

# 半导体激光器激活层中的四波混频和相位共轭光的发生\*

张 耐

(上海师范大学实验中心, 上海 200234)

## 提 要

本文提出了一种从半导体激光器中发生和检测相位共轭光的新方法, 并用  $1.3 \mu\text{m}$  分布反馈半导体激光器作了实验验证。本方法不仅可以用来发生相位共轭光, 还可以用来研究振荡运转中的激光激活介质的非线性光学特性。

关键词: 半导体激光器, 四波混频、相位共轭。

## 一、前 言

1985年以来 Nakajima 等<sup>[1~3]</sup>相继报道了在半导体激光器或半导体激光行波放大器的激活层中实现四波混频和发生相位共轭光的研究结果。但这些研究的共同特点是: 采用近简并四波混频, 并从频域上来检测相位共轭光。而最能代表相位共轭光特点的时间-空间反转特性在这些研究中都没有得到演示作用。此外, 他们的实验装置也较复杂。本文提出一种新的由简并四波混频在半导体激光器激活层中发生和检测相位共轭光的方法。采用本方法不仅整个实验装置十分简单, 而且还可以充分演示出相位共轭光的时间-空间反转特性, 所以可精确地测定相位共轭光<sup>[4]</sup>。另外本方法也为测定半导体激光器激活介质的非线性光学参数提供了一个非常方便而实用的手段。

## 二、基本 原 理

图1是实验的基本原理图, 图1所示的激光器共振腔内的驻波场构成了四波混频中的泵浦光电场  $E_{0+}$  和  $E_{0-}$ 。激光器的输出光电场通过分光板  $BS$  再经反射镜  $M_1$  反射后有一部分又重新注入到激光器共振腔内成为探测光电场  $E_p$ 。当反射镜  $M_1$  沿输出光束的轴线方向以一定的速度  $v$  作匀速移动时  $E_p$  就附加上了一个相位因子  $\exp[i\phi(t)]$  ( $\phi(t) = 2kvt$ )。  $E_p$  在腔内通过四波混频诱发出一个带有附加相因子  $\exp[-i\phi(t)]$  的相位共轭光电场  $E_c$ 。反射镜  $M_1$ ,  $M_2$  和分光板  $BS$  全体又构成了一个史密斯型干涉仪。在干涉仪的光束出射处, 略去微弱小量以后, 有如下几个主要的光电场成分射入到检测器上



以通过对检测器的输出信号进行频谱分析而鉴别出来。另外(1)~(5)式中除了相位共轭光振幅反射系数  $r_0$  以外都是已知量,所以若将  $I_0$  作为参考信号就可以从  $I_{2\phi}$  的大小推出  $r_0$  和其他有关的非线性光学常数。

### 三、实验装置

本研究的实验装置和图 1 所示的原理图一致。所用光源是一个  $1.3 \mu\text{m}$  单模 InGaAsP (DC-PBH) 直流-双异质结构分布反馈半导体激光器。史密斯型干涉仪的两反射镜  $M_1$  和  $M_2$  的反射率都为 95%。实验中注入到激光器激活层中的探测光功率小于  $3 \mu\text{W}$ , 不到其输出功率的 1%。 $M_1$  的移动速度为  $0.28 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 对应的  $I_0$  的频率为 4.3 Hz。激光器的输出稳定度另用检测器进行监视,在有探测光注入的情况下,输出扰动远小于 1%。激光器的线宽则用法布里-珀罗干涉仪进行观察,因采用了具有分布反馈构造的器件,在有探测光注入时激光器仍单模运转。当注入功率接近  $3 \mu\text{W}$  时,线宽展宽到 1 GHz。距离  $L_1$  和  $L_3$  在实验中分别取 8 cm 和 12 cm,而  $L_2$  则作为一个可变参数,使之在 6~12 cm 之间变化,检测器的输出信号被采集入计算机作频谱分析的实时处理,每次采集数据的时间间隔为 2~4 秒。

### 四、实验结果

在图 1 的实验配置下检测器输出信号电流波形的一个观察例如图 2 所示;图 3 是图 2 的信号波形被去掉了直流成分后用最大熵法(MEM)进行频谱分析后所得到的频谱强度分布图。图中出现 2 个频谱信号成分:一个在 4.3 Hz 处另一个在前者的两倍频处。它们分别对应于前节所述的  $I_0$  和  $I_{2\phi}$ 。从图 3 可以看出,  $I_{2\phi}$  的强度约为  $I_0$  的 2 倍。而在实验中测到的其他频谱成分都在  $I_0$  的 1% 以下。 $I_{2\phi}$  之所以这样强是因为实验所配置的光路构成了一个有利于带有相因子  $\exp[-i\phi(t)]$  的光电场和带有相因子  $\exp[-i\phi(t)]$  的光电场发生干涉的几何组态。由于相因子  $\exp[-i\phi(t)]$  是附在相位共轭光电场上的,所以上面结果证实了相位共轭光的发生。 $I_{2\phi}$  这样强也表明了半导体激光器激活层的相位共轭光反射系数

