

# 基于偏振滤波的皮肤镜光学和机械设计

曹逸兴<sup>1</sup> 张国旗<sup>1\*</sup> 卢勇男<sup>2</sup>

(1. 复旦大学工程与应用技术研究院, 上海 200433;

2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

**摘要:** 皮肤镜在临床中已广泛用于诊断皮肤病变, 然而, 如何更加清晰准确地观察表皮、真皮表皮交界处和真皮乳头层内的色素性结构的大小、形状、颜色的深浅及浅层血管丛血管的大小形态依旧是一个挑战。由于皮肤表皮层类似于镜面反射, 不改变反射光的偏振态, 而皮肤组织表皮层以下的组织会改变原有光线的偏振态, 基于此, 本文设计了一个视场为 22 mm、倍率为 10 × 的手持偏振皮肤镜, 通过采用偏振照明成像技术可以更加清晰有效地观察深层皮肤组织的病变以及病变组织形态, 从而提高临床诊断与鉴别效率。

**关键词:** 皮肤镜; 皮肤病影像; 偏振光

中图分类号: 170.3890; 170.1870; 170.3880 文献标识码: A doi: 10.3788/CO.20201302.0273

## Optical and mechanical design of polarization filtered dermoscopy

CAO Yi-xing<sup>1</sup>, ZHANG Guo-qi<sup>1\*</sup>, LU Yong-nan<sup>2</sup>

(1. Academy for Engineering & Technology, Fudan University, Shanghai 200433, China;

2. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

\* Corresponding author, E-mail: g. q. zhang@tudelft. nl

**Abstract:** Dermoscopy has been widely used in the diagnosis of skin lesions in the clinical field. However, difficulty remains in clear and accurate observation of the size, shape, color depth and size of superficial vascular plexus vessels in the epidermis, dermal-epidermal junction and dermal papilla. Since the epidermis is specularly reflective, it does not change the polarization state of the reflected light. Contrarily, tissue below the epidermal layer of the skin tissue changes the polarization state of the source light. Based on this, we designed a handheld system with a field of view of 22 mm and a magnification of 10 × that performs polarized dermoscopy through the use of polarized illumination imaging technology, which more clearly and effectively observe the lesions of deep skin tissue and the morphology of lesions, thereby improving the efficiency of clinical diagnoses.

**Key words:** dermoscopy; skin disease imagery; polarized light

## 1 引言

皮肤作为人体最大的组织器官, 为保护人类

身体免受外界环境侵袭扮演着重要的角色。但皮肤组织的病变每年呈递增趋势, 早期对皮肤病变组织进行准确诊断并采取积极的治疗措施可以获得非常高的治愈率<sup>[1]</sup>。因此, 如何更准

收稿日期: 2019-06-04; 修订日期: 2019-08-01

确有效的诊断与鉴别皮肤组织的病变尤为重要。

皮肤镜的发明使临床诊断皮肤组织变得更加方便快捷<sup>[2-6]</sup>。皮肤镜的基本原理就是将光源照射到待观察皮肤组织,通过皮肤镜上的放大镜观察皮肤组织的特征<sup>[6]</sup>。传统的皮肤镜主要为浸润式皮肤镜,其原理将皮肤镜镜头透过矿物油或乙醇等液体观察皮肤。由于皮肤表面的液体可以减小照明光源的反射,使得角质层变得透明,再通过皮肤镜的放大作用能够看到真皮组织的结构。但在该方案中,液体的选择,照明光源的角度,都会在一定程度上使皮肤组织的角质层反射了大部分光源而导致皮肤组织下面的真皮层被掩盖,所以在对真皮层的组织病变的临床诊断中难以做出较为准确的判断。

