

钕玻璃放大器氙灯泵浦的优化设计*

张 华 高艳霞 范滇元

(中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理国家实验室, 上海 201800)

摘 要 建立了氙灯辐射光谱、求解感容(LC)供电网络电路和研究泵浦动力学过程中粒子数反转的模拟计算程序,并根据国内外的实验和计算结果进行了校核。氙灯单位侧面积上的输入功率比电流密度能更好地描述氙灯的工作特性。计算结果还表明:当单位侧面积上的输入功率增加时氙灯的光谱效率下降。在似稳态条件下当输入功率不变时,不同直径的氙灯在泵浦区域内的辐射光谱和光谱效率几乎不变;电流密度不变时,氙灯的光谱效率和电-光转换效率随直径的增大而减小;泵浦宽度相同时,梯形泵浦的峰值电流比单级感容网络小,具有较高的光效;泵浦形状相同时,适当减小泵浦的宽度可提高泵浦效率,脉冲宽度减小 10%,泵浦效率提高 5%,与实验结果是一致的。

关键词 辐射光谱, 氙灯, 钕玻璃放大器。

1 引 言

用于惯性约束聚变的钕玻璃放大器要求泵浦源具有比较高的效率和能量密度。在氙灯对钕玻璃的泵浦过程中,存在着两个相互竞争的过程:一方面钕玻璃吸收泵浦能量使得上能级的反转粒子数增加,另一方面自发辐射使得反转粒子数减小。上能级的储能效率与光泵脉冲宽度、形状和钕玻璃的荧光寿命有密切的关系,一般情况下,储能效率对泵浦脉冲的宽度依赖是比较敏感的,减小氙灯发光时间有利于提高储能效率。但是,光能量和氙灯直径一定时发光时间越短,单位侧面积上的输入功率就越大,氙灯的光谱效率降低。而氙灯的发光波形、光谱分布取决于供电脉冲电流的时间波形、大小和脉宽。可以通过增大氙灯直径、改变泵浦脉冲形状等方法来减小单位侧面积上的输入功率,优化氙灯的辐射光谱。本文建立了氙灯辐射光谱、求解感容供电网络电路和研究泵浦动力学过程中粒子数反转的模拟计算程序,并根据国内外的实验和计算结果进行了校核。与以往的模型相比,本模型具有以下特点:

1) 物理模型精确化。首次考虑了对时间积分的氙灯光谱效率,由于氙灯在工作过程中电流随时间变化,辐射光谱也随时间变化,因此总的光谱效率必须是对时间的积分。氙灯的绝对辐射光谱强度可以与实验结果比较,并能很好地吻合;同时用单位侧面积上的输入功率来描述氙灯的工作特性,比用电流密度更接近于氙灯工作的实际情况。

2) 研究泵浦动力学的模拟具有多种数据输入方式,可以研究理论计算和实验测量的电

* 国家高技术 863-416 主题资助项目。

收稿日期: 1997-11-06; 收到修改稿日期: 1997-12-30

流波形、灯光波形等不同条件下反转粒子数的变化规律。

2 氙灯辐射光谱

氙灯的辐射光谱对钨玻璃的吸收效率具有重要的影响。本文根据文献[1]建立了完整的氙灯辐射光谱模拟计算程序,并根据国外的实验和计算结果进行了校核。根据 Trenholme-Emmett 理论^[2],在似稳态条件下氙灯的辐射光谱取决于电流密度、内径和充气压,认为氙灯的辐射是充满氙灯内径的均匀加热等离子体的辐射,氙灯等离子体用温度 T 和与波长有关的等离子体吸收辐射系数来描述。在非稳态条件下,也可用这个模型来描述氙灯的瞬时辐射特性。根据基尔霍夫定律,氙灯的辐射光谱强度为

$$M(T, \lambda) = \{1 - \exp[-\alpha(\lambda)l]\} M_B(T, \lambda) \quad (1)$$

式中 l 为光线所经历的等离子体长度, $M_B(T, \lambda)$ 为普朗克黑体辐射函数:

$$M_B(\lambda, T) = \frac{k}{\lambda^3} \frac{1}{\exp(hc/\lambda kT) - 1} \quad (2)$$

