

法布里-珀罗腔对相位噪声测量的影响*

张 云 张天才 李廷鱼 谢常德
(山西大学光电研究所, 太原 030006)

摘 要 从理论上讨论了通过法布里-珀罗腔将输入场的相位噪声转换为强度噪声的过程, 分析了腔参数对输入场相位噪声测量的影响, 并对自由运转时单模量子阱激光器相位噪声进行了测量。

关键词 相位噪声, 强度噪声, 法布里-珀罗腔。

1 引 言

相位噪声是激光器的重要指标之一。随着光通信工程的发展, 激光器大量用于长距离相干光通信和相干光学测量^[1]等方面, 特别是近几年来半导体激光器在光与原子相互作用方面的应用^[2], 相位噪声由于在许多方面可以与强度起伏耦合而给通讯测量等带来大量噪声而引起人们的关注^[3]。相位噪声不能直接测量, 人们总是通过各种转换方法, 间接地测量相位噪声^[4]。实验上, 一般通过法布里-珀罗腔^[5]失谐的方法, 将相位噪声转化为强度噪声进行测量。然而选择什么样的腔才能真实反映激光器的相位噪声是十分关键的。本文采用半经典的方法^[6]讨论了通过法布里-珀罗腔将场的相位噪声转换为强度噪声的过程以及腔参数对输入场相位噪声测量的影响。并在此基础上, 通过实验对单模量子阱半导体激光器的相位噪声进行了测量。

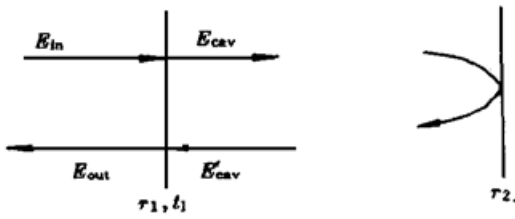
2 理论依据

考虑如图1所示的理论模型, 一束光注入法布里-珀罗腔, 其入射镜对振幅的反射系数和透射系数分别为 r_1 和 t_1 , 理想情况下满足 $r_1^2 + t_1^2 = 1$, 输出镜振幅反射系数为 r_2 。设 E_{in} 和 E_{out} 分别是输入场和输出场, E_{cav} 和 E'_{cav} 分别是入射和即将出射时的内腔场。由输入-输出关系, 有:

$$\left. \begin{aligned} t_1 E_{in} &= E_{cav} - r_1 E'_{cav}, \\ E_{out} &= t_1 E'_{cav} - r_1 E_{in}, \\ E'_{cav} &= r_2 E_{cav} \exp(-i\phi), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

* 国家青年科学基金(批准号: 19504008)、教育部优秀青年教师基金及山西省青年学术带头人基金的资助课题。

收稿日期: 1998-11-04; 收到修改稿日期: 1999-01-11



式中 ϕ 是中心频率为 ω 的光在腔中来回一周的相位延迟。

应用半经典理论, 可将场写为:

$$E = \bar{E} + \delta E, \quad (2)$$

其中 \bar{E} 为场的平均值, δE 为场的起伏。由(1)式, 可得内腔场、输出场与输入场的关系:

Fig. 1 Diagram of theoretical model of a phase-amplitude converter

$$\bar{E}_{\text{cav}} = \frac{t_1}{1 - r_1 r_2 \exp(-i\phi)} \bar{E}_{\text{in}}, \quad (3)$$

$$E_{\text{out}} = t_1 r_2 \bar{E}_{\text{cav}} \exp(-i\phi) - r_1 E_{\text{in}} = \frac{t_1^2 r_2 \exp(-i\phi)}{1 - r_1 r_2 \exp(-i\phi)} E_{\text{in}} - r_1 E_{\text{in}} = \frac{r_2 \exp(-i\phi) - r_1}{1 - r_1 r_2 \exp(-i\phi)} E_{\text{in}}, \quad (4)$$

