

文章编号: 1001-4322(2001)06-0701-05

反应堆核泵浦激光 He-Ar-Xe 体系 泵浦效率理论研究

万俊生, 景春元, 陈 达, 王道华, 蒋飞军, 刘晶儒, 赵柱民, 赵学庆

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘 要: 系统地提出了 He-Ar-Xe 核泵浦激光泵浦效率的理论模型, 推导了泵浦效率公式。研究了激光泵浦效率与泵浦腔内气体总压力, He 和 Ar 分压, Xe 的含量之间的函数关系。并用前人的实验结果定性地对模型进行了验证, 拟合了泵浦效率函数参数, 探讨了各参数之间的关系及其对泵浦效率的影响, 为进一步的实验设计提供了理论依据。

关键词: 反应堆核泵浦激光; Xe 激光; 理论模型; 泵浦效率

中图分类号: TN 248.5 **文献标识码:** A

利用电子和核泵浦含 Xe 混合惰性气体的 1.73 μm 波长激光已证实可达 1% 至 4% 的激光泵浦效率^[1-9], 可制成高功率激光器。又由于 Xe 激光介质是由惰性气体组成的混合气体, 使用寿命长, 因此人们对它的研究较多。

核泵浦是一种很有发展前途的激光泵浦技术。它的主要工作原理是利用核反应堆产生的热中子在激光泵浦介质中的俘获效应, 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, 泵浦产生激光^[6-9]。由于核泵浦激光利用核能泵浦, 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, 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^[10]。

在文献[7, 8]中我们研究了核泵浦激光的能量沉积问题。本文将借鉴电子泵浦理论, 结合核泵浦激光的特性, 建立核泵浦激光 He-Ar-Xe 体系的理论模型, 与实验结果进行比较并拟合出泵浦效率关系式的参数, 为进一步的实验工作提供理论依据。

1 理论模型

由于激光气体为混合惰性气体, Xe 激光器的使用寿命长, 且波长一般在近红外区^[1, 2], 该类激光是一种很有发展前途的激光。它能激励波长从 1.73~3.65 μm 的激光。电子在 Xe 的 5d 能级与 6p 能级之间的跃迁发射波长为 1.75~3.51 μm 的光子, 在 7p 能级与 7s 能级之间的跃迁发射波长为 3.43 和 3.65 μm 的光子(见表 1 与图 1)。

在 He-Ar-Xe 和 Ar-Xe 气体激光体系中, 激光波长和激光泵浦效率对混合气体组成很敏感^[1], 当 He-Ar-Xe 和 Ar-Xe 混合气体中 Xe 的含量为 0.1% 左右时, 体系的泵浦效率最高^[2]。在 Ar-Xe 体系中,

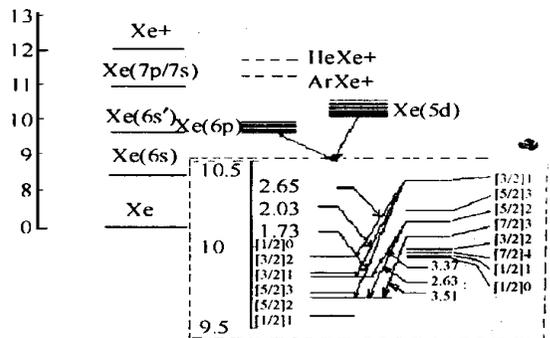


Fig 1 Schema of energy levels and electron transition of Xe
图 1 Xe 能级及电子跃迁简图, 图中放大部分为激光跃迁

收稿日期: 2001-04-02; 修订日期: 2001-06-08

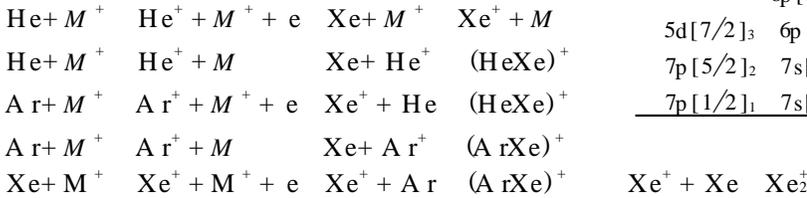
基金项目: 西北核技术研究所基金资助课题

作者简介: 万俊生(1963-), 男, 副研, 毕业于德国 Marburg 大学, 博士, 现从事核泵浦激光技术研究和加速器驱动的次临界系统的研究工作; 西安市 69-19 信箱。

