

# “波导/自由空间”组合腔激光器的研究

马养武 黄霖 陈钰清

(浙江大学光仪系, 310027)

**摘要:** 研究了利用腔内空心波导管选横模的新方法的“波导/自由空间”组合腔激光器构型。实现组合腔“多横模振荡单横模高功率密度输出”的核心在于组合腔的自由空间增益区中足够大的多模振荡模体积和中空波导管所限定的最低阶波导模输出。理论上分析了组合腔的可行性和应用前景,并由实验结果所证实。

**关键词:** 波导, 自由空间, 多模振荡, 单模输出

## The laser with “waveguide/free-space” compound resonator

*Ma Yangwu, Huang Lin, Chen Yulin*

(Department of Optical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou)

**Abstract:** Reserch on selecting traverse mode by hollow waveguide tube in cavity and a new laser with “waveguide/free-space” compound cavity are reported. The key for achieving “multimode oscillation and single mode output” is the compound cavity where large enough multimode oscilating volume exists in the free-space gain region and the lowest waveguide mode output controled by hollow waveguide tube. A theoretical analysis was made of the principle and foreground of compound cavity which was confirmed by experimental results.

**Key words:** waveguide, free-space, multimode osoilation, single-mode output

### 一、引 言

无论是固体、气体或是液体激光器,通常采用的横模选择方法是在腔内插入控模元件(光阑、反射镜、放电管或工作介质本身)。不论何种形式的控模元件,选模的机理都是通过控制选模元件的孔径尺寸来压缩激光振荡模式,抑制掉高阶模,实现单横模输出。归纳这种方法的核心就是“单横模振荡单横模输出”。这种方法虽则简单易行,但却以撇弃高阶模能量为代价,由于振荡模体积的减小,势必使得单模输出功率远小于同等条件下的多模功率。

本文报道了一种新的选横模概念和方法,并应用于各类激光器中,组成独特的“波导-自由空间”组合腔激光器构型。组合腔的自由空间增益区中的足够大的多模振荡模体积和波导管的优良的控模作用,使得激光器获得高功率单横模输出。新选模方法的实质是,多模振荡单模

输出。在组合腔中,是把参与振荡的各阶自由空间模耦合成最低阶波导模输出,而不是作为损耗予以撇弃,因而使激光器的输出光束质量和功率密度都大大提高。本文分析了组合腔的可行性和应用前景,并由组合腔  $\text{CO}_2$  激光器的实验结果所证实。

## 二、理论分析

如图 1 所示,组合腔由反射镜  $M_1$ 、大口径放电管  $D$ 、中空波导管  $W$  和输出镜  $M_2$  组成。放电管  $D$  内充工作气体,并且具有足够大的管径,相当于振荡模的自由空间增益区。中空波导管  $W$  是控模元件,不具备增益放大作用。

图 1 所示的组合腔与通常波导谐振腔<sup>[1]</sup>的不同在于:组合腔中的波导管和大口径放电管是作为两种不同元件置于腔内,而一般波导腔中的波导管既是控模和导光元件,同时又是作为气体放电的容器。因此,在组合腔内,波导管的控模作用决定了激光器的低阶波导模输出,但它本身不是增益区,因而组合腔的整个激活模体积不受波导管尺寸限制。

满足组合腔自洽条件的振荡模必须是能以低损耗传输于波导管的低阶波导本征模,同时又必须具有在自由空间增益区的“拉盖尔-高斯”分布,以能被反射镜高效耦合。分析组合腔的模场分布和腔损耗的一种有效方法是采用矩阵计算的数字技术<sup>[2]</sup>,由迭代计算求得任意几何排列的最低阶振荡模与其损耗,即从最低阶波导模出发,让它反复通过谐振腔,直到最终在每次相继通过后,都能得到重复再现的场分布。

图 2 是等效于图 1 组合腔的波导管-自由空间-透镜序列展开图。在等效展开时,假定输出镜  $M_2$  为平面镜,并且十分靠近波导管口,这样可使问题简化为图 2 所示的具有半对称结构的往返一周的等效透镜-波导系统。

在波导管口  $A$  处,波导模经过变换矩阵  $M_1$  到有限网格来数值计算,即通过计算  $M_1$  数值积分<sup>[3]</sup>:

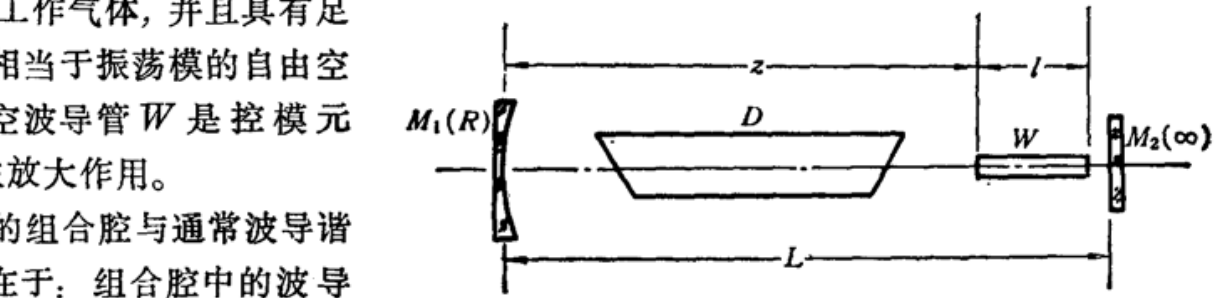


Fig. 1 Setup for "waveguide/free-space" compound cavity

$M_1$ -spherical reflective mirror;  $M_2$ -plane output mirror;  
 $D$ -beam-calibre discharge tube;  $W$ -hollow waveguide tube

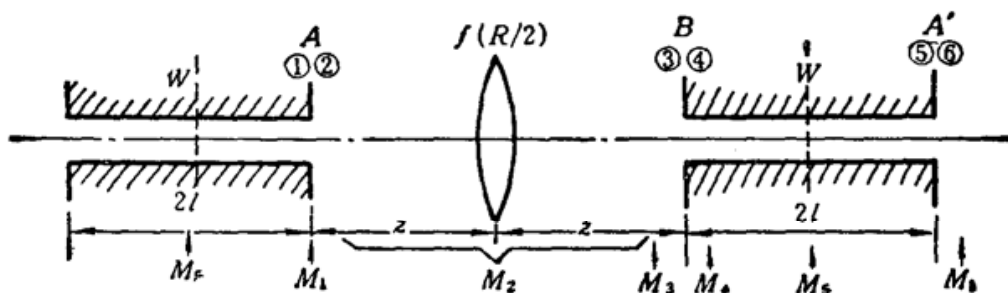


Fig. 2 Equivalent free space-waveguide-lens system

$f$ -equivalent lens of  $M_1$  mirror;  $W$ -hollow waveguide tube;  
 $M_1$ - $M_5$ -alternate matrices

$$(M_1)_{mn} = 2\pi \int_0^a r \psi_m(r) \phi_n(r) dr \quad (1)$$

将波导  $\text{EH}_{1m}$  模 ① 展开为“拉盖尔-高斯”TEM 模场 ②, 式中,  $a$  是波导管半径,  $\phi_n(r)$  和  $\psi_m(r)$  分别是波导模和自由空间模的归一化函数。“拉盖尔-高斯”模 ② 通过等效透镜  $f$  传输, 并经过“菲涅尔-基尔霍夫”衍射积分传回到波导管口  $B$ , 此过程可由对角矩阵  $M_2$  计算。在反射镜曲率半径  $R \rightarrow \infty$  的条件下,  $M_2$  具有较简洁形式:

$$(M_2)_{mn} = \delta_{mn} \exp[-i 2 m \tan^{-1}(4z/kw_0^2)] \quad (2)$$

式中,  $k$  是波矢,  $w_0$  是“拉盖尔-高斯”光束束腰半径。自由空间模传到管口  $B$  时, 是一具有扩展光斑  $w > w_0$  和有限曲率  $R'$  的 TEM 模, 必须由矩阵  $M_3$  变换为具有  $w_0$  腰斑的 TEM 模:

$$(M_3)_{mn} = (2/ww_0) \int_0^\infty dr^2 L_m(\alpha r^2) L_n(\beta r^2) \exp(-qr^2) \quad (3)$$

