

Определение

Отрицательная абсолютная температура — температура, характеризующая равновесные состояния термодинамической системы, в которых вероятность обнаружить систему в микросостоянии с более высокой энергией выше, чем в микросостоянии с более низкой. В классической статистике этому соответствует большая плотность вероятности для точек фазового пространства с более высокой энергией по сравнению с точками с более низкой энергией. При положительной температуре соотношение вероятностей или их плотностей обратное.

Отрицательная температура системы сохраняется достаточно долго, если эта система достаточно хорошо изолирована от тел с положительной температурой. На практике отрицательная температура может реализовываться, например, в системе ядерных спинов.

При этом абсолютная температура $+\infty$ и $-\infty$ — это одна и та же температура (соответствующая равномерному распределению), но различаются температуры $T = +0$ и $T = -0$. Так, система будет сосредоточена на самом нижнем уровне при $T = +0$, и на самом верхнем — при $T = -0$.

Инверсия заселенностей

В случае термодинамического равновесия, состояние с низкой энергией намного популярней возбуждённого состояния, и это является нормальным состоянием системы. Если удастся каким-либо способом *обратить* ситуацию, то тогда говорят, что система перешла в состояние с **инверсией электронных заселенностей**.

Из распределения Больцмана для отношения числа молекул на двух уровнях:

$$\frac{N_2}{N_1} = \exp \frac{-(E_2 - E_1)}{kT} \quad (1)$$

Если при $E_2 > E_1$ нам удастся достичь такое состояние, что $N_2 > N_1$, то из формулы 1 получим, что $T < 0$. Существует несколько моделей, реализующих данное состояние.

Рассмотрим одну из таких моделей, известную как трёхуровневый лазер. Возьмем группу из N атомов так, что каждый из них может находиться в трёх различных энергетических состояниях, на уровнях 1, 2 и 3 с энергиями E_1 , E_2 и E_3 , в количестве N_1 , N_2 и N_3 , соответственно. При этом диаграмма энергетических уровней будет выглядеть следующим образом:

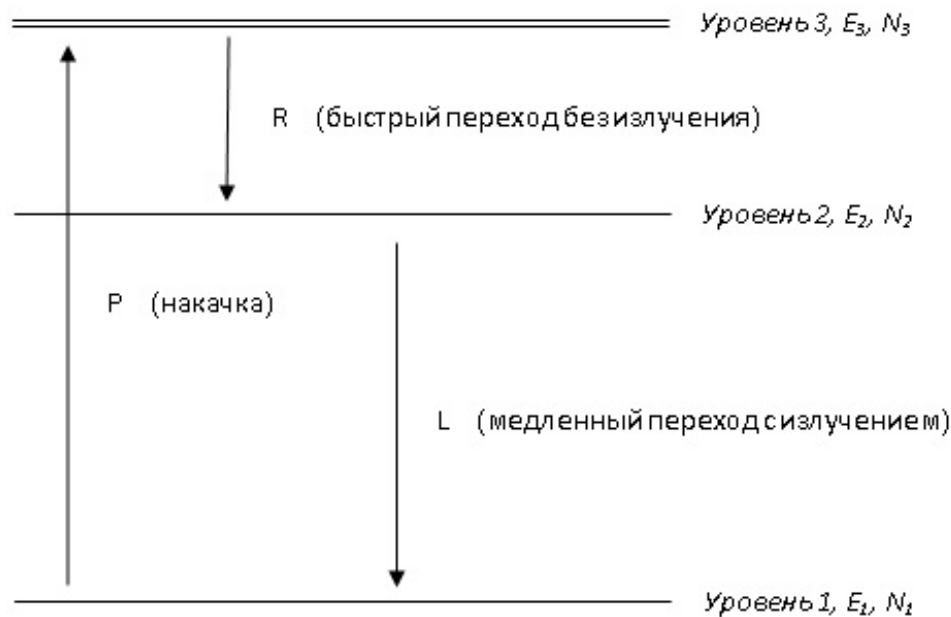


Рис. 1. Диграмма энергетических уровней (трехуровневый лазер).

На этой диаграмме $E_1 < E_2 < E_3$; т. е. энергетический уровень 2 лежит между основным состоянием и уровнем 3.

В самом начале система атомов находится в термодинамическом равновесии и большинство атомов находится в основном состоянии, т. е. $N_1 \approx N$, $N_2 \approx N_3 \approx 0$. Если теперь осветить атомы светом частоты ν_{31} , где $E_3 - E_1 = h\nu_{31}$ (h — Постоянная Планка), благодаря поглощению, начнётся процесс перехода атомов в возбуждённое состояние на уровень 3. Такой процесс называется накачкой, и не всегда он вызывается светом. Для этой цели также применяются электрические разряды или химические реакции.

Если мы будем продолжать накачку атомов, мы возбудим до уровня 3 достаточное их количество, т. е. $N_3 > 0$. Далее нам необходимо, чтобы атомы быстро перешли на уровень 2. Освобождённая при этом энергия может излучиться в виде фотона механизмом спонтанного излучения, но на практике рабочее тело лазера выбирают так, чтобы переход $3 \rightarrow 2$, обозначенный на диаграмме буквой **R**, проходил без излучения, а энергия тратилась на нагрев рабочего тела.

