

一种新型白光准直器*

张旭苹 李 青

(东南大学电子工程系, 南京 210096)

摘 要 提出一种新型的白光准直器, 它由梯度折射率光纤及光阑组成的微阵列构成。在研究其准直原理及理论计算基础上, 讨论了材料和结构参数对准直特性的影响。实验结果表明, 选择合适的参数, 可获得发散角小于 $\pm 10^\circ$ 的近准直光, 该种准直器可满足扩展液晶显示器(LCD)视角对准直背光源的需求。

关键词 准直光, 梯度折射率光纤, 背光源, 液晶显示。

1 引 言

液晶显示器是近年来迅速发展起来的一种新型平板显示器件, 它具有重量轻、体积小、画质优等优点。但它在视角特性上的不足, 大大限制了它的进一步的发展。为此, 提出了多种改善液晶显示器视角的方法^[1-3], 其中, Zimmerman 等人^[4]提出了准直背光源加漫射屏的方法, 即用准直光(发散角小于 $\pm 10^\circ$)作液晶显示器的背光源, 在显示屏观察方向设置漫射屏, 不仅使液晶显示器的视角得以扩大, 对比度提高, 而且由于该方法是从器件外部展宽视角, 可适用于各类扭曲向列屏-液晶显示器和超扭曲向列屏-液晶显示器, 通用性较强, 具有良好的发展前景。该种拓宽视角的方法中, 准直背光源的获得是其中一项至关重要的技术。液晶显示器中以发白光的冷阴极荧光灯为背光源的较多, 因此, 获得具有小的发散角和色散的白光准直系统是非常重要的, 同时还要求它与液晶显示器背光源易于耦合。

本研究提出一种新的冷阴极荧光灯背光源准直系统, 它由梯度折射率光纤棒(以下简称光纤棒)及光阑的微阵列构成。梯度折射率光纤已具有成熟的制备工艺并已广泛应用于自聚焦成像和光纤通信系统等领域中^[5, 6]。本文研究这种光纤棒微阵列实现准直的原理和可行性, 在理论上讨论材料和结构参数对发散角的影响, 同时给出计算结果, 并根据计算结果制备光纤棒及其阵列。对带有这种准直系统的背光源进行准直特性测量。

2 准直器原理

梯度折射率光纤, 通常由折射率分布满足一定规律的细玻璃圆棒制成, 棒轴心处折射率 $n(0)$ 最大, 沿棒半径 d 方向逐渐减小。对于子午射线和斜射线, 折射率沿半径方向的理想分

* 电子部军工预研基金(DJA 4.4.2)和江苏省科委应用基金(BJ 97015)资助项目。

收稿日期: 1998-11-23; 收到修改稿日期: 1999-05-31

布 $n_m(r)$ 和 $n_i(r)$ 分别由(1)式和(2)式表述:

$$n_m(r) = n(0) \operatorname{sech}(Ar) = n(0) \left[1 - \frac{1}{2}(Ar)^2 + \frac{5}{24}(Ar)^4 - \frac{61}{720}(Ar)^6 + \dots \right] \quad (1)$$

$$n_i(r) = n(0) [1 + (Ar)^2]^{-1/2} = n(0) \left[1 - \frac{1}{2}(Ar)^2 + \frac{3}{8}(Ar)^4 - \frac{1 \times 3 \times 5}{2 \times 4 \times 6}(Ar)^6 + \dots \right] \quad (2)$$

式中 $n(0)$ 为轴心处折射率, r 为离轴心的距离, A 为折射率变化特性常数。由(1)式和(2)式可见, 对上述两种射线, 它们的折射率沿径向的分布虽然有一定差别, 但前两项是相同的, 因此取抛物线近似的情况下, 两者的折射率沿径向的分布均可表示为

$$n(r) = n(0) \left[1 - \frac{1}{2}(Ar)^2 \right] \quad (3)$$

2.1 子午射线

通常, 子午射线的轨迹是一个初相不为零的正弦曲线, 呈周期性变化, 其轨迹和斜率方程为^[7]

$$x = x_0 \cos(Az) + p_0/A \sin(Az) \quad (4)$$

$$p = -x_0A \sin(Az) + p_0 \cos(Az) \quad (5)$$

x_0 、 p_0 分别为子午射线在入射端的半径位置和斜率, z 为沿光纤棒轴向的位置, x 、 p 分别为在 z 点处射线轨迹的离轴位置和斜率。(4)式也可改写成

$$x = R \sin(Az + \phi) \quad (6)$$

式中, $R = \sqrt{x_0^2 + p_0^2/A^2}$, $\tan \phi = x_0A/p_0$ 。由此可知, 入射斜率 p_0 越大, 振幅 R 越大, 而特性常数 A 越大, 振幅 R 越小。

