

文章编号: 0253-2239(2006)11-1627-5

体散射液晶导光板的光线追迹模拟^{*}

叶 勤¹ 唐振方¹ 张 杰¹ 马常群² 张 楠¹

(¹ 暨南大学物理系, 广州 510632)
(² 北京大学物理系, 北京 100871)

摘要: 体散射集成导光板是一种新型的液晶背光照系统。基于多重米氏(Mie)散射理论和蒙特卡罗(Monte Carlo)顺序抽样方法,对该类型导光板进行了光线追迹模拟计算与仿真设计。研究了填充粒子材料、粒径、浓度及导光板几何结构等光学参量对输出光强面分布均匀性、照明角度等背光性能的影响,并进行了初步的实验验证及设计评估。研究表明,各光学参量十分敏感,且相互制约,必须进行大量的优化计算才能获得符合实际需要导光板设计方案。导光板输出光面分布的均匀度主要由填充粒子浓度决定,视角特性主要由导光板尺寸,特别是底面倾角决定,色散程度则主要和填充粒子的直径和折射率有关。

关键词: 导波光学; 模拟设计; 光线追迹; 体散射; 导光板; 液晶显示器

中图分类号: TN27; TM923.01 文献标识码: A

Ray Tracing Simulation of Volume Scattering Light Guide Plate for LCD

Ye Qin¹ Tang Zhenfang¹ Zhang Jie¹ Ma Changqun² Zhang Nan¹

(¹ Department of Physics, Jinan University, Guangzhou 510632)
(² Department of Physics, Peking University, Beijing 100871)

Abstract: Ray-tracing simulation and simulating design for volume scattering integrated light guide plates are presented, with Monte Carlo sequential sampling method based on multiple Mie scattering theory. The effects of optical parameters, i. e. doped material, particle scale, concentration and geometrical structure of light guide plates, on the backlight performances, such as the output light intensity uniformity and illuminating angle, are considered, and primary verifying experiments and design evaluation are also presented. It is found that, the above parameters are sensitive and correlated, and plenty of optimizing simulation is necessary for light guide plate design scheme meeting practical demands. The uniformity of output light intensity is determined mainly by the doped particle concentration, view angle by the light guide plate size and especially the scope angle of basal surface, and dispersion by the diameter of doped particle and refractivity, respectively.

Key words: guided-wave optics; simulating design; ray tracing; volume scattering; light guide plate; liquid crystal display(LCD)

1 引 言

液晶显示器(LCD)是当前主要的平板显示技术。由于液晶显示器面板本身不发光,需附加背光照系统方能达到显示效果。传统的侧光照系统包括电光源、导光板(LGP)、以及各种光学膜片,如反射膜、扩散膜和聚光膜等。其中导光板是液晶显示器显示器中除面板以外最为重要的核心组件,冷阴极荧光灯(CCFL)线光源或发光二极管(LED)点光源经导光板变换成均匀的面光源投射于液晶显示

器面板背部,液晶显示器的显示质量和能耗在很大程度上决定于导光板的设计和制造水平^[1]。为了达到提高性能和降低成本的双重目标,各种导光板的设计不断推陈出新,导光板底面光散射点阵的制作工艺已由早期的丝网印刷工艺向一体注塑成型工艺转变,微透镜阵列和微棱镜阵列技术成为高档导光板设计的主流技术,模具加工精度已达到微米级。导光板的另一个发展趋势是集成化设计,以达到少用和不用光学膜片、降低材料成本、实现背光系统轻

* 广东省科技计划(2005B10201055)和广州市科技计划(2005Z3-D0041)资助课题。

作者简介: 叶 勤(1955~),男,浙江宁波人,暨南大学副教授,主要从事光电子材料与器件的研究。

E-mail: yq@jnu.edu.cn

收稿日期: 2006-02-16; 收到修改稿日期: 2006-04-14

薄化的目的^[2~5]。

体散射是一种另辟蹊径的导光板设计方案。它利用体内填充异质粒子的光散射聚合物来制作导光板,通过控制异质粒子的材料(相对折射率)、粒径和填充浓度,达到入射光的均匀定向出射,而且可以完全取消各种光学膜片,光能利用效率是传统背光系统的两倍^[6~8]。相对而言,体散射导光板的光学设计更为复杂,可变光学参量较多,在材料合成和成型加工之前需要进行精确的光学设计。常见的商用光学照明设计软件不支持体散射导光板设计,或者设计功能十分有限,本研究小组自行开发了体散射导光板专用设计程序,此处报导的是数学建模和光线追迹方法。

