

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования

**«МОГИЛЕВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ПРОДОВОЛЬСТВИЯ»**

Кафедра физики

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СВОБОДНОГО РЕЖИМА
ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРА**

Методические указания к лабораторной работе *№10*
по разделу «Квантовая физика» курса общей физики
для студентов технологических и механических
специальностей дневной и заочной формы обучения

Могилев 2012

УДК 532.516

Рассмотрены и рекомендованы к изданию
на заседании кафедры физики
Протокол № 7 от 6.02.2012

Составители

доктор физико-математических наук, профессор УО «МГУП»

В.А.Юревич,

кандидат физико-математических наук, доцент
УО «МГУ им. А.А.Кулешова»

Е.В.Тимощенко,

ассистент УО «МГУП» **Ю.В.Юревич**

Рецензент

кандидат физико-математических наук, доцент УО «МГУП»

А.С. Скапцов

УДК 532.516

©УО «Могилевский государственный
университет продовольствия», 2012

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10 МОДЕЛИРОВАНИЕ СВОБОДНОГО РЕЖИМА ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: изучение физических принципов устройства лазера и динамики излучения источников когерентного излучения

ЗАДАНИЕ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ:

1. Построить временную зависимость интенсивности излучения лазера в режиме свободной генерации, используя компьютерную программу моделирования процесса.

2. Построить и проанализировать зависимости величин средней мощности излучения и времени его стабилизации от скорости накачки для разных типов лазеров.

ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ: персональный компьютер, прикладная программа моделирования лазерной генерации PrSelf_3.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Лазеры — это источники когерентного излучения, обладающие целым рядом уникальных свойств. Благодаря этим свойствам лазеры нашли широкое применение в военной технике, в технологии обработки материалов, в медицине, в химии, в оптических системах навигации, связи и локации, в прецизионных интерференционных экспериментах, а также просто в быту. Первый лазер был создан немногим более полувека тому назад, однако, современное общество и многие современные технические устройства уже невозможно представить без лазеров.

Одним из важнейших свойств лазерного излучения является высокая степень его монохроматичности (излучение света практически единственной длины волны), недостижимая в излучении не лазерных источников. Это свойство, как и возможность высокой концентрации мощности светового электромагнитного поля в узком пространственном канале (как следствие - тонкий пучок света), также как и ряд других уникальных свойств лазерного излучения возникают в результате согласованного, кооперативного испускания световых квантов многими атомами рабочего вещества. Подобный характер испускания приводит к тому, что колебания электрического и магнитного силовых векторов в электромагнитных волнах, образующих световые лучи, происходят в высшей мере синхронно вдоль светового пучка и в его сечении. Такая «синхронность» электромагнитных волн определяет понятие их *когерентности*, поэтому излучение лазера является *когерентным*.

1 ВЫНУЖДЕННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Лазер представляет собой квантовое устройство, поэтому прежде надо обратиться к вопросам квантовой оптики и рассмотреть процессы поглощения и испускания атомами квантов электромагнитного излучения.

Атом может находиться в различных энергетических состояниях с дискретными значениями энергии E_1 , E_2 и т. д. В теории Бора эти состояния называют стационарными. На самом деле, стационарным состоянием, в котором атом может находиться бесконечно долго в отсутствие внешних возмущений, является только состояние с наименьшей энергией. Это состояние называют *основным*. Все другие состояния нестабильны. Как правило, возбуждённый атом способен пребывать в этих состояниях лишь очень короткое время, порядка 10^{-8} с, после этого он самопроизвольно переходит в одно из низших состояний, испуская квант светового электромагнитного излучения (фотон). Его частота ω_{12} определяется условием частот Бора: $\omega_{12} = \frac{E_2 - E_1}{\hbar} \eta$ (из второго постулата Бора, здесь $\eta \approx 1.05 \cdot 10^{-34}$ Дж с – постоянная Планка).

Излучение, испускаемое при самопроизвольном переходе атома из одного состояния с энергией E_2 в другое с энергией E_1 ($E_1 < E_2$), называют *спонтанным*.

На некоторых энергетических уровнях атом может пребывать дольше – порядка 10^{-3} с. Такие уровни называют *метастабильными*.

Переход атома в более высокое энергетическое состояние (с энергией E_2) может происходить при резонансном поглощении фотона, энергия которого равна разности энергий атома в конечном и начальном состояниях.

Переходы между энергетическими уровнями атома не обязательно связаны с поглощением или испусканием фотонов. Атом способен приобрести или отдать часть своей энергии и перейти в другое квантовое состояние в результате взаимодействия с другими атомами или столкновений с электронами. Такие переходы называются *безызлучательными*.

Для объяснения наблюдавшегося в эксперименте термодинамического равновесия между веществом и испускаемым (поглощаемым) им световым излучением А. Эйнштейн в 1916 году сформулировал постулат о том, что помимо поглощения и спонтанного излучения должен существовать третий, качественно иной тип взаимодействия. Было предположено, что переход электрона в атоме с верхнего энергетического уровня на нижний может происходить под влиянием внешнего электромагнитного поля, частота которого равна собственной частоте перехода. Возникающее при этом излучение получило название *вынужденного* или *индуцированного*. Вынужденное излучение отличается от спонтанного тем, что в результате взаимодействия возбуждённого атома с фотоном атом испускает еще один фотон той же самой частоты, распространяющийся в том же направлении. На рисунке 1 схематически представлены возможные механизмы переходов между двумя энергетическими состояниями атома с поглощением или испусканием кванта.

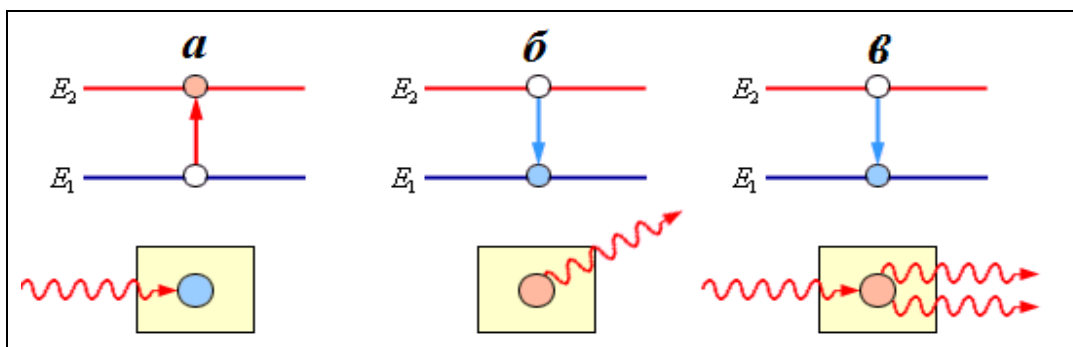


Рисунок 1 - Условное изображение процессов поглощения (а), спонтанного испускания (б), и индуцированного испускания кванта (в)

На языке волновой теории это означает, что атомом излучается электромагнитная волна с частотой, фазой, поляризацией и направлением распространения, точно такими же, как и у первоначальной волны. В результате вынужденного испускания фотонов амплитуда волны, распространяющейся в среде, возрастает. С точки зрения квантовой теории, в результате взаимодействия возбуждённого атома с фотоном, частота которого равна частоте перехода, появляются два совершенно одинаковых фотона – близнеца. Именно вынужденное излучение является физической основой работы лазеров. Название самих приборов составлено из первых букв английского выражения: «*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*» (*laser*), что в переводе означает «усиление света при вынужденном испускании излучения».

