

基于双路偏振影像分光的立体视觉*

代煜[†] 张建勋

(南开大学机器人与信息自动化研究所, 天津 300071)

(2010 年 10 月 27 日收到; 2010 年 11 月 30 日收到修改稿)

提出使用金属薄膜对双路偏振影像进行分光以实现三维立体视觉. 由两台相同的液晶显示器出射的线偏振光分别被超薄铝膜反射和透射. 由于超薄金属膜的光学常数与膜的厚度相关, 采用分段线性函数建立铝膜的厚度与体积分数的关系, 进而用 Sheng 模型估计铝膜的光学常数. 证明了反射光和透射光都是椭圆偏振光且主轴接近垂直, 从而可以通过偏振方向互相垂直的偏振片将两者加以区分, 并使观察者对液晶显示器的图像产生深度感. 考虑到双目入射光强度的均衡, 计算了最优的铝膜厚度. 实验结果与理论分析完全符合, 验证了方法的正确性.

关键词: 立体视觉, 液晶显示, 光学常数, 超薄金属膜

PACS: 42.30.-d, 78.66.Bz

1. 引言

人类从客观世界获得的信息 80% 以上来自双目, 因而视觉表达就成为多感知的虚拟现实系统中最重要的环节, 立体视觉实现技术也就成为虚拟现实的一种重要的支撑技术. 能够感受到立体视觉的原因是人类的双眼横向并排而且有一定间隔, 因此左眼所看到的影像与右眼所看到的影像会有些细微的差异, 大脑会解读双眼的水平视差以判断物体远近并使人产生立体视觉. 目前应用较广的三维显示技术, 本质上就是把具有一定视差的两幅图像分别投影到双眼视网膜, 最后根据双目视差实现立体视觉. 由于液晶显示 (LCD) 技术的不断发展和广泛应用, 基于 LCD 的自由立体显示技术^[1,2] (观察者不需要佩戴辅助设备) 和体视显示技术^[3-5] (观察者需要借助眼镜、头盔等设备) 已成为三维显示研究的主流方向.

传统的偏振光式体视显示系统是用两台保持一定距离的摄像机并列摄像, 同时获得左、右视差影像. 摄像机输出的左、右影像信号分两路在阴极射线管显示器上显示. 为使左眼仅看见左影像, 右眼仅看见右影像, 对两个显示器显示的左、右影像进行偏振化处理, 使左、右影像变为振动方向互相

垂直的偏振光影像. 观察者佩戴偏振眼镜, 两个镜片的偏振方向和影像的偏振方向相同, 就能使每只眼睛只看到相应的偏振光影像, 从而产生立体视觉. 考虑到 LCD 出射光束的线偏振特性, 本文将借鉴传统的偏振光式体视显示系统的原理, 设计基于双路偏振影像分光的立体视觉系统. 该系统先将双路摄像机对目标区域采集的带有视差的图像在两台相同的 LCD 上分别显示, 经由超薄金属膜的反射和透射, 最后由偏振眼镜接收带有视差并且偏振方向相互垂直的两路偏振光图像, 最终使观察者看到立体影像. 考虑到 LCD 出射光线的偏振特性, 设计这种立体显示系统的关键是要研究线偏振光在超薄金属膜与电介质交界面的反射和透射特性, 证明反射光和透射光的振动方向相互垂直, 从而能够用两个偏振方向垂直的偏振片将两者分离. 还要计算出最优的金属膜厚度, 使得观察者双目看到图像的亮度相同, 以减轻视觉疲劳.

2. 金属薄膜的反射和透射特性

设波长为 λ 的单色平面波透过折射率 n_1 的电介质入射到复折射率为 $\tilde{n}_2 = n_2 + jk_2$ 的金属膜表面, 金属膜镀在折射率为 n_3 的电介质上, 入射光束在金属膜上的入射角为 φ_1 , 折射角为 φ_2 . 按照折射

* 国家高技术研究发展计划 (批准号: 2007AA04Z247) 资助的课题.

