

# 放大自发辐射对 XeCl 激光器 空间相干性的影响

张大可 王小异 倪晋智 姚建萍 傅淑芬 陈建文

(中国科学院上海光机所)

**提要:** 本文采用杨氏实验的方法,在不同的谐振腔  $Q$  值条件下测量了 XeCl 激光的空间相干性,认为放大自发辐射(ASE)是影响 XeCl 激光空间相干性的重要因素。适当地选取谐振腔输出耦合腔镜的反射率,可以有效地抑制这一影响。

## Effect of amplified spontaneous emission on space coherence of the XeCl laser

Zhang Dake, Wang Xiaoyi, Ni Jinzhi Yao Jianpin, Fu Shufen, Chen Jianwen

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

**Abstract:** In this article, the space coherence of XeCl laser is measured with various cavity  $Q$  using Young's experiment. It shows that the amplified spontaneous emission (ASE) is the important factor which affects the space coherence of XeCl lasers. Such influence can be suppressed effectively by properly choosing the reflectivity  $R$  of the cavity output mirror.

### 一、引言

放大自发辐射(ASE)是自发辐射在已达到粒子数反转的激活介质中传播时引起受激辐射而实现的单程行波放大。

自从1963年 Bloom 首次的无腔镜脉冲 He-Ne 激光器中观察到 ASE 输出以来,相继有人在理论上和实验上对放大自发辐射的特性做过一定的研究和论述。但是,迄今为止还没有文献专门对准分子激光器中放大自发辐射对输出特性的影响做过系统的研究,

而在准分子这类高增益体系中,这种影响无疑是重要的。本文就这个问题进行一些探讨。

### 二、实验安排

本实验采用紫外预电离 Blumlein 快放电横向激励 XeCl 激光器,其具体结构可参阅文献[1]。为了便于研究在不同谐振腔  $Q$  值(以谐振腔输出耦合腔镜的反射率  $R$  表征之)条件下放大自发辐射对 XeCl 激光器输

收稿日期:1983年8月12日。

出特性的影响,采用外半腔式结构。后腔镜为一镀膜全反平镜,直接密封在激光气室上,而前腔镜则置于调节架上,以便于更换。所用前腔镜的反射率分别为:  $R=8\%$ 、 $70\%$ 、 $92\%$ 。如果撤去前腔镜,即构成一无谐振腔的器件。

我们采用典型的杨氏双狭缝干涉实验来测定 XeCl 体系激光和 ASE 的空间相干性,实验光路示于图 1。

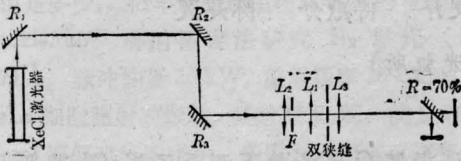


图1 杨氏实验光路

其中  $R_1$ 、 $R_2$  和  $R_3$  分别是反射率为  $70\%$ 、 $4\%$  和  $100\%$  的反射镜;  $L_1$  和  $L_2$  分别是焦距为  $30\text{ cm}$  和  $10\text{ cm}$  的正透镜,它们同小孔光阑  $F$  一起构成一简易的扩束望远镜系统; 焦距为  $2\text{ m}$  的正透镜  $L_3$  直接置于双狭缝之后,用以实现夫琅和费条件。

实验中使用的双狭缝缝宽为  $0.1\text{ mm}$ , 缝长为  $20\text{ mm}$ , 纵横比为  $200:1$ , 因此可以认为相对于缝宽而言缝长是无穷大的。双狭缝的间距分别取  $0.5\text{ mm}$ 、 $1.0\text{ mm}$  和  $2.0\text{ mm}$ 。

激光器的工作条件保持为: 预电离电压  $28.3\text{ kV}$ , 主放电压  $18.4\text{ kV}$ 。

工作物质的气分比为  $\text{HCl}:\text{Xe}:\text{Ne}=3\text{ Torr}:25\text{ Torr}:2.5\text{ atm}$ 。

为了分析照象干板曝光强度的差异对于干涉条纹可见度的影响,我们在象屏之前还放置了一面  $R=70\%$  的分光镜。这样,对于每一个光脉冲,可以同时拍摄两张具有不同曝光强度的照片,借以进行比较。图 2 是当谐振腔输出耦合腔镜反射率  $R=92\%$ 、双狭缝间距  $d=0.5\text{ mm}$  时摄下的一组干涉图象的黑度扫描曲线。显而易见,曝光强度较弱 ( $30\%$ ) 的那张干涉条纹的可见度要优于曝光强度较强 ( $70\%$ ) 的情况。

