

(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 101766472 A

(43) 申请公布日 2010. 07. 07

(21) 申请号 200910266651. 4

(22) 申请日 2009. 12. 31

(71) 申请人 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

地址 130033 吉林省长春市东南湖大路 3888 号

(72) 发明人 宣丽 穆全全 曹召良 李抄  
胡立发 彭增辉 刘永刚 李大禹  
鲁兴海

(74) 专利代理机构 长春菁华专利商标代理事务所 22210

代理人 南小平

(51) Int. Cl.

A61B 3/15(2006. 01)

A61B 3/12(2006. 01)

权利要求书 3 页 说明书 8 页 附图 3 页

(54) 发明名称

视度自调节液晶自适应像差校正视网膜成像的光学系统

(57) 摘要

本发明属于自适应光学成像技术领域,涉及高度近视人眼的视网膜高分辨率成像设计,提供了一种视度自调节液晶自适应像差校正视网膜成像的光学系统。本发明是由视度调节分系统、眼底照明分系统和自适应校正成像分系统三部分构成,将视标点光源和眼底照明点光源,通过光学设计成像于人眼前的明视距离处,能够在高于 800 度近视的人眼上稳定获得高分辨率视网膜成像。利用人眼凝视明视距离处的视标而产生的自动调节能力大幅降低人眼近视像差,使残余像差深度符合液晶校正器的校正能力,提高了液晶自适应系统的校正范围。

1. 一种视度自调节液晶自适应像差校正视网膜成像的光学系统,其特征是由视度调节分系统、眼底照明分系统和自适应校正成像分系统三部分构成,将视标光源与照明光源的像设置在被检测人眼的明视距离处,像面上两光斑质心完全重合,成为同一几何位置处的两个次光源;

所述的视度调节分系统由视标点光源(1)、第一透镜(2)、第二透镜(3)、PBS分束器(4)、第三透镜(5)、线性位移机构(6)、人眼(7)组成;

所述的眼底照明分系统由照明光源(8)、第四透镜(9)、旋转毛玻璃(10)、第五透镜(11)、孔径光阑(12)、二向色耦合分束器(13),和视度调节分系统中的第二透镜(3)、PBS分束器(4)、第三透镜(5)、线性位移机构(6)、人眼(7)组成;

所述的自适应校正成像分系统由人眼(7)、第三透镜(5)、PBS分束器(4)、第六透镜(14)、液晶波前校正器(15)、反射镜(16)、第七透镜(17)、分光棱镜(18)、波前探测器(19)、第八透镜(20)、成像CCD相机(21)组成。

2. 根据权利要求1所述的视度自调节液晶自适应像差校正视网膜成像的光学系统,其特征是:

视度调节分系统中的视标点光源(1)提供人眼凝视的视标光源,发光波长设置在可见光波段,且为单波长 $\lambda'$ ,位于第一透镜(2)的焦点处;第一透镜(2)和第二透镜(3)组成共轭透镜组,PBS分束器(4)与第二透镜(3)的光轴成45°角配置,第三透镜(5)到第二透镜(3)的光路长度 $d_1 = (1000-Df_5)f_5/1000+f_3$ ,其中D是屈光度数、无单位,且D≥4、当近视度低于400度时D=4,f<sub>5</sub>和f<sub>3</sub>分别为第三透镜(5)和第二透镜(3)的焦距,单位为mm;人眼(7)位于x-y-z三向线性位移的头托架上,x-y平面与光轴垂直,z方向与光轴平行,调节头托架使瞳孔与入射光束中心对准,且瞳孔到第三透镜(5)的距离为第三透镜(5)的焦距f<sub>5</sub>;

照明分系统中的照明光源(8)发出的球面波通过第四透镜(9)聚焦在旋转毛玻璃(10)上,该焦斑直径正比于眼底被照明成像区域的直径,调整该焦斑控制眼底被照明区域大小;旋转毛玻璃(10)置于第五透镜(11)的焦面处,第五透镜(11)的光轴与第二透镜(3)的光轴垂直,通过二向色耦合分束器(13)组成共轭透镜组,二者之间的光路长度为第二透镜(3)的焦距f<sub>3</sub>;孔径光阑(12)紧贴于第五透镜(11)之后;二向色耦合分束器(13)置于孔径光阑(12)之后,并插入第一透镜(2)与第二透镜(3)之间,形成与两互为垂直的光轴成45°角配置,反射端和透射端分别面向孔径光阑(12)和第一透镜(2);

