

# 激光光斑形状和尺寸对扫描显示中 散斑对比度的影响\*

常 宏 杨福桂 董 磊 王安廷 谢建平 明 海<sup>†</sup>

(中国科学技术大学物理系,安徽省光电子科学与技术重点实验室,合肥 230026)

(2009 年 8 月 26 日收到;2009 年 11 月 28 日收到修改稿)

计算了圆形、矩形激光光斑对于激光扫描显示系统中散斑对比度的影响. 对于圆形光斑,当光斑尺寸大于散射表面相关长度时,得到的散斑对比度随着光斑尺寸变小而下降;当光斑尺寸接近表面相关长度大小时,由于光斑中包含的散射颗粒变少,得到的是非高斯散斑,散斑的对比度反而会变大;随着激光斑进一步变小,由于镜面反射效果散斑的对比度会很快下降. 对圆形光斑部分结果给出了实验验证. 为了保证光斑中有足够的散射颗粒,只在一个方向压窄光斑,分别计算了平行于扫描方向和垂直于扫描方向压窄光斑得到的散斑对比度. 平行于扫描方向压窄光斑,散斑的时间相关性会下降,平均效果变明显,散斑的对比度变小;垂直于扫描方向压窄,散斑对比度变化不大.

**关键词:** 激光扫描显示, 散斑, 表面相关长度, 散斑对比度

**PACC:** 4220, 4230

## 1. 引 言

激光用作光源的显示系统具有色彩分辨率高、色彩饱和度高、色度三角色域大和高亮度等优点<sup>[1]</sup>,能够实现大屏幕和小型便携投影的高质量图像显示. 但由于激光光源的高相干性,该显示系统易产生散斑效应. 当激光被粗糙表面散射,在远场观看时,看到单个点的光强是粗糙表面上多个面元散射光的相干叠加,由相干增强或减弱,图像中含有斑纹状结构,即散斑<sup>[2]</sup>. 散斑作为噪声存在于图像中会严重影响图像的质量,造成图像分辨率下降<sup>[3]</sup>.

目前激光显示的工作方式主要有扫描式和投影式. 对于投影式,不少方法都被用来抑制散斑视觉<sup>[4]</sup>,如采用多根不同长度的光纤分光再合束来降低光源的相干性<sup>[5,6]</sup>,或是在光路中加入转动或振动的散射体<sup>[7,8]</sup>. 对于扫描显示系统,由于光束需要会聚到屏幕很小的一点,对光束质量要求较高,另外单个点的扫描时间极短,很难加入运动的散射器件进行时间平均. 但是对于扫描显示,不同时刻扫

描光斑被散射的光不会相干叠加,并且扫描过程自身会引进平均效应<sup>[9]</sup>,从而抑制散斑视觉. 所以可以通过改变系统的参数加强这一效果.

文献[10]中提出了压窄激光束来抑制散斑视觉的方法. 但文献作者并没有给出理论解释,也没有具体的实验结果给出抑制的效果. 本文通过计算模拟了不同形状和尺寸的激光光斑扫描下,对散斑的平均抑制效果. 对于其中出现的散斑对比度的变化现象给出了比较合理的解释,并对圆斑扫描给出了实验验证. 结果对于扫描显示系统中的散斑抑制有指导意义.

## 2. 理论模型

对于扫描显示系统,散斑主要产生于投影屏幕的散射. 图 1 为散斑产生的光路示意图. 激光垂直照射到散射屏上,并以速度  $v$  沿  $x_0$  方向做横向扫描.  $(x_0, y_0)$  为散射屏的出射面  $E$  上的坐标,  $(x, y)$  为像面  $H$  上的坐标. 假定散射屏是纯位相体,则在单色线偏振平行光均匀照明下,散射屏出射面光场可表示为

\* 国家自然科学基金(批准号:10474093)资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: minghai@ustc.edu.cn

