

用无极脉冲放电管泵浦兆瓦级 碘原子激光放大器的建议

张 遵 彦

(中国科学院物理研究所)

提 要

以脉冲无极放电作激光泵浦源,可提供高峰值功率、高紫外分量、高光学耦合效率、长使用寿命,并有良好的再现性。这一特点可望用于高功率碘原子激光器。本文提出一个以此种方式泵浦的兆瓦级、直径 20 厘米的激光放大器方案,论述了此种泵浦系统的特点。

激光聚变研究的推动使碘原子激光器达到单束 10^3 焦耳、1 毫微秒的水平^[1,2]。由于是气体介质和近红外的激光波长(1.3 微米),可以使用优质的光学元件,大功率碘激光器的光学质量极好^[3,4]。焦斑大小与衍射极限只差 2.5 倍,功率密度可达 10^{18} 瓦/厘米²,这对于强光研究也是很重要的。

碘原子激光器一般都是用光分解 C_3F_7I 产生激发态的碘原子,吸收带中心 2730\AA ,宽度 310\AA ,产生红外光子的量子效率 ~ 1 ^[5]。短脉冲闪光灯在此紫外吸收带的能量转换效率是 8%。大功率碘激光器的最后一级放大器,一般充 C_3F_7I 约 10 托以内,加缓冲气体(Ar、SF₆ 等)一个气压左右。这时激发态的原子经过 10 微秒将有 10% 的衰减。由于有核自旋($I=5/2$),对于毫微秒脉冲,只有激发态原子总数的 $7/12$ 参加激光跃迁。碘原子是储存型介质,但是由于光学元件的非线性破坏,输出限制在 10 焦耳/厘米² 以下。末级放大器一般都很长。由于激发寿命不长所以用短脉冲闪光灯,如 Asterix III 用 64 个 5 托的氙灯^[1],泵浦时间 20 微秒。苏联物理研究所

用腔内爆炸导线^[6],时间 50 微秒。由于紫外光泵浦效率还不高,大功率碘激光器只达到 0.15% 的效率。

同轴型的无极脉冲放电光源适合于高功率、短脉冲、紫外光激励的激光介质。我们^[6]和美国^[8]以及后来苏联^[9,10]的经验都表明,电能转换到放电管的效率 η 可以达到 70~80%。在紫外区,低气压的氩比氙发光还强。还有人用双脉冲,即加预电离放电后,总发光量增加一个量级^[11]。无极放电等离子体的亮温度为 15000~25000K,电阻率 ~ 0.02 欧姆·厘米。这些特点很适合碘原子激光器。我

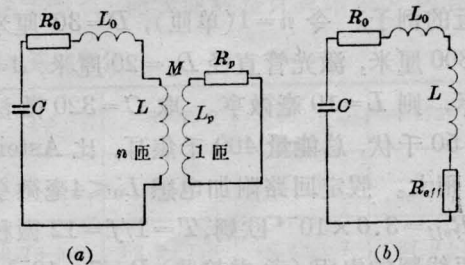


图 1 无极放电回路(a)及等效回路(b)

$$L_{\Sigma} = L + L_C; R_{\Sigma} = R_{eff} + R_0; T = 2\pi\sqrt{L_{\Sigma}C}$$

收稿日期: 1979 年 5 月 17 日。

们认为无极放电管的电-光转换效率, 与有电极的放电一样, 应当主要取决于放电的平均功率密度。为了检验能量转换效率, С. И. Андреев 等从实验结果导出一个放电的等效回路(图1)中等效电阻 R_{eff} 的公式^[10], 功率密度的范围是 0.05~1.7 兆瓦/厘米³。

$$R_{eff} = 1.07 \times 10^{-3} \left(\frac{n^3 \Delta D^4}{l^2} \right) \times f^2 \left(\frac{U}{L_{\Sigma}} \right) \times \frac{1}{\left[1 + 3 \times 10^{-4} \left(\frac{n \Delta D^2}{l} f \frac{U}{L_{\Sigma}} \right)^2 \right]}$$

