

ЛЕКЦИЯ 5

СХЕМЫ НАКАЧКИ. НЕКОТОРЫЕ ВИДЫ ЛАЗЕРНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ. ШУМ И НЕЛИНЕЙНОСТЬ

Б. Схемы накачки

Рассмотрим конкретные схемы накачки, которые используются на практике. Схемы накачки построены так, что процессы возбуждения увеличивают количество атомов на уровне 2 и уменьшают – на уровне 1. Схемы накачки используют минимум три уровня энергии. Мы рассмотрим трех- и четырехуровневые. Двухуровневые схемы накачки не в состоянии даже теоретически обеспечить режим непрерывной работы лазерного усилителя.

Четырехуровневая схема накачка

Показана на **рис. 1**. Под уровнем «1» находится уровень «0» энергии, соответствующий основному состоянию атома. При условии $E_1 \gg kT$ уровень «1» практически незаселен, как и нужно. Накачка осуществляется на уровни(-ень), лежащие выше уровня «2». Обозначаем их цифрой «3». Активная среда должна обеспечивать быстрые переходы $3 \rightarrow 2$, так что заселенность 3-го уровня остается незначительной. Напротив, время жизни на уровне «2» должно быть большим. Это позволяет достигнуть большой заселенности второго уровня. Уровень «1» снов должен быть короткоживущим, чтобы его заселенность была мала. Последние два требования, если они выполнены, позволяют достичь инверсии населенностей, то есть обеспечить условие $N = N_2 - N_1 > 0$. Таким образом, в процесс генерации излучения фактически вовлечены 4 уровня энергии атома. Само же когерентное усиление света происходит благодаря переходам $3 \rightarrow 2$.

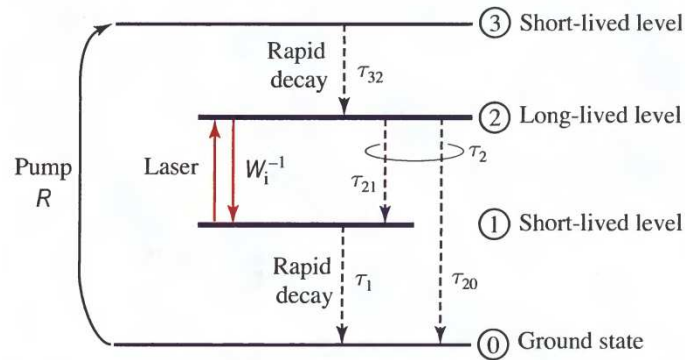


Рис. 1. Энергетические уровни и скорости распада четырехуровневой системы. Из всего множества уровней изображены лишь 4. Считается, что скорость накачки на уровень «3» равна скорости выкачки с уровня «0».

Внешний источник энергии (это может быть источник фотонов с частотой E_3 / h) накачивает атомы с уровня «0» на уровень «3» со скоростью R . Если уровень «3» распадается очень быстро, можно положить, что переходы $3 \rightarrow 2$ происходят мгновенно. Тогда накачка короткоживущего уровня «3» дает тот же эффект, что и накачка непосредственно уровня «2»: $R_2 = R$. Схема, изображенная на **рис. 1**, в таком приближении эквивалентна схеме (**рис. 9**) из **Лекции 4**. Соответственно, все полученные для нее соотношения сохраняют свою силу. В данной конфигурации атомы не подвергаются ни накачке, ни выкачке с уровня «1», поэтому следует положить $R_1 = 0$. В отсутствие усиваемого облучения ($\phi = 0 \Rightarrow W_i = 0$), стационарная разность заселенностей определяется соотношением

$$N_0 = R\tau_2 \left(1 - \frac{\tau_1}{\tau_{21}} \right). \quad (1.1)$$

В большинстве 4-уровневых схем накачки возможность безызлучательного перехода $2 \rightarrow 1$ можно не рассматривать, поскольку $t_{sp} \ll \tau_{nr}$. Кроме того $\tau_{20} \gg t_{sp} \gg \tau_1$. В этом случае

