大功率单色 LED 的空间相干特性

林惠川[1] 陶 华[2] 贺 盟[2] 蒲继雄[2]* 饶连周[1]

([1] 三明学院物理与机电工程学院，福建 三明 365004
[2] 华侨大学信息科学与工程学院，福建 厦门 361021)

摘要 基于 van Cittert-Zernike 定理，从理论上计算出大功率单色发光二极管(LED)辐出光，在空间中传输后的空间相干性分布。计算结果表明，自发辐射的 LED 光源其辐射光在空间中传输后，由非相干光变为部分相干光，且其空间相干性与 LED 芯片的结构有关。实验上采用双缝干涉对 LED 辐射光的空间相干性进行测量，由干涉条纹的可见度与两点间的相干度之间的关系得出，非相干 LED 光源的辐射光在传输后为部分相干光。而采用间隔可调的双缝干涉测量两点间的相干度后发现，LED 的芯片发光区域决定了其辐射光在传输中的空间相干性分布。理论计算的空间相干性分布与实验测量结果基本吻合。

关键词 发光二极管；空间相干性；部分相干光；芯片结构

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A **doi**：10.3788/AOS201232.0323003

Spatial Coherence of High-Power Single-Color LED

Lin Huichuan[1,2] Tao Hua[2] He Meng[2] Pu Jixiong[2] Rao Lianzhou[1]

([1] *School of Physics and Mechanical and Electrical Technology, Sanming University, Sanming, Fujian* 365004, *China*
[2] *College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian* 361021, *China*)

Abstract Based on the van Cittert-Zernike theorem, we study the spatial coherence distribution of the light beam, which radiated from the high-power single-color light-emitting diodes (LED) after propagation theoretically. The theoretical calculations show that, the spectral coherence of the light beams which radiated from the non-coherent LED source changed into partially coherent after propagation. Moreover, the spatial coherence of the light beams is related to its chip architecture of the LED. By double-slit interference we measure the spatial coherence of the light beams experimentally. And the visibility of the interference fringes show that the light beams from the non-coherent LED source change into partially coherent after propagation. In addition, the measurement of the visibility by use of adjustable double-slit reveal that, the emitting area of the LED determines the spatial coherence of the light beams from LED source. The theoretical result of the spatial coherence is almost consistent with the experimental measurement.

Key words light-emitting diode; spatial coherence; partially coherent beams; chip structure

OCIS codes 230.3670; 260.1960; 050.1970; 030.1640

1 引 言

发光二极管(LED)是一种电致发光器件，由于其具有高效率、低功耗、长寿命、体积小以及可视性高等优点，在光纤通信、全彩色显示屏、背光以及照明等领域都具有很高的应用价值[1~4]。随着 LED 芯片制造工艺以及封装技术的发展，高亮度大功率 LED 灯的使用寿命逐渐被延长，而由于在夜景照明、交通信号指示、汽车工业、机器视觉系统以及显

收稿日期：2011-09-19；**收到修改稿日期**：2011-11-12

基金项目：国家自然科学基金项目(60977068，61178015)、福建省教育厅 JK 类研究项目(JK2011054)和三明学院科研基金(B201008/Q)资助课题。

作者简介：林惠川(1984—)，男，硕士，助教，主要从事光束传输与变换等方面的研究。
E-mail：lhc703@hqu.edu.cn

* **通信联系人**。E-mail：jixiong@hqu.edu.cn

示技术等方面的广泛应用，高亮度大功率 LED 灯的重要性被日益显现[5~14]。LED 是电致发光光源，其发光区域主要在芯片的 p-n 结区。在正向电压的作用下，大量电子以及空穴向结区扩散，在 p-n 结区高能电子与低能态的空穴复合，并释放出光子。在电子与空穴的复合过程中所产生的光辐射主要为自发辐射，而辐射出来的光子向各个方向传播，光子与光子之间是非相干的。也因此，一般认为发光二极管(LED)为非相干光源，对其特性的描述主要为光谱峰值、光谱宽度以及发光颜色色温等，对其相干性的研究较少。然而，作为一种具有广泛应用的光源，近年来对 LED 辐射光的相干性的研究逐渐引起了人们的重视[15~18]。

