

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0023-03

核抽运³He-Ar-Xe 激光机理探索

万俊生 景春元 赵柱民 蒋飞军 陈 达 王道华 陈立新 潘孝兵 魏加祥
赵学庆 刘福华 刘晶儒

(西北核技术研究所, 西安 710024)

摘要 提出了 He-Ar-Xe 核抽运激光本征效率的理论模型, 推导了本征效率公式。建立了本征效率与抽运腔内介质温度(能量沉积), 气体总压力, He 和 Ar 分压, Xe 的含量之间的函数关系。探讨了能量沉积对本征效率的影响, 估算了核抽运激光器的激光输出, 为进一步的实验设计提供了理论依据。

关键词 核抽运激光, Xe 激光, 理论模型, 本征效率

中图分类号 TN248.5 **文献标识码** A

Studies on the Mechanism of the Nuclear Reactor Pumped Laser for ³He-Ar-Xe System

WAN Jun-sheng JING Chun-yuan ZHAO Zhu-min JIANG Fei-jun CHEN Da
WANG Dao-hua CHEN Li-xin PAN Xiao-bin WEI Jia-xiang
ZHAO Xue-qing LIU Fu-hua LIU Jin-ru

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024)

Abstract The Nuclear Reactor Pumped Lasing Model (NRPLM) He-Ar-Xe was proposed and the power efficiency function was derived in the present work. The power efficiency was built as a function of gas temperature (energy deposition), cell pressure, xenon concentration, He and Ar fractions. The influence of energy deposition on efficiency were also explored. And the laser output was also estimated. The present work will benefit the future experimental design.

Key words nuclear reactor pumped laser; Xe laser; lasing model; intrinsic efficiency

1 引言

利用电子和核抽运含 Xe 混合惰性气体的 1.73 μm 波长激光已证实可达 1% 至 4% 的本征效率^[1,2], 可制成高功率激光器。

核抽运的主要工作原理是利用核反应堆产生的中子在激光抽运介质中的俘获效应, 介质俘获中子后发生裂变或衰变并释放能量, 核反应过程中产生的粒子带着反应过程中释放的能量进入激光介质, 并与激光介质作用, 使其粒子数反转, 抽运产生激光。由于核抽运激光利用核能抽运, 使用惰性气体作为激光介质, 因此它具有输出的能量高, 使用寿命长等特点, 近年来受到了美、俄的高度重视。美国在圣地亚国家实验室(SNL)建造了专门用于开展该研究的 SPR-3 快中子脉冲堆和 ACPR 环形脉冲堆^[3]。

在文献[1,2]中我们研究了核抽运激光的能量

沉积问题。本文将在以前工作的基础上, 完善核抽运激光体系的理论模型, 估算激光输出, 为进一步的实验工作提供理论依据。

2 理论模型

在 He-Ar-Xe 和 Ar-Xe 气体激光体系中, 激光波长和激光本征效率对混合气体组成很敏感, 当 He-Ar-Xe 和 Ar-Xe 混合气体中 Xe 的含量为 0.1% 左右时, 体系的本征效率最高。在 Ar-Xe 体系中, 1.73 μm 的激光跃迁占 75% 以上, 然而当 Xe 的份额大于 10% 时, 激光淬灭。电子抽运研究表明: Xe 气体激光体系中, 准分子的形成对 5d 能级上的粒子数反转起决定作用。借鉴此理论, 在文献[4]中我们推导了当激光体系处于谐振平衡时的关系式:

$$N_{Xe^*} = \{K_{5d}^{HeXe} \times P^{He} + K_{5d}^{ArXe} \times P^{Ar} -$$

$$P(P^{\text{Ar}} \times K_{\text{ArXe}^+}^{5d} + P^{\text{He}} \times K_{\text{HeXe}^+}^{5d}) \} A \times f(C^{\text{Xe}}) \quad (1)$$

P 是体系的总压力(Pa), P^{Y} 是 Y 原子的分压(Pa), A 是能量沉积密度(W/cm^3), K_{5d}^{U+} 是通过 $IJ +$ 准分子结合和离解而生 $5d[3/2]_1$ 激发态 Xe^* 原子的抽运系数, K_{U+}^{5d} 是通过准分子 $IJ +$ 结合和离解而产生的 $5d[3/2]_1$ 激发态 Xe^* 原子再与气体中原子碰撞而退激的系数, 抽运腔内电子对抽运激光的贡献归

入参数 K_{5d}^{U+} 和 K_{U+}^{5d} 中。当激光体系处于谐振平衡时, N_{Xe^*} 是单位体积内处于激发态 Xe^* 的原子数, $f(C^{\text{Xe}})$ 是体系中 Xe 含量 C^{Xe} 对 N_{Xe^*} 的贡献。

