

УДК 621.373.8

ЛАЗЕРНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ. СОЗДАНИЕ ИНВЕРСНОЙ НАСЕЛЕННОСТИ. ДВУХУРОВНЕВАЯ И МНОГОУРОВНЕВАЯ ЛАЗЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

© 2023 г. Р. А. Горелов¹, В. О. Шатилов^{1,*}, А. И. Балаберников¹

¹Военный инновационный технополис «ЭРА», Анапа, Россия

*E-mail: era_1@mil.ru

Поступила в редакцию 09.10.2023 г.

После доработки 11.01.2024 г.

Принята к публикации 20.01.2024 г.

Рассмотрен принцип получения лазерного излучения – создание инверсной населенности атомов. Представлены модели двух-, трех- и четырехуровневой лазерной системы. Обсуждаются их преимущества и недостатки.

DOI: 10.56304/S2782375X23040034

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение

1. Вынужденное излучение атома
2. Создание инверсной населенности
3. Двухуровневая лазерная система
4. Трехуровневая лазерная система
5. Четырехуровневая лазерная система

Заключение

ВВЕДЕНИЕ

История лазеров насчитывает более полувека, однако уже сейчас можно утверждать, что лазеры – одно из интереснейших научно-технических достижений прошлого века. С самого начала эпохи лазеров стал ясен их большой практический потенциал. Создание и развитие лазерных технологий закономерно привели к перерождению одного из разделов физики – оптики, а также к появлению и развитию абсолютно новых научно-технических направлений. Лазеры применяются в разнообразных технологиях, связанных с микроэлектроникой, аддитивным производством, медициной. В настоящее время лазеры находят особое применение в решении специальных военных задач.

1. ВЫНУЖДЕННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ АТОМА

Рассмотрим общепризнанную модель атома Бора. Нильс Бор качественно переработал планетарную модель Эрнеста Резерфорда, лишив ее известных недостатков. В классической электродинамике электрон, движущийся вокруг ядра, должен непрерывно излучать энергию и в итоге

“прилипнуть” к ядру. Для преодоления этой проблемы Бор предложил следующее допущение: электроны в атоме, не излучая энергии, могут находиться только на определенных орбитах (называемых *стационарными*). Излучение происходит только при орбитальных переходах электронов. Электрон переходит на высокую орбиту, поглощая фотон, и “спускается” на низкую, излучая фотон. Стационарными называются такие орбиты, при движении по которым выполняется равенство момента количества движения электрона целому числу постоянных Планка [1]:

$$m_e v r = \hbar N, \quad (1)$$

где m_e – масса электрона, v – его скорость, r – радиус орбиты, N – номер уровня энергии, \hbar – приведенная постоянная Планка.

По основным принципам квантовой механики все частицы обладают дискретными уровнями энергии (или *энергетическими состояниями*). Определенные дискретные уровни энергии соответствуют определенным периодическим движениям электронов, входящих в состав частицы [2]. *Основное состояние* – это состояние с наименьшим допустимым уровнем энергии. Оно является часто встречающимся устойчивым состоянием частицы. *Возбужденное состояние* – это состояние с отличным от основного уровнем энергии. При нормальных условиях большинство частиц среды находится в основном состоянии.

Квантовыми переходами называются скачкообразные изменения состояний квантовой системы, т.е. ее переходы с одного уровня энергии на другой. Переходя с более высокого уровня энергии E_k на более низкий E_i , система отдает энер-

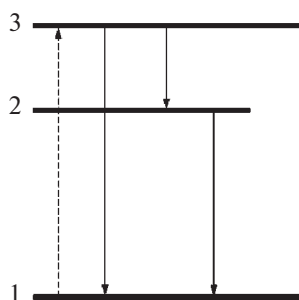


Рис. 1. Квантовые переходы между энергетическими уровнями.

гию $E_{ki} = E_k - E_i$, а при обратном переходе получает ее (рис. 1).

