим элементом пассивного затвора. Резонансное поглощение среды такого затвора может насыщаться, поэтому пропускание среды зависит от мощности проходящего излучения – при значительном уровне интенсивности среда просветляется, затвор начинает в большей степени пропускать излучение, при снижении интенсивности поглощение восстанавливается. Поэтому в схеме расчета принципиален учет потерь в виде ввода физически обоснованных нелинейных компонентов.

Лазерное устройство с модулирующим затвором в условиях непрерывного уровня возбуждения (накачки) способно после некоторого переходного этапа перейти в автоколебательный режим самоподдерживающихся пульсаций. Их частота, амплитуда и контраст зависят от соотношения коэффициентов системы. Автоколебания отличаются от вынужденных колебаний тем, что последние вызваны периодическим внешним воздействием и происходят с частотой этого воздействия. Возникновение же самопульсаций, их средняя мощность и частота определяются внутренними свойствами самой автоколебательной системы и не требуют усложнения лазерных схем за счет внешних модуляторов уровня накачки. В лазерной оптике для создания компактных, более надежных лазеров, с высокой воспроизводимостью излучающих регулярные серии импульсов, предпочтительны именно схемы с возможностью развития автоколебаний. Характеристики периодического автоколебательного режима самопульсаций излучения, их зависимость от сочетания физических параметров модели анализируются при выполнении заданий лабораторной работы, предложенных в пособии [2].

#### Список литературы

1. В.А. Юревич, Ю.В. Юревич, Е.В. Тимощенко. Моделирование динамики неравновесных процессов излучения света. Методические указания к лабораторной работе по разделу «Квантовая физика» курса общей физики / Могилев: МГУП. 2020.– 16 с.
2. В.А. Юревич, Ю.В. Юревич, Е.В. Тимощенко. Моделирование автоколебательных процессов в лазерной оптике. Методические указания к лабораторной работе по разделу «Квантовая физика» курса общей физики / Могилев: МГУП. 2020.– 16 с.