

VI Международный турнир «Компьютерная физика»

Турнир «Компьютерная физика» – часть программы Международного интеллект-клуба «ГЛЮОН», проводимой с целью поиска, отбора и поддержки интеллектуально-одаренных детей, проявляющих интерес к фундаментальным наукам и информатике. Уникальность и новизна этого турнира состоят в том, что все задачи предполагается решать с помощью численного моделирования на компьютере.

Для участия в турнире приглашаются команды школьников (5 человек), обладающих знанием физики и навыками работы на IBM PC. Турнир проводится в виде интеллектуального соревнования между командами в два тура – заочный и очный. Всем заявленным участникам рассылаются задания заочного тура, а по результатам выполнения этих заданий формируется состав участников очного тура соревнований.

Расскажем подробнее об очном туре VI Международного турнира «Компьютерная физика», проходившем с 27 января по 3 февраля 2002 года в городе Дубне.

Шесть команд из 45, принявших участие в заочном туре, были

приглашены на финальную часть соревнований. Турнир прошел при участии Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ), Межрегиональной ассоциации «Женщины в науке и образовании» и при поддержке компаний «ИС», «Физикон», «Кирилл и Мефодий», «Интел» (Московское представительство), а также Соросовской программы в области точных наук. Генеральным спонсором турнира выступила компания «Начало координат», предоставившая участникам компьютеры типа «Notebook» и замечательные призы.

Защита задания заочного тура («Комбинационное рассеяние») проходила в замечательном, современно оборудованном компьютерном зале Международного университета «Дубна». Каждой команде было предложено выступить с докладом и рассказать о результатах решения заочного задания. Остальные команды в этот момент исполняли роли оппонентов и рецензентов. Научная дискуссия докладчиков, оппонентов и рецензентов завершилась победой команды ФМЛ 1511 при Московском инженерно-физическом институте (МИФИ).

Перед началом соревнований очного тура участники прослушали лекцию профессора МГУ А.М.Попова об основах физики лазеров. Затем в течение 36 часов команды школьников, образовавшие временные научные коллективы, в острой конкурентной борьбе пытались найти научно-обоснованное решение задачи «Физика лазеров». На защите задания очного тура отличились команда Самарского аэрокосмического лицея (СМАЛ), которая стала победителем этого тура, а также команды ФМЛ 1511 при МИФИ и Многопрофильной гимназии 4 города Норильска, представившие наиболее глубокие результаты исследования работы лазерных систем.

Абсолютным победителем турнира стала команда ФМЛ 1511 при МИФИ, получившая переходной приз «Хрустальный глобус». Дипломами I степени награждены команды ФМЛ 1511 при МИФИ, СМАЛ и Многопрофильной гимназии 4 города Норильска. За высокие достижения жюри отметило дипломами II степени команды Самарской областной ФМШ и Классической гимназии 1 Ростова-на-Дону. Диплом III степени получила команда ФМЛ 1580 при Московском государственном техническом университете (МГТУ) им. Н.Э.Баумана. Участникам соревнований были также вручены многочисленные призы от спонсоров и организаторов турнира.

Международный интеллект-клуб «ГЛЮОН» приглашает региональные центры, гимназии и школы, работающие с одаренными детьми, принять участие в следующем, VII Международном турнире «Компьютерная физика», который пройдет в феврале 2003 года в городе Пущино (Московская область).

Теперь – о содержательной части соревнований.

Очный тур. «Физика лазеров»

Лазеры – это уникальные источники оптического излучения, позволяющие получать предельно высокие интенсивности излучения, малые длительности и высокую степень когерентности. Принцип работы лазеров основан на явлении вынужденного излучения, предсказанного А.Эйнштейном в 1917 году и заключающегося в усилении пучка света при прохождении его через среду с инверсной заселенностью.

Под инверсной заселенностью среды понимается такая ситуация, когда число атомов в некотором состоянии с энергией E_2 оказывается больше, чем число атомов в нижележащем состоянии с энергией E_1 ($E_2 > E_1$). Часто для получения лазерной генерации используется так называемая четырехуровневая схема накачки (рис.1). Некоторый источник (лампа-вспышка, газовый разряд или т.п.) переводит

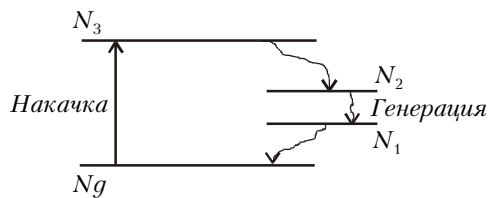


Рис.1. Четырехуровневая схема накачки лазера

атомы из основного состояния N_g в состояние N_3 , откуда они быстро релаксируют в состояние N_2 , являющееся верхним рабочим уровнем лазера. При этом оказывается, что населенность уровня N_2 больше, чем уровня N_1 , т.е. на переходе между уровнями N_2 и N_1 возникает инверсия населенностей. На этом переходе и происходит генерация с частотой $\omega = (E_2 - E_1)/\hbar$ где \hbar – постоянная Планка. Рабочая среда лазера подбирается так, что переходы 3–2 и 1–0 происходят быстро (мгновенно). Тогда можно считать,

что $N_3 \approx N_1 = 0$, а концентрация на уровне N_2 и определяет инверсию.

