

ASE 型 X 射线激光器的动力学分析

沈 柯

(长春光机学院)

Analysis on the dynamics of the ASE-type x-ray lasers

Shen Ke

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics)

1. ASE 型激光器是一种无腔激光器, 要求工作物质长度大于临界(阈值)长度。在工作物质内任一点同时存在左行波和右行波。它的饱和特性与工作物质的长度有关。

2. ASE 型激光器的阈值条件曾被定义为在工作物质的一端自发辐射出的一个光子恰好在另一端能感生一个光子。设原子的内壳层电子在两个能级上的阈值反转粒子数为 ΔN_0 , 激发态的自发辐射系数为 A_{21} , 工作物质内部的模式数目为 P , 则此条件显然可表示为:

$$\Delta N_0 \geq \frac{P}{A_{21} t_{\text{光子}}} \quad (1)$$

若 X 射线在工作物质内部的单程损耗系数为 z , 则

$$t_{\text{光子}} \approx \frac{L}{cz} \quad (2)$$

临界(阈值)长度为

$$L_0 \geq \frac{8\pi\Delta\nu\tau_{21}}{\lambda^2\Delta N} r \quad (3)$$

$$\Delta N_0 \geq 7\pi \times 10^{-3} \Delta\nu\tau_{21} z^{4.3} \Delta N \quad (4)$$

表明了 ΔN_0 与原子序数 z 的函数关系。分析表明, 对于 $z \leq 30$ 的原子, 有可能实现连续或准连续运转的 X 射线激光器, 对于 $z \leq 30$ 的原子, X 射线的谱线宽度 $\Delta\nu$ 基本上由 Auger 复合决定。对于 K_α 谱线, $\Delta\nu$ 可由经验公式决定:

$$\Delta\nu \approx 10^{13} \times z \quad (5)$$

K_α 谱线的 λ 由 Mosely 定律决定:

$$\lambda \approx c / 3.3 \times 10^{15} (-2.51 + 0.917z)^2 \quad (6)$$

如使用 τ_{21} 的经典表示式, 则对于 K_α 谱线, 我们有

$$\Delta N_0 \geq \frac{mc^3}{\pi e^2} \times 10^{-5} \times \frac{z^{5.3} N}{7.924 - 1.155z^2 + 1.056z^4} \quad (7)$$

连续运转的阈值泵浦功率为:

$$P_0 = N_2 h\nu\omega_2$$

式中 ω_2 为高能级 2 的总弛豫速率, 对于 X 射线, 近似有 $\omega_2 \approx 2\pi\Delta\nu$, 将此近似及(6)式代入后, 得到

$$P_0 \approx 2.74 \times 10^{-24} (\Delta\nu)^2 \tau_{21} z^{4.3} N \quad (8)$$

如果使用 X 射线泵浦,其波长 $\lambda < \lambda_{K\alpha}$, 则泵浦光强为

$$I_0 \simeq 7\pi \times 10^{-3} \times \frac{hc\Delta\nu\tau_{21}e^{4.3}\omega_2}{\sigma_a} \quad (9)$$

式中 σ_a 为工作物质吸收泵浦 X 光的吸收截面。

3. 原子的内壳层电子能级之间形成粒子数反转,相当于使高能级上的电子被形成的空位数大于低能级的空位数。所以,可以借助能级上的空位数随时间、空间的变化,来描写内壳层电子在能态之间的跃迁。由此求得对于谱线均匀加宽情形的饱和参数为:

$$I_s = \frac{2\pi^2 hc \Delta\nu}{\lambda^3} \cdot \frac{\tau_{21}}{\left(\frac{\omega_1 - \omega_{21} + \omega_2}{\omega_1 \omega_2}\right)} \quad (10)$$

对于 $K\alpha$ 谱线,当荧光产额 ≈ 1 时,有:

$$I_s \sim 2 \times 10^{10} z^4 \quad (\text{瓦/厘米}^2) \quad (11)$$

增益为:

$$G = \frac{1}{\phi} \frac{\partial}{\partial x} \phi = \sigma \frac{R_2/\omega_2 - (R_1 + R_2)/\omega_1}{1 + B_{21}g(\nu) \frac{n}{c} (I_+ + I_-) \left(\frac{\omega_1 - \omega_{21} + \omega_2}{\omega_1 \omega_2}\right)} \quad (12)$$

软 X 射线区粒子数反转的记录

卢仁祥 顾 援 毛楚生 田 莉

(中国科学院上海光机所)

Observation on the population inversion in the soft x-ray region

Lu Renxiang, Gu Yuan, Mao Cusheng, Tian Li

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

10¹¹ 瓦(100 微微秒)7 焦耳大功率激光轰击带 Cu 箔(8 微米厚)冷阱的 Mg 靶,所产生的 X 光线谱被狭缝缝宽为 35 微米的 TlAP 三合一晶体谱仪(针孔、积分及空间分辨线谱)所记录。

观察所摄的 X 光积分线谱,可知 Mg 的 1S4P-1S² 与 1S3P-1S² 线谱强度相近,计及窗口校正有 $\frac{I_3}{I_4} = 1.24$, 由于 $I_{nm} = 1.6 \times 10^{-19} A_{nm} N_n \Delta E_{nm}$ 及 $A_{nm} = 4.3 \times 10^7 \frac{g_n}{g_m} f_{nm} (\Delta E_{nm})^2$, 由此导出 Mg 类 He 离子 $n=4, 3$ 能级上集居数为 $\frac{N_4}{N_3} = 1.49$, 即在 1S4P-1S3P 之间建立了能级粒子数反转(发射波长为 155.5 Å)。

从所记录的 1S4P-1S² 与 1S3P-1S² 谱线强度峰值比随靶面距离 S 的变化,可见当 $S > 90$ 微米时, $I_{4峰} > I_{3峰}$ 。

再从 Mg 类 He 共振线 1S2P-1S² 强度随距离的变化来看,可以明显看出,在离靶面约 100 微米处,由于 Mg 等离子体与冷的铜等离子体会合, I_2 减小更快,而且谱线中央产生凹陷而分裂。