若光纤棒的长度取 $L/4$ 处, L 为正弦曲线周期, $L = 2\pi/A$, 就下述两种情况分别讨论。

1) 入射光从面轴心处入射, 即 $x_0 = 0$, 从由(4)~(6)式可得到

$$x = p_0/A = R \quad (7)$$

$$p = 0 \quad (8)$$

可见, $z = L/4$ 处, 射线的出射斜率为零, 即从轴心入射的光经过梯度折射率光纤的作用, 在端面出射的是一族彼此平行的光, 其振幅与入射角有关, 形成光束的最大半径也至多等于光纤的半径, 即

$$R_{\max} = p_{0m}/A = \tan \varphi_m/A = d \quad (9)$$

式中, φ_m 为光纤端面的最大入射角, p_{0m} 为入射斜率 p_0 的最大值, 如图 1(a) 所示。

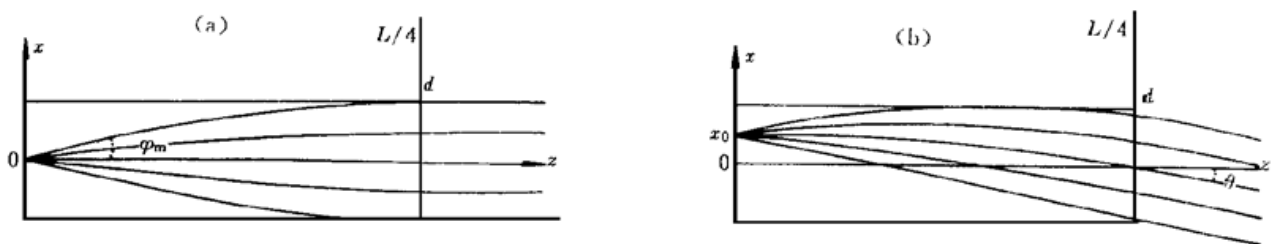


Fig. 1 Parallel beam passing through the $L/4$ GRIN rod. (a) Incident point on the center of the axis ($x_0 = 0$)
(b) incident point on the off-axis position ($x_0 \neq 0$),

2) 入射光在离轴情况下入射, 即 $x_0 \neq 0$, 由(4)、(5)式得

$$x = p_0/A \quad (10)$$

$$p = -x_0A \tag{11}$$

此时，射线出射斜率只与入射光的离轴位置 x_0 有关，这表明离轴入射的光束，在一定范围内，无论哪个方向入射，经过光纤后在端面仍为一族平行光，平行光束与 z 轴方向存在一个夹角 θ ，如图 1(b) 所示。而振幅与入射角度有关，所形成光束的最大直径受到棒直径的约束。