Квантовые переходы подразделяются на *безызлучательные* и *излучательные*. Безызлучательные квантовые переходы системы характеризуются обменом энергии путем взаимодействия с другими системами. Излучательные квантовые переходы системы связаны с испусканием или поглощением (переходы $E_k \rightarrow E_i$, $E_i \rightarrow E_k$) кванта с энергией $h\nu$, определяемой фундаментальным соотношением

$$E_k - E_i = h\nu. \quad (2)$$

Разность энергий состояний системы, между которыми происходит квантовый переход, обуславливает испускание или поглощение фотонов различных диапазонов частот:

- радиоизлучения;
- инфракрасного;
- видимого;
- ультрафиолетового;
- рентгеновского излучения;
- γ -излучения.

Совокупность излучательных квантовых переходов с верхних уровней энергии на нижние и обратно соответственно образует спектры испускания и поглощения данной квантовой системы [3].

Неустойчивое состояние частицы – это ее нахождение в одном из возбужденных состояний

E_k . Спустя непродолжительное время частица займет состояние с меньшей энергией E_i , испустив квант с частотой ν_{k-i} . Случайный характер таких процессов приводит к излучению атомами энергии вне зависимости друг от друга и в разное время. Пусть частица занимает нижний уровень E_i , а электромагнитное излучение, попадающее в вещество, несет кванты с частотой ν_{k-i} . Тогда вероятен процесс перехода частицы на уровень E_k , при котором атом поглощает квант излучения. Такие вынужденные переходы называются *резонансными*, и они характеризуют поглощение света.

В 1916 г. А. Эйнштейн анализировал особенности поглощения и испускания света веществом, находящимся в состоянии термодинамического равновесия. Он показал, что равновесность системы может поддерживаться еще одним механизмом взаимодействия света с веществом – так называемым *стимулированным* (или *индуцированным*) излучением.

Суть данного механизма состоит в следующем: если частица находится в возбужденном состоянии, то она может перейти с уровня E_k на уровень E_i под действием кванта света, частота которого близка к частоте перехода $\nu_{k-i} = (E_k - E_i)/h$. Такие переходы принято называть *вынужденными* (рис. 2). Особенностью стимулированного (вынужденного) излучения является “новорожденный” квант света, который является точной копией “первичных квантов”: его частота, фаза, направление движения и поляризация такие же.

2. СОЗДАНИЕ ИНВЕРСНОЙ НАСЕЛЕННОСТИ

В нормальных условиях населенность энергетических уровней термодинамически равновесных систем описывается распределением Больцмана. Уровни с низкой энергией E_i населены больше, чем уровни с высокой энергией E_k (т.е. $N_k < N_i$). Несмотря на усиление света за счет вынужденных квантовых переходов, происходит подавление излучения из-за вынужденного резонансного поглощения. Для усиления света веществом

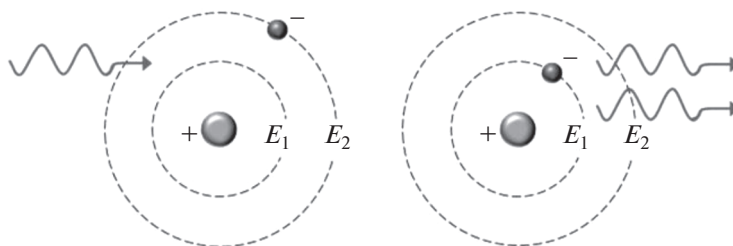


Рис. 2. Вынужденное излучение фотонов.

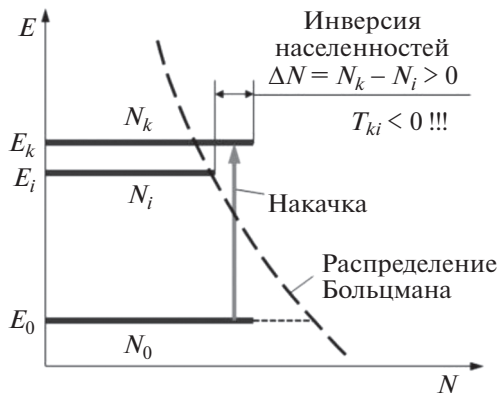


Рис. 3. Инверсная населенность.

необходимо изменить населенности уровней, а именно, одновременно с увеличением населенности верхнего уровня N_k уменьшить населенность нижнего уровня N_i . Такое активное состояние вещества называют состоянием с инверсной населенностью энергетических уровней [4].