其中 n 是初级线圈的匝数, Δ 是同轴放电管间厚度(厘米), D 是放电管直径(厘米), l 是线圈长度(厘米), f 是放电回路的频率(兆赫), U 是电容器 C 的充电电压(伏), L_{Σ} 是回路的总电感(毫微亨)。我们注意到 L_{Σ} 当中主要部分是初级线圈的电感 L , 而

$$L = \frac{\mu_0 \pi D^2 n^2}{4l}$$

其中 μ_0 是真空导磁系数。 L 与 l 成反比, 这对于长器件是很有利的, 长度大阻抗减小, 用一个放电管就可以保证短脉冲的泵浦。假如单位长度须要的供能量 $CU_2/2l$ 不变, 则 $1/f = 2\pi \sqrt{L_{\Sigma} C} \sim$ 常数。为了脉冲宽度的匹配, 我们可以改变匝数 n , 当 D 很大时, 我们可以使 $n < 1$, 即倍压方式, 我们已有办法制造结构紧凑的单层螺旋管, n 仅由螺旋角决定。

为了比较, 我们采取尺寸与 Asterix III 相近的例子。令 $n=1$ (单匝), $D=30$ 厘米, $l=800$ 厘米, 激光管直径 $D_2=20$ 厘米, $\Delta=2$ 厘米, 则 $L=10$ 毫微亨。取 $C=320$ 微法, $U=50$ 千伏, 总能量 400 千焦耳, 比 Asterix III 稍大。假定回路附加电感 $L_0 \leq 4$ 毫微亨, 则 $R_{eff} = 3.6 \times 10^{-4}$ 欧姆, $T=1/f=12$ 微秒。单匝线圈的电阻(考虑趋肤) $R=7 \times 10^{-5}$ 欧姆, 再假定初级回路电阻 $R_0 \leq 1.8 \times 10^{-4}$ 欧姆。 L_0 与 R_0 要求的条件应在回路设计时尽量满足, 这时放电管的能量转换效率

$$\eta = R_{eff} / (R_{eff} + R_0) \sim 67\%$$

回路的功率衰减时间

$$\tau = (L + L_0) / (R_{eff} + R_0) \sim 30 \text{ 微秒}$$

放电管内的功率密度

$$w = (CU^2/2) \times \eta / \tau (\pi D \Delta l) \sim 0.13 \text{ 兆瓦/厘米}^3$$

由于体积大, 所以 w 并不算高。若令聚光的耦合效率为 $\eta_{光}$, 光谱匹配效率为 $\eta_{光谱}$, 则腔中能贮存的激光能量

$$E = (CU^2/2) \eta (7/12) \eta_{光} \times \eta_{光谱} (\lambda_{吸收} / \lambda_{激光})^3$$

最后一个因子是由于 Stokes 损失引起的, 即吸收与发射光的波长比。共轴泵浦 $\eta_{光} \geq 0.8$, $\eta_{光谱}$ 按闪光灯同样估计(0.08), 则 $E \sim 3.6$ 千焦耳。如能在毫微秒时间内引出其中一部分, 激光功率可达兆瓦级。

放电管中环向电压 $E_Q \approx U/\pi D \sim 550$ 伏/厘米, 在几个托时可以放电。为了使工作稳定和增加光输出, 我们可以加预电离脉冲。如有必要还可以在初级电流最大时用 Crowbar 开关将其短路, 电容器可以避免反复充电。

由于激光是磁偶极跃迁, 放电与线圈电流的磁场不均匀会使增益降低, 这一点对于放大器是有利的, 可以抑制寄生振荡。只有电流过 0 时相当于一次 Q 开关。此外, 光泵引起气体中的激波会破坏介质的均匀性, 但激波是向心的, 速度 3~5 毫米/10 微秒^[1], 对于 $D=30$ 厘米, $\tau=30$ 微秒扰动只限于表面, 这个问题是 D 愈大愈有利。