近几年来,利用基于偏振光学的方法对人体组织进行诊断得到了较为广泛的应用<sup>[7-10]</sup>。

当自然光源照射到物体表面时,会发生反射,吸收或是散射。由于皮肤的表皮层折射率较高,当光线照射到皮肤表层时,通常会发生类似镜面反射的现象。此时,观察到的图像主要为皮肤表层的反射光,很难观察到皮肤组织真皮层的病变组织形态。此外,传统的浸润式皮肤镜在检测过程中过于复杂,同时观察效果并不理想。手持式皮肤镜作为皮肤影像领域中的重要装备,在我国尚处于起步阶段,临床中采用美国、德国等西方发达国家的进口产品较多,鲜见高质量国产装备。为了克服这些问题,本文设计了一种正交式偏振皮肤镜,该皮肤镜是一种非接触式皮肤镜。偏振皮肤镜的前端主要由 4 部分组成:光学系统、照明系统、偏振片  $P_1$  和偏振片  $P_2$ 。其中,照明系统由白光偏振光源、非偏振的白光光源和黄光光源 3 种光源组成。白色偏振光源照明时,深层皮肤组织的反射光线会通过光学系统后方放置的偏振片  $P_2$ ,而表皮层的反射光线将会被偏振片  $P_2$  阻止进入人眼(探测器),从而可以提高对皮肤组织真皮层病态组织观察的对比度。同样条件下,采用另外两种光源照明。通过对比 3 种不同光源照明的皮肤组织,可以观察到更多真皮组织的细微特征,可使临床诊断更加准确高效。该偏振皮肤

镜不仅可以满足人眼在不同距离和不同视场观察的需求,同时可以通过连接手机摄像头进行图像采集,以便存档和远程诊断。

本文详细说明了偏振皮肤镜的结构与设计原理,并加工制作出实物。同时,对比了不同光源下皮肤组织的照片,以进一步分析该偏振皮肤镜的性能。

## 2 设计原理

### 2.1 皮肤镜的偏振原理

假设当照明光线通过偏振片以后,振幅为  $A$  的线偏振光,以角度为  $i$  的入射角从空气( $n=1$ )入射到透明介质(表皮层),其折射角为  $\gamma$ ,入射线偏振光的偏振面与入射面夹角为  $\alpha$ ,则平行于入射面和垂直于入射面的分量分别为:

$$A_{1s} = A \cos \alpha, \quad (1)$$

$$A_{1p} = A \sin \alpha. \quad (2)$$

根据菲涅尔公式可知<sup>[11]</sup>,反射光的平行入射面与垂直入射面分量分别为:

$$A'_{1s} = \frac{\tan(i - \gamma)}{\tan(i + \gamma)} A_{1s} = A \cos \alpha \frac{\tan(i - \gamma)}{\tan(i + \gamma)}, \quad (3)$$

$$A'_{1p} = \frac{\sin(i - \gamma)}{\sin(i + \gamma)} A_{1p} = -A \cos \alpha \frac{\sin(i - \gamma)}{\sin(i + \gamma)}. \quad (4)$$

由于  $A'_{1s}$  和  $A'_{1p}$  位相相同或相反,因此照射在皮肤表面的线偏振光仍为线偏振光。

此外,根据马吕斯定律知<sup>[12]</sup>,自然光通过偏振片  $P_1$  以后为一束线偏振光  $I_1$ ,当  $I_1$  通过偏振片  $P_2$  以后,其出射光强  $I_2$  可表示为:

$$I_2 = I_1 \cos^2 \theta, \quad (5)$$

其中  $\theta$  为偏振片  $P_1$  和  $P_2$  的夹角。因此,设置观察皮肤的偏振片  $P_2$  与照明光源的偏振片  $P_1$  相垂直,则皮肤表面反射的光线无法通过偏振片  $P_2$ 。

### 2.2 偏振皮肤镜的设计原理

偏振皮肤镜的设计原理如图 1(彩图见期刊电子版)所示,光源发出的自然光经过前方放置的偏振片  $P_1$  后成为线偏振光,一部分线偏振光照射在皮肤表皮层发生反射(近似于镜面反射,不

改变光的偏振态),另一部分偏振光线在表皮层发生折射后入射到真皮层,进而在真皮层发生了散射和多次反射;通过光学系统后的光线,再经过偏振片 $P_2$ ,最终可通过人眼(探测器)观测到皮肤组织的相应状态。根据2.1部分可知,由于偏振片 $P_1$ 和偏振片 $P_2$ 的偏振方向相互垂直,而表皮近似于镜面反射,其反射光保持原有的偏振态,所以表皮反射的光线不会通过偏振片 $P_1$ ,故不会被人眼(探测器)所观察到;而真皮层的光线由于发生了散射以及多次反射,最终的出射光线改变了原有的偏振态,因此真皮所反射的部分光线可以通过偏振片 $P_2$ 由人眼(探测器)接收。