$$N_0 = R t_{sp}, \quad (1.2)$$

$$\tau_s \approx t_{sp}, \quad (1.3)$$

и, таким образом

$$N \approx \frac{Rt_{sp}}{1 + t_{sp}W_i}. \quad (1.4)$$

Выше предполагалось, что скорость накачки R не зависит от разности заселенностей $N = N_2 - N_1$. Однако, это не всегда так, поскольку спектральные плотности заселенности основного состояния и уровня «3», N_g и N_3 , соответственно, связаны с N_1 и N_2 соотношением

$$N_g + N_1 + N_2 + N_3 = N_a, \quad (1.5)$$

где N_a – количество атомов активной среды, которое, очевидно, постоянно. Если накачка с вероятностью W_i индуцирует переходы $0 \rightarrow 3$, то $R = (N_g - N_3)W$. Если уровни «1» и «3» короткоживущие, то $N_1 \approx N_3 \approx 0$. В этом случае скорость накачки приблизительно равна

$$R \approx (N_a - N)W. \quad (1.6)$$

Это означает, что скорость накачки – линейно убывающая функция разности заселенностей, а никак не постоянная. Зависимость скорости накачки от разности заселенностей обусловлена тем, что наличие атомов на втором и первом уровнях уменьшает количество атомов, доступный для накачки. Подставляя (1.6) в (1.4), получим:

$$N = \frac{t_{sp}N_aW}{1 + t_{sp}W + t_{sp}W_i}. \quad (1.7)$$

Это выражением может быть записано в привычном виде:

$$N = \frac{N_0}{1 + t_sW_i}, \quad (1.8)$$

где

$$N_0 = \frac{t_{sp} N_a W}{1 + t_{sp} W}, \quad (1.9)$$

$$\tau_s = \frac{t_{sp}}{1 + t_{sp} W}. \quad (1.10)$$

Для медленной накачки ($W_i \ll 1/t_{sp}$) $N_0 \approx t_{sp} N_a W$ пропорциональна плотности вероятности накачки W , а $\tau_s \approx t_{sp}$, так что вновь получаются формулы (1.2) и (1.3). Однако, по мере возрастания интенсивности накачки N_0 уменьшается и в пределе достигает насыщения.

Трехуровневая схема накачки

В отличие от четырехуровневой схемы, в трехуровневой схеме уровень «1» совпадает с основным состоянием атома (**рис. 2**). Накачка осуществляется на уровень «3». Скорость переходов $3 \rightarrow 2$ должна быть большой, чтобы заселенность уровня «3» оставалась незначительной. Переходы $3 \rightarrow 1$ должны происходить медленно ($\tau_{32} \ll \tau_{31}$), это обеспечит большую заселенность второго уровня.

Накачка (например, поглощение фотонов частотой E_3/h) переводит атомы с уровня «1» на уровень «3». Ее скорость равна R . Считаем, что эффективная скорость R_2 накачки уровня «2» совпадает со скоростью фактической накачки третьего уровня: $R_2 = R$. Заселением уровня «2» вследствие теплового возбуждения пренебрегаем.

Нетрудно видеть: если скорость перехода $3 \rightarrow 2$ большая, трехуровневая система (**рис. 2**) является частным случаем четырехуровневой системы (**рис. 1**) (при условии, что R не зависит от N) с параметрами:

$$R_1 = R_2 = R, \quad \tau_1 = \infty, \quad \tau_2 = \tau_{21}. \quad (1.11)$$

Воспользуемся выражениями для стационарной разности заселенностей (**Лекция 4**). Получим:

$$0 = R - \frac{N_2}{\tau_{21}} - N_2 W_i. \quad (1.12)$$

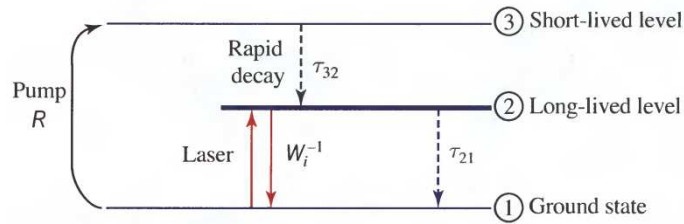


Рис. 2. Энергетические уровни и скорости распада трехуровневой схемы накачки. Атом может иметь множество других уровней, но они почти не влияют на работу. Считается, что скорость накачки на уровень «3» равна скорости выкачки из уровня «1».