[†] E-mail: daiyu@nankai.edu.cn

定律有 $n_1 \sin \varphi_1 = \tilde{n}_2 \sin \varphi_2$. 光的电矢量分解为以下两个分量: 平行于入射面的 P 分量和垂直于入射面的 S 分量. 由于金属具有很强的吸收作用, 根据折射定律和菲涅耳反射公式, 并设 $\tilde{n}_2 \cos \varphi_2 = u + jv$ 得到 P 分量和 S 分量在反射面上的复反射率为

$$r_{12}^P = \frac{\tilde{n}_2^2 \cos \varphi_1 - n_1(u + jv)}{\tilde{n}_2^2 \cos \varphi_1 + n_1(u + jv)}, \quad (1)$$

$$r_{12}^S = \frac{n_1 \cos \varphi_1 - (u + jv)}{n_1 \cos \varphi_1 + (u + jv)}, \quad (2)$$

式中 u 和 v 能够根据 $(u + jv)^2 = \tilde{n}_2^2 - n_1^2 \sin^2 \varphi_1$ 中实部和虚部相等求解. 该平面波再由金属膜入射到折射率为 n_3 的电介质上, 设折射角为 φ_3 . 按照折射定律 $\tilde{n}_2 \sin \varphi_2 = n_3 \sin \varphi_3$, 根据菲涅耳公式得到 P 分量和 S 分量的复反射率为

$$r_{23}^P = \frac{-\tilde{n}_2^2 \cos \varphi_3 + n_3(u + jv)}{\tilde{n}_2^2 \cos \varphi_3 + n_3(u + jv)}, \quad (3)$$

$$r_{23}^S = \frac{u + jv - n_3 \cos \varphi_3}{u + jv + n_3 \cos \varphi_3}. \quad (4)$$

设金属膜的厚度为 h , 则单层金属膜的 P 分量和 S 分量振幅反射率可表示为^[6]

$$r^P = \frac{r_{12}^P + r_{23}^P e^{2j\beta}}{1 + r_{12}^P r_{23}^P e^{2j\beta}}, \quad (5)$$

$$r^S = \frac{r_{12}^S + r_{23}^S e^{2j\beta}}{1 + r_{12}^S r_{23}^S e^{2j\beta}}, \quad (6)$$

式中

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda}(u + jv)h. \quad (7)$$

同理, 如果该平面波从折射率 n_3 的电介质以 φ_3 的入射角入射到金属膜表面, 再由金属膜入射到折射率为 n_1 的电介质上, 则 P 分量和 S 分量振幅透射率可表示为^[6]

$$t^P = \frac{t_{32}^P + t_{21}^P e^{j\beta}}{1 + r_{32}^P r_{21}^P e^{2j\beta}}, \quad (8)$$

$$t^S = \frac{t_{32}^S + t_{21}^S e^{j\beta}}{1 + r_{32}^S r_{21}^S e^{2j\beta}}, \quad (9)$$

式中

$$r_{32}^P = -r_{23}^P, \quad (10)$$

$$r_{32}^S = -r_{23}^S, \quad (11)$$

$$r_{21}^P = -r_{12}^P, \quad (12)$$

$$r_{21}^S = -r_{12}^S, \quad (13)$$

$$t_{32}^P = \frac{2\tilde{n}_2 n_3 \cos \varphi_3}{\tilde{n}_2^2 \cos \varphi_3 + n_3(u + jv)}, \quad (14)$$

$$t_{32}^S = \frac{2n_3 \cos \varphi_3}{n_3 \cos \varphi_3 + (u + jv)}, \quad (15)$$

$$t_{21}^P = \frac{2\tilde{n}_2(u + jv)}{\tilde{n}_2^2 \cos \varphi_1 + n_1(u + jv)}, \quad (16)$$

$$t_{21}^S = \frac{2(u + jv)}{n_1 \cos \varphi_1 + (u + jv)}. \quad (17)$$

从(5), (6), (8)和(9)式可知, 金属膜引起的相位改变与金属膜的复折射率和入射角密切相关. 由于金属膜的复折射率, 光反射和透射时发生特征相位变化, 因而入射的线偏振光经金属膜反射和透射后一般将变为椭圆偏振光.