由此可得:

$$|E_{\text{cav}}| = \left\{ \frac{t_1^2}{[1 - r_1 r_2 \exp(-i\phi)][1 - r_1 r_2 \exp(i\phi)]} \right\}^{1/2} |E_{\text{in}}| = \frac{t_1}{\sqrt{1 + r_1^2 r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos \phi}} |E_{\text{in}}|, \quad (5)$$

$$|E_{\text{out}}| = \left\{ \frac{[r_2 \exp(-i\phi) - r_1][r_2 \exp(i\phi) - r_1]}{[1 - r_1 r_2 \exp(-i\phi)][1 - r_1 r_2 \exp(i\phi)]} \right\}^{1/2} |E_{\text{in}}| = \frac{\sqrt{r_1^2 + r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos \phi}}{\sqrt{1 + r_1^2 r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos \phi}} |E_{\text{in}}|. \quad (6)$$

引入变量^[7] p 、 q , 它们分别正比于光场 E 的强度和相位起伏的傅里叶分量:

$$\left. \begin{aligned} p &= \delta e(\omega) + \delta e^*(-\omega), \\ q &= -i[\delta e(\omega) - \delta e^*(-\omega)], \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中 $\delta e(\omega)$ 是光场波动 $\frac{E^* \delta E(\omega)}{|E|}$ 的傅里叶分量。

对(1)式进行傅里叶变换, 有:

$$\left. \begin{aligned} \delta E_{\text{cav}}(\Omega) &= \frac{t_1}{1 - r_1 r_2 \exp[-i(\phi - \Omega)]} \delta E_{\text{in}}(\Omega), \\ \delta E_{\text{out}}(\Omega) &= t_1 r_2 \delta E_{\text{cav}}(\Omega) \exp[-i(\phi - \Omega)] - r_1 \delta E_{\text{in}}(\Omega) = \\ &= \frac{t_1^2 r_2 \exp[-i(\phi - \Omega)]}{1 - r_1 r_2 \exp[-i(\phi - \Omega)]} \delta E_{\text{in}}(\Omega) - r_1 \delta E_{\text{in}}(\Omega) = \\ &= \frac{r_2 \exp[-i(\phi - \Omega)] - r_1}{1 - r_1 r_2 \exp[-i(\phi - \Omega)]} \delta E_{\text{in}}(\Omega), \\ \delta E'_{\text{cav}}(\Omega) &= r_2 \exp[-i(\phi - \Omega)] \delta E_{\text{cav}}(\Omega), \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中 Ω 为归一化分析频率, 对 Ω 而言, 光在腔中一次来回的相位延迟为 $-(\phi - \Omega)$ 。由(5)式、(6)式和(8)式可以得出:

$$\begin{aligned} \delta e_{\text{cav}}(\Omega) &= \frac{E_{\text{cav}}^*}{|E_{\text{cav}}|} \delta E_{\text{cav}}(\Omega) = \\ &= \frac{E_{\text{cav}}^*}{E_{\text{in}}^*} \frac{|E_{\text{in}}|}{|E_{\text{cav}}|} \frac{\delta E_{\text{cav}}(\Omega)}{\delta E_{\text{in}}(\Omega)} \frac{E_{\text{in}}^*}{|E_{\text{in}}|} \delta E_{\text{in}}(\Omega) = \end{aligned}$$

$$\frac{t_1}{1 - r_1 r_2 \exp(i\phi)} \frac{\sqrt{1 + r_1^2 r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos \phi}}{t_1} \frac{t_1}{1 - r_1 r_2 \exp[-i(\phi - \Omega)]} \delta e_{in}(\Omega) = \sqrt{1 + r_1^2 r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos \phi} \frac{t_1}{1 - r_1 r_2 \exp(i\phi)} \frac{1}{1 - r_1 r_2 \exp[-i(\phi - \Omega)]} \delta e_{in}(\Omega), \quad (9)$$

$$\delta e_{out}(\Omega) = \frac{E_{out}^*}{|E_{out}|} \delta E_{out}(\Omega) =$$