在 LED 芯片的制造过程中，不同功率以及不同光谱特性的 LED 灯所具有的芯片结构一般是不一样的，而不同的芯片结构决定了 LED 芯片具有不同的发光区域。根据 van Cittert-Zernike 定理可知，非相干光源发出的光在传输之后变为部分相干光[19]，且此部分相干光的空间相干性是与非相干光源的形状有关的。本文通过透镜成像的方法测得不同光谱特性的大功率单色 LED 灯具有的光源形状，并由此光源形状采用 van Cittert-Zernike 定理对其辐射光的空间相干性进行计算。

2　相干性计算

实验采用 Cree 公司的 LED 灯，对主波长为 623.3 nm 的红色单灯 LED，与主波长为 466.9 nm 的蓝光 LED 的空间相干性进行测量，所测 LED 相干性是在工作功率为 3 W 的情况下测得的。两种波长的 LED 灯的光谱特性如图 1 所示，在传输过程中 LED 灯的光谱分布基本不变(图中标注的 Z 为观察平面距光源的距离)。

采用如图 2 左侧所示光路，采用透镜成像的方法测得所用 LED 灯的发光区域。在取旁轴近似的情况下，可忽略环氧树脂以及反光杯对 LED 发光区的影响，在透镜成像处 CCD 所呈光斑可近似认为该颗 LED 灯的发光区域。