校正成像分系统中的第六透镜(14)与第二透镜(3)通过PBS分束器(4)形成共焦面配置,并使第六透镜(14)的焦点向左侧偏离L长距离,L为4mm~6mm,使入射和反射出液晶波前校正器(15)的两束光分别左右偏心通过第六透镜(14);液晶波前校正器(15)置于第六透镜(14)的焦点处,其校正偏振方向与P偏振光吻合;从液晶波前校正器(15)反射的光束在到达反射镜(16)时反射与入射二者的光轴相隔2L距离,使得只有反射光束被反射镜16接收;反射镜(16)与第六透镜(14)光轴成45°角放置,将光束折轴;后续的第七透镜(17)和第八透镜(20)是共轭透镜组,二者之间的距离为第七透镜(17)的焦距,光束通过该共轭透镜组后在CCD相机(21)上成像;成像CCD相机(21)置于第八透镜(20)的焦点处;在第七透镜(17)和第八透镜(20)中间放置分光棱镜(18)。

3. 根据权利要求2所述的视度自调节液晶自适应像差校正视网膜成像的光学系统,其

特征是：

在视度调节分系统中，视标点光源(1)发出球面波，经由第一透镜(2)、第二透镜(3)变成成像光束，成像光束又在 PBS 分束器(4)上折轴，在垂直于原来光轴的方向上聚焦成像，该像点再经由第三透镜(5)成虚像于成像面上，成像面到被测人眼瞳孔的距离即为明视距离，虚像光点为人眼凝视的视标；

在照明分系统中，照明光源(8)为激光点光源，其波长  $\lambda$  依据眼底成像组织的光学特性而定， $\lambda \neq \lambda'$ ；二向色耦合分束器(13)分别反射照明光源(8)、透射视标点光源(1)的光，形成二光束共光路进入后续系统；第二透镜(3)和第三透镜(5)组成共轭透镜组，将孔径光阑(12)成像于人眼瞳孔处；照明光源(8)发出的光，经由第四透镜(9)成像于旋转毛玻璃(10)上，然后光束通过第五透镜(11)变成平行光，再经由孔径光阑(12)后光束直径约束成为略小于被测人眼瞳孔的平行光束，到达二向色耦合分束器(13)时被反射、并与视度调节分系统的光束共光路，经 PBS 分束器(4)反射成为 S 偏振光，再经第三透镜(5)形成明视距离处的虚像，像光斑的质心与视标光源虚像的质心位置能够完全重合；发出 S 偏振光，形成明视距离处的点光源对眼底照明；

在校正成像分系统中，信号光从眼底反射出来成为消偏振的球面波，经人眼(7)前角膜出射后携带着前角膜反射干扰光通过第三透镜(5)会聚其焦点处，而后到达 PBS 分束器(4)；在 PBS 分束器(4)的透射端只有携带眼底信号的 P 偏振光出射，滤除掉了角膜反射的 S 偏振干扰光；P 偏振光再经过第六透镜(14)后成为与液晶波前校正器(15)孔径匹配的平行光束，且 P 偏振方向与液晶波前校正器(15)的校正偏振方向一致；投射到液晶波前校正器(15)的眼底信号光束经波前像差校正后反射，再经过第六透镜(14)成为会聚光，并与入射光分离，到达反射镜(16)折轴会聚成像于第七透镜(17)的前焦点处；该像点发出的光经分光棱镜(18)又被分成互为垂直的两束，垂直向的光束进入波前探测器(19)检测校正后的残余像差，另一束在共轭透镜组第七透镜(17)和第八透镜(20)的作用下将眼底图像成像于 CCD 相机(21)。