3. 超薄金属膜的光学常数

由于超薄金属膜的光学性质不同于相应的块状材料, 且薄膜的光学常数与薄膜的厚度、入射电磁波的波长、薄膜的沉积方法等均有关系, 从而导致利用文献给出的块状或薄膜金属的光学常数进行薄膜设计得到的设计结果与实际值差别较大, 因此如何根据实际工作条件确定薄膜的光学常数一直是薄膜设计者非常关注的课题. 文献[7]是关于精确测量铝膜光学常数的最新报道, 该文虽然给出了铝膜的光学常数, 但本实验中采用的铝膜较厚, 而较厚铝膜的光学常数基本不随膜的厚度改变. Sun 等^[8]的实验表明, 当铝膜的厚度小于 30 nm 时透射率和反射率与膜的厚度相关. 虽然采用椭圆偏法、光度法或者两者的组合能够精确测得薄膜的光学常数以及膜的厚度^[9], 但如果在加工之前可以估计出特定厚度下薄膜的光学常数, 就能够使得薄膜的设计准确高效. 本文将在前人研究的基础上建立超薄金属膜的光学常数与金属膜厚度的简单函数关系.

超薄金属薄膜的光学性质, 可由 Maxwell-Garnett 模型^[10]、Bruggeman 模型^[11]、Sheng 模型^[12]等描述. Du 等^[13]指出, 当金属的体积分数 $k \leq 0.4$ 时, Maxwell-Garnett 模型对金属膜光学常数的估计与实验结果最接近, 当 $k > 0.7$ 时, Sheng 模型较好. 参考文献[14]中表 2 和表 5 的实验结果, 确定本文所用的薄膜中铝的体积分数在 0.6—0.8 之间(在这个区域内薄膜的透射率和反射率都比较大), 因此选用 Sheng 模型.

根据 Sheng 模型, 对于在折射率 n_1 的电介质中的金属薄膜, 其有效复介电常数 ε_{eff} 可通过求解如下方程得到:

$$p_1 \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_{\text{eff}}}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_{\text{eff}}} + p_2 \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_{\text{eff}}}{\varepsilon_2 + 2\varepsilon_{\text{eff}}} = 0, \quad (18)$$

式中

$$\begin{aligned} p_1 &= u_1 / (u_1 + u_2), \\ p_2 &= u_2 / (u_1 + u_2), \\ u_1 &= (1 - (1 - k)^{1/3})^3, \\ u_2 &= (1 - k^{1/3})^3, \\ \varepsilon_1 &= n_1^2, \\ \varepsilon_2 &= n_{\text{bulk}}^2. \end{aligned}$$

这里 n_{bulk} 表示块状金属的折射率. 根据文献[14]中图 5 给出的铝的体积分数与膜厚的实验数据 $(h_0, k_0), (h_1, k_1), \dots, (h_m, k_m)$, 通过下列分段线性函数可以得到膜厚与体积分数的关系:

$$k = \begin{cases} k_0 + \frac{k_1 - k_0}{h_1 - h_0}(h - h_0) & (h < h_1), \\ k_1 + \frac{k_2 - k_1}{h_2 - h_1}(h - h_1) & (h_1 \leq h < h_2), \\ \dots & \dots \\ k_{m-1} + \frac{k_m - k_{m-1}}{h_m - h_{m-1}}(h - h_{m-1}) & (h \geq h_{m-1}). \end{cases} \quad (19)$$

给定膜厚 h , 可以根据(18)和(19)式计算得到薄膜的光学常数.

4. 立体视觉原理及金属膜厚度的计算

如图 1 所示, 基于双路偏振影像分光的立体视觉实现方法如下: 在两台相同的 LCD 中间放置一块金属分光镜, 借助于 45° 和 135° 的偏振片, 使观察者的一只眼睛只能看到正面的 LCD 出射光线, 而让另一只眼睛只能看到分光镜上反射的另一台 LCD 的图像. 金属分光镜是将铝镀在光学玻璃(折射率为 1.51)上制成, 选择铝的原因是铝在整个可见光区域均表现出很高的反射比, 而且铝表面暴露在空气中会形成氧化铝保护层. 氧化铝薄层具有很高的可见光透射率^[15], 所以本文将其对铝膜光学常数的影响忽略.