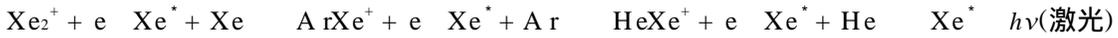


1. $73\mu\text{m}$ 的激光跃迁占 75% 以上, 然而当 Xe 的份额大于 10% 时, 激光淬灭。电子泵浦研究^[3,4]表明: Xe 气体激光体系中, 准分子的形成对 5d 能级上的粒子数反转起决定作用。

在核泵浦激光体系中, 核反应产物离子 M^+ 带着核反应能进入激光气体并与气体原子作用, 会发生一系列反应^[13], 其中对激光有直接贡献的主要反应有:



在 He-Ar-Xe 体系中, Xe_2^+ , ArXe^+ 和 HeXe^+ 三种准分子都可能对激光有贡献:



激发态 Xe^* 原子的产生与准分子数 (Xe_2^+ , ArXe^+ 和 HeXe^+) 成正比, 准分子 Xe_2^+ , ArXe^+ 和 HeXe^+ 的形成与构成该分子的气体原子 (气体分压) 和核反应产物在腔内的能量沉积成正比, 准分子的消失除与电子碰撞产生激发态的 Xe^* 外, 还会与激光体系中的其它粒子碰撞而消失, 后一部分的消失对激光无贡献。在 Xe^* 产生过程中, 如果与气体原子碰撞, 它还会重新结合成准分子或退激。

对于 $1.73\mu\text{m}$ 激光, 由准分子产生的单位体积内 $5d[3/2]_1$ 激发态原子 Xe^* 为

$$\left. \begin{array}{l} N_{\text{Xe}^* \text{Xe}_2^+} = K_{5d \text{Xe}_2^+} A (p^{\text{Xe}})^2 - K_{\text{Xe}_2^+ 5d} p A (p^{\text{Xe}})^2 \\ N_{\text{Xe}^* \text{ArXe}^+} = K_{5d \text{ArXe}^+} A p^{\text{Xe}} p^{\text{Ar}} - K_{\text{ArXe}^+ 5d} p A p^{\text{Xe}} p^{\text{Ar}} \\ N_{\text{Xe}^* \text{HeXe}^+} = K_{5d \text{HeXe}^+} A p^{\text{Xe}} p^{\text{He}} - K_{\text{HeXe}^+ 5d} p A p^{\text{Xe}} p^{\text{He}} \end{array} \right\} \quad (1)$$

式中: 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); $N_{\text{Xe}^* IJ^+}$ 是通过 IJ^+ 准分子结合和离解而产生的单位体积内 $5d[3/2]_1$ 激发态 Xe^* 原子数; $K_{5d IJ^+}$ 是通过 IJ^+ 准分子结合和离解而产生 $5d[3/2]_1$ 激发态 Xe^* 原子的泵浦系数, $K_{IJ^+ 5d}$ 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, 泵浦腔内电子对泵浦激光的贡献归入参数 $K_{5d IJ^+}$ 和 $K_{IJ^+ 5d}$ 中。当激光体系处于谐振平衡时, 即消失的 Xe^* 由式 (1) 产生而补充, 并根据 Lamb 理论^[11], 则可以推导出核泵浦激光的泵浦效率为

$$\epsilon = \frac{W}{A} = \{ K_{5d \text{HeXe}^+} p^{\text{He}} + K_{5d \text{ArXe}^+} p^{\text{Ar}} - p (p^{\text{Ar}} K_{\text{ArXe}^+ 5d} + p^{\text{He}} K_{\text{HeXe}^+ 5d}) \} F(C^{\text{Xe}}) \quad (2)$$