文献 [2] 指出, XeCl 激光器的输出强度

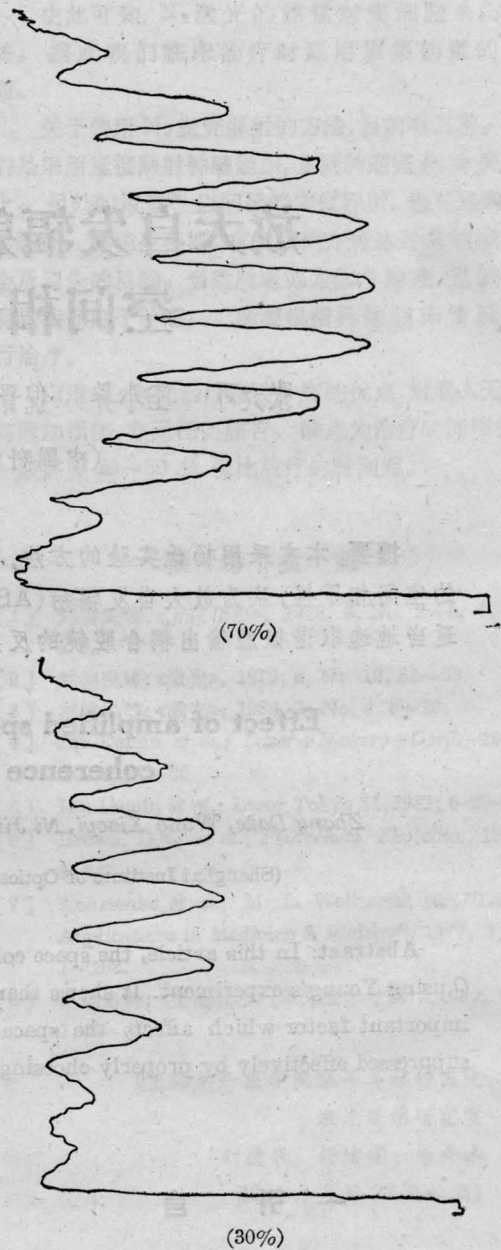


图2 干涉图象的黑度曲线

是前腔镜反射率  $R$  的函数。特别是考虑到 Blumlein 快放电横向激励型器件工作时的不稳定性,所以要实现完全等光强是具有相当的困难的。为此,我们设计了下述实验来探讨是否有可能实现曝光强度-可见度之间的变换。其实验光路如图 3 所示。其中  $R_4$  和  $R_5$  分别是反射率为  $92\%$  和  $70\%$  的分光镜。这样我们就可以同时拍摄三张干涉图



图3 等光强变换实验光路

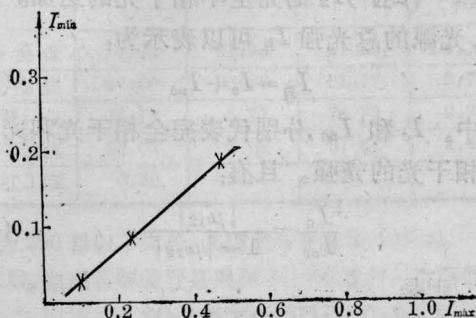


图4  $I_{\min}$ - $I_{\max}$  关系曲线

象,从而确定在不同曝光强度条件下,干涉图象的最大光强( $I_{\max}$ )与最小光强( $I_{\min}$ )之间的变化关系。其结果示于图4。

这一实验结果表明,当照象干板工作在线性区域时,对于不同的曝光强度,干涉图象中相对光强的变化满足线性关系。按此,我们就能够将光强不同的图象变换成统一的标准光强图象而加以比较,从而满足了等光强要求。采用曝光强度-可见度变换的优点在于:1. 简化了实验;2. 避免了器件工作不稳定的影响。

实验步骤如下:对于每一种缝间距,依次拍下不同 $Q$ 值条件下的激光以及ASE的双狭缝干涉图象,然后变换缝间距并重复上述的过程。摄象用的底板为紫外II型干板,在摄氏 $22^{\circ}\text{C}$ 时,显影和定影时间分别为1min和15min。

当通过狭缝1的光强 $I_1$ 与通过狭缝2的光强 $I_2$ 相等时,在象屏上光强的分布为<sup>[3]</sup>:

$$I = 2b^2 \sin^2 \frac{\bar{k}bx}{2f} \left[ 1 + |\mu_{12}| \cos \frac{\bar{k}dx}{f} \right] \quad (1)$$