2 理论基础

2.1 单粒子光散射

当入射光强为 I_0 ,在粒子周围介质中波长为 λ 的自然光平行入射到直径为 D 的各向同性真球形粒子上,在散射角为 θ ,距离粒子 r 处的散射光强为^[9~11]:

$$I = \frac{\lambda}{2\pi r} I_0 \frac{i_1 + i_2}{2}, \quad (1)$$

散射系数为

$$K(a) = \frac{2}{a^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (|a_n|^2 + |b_n|^2), \quad (2)$$

其中:

$$\begin{aligned} i_1 &= s_1(m, \theta, a) \times s_1^*(m, \theta, a), \\ i_2 &= s_2(m, \theta, a) \times s_2^*(m, \theta, a), \end{aligned} \quad (3)$$

i_1, i_2 分别为两个正交方向偏振光的强度函数; s_1, s_2 为振幅函数; a 为粒子的相对尺寸参量($a = \pi D/\lambda$); $m = m_1 + im_2$ 为粒子相对周围介质的折射率,当虚部为零时,表示粒子对光无吸收。又有

$$\begin{aligned} s_1 &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n \pi_n + b_n \tau_n), \\ s_2 &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n \tau_n + b_n \pi_n), \end{aligned} \quad (4)$$

其中

$$a_n = \frac{\varphi_n(a) \varphi_n'(ma) - m \varphi_n'(a) \varphi_n(ma)}{\zeta_n(a) \varphi_n'(ma) - m \zeta_n'(a) \varphi_n(ma)}, \quad (5)$$

$$b_n = \frac{m \varphi_n(a) \varphi_n'(ma) - \varphi_n'(a) \varphi_n(ma)}{m \zeta_n(a) \varphi_n'(ma) - \zeta_n'(a) \varphi_n(ma)},$$

$$\varphi_n = \left(\frac{z\pi}{2}\right)^{1/2} J_{n+1/2}(z), \quad \pi_n = \frac{dP_n(\cos \theta)}{d(\cos \theta)}, \quad (6)$$

$$\zeta_n = \left(\frac{z\pi}{2}\right)^{1/2} H_{n+1/2}^{(2)}(z), \quad \tau_n = \frac{d}{d\theta} P_n^{(1)}(\cos \theta).$$

2.2 多重光散射

粒子对单位光强的入射光散射后的总散射光强为^[6,8]

$$I = \int_0^{2\pi} 2\pi I(\theta) \sin \theta d\theta, \quad (7)$$

由此得到在 θ 方向上散射概率的密度分布函数为

$$F(\theta) = \int_0^{\theta} 2\pi I(\theta) \sin \theta d\theta / \left[\int_0^{2\pi} 2\pi I(\theta) \sin \theta d\theta \right], \quad (8)$$

采用蒙特卡罗(Monte Carlo)抽样方法,出射光子的出射方向为

$$\theta = F^{-1}(\text{random } 1), \quad (9)$$

random 1 为 $[0, 1]$ 之间的随机数。

多重散射光子的自由程抽样公式为^[12]

$$L = -\ln(\text{random } 2)/\sigma, \quad (10)$$

其中 $\sigma = \pi D^2 CK/4$ 为平均自由程的倒数, D 为散射粒子的直径, C 为填充粒子的浓度, K 为散射系数。

2.3 界面反射与透射

据菲涅耳(Fresnel)公式,当电场垂直于入射面时电磁波的反射系数为

$$R_{\perp} = \frac{\sin^2(\theta' - \theta'')}{\sin^2(\theta' + \theta'')}, \quad (11)$$

其中 θ' 和 θ'' 分别为入射角和折射角。若透明基质折射率为 n_1 ,外界折射率为 n_2 , θ' 和 θ'' 的关系满足斯涅耳(Snell)定律:

$$\theta'' = \arcsin(n_1 \times \sin \theta' / n_2), \quad (12)$$

当电场平行于入射面时电磁波的反射系数为

$$R_{\parallel} = \frac{\tan^2(\theta' - \theta'')}{\tan^2(\theta' + \theta'')}, \quad (13)$$