Рассмотрим слой оптической среды, атомы которой могут находиться в состояниях 1 и 2 с разностью энергий $\Delta E = E_2 - E_1 > 0$. Пусть в этом слое распространяется излучение резонансной частоты перехода $\omega = \Delta E / \hbar$. Согласно распределению Больцмана, при термодинамическом равновесии большее количество атомов вещества будет находиться в нижнем энергетическом состоянии 1. Некоторая часть атомов будет находиться и в верхнем энергетическом состоянии 2, получая необходимую энергию при столкновениях с другими атомами. Обозначим населенности нижнего и верхнего уровней соответственно через n_1 и $n_2 < n_1$. При распространении резонансного излучения в такой среде будут происходить все три процесса, изображённые на рисунке 1. Эйнштейном было показано, что процесс (а) поглощения фотона невозбужденным атомом и процесс (в) индуцированного испускания кванта возбуждённым атомом имеют одинаковые вероятности. Так как $n_2 < n_1$, поглощение фотонов будет происходить чаще, чем индуцированное испускание. В результате ослабляется интенсивность прошедшего через слой вещества излучения. Этим явлением можно объяснить наличие в спектре солнечного света относительно тёмных линий, называемых фраунгоферовыми. Излучение, возникшее в результате спонтанных переходов (б), некогерентно и распространяется во всевозможных направлениях, не создавая вклада в проходящую волну.

Чтобы проходящая через слой вещества электромагнитная волна усиливалась, нужно искусственно создать условия, при которых $n_2 > n_1$, т. е. создать *инверсную заселённость* уровней. Такая среда является термодинамически

неравновесной. Идея использования неравновесных сред для получения оптического усиления впервые была высказана советским физиком В.А. Фабрикантом в 1940 г. В 1954 г. советские физики Н.Г. Басов, А.М. Прохоров и независимо от них учёный из США Ч. Таунс, использовали явление индуцированного испускания для создания микроволнового генератора радиоволн с длиной волны $\lambda = 1,27 \text{ см}$. В 1964 году за разработку нового принципа усиления и генерации радиоволн все трое исследователей были удостоены Нобелевской премии.

Исторически первым действующим генератором когерентного излучения в оптическом диапазоне частот был лазер на рубине – искусственно выращенном люминесцентном диэлектрическом кристалле розового цвета из семейства корундов. Излучающий в импульсном режиме прибор был создан в декабре 1960 г. под руководством Т. Меймана, учёного из США, независимо несколькими месяцами позже – исследователем из Физического Института АН СССР А.М. Леонтовичем в 1961 г. В том же году лазерная генерация на рубине была реализована группой сотрудников Института физики АН Белорусской ССР в Минске под руководством академика В.А. Пилиповича.

2 ПРИНЦИП УСТРОЙСТВА ЛАЗЕРА

Среда, в которой создана инверсная заселённость уровней, называется *активной (рабочей средой* или *активным элементом*). Она может служить резонансным усилителем светового сигнала. Для того, чтобы возникала генерация света и его свойства были непрерывными, необходимо использовать *обратную связь* – частично возвратить сигнал назад в устройство для его дальнейшего усиления. Поэтому активную среду располагают между двумя высококачественными зеркалами, отражающими свет строго назад, чтобы он многократно прошёл через активную среду, вызывая лавинообразный процесс индуцированной эмиссии когерентных фотонов. Система, образованная двумя такими отражателями, представляет собой *открытый резонатор* (*оптический* или *лазерный резонатор*). При этом в усиливающем элементе, размещённом в открытом резонаторе, должна поддерживаться инверсная заселённость уровней. Это достигается с помощью *накачки* - процесса, обеспечивающего непрерывность инверсии населённостей.

Начало лавинообразному процессу в резонаторе при определенных условиях может положить случайное испускание резонансного фотона (например, в результате спонтанного акта люминесценции), при котором возникает излучение, направленное вдоль оси системы.

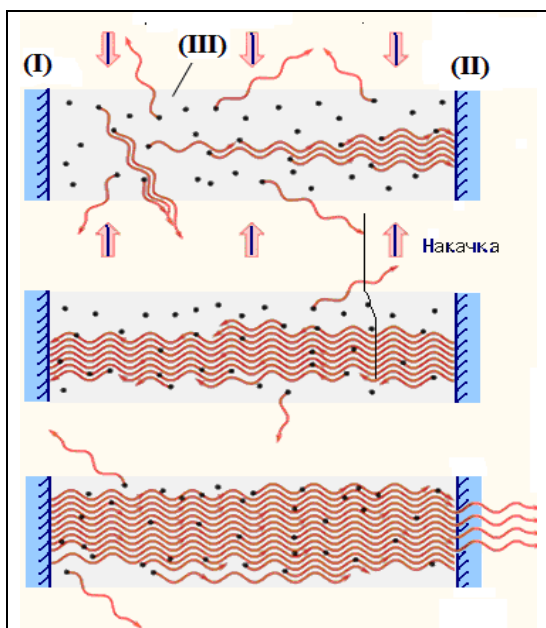


Рисунок 2 - Развитие лавинообразного процесса генерации в лазере. Приведен вариант с плоскопараллельными зеркалами (плоский резонатор), у одного из отражателей (I) $r_1 = 1$ («глухое» зеркало), у второго (II) $r_2 < 1$, его называют выходным. Между отражателями резонатора – активная (рабочая) среда (III)

На рисунке 2 схематически представлено развитие лавинообразного процесса в лазере. Через некоторое время в лазерном резонаторе после определённого переходного процесса формируется стабильный (стационарный) режим генерации. Именно генерация когерентного электромагнитного поля светового излучения и есть процесс, отличающий лазер от любых других источников света. Лазерное излучение выводится наружу через одно (иногда, оба) из зеркал, обладающее частичной прозрачностью (т. е., с энергетическим коэффициентом отражения $r < 1$).