等离子体的温度 $T(K)$ 可表示成下面形式:

$$T = 9300J^{0.18} d^{0.092} p^{-0.017} \quad (3)$$

式中 J 、 d 、 p 分别为电流密度(kA/cm^2)、内径(cm)和充气压(133.3Pa),等离子体的吸收辐射系数是两个展宽的高斯线型连续谱与 20 个洛仑兹线型分裂谱的和^[1]。当等离子体的温度和吸收辐射系数确定之后,在(1)式中对所有辐射角求平均值得到光谱辐射强度分布:

$$M(\lambda) = M_B(T, \lambda) F[\alpha(\lambda) d] \quad (4)$$

式中 $F[\alpha(\lambda) d]$ 为角度平均的辐射系数,可以用 Trenholme-Emmett 多项式表达式计算^[1]。在 $(0.4 \sim 1.0) \mu\text{m}$ 的泵浦区域内,运用(4)式计算得到的辐射光谱分布与实验结果符合得很好。图 1(a)给出了 1.5cm 直径氙灯在 $20.1\text{ kW}/\text{cm}^2$ 输入功率下氙灯的辐射光谱强度的计算结果与实验的比较,图 1(b)是 4.2cm 直径氙灯在 $19\text{ kW}/\text{cm}^2$ 输入功率下氙灯的辐射光谱强度的计算结果。可见不同直径的氙灯在输入功率相同的情况下,辐射光谱强度分布是相近的。

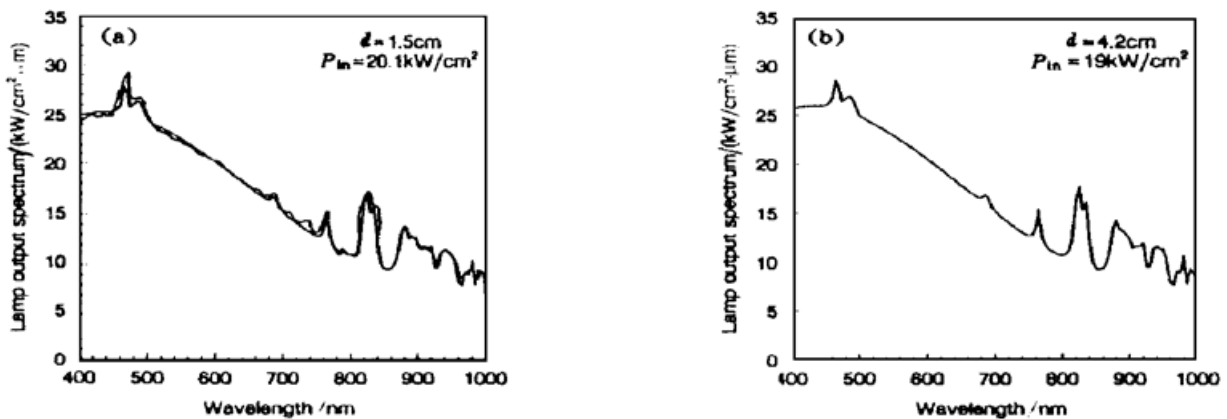


Fig. 1 (a) Xe flashlamp spectra intensity in pump region showing excellent agreement of model prediction with measurement for 1.5-cm-bore, Xe fill pressure= 40 kPa, current density= 1.36 kA/cm^2 , and so $P_{in} = 20.1\text{ kW}/\text{cm}^2$, (b) Xe lamp spectrum calculated (for 4.2-cm-bore, Xe fill pressure= 13.3 kPa, current density= 0.83 kA/cm^2 , $P_{in} = 19\text{ kW}/\text{cm}^2$) is nearly identical with Xe lamp (for 1.5-cm-bore) at equal input power power per unit area 这里用氙灯单位侧面积上的输入电功率 P_{in} (kW/cm^2) 来描述氙灯的工作状态, P_{in} 的值

由下式计算^[1]

$$P_{in} = 2.81 \exp [1.48 \ln (J) + 0.90 \ln (d) + 0.20 \ln (p) + 0.50 \ln (J) \ln (p)] \quad (5)$$