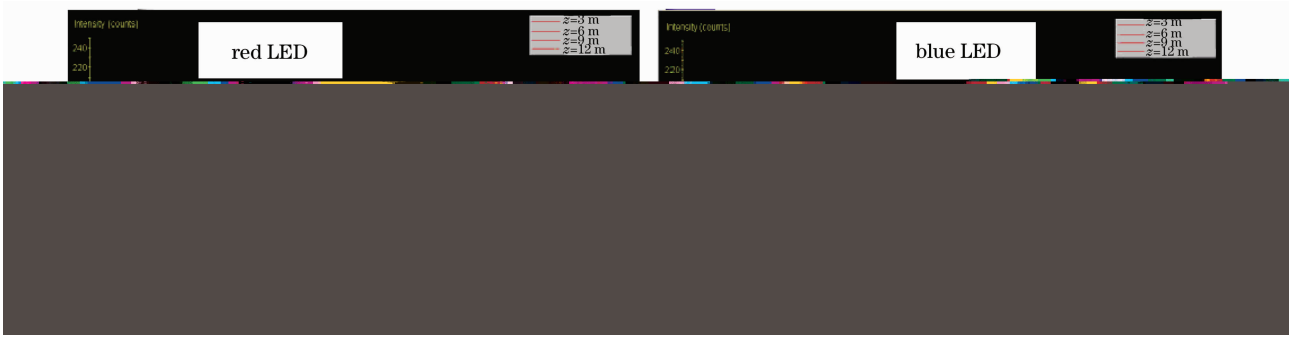

图 1　红光 LED 与蓝光 LED 的光谱特性

Fig. 1　Spectral characteristics of red LED and blue LED

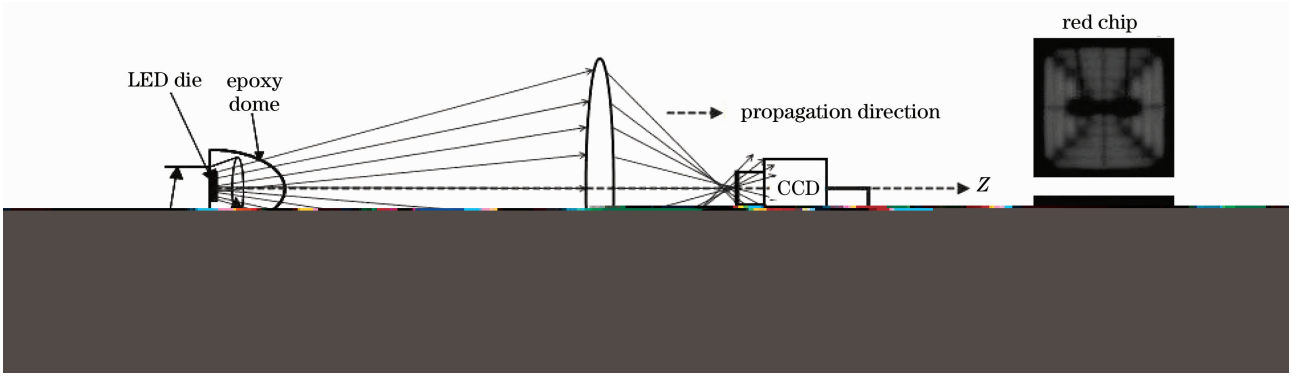

图 2　透镜成像系统及 LED 芯片发光区域

Fig. 2　Lens imaging system and light emitting region of LED chip

图 2 右侧为 LED 芯片辐射光经透镜成像后，在 CCD 中的光斑。红光芯片的发光区域近似为一方形环，方形发光区域的中心有一矩形区域不发光。而蓝光芯片可近似为，方形发光区域在右边缺一小方形非发光区域。由图 2 CCD 成像可知两种不同光谱特性的 LED 灯具有的芯片发光区域是不同的。

而这种发光区域的差异也将使得其光谱的空间相干性在传输过程中存在差异。下面根据 van Cittert-Zernike 定理，对这两种不同的芯片结构的 LED 灯的光谱空间相干性进行研究。根据 van Cittert-Zernike 定理，准单色的非相干光源辐射光在传输一段距离之后其空间相干性会发生变化，且其空间相干性在旁轴近似下可表示为[19]

$$\mu_{12}(\boldsymbol{r}_1-\boldsymbol{r}_2,z)=\exp(\mathrm{i}\alpha_{12})\times\frac{\iint\limits_s I(x,y)\exp[-\mathrm{i}2\pi(px+qy)]\mathrm{d}x\mathrm{d}y}{\iint\limits_s I(x,y)\mathrm{d}x\mathrm{d}y},\tag{1}$$

式中 $\boldsymbol{r}_1=x_1\boldsymbol{i}+y_1\boldsymbol{j}$，$\boldsymbol{r}_2=x_2\boldsymbol{i}+y_2\boldsymbol{j}$，$\alpha_{12}=2\pi\dfrac{r_1^2-r_2^2}{2\lambda z}$，$p=\dfrac{x_2-x_1}{\lambda z}$，$q=\dfrac{y_2-y_1}{\lambda z}$，$z$ 为光源处到观察平面的距离，λ 为准单色非相干光的主波长。$I(x,y)$ 为光源处的光强分布。在 LED 电极无缺损以及旁轴条件下近似认为 $I(x,y)$ 与光源的位置无关，既在发光区域内 $I(x,y)=I_0$，为一常数。在发光区域内对(1)式进行积分，可得相应光源的光谱空间相干性。对于红光 LED 灯，其发光区域可近似为一方环，外径为一半径为 a 的正方形而芯片内部不发光区域近似为长为 b，宽为 c 矩形区域。则红色 LED 灯的空间相干性为