$$\frac{E_{out}^*}{E_{in}^*} \frac{|E_{in}|}{|E_{out}|} \frac{\delta E_{out}(\Omega)}{\delta E_{in}(\Omega)} \frac{E_{in}^*}{|E_{in}|} \delta E_{in}(\Omega) =$$

$$\frac{r_2 \exp(i\phi) - r_1}{1 - r_1 r_2 \exp(i\phi)} \frac{\sqrt{1 + r_1^2 r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos \phi}}{\sqrt{r_1^2 + r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos \phi}} \frac{r_2 \exp[-i(\phi - \Omega)] - r_1}{1 - r_1 r_2 \exp[-i(\phi - \Omega)]} \delta e_{in}(\Omega) \quad (10)$$

由此可以得出内腔场、输出场与输入场起伏之间的关系:

$$p_{cav}(\Omega) = \delta e_{cav}(\Omega) + \delta e_{cav}(-\Omega) =$$

$$\begin{aligned} & \sqrt{1 + r_1^2 r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos \phi} \left\{ \frac{1}{1 - r_1 r_2 \exp(i\phi)} \frac{1}{1 - r_1 r_2 \exp[-i(\phi - \Omega)]} \times \right. \\ & \left. t_1 \delta e_{in}(\Omega) + \frac{1}{1 - r_1 r_2 \exp(-i\phi)} \frac{1}{1 - r_1 r_2 \exp[i(\phi + \Omega)]} t_1 \delta e_{in}(-\Omega) \right\} = \\ & \frac{1}{2} \sqrt{1 + r_1^2 r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos \phi} \left\{ \frac{1}{1 - r_1 r_2 \exp(i\phi)} \frac{1}{1 - r_1 r_2 \exp[-i(\phi - \Omega)]} + \right. \\ & \left. \frac{1}{1 - r_1 r_2 \exp(-i\phi)} \frac{1}{1 - r_1 r_2 \exp[i(\phi - \Omega)]} \right\} t_1 p_{in} + \\ & \frac{i}{2} \sqrt{1 + r_1^2 r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos \phi} \left\{ \frac{1}{1 - r_1 r_2 \exp(i\phi)} \frac{1}{1 - r_1 r_2 \exp[-i(\phi - \Omega)]} - \right. \\ & \left. \frac{1}{1 - r_1 r_2 \exp(-i\phi)} \frac{1}{1 - r_1 r_2 \exp[i(\phi + \Omega)]} \right\} t_1 q_{in}, \quad (11) \end{aligned}$$

$$q_{cav}(\Omega) = -i[\delta e_{cav}(\Omega) - \delta e_{cav}(-\Omega)] =$$

$$\begin{aligned} & -i \sqrt{1 + r_1^2 r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos \phi} \left\{ \frac{1}{1 - r_1 r_2 \exp(i\phi)} \frac{1}{1 - r_1 r_2 \exp[-i(\phi - \Omega)]} \times \right. \\ & \left. t_1 \delta e_{in}(\Omega) - \frac{1}{1 - r_1 r_2 \exp(-i\phi)} \frac{1}{1 - r_1 r_2 \exp[i(\phi + \Omega)]} t_1 \delta e_{in}(-\Omega) \right\} = \\ & \frac{-i}{2} \sqrt{1 + r_1^2 r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos \phi} \left\{ \frac{1}{1 - r_1 r_2 \exp(i\phi)} \frac{1}{1 - r_1 r_2 \exp[-i(\phi - \Omega)]} - \right. \\ & \left. \frac{1}{1 - r_1 r_2 \exp(-i\phi)} \frac{1}{1 - r_1 r_2 \exp[i(\phi - \Omega)]} \right\} t_1 p_{in} + \\ & \frac{1}{2} \sqrt{1 + r_1^2 r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos \phi} \left\{ \frac{1}{1 - r_1 r_2 \exp(i\phi)} \frac{1}{1 - r_1 r_2 \exp[-i(\phi - \Omega)]} + \right. \\ & \left. \frac{1}{1 - r_1 r_2 \exp(-i\phi)} \frac{1}{1 - r_1 r_2 \exp[i(\phi + \Omega)]} \right\} t_1 q_{in}, \quad (12) \end{aligned}$$