氙灯在泵浦区域内总的辐射功率等于光谱强度的积分和, 紫外区域和红外区域的辐射功率 (kW/cm^2) 可分别用下面的公式近似计算

$$P_{UV} = 0.174J^{2.07}d^{1.31}p^{0.2} \quad (6)$$

$$P_{IR} = 0.958 \exp [1.11 \ln (J) + 0.094 \ln^2(J) + 0.6 \ln (d) + 0.08 \ln (p)] \quad (7)$$

实验测量了 N_{21} 钽玻璃的吸收光谱, 5 个吸收带的波长范围为 500 nm~ 540 nm, 560 nm~ 600 nm, 720 nm~ 760 nm, 780 nm~ 820 nm, 860 nm~ 890 nm。将处于钽玻璃 5 个吸收带内的光谱功率与输入电功率之比定义为氙灯的瞬时光谱效率。本文计算了 1.5 cm 和 4.2 cm 两种直径氙灯的光谱效率与输入功率的依赖关系, 图 2 给出了计算结果, 图 2(a) 是光谱效率, 图 2(b) 是三个光谱区域内的权重比, 图中的点是文献[1, 3]中的实验结果。当输入功率增大时, 氙灯的光谱出现紫移, 光谱效率下降, 而且 4.2 cm 直径氙灯的光谱效率比 1.5 cm 直径氙灯略高, 这是因为 4.2 cm 直径氙灯的电流密度略小。

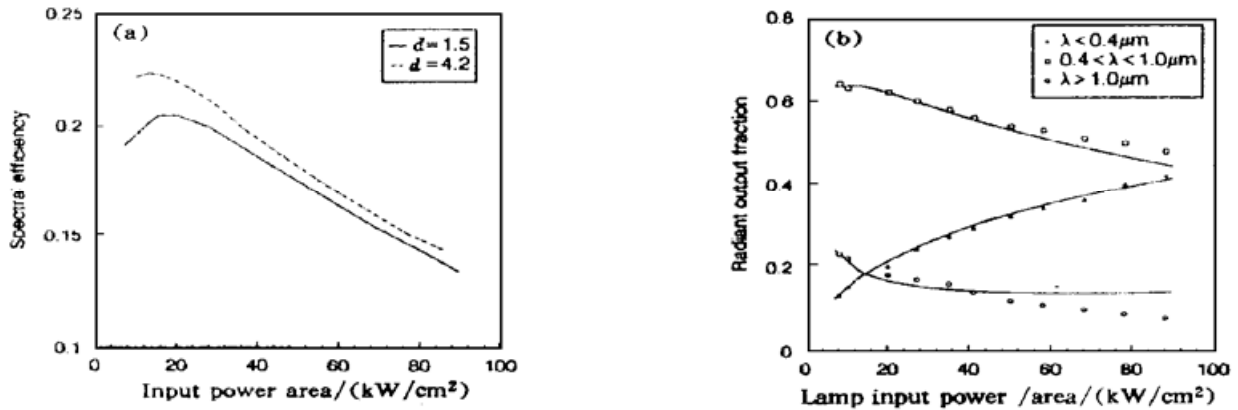


Fig. 2 (a) Calculated instantaneous spectral efficiency for 1.5 and 4.2 cm bore Xe flashlamp versus input electrical power loading per unit wall area, (b) Calculated and measured fraction of the instantaneous output radiation of 1.5 cm-bore Xe lamp lying in UV, pump and IR regions versus input power per unit area