В рассматриваемом случае динамика лазерной генерации описывается следующими уравнениями:

$$N_g + N_2 = N_0,$$

$$\frac{dN_2}{dt} = WN_g - \sigma_\phi c q N_2 - \frac{N_2}{\tau},$$

$$\frac{dq}{dt} = \sigma_\phi c N_2 q - \frac{q}{\tau_\phi},$$

где q – это число фотонов в единице объема, τ_ϕ – время жизни фотона в системе, σ_ϕ – сечение фотопоглощения, τ – время релаксации инверсии, W – скорость создания инверсии внешним источником, N_0 – полная концентрация рабочих атомов, c – скорость света.

Время жизни фотона в системе определяется выражением

$$\tau_\phi = \frac{2L}{c(1-R)},$$

где L – расстояние между зеркалами оптического резонатора лазера, R – коэффициент отражения одного зеркала. Интенсивность излучения внутри резонатора связана с плотностью фотонов соотношением $I_\phi = q c \hbar \omega$. Интенсивность выходного излучения равна $I = I_\phi (1 - R)$. Типичные значения параметров для широко распространенных лазеров (гелий-неонового и неодимового), работающих по четырехуровневой схеме в ближнем инфракрасном диапазоне, даны в таблице.

Генерация лазера может происходить в режиме модулированной добротности. Для этого в начальный момент времени одно из зеркал убирают, и в течение некоторого времени после накачки в среде создается высокий уровень инверсной заселенности. В момент, когда вводится зеркало, в системе возникает генерация, уровень которой определяется накопленной инверсией.

Таблица

Тип лазера	σ_ϕ , см ²	τ , с	N_0 , см ⁻³
He : Ne, $\lambda = 1,15$ мкм	$5,5 \cdot 10^{-12}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$3,5 \cdot 10^{15}$
Nd ³⁺ : YAg, $\lambda = 1,06$ мкм	$8,8 \cdot 10^{-19}$	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{19}$

Задание

1) Исследуйте зависимости от времени величины инверсной заселенности N_2 и интенсивности излучения (плотности фотонов) в резонаторе неодимового лазера при условии мгновенного включения внешнего источника накачки ($W = \text{const}$ в диапазоне до 1 с^{-1}). Предположите, что $1 - R = 0,01$, $L = 2,5$ см. При каком коэффициенте R величина выходной мощности излучения будет максимальной?

2) Выполните пункт 1) для гелий-неонового лазера при $L = 1$ м, $1 - R = 0,01$.

3) Опишите параметры импульса генерации, возникающей в режиме модулированной добротности при введении зеркала в систему неодимового лазера.

Разбор задания

Система уравнений лазерной генерации имеет два стационарных, независимых от времени решения: первое при $q = 0$ и второе при $N_2 = 1/(\sigma_\phi c \tau_\phi)$, которое определяет пороговое значение инверсной населенности. Для решения данной

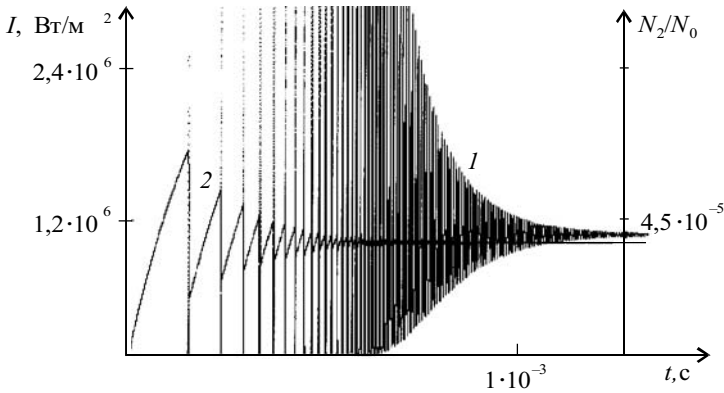


Рис.2. Временная зависимость интенсивности генерации и инверсной населенности (отношения населенностей N_2/N_0) при $W \approx 0,6 \text{ с}^{-1}$ для неодимового лазера