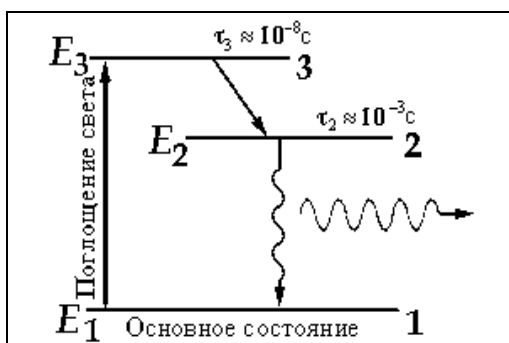


Рисунок 3 - Трехуровневая схема оптической накачки. Указаны параметры τ_2 и τ_3 , обычно называемыми временами жизни состояний 2 и 3 с энергиями E_2 и E_3 . Уровень E_2 – метастабильный. Переход между уровнями E_3 и E_2 безызлучательный. Лазерный переход осуществляется между уровнями E_2 и E_1 . В кристалле рубина уровни E_1 , E_2 и E_3 принадлежат примесным ионам хрома

Существуют различные способы получения среды с инверсной населенностью уровней. Первыми из лазеров на конденсированных средах стали лазеры на люминесцентных кристаллах – там обычно используется оптическая

накачка. Атомы возбуждаются за счет поглощения света. Но для этого недостаточно только двух уровней. Каким бы мощным не был свет лампы накачки, число возбуждённых атомов в двухуровневой схеме не может оказаться больше числа невозбуждённых из-за того, что вероятность резонансного поглощения фотона равна вероятности вынужденного излучения. В лазере на основе *рубина* (и поныне одного из широко используемых активных кристаллов) накачка производится через уровень **3** с энергией E_3 , расположенный выше двух других (рисунок 3). Кристаллическая решётка рубина создана атомами (ионами), образующими окисел алюминия Al_2O_3 с примесью до 0.03% ионов хрома – Cr^{3+} , поглощение энергии накачки переводит ионы хрома в возбуждённое короткоживущее состояние **3** (из которого происходит безызлучательный переход в относительно долгоживущее (*метастабильное*) состояние **2**). Тем самым в резонаторе лазера происходит «накопление» ионов хрома на уровне с энергией $E_2 > E_1$, то есть реализуется инверсная заселённость.

После вспышки мощной лампы, расположенной в резонаторе параллельно кристаллу рубина, выращенному в форме цилиндрического стержня, многие ионы хрома переходят в состояние с энергией E_3 , а через промежуток $\tau_3 \approx 10^{-8}$ с они переходят в состояние с энергией E_2 . Перенаселённость (инверсия) возбуждённого уровня E_2 по сравнению с невозбуждённым уровнем E_1 возникает из-за относительно большого времени жизни τ_2 уровня E_2 . Лазер на рубине работает в импульсном режиме на длине волны 694,3 нм (тёмно-вишнёвый свет), мощность излучения достигает в импульсе $10^6 - 10^9$ Вт.

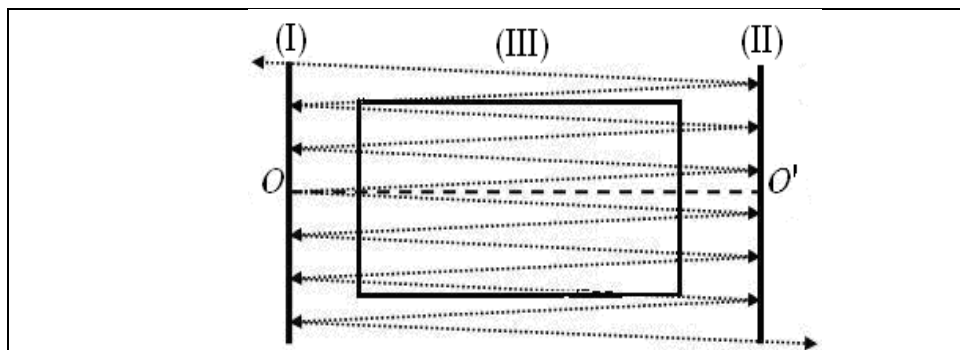


Рисунок 4 - Ход лучей в случае наклона по отношению к оси открытого резонатора: (I) и (III) – отражатели, (II) – активный элемент

Лазерный резонатор служит ещё одной цели – в нём формируется световой пучок с крайне *малой расходимостью* и *плоским волновым фронтом*. Усиливаются способны только те лучи, направление которых совпадает с горизонтальной линией – осью резонатора OO' (рисунок 4). Остальные лучи после нескольких последовательных отражений на параллельных зеркалах «сбегают» из активного элемента и резонатора. Такие лучи испытывают потери, называемые дифракционными, из-за них усиление для этих лучей оказывается недостаточным – как говорят, эти лучи не выходят в генерацию.

3 ТИПЫ ЛАЗЕРОВ

Лазеры, в основном, принято различать по природе активных сред и способу накачки. Активные элементы твердотельных лазеров, как правило, образованы прозрачными кристаллами или стёклами. Среди них, кроме уже названного рубина – *гранат, фторид лития-натрия с примесью эрбия, александрит, кварцевое стекло*. Для создания в их энергетической структуре схемы с метастабильными уровнями кристаллы и стёкла активируют – в кристаллическую решётку при их изготовлении внедряют атомы (ионы) других элементов. Гранат (образованный изоморфными рядами окислов кремния и алюминия прозрачный кристалл сиреневого цвета) активируют, например, неодимом, титаном или иттербием, стекло активируют неодимом, используют также органические соединения, активированные редкоземельными элементами. Многие из этих материалов генерируют в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне, например, гранат, активированный неодимом ($Nd^{3+}:YAG$), или неодимовое стекло излучают на длине волны 1.06 мкм.

Рабочей средой лазера может газ или смесь газов. Во многих лазерах на основе *газовых сред* накачка осуществляется за счёт энергии электрического разряда. Газовый лазер на смеси гелия и неона в настоящее время является одним из самых распространённых лазеров (первый гелий-неоновый лазер был создан в 1961 г. А. Джаваном, В. Беннетом и Д. Герриоттом, исследователями из США). Активным газом, на котором возникает генерация на длине волны 632,8 нм (ярко-красный свет) в непрерывном режиме, является неон. Гелий является буферным газом – он участвует в механизме создания инверсной заселённости одного из верхних уровней неона. На рисунке 5 представлена упрощённая схема уровней гелия и неона и механизм создания инверсной населённости лазерного перехода.