在以前的研究中大多用电流密度作为描述氙灯工作特性的参数, 对应于单位体积内的输入功率, 把氙灯等离子体当作光性薄来处理。本文中用氙灯单位侧面积上的输入电功率作为描述氙灯工作特性的参数, 把氙灯等离子体当作光性厚来处理, 实际上氙灯等离子体的发光更接近于光性厚, 在某些条件和波长下甚至可以看到是灰体辐射。图 3 给出了直径为 1.5 cm 的氙灯在峰值输入功率为 $20.1 \text{ kW}/\text{cm}^2$ 时等离子体的吸收辐射系数, 相应的氙灯工作比为 $f_x = 0.1$, 曲线(a)对应于连续谱, 曲线(b)对应于线状谱。可见在氙灯的正常工作点 ($f_x = 0.2$) 等离子体的吸收辐射系数是较大的, 可以作为光性厚来处理。另外, 不同直径的氙灯即使在工作在相同电流密度下, 其发光特性也有很大的差异, 图 4 是在 $2230 \text{ kA}/\text{cm}^2$ 电流密度下 4 种不同直径氙灯的辐射光谱分布。当氙灯直径增大时总光谱辐射能量增加, 但光谱紫移。将氙灯所有发射光谱的总功率与输入电功率的比值定义为辐射效率(或电-光转换效率)。表 1 给出了在相同电流密度下 5 种直径氙灯的瞬时光谱效率和辐射效率。可见, 氙灯的光谱效率和电-光转换效率随半径增大都减小。

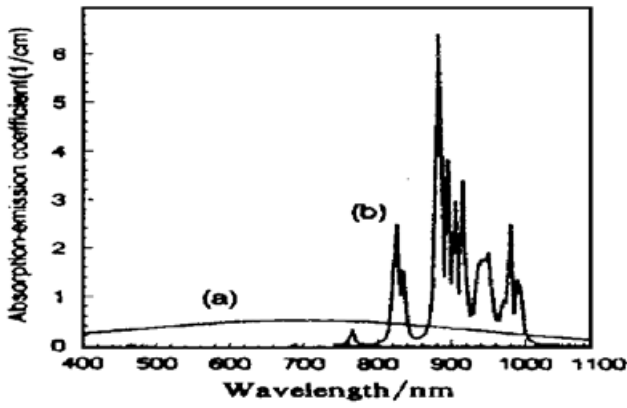


Fig. 3 Xenon flashlamp absorption-emission coefficient predicted by the model (bore diameter is 1.5 cm, $P_{in} = 20.1 \text{ kW/cm}^2$). Curve (a) gives the continuum absorption and curve (b) gives the discrete line component

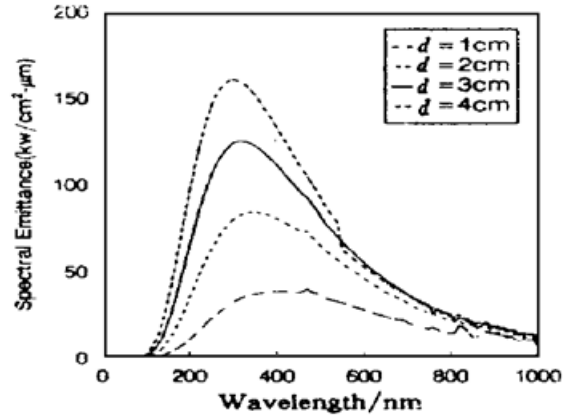


Fig. 4 Calculated absolute output spectral intensity vs wavelength produced by 1.0, 2.0, 3.0 and 4.0-cm-bore Xe flashlamp at the same current density (2215 A/cm^2)

Table 1. Instantaneous spectral efficiency and radiant efficiency of flashlamps with different bore diameters in the case of 2230 kA/cm^2

lamp diameter /cm	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
spectral efficiency /%	21.1	16.7	13.8	11.5	9.2
radiant efficiency /%	83.9	80.1	74.6	67.7	62.6

3 感容供电电路的电流时间波形和功率时间波形

感容成形网络电路的电流时间波形可以通过解完整的电路方程组得到。单级感容电路的放电特性可以由阻尼系数 α 来描述:

$$\alpha = K_0 / (V \sqrt{L/C})^{1/2} \tag{8}$$

式中 $K_0 = k_1 S/d$ 为氙灯等离子体的电阻系数, S 为指每一放电回路中串联灯的总弧长, d 为氙灯直径。在临界阻尼条件下, 对单级感容电路放电脉冲宽度(定义为底宽度)

$$T = 3.5 \sqrt{LC} \tag{9}$$

氙灯的工作比(负载系数)(定义为输入氙灯的能量与氙灯单发爆炸能量的比值)