如果入射光为自然光时,取二者平均。反射系数便为^[13]

$$R = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(\theta' - \theta'')}{\sin^2(\theta' + \theta'')} + \frac{\tan^2(\theta' - \theta'')}{\tan^2(\theta' + \theta'')} \right], \quad (14)$$

R 即为光子在界面上的反射概率。光子反射与否,由以下抽样函数确定:

$$P = \begin{cases} 1(\text{反射}) & \text{random } 3 < R \\ 0(\text{透射}) & \text{random } 3 \geq R \end{cases} \quad (15)$$

3 光线追迹

建立基于整个物理环境的数学模型,除前述光散射模型及界面作用模型外,还包括:1)光源模型。分 LED 点光源和 CCFL 线光源两种情况,它们都以激光光源为基础进行构造。激光光源可近似视为理想化的点光源(束斑大小为 0,发散角为 0),在一定的立体角内按一定随机概率作锥形扫描,就得到具

有一定发散角和光能立体分布的 LED 点光源。再将 LED 点光源在导光板侧边作随机移动,得到一定线度的 CCFL 线光源;2) 材料结构模型。内部填充粒子为正态分布或单一分布的真球形,对可见光无吸收,并均匀地单分散于塑料基质中,同时忽略基质对可见光的吸收;3) 导光板几何结构模型,包括导光板长、宽、厚及底面倾角等参量,可以是光滑底面,也可以带有微棱镜阵列的底面。

建立导光板各边的界面方程和光子行进轨迹方程,跟踪光子在导光板内部的行进方向和散射中心位置,以及光子在导光板界面反射和折射后的位置和方向,记录光子在导光板各面的出射点及出射方向。图 1 为多重光散射和光子行进轨迹示意图。其中,导光板正面(输出面)出射光子为有效光子,其它面为损失光子。采用蒙特卡罗连续顺序抽样的方法跟踪足够多的光子,然后进行统计分析,即可做出光强面分布与立体角分布图。

两个计算例子。介质内入射光波长 $\lambda=469\text{ nm}$, 相对折射率 $m=0.973$ [塑料基质为聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA), 折射率 1.49。填充粒子为 SiO_2 或硅树脂, 折射率 1.46], 散射粒子直径 D 分别为 $0.25\text{ }\mu\text{m}$ 和 $1\text{ }\mu\text{m}$ 。散射强度在光的入射方向为极大值,随着散射粒子直径的增大,前向散射光迅速增强。体散射导光板正是利用了米氏散射这种前向散射的特性来实现光的定向输出。如果将图 3 在散射中心处局部作放大,还可发现强度较弱的后向散射。

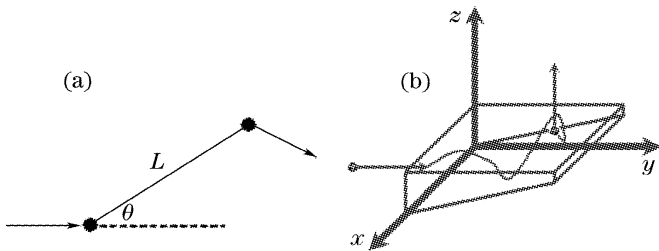


图 1 多重米氏散射(a)及光子行进轨迹(b)示意图
Fig. 1 Principle of multiple Mie scattering (a) and trace of photon (b) in LGP