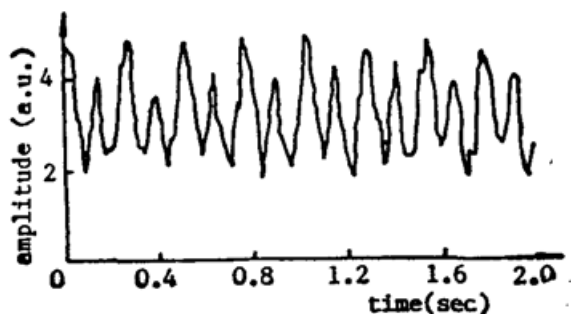


Fig. 2 A typical output signal waveform from the interferometer by using the experimental setup as Fig. 1

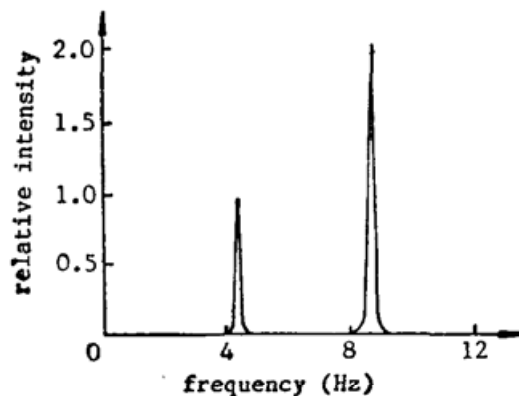


Fig. 3 Spectral density distribution for the detected signal shown in Fig. 2

非常高。本实验实测到的  $R_c$  ( $R_c = |r_c|^2$ ) 的最大值为 160%。

4 图中的小圆圈是频谱强度比  $I_{2\phi}/I_\phi$  随  $L_2$  的大小而变化的测定结果。从图 4 可以看出, 它有随  $L_2$  变长而增大的趋势。

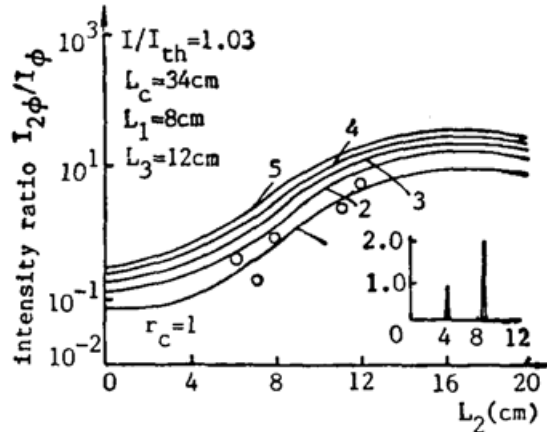


Fig. 4 Measured and calculated intensity ratio  $I_{2\phi}/I_\phi$  as a function of distance  $L_2$ .

For the calculation, the conjugated reflectivity  $r_c$  is taken as the parameter

这种变化趋势是由激光器输出光的有限相干长度所引起的。当  $L_2$  小于 6 cm 时由于实验所用光学系统空间上的限制使测定变得非常困难, 而当  $L_2$  大于 12 cm 时则由于所测到的频谱的分辨率很差, 从而使  $I_{2\phi}/I_\phi$  的比值的可靠性降低, 所以这些测定值就不标出来了。

## 五、数值分析

第二节中的  $I_\phi$  和  $I_{2\phi}$ , 可以写成如下的显式

$$I_\phi = [ |E_1| |E_2| |\tau_{11}^{(1)}(\tau_{12})| + |E_1| |E_3| |\tau_{11}^{(1)}(\tau_{13})| + |E_1| |E_4| |\tau_{11}^{(1)}(\tau_{14})| + |E_1| |E_5| |\tau_{11}^{(1)}(\tau_{15})| ] \cos \phi(t), \quad (7)$$

$$I_{2\phi} = [ |E_2| |E_3| |\tau_{11}^{(1)}(\tau_{23})| + |E_3| |E_4| |\tau_{11}^{(1)}(\tau_{34})| + |E_3| |E_5| |\tau_{11}^{(1)}(\tau_{35})| ] \cos 2\phi(t). \quad (8)$$