Атом на уровне 2 может перейти на основной уровень, спонтанно излучив фотон частоты ν_{21} (которую можно найти из выражения $E_2 - E_1 = h\nu_{21}$). Этот процесс показан на диаграмме буквой **L**. Время до этого перехода τ_{21} значительно превышает время неизлучающего перехода $3 \rightarrow 2 - \tau_{32}$ ($\tau_{21} \gg \tau_{32}$). При таком условии количество атомов на уровне 3 будет примерно равно нулю ($N_3 \approx 0$), а количество атомов на уровне 2 — больше нуля ($N_2 > 0$), поскольку переход $2 \rightarrow 1$ будет определять всю скорость перехода $3 \rightarrow 1$. Если на уровне 2 удастся удержать больше половины атомов, между уровнями 1 и 2 будет достигнута инверсия населённостей.

Поскольку для достижения такого эффекта нужно возбудить не менее половины атомов, для

накачки нужна очень большая энергия. Поэтому трёхуровневые лазеры непрактичны, хотя они и стали первыми созданными Теодором Майманом лазерами (на основе рубина) в 1960 году. На практике чаще используются четырёхуровневые лазеры, как показано на диаграмме ниже:

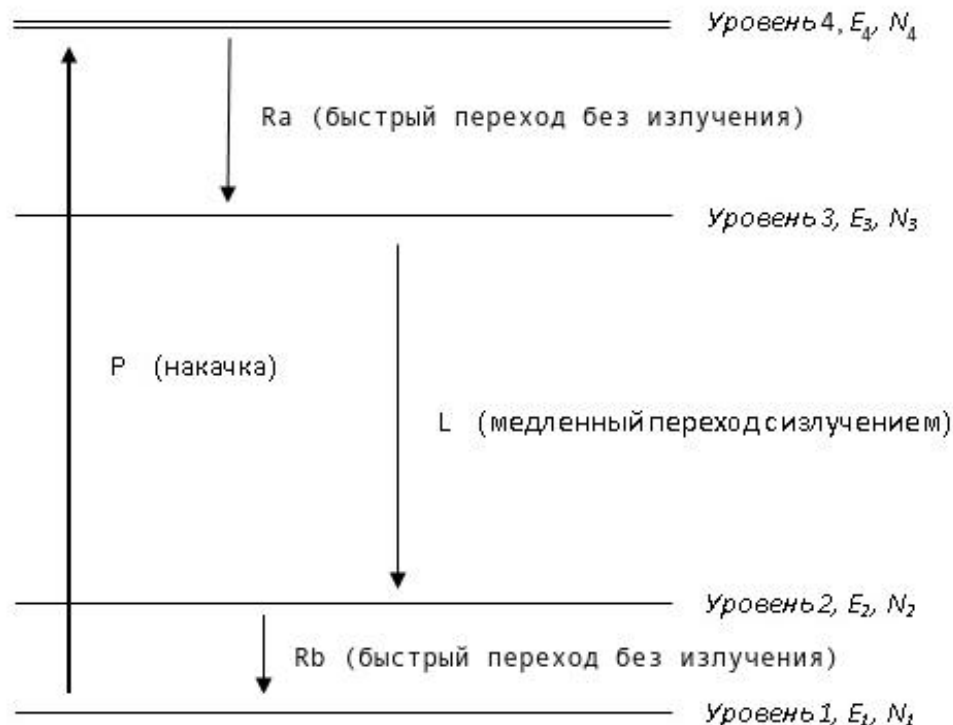


Рис. 2. Диаграмма для четырёхуровневого лазера.

Здесь присутствует четыре энергетических уровня E_1, E_2, E_3, E_4 , и количество атомов N_1, N_2, N_3, N_4 , соответственно. Энергии этих уровней последовательно увеличиваются: $E_1 < E_2 < E_3 < E_4$.

В такой системе при накачке **P** атомы переходят из основного состояния (уровень 1) на уровень накачки 4. С уровня 4 атомы с помощью быстрого неизлучающего перехода **Ra** — на уровень 3. Так как время до перехода **L** намного превышает время до перехода **Ra**, на уровне 3 скапливаются атомы, которые затем с помощью спонтанного или вынужденного излучения переходят на уровень 2. С этого уровня быстрым переходом **Rb** атом может вернуться в основное состояние.

Как и в предыдущем случае, наличие быстрого перехода **Ra** приводит к тому, что $N_4 \approx 0$. В четырёхуровневом лазере, благодаря наличию второго быстрого перехода **Rb**, количество атомов на уровне 2 также стремится к нулю ($N_2 \approx 0$). Это значительно упрощает достижение инверсии заселенностей.

Полученное оптическое усиление (и, соответственно, работа лазера) происходит на частоте ν_{32} ($E_3 - E_2 = h\nu_{32}$). Так как для образования инверсии населённостей в четырёхуровневом лазере достаточно небольшого числа атомов, такие лазеры более практичны.