式中: $F(C^{\text{Xe}})$ 为激光介质中 Xe 含量 ($C^{\text{Xe}}(\%)$) 对激光的贡献。

2 泵浦效率函数参数 $F(C^{\text{Xe}})$

早期的研究^[1,5]支持了这样一种假设: 准分子 ArXe^+ 的解离直接导致 Ar-Xe 激光气体中 Xe 原子 $5d[3/2]_1$ (激光上能级) 能态上的粒子数反转, 激励激光。而准分子 Xe_2^+ 的解离导致 6p (激光下能级) 能态上的粒子数增多, 抑制激光, 甚至淬灭激光。这种假设解释了为何含 Xe 的惰性混合气体激光的泵浦效率高, 而当 Xe 的含量很高时激光又会淬灭。由推导过程可知, 当 Xe 含量低时, 激光泵浦效率应该随 Xe 的含量增加而提高。因此, 在保持其它参数不变的条件下, 当 Xe 含量适当时, 泵浦效率会达到峰值。图 2 的实验结果^[6]支持了这个结论。泵浦腔内总压力为 $1.037 \times 10^5 \text{Pa}$, 能量沉积密度为 $15 \text{W}/\text{cm}^3$, He 与 Ar 分压比为 8/1 时, 泵浦效率峰值出现在 Xe 含量为 0.1% ~ 0.8% 附近。实验数据拟合的曲线为

$$F(C^{\text{Xe}}) = 1.965 - 1.211 \log C^{\text{Xe}} - 0.504 (\log C^{\text{Xe}})^2 \quad (3)$$

式中: C^{Xe} 是 Xe 在激光气体中占的百分比 (%)。

表 1 Xe 的近红外激光光谱

Table 1 Laser spectrum of Xe

transition	wave length/ μm
5d[3/2] ₁ 6p[5/2] ₂	1.73
6p[3/2] ₁	2.03
6p[1/2] ₀	2.65
5d[5/2] ₃ 6p[5/2] ₃	2.48
5d[5/2] ₂ 6p[5/2] ₂	2.63
6p[3/2] ₁	3.37
5d[7/2] ₃ 6p[5/2] ₂	3.51
7p[5/2] ₂ 7s[3/2] ₁	3.43
7p[1/2] ₁ 7s[3/2] ₂	3.65

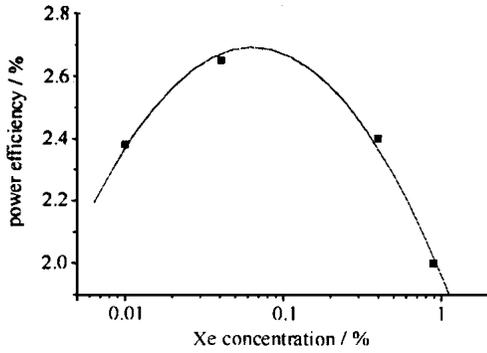


Fig 2 Relationship between power efficiency and Xe concentration

图 2 泵浦效率随 Xe 含量的变化^[6]

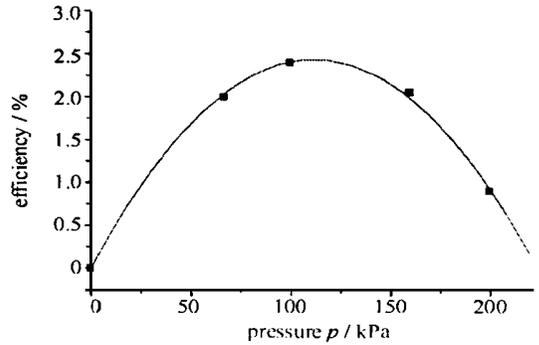


Fig 3 Relationship between power efficiency and total pressure in the cell

图 3 泵浦效率与腔内总压力关系^[6]

3 泵浦效率函数参数 $K_{5d}^{HeXe^+}$, $K_{5d}^{ArXe^+}$, $K_{HeXe^+ 5d}$ 和 $K_{ArXe^+ 5d}$