LCD 的基本结构是在两个偏振方向相互垂直的偏振片中间充满扭曲液晶, 因此从 LCD 背光板出射的光线穿过两个偏振片和液晶后成为线偏振光, 并且偏振角一般为 45° , 如果两台显示器出射的光线都以 45° 的入射角入射到金属分光镜上, 考虑到人眼可见的光波长范围在 390—760 nm 之间, 给定

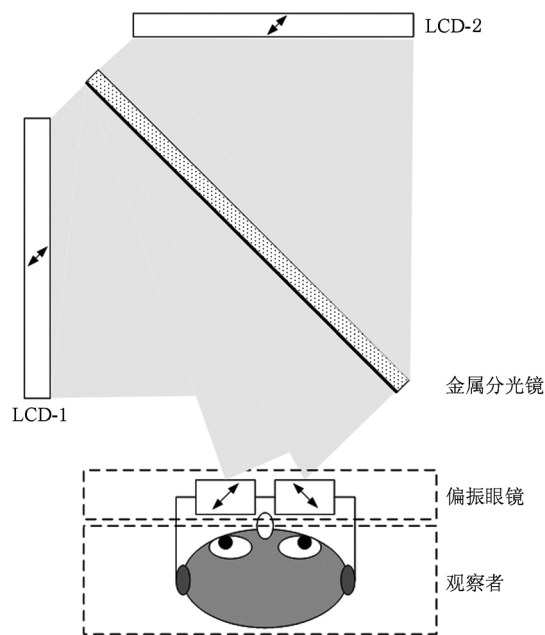


图 1 立体视觉原理示意图

铝膜的厚度 h , 取 $n_1 = 1$, 利用文献[16]中列出的金属铝的折射率, 就可根据(5), (6), (8)和(9)式列出反射和透射的椭圆偏振光的方程. 图 2 给出了当 $h = 10$ nm, 入射光的波长在人眼可见的光波长范围内取 $\lambda_1 = 729.3$ nm(光子能量为 1.7 eV), $\lambda_2 = 688.8$ nm(光子能量为 1.8 eV), $\lambda_3 = 652.3$ nm(光子能量为 1.9 eV), $\lambda_4 = 619.9$ nm(光子能量为 2.0 eV), $\lambda_5 = 563.6$ nm(光子能量为 2.2 eV), $\lambda_6 = 516.6$ nm(光子能量为 2.4 eV), $\lambda_7 = 476.9$ nm(光子能量为 2.6 eV), $\lambda_8 = 442.8$ nm(光子能量为 2.8 eV)和 $\lambda_9 = 413.3$ nm(光子能量为 3.0 eV)时, 透射光和反射光的椭圆曲线及旋向(忽略光束在玻璃中的传输损耗). 从图 2 可以看出, 如果观察者佩戴 45° 和 135° 的偏振眼镜, 两个眼睛就能分别看到两个显示器中的影像, 从而在脑中形成立体视觉.

金属膜对 P 分量和 S 分量的强度反射率为

$$R_{\text{ip}} = |r^{\text{p}}|^2, \quad (20)$$

$$R_{\text{is}} = |r^{\text{s}}|^2. \quad (21)$$

对 P 分量和 S 分量的强度透射率为

$$T_{\text{ip}} = \frac{n_1 \cos \varphi_1}{n_3 \cos \varphi_3} |t^{\text{p}}|^2, \quad (22)$$

$$T_{\text{is}} = \frac{n_1 \cos \varphi_1}{n_3 \cos \varphi_3} |t^{\text{s}}|^2. \quad (23)$$

忽略光束在偏振片中的传输损耗, 透射光和反射光通过 45° 和 135° 的偏振眼镜后的透光率 E_{45} 和 E_{135} 分别为

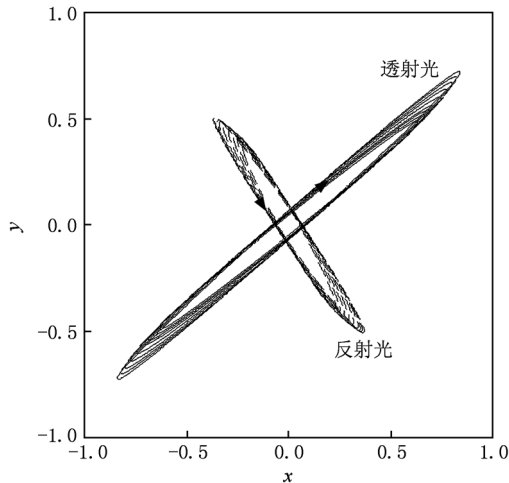


图2 透射光的椭圆方程和反射光的椭圆方程 箭头标出了旋转方向

$$E_{45} = \frac{|T_{iP} + T_{iS}|}{2}, \quad (24)$$

$$E_{135} = \frac{|R_{iP} + R_{iS}|}{2}. \quad (25)$$

当铝膜的厚度增加时, E_{45} 减小, E_{135} 增大. 为了达到理想的立体视觉效果, 对于在可见光范围内的任意波长的光, 应当使得 $E_{45} = E_{135}$. 定义评价函数