2.2 斜射线

斜射线是在光纤棒中周期性传播的空间曲线，为简便起见，可将斜射线近似地视为螺旋光线^[7]，如图 2 所示，其参数方程为

$$x = x_0 \cos \delta, \quad y = x_0 \sin \delta, \quad z = \delta/a \tag{12}$$

式中， x_0 为斜射线入射的离轴位置， δ 和 a 为待定参数。对于螺旋光线，行进过程中折射率不变，根据光线在光纤中传播其光程相等的条件，得

$$n(x_0)(\delta^2 x_0^2 + z^2)^{1/2} = n(0)z \tag{13}$$

再由(2)式斜射线折射率分布公式得出参数 δ 为：

$$\delta = Az。$$

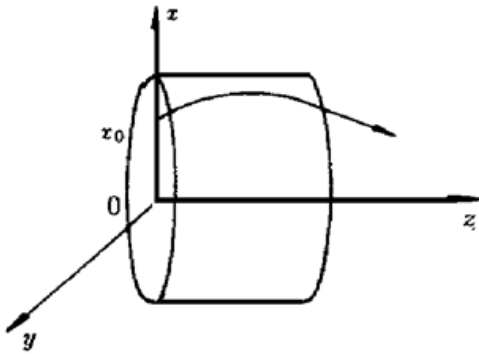


Fig. 2 Helix beam in GRIN-rod

光线经过光纤棒的出射方向是其达到端面螺旋线的切线方向。为计算该切线与 z 轴的夹角，将螺旋线投影在 xoz 平面上，得到的投影线方程为

$$x = x_0 \cos \delta = x_0 \cos Az \tag{14}$$

可见，投影线为一正弦曲线，其斜率为

$$p = -Ax_0 \sin Az \tag{15}$$

当 $z = L/4$ 时，投影线的斜率为 $p = -Ax_0$ ，与离轴的子午射线的斜率相同。该结果表明，从离轴位置入射的螺旋光线在 $L/4$ 光纤棒端面出射方向与 z 轴的夹角和离轴子午射线与 z 轴的夹角相同。可见，当忽略高次项引起的误差，折射率分布取抛物线近似时，可简单地用子午射线描述上述规律。

综合上述情况可得，具有一定截面的入射光束经过 $1/4$ 周期长的梯度折射率光纤时，将成为发散角可控的发散光，其发散角 θ 由(11)式确定，该式用数值孔径 $NA(NA = n(0)dA^{[8]})$ 可表示为：

$$\tan \theta = \frac{d_0}{d} NA \tag{16}$$

式中， d_0 、 d 分别为入射截面和光纤棒的半径。如果选择合适的参数 d_0 、 d 和 NA 可使发散角 θ 小于 $\pm 10^\circ$ ，即可获得近准直光，如图 3 所示。

液晶显示器中冷阴极荧光灯经过特别设计的反光罩及漫射板，使之出射亮度在半球面内比较均匀，因此可将其近似作为朗伯面光源。下面对此光源经过光纤棒获得的光通量进行简单的讨论。

对于单根光纤，影响透光量的主要有光纤芯材料的吸收、涂层和芯界面内壁上的全反射损失以及光纤端面上的菲涅耳损失等因素，在光纤中距轴 r 到 $r + dr$ 范围内圆环的光通量为^[9]：

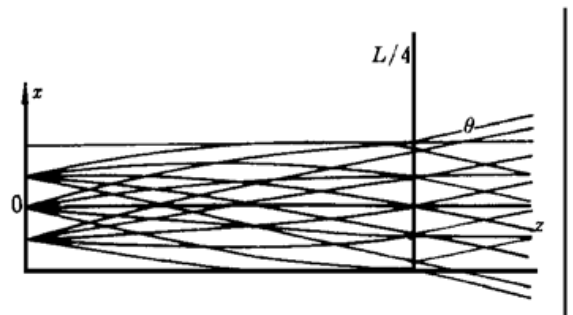


Fig. 3 Quasi-collimating beam passing the GRIN-rod

$$d\Phi = 8\pi^2 \int_{\sigma_c}^{\sigma_a} \int_0^{\pi/2} I(\sigma) t' t'' \alpha^\eta(\sigma) \exp(-\beta l) \cos^2 \gamma \sin \sigma d\gamma d\sigma +$$

$$8\pi^2 \int_{\sigma_c}^{\sigma_a} \int_{\gamma}^{\pi/2} I(\sigma) t' t'' \alpha^\eta(\sigma) \exp(-\beta l) \cos^2 \gamma \sin \sigma d\gamma d\sigma \quad (17)$$

式中, t' 和 t'' 为光纤两个端面上的菲涅耳透射系数; α 为光纤芯和涂层界面之间的全反射系数; η 为全反射次数; β 为材料的吸收系数; l 为光路程长。 $I(\sigma)$ 是发光强度在光纤中的角分布, 对于上述朗伯光源, 有 $I(\sigma) = I_0 \cos \sigma$ 。上述积分包括了子午射线和斜射线。 γ 的最小值为 $\bar{\gamma}$, 有:

$$\cos \bar{\gamma} = \frac{\sin \sigma_c}{\sin \sigma} \quad (18)$$

$$\sin \sigma_a = \frac{n_0}{n(r)} = \frac{1}{n(r)} \quad (19)$$

其中 σ_a 为入射光线在光纤内的最大角。 n_0 为外部介质折射率, 这里是空气, 其值为 1。

对于本文所研究的光纤棒, 长度很短, 约几毫米, 因此芯材料的吸收和壁面全反射损失很小, 可作一些近似处理, 令 $\alpha = 1$, $\beta = 0$, $t' = t'' = 1$, (17) 式变为:

$$d\Phi = \pi^2 r^2 I_0 \sin^2 \sigma_a - 2\pi^2 I_0 \sin \sigma_c (\sin^2 \sigma_a - \sin^2 \sigma_c)^{1/2} -$$

$$8\pi^2 I_0 \cos^{-1} \left(\frac{\sin \sigma_c}{\sin \sigma_a} \right) \left(\frac{1}{4} \sin^2 \sigma_a - \frac{1}{2} \sin^2 \sigma_c \right) \quad (20)$$

若光阑孔半径为 d_0 , 则经过光阑孔的光通量为

$$\Phi = \int \Phi = 2\pi \int_0^{d_0} d\Phi dr \quad (21)$$

由于 $\sin \sigma_a = 1/n(r)$, $\sin \sigma_c = NA = \sqrt{n^2(d_0) - n^2(d)}$, 因此, 透光量与光纤棒的材料参数 NA 和 d 以及光阑孔径 d_0 有很大关系, 实验结果表明, 选取适当的参数, 经过光纤棒微阵列得到的光通量接近于带导光板的液晶显示器背光源, 可以被液晶显示器所用。更详细的定量关系计算正在进一步研究中。

另外, 白光经过光纤棒通常会色散, 其主要原因是材料参数 $n(0)$ 和 A 是与波长有关的函数^[10], 使白光通过产生颜色分离。有关研究表明^[11, 12], 含有 Cs_2O 玻璃制成的梯度折射率光纤, 相对色散 ΔL 与周期 L 的比值大约为 10^{-3} , 对于 $1/4$ 周期长的光纤棒, 长度只有几个毫米, 其相对色散 ΔL 仅在微米量级, 因此, 本研究采用这样的光纤棒所构成的准直系统, 白光经过所产生的色散完全可以忽略。

3 材料结构参数的选择与结构设计

3.1 参数选择

从(16)式可知发散角 θ 与参数 d_0 、 d 和 NA 有关。另一方面, 准直器要求薄型化, 将参数 $L = 2\pi/A$, $A = NA/n(0)d$ 代入 $z = L/4$ 公式中, 得到准直器厚度 Z 与 d 和 NA 的关系:

$$Z = \pi n(0) d / 2NA \quad (22)$$

下面根据(16)式和(22)式对影响发散角 θ 和器件厚度 Z 的参数选择进行讨论。

如果入射截面大小及光纤棒半径一定, 即 d_0 、 d 不变, 发散角 θ 与 NA 成正比, NA 值减

小,使发散角 θ 变小,可提高光束的准直度,但采用 NA 值过小的光纤,其集光能力不高,不利于能量的有效利用。同时从(22)式可知,NA 值过小,使器件厚度增加。因此,应选择适中的 NA 值。

选择一定 NA 值的光纤,以截面大小不变的光入射,即 NA 和 d_0 均保持不变,发散角 θ 与光纤棒半径 d 成反比。采用半径较大的光纤可使发散角减小,但制备此类光纤的成本将提高。再者,器件厚度与半径成正比,大的光纤半径使厚度增加。因此,对光纤半径的选择,在满足发散角的前提下,取较小的半径值。

当光纤的材料参数 NA 和 d 选定,发散角 θ 与入射截面成正比,入射截面愈小,发散角就愈小,能得到准直度较高的光束,但过小的入射截面使经过光纤棒的能量减小,所以,在满足发散角的要求下,尽可能选择较大的入射截面。

根据液晶显示器对准直背光源的要求,即发散角小于 $\pm 10^\circ$,厚度在毫米量级上尽量小,从上述参数选择的原则出发,对参数 d_0 、 d 和 NA 进行优化选择。

NA 取为 0.16、0.37、0.60,相应的轴心折射率 $n(0)$ 为 1.53、1.58、1.65。采用两种不同 d 的光纤棒,选用不同的光阑孔径,即不同的 d_0/d 比值,由(12)式计算其发散角,结果列于表 1。