在腔内各分压比和 Xe 含量保持不变的情况下, 由式(2)可知, 激光泵浦效率应是总压力的二次函数。Law ton 等^[6]的实验结果证实了本文提出的理论模型, 在 Xe 含量占激光气体的 0.2%, 能量沉积密度为 $7.5W/cm^3$, He 与 Ar 分压之比为 8 比 1 时, 实验结果如图 3。图 3 的实验结果拟合的曲线为

$$\epsilon = 4.351 \times 10^{-5} p - 1.942 \times 10^{-10} p^2 \tag{4}$$

式(4)是泵浦效率与总压的关系式。在本文研究的体系中, Xe 份额很低的情况下, 生成 Xe_2^+ 量很少, 通过 Xe_2^+ 激励激光的几率很小, 可忽略不计。在 Xe 份额高的情况下, 虽然生成 Xe_2^+ 量较大, 通过 Xe_2^+ 的解离增加了部分 5d 能态上的粒子数, 但由于 Xe_2^+ 准分子的解离, 也使激光下能级 6p 上粒子数增加, 抑制本文研究的激光波长, 这两种因素相抵, 因此也可以忽略通过 Xe_2^+ 准分子的结合和解离对激励激光的贡献。当 Xe 量很小, $C^{Xe} \ll 1\%$ 时, $p^{Ar} + p^{He} = p_0$ 。结合式(4)与式(2)和式(3), 可得方程式

$$\frac{8}{9} K_{HeXe^+ 5d} + \frac{1}{9} K_{ArXe^+ 5d} = \frac{1.942 \times 10^{-10}}{F(0.2\%)} = 8.019 \times 10^{-11} \tag{5}$$

$$\left(\frac{8}{9} K_{5d}^{HeXe^+} + \frac{1}{9} K_{5d}^{ArXe^+} \right) = \frac{4.351 \times 10^{-5}}{F(0.2\%)} = 1.797 \times 10^{-5} \tag{6}$$

变化式(2)得

$$\frac{\epsilon}{F(0.2\%) p^{He}} = (K_{5d}^{HeXe^+} - p K_{HeXe^+ 5d}) + \frac{p^{Ar}}{p^{He}} (K_{5d}^{ArXe^+} - p K_{ArXe^+ 5d}) \tag{7}$$

由(7)式可知, $\epsilon/F(0.2\%) \times p^{He}$ 是 Ar 和 He 分压比的函数。当能量沉积密度为 $7.5W/cm^3$, Xe 含量为 0.2% 时, 实验结果如图 4。

对图 4 实验数据拟合的结果为

$$\epsilon/F(0.2\%) \times p^{He} = 7.726 \times 10^{-6} + 2.333 \times 10^{-5} p^{Ar}/p^{He} \tag{8}$$

比较式(12)与(11)得

$$K_{5d}^{ArXe^+} - 1.037 \times 10^5 K_{ArXe^+ 5d} = 2.333 \times 10^{-5} \tag{9}$$

$$K_{5d}^{HeXe^+} - 1.037 \times 10^5 K_{HeXe^+ 5d} = 7.726 \times 10^{-6} \tag{10}$$

我们知道, 通过 $ArXe^+$ 准分子的结合和解离而产生的 $5d[3/2]_1$ 能态的 Xe^* 原子与通过 $HeXe^+$ 准分子的结合和解离而产生的 Xe^* 原子再与系统中的气体原子碰撞而退激的几率相同, 因此可令 $K = K_{HeXe^+ 5d}/K_{5d}^{HeXe^+} = K_{ArXe^+ 5d}/K_{5d}^{ArXe^+} =$ 常数, 由这个未知常数关系式和方程(5), (6), (9)和(10)组成的方程组可解出方程中的四个未知数及未知常数 K , 泵浦效率函数为