Основная проблема в создании инверсной населенности заключается в том, что антибольцмановское энергетическое распределение частиц является сильно неравновесным, и оно недостижимо при использовании обычных способов передачи энергии. Инверсная населенность формально может быть представлена как состояние вещества с отрицательной абсолютной температурой (рис. 3).

Запишем отношение населенностей верхнего уровня к нижнему (число частиц, температура и энергия связаны уравнением Больцмана):

$$\frac{N_k}{N_i} = e^{-\left(\frac{E_k - E_i}{kT}\right)}. \quad (3)$$

Логарифмируя левую и правую части уравнения с учетом знака, получим:

$$\ln\left(\frac{N_k}{N_i}\right) = \frac{E_i - E_k}{kT}.$$

Выражая температуру, получим

$$T_{ki} = \frac{E_i - E_k}{k \ln\left(\frac{N_k}{N_i}\right)}. \quad (4)$$

Зная, что для состояния инверсной населенности $E_k > E_i$ и $N_k > N_i$, получим $T_{ki} < 0$. Инверсная населенность уровней — это основное условие получения лазерного излучения. Она обеспечивает большее количество частиц-излучателей по сравнению с поглощающими частицами, это приводит к доминированию вынужден-

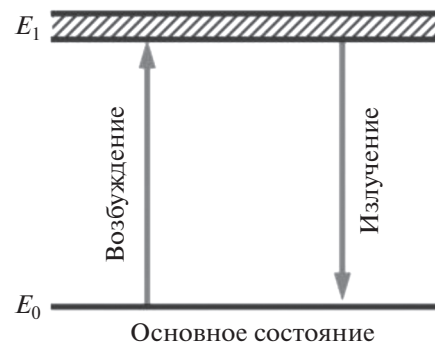


Рис. 4. Двухуровневая лазерная система.

ного излучения над спонтанным излучением и над процессами поглощения.

Существуют два способа достижения инверсии. Первый — это заселение верхнего уровня путем возбуждения дополнительных атомов или молекул до верхнего уровня. Второй способ состоит в уменьшении “популяции” нижнего уровня, который также участвует в генерации лазерного излучения. На самом деле устойчивое лазерное излучение достигается обоими путями: и увеличением населенности верхнего энергетического уровня, и уменьшением населенности нижнего. Для достижения эффективного лазерного действия наращивание населенности верхнего лазерного уровня должно происходить быстрее, чем его распад. Таким образом, продолжительное по времени существование перенаселенности верхнего лазерного уровня упрощает достижение нужного результата. Важная особенность, которая определяет процессы образования инверсной населенности, — это структура энергетических уровней активной среды, определяющая основные характеристики лазеров.

3. ДВУХУРОВНЕВАЯ ЛАЗЕРНАЯ СИСТЕМА

Двухуровневая энергетическая система образована двумя уровнями, участвующими в общем процессе. Атомы (молекулы) нижнего уровня, в данном случае являющегося нижним уровнем лазерного перехода, возбуждаются до верхнего уровня при помощи накачки или другого способа возбуждения. Верхний уровень системы аналогично называется верхним лазерным уровнем. При достижении инверсной населенности и превышении порога инверсии возникает лазерное излучение. Рисунок 4 иллюстрирует взаимное расположение энергетических уровней в двухуровневой системе.

Описанная система является лишь теоретической концепцией, она удобна для начального изучения физики лазеров. Лазеров, работающих

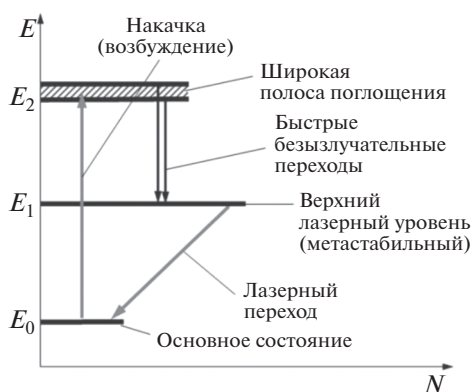


Рис. 5. Трехуровневая лазерная система.

по двухуровневой схеме инверсной населенности, на данный момент не существует.

