

文章编号: 0258-7025(2005)01-0031-04

发光二极管的时间与空间相干性研究

李俊韬, 朱 健, 王自鑫, 李 鸣, 周建英*

(中山大学光电材料与技术国家重点实验室, 广东 广州 510275)

摘要 由相干度理论和准单色光理论出发研究了发光二极管(LED)的时间相干与空间相干特性,并采用时间分辨为亚飞秒的迈克尔逊干涉仪对 LED 的相干度进行了测量记录。由记录所得的干涉图计算得到 LED 的发射光谱、相干时间及时间相干度;并通过比较其可见度和时间相干度推算出其空间相干度;最后提出由空间相干度计算 LED 发光面积的方法和使用 LED 光源测量材料中超快弛豫过程的可能性。分析了实验中的误差并提出修正方法,为采用 LED 作为稳态与时间分辨光谱光源提供了必要的理论与实验依据。

关键词 激光物理;相干度;迈克尔逊干涉仪;发光二极管;时间相干性;空间相干性

中图分类号 TN 312⁺.8;TN 241 **文献标识码** A

Study of Temporal and Spatial Coherence of Light Emitting Diode

LI Jun-tao, ZHU Jian, WANG Zi-xin, LI Ming, ZHOU Jian-ying

(The State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies,
Sun Yat-sen University, Guangzhou, Guangdong 510275, China)

Abstract The temporal and spatial coherence of light emitting diode (LED) is studied by Michelson interferometer with subfemtosecond time resolution. LEDs' spectral characteristics and coherence time are measured, and their emitting area is estimated by LEDs' interference signal. Systematic errors in the experiments are discussed and the solutions to reduce the errors are suggested. Results show that LED can be applied as a light source for stable and time resolved spectroscopy.

Key words laser physics; degree of coherence; Michelson interferometer; light emitting diode; temporal coherence; spatial coherence

1 引 言

半导体发光二极管(LED)是一种注入式电致发光器件。由于它具有高效率、使用寿命长、抗振动和耐冲击、低紫外线辐射、低放热的特点,可在 50℃ 以下环境中正常工作,以其特殊的光色、体积小、功耗低、可视性高、易实现固体化、响应速度快、亮度高、易和集成电路匹配等优点而在光纤通信、全彩色显示屏、照明光源的开拓应用等方面具有很高的应用价值^[1]。

对于 LED 相干性的研究较少,一般仅笼统指出

LED 为非相干光,对 LED 光谱相干特性缺乏精确的描述。以下由相干度的概念出发,对 LED 的时间相干性和空间相干性进行了测量,希望以此进一步开阔 LED 在稳态与瞬间光谱中的应用范围。

2 相干度概念的引入

光束叠加时会产生两种极端效果,第一种情形是振幅叠加,形成干涉图样,这种情况成为完全相干,第二种情形是强度叠加,观察不到干涉图样,成为完全不相干。在实际情况下,由于光源的特性限

收稿日期:2003-07-03;收到修改稿日期:2004-01-05

基金项目:国家自然科学基金(90201027,10374120)及广东省千百十人才工程资助项目。

作者简介:李俊韬(1980—),男,广州人,中山大学光电材料与技术国家重点实验室硕士研究生,主要从事超快信息光学研究。E-mail:lijuntao@sina.com

* 通信联系人。E-mail:stszjy@zsu.edu.cn

制,光束叠加的特征是居于两者之间的,即部分相干。对于部分相干问题,一般从时间相干性和空间相干性两部分考虑,其中时间相干性比较的是同一点光源而具有一定光程差的光波,空间相干性比较的是空间不同点的光波。