式中, $\bar{k}$ 是平均波数, $b$ 是缝宽, $d$ 是缝间距, $f$ 是双狭缝到屏的距离。 $|\mu_{12}|$ 是:

$$|\mu_{12}| = \frac{I_1 + I_2}{2\sqrt{I_1 I_2}} W \quad (2)$$

其中 $|\mu_{12}|$ 是部分相干光复相干度的模, $W$ 是干涉条纹的可见度,而 $I_1$ 和 $I_2$ 分别是通过双狭缝的光强。

由上式计算可知在零级衍射包络内的干涉条纹数 $n$ 为:

$$n = 2 \frac{d}{b} - 1$$

当 $d/b=5$ 、10和20时, $n$ 分别为9、19和39。图5中的 $a$ 和 $b$ 分别是当 $R=92\%$ , $d=0.5\text{mm}$ 和 $d=1.0\text{mm}$ 时,零级衍射包络内的光强分布。其中虚线是根据(1)式计算的理论衍射包络。

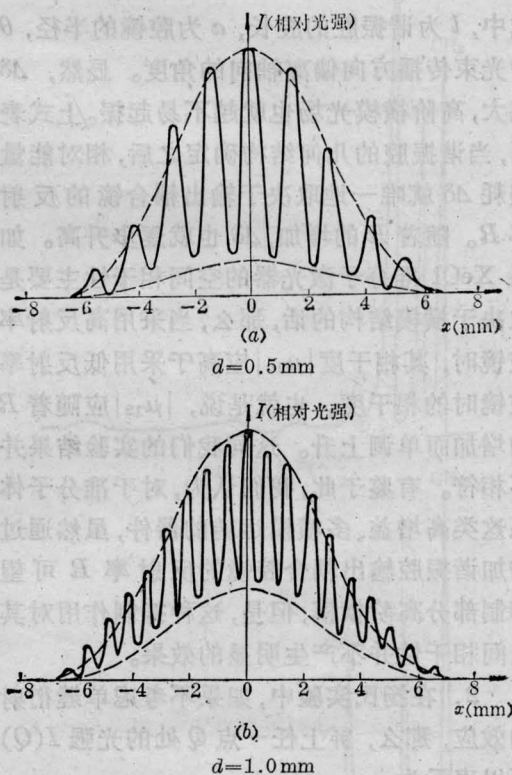


图5 零级衍射包络内的光强分布

在不同 $Q$ 值条件下, $|\mu_{12}|$ 随缝间距的变化如下:

$d$ \ $R$	8%	70%	92%	ASE
0.5 mm	0.77	0.93	0.78	0.61
1.0 mm	0.48	0.68	0.49	0.42
2.0 mm	0.29	0.55	0.36	0.13



这一结果表明, 当其他实验条件均保持不变时, XeCl 激光的相干度随  $R$  的变化而有一极大值出现。

### 三、讨 论

1. 对于平行平面腔这种介稳腔, 如果近似地视基模激光场为轴向光束, 而其余的高阶横模激光场为非轴向光束, 则二者之间的相对能量损耗  $\Delta\delta$  为<sup>[4]</sup>:

$$\Delta\delta = \frac{l\theta/\alpha}{1-R} \quad (4)$$

式中,  $l$  为谐振腔的腔长,  $\alpha$  为腔镜的半径,  $\theta$  为光束传播方向偏离轴向的角度。显然,  $\Delta\delta$  越大, 高阶横模光场也就越不易起振。上式表明, 当谐振腔的几何结构确定之后, 相对能量损耗  $\Delta\delta$  就唯一地取决于输出耦合镜的反射率  $R$ 。随着  $R$  的增加,  $\Delta\delta$  也就逐步升高。如果 XeCl 准分子激光器的空间相干性主要是取决于横模结构的话, 那么, 当采用高反射率腔镜时, 其相干度  $|\mu_{12}|$  应高于采用低反射率腔镜时的相干度。也就是说,  $|\mu_{12}|$  应随着  $R$  的增加而单调上升。这同我们的实验结果并不相符。有鉴于此, 我们认为, 对于准分子体系这类高增益、多横模运转的器件, 虽然通过增加谐振腔输出耦合腔镜的反射率  $R$  可望抑制部分高阶横模, 但是, 这种抑制作用对其空间相干性并不产生明显的效果。

2. 在扬氏实验中, 如果不考虑单缝衍射的效应, 那么, 屏上任一点  $Q$  处的光强  $I(Q)$  可以表示为

$$I(Q) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} |\mu_{12}| \cos \delta \quad (5)$$

其中  $\delta$  为通过狭缝  $P_1$  和  $P_2$  到达  $Q$  点的两光束之间的位相差。

上式又可以改写为:

$$I(Q) = |\mu_{12}| \{I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta\} + \{1 - |\mu_{12}|\} (I_1 + I_2) \quad (6)$$