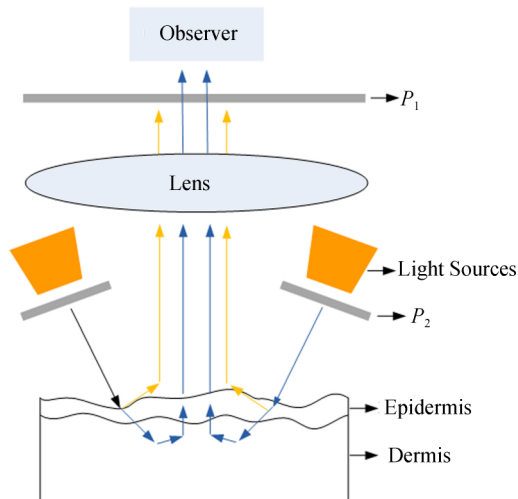


图1 偏振皮肤镜原理

Fig. 1 Principle of polarized dermoscopy

### 2.3 光学系统设计

为了便于使人眼通过偏振皮肤镜观察真皮组织,同时使手机相机能对真皮组织进行拍照,采用目镜系统代替普通放大镜进行观察。人眼直接观察物体时,通常把物体放在明视距离上,该距离 $D=250\text{ mm}$ ,当人眼调焦在无限远处时,物体(皮肤组织)放在放大镜的前焦点上,则有:

$$\Gamma_0 = D/f' = 250/f' \quad (6)$$

由于目视倍率 $\Gamma_0$ 为 $10\times$ ,根据公式(6),可以得到目镜的焦距为 $25\text{ mm}$ 。根据皮肤镜 $22\text{ mm}$ 线视场要求,得出目镜全视场角为 $47.5^\circ$ 。选择对称型目镜作为皮肤镜的初始光学结构,这是因

为该初始结构具有结构紧凑,工艺性好,适用于短焦距,具有较大的视场范围并且有利于减小像差。基于该初始结构和初始参数,通过CODE V软件对光学系统进行优化设计,最终目镜的具体参数见表1,结构如图2(彩图见期刊电子版)所示。由于人眼在明视距离时,分辨率在 $0.07\sim 0.12\text{ mm}$ 之间,取最小人眼分辨率 $0.07\text{ mm}$ ,则人眼的分辨率为 $7\text{ lp/mm}$ 。图3表示的是偏振皮肤镜光学系统的光学传递函数(MTF),其系统全视场在 $70\text{ lp/mm}$ 处MTF均在 $0.2$ 以上,满足人眼对皮肤组织观测的细节需求。此外,图3、图4和图5分别为偏振皮肤镜的光线像差曲线,场曲和畸变曲线,由图3、图4和图5可知,像差曲线被控制在 $\pm 0.025\text{ mm}$ 以内,边缘场曲被控制在 $0.14\text{ mm}$ 以内,边缘视场畸变被控制在 $2.3\%$ 以内。因此该偏振皮肤镜满足皮肤组织成像需求。