$$L(h) = \sum_{i=1}^9 (E_{45}(h, \lambda_i) - E_{135}(h, \lambda_i))^2. \quad (26)$$

$L(h)$ 取得最小值时的 h 就是最优的金属膜厚度. 从图3可见, 当 $h = 11.8 \text{ nm}$ 时评价函数 $L(h)$ 取得最小值, 此时的偏振眼镜的透光率如图4所示, 体积分数 $k = 0.7$. 图4中曲线的变化趋势与文献[8]中图3的结果一致.

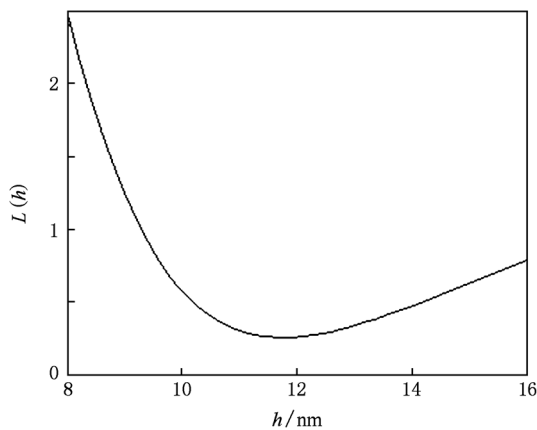


图3 评价函数 $L(h)$ 与铝膜厚度 h 的关系

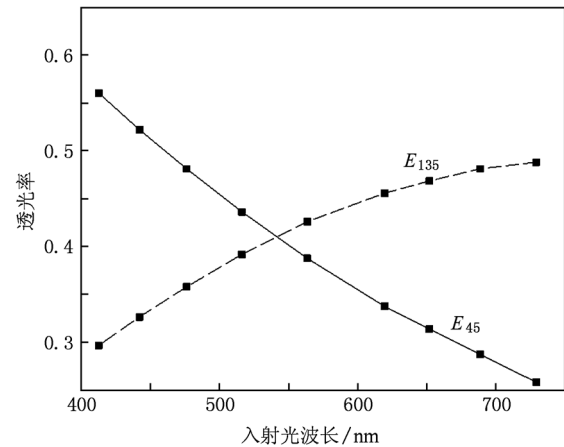


图4 透光率与入射光波长的关系

5. 实验结果分析

按照图1所示研制了基于双路偏振影像分光的立体显示装置, 使用三星公司生产的 2243BW 型 LCD, 两台 LCD 显示的图像分别来源于两个电荷耦合器件 (CCD) 摄像机对同一个场景的拍摄. 图5(a) 给出了两台 LCD 出射的光束分别经超薄铝膜透射和反射之后重叠在一起的模糊影像, 该图由架设在金属分光镜前的 CCD 摄像机采集. 图5(b) 和 (c) 是图5(a) 所示影像分别经过 45° 和 135° 偏振片后由 CCD 摄像机采集的画面, 从中可以看出重叠的图像被有效地分离, 这也证明了透射椭圆偏振光和反射椭圆偏振光的主轴夹角约为 90° . 由于两台摄像机拍摄角度和位置的不同, 图5(b) 和 (c) 存在一定的差异, 所以观察者可以从中获得场景的深度信息. 根据图2所示, 入射的线偏振光经超薄铝膜反射和透射后变为椭圆偏振光, 这就表明透射光会有一部分通过 135° 偏振片, 反射光同样会有一部分通过 45° 偏振片, 但由于椭圆的长轴和短轴之比较大, 在图5(b) 和 (c) 中看不到重叠的影像, 这一小部分漏光不影响立体视觉的效果. 从图5可见, 由于偏振片的滤光作用, 图5(b) 和 (c) 的亮度与图5(a) 的亮度有较大差距, 也就是观察者看到的影像要比 LCD 显示的影像暗 (根据图4的曲线可知, 透光率在 40% 左右). 因此在使用基于双路偏振影像分光的立体视觉装置时, 需要适当提高被摄场景的亮度, 同时采用一定的屏蔽措施防止环境光的干扰. 此外, 由于目前主流的薄膜晶体管 LCD 均采用了宽视角技术 (2243BW 型 LCD 的水平可视角度为 170° , 垂直

可视角度为 160°), 所以这种立体显示装置同样适合多人观看.