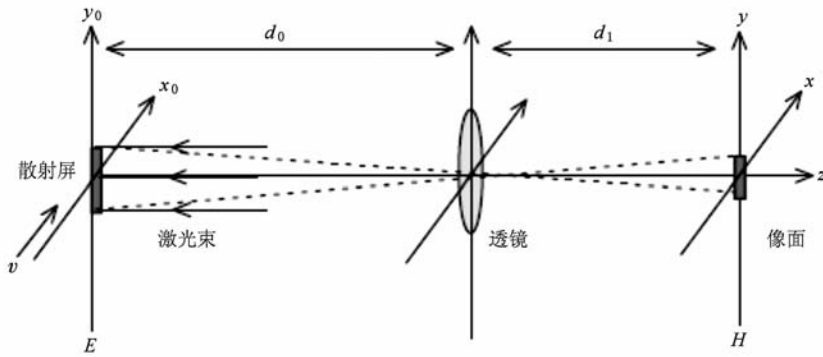


图1 散斑产生的光路示意图

$$A_0(x_0, y_0; t) = \exp[j\phi_0(x_0 - vt, y_0)]. \quad (1)$$

设像面上  $(x, y)$  点  $t$  时刻的光场为  $A(x, y; t)$ , 有

$$A(x, y; t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P(x_0, y_0) A_0(x_0, y_0; t) \times K(x_0, y_0; x, y) dx_0 dy_0, \quad (2)$$

其中  $P(x_0, y_0)$  为激光照射到屏幕上的孔径函数,  $K(x_0, y_0; x, y)$  为成像系统的点传递函数. 则光强为

$$I(x, y; t) = A(x, y; t) A^*(x, y; t), \quad (3)$$

所以  $(x, y)$  点的光强可表示为

$$I(x, y) = \frac{1}{T} \int_0^T I(x, y; t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T |A(x, y; t)|^2 dt, \quad (4)$$

其中  $T$  为单个像素的扫描时间.

设散射屏为高斯型散射面, 其在  $z$  方向的高度分布概率密度函数为

$$p(h(x_0, y_0)) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{h(x_0, y_0)^2}{2\sigma_h^2}\right), \quad (5)$$

其中,  $h(x_0, y_0)$  表示  $E$  面上点对应的散射屏表面高度,  $\sigma_h$  为屏表面高度的标准偏差, 表面颗粒的大小通过表面相关长度  $l_{\text{corr}}$  来表征, 其定义为相关函数下降到  $1/e$  时, 对应点之间的距离.

### 3. 理论和实验结果

参照图 1 进行了相关的模拟, 参照文献 [11, 12] 中的方法产生了高斯表面作为散射屏, 由 (1), (2) 和 (4) 式计算了像面  $x = y = 0$  点的光强. 采用的模拟参数如下:

假设激光束为均匀圆形光斑, 其波长  $\lambda = 632 \text{ nm}$ . 相关长度为  $l_{\text{corr}}$ . 物距  $d_1 = 1000 \text{ mm}$ , 透镜的孔径  $\phi = 4 \text{ mm}$ , 则所取  $\phi$  对应物面的分辨斑尺寸近似为  $0.3 \text{ mm}$ . 透镜的焦距为  $20 \text{ mm}$ , 所以像距  $d_2 = 20.41 \text{ mm}$ . 模拟中物面网格化所取步长为  $0.1 \mu\text{m}$ .

对于散斑对比度的计算, 产生了 10000 个屏幕上分辨斑大小的不同表面, 分别计算得到光斑扫过该分辨斑时, 由积分效应产生的光强. 散斑的对比度采用通常的定义<sup>[13]</sup>

$$C_s = \frac{\sigma_I}{\langle I \rangle}, \quad (6)$$

其中  $\sigma_I$  为 10000 个光强的标准偏差,  $\langle I \rangle$  为 10000 个光强的平均值.

图 2 为模拟中采用的三种不同情况的光斑: (a) 为圆形光斑, (b) 和 (c) 为矩形光斑, 且分别在

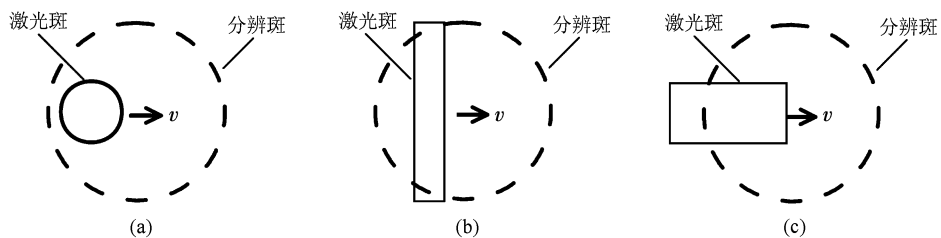


图2 模拟中采用的三种不同情况的光斑 (a) 圆形光斑, (b) 在扫描方向压窄的矩形光斑, (c) 垂直于扫描方向压窄的矩形光斑

平行和垂直于扫描方向压窄激光光斑. 对于圆形光斑其直径为  $D$ , 对于矩形光斑, 对应的激光照射到屏幕上的孔径函数为

$$P(x_0, y_0) = \text{rect}\left(\frac{x_0}{a}\right)\text{rect}\left(\frac{y_0}{b}\right), \quad (7)$$

其中  $a$  为光斑横向宽度,  $b$  为光斑纵向宽度.

