

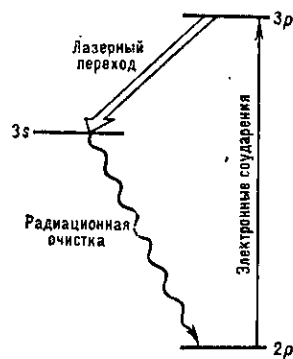
здесь $n_{пор}$ — пороговая концентрация ионов. Если $\delta = 0,1$ и $n_{пор} = 10^{23} \text{ см}^{-3}$, т. е. $n_{пор} \sim$ концентрации атомов в твёрдом теле, то энерговклад на единицу длины активной среды

$$\frac{\epsilon_{пор}}{L} \approx \frac{2 \cdot 10^{-23}}{\lambda_{[nm]} \delta} n_{пор} \approx \frac{2 \cdot 10^4}{\lambda_{[nm]}} \frac{\text{Дж}}{\text{см}}. \quad (6)$$

Для значений $\Gamma T_1 \approx 10$ и $L \sim 1 \text{ см}$ пороговые значения концентрации ионов, согласно (1) и (2), определяются выражением $n_{пор} \approx 10^9 / \lambda^2 \text{ [nm]} \text{ см}^{-3}$, что существенно меньше концентрации атомов в твёрдом теле. Так, при $n_{пор} \sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$ из (6) следует $\epsilon_{пор}/L \sim 2 \cdot 10^{-3} \lambda_{[nm]} \text{ Дж/см}$, что выполнимо для широкого класса систем накачки.

Основные механизмы создания инверсии. Предложено ок. 10 механизмов создания инверсии между уровнями в атомах или ионах активной среды Р. л., некие из них являются развитием методов, широко используемых в традиционных оптич., ИК- и УФ-лазерах, другие применимы лишь в рентг. области. Реализованы два механизма: столкновит. возбуждение и рекомбинац. накачка. В лазерной плазме, в отличие от плазмы низкой плотности, распределение частиц по энергетич. уровням может существенно отличаться от равновесного и определяется соотношением скоростей процессов ионизации, рекомбинации электронов и ионов, возбуждения ионов, а также излучат. процессов. При высоких значениях электронной плотности преобладают процессы трёхчастичной рекомбинации: напр., $A^{n+} + e + e \rightarrow (A^n)^* + e$, где $(A^n)^*$ — возбуждённое состояние иона кратности n . Поскольку в этом случае третья частица привносит часть энергии, то электроны оказываются на высоковозбуждённых уровнях иона $(A^n)^*$, последующая релаксация в осн. состояние идёт либо излучательным, либо столкновит. путём.

В случае низкой плотности электронов преобладают процессы излучат. рекомбинации, когда электрон оказывается на ниж. уровнях иона A^n : если электронная темп-ра при этом велика, то ион оказывается в осн. состоянии. Указанные процессы и определяют два осн. механизма создания в Р. л. инверсии. Р. л. со столкновительной накачкой по принципу действия гораздо ближе к традиц. лазерам, работающим в видимой области. В этом случае в качестве активной среды используется высокотемпературная плазма низкой плотности. В результате излучат. рекомбинации



заселяются осн. состояния рабочих ионов (напр., уровни $2s^2p^6$ в случае иона Se^{24+} ; рис.). Верхний рабочий уровень $3p$ заселяется из осн. состояния при соударениях ионов плазмы с электронами, нижний рабочий уровень $3s$ быстро опустошается за счёт быстрого излучат. распада $3s \rightarrow 2p$. Переход $3p \rightarrow 2p$ запрещён. Генерация рентг. излучения идёт на излучательно разрешённом переходе $3p \rightarrow 3s$. Плазма должна быть оптически тонкой для излучения на переходе $3s \rightarrow 2p$

(с тем чтобы избежать заселения уровня $3s$ в результате пленения излучения на переходе $3s \rightarrow 2p$).