表1 最终目镜结构参数

Tab. 1 Structure parameters of final eyepiece

参数名称	参数
口径/mm	30
光学总长/mm	28.81
焦距/mm	25
入瞳直径/mm	4
目视倍率	$10\times$
有效靶面/mm	22

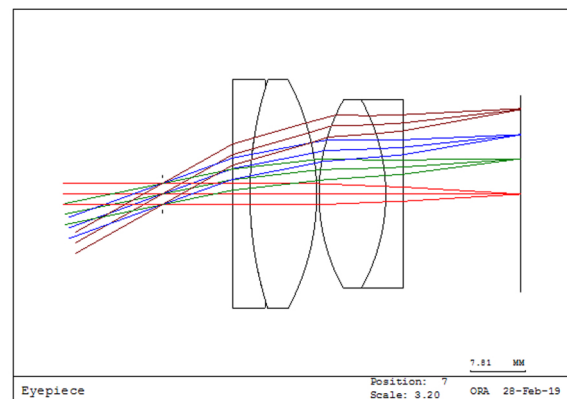


图2 偏振皮肤镜目镜的光学系统

Fig. 2 Optical system of dermoscopy eyepiece

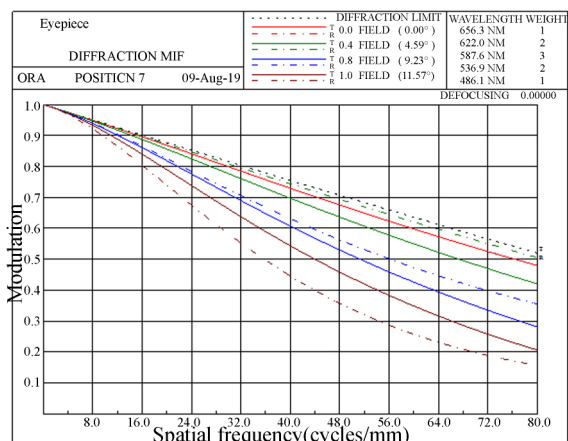


图 3 偏振皮肤镜光学系统 MTF

Fig. 3 MTF of polarized dermoscopy optical system

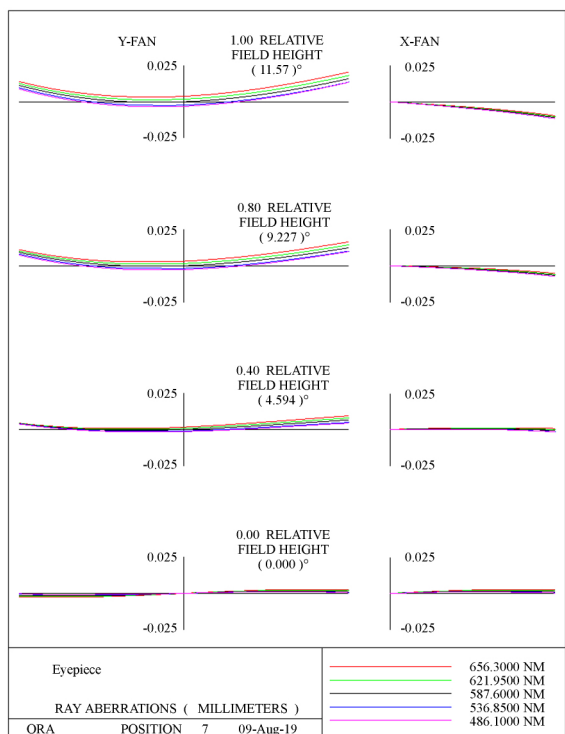


图 4 偏振皮肤镜光学像差曲线

Fig. 4 Optical aberration curves of polarized dermoscopy

该目镜结构不仅能够使人眼可以在不同距离视场对皮肤组织进行观察,而且可以使用手机拍照功能获取皮肤组织的照片。

### 2.4 照明系统

由于 LED (Light-Emitting-Diode) 光源具有光效率高、耗电少和寿命长等特点,可以对皮肤组织提供有效的照明,更有利于对皮肤组织的病变进行分析判断,所以该偏振皮肤镜的照明系统选择

LED 为照明光源。该照明系统由 3 部分组成,分别为白色 LED 偏振光源,白色 LED 光源和黄色 LED 光源。白色 LED 光源光效在 97 lm/W 左右,而白色 LED 偏振光源由于起偏器只允许一半的光能量通过,因此 LED 偏振光源的光效在 48.5 lm/W 左右,黄色 LED 光源的光效为 70 lm/W。因为自然光通过偏振片后能量会缩小一半,为了保证对皮肤组织照明的均匀性,白色 LED 偏振光源的个数为白色 LED 光源的两倍。如图 6 (彩图见期刊电子版) 所示,在放大镜周围,每间隔 15° 设置为一个 LED 光源,共设置有 24 个 LED 光源。其中,以 0° 为起始点到 360° 为终点,每间隔 30° 设置为白色 LED 偏振光源;以 15° 为起始点到 315° 为终点,每间隔 60° 设置为白色 LED 光源;以 45° 为起始点到 345° 为终点,每间隔 60° 设置为黄色 LED 光源。