Table 1. Calculation value of diffuse angle in different parameters

		$2d = 1.0 \text{ mm}$						$2d = 2.0 \text{ mm}$					
$\theta/(\circ)$	d_0/mm	0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.00	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50
	d_0/d	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
NA													
	0.16	0.00	0.92	1.83	2.75	3.66	4.57	0.00	0.92	1.83	2.75	3.66	4.57
	0.37	0.00	2.12	4.23	6.33	8.42	10.5	0.00	2.12	4.23	6.33	8.42	10.5
	0.60	0.00	3.43	6.84	10.2	13.5	26.6	0.00	3.43	6.84	10.2	13.5	26.6

从表 1 看出,对直径不同的光纤,光阑孔径不同,但如果 d_0/d 比值一定,发散角则一定,与光纤直径无关,但直径大小影响准直器的厚度。将有关数据代入(13)式,器件厚度的计算值列入表 2。

Table 2. Calculation value of Z in different parameters

Z/mm	NA	0.16	0.37	0.60
$2d/\text{mm}$				
2.0		15.0	6.70	4.31
1.0		7.51	3.35	2.16

表 2 数据显示,厚度与光纤直径大小成正比,因此,要求厚度尽可能小时,应选择小的光纤直径。

3.2 结构设计

从上面讨论可知,入射光沿 z 轴方向取 $L/4$ 时,通过控制入射截面 d_0 、光纤半径 d 及光纤数值孔径等参数,在端面的出射光可成为近准直光,因此,在准直器设计时,将光纤棒的长度取 $1/4$ 周期长。另外,准直器应尽量薄,以满足实用化要求。从表 2 可见,当 $2d \leq 1$ (mm)、 $\text{NA} \geq 0.37$ 时,光纤棒只有数毫米,又因为液晶显示器的背光源面积大,为此,取直径为 1 毫米的光纤棒组成微阵列结构。从上述对入射截面的讨论还可知,如果不对光的入射截面加以控制,就将失去对发散角的控制,也不可能实现近准直光。所以,在准直器设计

中采用一光阑微阵列调控入射截面。光阑微阵列采用金属薄片(厚度约为 0.2 mm)，根据光纤棒的排列及光阑孔的要求定位、打孔，然后在表面涂覆一层反射率很低的材料，如本实验用的石墨。还可采用制版方法，用高透过率的玻璃薄片或塑料薄膜制成光阑微阵列。微阵列的排列方式，选用六角形排列，这是由于该种排列是所有排列方式中密度最高的一种，采用这种结构的能量损失最小。整个准直器的结构示意图如图 4 所示。

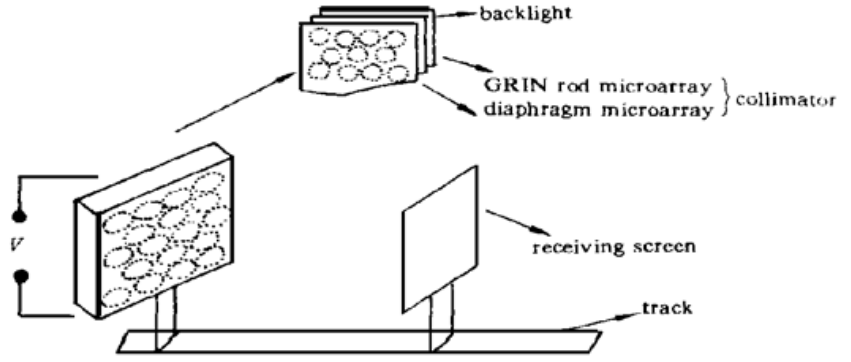


Fig. 4 Experimental device of measuring diffuse angle

4 实验结果

根据上述结构设计及参数选择要求，制备了光纤微阵列及不同光阑孔径的微阵列。用图 4 所示的测量装置测试其准直特性。实验装置中，将准直器贴在液晶显示器的冷阴极荧光灯背光源的出射面上，加电压后，背光源发光，光束经过准直器投射到安装在光具座轨道上的接收屏表面，滑动接收屏，得到不同距离下不同大小的光斑，据此算出发散角，取多次测量的平均值。实验结果如图 5 所示，作为对比，计算结果也列入图 5。