4. ТРЕХУРОВНЕВАЯ ЛАЗЕРНАЯ СИСТЕМА

В трехуровневой энергетической системе нижний уровень лазерного перехода является основным состоянием (самым нижним энергетическим уровнем). Атомы или молекулы возбуждаются до верхнего уровня, находящегося выше верхнего лазерного. Верхний уровень отличается более коротким временем существования по сравнению с верхним лазерным метастабильным уровнем. В итоге возбужденные частицы быстро переходят с верхнего уровня на метастабильный лазерный уровень. Относительно более длительное время существования метастабильного уровня обеспечивает инверсную населенность между метастабильным уровнем и основным состоянием при условии, что более половины из атомов или молекул в основном состоянии уже были возбуждены до верхних короткоживущих энергетических уровней. Рождение лазерного излучения наблюдается при переходе частицы с метастабильного уровня в основное состояние. Рисунок 5 отражает трехуровневую схему энергетических уровней. Основным недостатком трехуровневых лазеров является то, что нижний лазерный уровень одновременно является и основным состоянием системы.

При термодинамическом равновесии почти все атомы или молекулы находятся в основном состоянии, а значит, для достижения лазерной генерации необходимо вывести из основного состояния более половины числа частиц. Это приводит к тому, что для превышения порога инверсии населенности необходимы существенные энергии накачки. Это создает трудность в постоянном поддержании инверсии населенностей в трехуровневых лазерных системах. По этой причине такие лазеры не могут работать в режиме генерации непрерывного излучения.

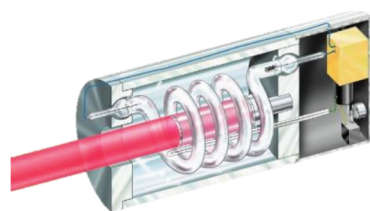


Рис. 6. Рубиновый лазер.

Примером лазера с трехуровневой системой может послужить твердотельный рубиновый лазер. В качестве усилителя используется синтетический кристалл рубина, представляющий собой стержень (рис. 6). Он помещается между зеркалами, образуя тем самым оптический резонатор. Накачка происходит оптическим путем при помощи лампы-вспышки, которая вызывает вынужденную флуоресценцию рубина. Излучение происходит в видимом диапазоне спектра с длиной волны 694.3 нм, что соответствует темно-красному цвету. Первый работающий рубиновый лазер был изготовлен Теодором Мейманом в HRL Laboratories 16 мая 1960 г. Рубиновый лазер применяется в дальнометрии, создании голограмм и сверлении отверстий в алмазах.

5. ЧЕТЫРЕХУРОВНЕВАЯ ЛАЗЕРНАЯ СИСТЕМА

Оптимальный вариант получается дополнением трехуровневой схемы механизмом уменьшения населенности нижнего лазерного уровня для того, чтобы на нем было существенно меньше атомов или молекул в состоянии термодинамического равновесия. Такая ситуация, решающая проблемы трехуровневых схем, достигается в четырехуровневых лазерных системах. В них нижний лазерный уровень отличен от основного энергетического состояния и расположен выше него. В лазерной четырехуровневой системе атомы или молекулы возбуждаются до верхнего высоковозбужденного короткоживущего энергетического уровня, откуда скоротечно переходят на метастабильный верхний лазерный уровень. По причине того, что нижний лазерный уровень теперь не является основным состоянием, его населенность значительно меньше, чем населенность основного состояния. А это означает, что для достижения инверсной населенности требуется меньшее число возбужденных атомов или молекул, чем в трехуровневой схеме [5].

Рисунок 7 иллюстрирует четырехуровневую энергетическую схему. Накачка или ввод возбуждения поднимает электроны или атомы на самый верхний энергетический уровень, который часто является не одним уровнем, а целой группой энергетических уровней. Возбужденные частицы

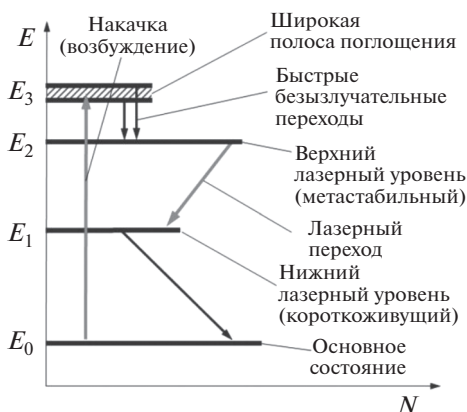


Рис. 7. Четырехуровневая лазерная система.