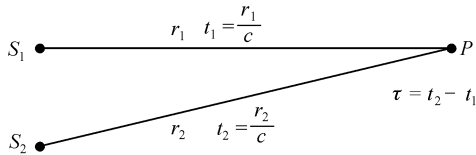


图 1 在 P 点的空间-时间相干

Fig. 1 Temporal-spatial coherence in point P

考虑两束光 $E_1(r_1, t_1)$ 和 $E_2(r_2, t_2)$ 在 P 点部分相干叠加,如图 1, P 点的总光强^[2] 为

$$I_P = I_1 + I_2 + 2 \sqrt{I_1 I_2} \text{Re}\{\gamma_{12}(\tau)\}, \quad (1)$$

其中 $I_1 = |E_1^2|$, $I_2 = |E_2^2|$, E_1, E_2 为 S_1, S_2 在 P 点的场强, $\gamma_{12}(\tau)$ 为互相干度,其下标代表发光点 S_1, S_2 的坐标, τ 为相干时间。 $\gamma_{12}(\tau)$ 值可以分为以下三种情况:

- 1) $|\gamma_{12}(\tau)| \equiv 1$, 完全相干;
- 2) $0 < |\gamma_{12}(\tau)| < 1$, 部分相干;
- 3) $|\gamma_{12}(\tau)| \equiv 0$, 完全不相干。

相干度函数把空间相干性和时间相干性联系在一起,时间相干性可用 $\gamma_{11}(\tau)$ 来描述,空间相干性可用 $\gamma_{12}(0)$ 来描述。一般来说时间相干性和空间相干性不可分开考虑。但对于准单色光根据 Van Cittert-Zernike 定理可作出以下假设^[3]

$$\gamma_{12}(\tau) = \gamma_{11}(\tau)\gamma_{12}(0), \quad (2)$$

即时间和空间相干性可以被分离。其中准单色光的依据是

$$\begin{cases} \Delta\nu/\bar{\nu} \ll 1 \\ \Delta\nu|\tau| \ll 1 \end{cases}, \quad (3)$$

其中 $\Delta\nu$ 为准单色光光谱的带宽, $\bar{\nu}$ 为中心波长频率。对 LED, 其光谱特性为: $\Delta\nu \approx 10^{12}$ Hz, $\bar{\nu} \approx 10^{15}$ Hz, $\tau \approx 50$ fs, 代入公式(3)可得 LED 光源满足准单色光的条件。因此,它的相干度可由公式(2)定义。

此外,可见度 V 与相干度的关系为^[2]

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{2 \sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2} |\gamma_{12}(\tau)|, \quad (4)$$

其中 I_{\max}, I_{\min} 分别表示相邻的亮暗条纹的光强。当 $I_1 = I_2$ 时,可见度等于相干度的模

$$V(\tau) = |\gamma_{12}(\tau)| = |\gamma_{11}(\tau)| \cdot |\gamma_{12}(0)|, \quad (5)$$

LED 没有光学谐振腔,不形成激光,它的荧光发光

仅限于自发辐射。因此其光源是非单色性的,但具有一定的时间相干性;同时 LED 具有一定的发光面积,具有空间相干性。因此以下根据相干度概念对 LED 光源的部分相干性进行研究。

3 实验结果及讨论

3.1 实验装置

测量 LED 相干性的装置如图 2。其中透镜用于把 LED 点光源发出的光聚焦成近平行光进入迈克尔逊干涉系统;探测器使用 S1320 型光电倍增管;He-Ne 激光器用于确定零点,实际测量时关掉激光器,移去 M_4 , 使 LED 光束进入干涉仪;延时器采用 WSM-200 型迈克尔逊干涉仪,测量时使用自行设计的步进马达控制程序控制延时器的移动,其精度为 $0.02 \mu\text{m}$, 对应的时间分辨率为 0.1 fs。当延时器移动到两反射镜 M_1, M_2 到分束器的距离相近时,观察到 LED 干涉条纹从模糊到清晰再到模糊的过程。记录这一过程光强的变化值将得到 LED 光谱的干涉图。另外由于 LED 的光强较小,为了得到光强较大的干涉条纹,应尽量减少传播过程中光强的损失。实验中选用的 LED 为广州市雄业电子厂生产的 204URC 型红色 LED, 其制作材料为 $\text{GaAs}_{0.6}\text{P}_{0.4}/\text{GaP}$, 中心波长为 650 nm, 半波宽度约为 18 nm, 驱动 LED 时使用 20 mA 的恒流源。

