

介质参数对电子束泵浦的KrF激光激发态泵浦率的影响

吴选红 杨之昌

沈乃澂

(复旦大学物理系, 上海 200433)

(中国计量科学研究院时频处, 北京 100013)

摘要: 对电子束泵浦的KrF激光介质之间的各种化学反应进行研究, 求得 KrF^* 、 ArF^* 、 Kr_2F^* 等激发态的泵浦率随时间、介质压强和介质成分的变化曲线。得到介质压强的最佳值是 0.8 atm, 最佳分压比是 $\text{Ar}/\text{Kr}/\text{F}_2=91.37\%/8.4\%/0.225\%$ 。最佳电子束脉宽应大于 50 ns。

关键词: KrF 准分子激光, 碰撞弛豫, 振动弛豫

Influence of medium parameter on pumping rate in electron-pumped KrF laser

Wu Xuanhong, Yang Zhichang

(Physics Dept. Fudan University, Shanghai)

Shen Naicheng

(National Institute of Metrology, Beijing)

Abstract: In this paper, we study the chemical reactions of medium, and obtain the relationship of the sidelight spectrum and the pumping rate of the excimer excited states such as KrF^* , ArF^* , Kr_2F^* on time, medium pressure and medium composition. The results show that the optimum value of medium pressure is 0.8 atm, the optimum ratio of the partial pressure $\text{Ar}/\text{Kr}/\text{F}_2$ equals to 91.375%/8.4%/0.225%, and the optimum dwell time of electron beam should be more than 50 ns.

Key words: KrF excimer laser, collisional relaxation, vibrational relaxation,

本实验研究用的激光室尺寸为截面 $2 \times 2 \text{ cm}^2$, 长 40 cm。脉冲电子束是由栅阴极产生, 正负极之间加速电压是 450 kV, 电子束强度是 $J=75 \text{ kA}$, 电子束脉宽 $\tau_0=50 \text{ ns}$, 电子能量是 $E_0=450 \text{ keV}$, 进入到激发室的速率是 $n_e=2.9 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}/\text{s}$ 。

在一个脉冲 τ_0 内激发室内的电子数密度是 $n_e \tau_0 \leq 1.45 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, 而在 $P=1 \text{ atm}$, $T=300 \text{ K}$ 时, Ar、Kr 和 F_2 的数密度 $N_i \geq 1.25 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $N_i \gg n_e \tau_0$, 而电子束能量在下一个脉冲来到之前已全部传递给介质分子, 不再参与激发过程, 因此在整个激发过程中可认为 Ar、Kr、 F_2 的数密度基本不变。

KrF 激光介质分子与电子束以及介质分子之间的化学反应可归纳为两类:一类产生某些激发态,如 Kr^* 、 KrF^* 、 Kr_2F^* 等,其产生率为 $R'_i(t)$;另一类消激发,称为碰撞弛豫过程,其特征时间为 τ_{D_i} 。若 τ_{S_i} 是激发态受激辐射(包括自发辐射)的特征时间,由于 $\tau_{D_i}^{-1} \gg \tau_{S_i}^{-1}$,则泵浦速率为

$$R_i(t) = \frac{dx_i(t)}{dt} = R'_i(t) - x_i(t)/\tau_{D_i} \quad (1)$$

其中 $x_i(t)$ 是激发态的数密度, $R'_i(t)$ 是产生率。根据介质分子之间的化学反应方程式及其反应常数^[16], 推导出产生率 $R'_i(t)$ 和碰撞弛豫时间 τ_{D_i} 与介质压强和介质分压的关系:

$$\begin{aligned} \text{Kr}^* & R'_1(t) = 4.7 \times 10^{-10} N_0 X_K N_e(t) + 10^{-10} X_A N_0 X_2(t) \\ & \tau_{D1}^{-1} = 1.06 \times 10^{-9} X_F N_0 + 10^{-32} [X_A X_F + 1.1 X_A^2] N_0^2 \\ \text{Kr}^{**} & R'_2(t) = 1.2 \times 10^{-9} N_0 X_K N_e(t) \\ & \tau_{D2}^{-1} = 10^{-10} [7.8 X_F + X_A] N_0 \\ \text{Ar}^* & R'_4(t) = 2.7 \times 10^{-10} N_0 X_A N_e(t) + 10^{-10} X_A N_0 X_5(t) \\ & \tau_{D4}^{-1} = 8.1 \times 10^{-10} X_F N_0 + 10^{-32} [X_A^2 + 2.7 X_A X_K] N_0^2 \\ \text{Ar}^{**} & R'_5(t) = 7.4 \times 10^{-10} N_0 X_A N_e(t) \\ & \tau_{D5}^{-1} = 10^{-10} [8.1 X_F + X_A] N_0 \\ \text{KrF}^* & R'_7(t) = 8.1 \times 10^{-10} X_F N_0 [X_4 + X_5] \\ & \tau_{D7}^{-1} = 10^{-15} [2X_K + 1.8X_A + 780X_F] N_0 \\ & \quad + 10^{-31} [0.7X_A^2 + 6.5X_A X_K + 6.7X_K^2] N_0^2 \\ \text{ArF}^* & R'_8(t) = 10^{-10} X_F N_0 [7.5X_1(t) + 4.7X_2(t)] \\ & \tau_{D8}^{-1} = 10^{-9} N_0 [1.6X_K + 1.9X_F + 0.009X_A] + 4 \times 10^{-31} X_A^2 N_0^2 \\ \text{KrAr}^* & R'_9(t) = 10^{-32} N_0^2 [X_K X_A X_1(t) + X_A^2 X_4(t)] \\ & \tau_{D9}^{-1} = 10^{-10} N_0 [9X_F + X_K] \\ \text{Kr}_2^* & R'_{10}(t) = 2.7 \times 10^{-32} X_A^2 N_0^2 X_4(t) \\ & \tau_{D10}^{-1} = 6 \times 10^{-10} X_F N_0 + 3 \times 10^{-10} X_A N_0 \\ \text{Ar}_2^* & R'_{11}(t) = 1.14 \times 10^{-32} X_A^2 N_0^2 X_1(t) \\ & \tau_{D11}^{-1} = 10^{-10} N_0 [6.1X_F + 4X_K] \\ \text{Kr}_2\text{F}^* & R'_{12}(t) = 3 \times 10^{-10} X_F N_0 X_{10}(t) 6.6 \times 10^{-31} N_0^2 X_7(t) * (X_K^2 + X_A X_K) \\ & \tau_{D12}^{-1} = 1.5 \times 10^{-10} X_F N_0 \\ \text{Ar}_2\text{F}^* & R'_{13}(t) = 2.5 \times 10^{-10} X_F N_0 X_{11}(t) + 4 \times 10^{-31} (X_A N_0)^2 X_8(t) \\ & \tau_{D13}^{-1} = 10^{-10} N_0 (2X_F + 2X_K + X_A) \\ \text{ArKrF}^* & R'_{14}(t) = 3 \times 10^{-10} X_F N_0 X_9(t) + 7 \times 10^{-31} (X_A N_0)^2 X_7(t) \\ & \tau_{D14}^{-1} = [10^{-9} X_F + 2 \times 10^{-11} (X_A + X_K)] N_0 \end{aligned}$$

将上述的结果代入方程(1)中即可求出各种激发态的化学泵浦率,图1显示了压强分别是 1, 2, 3 atm 时 KrF^* 的泵浦率 $R(t)$ 随时间的变化,从中得出:电子束泵浦介质分子是在几个 ns 内完成, $R(t)$ 曲线的上升时间 τ 就是电子束再次泵浦介质的时间。因此当入射的 248 nm 的激光脉宽小于 τ 时,脉冲就不能被饱和放大,那么 τ 就是能放大 248 nm 脉冲激光的最小宽度,而能放大的 248 nm 的激光脉宽不能超过 $R(t)$ 的平台宽度(最大值是 τ_0)。