式中,

$$\alpha = 2/w_0^2, \beta = 2/w^2, q = \frac{1}{w_0^2} + \frac{1}{w^2} - i \frac{k}{2R},$$

$$w = w_0 [1 + (4z/kw_0^2)^2]^{1/2}, R = 2z [1 + (kw_0^2/4z)^2]$$

$z$  是波导管端口到反射镜的间距,  $L_m$ 、 $L_n$  分别是  $m$ 、 $n$  阶拉盖尔多项式。然后,  $M_1$  的逆阵  $M_4$  将把这自由空间模再变换成波导模。

$M_5$  是波导管内波导模的传输矩阵, 具有形式:

$$(M_5)_{mn} = \delta_{mn} \exp[-u_{1m}^2 (l/ka^2) (\text{Re} \nu_n / k_a)] \\ \times \exp\left[-\frac{i}{2} (u_{1m}^2 - u_{11}^2) (l/ka^2) \cdot (1 + 2I_m \nu_n / k_a)\right] \quad (4)$$

式中,  $l$  是波导管长,  $\nu_n$  是波导管材料折射率,  $u_{1m}$ 、 $u_{11}$  分别是零阶贝塞尔函数的第  $m$  和第 1 个根。

振荡模场由  $A$  出发, 完成一次往返后, 在  $A'$  处再现原来的场分布, 总的往返矩阵是

$$M = M_5 M_4 M_3 M_2 M_1 \quad (5)$$

由等式:

$$M X_i = \Lambda_i X_i \quad (6)$$

所求得的  $M$  的本征矢量  $X_i$  表征着组合腔振荡模的模场分布, 而  $M$  的本征值  $\Lambda_i$  给出了组合腔的总损耗:

$$L_i = 1 - |\Lambda_i|^2 \quad (7)$$

数值计算表明, 组合腔的模场分布和腔损耗取决于腔结构参数, 包括波导管长  $l$ 、管半径  $a$ 、反射镜曲率  $R$ 、间距  $z$ 、以及参量  $w_0/a$ 。事实上, 对于组合腔, 其中最主要的参量是  $w_0/a$ 。虽然, 矩阵的本征值  $\Lambda_i$  与  $w_0/a$  是相互独立,  $w_0/a$  的取值似乎是任意的, 而实际上, 能被展开的 TEM 模的数目总有一定限度。子矩阵  $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$  表明,  $w_0/a$  值的选取将关系到在自由空间增益区中的激活模体积的大小和自由空间模返回波导时的汇聚程度。

Abrams<sup>[4]</sup>曾假定波导管中只允许最低阶波导模  $\text{EH}_{11}$  的存在和传输。据此, 在适当反射镜位置条件下,  $\text{EH}_{11}$  模能量的 98% 将辐射到腰斑  $w_0 = 0.6435a$  的  $\text{TEM}_{00}$  模中。这种选择对于波导腔激光器也许是最方便的, 但对“波导-自由空间”组合腔, 最感兴趣的是波导模在自由空间增益区所展开 TEM 模的总体积和重新耦合成波导模的总损耗。数值结果表明,  $\text{EH}_{1m}$  模在腔中的波导损耗十分接近于  $\text{EH}_{11}$  模损耗, 因此, 更符合实际的考虑是: 腔模应是  $\text{EH}_{1m}$  模

的线性组合, 即  $w_0/a$  的合理选取应使  $\text{EH}_{1m}$  模以最佳效率耦合到自由空间  $\text{TEM}_{0m}$  模中。

按  $\text{EH}_{1n}$  模总能量  $Q$  的展开式:

$$Q = \sum_{p=0}^{\infty} |A_p(w_0)|^2 \quad (8)$$

式中,  $A_p(w_0)$  为第  $p$  个自由空间展开模的振幅, 由 Abrams 的假定:

$$\frac{\partial A_0(w_0)}{\partial w_0} = 0,$$

即  $w_0/a = 0.6435$  时,  $\text{EH}_{11}$  模能量的 98% 耦合到  $\text{TEM}_{00}$  模中, 2% 的能量辐射到  $\text{TEM}_{0m}$  模中。但若考虑到腔模是低阶  $\text{EH}_{1m}$  模的线性组合(如:  $\text{EH}_{11}$ 、 $\text{EH}_{12}$ 、 $\text{EH}_{13}$ ), 并使  $w_0/a$  的取值能使展开式(8)的最大  $A_p(w_0)$  值落在  $A_0(w_0)$  的后几项上, 例如, 在  $A_2(w_0)$  项上, 即  $w_0/a$  取成 0.490, 由此所算得的能量分配额就变为:  $\text{EH}_{11}$  模能量的 89% 将耦合到  $\text{TEM}_{00}$  模中,  $\text{EH}_{12}$  模能量的 84% 耦合到模  $\text{TEM}_{01}$  中, 而  $\text{EH}_{13}$  模能量的 73% 耦合到  $\text{TEM}_{02}$  模中。显然,  $w_0/a = 0.49$  的取值较  $w_0/a = 0.6435$  的取值, 可使自由空间增益区具有更大的振荡模体积。

计算表明,  $\text{EH}_{1m}$  线性组合模中各个波导模能量含量随模数  $m$  的升高而迅速下降, 前三个模几乎包含了全部腔模的能量, 并且  $\text{EH}_{11}$  模具有最高的比份。因此, 在我们实验中观察到, 上述两种  $w_0/a$  的取值, 激光器都获得了准高斯基模远场分布的激光输出。

“波导-自由空间”组合腔的特点是: 由波导管所限定的  $\text{EH}_{1m}$  模, 在波导管口展开成各阶自由空间模, 这些模在向自由空间增益区传输过程中, 得以放大, 并形成大的激活模体积, 因此, 反馈回波导管口, 重新耦合成的波导模能量必定大于单个高斯基模振荡时所能获得的能量。组合腔腔模的自洽振荡过程中所存在的波导模与自由空间模之间的展开、放大、耦合过程, 构成了“多模振荡单模输出”的选模概念, 提供了实现激光器高功率、单横模输出的方法。

### 三、实验结果与实验方法

#### 3.1 组合腔的结构参数

组合腔中的波导管半径  $a$  和管长  $l$  的选取应满足矩阵  $M_5$ , 即应使最低阶波导模在管中具有足够小的传输损耗, 同时又应避免高阶波导模振荡。通常, 腔的菲涅耳数  $N$  取在:  $N = a/L\lambda = 0.2 \sim 1$  之间。式中,  $L$  是组合腔腔长,  $\lambda$  是波长。管长  $l$  会影响到波导管所形成的低阶波导模的数目和能量比份以及传输损耗。在我们初期实验中, 是由实验方法加以选取, 发现  $l/a$  比值大于 20 时, 影响不十分明显。

由矩阵  $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$  所描述的反射镜曲率  $R$ 、间距  $z$  以及  $w_0/a$  这三个参量, 将决定增益区中的振荡模体积和反射镜的耦合损耗。在初期研究中, 我们仍采用 Abrams<sup>[5]</sup> 的结果, 并认为由  $z=f$ ,  $R=2f$  所给出的低耦合损耗区, 可能是组合腔可行的构型方案之一(也许存在更佳的构型)。式中,  $f = \pi w_0^2/\lambda$ ,  $f$  是共焦参量。为了比较  $w_0/a$  的值对振荡模体积的影响, 据计算结果, 选择了两组  $w_0/a$  值: (1)  $w_0/a = 0.6435$ , 对应于  $\partial A_0(w_0)/\partial w_0 = 0$ ; (2)  $w_0/a = 0.55$ , 对应于  $\partial A_1(w_0)/\partial w_0 \approx 0$ 。

置于反射镜到波导管口间的大口径放电管管径  $D_T$  的选取, 应考虑能容纳可能存在的最大振荡模体积, 以及放电管中工作物质的扩散冷却效应和反转粒子数密度的横向分布情况, 研

究表明<sup>[6]</sup>,  $D_T$  取成与振荡光束直径  $D_i$  满足关系:  $D_T = e^2 D_i$  时, 是一种合适的选择。

### 3.2 实验结果

在图 1 的实验装置中, 放电管直径  $D_T = 28 \text{ mm}$ , 管长  $L_e = 90 \text{ cm}$ ; 工作气体混合比为  $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}:\text{Xe} = 1:1.25:5:0.5$ ; 总气压 20 Torr, 放电电流 35 mA, 波导管半径  $a = 3.5 \text{ mm}$ , 管长选取  $l = 10, 50, 100, 200, 400, 1200 \text{ mm}$ 。