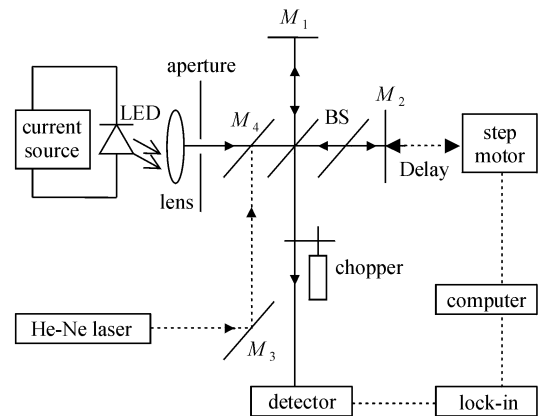


图 2 测量 LED 时间相干性的实验装置图

Fig. 2 Schematic experimental setup for the measurement of the LED temporal coherence

常见 LED 的环氧树脂聚封装采用折射式聚光形式以提高聚光效率和发光强度。但由于加工原因,发射出来的光分布不对称,无法用透镜聚焦成平行光。因此实验中将 LED 表层的环氧树脂磨平抛光,再用透镜聚焦成准平行光。

3.2 时间相干特性研究

在迈克尔逊干涉仪中, 设发射光经分光后两束光的光程差为 d 。对一准单色光, 从干涉条纹最清晰到消失所对应的 d 的变化长度称为相干长度 L_m , 通过推导可得^[4]

$$L_m = \lambda_0^2 / \Delta\lambda, \quad (6)$$

其中 $\Delta\lambda$ 表示准单色光的谱线宽度, λ_0 表示准单色光的中心波长。由此可以得到相干时间为

$$\tau_o = L_m / c = \lambda_0^2 / (c\Delta\lambda), \quad (7)$$

另外根据相干度可采用相干时间更精确的定义^[3]

$$\tau_o = \Delta t = \int_{-\infty}^{+\infty} |\gamma_{11}(\tau)| d\tau = \Sigma |\gamma_{11}(\tau)| \Delta\tau. \quad (8)$$

相干长度和相干时间越长, 说明其相干性越好。对于 He-Ne 激光, 其相干长度可达十几千米, 而由于 LED 的谱线宽度比较宽, 其相干长度和相干时间也相应比较短, 约在微米量级。

得到的光强与延时时间的关系如图 3 所示, 其中干涉强度最大点为延时时间的零点; 小图为零点附近干涉图的放大; 一个周期的平均采样点为 13 个, 时间分辨的测量结果达亚飞秒级。

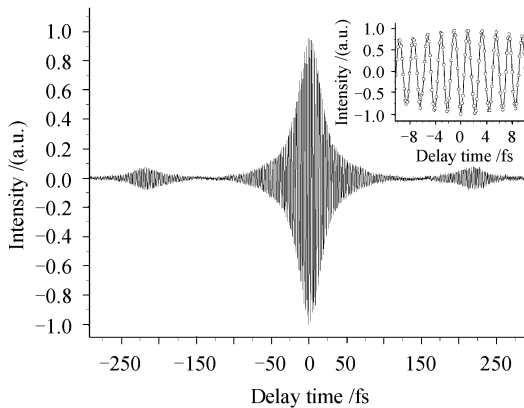


图 3 LED 的干涉信号图

Fig. 3 Interference signal of LED

为验证干涉图的正确性, 对干涉图进行傅里叶变换^[5]后得到的光谱图与使用北京光学仪器厂生产的 WDG30 型光栅单色仪测量的光谱图进行对比, 结果如图 4 所示。测量分辨率都为 4 cm^{-1} , 两者基本一致, 偏差是由于干涉图测量时扫描均匀度不够造成的。由图 4 可见, 对环氧树脂研磨后, LED 的光谱出现多个峰值。这一现象可认为是磨平后的环氧树脂形成 LED 芯片前的一个标准具, 同一波长的光经过标准具多次反射透射后的光束会发生干涉使得 LED 的光谱变化。

将图 3 中干涉信号的 I_{\max} 和 I_{\min} 代入公式(4)可

得到红光 LED 可见度 V 即相干度 $|\gamma_{12}(\tau)|$, 如图 5 虚线所示。如只考虑时间相干性, LED 的时间相干度 $\gamma_{11}(\tau)$ 应为可见度归一化后的值, 其结果如图 5 实线所示。