对 KrF^* 的泵浦率 $R(t)$ 的上升时间随压强的变化关系的研究表明:当 $P < 0.5$ atm 时,

上升时间 τ 大于 50ns, 说明在电子束脉冲内, $R(t)$ 仍然没能达到极大值, 这将造成脉冲激光不能饱和放大, 使放大器的转换效率降低。当 $P > 1 \text{ atm}$ 时, 上升时间 τ 小于电子束脉宽的一半, $R(t)$ 将有一平台, 宽度大于 25 ns。在平台内脉冲激光被饱和地放大, 可以提高能量转换效率。随着压强的增加, $R(t)$ 的极大值平台更加平坦, 使放大快脉冲激光的畸变更小。但随着压强的增加, KrF^* 的 $R(t)$ 的极大值减少, 使脉冲激光的放大率减小。图 2 显示了介质的压强、 X_A/X_K 、 X_{F_2} 对 KrF^* 的平均化学泵浦率的影响曲线。

当压强为 0.8atm 时, KrF^* 的平均泵浦率 R 出现极大值为 $3.12 \times 10^{23} \text{ cm}^{-3}/\text{s}$, 但当 $P > 1.2 \text{ atm}$ 时, R 变化较为平坦, 考虑到 $R(t)$ 的上升时间对输出的影响, 可选择压强在 0.8~3atm 之间。对 X_A/X_K 对 KrF^* 的平均泵浦率影响的研究表明, Ar/Kr 取 91.4%/8.4% 时, R 有极大值, 当 Ar/Kr 在 0/99.8%~80%/20% 之间时, R 较小, 而当 Ar/Kr 在 80%/20%~97%/3% 之间时, R 的值较大。造成上述结果的原因是由于下面的反应使 KrF^* 的态数增加:



当 Ar 的含量增加到 80% 时, 上述反应使 KrF^* 的增加量大于由于 Kr 的减少而使 KrF^* 的减少量, R 就增加, 而当 Kr 减少到 3% 时, 上述的反应也在迅速减少, 导致 KrF^* 的态数迅速减少。

对 F_2 的含量的研究表明: F_2 的最佳值是 0.225%, 当 F_2 的含量大于 0.05% 时就足以满足所有反应的需要, 随着 F_2 的进一步增加, F_2 将使 ArF^* 和 KrF^* 反应成其他物质, 反而使 KrF^* 的态数降低。

电子束脉宽对 KrF^* 的泵浦率影响曲线如图 3 所示, 当 τ_0 增加至 50ns 后, KrF^* 的泵浦率不再增加, 达到饱和。在 $50 \text{ ns} < t < \tau_0$ 的时间里, 电子束只是在维持这个饱和状态, 使 $R(t)$ 的平台宽度增长, 并不能使泵浦率的值进一步增加。一般选择 τ_0 在 200 ns 至 500 ns 之间。

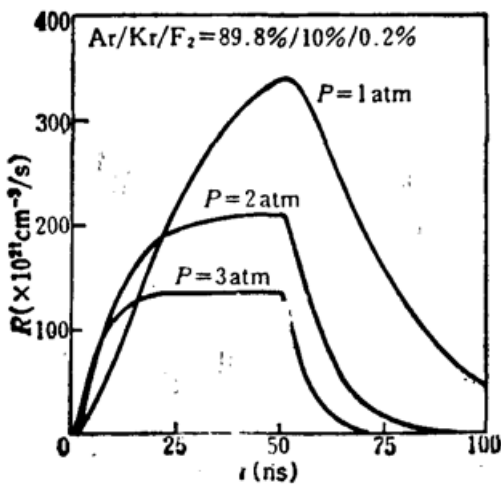


Fig. 1 Calculated relationship of chemical pumping rate on time.