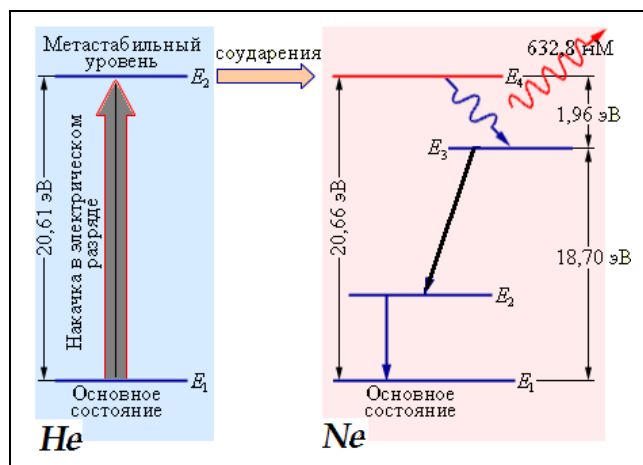


Рисунок 5 - Механизм накачки He-Ne лазера. Прямыми стрелками изображены спонтанные переходы в атомах неона

Накачка лазерного перехода $E_4 \rightarrow E_3$ в неоне осуществляется следующим образом. В высоковольтном электрическом разряде вследствие соударений с электронами значительная часть атомов гелия переходит в верхнее метастабильное состояние E_2 . Возбуждённые атомы гелия неупруго сталкиваются с атомами неона, находящимися в основном состоянии, и передают им свою энергию. Уровень E_4 неона расположен на 0,05 эВ выше метастабильного уровня E_2 гелия. Не-

достаток энергии компенсируется за счет кинетической энергии соударяющихся атомов. На уровне E_4 неона возникает инверсная заселенность по отношению к уровню E_3 , который сильно обедняется за счет спонтанных переходов на уровни, расположенные ниже. При достаточно высоком уровне накачки в смеси гелия и неона начинается лавинообразный процесс размножения идентичных когерентных фотонов.

Если ёмкость со смесью газов (обычно её основная часть – тонкий стеклянный цилиндр) помещена в оптический резонатор, то возникает лазерная генерация. На рисунке 6 изображена схема гелий-неонового лазера. Отметим, что прозрачные основания цилиндрической трубки (I) скошены, угол наклона проходящего луча соответствует углу Брюстера – усиливаться в ходе генерации должны только волновые цуги, имеющие соответствующую одинаковую поляризацию. Лазер генерирует плоскополяризованный световой пучок.

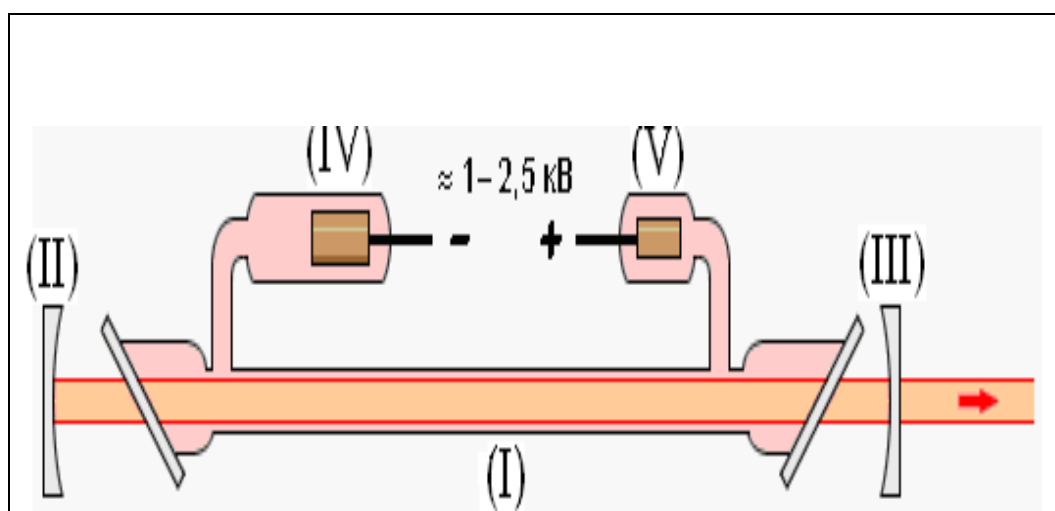


Рисунок 6 - Схема гелий-неонового лазера: (I) – стеклянный цилиндр со смесью гелия и неона, в котором создаётся высоковольтный разряд; (II) – «глухое» сферическое зеркало с отражением r_1 , (пропускание менее 0,1 %) (III) – сферическое зеркало с отражением $r_2 \approx 0.98$, (IV) – катод; (V) – анод

Излучение $He - Ne$ лазера обладает исключительной, непревзойденной монохроматичностью. Считается, что достижимый частотный диапазон, в котором способен излучать этот лазер (ширина спектральной линии генерации), должен составлять примерно $\Delta\nu \approx 5 \cdot 10^{-4} \text{ Гц}$ – эта величина крайне мала.

Время когерентности электромагнитных колебаний в световом пучке такого источника оказывается порядка $\tau \approx 1 / \Delta\nu \approx 2 \cdot 10^3 \text{ с}$, а длина когерентности $c\tau \approx 6 \cdot 10^{11} \text{ м}$, т. е. больше диаметра земной орбиты. На практике многие технические причины мешают реализовать столь узкую спектральную линию $He - Ne$ лазера. Путем тщательной стабилизации всех параметров лазерной установки удастся достичь относительной ширины $\Delta\nu / \nu$ порядка $10^{-14} - 10^{-15}$, что примерно на 3–4 порядка хуже теоретического предела. Но и реально достигнутая монохроматичность излучения $He - Ne$ лазера делает этот прибор совершенно незаменимым при решении многих научных и технических задач. Современные высокостабильные гелий-неоновые лазеры производятся в моноблочном испол-

нении. Для этого используется стеклообразное вещество – *ситалл*, обладающий практически нулевым температурным коэффициентом расширения. В образце ситалла в форме прямоугольного параллелепипеда просверливается канал, к торцам которого на оптическом контакте приклеиваются лазерные зеркала. Канал заполняется смесью гелия и неона. Общее давление в смеси составляет порядка 10^2 Па при соотношении компонент *He* и *Ne* примерно 10 : 1. Катод и анод вводятся через дополнительные боковые каналы. Такая моноблочная конструкция обеспечивает высокую механическую и тепловую стабильность.