$$f_x = CV^2 / [2BSd(LC)^{1/2}] \tag{10}$$

式中 B 为氙灯的爆炸系数, $B = 20$ 。在放大器的设计中 f_x 的取值范围为: 0.2~ 0.3。

图 5 给出了神光装置上 $\phi 100 \text{ mm}$ 片状放大器的在不同电感下的氙灯电流波形和灯光波形。图 5(a) 是电流波形, 图中的实线和点分别是电感为 $450 \mu\text{H}$ 时的计算结果和实验测量结果, 实验结果与理论计算结果是一致的, 二者之间的微小差异是由于在计算中没有考虑电路的分布电感和氙灯在放电过程中等离子体直径随时间的变化^[4]。本文将进一步研究大口径氙灯在放电过程中等离子体直径随时间的变化规律。虚线是电感为 $300 \mu\text{H}$ 的计算结果, 当电路的电感减小时泵浦脉冲宽度减小, 峰值电流增大。图 5(b) 是理论计算的输入功率和实验测量的灯光波形。图中的实线和点分别是电感为时, 理论计算的输入功率和实验测量的灯光波形, 计算的输入功率与测量的灯光波形之间存在时间延迟, 表明氙灯等离子体的辐射需要一个时间响应过程。虚线是电感为 $300 \mu\text{H}$ 时输入功率的计算结果。

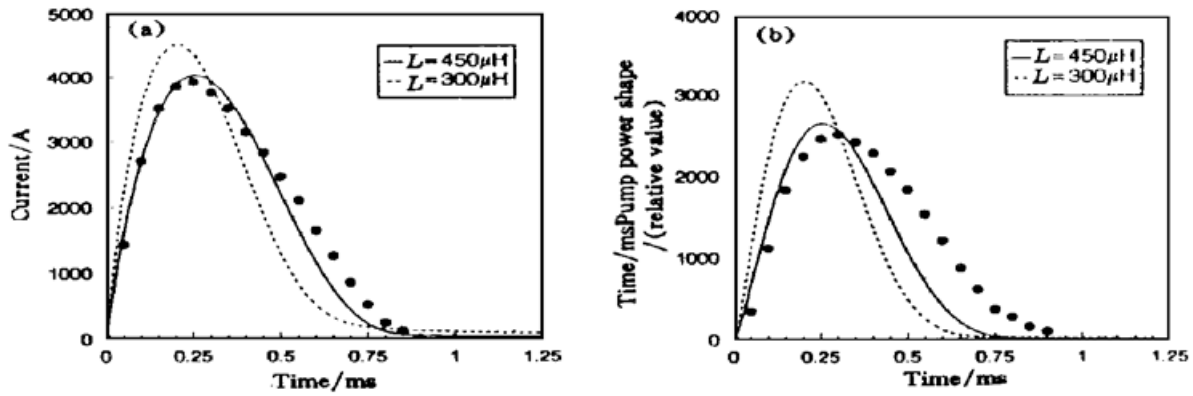


Fig. 5 The calculated and experimental current pulse shape (a) and pump power shape (b) for D1002 Xe flashlamp of Shengguang Facility, the circuit parameters are $L = 450 \mu\text{H}$, $C = 96 \mu\text{F}$, $V = 20 \text{ kV}$ and $R = 0.028\Omega$. The calculated result is also shown when $L = 300 \mu\text{H}$

4 泵浦的动力学过程

在氙灯对钕玻璃的泵浦过程中，基态和亚稳态的粒子数变化可用下面的光泵速率方程表示：

$$N_0 = N_1 + N_3, \quad \frac{dN_3}{dt} = w_{14}(t)N_1 - N_3/\tau \tag{11a}$$

$$N_3 = 0, \quad \text{当 } t = 0 \text{ 时} \tag{11b}$$

式中 N_0 为泵浦前基态粒子数， $N_1(t)$ 、 $N_3(t)$ 为光泵过程中基态、亚稳态的粒子数， $w_{14}(t)$ 为泵浦速率，它的波形等同于光泵波形， τ 为荧光寿命。在弱光泵浦条件下，(11) 式的解为：

$$N_3(t) = N_0 \exp(-t/\tau) \int_0^t w_{14}(t') \exp(t'/\tau) dt' \tag{12}$$

在一般情况下， $N_3(t)$ 存在极大值，达到极大值的泵浦时间 t_m 由下列方程确定：

$$w_{14}(t_m) \exp(t_m/\tau) = \frac{1}{\tau} \int_0^{t_m} w_{14}(t) \exp(t/\tau) dt \tag{13}$$