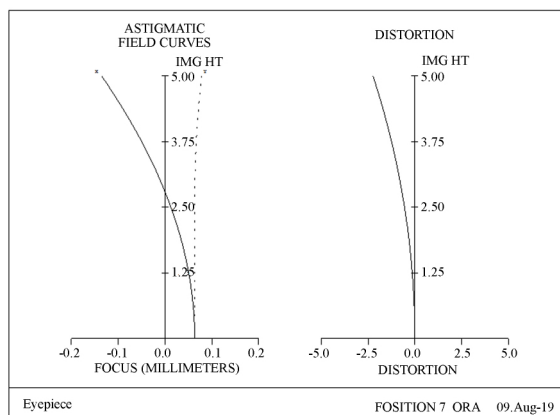


图 5 偏振皮肤镜场曲和畸变曲线

Fig. 5 Field curvature and distortion curve of polarized dermoscopy

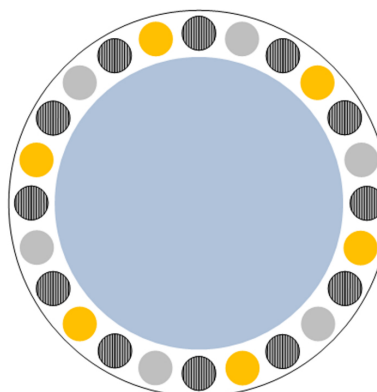


图 6 3 种 LED 光源分布图

Fig. 6 Distribution diagram of three kinds of light source of LED

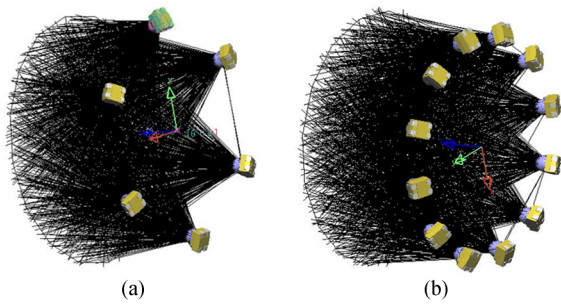


图 7 LightTools 模拟光源照度均匀性。(a) 模拟 6 个白色 LED 光源照度; (b) 模拟 12 个白色 LED 偏振光源照度

Fig. 7 Illuminance uniformity of the source simulated by LightTools. (a) Simulate illumination of 6 white LED sources; (b) simulate illumination of 12 white LEDs with polarized light source

为了验证系统照明的均匀性,在 LightTools 中建立照明系统模型。利用 LightTools 建模并模

拟非偏振 LED 光源和偏振 LED 光源相应光源的分布 如图 7 所示 然后分别对非偏振 LED 光源和偏振 LED 光源进行仿真并计算其照明均匀性,具体参数如表 2 所示。

表 2 模拟 LED 光源照明参数

Tab. 2 Simulation LED lighting parameters

设置条件	白色 LED 光源参数	偏振 LED 光源参数
LED 数目	6	12
LED 发散角	30°	30°
LED 倾斜角度	25°	25°
对角 LED 距离	35 mm	35 mm
LED 距靶面距离	19 mm	19 mm
照明均匀性	85%	86%