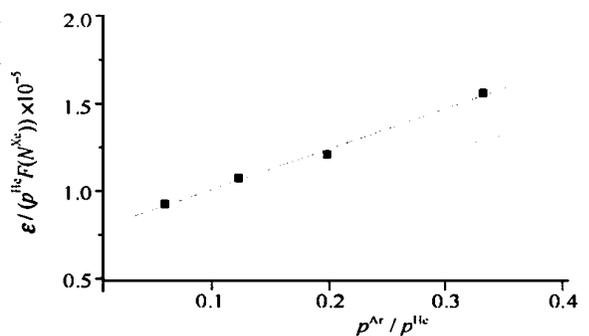


Fig 4 Relationship between $\epsilon/F(0.2\%) \times p^{He}$ and p^{Ar}/p^{He}

图 4 $\epsilon/F(0.2\%) \times p^{He}$ 与 p^{Ar}/p^{He} 的函数关系式

数据来自文献^[6]中图 2

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

由上面的结果可见, $K_{5d}^{\text{ArXe}^+}$ 与 $K_{5d}^{\text{HeXe}^+}$ 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^[12] 研究电子泵浦 He-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 $6p[3/2]_1$ 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 $6p[5/2]_2$ 能级容易得多^[1]。而 Lawton 等^[5] 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 原子很可能起到了抽空 $6p[5/2]_2$ 能态上粒子数的作用, 使 $5d[3/2]_1$ 能级上粒子反转数相对提高的结果, 在泵浦效率关系式中表现为 $K_{5d}^{\text{ArXe}^+}$ 值大。

4 最佳效率时的气体压力及 Xe 含量

式(11)对 $\log C^{\text{Xe}}$ 微分并使其等于 0, 则可求得

$$N^{\text{Xe}} = 10^{-1.211/1.008} = 0.063\% \quad (12)$$

在泵浦腔内总压, He 与 Ar 分压一定的情况下, 利用式(12)人们可以设计要获得最大泵浦效率时应该给泵浦腔内充多少 Xe 气体。

式(11)对总压力 p 微分并使其等于 0, 则求得

$$p = (1.438 + 4.342 p^{\text{Ar}}/p^{\text{He}}) / 2(6.416 \times 10^{-6} + 1.937 \times 10^{-5} p^{\text{Ar}}/p^{\text{He}}) \quad (13)$$

当泵浦腔内 Ar 与 He 分压比 ($p^{\text{Ar}}/p^{\text{He}}$) 一定时, 利用式(13)可求得最大泵浦效率时的泵浦腔内总压力应该为多少。

本文提出的理论模型适用性强, 式(1), (2)不但适用于本文研究的核泵浦激光 He-Ar-Xe 体系, 作适当的调整, 它们也适用于其它气体体系。式(11), (12)和(13)可为实验优化设计提供理论依据。

5 结 论

本文通过对核泵浦激光机理的研究, 系统地提出了基于准分子的生成和解离的核泵浦激光激励模型, 推导了泵浦效率公式, 并用文献的实验数据定性地对理论模型进行了验证。结果表明, 本文建立的理论模型基本合理。

参考文献:

- [1] Ohwa M, Moratz T J, Kushner M J. Excitation mechanisms of the electron-beam-pumped atomic xenon ($5d-6p$) laser in Ar/Xe mixture[J]. *J Appl Phys*, 1989, **66**(11): 5131—5145.
- [2] Alford J, Hays G N. Nuclear-reactor-pumped laser research at Sandia National Laboratories[J]. *J Appl Phys*, 1989, **65**(10): 3760—3765.
- [3] Peters P J M, Mei Q C, Wittenan E J. Pressure-dependent optical delay time measurements in a coaxial electron beam pumped Ar/Xe laser[J]. *Appl Phys Lett*, 1989, **54**(3): 193—195.
- [4] Silvest W T, Szeto L H, Wood H O R. Recombination lasers in expanding CO_2 laser-produced plasmas of argon krypton, and xenon[J]. *Appl Phys Lett*, 1977, **31**(5): 334—337.
- [5] Lawton S A, Richards J B, Newman L A, et al. The high-pressure neutral infrared xenon laser[J]. *J Appl Phys*, 1979, **50**(6): 3888—3898.
- [6] Hebner G A, Hays G N. Laser efficiency and gain of the $1.73\mu\text{m}$ atomic xenon laser at high He/Ar buffer gas ratios[J]. *J Appl Phys*, 1993, **74**(6): 3673—3679.
- [7] Wan J S, Jing C Y, Chen D, et al. Studies on energy deposition in the nuclear reactor pumped ^3He -Ar-Xe gas laser cavity[A]. Proc of 5th China-Russia International Conference on Laser Physics and Application[C]. Russia, 2000. 74.
- [8] 万俊生, 景春元, 陈 达, 等. 反应堆核泵浦 ^3He -Ar-Xe 激光气体腔内能量沉积数值模拟研究[J]. *强激光与粒子束*, 2001, **13**(4): 413—417. (Wan J S, Jing C Y, Chen D, et al. Studies on power deposition in the nuclear reactor pumped ^3He -Ar-Xe gas laser cavity. *High power laser and particle beams*, 2001, **13**(4): 413—417.)
- [9] Hebner G A, Hays G N. Fission-fragment excited xenon/rare gas mixtures[J]. *J Appl Phys*, 1993, **73**(8): 3614—3626.