式中等号左边的第一项可以看作是两束强度

分别为  $|\mu_{12}|I_1$  和  $|\mu_{12}|I_2$  而相对位相差为  $\delta$  的完全相干光的相干迭加, 而第二项则可以看作是两束强度分别为  $(1 - |\mu_{12}|)I_1$  和  $(1 - |\mu_{12}|)I_2$  的完全不相干光的迭加。因此, 光源的总光强  $I_{\Sigma}$  可以表示为:

$$I_{\Sigma} = I_o + I_{nc} \quad (7)$$

式中,  $I_o$  和  $I_{nc}$  分别代表完全相干光和完全不相干光的光强。且有:

$$\frac{I_o}{I_{nc}} = \frac{|\mu_{12}|}{1 - |\mu_{12}|} \quad (8)$$

于是

$$|\mu_{12}| = I_o / (I_o + I_{nc}) \quad (9)$$

我们现在假设在 XeCl 准分子激光器的输出光中包含有单纯受激辐射, 即激光和放大自发辐射, 总的输出光强可以表示为二者的迭加, 也即:

$$I = L + S \quad (10)$$

其中  $L$  和  $S$  分别代表激光和 ASE 光强, 且有:

$$I_o = L_o + S_o \quad (11)$$

$$I_{nc} = L_{nc} + S_{nc}$$

按此, 复相干度的模  $|\mu_{12}|$  为

$$|\mu_{12}| = |\mu_{12}|_L \frac{L}{L+S} + |\mu_{12}|_S \frac{S}{L+S} \quad (12)$$

式中:

$$|\mu_{12}|_L = L_o / L \quad (13)$$

$$|\mu_{12}|_S = S_o / S$$

考虑到相干光强  $I_o$  正比于受激辐射光子通量  $\phi_{st}$  而非相干光强  $I_{nc}$  正比于自发辐射光子通量  $\phi_{sp}$ , 对于激光, 可近似地认为仅会有受激辐射光子, 于是,  $|\mu_{12}|_L \approx 1$ ; 而对于 ASE, 除了会有受激辐射光子外, 还会有在  $d\Omega/4\pi$  立体角范围内的自发辐射光子, 所以恒有  $|\mu_{12}|_S < 1$ 。在这种情况下, XeCl 激光器输出光的相干度  $|\mu_{12}|$  即可近似地表示为:

$$|\mu_{12}| \approx 1 - \frac{1}{\beta} (1 - |\mu_{12}|_S) \quad (14)$$

式中,

$$\frac{1}{\beta} \equiv \frac{S}{L+S} \quad (15)$$

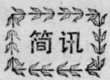
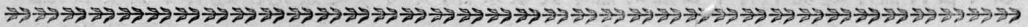
它表征了放大自发辐射在总的输出中所占的比重。

由于  $|\mu_{12}|_S$  取决于在  $d\Omega/4\pi$  立体角范围内的自发辐射光子通量，也就是取决于激活介质的组成成份、激励电压和谐振腔的几何结构，一旦这些条件确定之后，那么由上式可知， $|\mu_{12}|$  的大小将随  $1/\beta$  的变化而变化，在这个意义上，我们认为方程(14)式实际上反映了放大自发辐射对 XeCl 激光空间相干性的影响。定性地讲，腔的  $Q$  值越高，对光子的反馈作用就越大，相应地放大自发辐射就越弱。但另一方面，存在着一个对应于最

大输出的最佳反射率  $R_{opt}$ ，当  $R > R_{opt}$  时，XeCl 激光器的输出强度也将随着  $R$  的增加而减弱。所以，当  $R$  取某一定值  $R_0$  时， $1/\beta$  达到其最小值。这样，在  $R_0$  附近，光束的空间相干性就比较好，而当  $R$  偏离  $R_0$  时，相干性也就随之变差。这同前述实验结果是一致的。

### 参 考 文 献

- [1] 陈建文等;《激光》,1979,6, No. 9, 1.
- [2] 陈建文等;《光学学报》,1983,3, No. 4, 364.
- [3] J. Mschura *et al.*; *Optik*, 1974, 40, 217.
- [4] 兰信钺等;《激光技术》,湖南科学技术出版社,1979, p. 174.



## 中国光学学会第一、二届理事会联席会在北京召开

1984年12月11日至15日,中国光学学会在北京召开第一、二届理事会联席会。人大副委员长严济慈、中国科协党组副书记裴丽生、著名物理学家钱临照以及来自全国各地的专家、教授125人出席了这次会议。王大珩理事长代表第一届理事会向大会作了学会五年来的工作总结报告;各专业委员会及学会办的各期刊编辑部也分别作了汇报;大会表彰了一批为学会工作做出显著成绩的先进集体和个

人,本刊编辑部的雷仕湛、陈兮、周稳观受到了表彰奖励;讨论并通过了学会的新会章;选出了参加中国科协三大的代表。大会还组织了学术报告。经过民主协商,选出了第二届理事会和常务理事。王大珩继任理事长,赖宗瑜任秘书长。计划1985年10月份在上海召开光学学会年会,这将是一次有千人参加的光学盛会。

(纪钟)