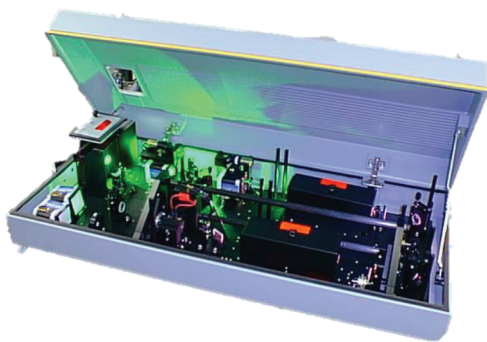


Рис. 8. Nd:YAG-лазер.

скоротечно попадают на верхний лазерный метастабильный уровень. Метастабильный уровень имеет большое время жизни, существенно превышающее время жизни частицы на нижнем лазерном уровне, что обеспечивает поддержание инверсной населенности. Такая схема может обеспечивать непрерывное поддержание инверсной населенности в активной среде. Это одна из основных причин, почему четырехуровневые лазеры, такие как Nd:YAG или He–Ne, могут работать в непрерывном режиме, в то время как трехуровневый рубиновый лазер только в импульсном.

Выделим две основные особенности четырехуровневой схемы, облегчающие поддержание инверсии населенностей. Они связаны с наличием верхнего энергетического уровня, до которого атомы или молекулы возбуждаются изначально, нижнего короткоживущего лазерного уровня и метастабильного верхнего лазерного уровня с более длительным временем существования:

– быстрая заселяемость верхнего лазерного уровня, являющаяся результатом чрезвычайно быстрого падения возбужденных частиц с верхнего энергетического уровня на метастабильный

верхний лазерный уровень с долгосрочным временем жизни;

– депопуляция нижнего лазерного уровня есть результат его короткого времени существования. Благодаря этому в четырехуровневой системе становится гораздо проще поддерживать инверсию населенностей и, следовательно, становится легче заставить лазер работать в режиме непрерывного излучения.

Nd:YAG-лазер представляет собой твердотельный лазер, в качестве активной среды которого используется алюмо-иттриевый гранат (YAG, $Y_3Al_5O_{12}$), легированный ионами неодима (Nd). Генерация излучения происходит на длине волны 1064 нм. Nd:YAG-лазер используется для обработки и сварки материалов, а также в медицине, дальнометрии, в военных целях и науке (рис. 8).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получение инверсной населенности для группы атомов, находящихся в термодинамическом равновесии, невозможно. Для создания неравновесного состояния необходимо использовать косвенные способы перевода атомов в возбужденное состояние. Как правило, такие способы связаны с подводом к лазерной среде энергии извне и поэтому называются накачкой, а инверсно населенное лазерное вещество – активной средой.

Двухуровневая система является теоретической и демонстрирует базовый принцип получения лазерного излучения. Трехуровневая схема идеально подходит для генерации импульсного лазерного излучения, а лазеры с четырехуровневой системой хорошо работают в режиме непрерывного излучения.

Лазеры находят свое применение в различных сферах промышленности и техники. Актуальной задачей является использование лазерных технологий для решения специальных военных задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Борейшо В.А., Ивакин С.В.* Лазеры: устройство и действие. СПб.: Лань, 2022. 304 с.
2. *Борейшо В.А., Клочков Д.В., Коняев М.А., Никулин Е.Н.* Военные применения лазеров: учебное пособие. СПб.: Балтийский государственный технический университет, 2015. 103 с.
3. *Тимченко Е.В.* Оптика лазеров – электронное учебное пособие. Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королева (национальный исследовательский университет), 2013.
4. *Айхлер Ю.* Лазеры: исполнение, управление, применение. М.: Техносфера, 2008. 230 с.
5. *Maini A.K.* Lasers and optoelectronics: fundamentals, devices and applications. India: John Wiley and Sons Inc., 2013.