- [10] Repetti Thomas E. Application of reactor-pumped lasers to power beaming [R]. Idaho National Engineering Laboratory, Information Report, EGG-PHY-9978, 1999.
- [11] Lamb W E. Theory of optical masers[J]. *Phys Rev A*, 1964, **134**(3): 1429—1438.
- [12] Basov N G, Danilychev V A, Dudin A Y, et al. Electronization IR laser utilizing xenon atoms[J]. *Sov J Quantum Electron*, 1984, **14**(9): 1158—1173.
- [13] 屠琴芬, 张建泉, 高占鹏, 等. 强流电子束泵浦 XeCl 准分子激光动力学模型[J]. *强激光与粒子束*, 1991, **3**(3): 356—366 (Tu S F, Zhang J Q, Gao Z P, et al. Kinetic model of electron-beam-pumped XeCl lasers. *High power laser and particle beams*, 1991, **3**(3): 356—366).

Studies on the power efficiency for the He-Ar-Xe system of nuclear reactor pumped laser

WAN Jun-sheng, JING Chun-yuan, CHEN Da, WANG Dao-hua,
JIANG Fei-jun, LIU Jing-ru, ZHAO Zhu-ming, ZHAO Xue-qing

(Northwest Institute of Nuclear Technology, P. O. Box 69-19, Xi'an 710024, China)

Abstract The nuclear reactor pumped lasing model (NRPLM) was proposed and the power efficiency function was derived in the present work. The power efficiency was studied as a function of cell pressure, xenon concentration, He and Ar fractions. The lasing model was checked using experimental results. The parameters of the efficiency function were obtained. The relationship between the parameters and their influence on the efficiency were explored. The present work will benefit the future experimental designs.

Key words nuclear reactor pumped laser; Xe laser; theoretic model; power efficiency

第十五届全国激光学术会议在武汉召开

2001年9月21~24日第十五届全国激光学术会议在武汉召开, 本次会议由中国光学学会、中国电子学会、中国物理学会、中国兵工学会、中国仪器仪表学会、华中科技大学激光技术国家重点实验室、武汉·中国光谷建设领导小组办公室、湖北省激光学会、湖北省电子学会联合举办。大会代表来自全国从事激光与光电子的科研人员共300余人, 其中包括9位院士。大会邀请了贺贤土院士等作了特邀报告, 本次大会收到来稿总数近400篇, 在大会上分口头报告和张贴报告进行了交流。第十五届全国激光学术会议是新世纪的第一次盛会, 总结汇报了二十世纪我国激光与光电子领域的最新成果, 展望了二十一世纪激光与光电子领域的发展方向, 为我国激光与光电子新老学者提供了探讨新思想、交流新技术的讲台, 促进了本领域的科技创新和成果转化。本次会议受到全国激光与光电子学术界的广泛重视和支持, 我国激光领域内的《强激光与粒子束》杂志社、《中国激光》杂志社、《激光与光电子学进展》杂志社都派代表参加了这次盛会。 (《强》刊编辑部 汪道友)