Из единственной формулы (1.12), связывающей N_2 и N_1 определить их разность N невозможно. Для этого воспользуемся законом сохранения атомов в системе (учтем, что $N_3 \approx 0$):

$$N_1 + N_2 = N_a. \quad (1.13)$$

Из (1.12) и (1.13), получим $N = N_0 / (1 + \tau_s W_i)$, где

$$N_0 = 2R\tau_{21} - N_a, \quad (1.14)$$

$$\tau_s = 2\tau_{21}. \quad (1.15)$$

Если безызлучательным переходом $2 \rightarrow 1$ можно пренебречь, то есть $t_{sp} \ll \tau_{nr}$, τ_{21} можно заменить на τ_{sp} , вследствие чего получим:

$$N_0 \approx 2R\tau_{sp} - N_a, \quad (1.16)$$

$$\tau_s \approx 2\tau_{sp}. \quad (1.17)$$

Сравним уравнения для трехуровневой системы (1.16) и (1.17) с аналогичными уравнениями четырехуровневой системы (1.2) и (1.3). Для достижения инверсии заселенностей $N > 0 \Leftrightarrow N_0 > 0$ скорость накачки в трехуровневой системе

должна быть $R > N_a / t_{sp}$. Таким образом, даже для выравнивания заселенностей ($N_1 = N_2$) необходима существенная плотность энергии накачки $E_3 N_a / t_{sp}$. Неотъемлемое препятствие для достижения высокой инверсии заселенностей в трехуровневой системе – большая заселенность основного состояния. В четырехуровневой системе этот недостаток устраняется, если время распада уровня «1» τ_1 мало. Постоянная времени насыщения $\tau_s \approx t_{sp}$ четырехуровневой схемы накачки вдвое меньше, чем в трехуровневой. Как и для четырехуровневой схемы накачки, путем прямой накачки $1 \rightarrow 2$ не удастся достичь инверсии заселенностей.

Найдем зависимость скорости накачки от разности заселенностей N . По определению $R = (N_1 - N_3)W$; $N_3 \approx 0$, а $N_1 = 1/2(N_a - N)$, откуда $R \approx 1/2(N_a - N)W$. Подставляя этот результат в главное уравнение $N = (2Rt_{sp} - N_a) / (1 + 2t_{sp}W_i)$ и перегруппировывая члены, получим:

$$N = \frac{N_0}{1 + \tau_{sp}W_i}, \quad (1.18)$$

где в данном случае

$$N_0 = \frac{N_a(t_{sp}W - 1)}{1 + t_{sp}W}, \quad (1.19)$$

$$\tau_s = \frac{2t_{sp}}{1 + t_{sp}W}. \quad (1.20)$$

Как и в четырехуровневой схеме, N_0 и τ_s достигают насыщения по мере роста вероятности переходов вследствие накачки W .

Методы накачки

Накачка может осуществляться различными методами. Среди них – использование электрических, химических и оптических

средств. Некоторые виды электрической и оптической накачки представлены на рис. 3. Ядерная накачка использует поток высокоэнергетических частиц или гамма-лучей, получаемых из ядерного реактора или радиоизотопа.

Важно понимать, что величины R_1 и R_2 имеют смысл количества атомов в единицу времени в единичном объеме, накачка которых успешно осуществлена. Однако, сам процесс накачки может быть достаточно неэффективным. Например, при оптической накачке большая доля поставляемая системой накачки фотонов не взаимодействует с активной средой, то есть попросту теряется.