图 3(a) 为模拟得到的扫描光斑为圆形光斑时, 散斑对比度随光斑直径  $D$  的变化曲线, 不同的曲线对应着不同的  $\sigma_h$  和  $l_{\text{corr}}$  值. 可以看出当  $D \gg l_{\text{corr}}$  时, 散斑的对比度随着  $D$  变小而变大. 因为此时光斑变小后, 在扫描过程中得到的光强的时间相关长度变小, 从而得到的平均效果变明显. 当  $D$  和  $l_{\text{corr}}$  大小相当时, 散斑对比度反而上升. 这是因为光斑中所含散射颗粒数目变少, 散斑由高斯散斑转化为非高斯散斑, 光强的起伏变剧烈<sup>[14,15]</sup>. 图 3(b) 为  $D = 200 \mu\text{m}$  和  $D = 20 \mu\text{m}$ , 且  $l_{\text{corr}} = 10 \mu\text{m}$ ,  $\sigma_h = 3.54 \mu\text{m}$  时, 光斑直接照射, 无扫描过程, 抽样 10000 个屏幕, 得到  $x = y = 0$  点的光强分布. 可以看出两者都接近于负指数分布, 这和文献[16]的计算结果一致. 但对于  $D = 20 \mu\text{m}$  时, 相对于  $D = 200 \mu\text{m}$  时, 光强分布趋向于两边(大光强和小光强), 分布起伏相对于高斯散斑要剧烈<sup>[17]</sup>, 因此散斑的对比度会变大. 计算得到  $D = 200 \mu\text{m}$ ,  $C_s = 1$  和  $D = 20 \mu\text{m}$ ,  $C_s = 1.80$ . 非高斯散斑的形成和光斑中所含独立颗粒的数目有关, 由图 3(a) 可以看出  $l_{\text{corr}}$  大的表面, 对于同一  $D$ , 由于所含独立散射颗粒数目少, 更易产生非高斯散斑. 因而随  $D$  变小, 得到的散斑对比度会更快变大. 图 3(a) 中  $D < l_{\text{corr}}$  时, 散斑对比度会很快下降, 这是因为随着  $D$  进一步变小, 光斑照射的小区域是相对平滑的, 计算得到的光强是镜面反射的光强, 光强几乎不变, 所以对对比度很快下降, 趋于 0.

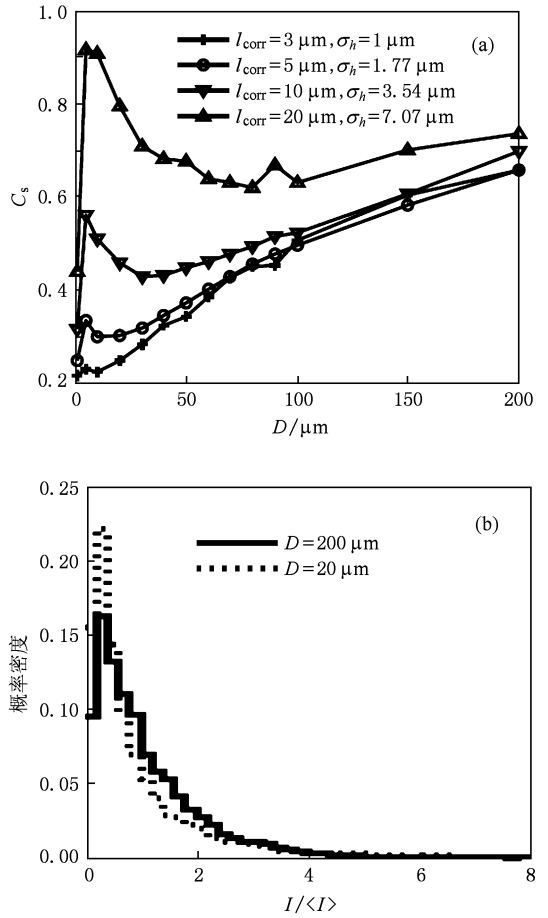


图 3 圆形光斑扫描情形 (a) 圆形光斑散斑对比度随光斑尺寸大小的变化; (b)  $l_{\text{corr}} = 10 \mu\text{m}$ ,  $\sigma_h = 3.54 \mu\text{m}$  时,  $D = 200 \mu\text{m}$  和  $20 \mu\text{m}$  散斑光强概率分布