3 本征效率函数

在文献[4]中推导了本征效率函数为

$$\epsilon_0 = \{ K_{5d}^{\text{HeXe}^+} \times P^{\text{He}} + K_{5d}^{\text{ArXe}^+} \times P^{\text{Ar}} - P(P^{\text{Ar}} \times K_{\text{ArXe}^+}^{5d} + P^{\text{He}} \times K_{\text{HeXe}^+}^{5d}) \} F(C^{\text{Xe}}) \quad (2)$$

式中, $F(C^{\text{Xe}})$ 是体系中 Xe 含量 C^{Xe} 的函数。

利用前人的实验数据对该函数关系式的系数进行了拟合, 得本征效率函数式为^[4]:

$$\epsilon_0 = \{ 1.438 \times 10^{-5} P^{\text{He}} + 4.342 \times 10^{-5} P^{\text{Ar}} - P(1.937 \times 10^{-10} P^{\text{Ar}} + 6.416 \times 10^{-11} P^{\text{He}}) \} \times \{ 1.965 - 1.211(\log C^{\text{Xe}}) - 0.504(\log C^{\text{Xe}})^2 \} \quad (3)$$

由上面的结果可见, $K_{5d}^{\text{ArXe}^+}$ (4.342×10^{-5}) 与 $K_{5d}^{\text{HeXe}^+}$ (1.438×10^{-5}) 处于同一数量级, 但前者值较大, 即混合气体中的 Ar 原子更易激励 $1.73 \mu\text{m}$ 波长的 Xe 激光。在本文研究体系中 ArXe^+ 和 HeXe^+ 两种准分子形成激光介质 Xe 的上能级 $5d[3/2]_1$ 机制相同, 因此, He 和 Ar 对激光的影响不同应该另有其因。Basov 等^[5] 研究电子抽运 He-Xr 激光体系时, 观察到能级间的跃迁主要发生在 $5d[3/2]_1$ 能级与 $6p[3/2]_1$ 能级之间, 发射 $2.03 \mu\text{m}$ 波长激光, 这个结果很好理解, 因为从 Xe 的 $5d[3/2]_1$ 能级受激跃迁到 $6d[3/2]_1$ 能级比跃迁到 $6p[3/2]_2$ 能级容易得多。而 Lawton 等^[6] 研究 Ar-Xe 激光体系时, 观察到能级间的跃迁主要发生在 $5d[3/2]_1$ 能级与 $6p[5/2]_2$ 能级之间, 发射 $1.73 \mu\text{m}$ 波长激光, 这说明混合气体体系中的 Ar 原子很可能起到了掏空 $6p[5/2]_2$ 能态上粒子数的作用, 是 $5d[3/2]_1$ 能级上粒子反转数相对提高的结果, 在本征效率关系式中表现为 $K_{5d}^{\text{ArXe}^+}$ 值大。

4 介质温度的影响

在文献[4]中, 我们只讨论了能量沉积为 $7.5 \text{ W}/\text{cm}^3$ 时的本征效率问题, 忽略了工作温度对本征效率的影响, 其实在文献[7]中已观察到工作温度对小增益的影响和能量沉积对抽运效率的影响, 下面对介质温度对本征效率的影响进行较深入地讨论。

核抽运激光一般是工作在脉冲状态, 工作时间短, 脉冲的瞬间可认为绝热过程, 因此能量沉积决定

了激光介质的工作温度, 即能量沉积对本征效率的影响可认为是激光介质工作温度对效率的影响。因此我们对(2)式引入一个能量沉积(A)的影响函数 $T(A)$

$$\epsilon = \epsilon_0 \times T(A) \quad (4)$$

图1显示了能量沉积对本征效率的影响^[8], 图中实验的工作条件为: 激光气体介质的总压力为 $1.039 \times 10^5 \text{ Pa}$, He:Ar=8:1, Xe 含量为 0.2%。对实验数据的拟合结果如下:

$$\epsilon = \epsilon_0(1.013 - 0.0138A + 0.00104A^2 - 0.000034A^3) \quad (5)$$

式中 A 为腔内的能量沉积, 单位为 W/cm^3 。

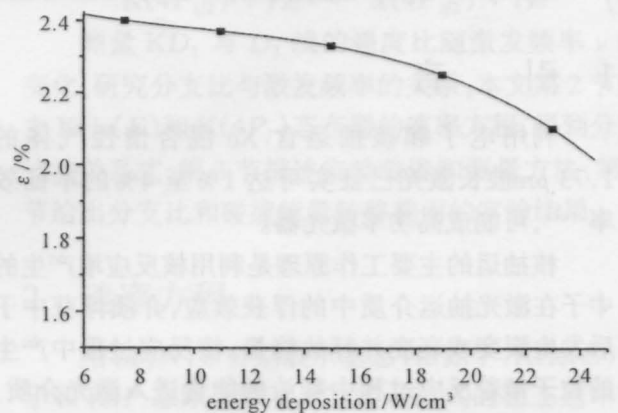


图1 能量沉积对本征效率的影响

Fig.1 The influence of energy deposition on power efficiency

由实验结果(图1)可见, 随能量沉积的增大, 本征效率降低, 这是由于能量沉积增大, 介质温度增高, 而温度的升高影响准分子的生成与离解^[7], 进而影响了 Xe 粒子数的反转, 引起本征效率的下降, 因