将图 5 实线所示的时间相干度 $|\gamma_{11}(\tau)|$ 代入公式(7)可得到红光的相干时间为 78.32 fs。而将图 4 中单色仪测得的光谱特性代入公式(8)可得相干时间为 78.49 fs, 两者一致。

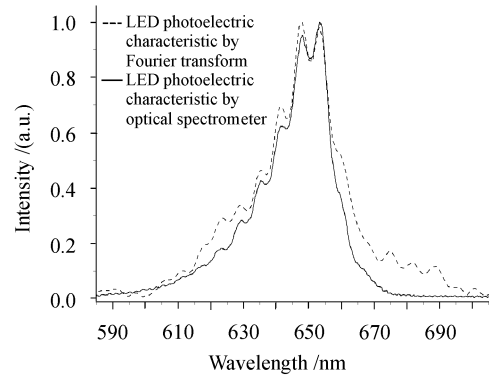


图 4 LED 的光谱特性

Fig. 4 Photoelectric characteristic of LED

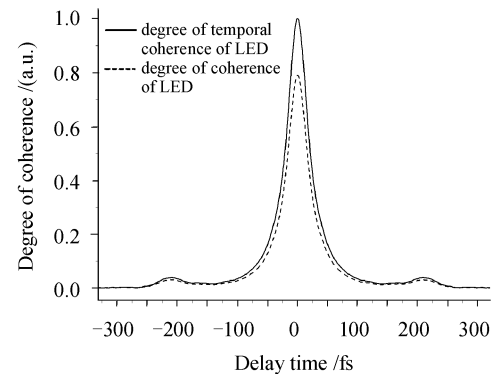


图 5 LED 的相干度

Fig. 5 Degree of coherence of LED

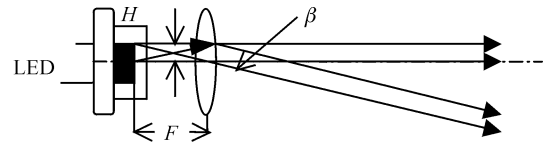


图 6 空间相干度的影响

Fig. 6 Influence of spatial coherence

3.3 空间相干特性研究

图 6 为用透镜准直 LED 光源的示意图。由于光源不是点光源, 因此部分光线准直后仍产生偏离角 β , 从而造成空间相干性的存在。如忽略其他噪声对相干度的影响, 将图 5 中实线代表的 $|\gamma_{11}(\tau)|$ 和

虚线代表的 $|\gamma_{12}(\tau)|$ 值代入公式(5)可得 LED 的空间相干度 $|\gamma_{12}(0)|$ 为 0.79。在干涉仪零点处时间相干度为 1, 因此可得 LED 在此处的总可见度为 0.79, 可见 LED 的空间相干性较好。

同时, 可以由空间相干度出发计算 LED 的发光面积。

如图 6, LED 光源的半导体发光体为一正方形。对于矩形或狭缝光源, 空间相干度可表示为^[4]

$$|\gamma_{12}(0)| = \frac{|\sin(\pi/\bar{\lambda})\beta H|}{(\pi/\bar{\lambda})\beta H}, \quad (9)$$

其中 $\bar{\lambda}$ 为光源的峰值波长, H 为矩形的横向半高宽或狭缝的半高宽, $\beta = H/F$ 为离轴光线的偏离角, F 为准直透镜的焦距。对于红光 LED $\bar{\lambda}$ 为 650 nm, 透镜焦距 $F = 10$ cm, 利用图 5 的可见度和空间相干度计算得到空间相干度 $|\gamma_{12}(0)| = 0.79$ 。将以上数据代入公式(9)得到 $H = 0.15$ mm, 即 LED 的发光体发光面积为 0.3 mm \times 0.3 mm, 该计算值与实际使用的红光 LED 的发光面积相同, 证明以上推导的正确性。