实验结果表明: 腔内不置波导管时, 即为普通的  $\text{CO}_2$  激光器。在反射镜曲率  $R = 3 \text{ m}$ , 输出镜曲率  $R = \infty$ , 总腔长  $L = 1.8 \text{ m}$  条件下, 观察到典型的多横模输出花样, 并测得平均功率密度为:  $21 \text{ W/cm}^2$ 。

当在腔内放置半径  $a_T = 6 \text{ mm}$  光阑(相当于  $N = 1.5$ ), 观察到准  $\text{TEM}_{00}$  模输出花样, 测得平均输出功率密度为  $36 \text{ W/cm}^2$ 。

用半径  $a = 3.5 \text{ mm}$  的波导管置换腔中的光阑, 在第一组  $w_0/a = 0.6435$  的取值条件下,  $f = 1.5 \text{ m}$ , 由低损耗条件:  $z = f, R = 2f$ , 使波导管口到反射镜的间距  $z$  固定于  $z = f = 1.5 \text{ m}$ , 并取镜  $M_1$  的曲率  $R = 3 \text{ m}$ 。

对于  $\phi 7 \times 10 \text{ mm}$  的短波导管, 如预期那样, 不足具有形成波导模的效应, 而形成小菲涅耳数谐振腔<sup>[7]</sup>, 观察到典型的具有十分类似于共焦不稳定腔<sup>[8]</sup>输出的圆对称分布的环形基模花样(见图 3)。由于小孔径腔的极大的衍射损耗, 使激光器功率明显降低, 平均输出功率密度  $10 \text{ W/cm}^2$ 。

换置  $\phi 7 \times 50 \text{ mm}$  波导管, 观察到分布均匀的波导模与小孔径腔环形基模交替出现的模式竞争, 并观察到波导模的亮度明显高于环形模亮度。

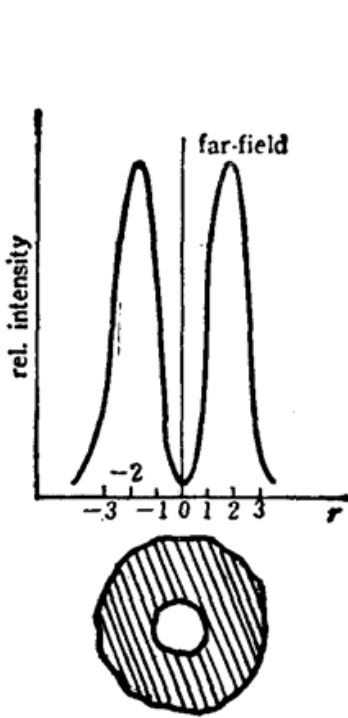


Fig. 3 Output beam intensity and facula of small- $N$  cavity

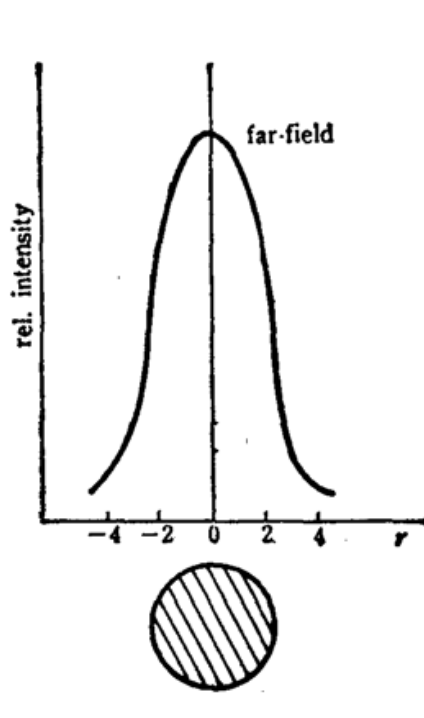


Fig. 4 Output beam intensity and facula of "waveguide free-space" cavity  
( $w_0/a = 0.6435, f = 1.5 \text{ m}, R = 2f = 3 \text{ m}, Z = f = 1.5 \text{ m}$ )