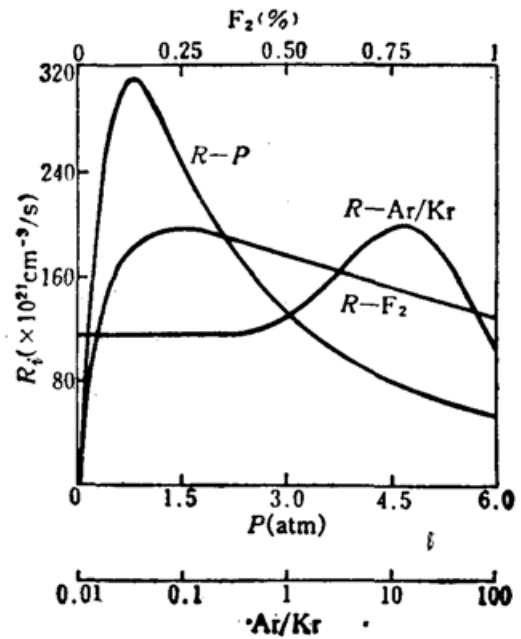


Fig. 2 Relationship of average pumping rate on pressure and medium composition.

The conditions are:

- $R \sim P$: Ar/Kr/F₂=89.8%/10%/0.2%, $\tau_0=50 \text{ ns}$.
- $R \sim \text{Ar/Kr}$: $P=2 \text{ atm}$, $F_2=0.2\%$, $\tau_0=50 \text{ ns}$.
- $R \sim F_2$: $P=2 \text{ atm}$, Ar/Kr=9, $\tau_0=50 \text{ ns}$.

其它激发态的泵浦率比 KrF* 态的泵浦率小得多, 随着 P 的增加, 除 ArF* 的泵浦率在 $P=1.2\text{atm}$ 时有极大值外, 其它激发态的泵浦率均是单调上升 (Ar/Kr/F₂=89.8%/10%/0.2%); 随着 Ar/Kr 的增加, ArF*、Ar₂*、Ar₂F* 的 R 在单调上升, Kr₂F* 的 R 在单调下降, Ar、Kr*、Kr₂*、ArKrF* 则在 X_A/X_K 分别是 91%/9%、50%/50%、80%/20% 时 R 存在极大值 ($P=2\text{atm}$, $X_F=0.2\%$); 随着 X_F 的增加, Ar₂F* 的 R 在单调上升, ArKr*、Kr₂*、Ar₂* 的 R 在单调下降, 而 ArF*、Kr₂F*、ArKrF* 则在 X_F 分别是 0.8%、0.3%、0.3% 时 R 存在极大值 ($P=2\text{atm}$, $X_A/X_K=90\%/10\%$)。

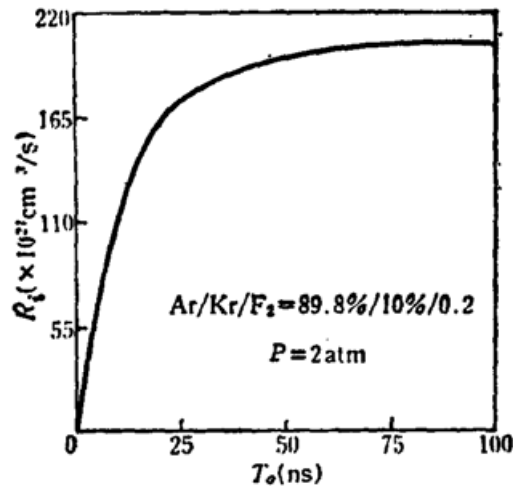


Fig. 3 Relationship of average pumping rate on the pulse width of electron beam

参 考 文 献

- 1 F. Kannari, M. Obara *et al.*, *J Appl. Phys.*, **57**, 4309 (1985)