$$\mu_{12}(\boldsymbol{\rho}_1-\boldsymbol{\rho}_2,z)=\frac{1}{I_0\left(\int\limits_{-a/2}^{a/2}\int\limits_{-a/2}^{a/2}\mathrm{d}x\mathrm{d}y-\int\limits_{-b/2}^{b/2}\int\limits_{-c/2}^{c/2}\mathrm{d}x\mathrm{d}y\right)}\times\left\{\int\limits_{-a/2}^{a/2}\int\limits_{-a/2}^{a/2}\frac{I_0}{z^2}\exp\left[\frac{\mathrm{i}k}{2z}(\rho_1^2-\rho_2^2)+\frac{\mathrm{i}k}{z}(x_2-x_1)x+\frac{\mathrm{i}k}{z}(y_2-y_1)y\right]\mathrm{d}x\mathrm{d}y-\int\limits_{-b/2}^{b/2}\int\limits_{-c/2}^{c/2}\frac{I_0}{z^2}\exp\left[\frac{\mathrm{i}k}{2z}(\rho_1^2-\rho_2^2)+\frac{\mathrm{i}k}{z}(x_2-x_1)x+\frac{\mathrm{i}k}{z}(y_2-y_1)y\right]\mathrm{d}x\mathrm{d}y\right\},\tag{2}$$

式中 $\rho_1=\sqrt{x_1^2+y_1^2}$，$\rho_2=\sqrt{x_2^2+y_2^2}$ 为接收平面上的空间位置坐标，而积分区域为芯片的发光区域。对(2)式积分的结果为

$$\mu_{12}(\boldsymbol{\rho}_1-\boldsymbol{\rho}_2,z)=\frac{-2\exp\left[\dfrac{\mathrm{i}k}{2z}(\rho_1^2-\rho_2^2)\right]}{z^2(a^2-bc)}\left\{\frac{4}{a^2}\mathrm{sinc}\left[\frac{\mathrm{i}ka}{2z}(x_2-x_1)\right]\mathrm{sinc}\left[\frac{\mathrm{i}ka}{2z}(y_2-y_1)\right]-\frac{4}{bc}\mathrm{sinc}\left[\frac{\mathrm{i}kb}{2z}(x_2-x_1)\right]\mathrm{sinc}\left[\frac{\mathrm{i}kc}{2z}(y_2-y_1)\right]\right\},\tag{3}$$

(3)式表明，非相干 LED 光源所发出的光在传输了距离 z（旁轴近似下 $\sqrt{x^2+y^2}\ll z$）后变为部分相干光，而其空间相干性在传输过程中如(3)式所示。对于蓝光芯片，其发光区域如图 2 所示，可近似为大的方形发光区域扣除一小方形区域。则蓝光 LED 灯的空间相干性为

$$\mu_{12}(\boldsymbol{\rho}_1-\boldsymbol{\rho}_2,z)=\frac{1}{I_0\left(\int\limits_{-a/2}^{a/2}\int\limits_{-a/2}^{a/2}\mathrm{d}x\mathrm{d}y-\int\limits_{3a/4}^{a}\int\limits_{-a/8}^{a/8}\mathrm{d}x\mathrm{d}y\right)}\times\left\{\int\limits_{-a/2}^{a/2}\int\limits_{-a/2}^{a/2}\frac{I_0}{z^2}\exp\left[\frac{\mathrm{i}k}{2z}(\rho_1^2-\rho_2^2)+\frac{\mathrm{i}k}{z}(x_2-x_1)x+\frac{\mathrm{i}k}{z}(y_2-y_1)y\right]\mathrm{d}x\mathrm{d}y-\int\limits_{3a/4}^{a}\int\limits_{-a/8}^{a/8}\frac{I_0}{z^2}\exp\left[\frac{\mathrm{i}k}{2z}(\rho_1^2-\rho_2^2)+\frac{\mathrm{i}k}{z}(x_2-x_1)x+\frac{\mathrm{i}k}{z}(y_2-y_1)y\right]\mathrm{d}x\mathrm{d}y\right\}.\tag{4}$$

