

高功率激光放大器 B 积分值的选取

赵庆春

(中国科学院上海光机所)

提要: 在 Беспалов^[1] 关于自聚焦的线性不稳定理论的基础上, Glass^[2] 等人在高功率激光放大器中引入了分裂积分 (B 积分) 作为一个重要参数。在上述基础上, 本文给出了放大器所能选取的最大 B 值的一个判据, 并讨论了放大器 B 值如何选取等问题。

Selection of the value of B integral for high power laser amplifier

Zhao Qingchun

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

Abstract. Based on the theory by Беспалов^[1] with regard to linearity instability of self-focusing, Glass^[2] and others introduced as an important parameter the breakup integral (B integral) in the design of high power laser amplifier. Upon these works criterion in choice of the maximum B value for amplifier is given, problems as how to choose B value for an amplifier is also discussed.

最大允许 B 值判据

增加高功率激光放大器的输出, 受到自聚焦破坏的限制。为衡量自聚焦的影响大小, Glass 等人引入“分裂积分”(简称 B 积分) 做为高功率放大器的一个重要参数, 用它来表征局部自聚焦的强度及波面非线性象差的大小。 B 值越小, 自聚焦影响越小, 但是, 从放大器引出的能量也越小。那末, B 值到底取多大好? 确定每级放大器允许取的最大 B 值的判据, 是根据放大介质的激光破坏阈值光强度 I_{cr} (瓦/厘米²) 确定的。而本文中 I_{cr} 是由强激光在放大器内局部自聚焦形成的空间周期性分裂而形成的破坏周期确定的^[3]:

$$I_{cr} = \frac{n_0 K_{\max}^2}{2K_l^2 r} \quad (1)$$

n_0 是线性折射率, K_{\max} 是空间周期破坏点的空间波数, K_l 是介质中激光光波数, $r = 4\pi n_2 / n_0 c$, c 是真空中光速, n_2 是非线性折射率系数。

由于大口径强激光束截面上强度分布的不均匀, 在设计放大器和确定工作点时, 应使增长最快的空间波数, 在放大器输出端所达到的光强度 I_s 小于 I_{cr} , 这样才不会造成自聚焦破坏^[3]。由于

$$I_s = I_{in} e^B \quad (2)$$

其中 I_{in} (瓦/厘米²) 是放大器输入光强度, B 是“分裂积分”, 其定义为

$$B = K_l r / n_0 \int_0^L I dl$$

I 是激光强度, L 是放大器长度。积分路径沿光轴上强度最大区。要 $I_s < I_{cr}$, 即

收稿日期: 1979年7月12日

$$I_{in} e^B < I_{or}$$

$$B \leq \ln(I_{or}/I_{in}) \quad (3)$$

(3) 式就是放大器允许取的最大 B 值判据。当 (3) 式取等号时, 在放大器输出端刚开始出现自聚焦破坏。

如果两个空间滤波器之间有多个光学部件, 则 I_{or} 是最易受破坏的光学部件的破坏阈值光强度, (3) 式中的 B 则应是该部件及它前面各部件的 B 积分值之和, I_{in} 是第一个光学部件的入射光强度。

二、放大器设计及工作点选取的几个问题(包括 B 值选取)

如果放大介质、脉冲宽度 τ 已确定, 则讨论放大器工作状态时, 一般考虑下面五个参数就够了: L 、 E_{in} 、 E 、 β 、 B (E_{in} 是输入能量密度, 焦耳/厘米²; E 是放大器内任一截面处的能量密度, 焦耳/厘米²; β 是激光小信号增益系数, 厘米⁻¹)。这五个不是全独立的, E 和 B 可用另外三个来表示

$$E = E_r \ln \left\{ 1 + \left[\exp\left(\frac{E_{in}}{E_r}\right) - 1 \right] \exp(\beta L) \right\} \quad (4)$$

$$B = K_r r / n_0 \int_0^L \frac{E}{\tau} dl \quad (5)$$

其中 E_r 是放大介质的“饱和能量密度”。可见只有 L 、 β 、 E_{in} 三个是独立的参数。

1. 极限工作线

三个独立参数中, 若 L 已确定, 则 E_{in} ($E_{in} = I_{in}\tau$) 和 β 只能在一定范围内取值, 而当

$$B = \ln(I_{or}/I_{in})$$

时, E_{in} 和 β 中只有一个是独立参数, 在 E_{in} 和 β 图上形成一条“极限工作线”。线上各点代表使放大器开始自聚焦破坏的工作状态。对于 III 型玻璃, $n_2 = 1.5 \times 10^{-13}$ e. s. u., 当 $\tau = 1$ 毫微秒时, 按 (1) 式测得 $I_{or} = 1.0 \times 10^{10}$ 瓦/厘米²。我们用的放大器 $L = 50$ 厘米, 极限工作线如图 1 实线所示。图 2、3、4 中的实

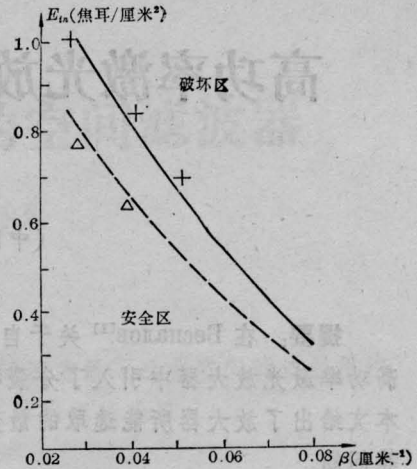


图 1 E_{in} 、 β 图上的“极限工作线”(实线)和 $\eta=2$ 的“安全工作线”(虚线)