对于每一个光子,光线追迹计算流程如图 2 所示。

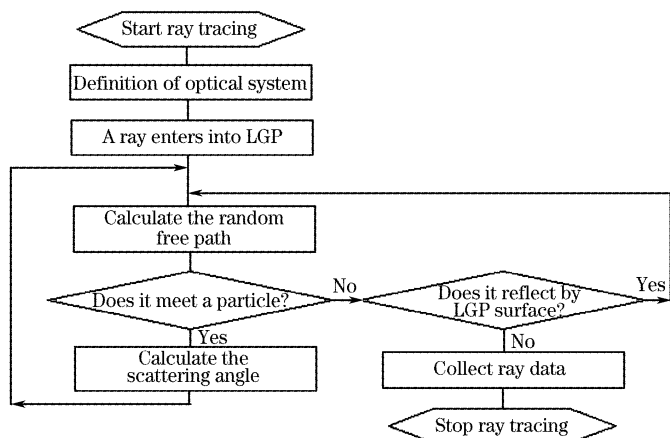


图 2 计算流程图
Fig. 2 Flow chart of ray tracing

4 模拟结果与讨论

图 3 是单粒子米氏(Mie)散射强度随角分布的

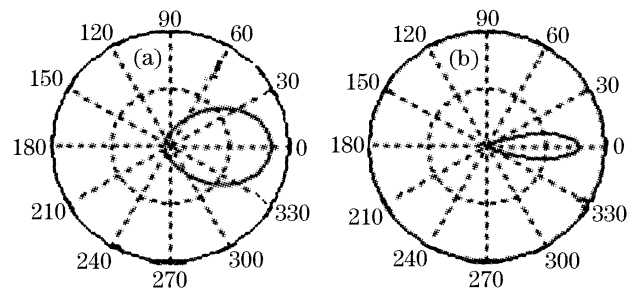


图 3 单粒子散射强度随角分布。(a) $D=0.25\text{ }\mu\text{m}$, (b) $D=1\text{ }\mu\text{m}$

Fig. 3 Calculated single particle scattering intensity profiles with angle at diameter : (a) $D=0.25\text{ }\mu\text{m}$, (b) $D=1\text{ }\mu\text{m}$

图 4 是采用激光光源,取样光子数 $n=100$ 时在一个平行板内部的光子行进轨迹图($C=6 \times 10^7/\text{mm}^3, m=0.973, D=0.8\text{ }\mu\text{m}$)。单个光子在导光板内经多次米氏散射及界面反射,运动轨迹相当随机杂乱,但就统计意义而言,大量的光子行为仍具有规律性,通过调整散射粒子直径及浓度可控制散射次数,从而最终控制光子的主要出射点及出射方向。

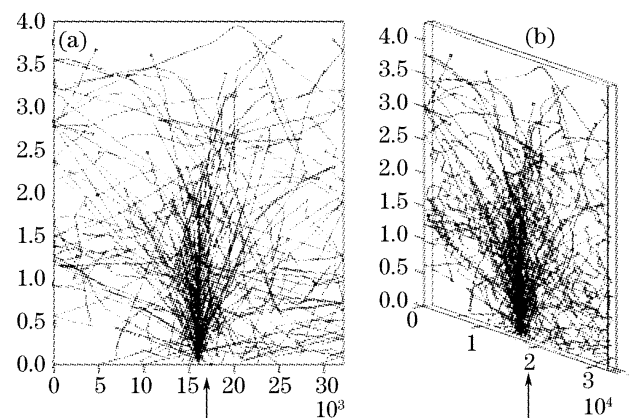


图 4 模拟计算光子行进轨迹图。(a) 俯视, (b) 侧视
Fig. 4 Simulated trace of photon. (a) top view, (b) edge view

体散射导光板输出光强的面分布和角分布对各种光学参量的变化十分敏感,各参量的影响一般不是单调关系,且相互制约。对于白光照明的情形,还存在因米氏散射与波长有关导致的色散等问题,优化设计工作量较大。输出光面分布的均匀度主要由

填充粒子浓度决定,视角特性主要由导光板尺寸,特别是底面倾角决定,色散程度则主要和填充粒子的直径和折射率有关。由于篇幅所限,本文仅以浓度参量为例进行简要说明。图 5 是采用激光光源时,不同掺杂粒子浓度得到的两个模拟计算结果。由(10)式可知,填充粒子浓度较小时[图 5(a)],光子可穿越更长的路程,在远离光源处散射出去,反之,浓度较大时[图 5(b)],光子在光源附近出射的概率增大。选择适当的浓度,可以使出射光的均匀度最优化。