此在核抽运激光技术研究中,降低激光介质的工作温度十分重要。

5 抽运腔内的能量沉积与激光装置的出光强度

在文献[9]中,我们导出了能量沉积效率 β 与抽运腔直径 D 的关系式为

$$\beta = 100 - (C_1 \cdot e^{-D/t_1} + C_2 \cdot e^{-D/t_2}) \quad (6)$$

式中 C_1, t_1, C_2 和 t_2 是待定参数,利用 TRIM 和 EDL 软件可算得这些参数^[9]。根据优化原则求得的抽运腔设计参数^[10]列于表 1。由表中的最佳气体组成和上式,求得本文条件下的 $C_1 = 114.94, t_1 = 31.99, C_2 = 4.962$ 和 $t_2 = 420.14$,把这些参数代入(6)式得能量沉积效率为 50%。

表 1 抽运腔设计参数表
Table 1 Parameters of cell

Length of cell /mm	300
Diameter of cell/mm	30
Total pressure /Pa	1.12×10^5
He partial pressure /Pa	8.838×10^4
Ar partial pressure /Pa	2.355×10^4
Xe concentration /%	0.063

表 2 各种堆功率条件下的抽运腔内能量沉积密度与激光输出功率估价

Table 2 Estimation of laser power and energy deposition in the cell at different reactor power

Reactor power /MW	Energy deposition /J/cm ³	Laser power /J
2	0.0002	0.0015
10	0.0012	0.0077
100	0.012	0.077
500	0.059	0.38
1000	0.12	0.77
2000	0.24	1.5
4300	0.51	3.3

把激光气体组成再代入(2)式和(4)式可求得激光器的本征效率。

在文献[2]中,我们推导了单位体积内的能量沉

积密度 A (单位为 W/cm^3) 与³He 分压 P^{He} (单位: Pa)、中子通量 φ [单位: $n/(s \cdot cm^2)$]、反应截面 σ (单位: cm^2) 和抽运腔内能量沉积效率 β 之间的函数关系式:

$$A = 32.41 \times P^{He} \times \sigma \times \varphi \times \beta \quad (6)$$

抽运腔的体积为 212 cm^3 。估算抽运腔内的能量沉积密度及激光装置输出的激光强度的结果列入表 2。

6 结 论

本文通过对核抽运激光机理的研究,提出了基于准分子的生成和解离的核抽运激光激励模型,深入讨论了介质温度(能量沉积)对本征效率的影响,并用文献的实验数据对理论模型进行了验证。此外,本文对抽运腔内的能量沉积及激光输出也进行了理论估算。这些工作为将来开展核抽运激光的实验工作奠定了基础。

参 考 文 献

- 1 Wang J. S., Jing C. Y., Cheng D. *et al.*. Studies on Energy Deposition in the Nuclear REactor Pumped ³He-Ar-Xe Gas Laser Cavity. Proc. of the 5th China-Russia International Conference on Laser Physics and Application, 2000(10), 74
- 2 万俊生,景春元,陈 达等.反应堆核抽运³He-Ar-Xe 激光气体腔内能量沉积数值模拟研究. 强激光与粒子束, 2001, 13(4): 314~317
- 3 Repetti T. E. Application of Reactor-Pumped Lasers to Power Beaming, Idaho National Engineering Laboratory, Information Report, EGG-PHY-9978, 1999(10)
- 4 万俊生,景春元等.反应堆核抽运激光 He-Ar-Xe 体系本征效率理论研究. 强激光与粒子束, 2001, 13(6): 1~5
- 5 Basov N. G., Danilychev V. A., Dudin A. Yu. *et al.*. *Sov. J. Quant. Electron.*, 1984, 14: 1158
- 6 Lawton S. A., Richards J. B., Newman L. A. *et al.*. *J. Appl. Phys.*, 1979, 50: 3888
- 7 Hebner G. A. *et al.*. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, 63(21): 2872
- 8 Hebner G. A., Hays G. N. *J. Appl. Phys.*, 1993, 74: 3673
- 9 万俊生,景春元,蒋飞军等.抽运腔参数对核抽运激光腔内能量沉积的影响. 试验与研究, 2001, 24(4): 79~88
- 10 赵柱民,万俊生等.脉冲堆上核抽运激光腔的物理设计. 试验与研究, 2001, 24(4): 89~93