$$p_{out}(\Omega) = \delta e_{out}(\Omega) + \delta e_{out}(-\Omega) =$$

$$\frac{1}{2} \sqrt{\frac{1 + r_1^2 r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos \phi}{r_1^2 + r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos \phi}} \left\{ \frac{r_2 \exp(i\phi) - r_1}{1 - r_1 r_2 \exp(i\phi)} \frac{r_2 \exp[-i(\phi - \Omega)] - r_1}{1 - r_1 r_2 \exp[-i(\phi - \Omega)]} + \right.$$

$$\frac{r_2 \exp(-i\phi) - r_1}{1 - r_1 r_2 \exp(-i\phi)} \frac{r_2 \exp[i(\phi + \Omega)] - r_1}{1 - r_1 r_2 \exp[i(\phi + \Omega)]} \} p_{in}(\Omega) +$$

$$\frac{i}{2} \sqrt{\frac{1 + r_1^2 r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos \phi}{r_1^2 + r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos \phi}} \left\{ \frac{r_2 \exp(i\phi) - r_1}{1 - r_1 r_2 \exp(i\phi)} \frac{r_2 \exp[-i(\phi - \Omega)] - r_1}{1 - r_1 r_2 \exp[-i(\phi - \Omega)]} - \right.$$

$$\left. \frac{r_2 \exp(-i\phi) - r_1}{1 - r_1 r_2 \exp(-i\phi)} \frac{r_2 \exp[i(\phi + \Omega)] - r_1}{1 - r_1 r_2 \exp[i(\phi + \Omega)]} \right\} q_{in}(\Omega), \quad (13)$$

$$q_{out}(\Omega) = -i[\delta e_{out}(\Omega) - \delta e_{out}(-\Omega)] =$$

$$-\frac{i}{2} \sqrt{\frac{1 + r_1^2 r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos \phi}{r_1^2 + r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos \phi}} \left\{ \frac{r_2 \exp(i\phi) - r_1}{1 - r_1 r_2 \exp(i\phi)} \frac{r_2 \exp[-i(\phi - \Omega)] - r_1}{1 - r_1 r_2 \exp[-i(\phi - \Omega)]} - \right.$$

$$\left. \frac{r_2 \exp(-i\phi) - r_1}{1 - r_1 r_2 \exp(-i\phi)} \frac{r_2 \exp[i(\phi + \Omega)] - r_1}{1 - r_1 r_2 \exp[i(\phi + \Omega)]} \right\} p_{in}(\Omega) +$$

$$\frac{1}{2} \sqrt{\frac{1 + r_1^2 r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos \phi}{r_1^2 + r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos \phi}} \left\{ \frac{r_2 \exp(i\phi) - r_1}{1 - r_1 r_2 \exp(i\phi)} \frac{r_2 \exp[-i(\phi - \Omega)] - r_1}{1 - r_1 r_2 \exp[-i(\phi - \Omega)]} + \right.$$

$$\left. \frac{r_2 \exp(-i\phi) - r_1}{1 - r_1 r_2 \exp(-i\phi)} \frac{r_2 \exp[i(\phi + \Omega)] - r_1}{1 - r_1 r_2 \exp[i(\phi + \Omega)]} \right\} q_{in}(\Omega), \quad (14)$$