对(4)式积分便可得到蓝光芯片的空间相干性为

$$\mu_{12}(\boldsymbol{\rho}_1-\boldsymbol{\rho}_2,z)=\frac{\exp\left[\dfrac{\mathrm{i}k}{2z}(\rho_1^2-\rho_2^2)\right]}{k^2a^2\,15/16(y_2-y_1)(x_2-x_1)}\left\{-4\sin\left[\frac{ka}{2z}(x_2-x_1)\right]\sin\left[\frac{ka}{2z}(y_2-y_1)\right]+2\mathrm{i}\sin\left[\frac{ka}{4z}(y_2-y_1)\right]\left\{\exp\left[\frac{\mathrm{i}ka}{z}(x_2-x_1)\right]-\exp\left[\frac{\mathrm{i}k3a}{4z}(x_2-x_1)\right]\right\}\right\}.\tag{5}$$

(3)式及(5)式均表明 LED 虽是自发辐射的非相干光源，但其发出的光在空间传输过程中变为部分相干光。在(3)式及(5)式中，取 ρ_1 为 0，即 ρ_1 为光轴上的点，对(3)式及(5)式进行数值计算，两芯片发出光经传输后，其空间相干性的分布如图 3 和图 4所示。

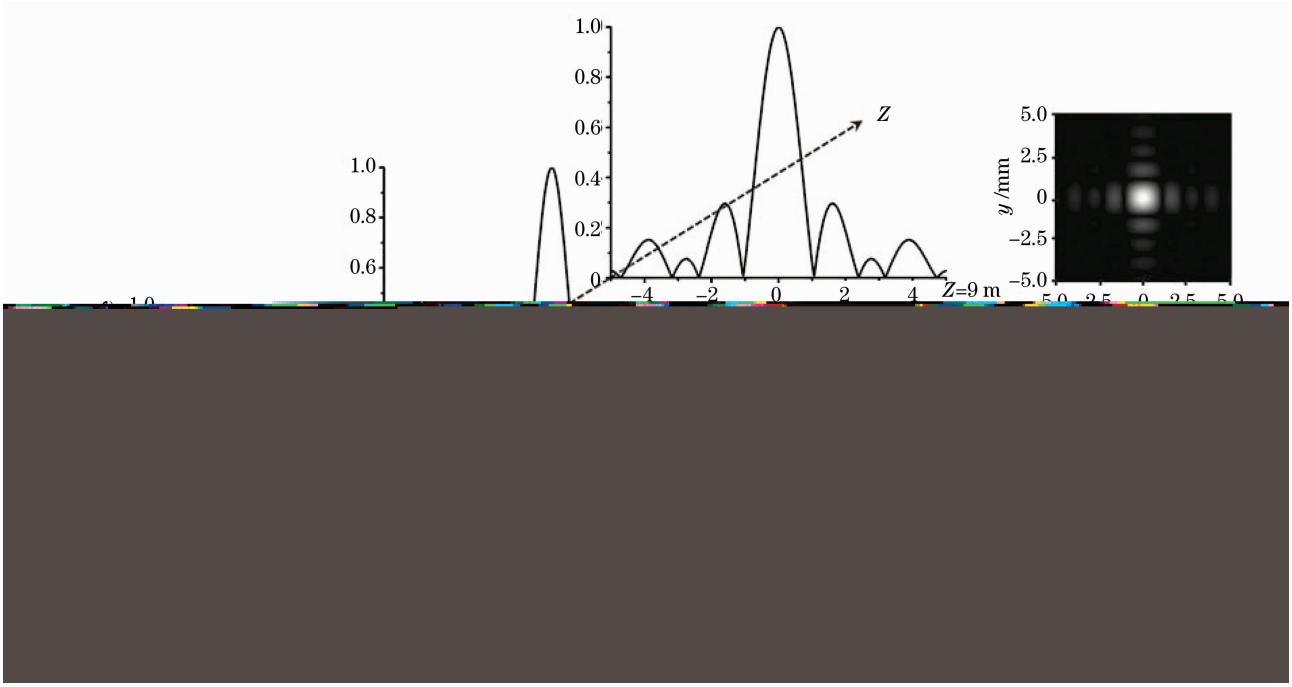

图 3　红光 LED 辐射光在传输过程中的空间相干度分布

Fig. 3　Degree of spatial coherence distribution of red LED radiating light in propagation