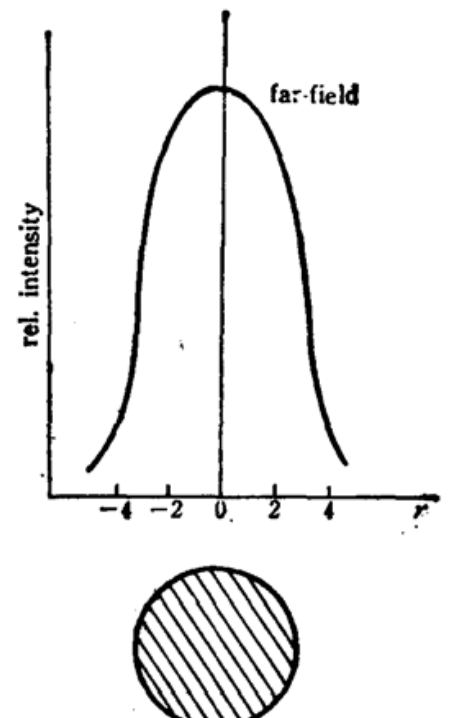


Fig. 5 Output intensity and facula of compound cavity  
( $w_0/a = 0.55, f = 1.1 \text{ m}, R = 2f = 2.2 \text{ m}, Z = f = 1.1 \text{ m}$ )

在腔中放置  $\phi 7 \times 100$  mm 波导管时, 获得稳定的单模输出, 光斑亮度明显提高, 测得输出功率密度为  $60 \text{ W/cm}^2$ , 比普通腔时提高近一倍。图 4 是输出光束的远场光强分布, 具有准  $\text{TEM}_{00}$  模形状。

换用更长的波导管, 激光器具有同样稳定的单模输出。实验还特意放置一根  $\phi 7 \times 1200$  mm 的波导管, 相应总腔长  $L=3100$  mm, 在镜  $M_1$  的  $R=3$  m 条件下, 已使普通平凹腔进入非稳区, 而组合腔仍能稳定单模输出, 这也证实了上述的“组合腔”的运转机理。

作为比较, 进行了第二组  $w_0/a=0.55$  的取值实验, 采用相同尺寸的  $\phi 7 \times 100$  mm 波导管。相应共焦参量  $f$  的取值为  $1.1$  m, 间距  $z=f=1.1$  m, 反射镜曲率半径  $R=2.2$  m, 在其它条件不变的情况下, 观察到激光器输出功率比第一组  $w_0/a=0.6435$  值时有明显增强, 并且仍具有相似的远场光强的准基模分布和均匀的光斑形状(见图 5)。实验还分别测量了两种  $w_0/a$  取值情况下的自由空间增益区中的振荡模体积, 观察到, 在镜  $M_1$  与放电管  $D$  的布窗之间的光斑尺寸都大于预算的  $\text{TEM}_{00}$  模尺寸, 并且  $w_0/a=0.55$  时的光斑尺寸明显大于  $w_0/a=0.6435$  时的光斑尺寸, 与理论分析相符。

我们关于组合腔的研究尚是初期的。事实上, 组合腔输出特性除与参量  $w_0/a$  有关外, 还密切相关于其它的结构参数。例如, 采用“波导/自由空间”混杂非稳腔构型<sup>[9,10]</sup>, 就可望有更大的激活区的振荡模体积和输出功率。进行更深入的研究, 总可以由理论计算和实验研究找到最合适的腔结构参量, 以获得更好的输出特性。这是我们正在进行的工作。可以预言, 组合腔构型将在包括固体、气体、液体和半导体在内的各类激光器中得到推广和应用。

### 参 考 文 献

- 1 P. W. Smith, *Appl. Phys. Lett.*, **19**, 132(1971)
- 2 J. J. Degnan *et al.*, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-9**, 901(1973)
- 3 R. Gerlach *et al.*, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-20**, 948(1984)
- 4 A. N. Chester *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **21**, 576(1972)
- 5 R. L. Abrams *et al.*, *Appl. Opt.*, **13**, 2117(1974)
- 6 马养武, 中国激光, **15** (4), 221(1988)
- 7 S. R. Baroué, *Appl. Opt.*, **6**, 861(1967)
- 8 V. G. Roper, *Opt. Laser Tech.*, **8**, 13(1976)
- 9 K. M. Abramski *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **54**, 1833(1989)
- 10 P. E. Jackson *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **54**, 1950(1989)