这里只关心从腔反射输出场的功率谱 S_I^{out} ，由于 p_{in} 、 q_{in} 是两个相互独立的随机变量，则有：

$$S_I^{out} = \left| \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1 + r_1^2 r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos \phi}{r_1^2 + r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos \phi}} \left\{ \frac{r_2 \exp(i\phi) - r_1}{1 - r_1 r_2 \exp(i\phi)} \frac{r_2 \exp[-i(\phi - \Omega)] - r_1}{1 - r_1 r_2 \exp[-i(\phi - \Omega)]} + \right. \right.$$

$$\left. \frac{r_2 \exp(-i\phi) - r_1}{1 - r_1 r_2 \exp(-i\phi)} \frac{r_2 \exp[i(\phi + \Omega)] - r_1}{1 - r_1 r_2 \exp[i(\phi + \Omega)]} \right\} \right|^2 |p_{in}|^2 +$$

$$\left| \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1 + r_1^2 r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos \phi}{r_1^2 + r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos \phi}} \left\{ \frac{r_2 \exp(i\phi) - r_1}{1 - r_1 r_2 \exp(i\phi)} \frac{r_2 \exp[-i(\phi - \Omega)] - r_1}{1 - r_1 r_2 \exp[-i(\phi - \Omega)]} - \right. \right.$$

$$\left. \frac{r_2 \exp(-i\phi) - r_1}{1 - r_1 r_2 \exp(-i\phi)} \frac{r_2 \exp[i(\phi + \Omega)] - r_1}{1 - r_1 r_2 \exp[i(\phi + \Omega)]} \right\} \right|^2 |q_{in}|^2. \quad (15)$$

由上式可以看出：通过腔转换装置，输出光的强度噪声既包含输入光的强度噪声又包含输入光的相位噪声。为进一步说明这一过程，看一个具体的例子。如假设半导体激光器(LD)的强度噪声在散粒噪声基准左右^[8](即 $|p_{in}|^2 = 1$)，相位噪声为其强度噪声的 30 倍(即 $|q_{in}|^2 = 30$)，则对于射频频率 15 MHz(对应 $\Omega = 0.063$)、 $r_1 = 0.95$ 、 $r_2 = 1$ 来说，由半导体激光器的强度起伏和相位起伏分别转换的噪声谱如图 2 所示。可以看出：当腔共振时，由半导体激光器的强度起伏转换的噪声最大($= 1$)，而由其相位起伏转换的噪声最小(≈ 0)，这样，腔的反射光噪声主要为半导体激光器的强度起伏。当腔稍微失谐时，由半导体激光器的强度起伏转换的噪声急剧减小，而由相位起伏转换的噪声急剧增大，直到由半导体激光器的强度起伏转换的噪声减至最小(≈ 0)，由相位起伏转换的噪声

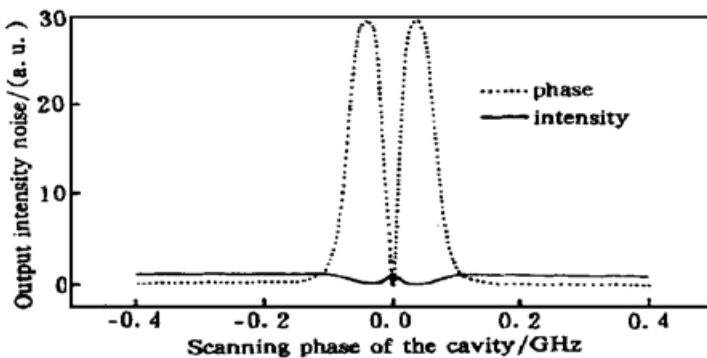


Fig. 2 The cavity output intensity noise due to the input intensity and phase noise respectively as a function of the scanning phase. The finesse of the cavity is 60, the FSR is 750 MHz, the reference frequency is 15 MHz