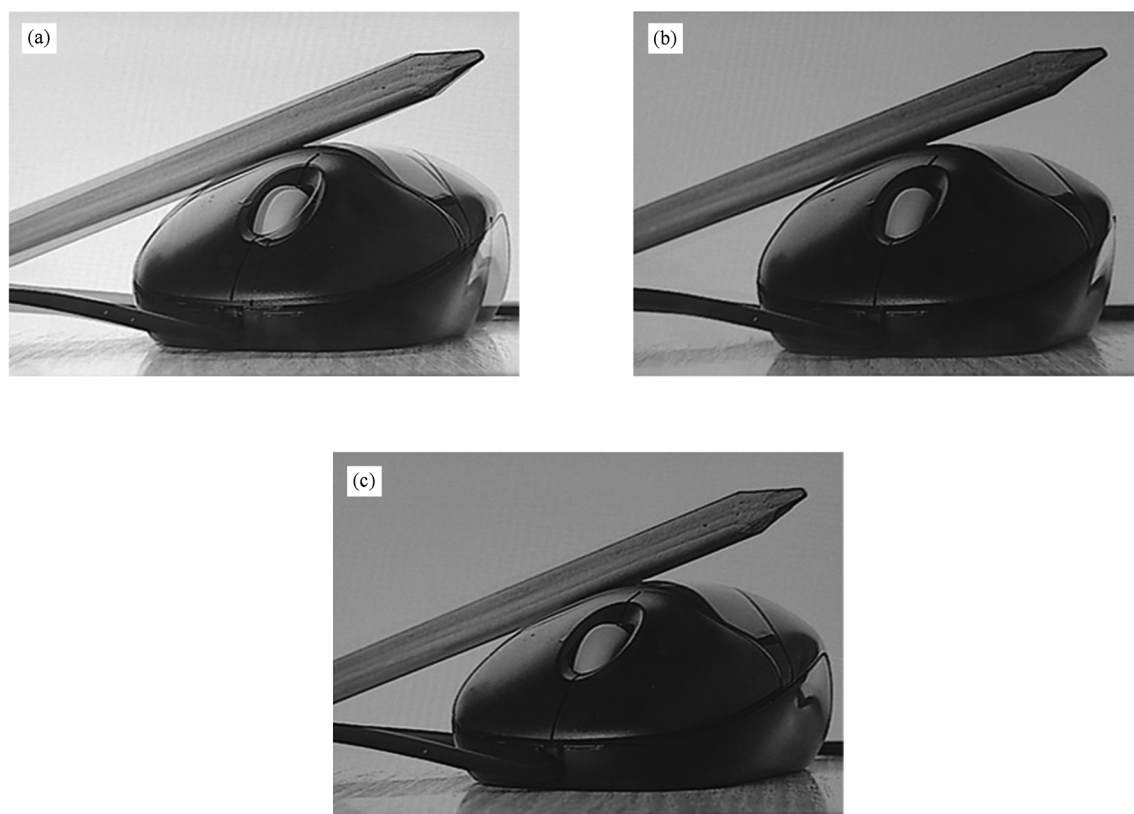


图5 透射光和反射光重叠的影像及其经过偏振片后的影像 (a) 透射光和反射光重叠的影像, (b) 经过 45° 偏振片后的影像, (c) 经过 135° 偏振片后的影像

6. 结 论

本文对基于双路偏振影像分光的立体成像技术进行了研究, 设计了立体感强、便于多人同时观看、结构简单的立体显示装置. 与传统的偏振光式体视显示系统相比, 该装置具有体积小、重量轻和结构紧凑的优点. 深入研究了装置中的关键部件——金属分光镜, 着重探讨了超薄金属膜的光学常数与膜厚的关系, 提出采用分段线性函数建立铝

膜厚度与体积分数的简单函数关系, 然后用 Sheng 模型估计铝膜的光学常数. 证明了线偏振光经金属分光镜反射和透射之后都是椭圆偏振光且主轴接近垂直, 从而可以通过偏振方向互相垂直的偏振片将反射光和透射光分开, 使观察者产生立体视觉. 此外, 本文还考虑到进入观察者双目光强度的均衡, 计算了最优的铝膜厚度. 实验结果表明, 立体显示装置达到了预期的效果, 完全能够满足实际应用的需要.