可见 t_m 与 $w_{14}(t)$ 绝对大小无关，仅由 $w_{14}(t)$ 的形状和亚稳态寿命决定。

从 (12) 式可以计算泵浦过程中反转粒子数随时间的变化。本文对单级感容网络，两级感容网络、半正弦形和梯形等 4 种泵浦脉冲形状进行了计算，钕玻璃的荧光寿命为 $340 \mu\text{s}$ ，图 6 给出了计算结果，同时还给出了对应的功率波形。从图 6 中可以看出：在泵浦能量、脉宽相同的情况下，单级感容网络具有最大的反转粒子数，而梯形脉冲的反转粒子数最小。但梯形脉冲的峰值电流最小，相应的光谱效率当然较高。

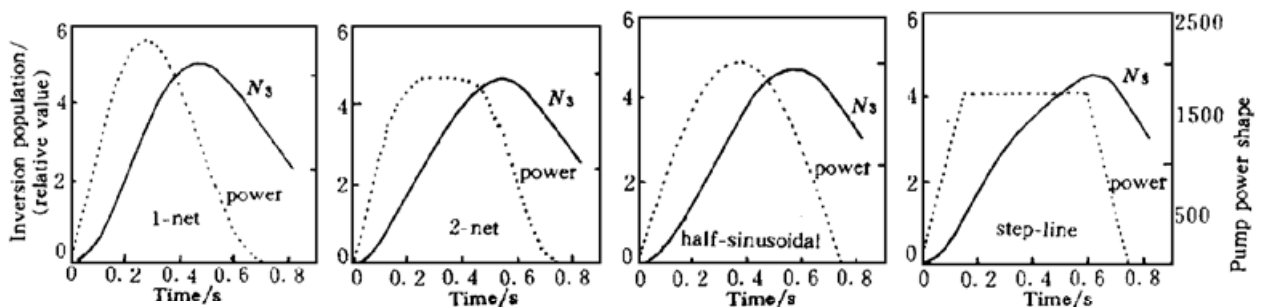


Fig. 6 Inversion population and pump power shape vs time for different pump shape at the same pump width

图 7 给出了几种不同宽度的梯形脉冲反转粒子数随时间的变化关系, 同时给出了对应的泵浦功率形状, 随着泵浦宽度的减小, 最大的反转粒子数迅速增大, 但峰值电流也相应增大。

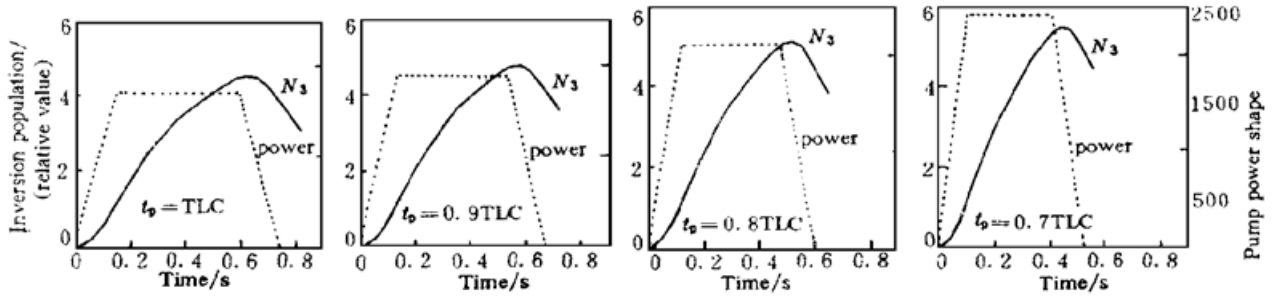


Fig. 7 Inversion population and pump power shape vs time for different step-line pump width