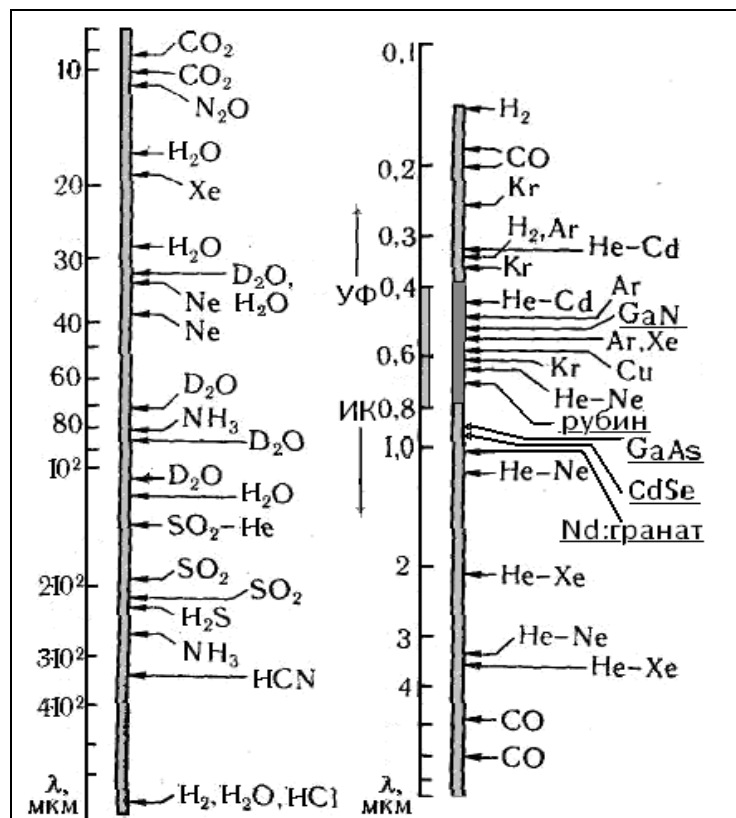


Рисунок 7 - Схема спектрального диапазона излучения лазеров на шкале длин волн. В основном, обозначены длины волн ряда газовых лазеров, на их фоне подчёркнутым шрифтом выделены длины волн для кристаллов (рубин, гранат) и некоторых полупроводников (нитрид галлия, арсенид галлия, селенид кадмия). Особо выделен видимый диапазон ($\sim 0.38...0.78$ мкм). Элементы *Cu* и *Cd* присутствуют в газах в виде паров. Активную среду или её составляющую может образовать водяной пар или пар тяжёлой воды (D_2O) – на основе изотопа водорода дейтерия

Аналогичным образом устроен также, например, лазер на смеси гелия и паров кадмия, излучающий на стыке зелёного и синего участка в видимом диапазоне. По спектру излучения среды газовых лазеров перекрывают довольно широкий диапазон длин волн – от микроволнового и ИК до ультрафиолетового (УФ) (см. схему на рисунке 7).

Среди других лазеров на газовых средах можно назвать *газодинамические лазеры*. Привлекательность динамических лазеров — в предельной простоте получения инверсной заселенности уровней в газовом потоке, например при

истечении, быстром последующем охлаждении и снижении давления нагретой смеси $CO_2-N_2-He(H_2O)$ в сверхзвуковом сопле. При «газодинамической накачке» достигается быстрое обновление активной среды, что и позволяет получать высокие уровни выходной мощности.

В химических газовых лазерах возбуждение активной среды создаётся энергией, освобождающейся при химических реакциях компонентов среды. Чаще всего непосредственно после реакции те или иные атомы оказываются в возбуждённом состоянии – в результате безынерционно образуется инверсная заселённость. В качестве примера приведем лазер на фтористом водороде. Возбужденные молекулы HF^* образуются в нем в процессе реакций $F + H_2 \rightarrow HF^* + H$ и $H + F_2 \rightarrow HF^* + F$. Большая оптическая однородность среды позволяет получать лазерное излучение с очень высокой монохроматичностью, когерентностью и малым углом расходимости. Газодинамические и химические лазеры излучают в ИК диапазоне.

Активной средой газовых лазеров, называемых *эксимерными* и получивших особое применение в медицине, служат комплексы атомов (эксимеры), существующие только в возбуждённом состоянии. Лазерное излучение возникает при переходе эксимера в нижнее электронное состояние, после чего он распадается. Эксимерные лазеры работают, как правило, в УФ области спектра. К числу эксимеров относятся Xe^* (с УФ длиной волны 172 нм), Ar^* (с УФ длиной волны 126 нм), ArO^* (с длиной волны в зелёной области 558 нм).

Группой белорусских физиков в 70-х гг. под руководством академика Б.И.Степанова была вначале предсказана возможность, а затем осуществлена *генерация на растворах красителей*. Её важным свойством оказалась возможность управления длиной волны излучаемого света в ходе генерации. Эти лазеры, получившие название *перестраиваемых*, позволяли получать излучение на любой длине волны в широком диапазоне УФ, видимого и ИК спектра. Работая на одном приборе, можно легко произвести настройку лазерного излучения на заданный спектральный интервал. Для накачки красителей используется излучение лазеров на активированных кристаллах или полупроводниках, а также свечение обычных газоразрядных ламп.

В ряде областей применения лазеров, таких, например, как световодная связь, системы записи, считывания и обработки информации, необходимо иметь лазерные устройства, характеризующиеся малым энергопотреблением, малой массой и малыми габаритами. В этих случаях очень удобны *полупроводниковые лазеры*. Активным элементом полупроводникового лазера является образец полупроводника (кристалл, твёрдый раствор, слоистая система – так называемая гетероструктура), возбуждаемый электрическим током, пучком электронов высокой энергии или просто электрическим разрядом. В полупроводниковых лазерах показатель усиления очень велик, и именно поэтому лазерный эффект достигается в довольно компактных образцах (доли миллиметра), оптический резонатор образован отражением на гранях (сколах) элемента. Значение максимально достижимой мощности определяется в них стойкостью излучающей поверхности лазера.

Излучение полупроводниковых лазеров лежит чаще всего в ИК области спектра. Длину их волны можно варьировать изменением температуры, давления, внешнего электрического поля.

4 ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ЛАЗЕРНОГО ЛУЧА

Кратко остановимся на четырех особенностях лазерного излучения. Выше уже пояснялась причина очень *высокой направленности* светового луча лазера. Угол его расходимости примерно в 10^4 раз меньше, чем луча хорошего прожектора. На поверхности Луны лазерный луч создает пятно диаметром около 10 км. Благодаря высокой направленности энергия лазерного луча может передаваться на очень большие, в том числе и космические, расстояния. Этим создана основа для осуществления связи, передачи по лазерному лучу как телефонных разговоров, так и телевизионных изображений. Требуемая мощность лазерного передатчика при этом в десятки и сотни тысяч раз ниже мощности обычных радиостанций. В будущем лазерный луч будет использоваться и для дальней передачи энергии.

О свойстве необычайно спектральной ширины (*монохроматичности*) излучения лазера также говорилось. Спектральный состав лазерного луча много меньше у всех других источников света и радиоволн. Высокая монохроматичность свойственна, однако, не всем типам лазеров. В ряде случаев (полупроводниковые лазеры, лазеры на растворах красителей) полоса излучений весьма широка, что также может быть использовано на практике.

Третье важнейшее свойство лазерного луча — его *высокая когерентность*. Фазы различных световых волн, выходящих сквозь зеркала лазерного резонатора, или одинаковы, или взаимно согласованы. Испускание всех других источников в оптическом диапазоне не когерентно (в радио области шкалы электромагнитных волн, однако, многие источники волнового поля дают именно когерентное излучение).