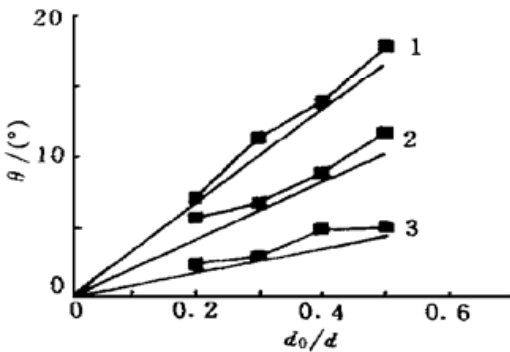


Fig. 5 Calculation and experiment results of diffuse angle. 1: NA= 0. 60; 2: NA = 0. 37; 3: NA= 0. 16. The solide lines are calculated results, the squares are expermetal data

图中结果显示，通过光纤棒微阵列可获得近准直光，其发散角与所选参数有关，如选择 NA 值为中间值 0.37， d_0/d 小于 0.4 时，发散角实验值小于 9° ，计算值小于 8.4° 。可见，实验结果与计算结果基本吻合。而 NA 值为 0.37 时，从表 2 可知，光纤直径为 1.0 mm 时，准直器的厚度为 3.35 mm，基本满足背光源薄型化的要求。

结 论 本研究提出采用梯度光纤折射率微阵列结合光阑微阵列可实现液晶显示器背光源的准直。当光纤棒的长度取 1/4 周期(约几个毫米)，适当选择材料及结构参数 NA 和 d_0 、 d_0/d ，获得了发散角小于 $\pm 10^\circ$ 的近准直光，可以满足液晶显示器扩展视角的需要。

参 考 文 献

[1] 朱昌昌. LCD 宽视角化技术的进展. 光电子技术, 1996, 16(2) : 94~ 103
 [2] Lowe D., Chin T., Crebelle T.L. et al., Spectravue TM: A new system to enhance the viewing angle of LCDs. *Journal of the SID*, 1997, 5(1) : 41~ 44
 [3] Toko Y, Sagiya T, Katoh K. et al.. Amorphous twisted nematic-liquid-crystal displays fabricated by

- nonrubbing showing wide and uniform viewing-angle characteristics accompanying excellent voltage holding ratios. *J. Appl. Phys.*, 1993, **74**(3) : 2071~ 2075
- [4] Zimmerman S, Beeson K, McFarland M *et al.*. Viewing-angle-enhancement system for LCDs. *J. SID*, 1995, **4**(3) : 173~ 176
- [5] 张明德. 光波导技术, 南京: 东南大学出版社, 1982
- [6] Ohmi S, Sakai H, Asaharaet Y *et al.*. Gradient-index rod lens made by a double ion-exchange process. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(3) : 496~ 499
- [7] 刘德森等. 纤维光学, 北京: 科学出版社, 1987.
- [8] 朱世国, 付克祥. 纤维光学原理及实验研究, 成都: 四川大学出版社, 1992.
- [9] Robert J P, Eril D, Richard T. Light-collecting properties of a perfect circular optical fiber. *J. Opt. Soc. Am.*, 1963, **53**(2) : 256~ 260
- [10] [美] 马库赛 D. 光纤测量原理, 北京: 人民邮电出版社, 1986.
- [11] Nishzawa K. Chromatic aberration of the selfoc lens as an imaging system. *Appl. Opt.*, 1980, **21**(7) : 1052~ 1054
- [12] Tomlinson W J. Aberrations of GRIN-rod lenses in multimode optical fiber devices. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(7) : 1117~ 1126

A Novel Collimator for White Light

Zhang Xuping Li Qing

(*Department of Electronic Engineering, Southeast University, Nanjing 210096*)

(Received 23 November 1998; revised 31 May 1999)

Abstract A new collimator is invented which is consisted of the graded-refractive-index (GRIN) -rod microarrays and diaphragm microarrays. The optical principle and the effects of material and structural parameters on collimating properties are studied theoretically. The results of calculation and preliminary experiments show that the quasi-collimating light with the low diffuse angle and small chromatism can be obtained when the parameters are chosen appreciatively. The collimator can meet the needs of collimating backlight of LCD.

Key words collimator, graded-refractive-index fiber, backlight, liquid crystal display.