对于圆形光斑情况进行了验证实验. 通过控制成像透镜口径和物面分辨斑的大小(即对于像面一点, 物面有贡献面散射点区域的大小), 来对应扫描光斑的尺寸; 通过移动屏幕得到多幅图像, 来对应

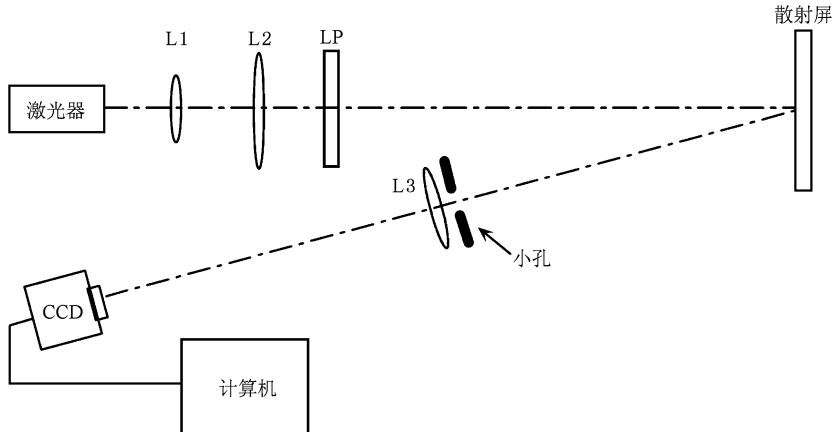


图 4 实验光路图

光斑扫过分辨斑的过程；通过多幅图像的叠加来对应时间平均. 图 4 为实验光路图, 其中 L1 和 L2 组成扩束镜, LP 为偏振片. 所用散射屏幕为一白色塑料屏幕, 激光垂直照射到屏幕上, 在偏离  $15^\circ$  的方向测量得到主观散斑. L3 为成像用凸透镜, 前面放置一孔径用来控制透镜孔径大小, 透镜焦距  $f=20\text{ cm}$ , 取物距等于像距为  $40\text{ cm}$ . 每次在垂直于激光束的方向平移屏幕  $10\text{ }\mu\text{m}$ , 得到的散斑图像通过 CCD 存入计算机. 对同样透镜孔径下得到 30 幅图像做平均.

图 5 为透镜孔径分别为  $\phi = 2, 4, 6, 8, 10$  和  $20\text{ mm}$  的散斑图, 其散斑对比度分别为  $57.1\%$ ,  $36.5\%$ ,  $30.3\%$ ,  $26.7\%$ ,  $25.1\%$  和  $25.3\%$ , 其对应的光斑大小为  $130, 65, 43, 32, 26$  和  $13\text{ }\mu\text{m}$ . 所以散斑的对比度基本随着光斑变小而下降. 需要说明的是, 由于通常屏幕的相关长度只有几个微米, 需要透镜的孔径较大时, 才能观察到非高斯散斑的情形. 此时散斑颗粒大小相对于 CCD 单元的尺寸很小, 由于积分效应, 很难观察到该效果.