Когерентность широко используется в интерферометрии, голографии и во многих других отраслях науки и техники. Ранее, до появления лазеров, малоинтенсивные когерентные волны в видимой области спектра создавались только искусственно, путем деления одной волны на несколько.

Как особое свойство лазеров рассматривается возможность достижения *высокой интенсивности и низкой длительности импульсов лазерного излучения*. Выбор типа лазеров для его практического использования зависит от поставленной задачи. Есть лазеры непрерывного действия. Однако большинство лазерных систем излучает изолированные всплески световой энергии (световые моноимпульсы) или целую серию импульсов. Длительности импульсов также различны. В режиме свободной генерации длительность генерации близка к продолжительности свечения ламп накачки.

В режиме непрерывного действия излучают гелий - неоновые лазеры. Мощность лазера всего 0,002...0,020 Вт, что во много раз меньше мощности лампочки карманного фонаря. Для характеристики исключительных свойств излучения этого лазера приведём следующее сравнение. Интенсивность ΔI в

видимом частотном диапазоне, получаемая от Солнца на среднем расстоянии до Земли, равна 186 Вт/м^2 . Эта мощность распределена в спектральном интервале от $\nu_2 = 7,5 \cdot 10^{14}$ до $\nu_1 = 4,3 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$ ($\Delta\nu = \nu_2 - \nu_1 \approx 3 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$). Спектральная плотность интенсивности в солнечных лучах – $I_\nu = \Delta I / \Delta\nu \approx 6 \cdot 10^{-13} \text{ Вт/(м}^2 \text{Гц)}$. *He – Ne* лазер может испускать $0,01 \text{ Вт}$ в пучке с поперечным сечением 1 мм^2 , соответственно интенсивность в световом пятне на экране равна 10^6 Вт/м^2 . Поскольку ширину спектральной линии такого лазера можно принять как $\Delta\nu = 100 \text{ кГц}$, то спектральная плотность излучения *He – Ne* лазера $I_\nu \approx 10 \text{ Вт/(м}^2 \text{Гц)}$. Таким образом, спектральная плотность излучения даже относительно маломощного лазера на 13 порядков больше, чем у Солнца или другого теплового источника света. Именно поэтому характер взаимодействия с веществом лазерного света, распространяющегося в среде, существенно отличается от хорошо изученных случаев классической оптики.

Газодинамические лазеры на смеси $\text{CO}_2 + \text{N} + \text{He}$, работающие в непрерывном режиме в ИК области ($\sim 10 \text{ мкм}$), имеют мощности в миллион раз больше (порядка сотен и тысяч Ватт). Чтобы оценить возможности подобных источников энергии, надо вспомнить, что для плавления 1 см^3 металла необходимо $\sim 50 \text{ Дж}$. Если мощность лазерного луча 500 Вт , то в принципе он может расплавить за $1 \text{ с} \sim 10 \text{ см}^3$ металла. Реальные цифры, достигаемые на опыте, существенно меньше, так как значительная доля световой энергии, падающей на поверхность металла, отражается от нее.

Отметим, что понятие мощности говорит о концентрации энергии во времени, о способности системы произвести значительное действие в заданный (обычно короткий) промежуток времени. Огромные мощности некоторых типов лазеров, излучающих моноимпульсы, свидетельствуют о высоком качестве лазерной энергии. Можно, например, получить в считанные мгновения плотности энергии, превышающие плотности энергии ядерного взрыва. С помощью лазеров удается получить температуры, равные десяткам миллионов градусов, давления порядка 100 млн атмосфер. С помощью лазеров получены самые высокие магнитные поля и т.д.

Для сокращения длительности импульсов излучения внутри резонатора лазера обычно помещают различные управляющие устройства - внутррезонаторные модуляторы или создают многокаскадные схемы усиления из ряда последовательных звеньев, содержащих активные элементы. Важно отметить, что применение полупроводниковых лазеров в системе накачки, элементов волоконной оптики и нелинейных преобразователей лазерного излучения позволило создать исключительно эффективные и компактные импульсные системы.

В первом моноимпульсном генераторе на рубине длительность свечения в импульсах достигала $\sim 10^{-8} \text{ с}$. Современные лазеры способны излучать импульсы длительностью около 5 фс , т. е. менее двух периодов световой волны, что близко к фундаментальному пределу. Даже сравнительно скромная по лазерным масштабам энергия излучения, будучи сосредоточенной в импульсе ультракороткой длительности (УКИ), дает высокую мощность, а при фокусировании пучка – огромную интенсивность. В частности, созданная в Ливерморской Национальной

лаборатории (США) установка позволяет получать УКИ лазерного излучения с энергией 660 Дж при длительности импульса 440 фс, что обеспечивает получение пиковой мощности порядка 1 ПВт, а при фокусировании пучка - интенсивность излучения свыше 10^{21} Вт/см². Для представления об этой величине следует отметить, что давление света в этом случае составляет 300 Гбар, что сравнимо с давлением в центре Солнца. В данном примере рост мощности лазерного излучения достигался, главным образом, за счет сокращения длительности импульса. Сравнение современных фемтосекундных лазеров с первым из импульсных лазеров показывает, что увеличение мощности достигло 12 порядков. Для оценки роста энергии излучения можно привести данные о лазерном устройстве УКИ, проектируемом в США для исследований по термоядерному синтезу. В 192 пучках этой установки величиной с футбольное поле должна достигаться энергия 2 МДж в импульсе наносекундной длительности. Т.о., рост энергии составит не менее 6 порядков.

5 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРА

Временной ход генерации лазера приближённо можно описать, применяя *балансно-вероятностную модель* динамики электромагнитного поля оптического излучения, усиливаемого инверсной средой, помещенной внутрь открытого резонатора. Название модели можно объяснить так. Математические соотношения, характеризующие динамику переменных, формулируются в квантовой механике. В механике микрочастиц используют вероятностные параметры. Определяя некоторую особо большую совокупность частиц с разной энергией, рассматривают вероятности нахождения части из них в том или ином энергетическом состоянии.

Переход из одного состояния в другое характеризуют *вероятностью квантового перехода*, т. е. числом, указывающим, какая доля от общего числа частиц, возможно, изменила своё состояние за единицу времени. Например, вероятность спонтанного перехода из состояния 2 в состояние 1 обозначают как A_{21} с размерностью s^{-1} .

Величину, обратную вероятности, именуют *временем жизни* (или *временем релаксации*) некоторого неустойчивого состояния, так для спонтанного возврата в устойчивое состояние – $\tau_1 = 1/A_{21}$.

Уравнениями модели устанавливается: *баланс мощности, выделившейся в лазерном резонаторе в виде светового излучения, и мощности, запасённой в среде в ходе процесса накачки*. Основные положения, приводящие к формулировке этой модели, состоят в следующем.