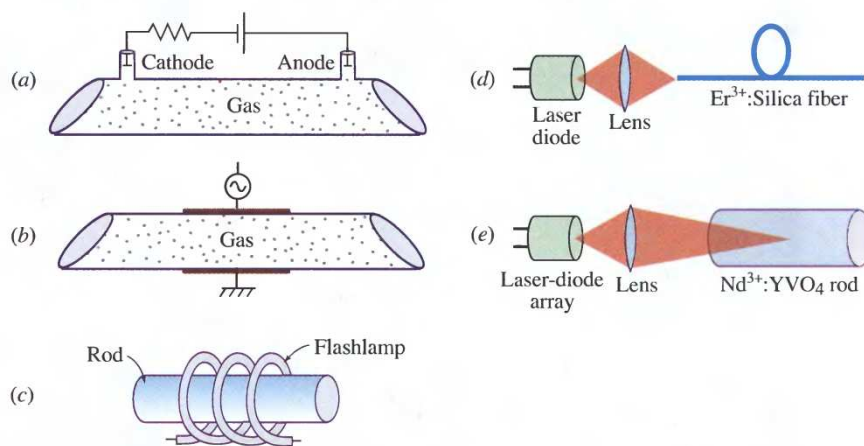


Рис. 3. Примеры электрической и оптической накачки: *a)* для накачки газовых лазеров часто используется постоянный ток. Тока газового разряда может создаваться как вдоль (*a*), так и поперек (*b*) оси лазера. Также для накачки газовых лазеров используются радиочастотные токи разряда (*b*). Ксеиновые импульсные лампы или дуговые лампы KrCW также часто для накачки волоконных лазерных усилителей Er³⁺:SiO₂ (кварц) используются полупроводниковые лазерные диоды (*г*). Для оптической накачки лазеров Nd³⁺:YVO₄ обычно используется матрица лазерных диодов (*e*).

ТИПИЧНЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ УСИЛИТЕЛИ

Лазерное усиление может иметь место в разнообразных материалах: атомарный и молекулярный газ, легированные диэлектрики, полупроводники, и проч. Реальные лазерные системы обычно содержат большое количество энергетических

уровней, между которыми возможны переходы, и которые оказывают влияние на заселенности N_1 и N_2 уровней «1» и «2», между которыми происходят интересующие нас излучательные переходы. Не смотря на это, основные принципы работы лазерных усилителей могут быть описаны в терминах трех- и четырехуровневой схемы накачки.

Ниже описаны три типа систем лазерных усилителей:

- 1) рубиновый лазерный усилитель (3-уровневая схема);
- 2) лазер на стекле, легированном неодимом (4-уровневая схема);
- 3) кварцевый волоконный лазер, легированный эрбием (трехуровневая схема).

Большинство лазеров работают по 4-уровневой схеме. Однако, рубиновый и кварцевый волоконный лазер с Er^{3+} исключения.

Также описан лазер, работающий на рамановском рассеивании. Все описанные лазерные усилители могут использоваться также в качестве лазерных генераторов.

Большинство лазерных усилителей используются в качестве *усилители мощности* высококачественного, но маломощного излучения лазерных генераторов. Некоторые лазерные усилители, такие как кварцевый волоконный лазер, легированный эрбием, используются в волоконно-оптических линиях связи в качестве повторителей и предусилителей, предназначенные для усиления сигнала перед фотодетектором.

Часто лазерные усилители используются в режиме насыщения.

А. Рубиновый лазер

Рубин ($\text{Cr}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$) – это сапфир (Al_2O_3), в котором ионы (Cr^{3+}) замещают незначительную долю ионов алюминия. Рубин – это первый материал, в котором наблюдался лазерное усиление. Сейчас такие лазеры почти не используются на практике, но могут служить учебным примером. Как и везде, в активной среде такого лазера лазерное усиление может иметь место для большого разнообразия переходов. Энергетические уровни, ответственные за хорошо известный красный переход, обозначены на **рис. 4** посредством обозначений, используемых в теории групп. Уровень «1» – это основное состояние; уровень «2» представляет собой 2 близко расположенных дискретных уровня. На **рис. 4** справа они показаны как один.

/лекция не закончена/