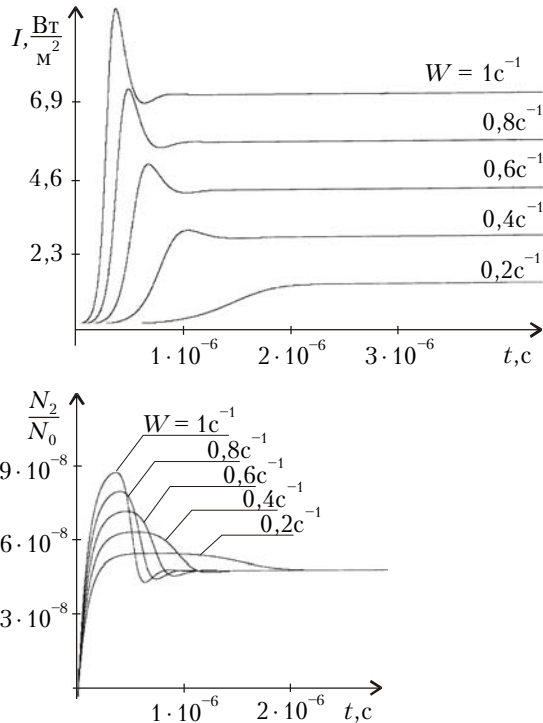


Рис.3. Временная зависимость интенсивности генерации и инверсной населенности при различных значениях скорости накачки для гелий-неонового лазера

задачи необходимо задать начальные условия. Обычно полагают, что $N_2 = 0$, а q – малое число, определяемое спонтанным фоном излучения, например $q = 1$ или $q = 10$. Для появления в системе генерации необходимо, чтобы накачка превышала пороговое значение W^* , соответствующее достижению в системе порогового значения инверсии. Характер генерации и выход на стационарный режим при превышении значения W^* существенным образом определяется соотношением времен τ и τ_ϕ . В случае $\tau_\phi \ll \tau$, что характерно для неодимового лазера, возникает пиковый режим генерации (рис.2). В противоположном случае (такая ситуация реализуется для гелий-неонового лазера) происходит плавное изменение во времени интенсивности генерации и инверсной населенности (рис.3). При заданных условиях пороги возникновения генерации составляют приблизительно $0,2 \text{ с}^{-1}$ для неодимового лазера и $0,05 \text{ с}^{-1}$ для гелий-неонового лазера.

В предположении отсутствия других каналов гибели фотонов, кроме выхода через зеркало, получается, что максимальная интенсивность излучения достигается при $R \rightarrow 1$. Поэтому в реальной системе оптимальное значение коэффициента отражения выходного зеркала определяется скоростью гибели фотонов внутри резонатора.

На рисунке 4 представлены динамика лазерной генерации в режиме модуляции добротности. Предполагалось, что сначала одно из выходных зеркал отсутствовало, а затем в систему вводилось второе зеркало, что приводило к резкому возрастанию времени жизни фотона в резонаторе и, следовательно, к резкому уменьшению значения инверсной населенности. В результате в системе формируется гигантский импульс, форма которого показана справа на рисунке 4.

Для демонстрации решения были использованы расчеты, представленные командой СМАЛ в составе Д.Игошина, А.Афанасьева, А.Белоусова, К.Гинзбургского, А.Горбанева.

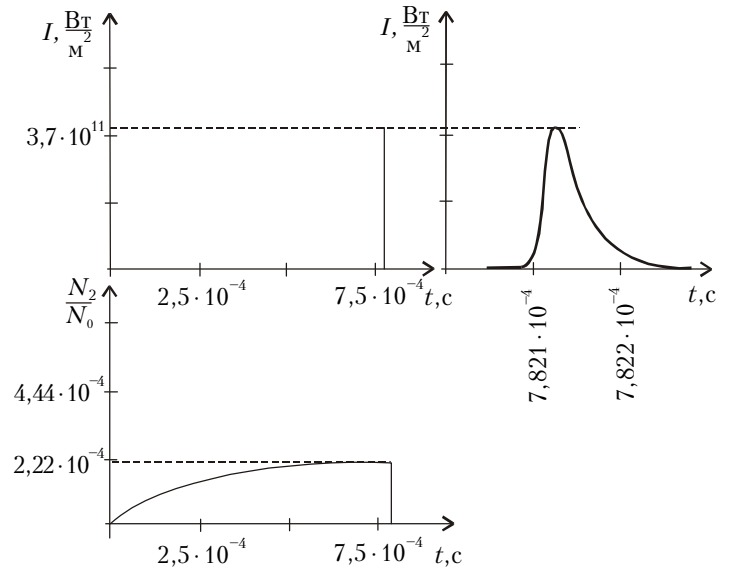


Рис.4. Временная зависимость интенсивности генерации и инверсной населенности при $W \approx 0,6 \text{ с}^{-1}$ для неодимового лазера в режиме модулированной добротности. Вверху справа – форма импульса генерации

Публикацию подготовили
В.Альминдеров, А.Попов, О.Поповичева

Информацию о журнале «Квант» и некоторые материалы из журнала можно найти в ИНТЕРНЕТЕ по адресам:

Курьер образования
<http://www.courier.com.ru>

Vivos Voco!
<http://vivovoco.nns.ru>
(раздел «Из номера»)

Московский детский клуб «Компьютер»
math.child.ru