Во-первых, усиление в среде существует за счет инверсной заселенности, создаваемой в ходе процесса накачки – то есть перевода атомов, образующих среду, при поглощении ими энергии возбуждающего излучения в состояние с большей энергией. Накачка тем самым обеспечивает увеличение населенности верхнего возбуждённого состояния.

Во-вторых, создание инверсной заселённости помимо возможности ухода частиц из основного в верхнее возбужденное состояние должно предполагать и последующее заселение ими метастабильного уровня. Темп нарастания инверсии

должен определяться скоростью заселения этого уровня, при этом должна учитываться и возможность спонтанного ухода частиц из метастабильного состояния с возвратом к основному.

Кроме того, в-третьих, существенной причиной изменения инверсии (в сторону её снижения) должно быть вынужденное излучение – такой переход (сброс) частиц с метастабильного уровня и означает развитие собственно процесса генерации.

Вероятности трех перечисленных процессов различны – при непрерывной накачке инверсия увеличивается с постоянной скоростью, спонтанный переход частиц характеризуется меньшей скоростью, но вероятность его также постоянна, скорость же вынужденного излучения, обуславливающего снижение инверсии, зависит от мощности генерации (излучаемой интенсивности). Поэтому в процессе генерации должно происходить насыщение инверсии, то есть снижение темпа её нарастания.

В четвёртых, необходимый для начала генерации уровень усиления должен превышать сумму потерь на рассеяние энергии усиливаемого излучения в активной среде (называемых вредными) и так называемых полезных потерь (снижение энергии из-за выхода излучения сквозь полупрозрачные зеркала открытого резонатора). При равенстве усиления и суммарных потерь мощности говорят о достижении *порогового уровня усиления*. Скорость усиления будет определяться разностью показателя усиления, обусловленного инверсной заселённостью, и обоих видов потерь.

В-пятых, темп изменения выходной мощности будет зависеть от величины этой разности, от размеров активного элемента (длины пути усиливаемого луча между зеркалами открытого резонатора) и от достигнутого уровня интенсивности (плотности мощности) излучения. Последнее характеризует лавинный характер нарастания мощности вынужденного излучения, реализующийся в резонаторе.

Таким образом, установление баланса мощности излучения в ходе лазерной генерации определяется несколькими процессами, протекающими с разной скоростью, и переход к установившемуся, то есть постоянному во времени, свечению лазерного устройства должен занимать определённый период. За этот период интенсивность и инверсная заселённость совершают релаксирующую серию осцилляций (затухающих колебаний), иногда довольно продолжительную, приближающихся к стационарному уровню. Подобный переходный процесс называется *режимом свободной генерации*. При его экспериментальном исследовании измеряются энергетические характеристики и характеристики временной структуры выходного излучения. Результаты этого измерения важны для оценки параметров рабочих сред лазеров и служат цели модернизации лазеров, создания устройств с управляемыми характеристиками излучения.

Уравнения, описывающие баланс мощности выходного излучения и накапливаемой в инверсной среде мощности, которая обеспечивает процесс усиления, называют *скоростными* или *кинетическими*. В самом простом виде они представляют собой систему нелинейных дифференциальных уравнений для интенсивности I и инверсии n в усиливающей среде:

$$\frac{dI}{dt} = \frac{1}{\tau} nI + \varepsilon,$$

$$\frac{dn}{dt} = \frac{1}{\tau_1} [\alpha - (1 + I)n]$$

Интенсивность пропорциональна квадрату напряженности поля лазерного излучения и является характеристикой, значение и скорость изменения которой относительно просто может быть измерено в эксперименте. Поэтому при моделировании динамики лазера обычно анализируют её временную зависимость. Величины интенсивности и инверсии в системе (1) нормированы, т.е. их значения не имеют размерности, их выражают отношениями соответственно для I – к величине мощности насыщения, для n – к уровню инверсной заселённости, отвечающему пороговому усилению. Далее в (1): α – параметр накачки (по отношению к пороговому уровню, обязательно – $\alpha > 1$), ε – параметр, отражающий вклад люминесценции в усиливаемое излучение, τ_1 – время спонтанной релаксации метастабильного уровня; величину τ называют временем жизни фотона в резонаторе, значением скоростного параметра $1/\tau$ учитывается длина резонатора и суммарные потери излучения. Уравнения (1) нелинейны (вероятность вынужденного перехода зависит от интенсивности) – правая часть обоих соотношений содержит произведение переменных nI . Поэтому, несмотря на относительную простоту, система (1) не допускает точного аналитического решения. Переменные $I(t)$ и $n(t)$ как неизвестные функции определяется путем численного интегрирования. Интегрирование уравнений (1) и графическое построение зависимостей $I(t)$ и $n(t)$ проводится с помощью прикладной программы расчёта PrSelf_3.

6 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИКЛАДНОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ПРОГРАММЫ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ № 10

Чтобы начать работу с программой требуется запустить ярлык с иконкой программы на рабочем столе. Для этого переместите курсор мыши на иконку и щелкните 2 раза левой клавишей мыши. На экране появится окно (рисунок 8,а), на рабочем поле которого слева – графическая зависимость интенсивности от времени для произвольного набора значений коэффициентов интегрируемой системы (1), справа – ячейки с указанием наименования коэффициентов (1): α (alpha), отношения τ_1/τ (tau1/tau), ε (eps) и отрезка времени (временного диапазона расчёта): t_1 (начало отрезка), t_2 (конец отрезка). Также в этом ряду указаны необходимые при интегрировании начальные значения переменных I ($Y0$) и n ($y0$), последнее из вводимых данных – количество точек (параметр точности расчёта).

Необходимо отметить то, что масштаб времени нормирован по величине τ_1 . Таким образом, если для τ_1 выбирается, например, значение $1 \cdot 10^{-4} \text{ с} = 0.1 \text{ мс}$, то задание числа $t_2 = 10$ подразумевает расчёт в пределах 1 мс.