无极放电管结构简单, 照明均匀, 如用激光管兼做放电管内壁, 可以节省一根石英管。闪光灯在高电压、短脉冲条件下使用寿命只有 10^3 次, 没有电极的放电管使用寿命长, 例如放电 6×10^4 次没有什么变化^[13]。无极放电对于回路要求高压、低感电容、低阻抗传输等条件, 但是在短脉冲情况下, 有电极的放电也同样有这些要求, 只是无极放电要求多个开关并联, 而有电极的放电要求多个灯并联。无极放电泵浦如能改善光谱成分从而提高效率

率,在未来的激光聚变中应用是有前途的。当前就可以通过较小规模的实验来检验上述的设想。

参 考 文 献

- [1] K. Hohla; "High power laser and applications", Springer Series in Optical Science, ed. by K. L. Kompa, 124.
- [2] K. Hohla et al.; "Laser interactions and related plasma phenomena", Vol. 4A, 1977, 97.
- [3] R. E. Palmer et al.; *Opt. and Quant. Electr.*, 1979, 11, No. 1, 61.
- [4] S. Witkowski; Topical meeting on Inertial Confinement Fusion, Technical Digest paper ThA3-1, 1978.
- [5] K. Hohla et al.; Handbook of Chemical Lasers, 1976, 667.
- [6] В. А. Катулин и др.; *Кван. электр.*, 1976, 3, 1829.
- [7] 张遵达, 叶茂福:《物理学报》, 1966, 22, 174.
- [8] R. G. Buser et al.; *J. Appl. Phys.*, 1967, 37, 28.
- [9] С. И. Андреев и др.; *ЖТФ*, 1967, 37, 1252.
- [10] С. И. Андреев и др.; *ЖТФ*, 1969, 39, 1032.
- [11] A. Parayanou et al.; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1967, QE-3, 227.
- [12] W. T. Haswell et al.; *Proc. IEEE*, 1964, 52, 93.

Proposal for use of electrodeless discharges as optical pumping for an atomic iodine laser amplifier of TW order

Chang Zunkui

(Institute of Physics, Academia Sinica)

Abstract

Pulsed electrodeless discharges used as laser pumping provide high peak power, high UV content, high optical coupling efficiency, long life-time and good reproducibility. These unique features seem very promising for high power atomic iodine lasers. A Tw order laser amplifier of 20cm diameter and 8 m long pumped by this scheme is proposed. The characteristics of such pumping system are discussed.

简 讯

铜离子空心阴极紫外 2600Å 激光器研制成功

美国 G. J. Collins 等人于 1976 年首先研制成功铜离子空心阴极紫外 (2500Å 区) 激光器, 它在激光化学、生物、医学、泵浦染料激光等许多领域有着重要的应用价值。

CuII 2600Å 激光的激励机理是电荷交换。氖作为缓冲气体, 将氖离子的电离能转换为铜离子的激发能。由放电溅射产生适当的铜蒸气压力。激光器结构由钨棒阳极和无氧铜棒阴极组成。铜棒上开有 2 毫米宽 6 毫米深的矩形槽作为放电通道并且开有水冷直孔, 铜棒长 60 公分, 等长的钨棒平行地放置在阴极上面, 间隙约 5 毫米。铜棒两端和外表面都

用石英材料绝缘, 使得放电能量比较集中于铜槽中, 以提高有效电流密度。

激励系统由 1~5 安培的直流电源和脉宽 200 微秒、重复频率 30 赫芝、脉冲电流 50 安培的脉冲电源供给。激光反射镜由一块反射率为 99.7% 的平面镜和一块反射率为 98% 的球面镜 ($R=3$ 米) 组成。在氖气压 8~15 托范围内观察到激光输出, 激光可以方便地用普通日光灯的荧光粉显示。进一步工作在继续中。

(复旦大学物理系激光物理、
光学实验室激光器件组)