图 4　蓝光 LED 辐射光在传输过程中的空间相干度分布

Fig. 4　Degree of spatial coherence distribution of blue LED radiating light in propagation

图 3 及图 4 中，曲线为空间相干性的径向分布，而三维图为光束截面上光束空间相干性分布。从图 3 及图 4 的空间相干性分布可知，随着传输距离的增大，LED 的光谱相干性逐渐变好，由光源处的非相干光变为部分相干光。并且，其空间相干性沿着径向存在振荡。而对比两图可知，不同的芯片结构所发出的

从而决定了其辐射光在空间的中光谱相干性。

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 Zhang He, Zhu Jun, Zhao Yan *et al*.. A design of light guide plate for direct illumination of large-sided liquid crystal panel[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2668～2673
张 鹤,朱 钧,赵 燕 等. 一种用于大尺寸液晶照明的直下式导光板模块设计[J]. 光学学报, 2010, **30**(9): 2668～2673

3 Zhao Xing, Fang Zhiliang, Cui Jicheng *et al*.. Study on the optical engine of the mini-projector [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 913～918
赵 星,方志良,崔继承 等. 微型投影机光学引擎的研究[J]. 光学学报, 2007, **27**(5): 913～918

4 Qin Yi, Zhong Jingang. Theoretical and experimental research of digital holography with partially coherent light based on light emitting diode[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2236～2241
秦 怡,钟金刚. 基于发光二极管的弱相干光数字全息理论与实验研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(8): 2236～2241

5 E. F. Schubert. Light-Emitting Diodes [M]. UK: Cambridge University Press, 2003

6 H. S. Nalwa, L. S. Rohwer (Eds.). Handbook of Luminescence, Display Materials and Devices[M]. USA : ASP Press, 2003

7 J. Kim, S. Somani, Y. Yamamoto. Nonclassical Light from Semiconductor Lasers and LEDs[M]. Berlin: Spinger, 2001

8 S. Nakamura, T. Mukai, M. Senoh. Candela-class high-brightness InGaN/AlGaN double-heterostructure blue-light-emitting diodes[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **64**: 1687

9 M. G. Craford, N. Holonyak, F. A. Kish. In pursue of the ultimate lamp[J]. *Scient. Am.*, 2001, **284**: 63～67

10 Y. Narukawa. White-light LEDs[J]. *Opt. & Photon. News*, 2004, **15**: 24～29

11 A. Bergh, Gcrawford, A. Duggal, R. Haiz. The promise and challenge of solid-state lighting[J]. *Phys. Today.*, 2001, **54**: 42～47

12 D. S. Mehta, K. Saxena, S. K. Dubey *et al*.. Coherence characteristics of light-emitting diodes [J]. *J. Luminesc.*, 2010, **130**: 96～102

13 He Guoxin, Zheng Lihong. A model for LED spectra at different drive currents[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(11): 1091～1094

14 Luo Yi, Zhang Xianpeng, Wang Lin *et al*.. Non-imaging optics and its application in solid state lighting[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(7): 963～971
罗 毅,张贤鹏,王 霖 等. 半导体照明中的非成像光学及其应用[J]. 中国激光, 2008, **35**(7): 963～971

15 M. Peeters, G. Verschaffelt, H. Theinpont *et al*.. Spatial decoherence of pulsed broad-area vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**: 9337

16 M. Peeters, G. Verschaffelt, J. Speybrouck *et al*.. Propagation of spatially partially coherent emission from a vertical-cavity surface-emitting laser[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**: 1178

17 F. J. Duarte, L. S. Liao, K. M. Vaeth. Coherence characteristics of electrically excited tandem organic light-emitting diodes[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**: 3072

18 F. J. Duarte. Coherent electrically excited organic semiconductors: visibility of interferograms and emission linewidth[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**: 412

19 Zhao Jianlin. Advanced Optics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002
赵建林. 高等光学[M]. 北京:国防工业出版社,2002

栏目编辑：韩 峰