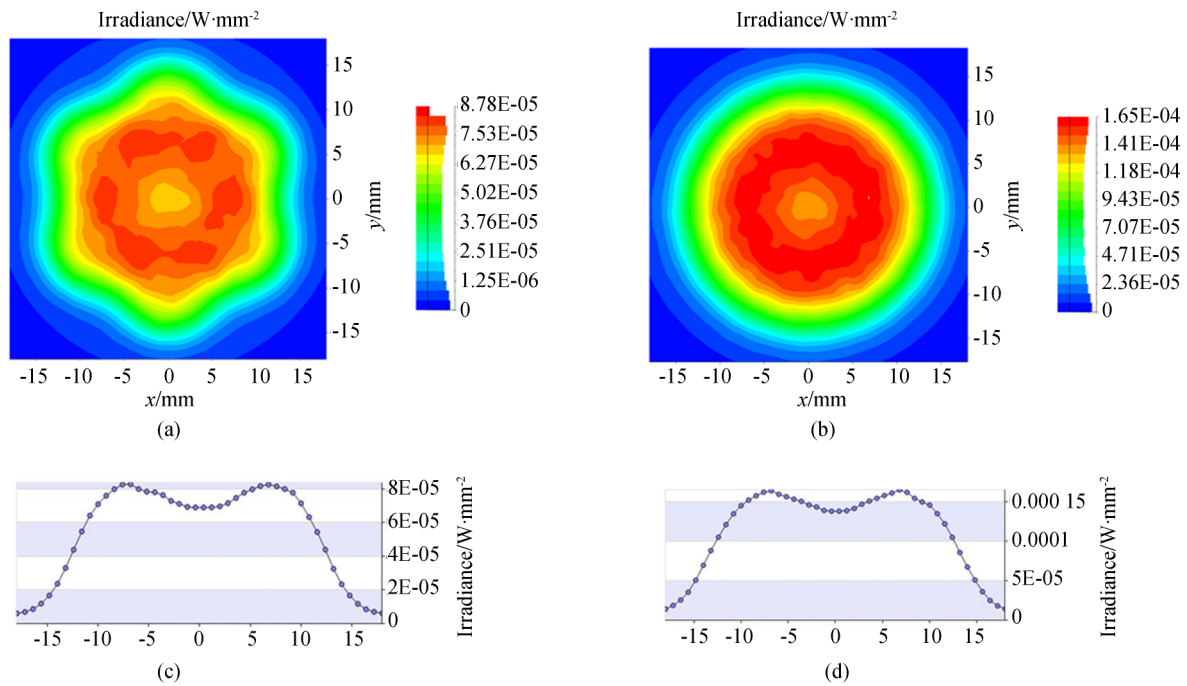


图 8 非偏振与偏振 LED 光源照度图。(a) 非偏振光源照度图; (b) 偏振光源照度图; (c) 非偏振光源 Y 轴辐射分布; (d) 偏振光源 Y 轴辐射分布

Fig. 8 Unpolarized and polarized LED source illuminations. (a) Unpolarized source illumination; (b) polarized source illumination; (c) Y-axis radiation distribution of unpolarized source; (d) Y-axis radiation distribution of polarized source.

利用 LightTools 软件对偏振和非偏振 LED 照明光源进行模拟 得到了相应 LED 光源对皮肤表

面照度图。非偏振光源和偏振光源在皮肤组织表面的辐照度分布如图 8 所示,可以看到由于偏振光源为 12 个 LED 子光源组成,而非偏振光源由 6 个 LED 子光源组成,所以偏振照明的最高辐照度约为非偏振照明辐照度的 2 倍。同时,还通过该软件计算了两种照明方式的均匀性,结果显示偏振照明的均匀性为 86%,非偏振照明的均匀性为 85%。因此,两种照明方式均具有很好的均匀性,满足皮肤组织检查要求。

## 2.5 机械设计和控制电路设计

机械设计图如图 9 所示,手持把手为圆柱形,其与前端部分相连接。电路板安装在手持把手内,灯光开关安装在把手外侧,开关有 3 种模式,分别为偏振白光照明、非偏振白光照明和非偏振光黄光照明。可充电电源安装在把手后部,并在把手后部安装有 USB 接口,通过 USB 接口可以对偏振皮肤镜进行充电。

偏振皮肤镜的光学部分是一个放大光学系统,主要由两个对称式透镜组成。偏振片  $P_1$  放置在 LED 光源前方,偏振片  $P_2$  放置在光学系统后方,两个偏振方向相互垂直。可以通过手机固定装置将手机与偏振皮肤镜相连接,便于手机采集

皮肤组织图像。

控制电路系统为皮肤镜的 LED 光源供电,该系统由锂电池供电,并集合了 USB 充电模块、放电保护模块、升压扩流模块等硬件,通过中央控制单元、电量采集指示、按键控制模块、LED 模组驱动模块、LED 模组显示模块及各电路板之间的 FPC 软连接所构成。