为了便于定量比较, 本文把图 6 和图 7 的主要计算结果归纳于表 2 中, 并以单级感容网络的数据为基准作归一化处理。

Table 2. Comparison of calculated results under the conditions of different pumping shape and length

pump shape	pump width/%	max. inversion/%	peak power/%	peak current/%
1-net	100	100	100	100
1-net	78	111	141	118
1-net	63	120	176	133
2-net	100	92	83	88
half-sinusoidal	100	93	86	90
step-line	100	90	72	80
step-line	90	95	80	86
step-line	80	102	90	93
step-line	70	109	103	102

由表 2 可见, 对梯形泵浦当脉宽减小到 0.8 倍时, 最大反转粒子数就已达到并略微超过单级感容网络的水平, 而这时的峰值功率只有单级感容网络的 0.9 倍。在泵浦脉冲形状不变的情况下, 泵浦的宽度减小 10% 或荧光寿命增加 10%, 最大反转粒子数将增加 5%。因此, 表 2 中计算结果与实验结果是相符合的^[5]。

为了更好地研究反转粒子数与泵浦脉冲的形状、宽度和钷玻璃的荧光寿命的关系, 把泵浦的宽度与荧光寿命的比值 τ_p/τ 定义为归一化泵浦时间, 研究了最大反转粒子数与归一化泵浦时间之间的关系。图 8 是最大反转粒子数的计算结果。从图 8 中可知这 4 种形状的泵浦在任意荧光寿命和泵浦宽度下最大反转粒子数的性质。

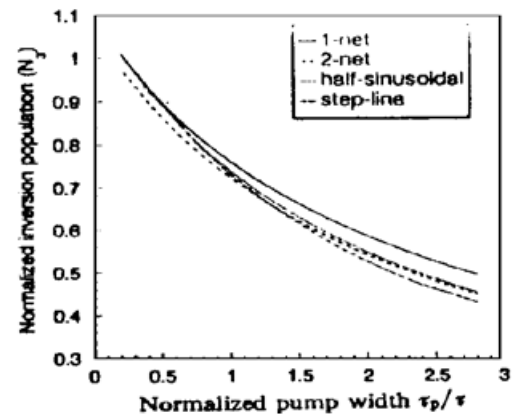


Fig. 8 The normalized inversion quantity vs the ratio of pump pulse width to fluorescence lifetime for four sorts of pump shape: 1-net, 2-net, half-sinusoidal and step-line

5 最佳化设计

从上面的计算可以得出以下几点结论:

1) 氙灯单位侧面积上的输入功率比电流密度能更好地描述氙灯的工作特性, 当单位侧面积上的输入功率增加时氙灯的光谱效率下降。当输入功率不变时, 不同直径的氙灯在泵浦

区域内的辐射光谱和光谱效率几乎不变, 当然直径增大时电流密度要减小。

2) 电流密度不变时, 氙灯的光谱效率和电-光转换效率随直径的增大而减小。

3) 泵浦宽度相同时, 梯形泵浦的峰值电流比单级感容网络小, 具有较高的光谱效率, 对于半宽度为底宽 80% 的梯形泵浦其峰值电流仅为单级感容网络的 90%。

4) 泵浦形状相同时, 适当减小泵浦的宽度可提高泵浦效率, 脉冲宽度减小 10%, 泵浦效率提高 5%。

由于用于高功率钨玻璃放大器的氙灯的负载系数 f_x 一般在 0.2~0.3 之间, 而且放电电路一般工作在临界阻尼附近。因此, 本文研究了在负载系数 $f_x = 0.2$ 、阻尼系数 $\alpha = 0.75$ 的情况下, 不同直径氙灯在不同泵浦宽度时的光谱效率、储能效率。计算得到的有关电路参数在表 3 中, 有关效率和能量的计算结果在表 4 中, 计算中放电电路都是单级感容网络, 单灯的长度为 135 cm, 双灯串联形成一个回路。