急剧增大，直到由半导体激光器的强度起伏转换的噪声减至最小(≈ 0)，由相位起伏转换的噪声

增至最大, 这时总的输出的噪声就仅由输入光的相位噪声决定。当腔的失谐再增大时, 由半导体激光器的强度起伏转换的噪声又在快速增大, 由相位起伏转换的噪声又快速减小, 在这个过程中, 腔的反射光噪声主要为半导体激光器的一部分相位起伏。当激光的频率远离腔的共振频率时, 绝大部分光反射回去, 这时由半导体激光器的强度起伏转换的噪声为1, 而由其相位起伏转换的噪声几乎为0, 腔的反射光的噪声主要是半导体激光器的强度起伏。如果周期性地扫描腔的长度, 由这两种噪声共同转换的腔的反射光的噪声特性作周期性地变化, 这样就实现了相位-振幅的转换。

1) 输入镜反射率对测量结果的影响

在(15)式中, 依旧取 $|p_{in}|^2 = 1$, $|q_{in}|^2 = 30$, 射频频率为15 MHz, 则对 $r_2^2 = 0.98$ 来说, 得到反射输出噪声与 r_1^2 的关系曲线, 如图3所示。从图中可看到, r_2^2 确定以后, 当 $r_1^2 < r_2^2$ 时, 输出噪声随着 r_1^2 的增大而增大; 当 $r_1^2 = r_2^2$, 即两镜的反射率相等时, 输出噪声最大; $r_1^2 > r_2^2$ 时, 输出噪声会随着 r_1^2 的增大急剧减小。图中表示的A 的值随着 r_1^2 逐渐趋近于 r_2^2 而趋于零。当两镜的反射率绝对相等时, A 等于零。而事实上, 实验中都不可能做到绝对的对称腔(两镜反射率绝对相等), 因此所观察到的反射输出噪声图都相似于曲线 a 或 c 的形式。

2) 最大可测量相位噪声随输出镜反射率 r_2^2 的变化

给定射频频率以后(假设仍为15 MHz), 由(15)式可以得出最大可测量相位噪声与输出镜反射率 r_2^2 的关系图, 如图4所示。从图中可以看出, 随着输出镜反射率的提高, 所能测到的相位噪声的比例逐渐增大, 原则上只有理想情况下 ($r_2^2 = 1$), 才能真正测到输入场的相位噪声。

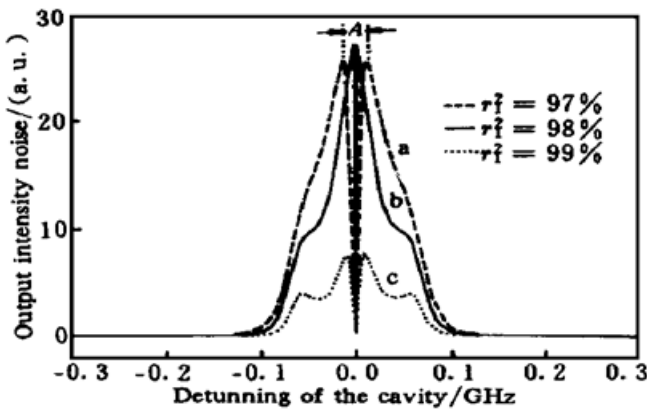


Fig. 3 The output intensity noise power at 15 MHz Vs the input mirror reflectivity when the output mirror reflectivity is fixed