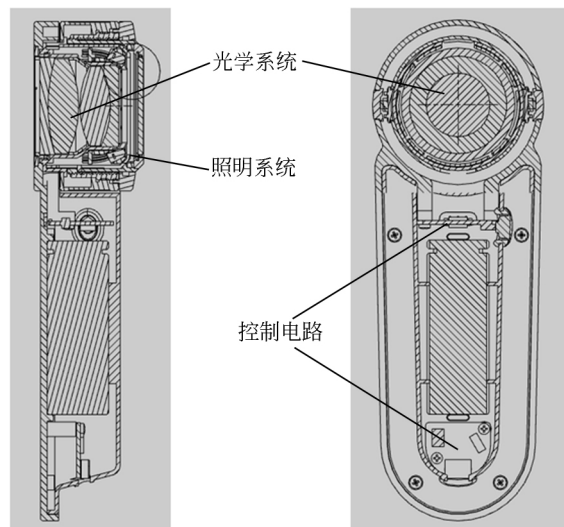


图 9 总体机械图

Fig. 9 Overall mechanical diagram

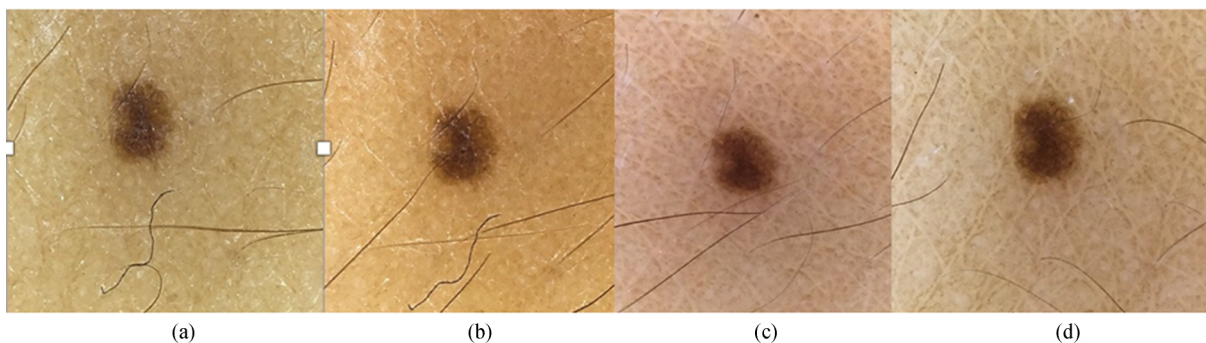


图 10 (a) 白光非偏振下的皮损形态; (b) 黄光非偏振下的皮损形态; (c) 白光偏振下的皮损形态; (d) 黄光偏振下的皮损形态

Fig. 10 (a) Skin lesion under white unpolarized light; (b) skin lesion under yellow unpolarized light; (c) skin lesion under white polarized light; (d) skin lesion under yellow polarized light.

## 3 效果图与讨论

产品的实拍效果如图 10 所示,同一皮肤损伤

在不同状态下形态呈现出差异,偏振光下层次感增加,有利于医生的诊断鉴别。由于不同的病变组织对光谱的吸收波段并不相同<sup>[13-14]</sup>,而本文所设计的偏振皮肤镜只包含有白光光源和黄光光

源,所以在之后的偏振皮肤镜设计时计划加入更多光谱区域,从而可以更好地对不同病变组织进行诊断与鉴别。同时,手机可以通过该皮肤镜采集皮肤组织的照片,便于在后期较长时间内随访观察时比较病变的发展变化情况。由于产品操作简便,非常适合全科医生和基层医院使用,还可配合远程医疗系统进行远程医疗和临床教学。该产品已经获得第一类医疗器械备案(苏苏械备20180942),在临床上对皮肤损伤的诊断与鉴别等

多方面应用与研究取得了满意的效果。

## 4 结 论

本文设计的偏振皮肤镜作为一种非浸润式皮肤镜,视场为22 mm、倍率为 $10\times$ ,具有操作简便、适用范围广、不损伤患者皮肤组织等特点,不仅简化了皮肤组织病变的检查步骤,而且提高了诊断病变皮肤组织的准确性和时效性。