因此, 对于任意未知发光面积的 LED, 都可通过测量准直透镜的焦距和光谱的干涉图, 利用以上的推导, 从相干度的角度出发计算 LED 实际发光面积。

3.4 LED 在超快领域的应用研究

一般脉宽为 100 fs, 中心波长为 800 nm 的飞秒脉冲频谱半宽约为 10 nm^[6], 与 LED 的频谱相似, 它们的自相干特性也应该相似。利用这一特性可以

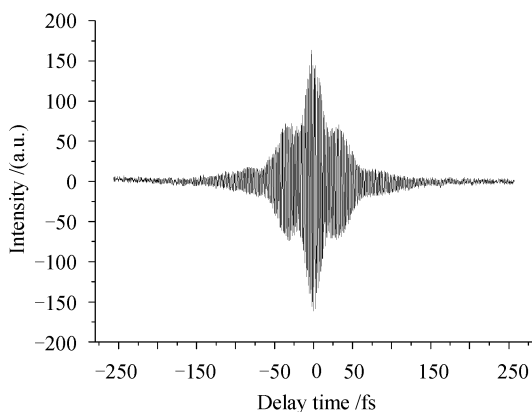


图 7 LED 测量 Nd^{3+} 干涉图

Fig. 7 Interferogram of Nd^{3+} by LED

使用 LED 代替飞秒激光进行一阶相关的研究。利用相干时间为 50 fs 的 LED 作为光源, 测量了 Nd_2O_3 的 HNO_3 溶液中 Nd^{3+} 的相干弛豫过程, 其结果如图 7 所示。与用飞秒激光测量 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 样品的结果类似^[7], 表明 LED 与迈克尔逊干涉仪结合可用于测量材料中的相干弛豫过程。

4 结 论

利用光源相干度的定义分析了 LED 光源的相干性, 测量结果表明 LED 具有较好的相干性。通过测量 LED 的相干度, 得到了 LED 光源多方面的性质, 有利于扩展 LED 在光谱研究中的应用, 如测量材料中的超快弛豫过程。另外, 利用 LED 的干涉图, 可通过反傅里叶变换得出其光谱图, 从而可用价格低廉的 LED 为光源制作傅里叶吸收光谱仪。

参 考 文 献

- 1 Fang Zhilie. Semiconductor Light Emitting Material and Device [M]. 1st ed.. Shanghai; Fudan University Press, 1992. 275~316
方志烈. 半导体发光材料和器件[M]. 第一版. 上海: 复旦大学出版社, 1992. 275~316
- 2 Liu Simin, Xu Jingjun, Guo Ru. Coherent Optics-Fundamentals and Applications [M]. 2nd ed.. Tianjin; Nankai University Press, 2001. 17~18
刘思敏, 许京军, 郭 儒 编著. 相干光学原理及应用[M]. 第二版. 天津: 南开大学出版社, 2001. 17~18
- 3 J. Perina, Translated by Zhan Dasan. Coherence of Light [M]. 1st ed.. Beijing; Science Press, 1986. 21~23
J. 柏里纳, 詹达三 译. 光的相干性[M]. 第一版. 北京: 科学出版社, 1986. 21~23
- 4 Li Liangde. Basal Optical [M]. 1st ed.. Guangzhou; Sun Yat-sen University Press, 1987. 169~189
李良德. 基础光学[M]. 第一版. 广州: 中山大学出版社, 1987. 169~189
- 5 Zhang Guangzhao. Fourier Transform Spectroscopy [M]. 1st ed.. Guangzhou; Sun Yat-sen University Press, 1988. 44~47
张光昭. 傅里叶变换光谱学原理[M]. 第一版. 广州: 中山大学出版社, 1988. 44~47
- 6 Chen Lei, Luo Li, Dai Dechang *et al.*. Experimental techniques for quantum wavepacket interferometer [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(2):142~145
陈 磊, 罗 莉, 戴德昌 等. 量子波包干涉仪的实验技术研究 [J]. 中国激光, 2001, **A28**(2):142~145
- 7 Q. Luo, D. C. Dai, G. Q. Wang *et al.*. Theory and experiment of coherent wave packet dynamics in rare earth solids; Absorption spectrum vs femtosecond fringe-resolved interferogram [J]. *Journal of Chemical Physics*, 2001, **114**(4): 1870~1875