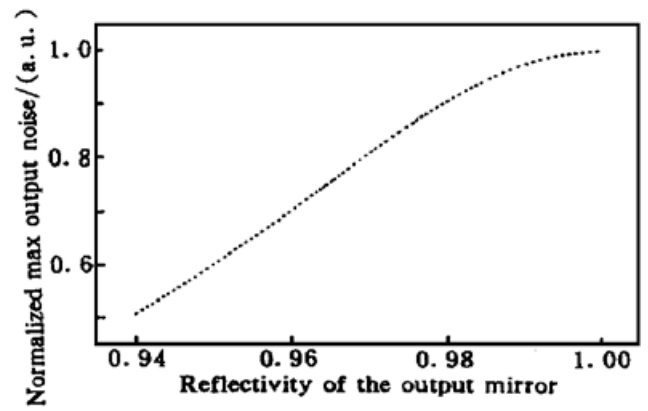


Fig. 4 The maximum output noise as a function of the output mirror reflectivity

3) 宽带分析频率对腔的要求

当要测一个宽带分析范围内的输入场的相位噪声时, 对于给定的一个法布里-珀罗腔, 不同分析频率所能测到的相位噪声比例是不同的。

图5给出了三种腔分析频率与最大所测相位噪声比例的关系。从图中可以看出, 随着分析频率的增大, 所能测到的相位噪声比例也随之增大, 在高频段(高于50 MHz), 即使腔镜的反射率较小, 所测到的结果也基本上可以反映输入场的相位噪声; 但如果希望在低频段(低于10 MHz)也有好的测量结果, 对

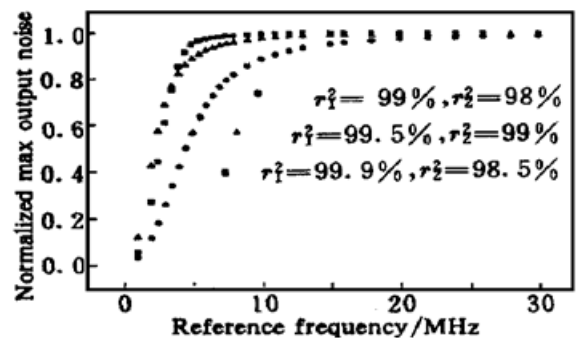


Fig. 5 The output intensity noise vs the reference frequency with the different phase -amplitude converter

于腔镜的选择就非常严格。腔镜的反射率稍差一点,测量结果就有很大差别。因此,在测量宽带的相位噪声时,尽量选取高精度的腔,尤其是输出镜的反射率应尽可能高。因此,在测光场的相位噪声时,必须合理选择腔镜的反射率。

3 实验测量和结果

测量相位噪声的实验装置如图6所示。所用的半导体激光器是SDL公司生产的单模量子阱半导体激光器,波长为850 nm,激光器发出的

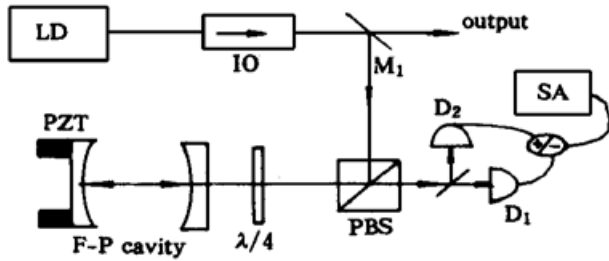


Fig. 6 Experimental setup

部分光经分束镜 M_1 分束,利用棱镜反射 s 偏振光,透射 p 偏振光的特性,小部分 s 偏振光经棱镜反射和 $\lambda/4$ 波片进入相位-振幅转化法布里-珀罗腔,腔的输出光再经过 $\lambda/4$ 波片变为 p 偏振光透过棱镜后进入平衡探测器^[5]。所得结果最终输入频谱分析仪(型号为 HP5890D)进行测量。

测得了在单频状态下激光器自由运转时相位噪声随腔的失谐量的变化如图7所示,其中

曲线 a 表示激光器自由运转时的相位噪声,曲线 c 是标准量子极限(SNL)^[9],曲线 d 为电子学噪声。测量的中心频率为 15 MHz,频率展宽为 0. 分辨率带宽为 10 KHz,视频带宽为 1 kHz。曲线 a 中的最高点为半导体激光器的相位噪声,最低处为半导体激光器的强度噪声。与标准量子极限相比,它的强度起伏在标准量子极限附近,它的相位起伏很大,比标准量子极限高 45 dB 左右。图7中曲线 b 为理论拟合结果,实验所观测的结果由测试法布里-珀罗腔和入射场的相位起伏确定。实验中腔参数为:输出镜为高反射镜, $r_2^2 = 0.999$,输入镜的反射率 $r_1^2 = 0.985$,在大于 4 MHz 的频带内所测得的结果(大于 80%)已非常好地反应输入场的相位噪声;当射频频率为 15 MHz(对应 $\Omega = 0.063$)时,强度噪声为