在上两式中,  $\tau_{12} = [2(L_1 + L_2)/C]$ ,  $\tau_{13} = \tau_{14} = \tau_{15} = [2(L_1 + L_3)/C]$ ,  $\tau_{23} = [2(L_3 - L_2)/C]$ ,  $\tau_{34} = \tau_{35} = 0$ 。  $\tau_{11}^{(1)}(\tau)$  是复相干度函数, 它可以通过激光器的线宽因子求得。本计算中假设激光器的输出光具有高斯型线宽分布。

利用(7)式和(8)式可以求出  $I_{2\phi}/I_\phi$  值随  $L_2$  的变化情况。计算中输出光的相干长度  $L_c$  作为拟合因子。为了便于与实验作比较, 计算结果作为曲线族标在图 4 上, 曲线族中不同的曲线对应于不同的  $r_c$  值, 而  $L_c$  被设为 34 cm, 计算所得曲线和实验结果符合得相当一致。

本文还将第二节所述的种种经  $BS$ 、 $M_1$  和  $M_2$  多次反射而射入检测器的微弱光信号成分一起考虑进行了数值计算, 结果发现这些信号成分对  $I_\phi$  和  $I_{2\phi}$  及其他频谱成分的贡献极小。这不仅是因为这些信号成分十分小, 而且因为它们所经的光路过长, 和它们相关联的干涉可见度也变得极低所致。所以这时计算所得的强度比  $I_{2\phi}/I_\phi$  值随  $L_2$  变化的曲线与图 4 所示曲线一致。

## 六、讨 论

对半导体激光器激活层内相位共轭光发生的研究,过去因为都是采用探测光频率偏移法,主要是放在探测光失谐特性的探讨上,而对双重波前的发生则从未予以考虑。本文则把非相位共轭光的发生也考虑了进去,对照实验和计算可以看出在本实验中双重波前的发生是存在的。

另外根据本实验所测到的相位共轭光功率反射系数  $R_c$  可以推导出半导体激光器激活层的三次非线性极化系数  $\chi^{(3)}$ , 具体的推导因较冗长,兹不再赘述。

本研究还曾采用过  $1.3 \mu\text{m}$  单模 In GaAsP DO-PBH DBR 型半导体激光器作过同样的实验,并获得了几乎相同的结果。

## 七、结 论

本文首次实现了用史密斯型干涉仪从  $13 \mu\text{m}$  单模分布反馈半导体激光器激活层中发生并检测相位共轭光。这种方法不仅开辟了一条发生相位共轭光的简便而又实用的新途径,而且还可以用来探测半导体激光器激活层的一些重要物理特性。另外本文所提出的实验方法也可用于一般类型的单模激光器来发生相位共轭光和研究振荡运转中激光共振腔内的激活介质的非线性光学特性。

本文实验工作是作者在日本东北大学电气通信研究所完成的。对该所的稻场文男教授、伊藤弘昌副教授的热情支持,新田嘉一君的协助表示深切感谢。

## 参 考 文 献

- [1] H. Nakajima *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1985, **47**, No. 8 (Oct), 769.
- [2] R. Nietzek *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1987, **51**, No. 17 (Nov), 1298.
- [3] K. Inoua *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1987, **51**, No. 14 (Oct), 1051.
- [4] Nai Zhang *et al.*; *IQEC 88, 1988, July Tokyo*; TuF-7.
- [5] N. Tan-no *et al.*; *J. O. S. A. (B)*, 1986, **3**, No. 1 (Jan), 60.

## Four-wave mixing and phase conjugated wave generation in a semiconductor diode laser

ZHANG NAI

*(Central Laboratory, Shanghai Normal University, Shanghai 200234)*

(Received 7 May 1990; revised 13 September 1990)

### Abstract

A new method was proposed for the generation and detection of phase conjugated optical waves from a semiconductor diode laser using a Smith-type interferometer. This method has an advantage to display the spatial as well as temporal information of the generated phase conjugated optical waves. The experimental demonstration was performed by using a 1.3  $\mu\text{m}$  DFB diode laser, and a remarkable agreement was confirmed between experimental and theoretical results. The present method can be generally applied to all kinds of lasers for the generation of phase conjugated waves as well as for the study of their nonlinear optical properties during the laser oscillation.

**Key words:** laser diode, four wave mixing, phase conjugation.