Рисунок 8а - Вид окна прикладной компьютерной программы PrSelf_3

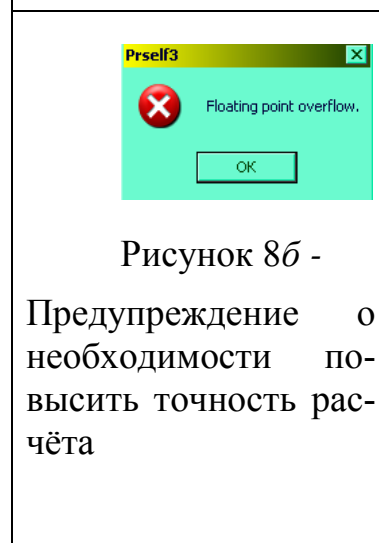


Рисунок 8б -

Предупреждение о необходимости повысить точность расчёта

Набор чисел в ячейках проводится после соответствующей установки курсора, десятичная мантисса вводится через запятую. Когда набор вводимых данных завершён, курсор устанавливается на виртуальную клавишу Draw, после её нажатия левой клавишей мыши должен появиться график рассчитанной функции $I(t)$ или $n(t)$ в рабочем поле программы (слева). В зависимости от установленной точности расчёт происходит в течение некоторого интервала времени, поэтому график может проявиться не сразу. Может оказаться, что расчёт с введенной точностью нереализуем, тогда в окне программе появляется предупреждение (рисунок 8,б). Программу необходимо закрыть (нажатием мышью виртуальной клавиши Close) и снова запустить, повторить набор требуемых входных данных, повысив при этом точность увеличением в несколько раз (возможно, на порядок и более) входного параметра количество точек, и повторить попытку расчёта.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

В рамках численного решения задачи рассматривается протекание во времени генерации света. Лазеры отличаются по типу рабочих сред – этим различается схема их устройства и назначение во всевозможных практических применениях. Параметры свободного свечения могут сильно отличаться для разных лазеров в силу различия сред, диапазона излучаемых частот и рабочих схем. В зависимости от набора технических параметров лазерной схемы (значениям которых соответствуют такие коэффициенты модели (1) как τ , τ_1 и α), как уже указывалось, переходный процесс характеризуется серией осцилляций интенсивности с разным периодом и временем релаксации (затухания) – от десятков микросекунд до наносекунд. Осцилляции носят затухающий характер – по

мере снижения амплитуды и контраста колебаний интенсивность достигает определённого стационарного уровня. Для некоторых типов лазеров характерен даже апериодический переход к установившемуся режиму излучения. Выраженный и контрастный характер отдельных пульсаций осцилляторная структура свободного режима носит в случае высоких значений отношения τ_1/τ (порядка 10^4 и выше) при относительно невысоком превышении порогового уровня усиления (до 10%) – величин, присущих, например, лазерам на люминесцентных кристаллах.

Основным заданием, выполняемым в ходе работы, является построение зависимости $I(t)$ для разных типов лазеров с помощью прикладной компьютерной программы PrSelf_3. Качественно вид зависимости $I(t)$ должен представлять переход к стационарному режиму, подобный изображенному в диалоговом окне программы PrSelf_3 (рисунок 8, а). В начале построения зависимостей в ячейках для переменных следует установить такие значения, как на рисунке 8, а и не изменять их, за исключением двух ячеек – tau1/tau и alpha (в случае невозможности реализации расчёта и получения предупреждения – поступить так, как указано в правилах обращения с программой, изменив содержимое ячейки количество точек). При введённом значении фиксированного параметра tau1/tau, который вычисляется по заданным τ, τ_1 (разным для четырех типов лазеров и указанных в таблице 1) построение повторяется для нарастающих значений параметра накачки alpha (всего — 7-8 значений).

Таблица 1 – Значения параметров лазеров (для разных активных сред)

активная среда	рубин	алюмо-иттриевый гранат (Nd:YAG)	смесь He-Ne	AlGaAs (полупроводник)
длина волны, м	$6.94 \cdot 10^{-7}$	$1.06 \cdot 10^{-6}$	$6.33 \cdot 10^{-7}$	$8.80 \cdot 10^{-7}$
параметр τ, c	$1 \cdot 10^{-9}$	$2 \cdot 10^{-9}$	$2 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-12}$
параметр τ_1, c	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-9}$
диапазон α	1.025...1.050	1.050 ...1.150	1.010 ...1.080	1.05...1.50
точность (не менее)	100000	10000	5000	2500

Для каждого из вариантов надо измерить и занести в таблицу величину установившейся интенсивности $I_{ст}$ и примерный момент времени $\Delta t_{ст}$, за который она стабилизируется. Для этого курсор (в окне программы – в виде стрелки) устанавливается и острием стрелки ведут вдоль кривой. Ниже графика в окне программы при этом движении непрерывно изменяются два числа — соответственно время и значение интенсивности. Как только интенсивность перестаёт заметно меняться, следует считать, что стационарный режим достигнут. По данным таблицы 2 для каждого типа лазеров строится график зависимости стационарного уровня интенсивности излучения и характерного времени его достижения (времени стабилизации $\Delta t_{ст}$) от уровня накачки α .

Таблица 2 – Расчётные данные

Лазер на рубине			<i>Nd:YAG</i> – лазер			<i>He-Ne</i> – лазер			<i>AlGaAs</i> – лазер		
α_1	$I_{ст}$	$\Delta t_{ст}$	α_1	$I_{ст}$	$\Delta t_{ст}$	α_1	$I_{ст}$	$\Delta t_{ст}$	α_1	$I_{ст}$	$\Delta t_{ст}$
α_2			α_2			α_2			α_2		

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 1 Какое физическое явление лежит в основе эффекта усиления света?
- 2 Назвать основные элементы устройства лазера.
- 3 Почему в двухуровневой энергетической схеме активной среды невозможно создание инверсной заселённости?
- 4 Пояснить различия в системах накачки и принципах создания инверсной заселённости в активных средах лазеров на рубине и на смеси *He-Ne*.
- 5 Объяснить роль открытого резонатора в схеме лазера.
- 6 Каковы основные условия старта генерации лазера? Что понимают под пороговым уровнем усиления?
- 7 Что понимают под режимом свободной генерации лазера?
- 8 Охарактеризовать основные свойства лазерного излучения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Общие требования и правила оформления учебных текстовых документов: СТП СМК 4.2.3-01-2011. - Введ. 2011-04-07. - Могилев: Могилевский государственный университет продовольствия, 2011. – 43 с.
- 2 Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Высшая школа, 2007. – 558 с.
- 3 Манак И.С. Квантовая радиофизика / И.С. Манак, Е.Д. Карих. – Минск: Изд. центр БГУ, 2009.
- 4 Квантовая электроника : Маленькая энциклопедия / Под ред. М.Е. Жаботинского и др. – М.: Советская энциклопедия, 1991.

Учебное издание

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СВОБОДНОГО РЕЖИМА
ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРА**

Методические указания

Составители

доктор физ.- мат. наук Юревич В.А.,
кандидат физ.- мат. наук Тимощенко Е.В.,
ассистент Юревич Ю.В.

Редактор А.А. Щербакова
Технический редактор Т.В Багуцкая

Подписано в печать Формат 60x84 1/16 Бумага офсетная.
Гарнитура Таймс. Ризография. Усл. печ. л. Уч.-изд. л.
Тираж ___ экз. Заказ _____

Учреждение образования «Могилёвский государственный университет
продовольствия».
ЛИ №02330/0131913 от 08.02.2007.
пр-т Шмидта, 3, 212027, Могилёв.

Отпечатано в учреждении образования «Могилёвский государственный универ-
ситет продовольствия».
пр-т Шмидта, 3, 212027, Могилёв.