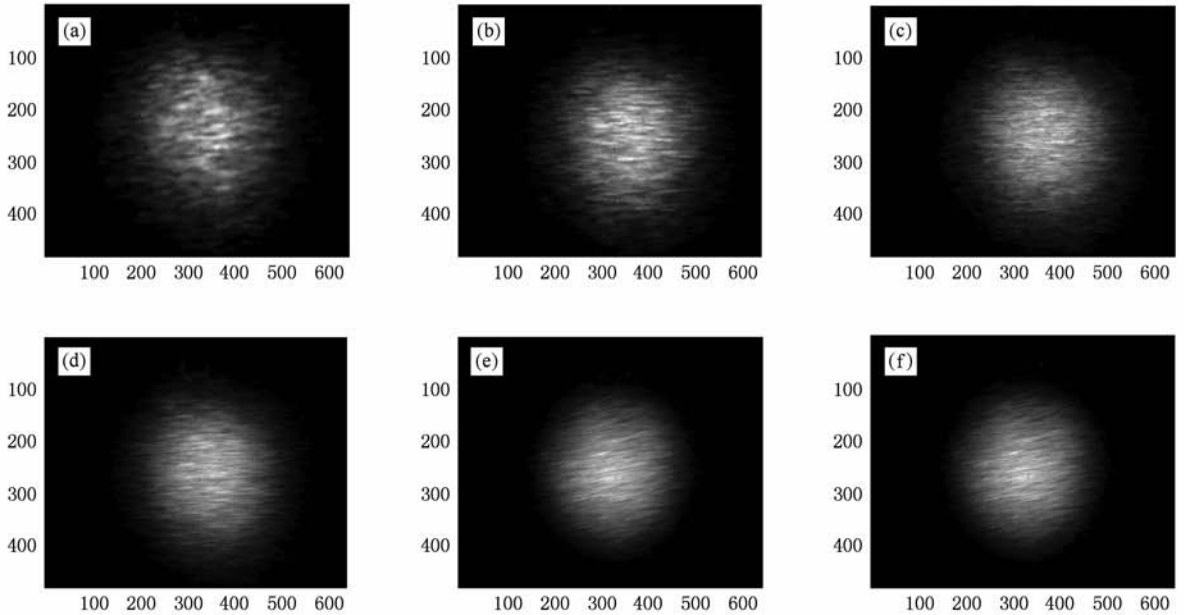


图 5 不同直径成像透镜成像得到的平均散斑图 横纵坐标为像素. (a)  $\phi = 2\text{ mm}$ , (b)  $\phi = 4\text{ mm}$ , (c)  $\phi = 6\text{ mm}$ , (d)  $\phi = 8\text{ mm}$ , (e)  $\phi = 10\text{ mm}$ , (f)  $\phi = 20\text{ mm}$

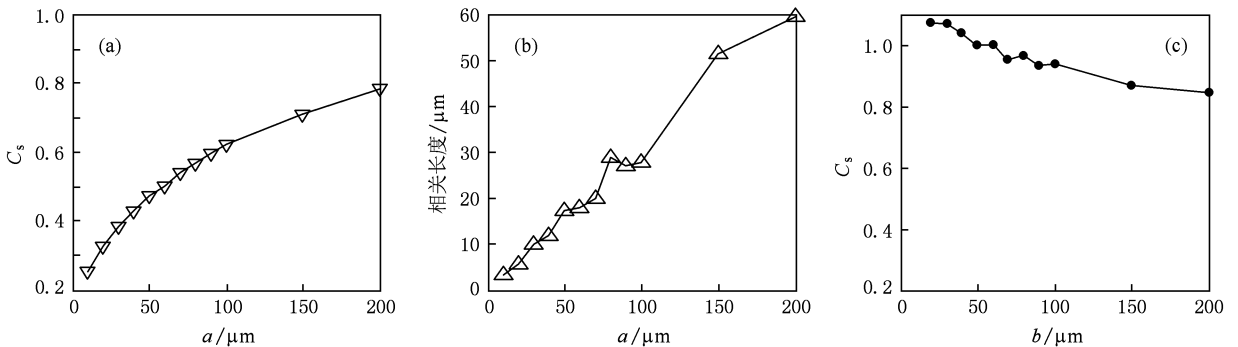


图 6 矩形光斑情形 (a) 扫描方向压窄激光光斑, 散斑对比度随  $a$  的变化; (b) 扫描方向压窄激光光斑, 光强序列相关长度随  $a$  的变化; (c) 垂直于扫描方向压窄光斑, 散斑对比度随  $b$  的变化

为了避免光斑中散射面元的数目过少, 只在一个方向压窄光斑, 另外一个方向光斑大小取为

$200\text{ }\mu\text{m}$ . 图 6(a) 为在扫描方向压窄光斑情况下, 散斑的对比度随  $a$  的变化. 图 6(b) 为不同  $a$  下的光斑

扫过屏幕时,得到光强相关长度随  $a$  的变化情况. 其中光强相关长度为光斑在屏幕上扫过  $14000 \mu\text{m}$ , 得到的时间序列作自相关, 自相关曲线下降为最大值的  $1/2$  时, 对应的光斑移动距离. 可以看出随  $a$  减小, 得到的光强序列相关性变小, 因而其平均效果变明显, 散斑的对比度下降. 由于只在一个方向压窄光斑, 光斑仍能被足够多的面元散射, 不会出现由于产生非高斯散斑造成散斑对比度变大的情况, 散斑的抑制相对于圆斑情况更为明显. 图 6(c) 为在垂直于扫描方向压窄光斑, 散斑的对比度随  $b$  的变化情况. 由于此种压窄不会造成扫描过程中光强相关长度变小, 所以不会引起散斑的对比度变小, 且随着  $b$  变小光斑中散射颗粒数目变少, 散斑对比度和散斑有逐渐偏离高斯散斑的趋势, 散斑对比度逐渐变大.