В лазерах с рекомбинационной накачкой используется быстрое охлаждение высокоплотной плазмы. В этом случае электроны, оказавшиеся на высоких уровнях иона $(A^n)^*$, начинают релаксировать под влиянием излучат. и столкновит. переходов. Если электронная темп-ра мала, то столкновит. процессы важны лишь при переходах между верх. уровнями, когда $kT_e \geq \hbar\omega_{nm}$, где $\omega_{nm} = (\epsilon_n - \epsilon_m)/\hbar$ —

частота перехода с уровня с энергией ϵ_n на уровень с энергией ϵ_m . С ростом ω_{nm} сечение столкновит. переходов падает, а излучательных — растёт. Чем ближе уровень к основному, тем выше скорость спонтанных переходов, поэтому возможно возникновение инверсии между возбуждёнными уровнями за счёт того, что ниж. уровень будет опустошаться быстрее, чем верхний. Если скорость притока частиц на верх. рабочий уровень за счёт рекомбинац. процессов будет удовлетворять пороговому условию (3), то в этом случае возможна квазистационарная генерация, к-рая прекратится, когда нарушится пороговое условие из-за охлаждения плазмы. Такой тип генерации рентг. излучения был реализован на *Бальмера серии* водородоподобных ионов (C^{5+} , F^{8+}).

Другие методы накачки. Среди др. методов накачки рентг. переходов атомов и ионов — процессы фотоионизации электронов внутр. оболочек атомов или ионов, фотовозбуждения на верхний рабочий уровень излучением, исходящим от ионов более высокой кратности. Этот метод требует перекрытия спектральных линий ионов разл. кратности, что встречается достаточно часто. Идея накачки за счёт перезарядки ионов близка к идее рекомбинац. лазера. При перемешивании ионов с атомными пучками или при распылении плазмы в газ возможны ионизация атомов и образование ионов меньшей кратности. Последние образуются, как правило, в возбуждённом состоянии. Дальнейшие процессы релаксации и возникновение инверсии предположительно будут происходить так же, как и в лазере с рекомбинац. накачкой.

Лит.: Бункин Ф. В., Держнев В. И., Яковлевко С. И., О перспективах усиления света далекого УФ диапазона (Обзор), «Квантовая электроника», 1981, т. 8, с. 1621; Кей М. Н., Laboratory production of X-ray lasers, «Nature», 1985, v. 318, p. 314; Matthews D. L. и др., Demonstration of a soft X-ray amplifier, «Phys. Rev. Lett.», 1985, v. 54, p. 110; Elton R. C., X-Ray Lasers, N. Y., 1990. А. В. Андреев.

РЕНТГЕНОВСКИЙ МИКРОСКОП. Благодаря малой длине волны рентг. излучения Р. м. может достигать дифракц. разрешения порядка неск. десятков нм и теоретич. величине разрешения занимает промежуточное положение между оптическим и электронным микроскопами. Он позволяет изучать не только распределение общей плотности вещества, но и распределение плотностей отд. хим. элементов по их характеристич. рентг. излучению (поглощению). В отличие от электронного микроскопа, Р. м. позволяет исследовать живые биол. объекты.

По способу формирования изображения различают проекционный, контактный, отражательный и дифракционный Р. м.; по принципу регистрации Р. м. может быть изображающим, образующим действительное или теневое изображение объекта, или сканирующим (растровым), к-рый регистрирует излучение от одного элемента объекта, находящегося на оптич. оси микроскопа, а полное изображение (растр) создаётся при последоват. перемещении объекта относительно оси микроскопа с помощью прецизионного механизма. Преимущество последнего способа регистрации — независимость разрешения от полевых аберраций оптич. системы и, следовательно, отсутствие ограничений на величину поля зрения, а также меньшая радиац. нагрузка на объект исследования.

Р. м. работает в широком диапазоне энергий рентг. квантов — от десятков эВ до десятков кэВ. В ДВ-части спектра наиб. важен участок длин волн 2,3—4,4 нм, соответствующий т. н. «водяному окну», в к-ром достигается наиб. контраст между содержащим углерод органич. веществом живых клеток и жидкой цитоплазмой. Р. м., работающие в КВ-части диапазона, применяются для исследований структуры разл. конструкц. материалов, содержащих элементы с большим атом. номером.

Проекционный рентгеновский микроскоп для наблюдения структуры самосветящихся объектов представля-