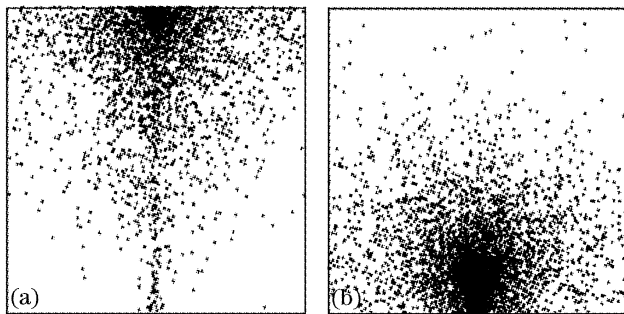


图 5 填充粒子浓度对光强面分布的影响($\lambda=469\text{ nm}$, $D=0.80\text{ }\mu\text{m}$, $m=1.5$, $n=5000$). (a) $C=2.0\times 10^4/\text{mm}^3$, (b) $C=5.0\times 10^5/\text{mm}^3$

Fig. 5 Planar distribution of light intensity with doped particles ($\lambda=469\text{ nm}$, $D=0.80\text{ }\mu\text{m}$, $m=1.5$, $n=5000$). (a) Low concentration, $C=2.0\times 10^4\text{ mm}^3$, (b) high concentration ($C=5.0\times 10^5/\text{mm}^3$)

图 6 是采用激光光源时得到的实验与理论模拟数据的比较图。尽管实验用的散射聚合物的材料合成参量并不十分清楚,模拟计算时,通过调整浓度、相对折射率和粒径大小等参量,可以得到与实验结果大体一致的光强面分布,表明本文采用的光线追迹方法可信度较高,更精确的实验验证工作有待下一步进行。

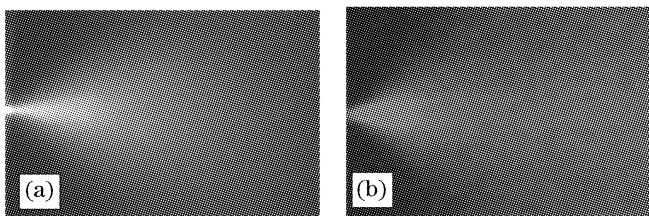


图 6 实验与理论模拟结果的比较。(a)实验, (b)模拟($n=200000$)

Fig. 6 Experimental (a) and simulated (b) results

图 7 是采用单色线状光源经过优化计算得到的模拟光强面分布及角分布图。填充粒子直径为 $0.8\text{ }\mu\text{m}$, 填充浓度 $5\times 10^6/\text{mm}^3$, 相对折射率 0.973 , 介质内入射波长 435 nm , 线光源发散角为 55° , 导光长宽为 $50\text{ mm}\times 40\text{ mm}$, 板厚 1 mm , 取样光子数为

10000。光强分布在一个较窄的立体角区间,这正是体散射导光板加以利用的多重米氏散射的定向散射特性。由于没有增加光学矫正机构(出光面附加微棱镜聚光膜或底面制作微棱镜阵列^[14]),出射光并非从导光板正面法向输出,光强极大值方向与入射光方向有一个约 $10^\circ\sim 40^\circ$ 的夹角,具体大小取决于导光板几何参量和其他初始条件。

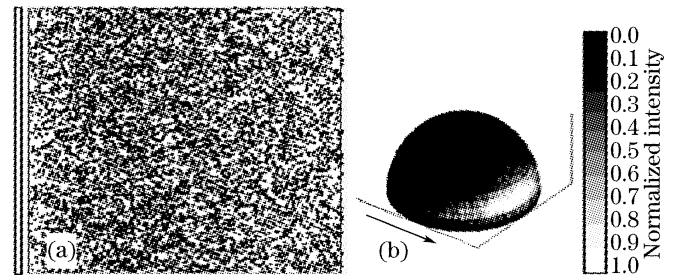


图 7 采用线光源经优化设计得到的模拟光强分布。

(a) 面分布, (b) 角分布

Fig. 7 Optimized intensity distribution with linear light source. (a) Planar distribution, (b) normalized angular

5 结 论

基于多重米氏散射理论,采用蒙特卡罗顺序抽样方法,对新型体散射液晶导光板进行了光线追迹模拟,全程跟踪光子行进过程中的各种信息,并进行统计分析。模拟计算的结果表明,对体散射导光板进行精确的数学建模与光学设计是可行的,背光照明性能对各种光学参量的变化十分敏感,必须进行大量的优化计算才能得到满足实际需要的材料合成与光学设计方案。本研究对于选择材料合成参量,评估体散射导光板光学效率,提出新颖设计具有十分重要的意义。