## 4. 结 论

本文计算了圆形和矩形激光光斑对于激光扫描显示系统中散斑对比度的影响. 认为光斑尺寸变小时, 由于扫描时光强的相关性变小, 散斑的平均效果变明显, 得到散斑的对比度会下降. 对于圆形光斑, 当光斑尺寸接近表面相关长度大小时, 由于光斑中包含的散射颗粒变少, 得到的是非高斯散斑, 散斑的对比度反而会变大. 本文对该结果进行了部分实验验证. 在扫描方向压窄光斑, 使光斑中对立散射基元的数目不会减少得过快, 散斑的对比度随光斑尺寸变小而变小, 可用作抑制激光扫描显示系统中的散斑视觉.

- 
- [1] Shin S C, Yoo S S, Lee S Y, Park C Y, Park S Y, Kwon J W, Lee S G 2006 *Displays* **27** 91
  - [2] Goodman J W 1975 *Laser Speckle and Related Phenomena* (Heidelberg: Springer) p9
  - [3] Wang L L, Tschudi T, Halldórsson T, Pétursson P R 1998 *Appl. Opt.* **37** 1770
  - [4] Iwai T, Asakura T 1996 *Proc. IEEE* **84** 765
  - [5] Suganuma H *U S Patent* 6 249 381 [2001-06-19]
  - [6] Dingel B, Kawata S, Minami S 1993 *Optik* **94** 132
  - [7] Kurtz A F, Kruschwitz B E, Ramanujan S *U. S. Patent* 6 577 429 [2003-06-10]
  - [8] Lowenthal S, Joyeux D 1971 *J. Opt. Soc. Am.* **61** 5376
  - [9] Trisnadi J I 2002 *Proc. SPIE* **4657** 131
  - [10] Kovarz M W, Bonilla F H, Kruschwitz B E, Phalen J G *U. S. Patent* 7 046 446 [2006-05-16]
  - [11] Fung A K, Cheng M F 1985 *J. Opt. Soc. Am.* **A 2** 2274
  - [12] Liu M, Cheng C F, Song H S, Teng S Y, Liu G Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5376 (in Chinese) [刘曼、程传福、宋洪胜、藤树云、刘桂媛 2009 物理学报 **58** 5376]
  - [13] Goodman J W 1976 *J. Opt. Soc. Am.* **66** 1145
  - [14] Jakeman E, McWhirter J G 1981 *Appl. Phys.* **B 26** 125
  - [15] Popov I A, Sidorovsky N V, Veselov L M 1997 *Opt. Comm.* **134** 289
  - [16] Cheng C F, Qi D P, Liu D L, Teng S Y 1999 *Acta Phys. Sin.* **48** 1635 (in Chinese) [程传福、亓东平、刘德丽、藤树云 1999 物理学报 **48** 1635]
  - [17] Jakeman E, Tough R A 1988 *Adv. Phys.* **37** 471

# Effect of structure and size of laser spot on speckle contrast in laser scanning display<sup>\*</sup>

Chang Hong Yang Fu-Gui Dong Lei Wang An-Ting Xie Jian-Ping Ming Hai<sup>†</sup>

(Key Laboratory of Optoelectronic Science and Technology of Anhui Province, Department of Physics,  
University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

(Received 26 August 2009; revised manuscript received 28 November 2009)

## Abstract

Speckle contrast in laser scanning display system with circular and rectangular laser spot on screen was calculated. For scanning with circular laser spot, the speckle contrast reduces with the decrease of the diameter of laser spot when the diameter of the laser spot is larger than the correlation length of the screen. When the laser spot is about the same size of the correlation length of the screen, the speckle contrast becomes higher owing to the non-Gaussian speckle effect. If we continue to reduce the size of laser spot, because of the specular reflection the speckle contrast decreases quickly. To ensure enough scattering elements in laser spot, the laser spot is just narrowed in one direction. If the laser spot is narrowed in the scanning direction, the speckle contrast is reduced due to the reducing temporal correlation of speckle, while if the laser spot is narrowed in the other direction, speckle contrast changes slightly. For the circular laser spot, some experimental results are given.

**Keywords:** laser scanning display, speckle, correlation length of the screen, speckle contrast

**PACC:** 4220, 4230

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10474093).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: minghai@ustc.edu.cn