### 参考文献:

- [1] Cancer facts & figures 2009 [EB/OL]. The American Cancer Society. [2010-08-18]. <http://www.cancer.org>.
- [2] ZALAUDEK I, ARGENZIANO G, DI STEFANI A, et al. Dermoscopy in general dermatology [J]. *Dermatology*, 2006, 212(1): 7-18.
- [3] BRAUN R P, RABINOVITZ H S, OLIVIERO M, et al. Dermoscopy of pigmented skin lesions [J]. *Journal of the American Academy of Dermatology*, 2005, 52(1): 109-121.
- [4] MENZIES S W, CROTTY K A, C INGVAR C, et al. *Dermoscopy: An Atlas* [M]. 3rd ed. Sydney, Australia: McGraw-Hill Book Co, 2009: 26-32.
- [5] MARGHOUB A A, BRAUN R P, KOPF A W. *Atlas of Dermoscopy* [M]. London: Taylor & Francis, 2005: 374.
- [6] MALVEHY J, PUIG S, BRAUN R P, et al. *Handbook of Dermoscopy* [M]. London: Taylor & Francis, 2006: 88-90.
- [7] YAROSLAVSKY A N, NEEL V, ANDERSON R R. Fluorescence polarization imaging for delineating nonmelanoma skin cancers [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(17): 2010-2012.
- [8] 孟如松,蔡瑞康,赵广,等. 偏振光皮肤镜数字图像分析技术的研究及在色素性皮肤病诊断中的探讨 [J]. *中国电视学与图像分析*, 2006, 11(2): 122-126.  
MENG R S, CAI R K, ZHAO G, et al. Study on digital image analysis technique of polarized dermabrasion and its application in the diagnosis of pigmented lesions [J]. *Chinese Journal of Stereology and Image Analysis*, 2006, 11(2): 122-126. (in Chinese)
- [9] BENVENUTO-ANDRADE C, DUSZA S W, AGERO A L C, et al. Differences between polarized light dermoscopy and immersion contact dermoscopy for the evaluation of skin lesions [J]. *Archives of Dermatology*, 2007, 143(3): 329-338.
- [10] 马科斯·波恩,埃米尔·沃耳夫. 光学原理 [M]. 杨葭菽,译. 北京: 电子工业出版社, 2005: 34-36.  
BONN M, WOLF E. *Principles of Optics* [M]. YANG X S, trans. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005: 34-36. (in Chinese)
- [11] 吴亚飞,顾洪恩,李增智,等. 大学物理(下册) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2015: 140.  
WU Y F, GU H E, LI Z ZH, et al. *University Physics (2)* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2015: 140. (in Chinese)
- [12] ANDERSON R R, PARRISH J A. The optics of human skin [J]. *Journal of Investigative Dermatology*, 1981, 77(1): 13-19.
- [13] ZONIOS G, BYKOWSKI J, KOLLIAS N. Skin melanin, hemoglobin, and light scattering properties can be quantitatively assessed in vivo using diffuse reflectance spectroscopy [J]. *Journal of Investigative Dermatology*, 2001, 117(6): 1452-1457.
- [14] TSENG S H, BARGO P, DURKIN A, et al. Chromophore concentrations, absorption and scattering properties of human skin in-vivo [J]. *Optics Express*, 2009, 17(17): 14599-14617.

## 作者简介:



曹逸兴(1989—),吉林长春人,博士研究生。2012年于复旦大学获得学士学位,2014年于悉尼大学获得硕士学位,2018年进入复旦大学工程与应用技术研究院攻读博士学位,主要从事光健康领域产品研究。E-mail: yixingcao@sina.cn



卢勇男(1992—),吉林松原人,博士研究生。2014年于长春理工大学获得学士学位,2017年于西北师范大学获得硕士学位,主要从事光学设计、偏振成像方面的研究。



张国旗(1959—),北京人,博士生导师,IEEE Fellow,荷兰代尔夫特理工大学教授,复旦大学工程与应用技术研究院特聘教授,国际半导体照明联盟(ISA)咨询委员会共同主席,IEEE国际宽禁带半导体技术路线图委员会(ITRW)秘书长,欧洲微纳米可靠性中心副主任,国家第三代半导体联盟国际咨询委员会共同主席,中国电子学会制造与电子封装技术分会副理事长。曾任飞利浦半导体院士(Fellow)及NXP技术战略高级总监,荷兰国家微/纳米电子、嵌入式系统和高科技系统战略创新规划学术委员会共同主席,荷兰国家材料创新规划指导委员会成员,欧洲纳米电子技术平台“超越摩尔”战略研究规划负责人,北京大学客座教授,中国科学院半导体研究所荣誉教授。是半导体封装技术、可靠性技术、微纳系统集成技术的世界级专家。E-mail: g. q. zhang@tudelft.nl

## 《光学 精密工程》(月刊)

- 中国光学开拓者之一王大珩院士亲自创办的新中国历史最悠久的光学期刊
- 现任主编为国家级有突出贡献的青年科学家曹健林博士
- Benjamin J Eggleton, John Love 等国际著名光学专家为本刊国际编委

《光学 精密工程》主要栏目有现代应用光学(空间光学、纤维光学、信息光学、薄膜光学、光电技术及器件、光学工艺及设备、光电跟踪与测量、激光技术及设备);微纳技术与精密机械(纳米光学、精密机械);信息科学(图像处理、计算机应用与软件工程)等。

- \* 美国工程索引 EI 核心期刊
- \* 中国出版政府奖期刊提名奖
- \* 中国精品科技期刊
- \* 中文核心期刊
- \* 百种中国杰出学术期刊
- \* 中国最具国际影响力学术期刊

主管单位: 中国科学院

主办单位: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

中国仪器仪表学会

地址: 长春市东南湖大路 3888 号

电话: 0431-86176855

电邮: gxjmgc@sina.com

定价: 100.00 元/册

邮编: 130033

传真: 0431-84613409

网址: <http://www.eope.net>