$\eta=1$ 线与纵轴($\beta=0$)交点是 $E_{in}=1.43$ 焦耳/厘米²

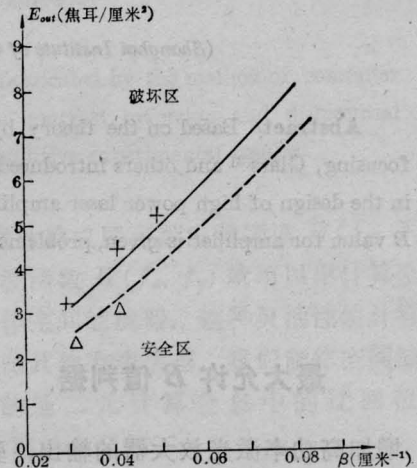


图 2 E_{out} 、 β 图上的“极限工作线”(实线)和 $\eta=2$ 的“安全工作线”(虚线)

$\eta=1$ 线与纵轴交点是 $E_{out}=1.24$ 焦耳/厘米²
(放大介质的吸收系数为 0.002 厘米⁻¹)

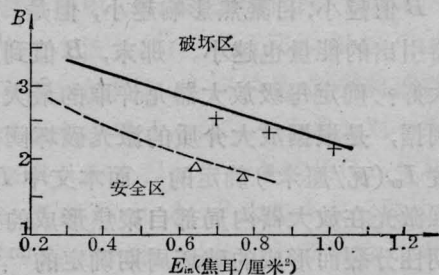


图 3 B 、 E_{in} 图上的“极限工作线”(实线)和 $\eta=2$ 的“安全工作线”(虚线)

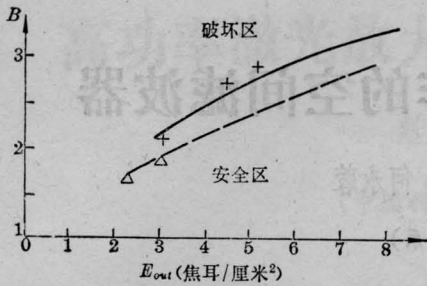


图4 B 、 E_{out} 图上的“极限工作线”(实线)和 $\eta=2$ 的“安全工作线”(虚线)

线是用不同参数表示的“极限工作线”。线的上方为放大器自聚焦破坏区，线的下方为无破坏安全工作区。图中符号“+”和“ Δ ”分别为“极限工作线”和 $\eta=2$ “安全工作线”的实验数据。

2. 安全工作线

放大器不能工作在破坏区，也不应工作在“极限工作线”上，而应工作在安全区。定义一个“安全工作系数” η ：

$$\eta = I_{cr}/I_{max} \quad (6)$$

I_{max} 是增长最快的空间波数在放大器输出端所达到的强度，即：

$$I_{max} = I_{in} e^B$$

所以

$$\eta = (I_{cr}/I_{in}) e^{-B} \quad (7)$$

$\eta > 1$ 意味着放大器工作在安全区，而 $\eta < 1$ 意味着放大器工作在破坏区， $\eta = 1$ 表示放大器工作在“极限工作线”上。取不同 η 值就有低于“极限工作线”的不同安全工作线，当然 η 越大，非线性传输影响越小，但放大器效率也越低。一旦 η 选定，对于本文讨论的情况，则只有一个独立参数，一般取 β 为独立参数，这样只要 β 确定了，其他参数(包括 B 值)均可从图 1~4 中查到。

3. β 值的选取

对文中所述放大器的 η 选定后， β 是唯一的独立参数，在设计放大器时应使 β 尽量

大。这样不仅可减少放大系列的级数，而且会减少非线性传输造成的影响。例如当 $\beta = 0.04$ 厘米⁻¹ 时，若 $E_{in} = 0.1$ 焦耳/厘米²，用两级放大器， $E_{out} = 3.07$ 焦耳/厘米²，两级 B 值之和为 2.14；而当 $\beta = 0.08$ 厘米⁻¹ 时， E_{in} 同样选为 0.1 焦耳/厘米²，仅用一级放大器就可得到 $E_{out} = 3.54$ 焦耳/厘米²， $B = 1.22$ 。可见 β 提高一倍，不仅可减少一级放大器，光束质量也变好了，因为两级时，光束整体自聚焦造成的波面畸变为 2.14 (B 值) 弧度 (约 $\lambda/3$) 远大于一级时的 1.22 (B 值) 弧度 (约 $\lambda/5$)。从图 1、2 可见，当同样是工作在极限工作线或 $\eta=2$ 安全工作线上时， β 越大引出的能量也越多，例如同样是输出 4 焦耳/厘米²，若 $\beta = 0.04$ 厘米⁻¹，放大器已工作在极限工作线上了；而 $\beta > 0.04$ 厘米⁻¹，放大器却工作在安全区。

由于 $\beta = \sigma \Delta n$ ， Δn 是反转粒子数密度， σ 是受激发大截面。因而使 β 大，一方面要改善和提高光泵，更重要的是选用 σ 大的工作物质，它和减小 n_2 的作用一样，都可以克服非线性的影响，亦即提高工作物质的品质因数 $\sigma n_0/n_2$ 。我们的 III 型玻璃 $\sigma \approx 1.1 \sim 1.3 \times 10^{-20}$ 厘米²，比 ED_2 的 σ (2.7×10^{-20} 厘米²) 小一倍左右，更有增大的潜力。

值得指出的是，对于更短的脉冲，放大器远不能工作在极限工作线上，因为在没自聚焦破坏之前，光束质量由于光束的分裂而大大下降了，因此 η 要选得大一些。

参 考 文 献

- [1] В. И. Беспалов; *Письма в ЖЭТФ*, 1966, 3, 471.
- [2] A. J. Glass; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1975, QE-11, No. 9, 28D.
- [3] B. R. Suydam; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1974, QE-10, No. 11, 837.