参 考 文 献

- Li Haifeng, Yang Bailiang, Ma Fenglei. Main points of backlight technique for good performance TFT-LCD[J]. *Chin. J. Liquid Crystals and Displays*, 2003, **18**(1): 58~62 (in Chinese)
李海峰, 杨柏梁, 马凤雷. 高品质液晶显示器用轻薄背光源技术要点[J]. *液晶与显示*, 2003, **18**(1): 58~62
- Hwan Young Choi, Young-Pil Park. Design and analysis of diffractive grating imprinted light-guide plate for LCD illumination[J]. *J. Information Display*, 2004, **5**(1): 7~15
- Di Feng, Guofan Jin, Yingbai Yan *et al.*. High quality light guide plates that can control the illumination angle based on micropism structures[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(24): 6016~6018
- Di Feng, Yingbai Yan, Xingpeng Yang *et al.*. Novel integrated light-guide plates for liquid crystal display backlight[J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2005, **7**: 111~117
- Jiang Ginbo, To Sandy, Lee WB *et al.*. Design of the V-cut optics in the cell phone backlight system[J]. *Chin. J. Liquid Crystal and Display*, 2005, **20**(3): 178~184 (in Chinese)

- 蒋金波, 杜 雪, 李荣彬 等. 用于手机背光模组的轮廓渐变 V 槽形自由曲面结构的新设计[J]. *液晶与显示*, 2005, **20**(3): 178~184
- 6 Takamitsu Okumura, Akihiro Tagaya, Yasuhiro Koike. Highly efficient backlight for liquid crystal display having no optical films [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **83**(13): 2515~2517
- 7 Takamitsu Okumura, Takeshi Ishikawa, Akihiro Tagaya *et al.*. Optical design of liquid crystal display backlighting with highly scattering optical transmission polymer [J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2003, **5**(5): s269~s275
- 8 Akihiro Tagaya, Yasuhiro Koike. Highly scattering optical transmission polymers for bright display[C]. *Macromol. Symp.*, 2000, **154**: 73~82
- 9 H. C. van de Hulst. *Light Scattering by Small Particles* [M]. New York: Dover Publications Inc., 1981, 34~36, 114~130
- 10 Liu Jianbin, Wu Jian. Study of scattering property of spherical particle in atmosphere[J]. *J. Appl. Opt.*, 2005, **26**(2): 31~33 (in Chinese)
刘建斌, 吴 健. 大气中球形粒子的散射特性研究[J]. *应用光学*, 2005, **26**(2): 31~33
- 11 Sheng Jing, Zhang Dinghao. Mie scattering studies on the formation of phase structure and distribution of phase size in polymer alloys[J]. *Chin. J. Light Scattering*, 2003, **14**(4): 252~256 (in Chinese)
盛 京, 张丁浩. Mie 散射研究聚合物合金相结构的形成及相尺寸分布[J]. *光散射学报*, 2003, **14**(4): 252~256
- 12 Wang Lin, Xu Zhihai, Feng Junhua. Monte Carlo simulation for diffuse backscattering of polarized light from poly-disperse highly dense media[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(6): 2694~2698 (in Chinese)
王 凌, 徐之海, 冯君华. 多分散高浓度介质偏振光后向扩散散射的 Monte Carlo 仿真[J]. *物理学报*, 2005, **54**(6): 2694~2698
- 13 Sun Wei, Ying Jinping, Li Jjiang *et al.*. Monte Carlo method study of light propagation in tissues[J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, **14**(1): 98~101 (in Chinese)
孙 威, 应金品, 李 江 等. 用蒙特卡罗方法研究生物组织中的光分布[J]. *光学学报*, 1994, **14**(1): 98~101
- 14 Tang Zhenfang, Ye Qin, Ma Changqun *et al.*. Design of volume scattering and integrated light guide plates for LCD [C]. *Proceedings of 13th Chinese Integrated Optics*, Guangzhou, 2005. 972~977 (in Chinese)
唐振方, 叶 勤, 马常群 等. 体散射集成液晶导光板的设计[C]. 全国第十三届集成光学学术会议论文集. 广州: 暨南大学出版社, 2005. 972~977