- | | |
|---|--|
| <p>[1] Jang J S, Javidi B 2004 <i>Opt. Express</i> 12 1077</p> <p>[2] Tao Y H, Wang Q H, Gu J, Zhao W X, Li D H 2009 <i>Opt. Lett.</i> 34 3220</p> <p>[3] Kim S C, Kim E S 2005 <i>Opt. Commun.</i> 249 51</p> <p>[4] Kim S C, Kim E S 2006 <i>Opt. Commun.</i> 266 55</p> <p>[5] Shin H K, Lee J H, Jin H J, Yoon T H, Kim J C 2010 <i>Opt. Lett.</i> 35 2227</p> | <p>[6] Born M, Wolf E 2009 <i>Principles of Optics</i> (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) pp628—633 (in Chinese) [玻恩 M, 沃尔夫 E 2009 光学原理(中译本)(北京: 电子工业出版社) 第 628—633 页]</p> <p>[7] Aleksandar D R 1995 <i>Appl. Opt.</i> 34 4755</p> <p>[8] Sun Z Q, Cao C B, Cao L, Liang P, Huang X F, Song X P 2010 <i>Vacuum</i> 84 828</p> |
|---|--|

- [9] Zhou Y, Wu G S, Dai W, Li H B, Wang A Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2356 (in Chinese) [周毅、吴国松、代伟、李洪波、汪爱英 2010 物理学报 **59** 2356]
- [10] Maxwell-Garnett J C 1904 *Philos. Trans. R. Soc. London A* **203** 385
- [11] Bruggeman D A G 1935 *Ann. Phys.* **24** 636
- [12] Sheng P 1980 *Phys. Rev. Lett.* **45** 60
- [13] Du H, Chen H, Gong J, Wang T G, Sun C, Lee S W, Wen L S 2004 *Appl. Surf. Sci.* **233** 99
- [14] Du H, Xiao J Q, Zou Y S, Wang T G, Gong J, Sun C, Wen L S 2006 *Opt. Mater.* **28** 944
- [15] Palik E D 1985 *Handbook of Optical Constants of Solids* (San Diego: Academic Press) pp369—406
- [16] Marvin J W 2003 *Handbook of Optical Materials* (Boca Raton: CRC Press) pp314—316

Stereoscopic visualization based on splitting of two-way polarized image beams^{*}

Dai Yu[†] Zhang Jian-Xun

(Institute of Robotics and Automatic Information System, Nankai University, Tianjin 300071, China)

(Received 27 October 2010; revised manuscript received 30 November 2010)

Abstract

A thin metal film is introduced to split two-way polarized image beams, thereby accomplishing a stereoscopic three-dimensional display. Linearly polarized beams emitted by two uniform liquid crystal displays (LCDs) are reflected and transmitted by ultrathin aluminum film separately. Since optical constant of ultrathin metal film depends on film thickness, a piecewise linear function is used to obtain the relationship between the volume fraction of aluminum and the thickness of the film, and then the optical constant can be estimated by the Sheng Model. Following this procedure it is proved that both the reflected and the transmitted beams become elliptically polarized light beams and their principal axes are approximately vertical. Thus two orthogonal polarizers can be used to separate them and then make the observer have a perception of depth in LCD image. In order to keep the quantities of light entering the observer's two eyes balanced, the thickness of the aluminum film is optimized. Experimental results are in agreement with the theoretical analyses, so the correctness of the method is verified.

Keywords: stereoscopic visualization, liquid crystal display, optical constant, ultrathin metal film

PACS: 42.30.-d, 78.66.Bz

^{*} Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2007AA04Z247).

[†] E-mail: daiyu@nankai.edu.cn