Table 3. Circuit parameters of different pulselength and flashlamp at the same damp coefficient and explosion factor

diameter /cm	pump width/ μs	impedance / $\Omega\text{A}^{1/2}$	inductance / μH	capacitance / μF	voltage /kV	current density /(kA/cm ²)
2.0	583	172.8	335.8	82.7	25.96	1.95
2.0	467	172.8	258.7	68.7	26.94	2.09
2.0	350	172.8	184.9	54.1	28.26	2.30
3.0	583	115.2	170.6	162.8	22.67	1.39
3.0	467	115.2	131.5	135.2	23.50	1.49
3.0	350	115.2	94.0	106.4	24.68	1.63
4.0	583	86.4	105.0	263.0	20.58	1.06
4.0	467	86.4	81.3	218.6	21.36	1.13
4.0	350	86.4	58.1	172.1	22.40	1.23

Table 4. Efficiency of different pulselengths and flashlamp at the same damp coefficient and explosion factor

diameter /cm	pump width/ μs	explosion energy/kJ	peak P_{in} /(kW/cm ²)	spectral efficiency	inversion efficiency	total efficiency	Max. inversion
2.0	583	69.7	45.15	0.194	0.65	0.126	1.00
2.0	467	62.4	50.28	0.190	0.69	0.131	0.931
2.0	350	54.0	56.74	0.185	0.75	0.139	0.850
3.0	583	104.6	39.30	0.206	0.65	0.134	1.596
3.0	467	93.5	43.54	0.201	0.68	0.137	1.458
3.0	350	81.0	50.06	0.195	0.74	0.144	1.328
4.0	583	139.4	33.50	0.217	0.64	0.139	2.206
4.0	467	124.7	37.10	0.214	0.67	0.143	2.030
4.0	350	108.0	42.38	0.208	0.72	0.150	1.845

从表 4 中的数据可以看出, 4 cm 直径氙灯、脉宽 350 μs 时总效率最高, 但有效光谱能量 (表中 Max. inversion) 并不是最大, 如果适当提高氙灯的负载系数可获得最大的有效光谱能量。

参 考 文 献

- [1] H. T. Powell, A. C. Erlandson, K. S. Jancaitis, Flashlamp pumping of Nd-glass disk amplifier. *Proc. SPIE*, 1990, **1277**: 103~ 120
- [2] J. E. Murrery, H. T. Powell, B. W. Woods, Optimized flashlamp pumping of disc amplifiers. *Proc. SPIE*, 1986, **609**: 95~ 102
- [3] H. T. Powell, A. C. Erandson, K. S. Jancaitis, Characterization of high power flashlamp and application to Nd-glass laser pumping. *Proc. SPIE*, 1986, **609**: 78~ 94
- [4] R. H. Dishington, W. R. Hook, R. P. Hilberg, Flashlamp discharge and laser efficiency. *Appl. Opt.*, 1974, **13**(10): 2300~ 2312
- [5] 张 华, 黄国松, 范滇元等, 钕玻璃荧光寿命和损耗对激光增益性能的影响. *光学学报*, 1998, **18**(9): 1186~ 1191

Optimized Design of Xenon Flashlamp Pumping of Nd-Glass Amplifier

Zhang Hua Gao Yanxia Fan Dianyuan

(National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 6 November 1997; revised 30 December 1997)

Abstract A model to predict the xenon flashlamp output spectrum, LC net circuit and inversion quantity during the pump has been established. The model has been examined by calculated and experimental results. The input power per unit wall area is more useful to describe the output spectra of flashlamp than current density which is used by previous studies. The spectral efficiency of flashlamp will fall as the input power is increased. It is concluded that the instantaneous output spectra and radiant efficiencies of flashlamp with different bore diameters are nearly identical at quasi-stationary conditions compared with that at the same input power per unit wall area of the bore. It is also shown that (1) spectral efficiency and radiant efficiency of flashlamp will decline at the same current density as the bore diameter of flashlamp is increased, (2) peak current density of step-line pump equals to 90 percent of one-net circuit at the same pump width and so with higher efficiency, (3) inversion efficiency will adds 5 percent when pump width reduces 10 percent, which is good agreement with experiment.

Key words radiant spectrum, xenon flashlamp, Nd-glass amplifier.