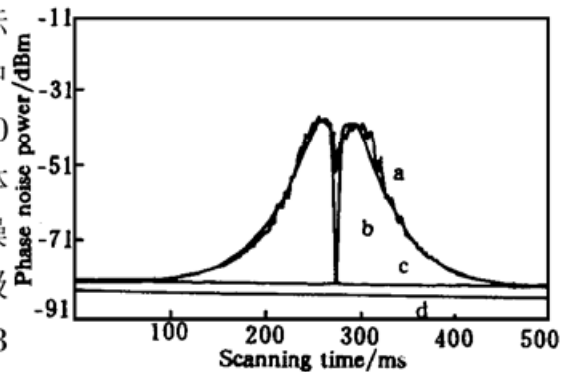


Fig. 7 LD's phase noise of single frequency at 15 MHz. (a) Experimental result; (b) Theoretical result; (c) Shot noise limit; (d) Electric noise

标准量子极限(-83 dB),相位噪声为-38 dB,由(15)式可得到图7中 b 的结果。图中在共振点实验上没能达到最低点,曲线的不对称以及噪声起伏是由探测器的响应、压电陶瓷的伸长变化以及谱仪本身测试条件影响的结果。

结 论 在测量光场的相位噪声时,必须合理选择法布里-珀罗腔的参数,要想所测得的结果非常好地反应输入场的相位噪声,必须选择高反射率的输出镜;一般情况下,腔质量对高频段相位噪声测量的影响不大,要想很好地测定低频段的相位噪声,必须选择高精度的腔。

参 考 文 献

- [1] Yamamoto Y, Kimura T. Conherent optical fiber transmission system. *IEEE. J. Quant. Electron.*, 1981, **QE-17**(6) ·919~ 934

- [2] Wieman C E, Hollberg L. Using diode laser for atomic physics. *Rev. Sci. Instrum.*, 1991, **62**(1) ·1~ 19
- [3] 张天才, 李廷鱼, 谢常德等. 自锁定半导体激光器中强度压缩及相位噪声的减小. *物理学报*, 1998, **47**(9) ·1498~ 1502
- [4] Camparo J C. Conversion of laser phase noise to amplitude noise in an optically thick vapor. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1998, **15**(3) ·1177~ 1186
- [5] Zhang T C, Poizat J P, Grelu P *et al.*. Quantum noise of free-running and externally-stabilized laser diodes. *Quantum and Semiclassical Optics.*, 1995, **7**(5) ·601~ 613
- [6] Reyand S, Heidmann A. A semiclassical linear input output transformation for quantum fluctuations. *Opt. Commun.*, 1989, **71**(3, 4) ·209~ 214
- [7] Grangier P, Roch J F. Single-side-band optical quantum non-demolition measurement. *Opt. Commun.*, 1991, **83**(3, 4) ·269~ 277
- [8] Zhang Tiancai, Hou Zhanjia, Wang Junmin *et al.*. Generation of intensity squeezing in laser diodes by weak cavity feedback. *Chin. Phys. Lett.*, 1996, **13**(10) ·734~ 737
- [9] 郭光灿. 量子光学, 北京: 高等教育出版社, 1990. 195~ 198

Phase Noise Measurement by F-P Cavity

Zhang Yun Zhang Tiancai Li Tingyu Xie Changde
(*Institute of Opto-Electronics of Shanxi University, Taiyuan 030006*)
(Received 4 November 1998; revised 11 January 1999)

Abstract The principle of measurement of the phase noise by the means of phase-amplitude conversion via F-P cavity is theoretically analysed. The influence of the cavity parameters on the measurement is discussed. The theoretical analyses are used as valuable references for the design of experiment. The phase noise of LD is measured experimentally.

Key words phase noise, intensity noise, F-P cavity.