4. 根据权利要求 3 所述的视度自调节液晶自适应像差校正视网膜成像的光学系统，其特征是：通过线性位移机构(6)同步移动第三透镜(5)和人眼(7)得到不同人眼(7)的明视距离视标。

5. 根据权利要求 3 所述的视度自调节液晶自适应像差校正视网膜成像的光学系统，其特征是：

所述的视标点光源(1)为发光二极管光源；

所述的 PBS 分束器(4)在照明光波长  $\lambda$  为中心的波段内，以  $1 \times 10^{-3}$  消光比的偏振特性透过 P 光；

所述的线性位移机构(6)为一维位移器，位移精度 0.01mm，行程 120mm；

所述的照明光源(8)为单模激光器，出射激光经单模光纤耦合形成点光源，功率在 10mW ~ 20mW 范围；

所述的旋转毛玻璃(10)为一块表面经过磨砂的玻璃片，具有 75% ~ 80% 的透过率，由电机控制连续旋转，旋转速率范围 1000rpm ~ 2000rpm；

所述的孔径光阑(12)孔径在 1mm ~ 10mm 范围内连续调节；

所述的二向色耦合分束器(13)具有反射波长为  $\lambda$  的照明光和透射波长为  $\lambda'$  的视标

光的能力；

所述的液晶校正器（15）为纯位相型反射式液晶波前校正器，液晶对驱动电压的响应时间≤15ms。

6. 根据权利要求5所述的视度自调节液晶自适应像差校正视网膜成像的光学系统，其特征是：首先让人眼凝视视标点光源的像，产生屈光度自调节，达到视觉清晰，补偿掉近视人眼的大部分离焦像差；然后再瞬间点亮照明点光源进行残余像差的自适应校正成像。

7. 根据权利要求5所述的视度自调节液晶自适应像差校正视网膜成像的光学系统，其特征是：

1) 采用发光波长 $\lambda'$ 为550nm的发光二极管作为视标点光源(1)；

2) 所用照明光源(8)的纤芯直径为100μm，发光波长 $\lambda$ 为808nm；

3) 第一透镜(2)、第二透镜(3)、第三透镜(5)、第四透镜(9)、第五透镜(11)、第六透镜(14)、第七透镜(17)、第八透镜(20)的表面镀有增透膜，口径依次为：20mm、25mm、25mm、10mm、20mm、40mm、20mm、20mm；焦距依次为：50mm、250mm、200mm、30mm、50mm、250mm、86mm、100mm；

4) 旋转毛玻璃(10)为厚度为1mm的磨沙薄玻璃片，激光的透过率为75%，贴于磨沙薄玻璃片的电机以1000rpm的速度旋转；

5) 人眼(7)为800度近视兼有150度散光，其明视距离125mm，调节线性位移机构(6)使第三透镜(5)到第二透镜(3)的光路长度 $d_1$ 为130mm；在较暗环境下瞳孔直径在6mm；

6) 所用孔径光阑(12)，采用1mm到10mm连续调节的小孔光阑，紧贴于第五透镜(11)后，直径控制到5.8mm；

7) 所用二向色耦合分束器(13)，口径25mm，对808nm波长的眼底照明光具有95%的反射率，对550nm波长的视标光具有95%的透过率；

8) 所用PBS分束器(4)，直径50mm，当808nm波长的眼底照明光透过时分出的P偏振光的消光比为1×10；

9) 所用液晶校正器(15)，纯位相型反射式LCOS器件，美国BNS公司生产，型号P512-0785；

10) 所用的反射镜(16)，面积15mm×15mm，厚度2mm，反射率95%；

11) 所用的分光棱镜(18)为普通分光棱镜，对808nm波长眼底照明光的透反比约为1:1；

12) 所用波前探测器(19)，为哈特曼型，测量误差峰谷值0.05λ，均方根值0.01λ；

13) 所用成像CCD相机(21)，英国ANDOR公司生产，型号EM-DV897，512×512像素，曝光时间15ms。

## 视度自调节液晶自适应像差校正视网膜成像的光学系统

### 技术领域

[0001] 本发明属于显微成像技术领域，是借助人眼视度自调节功能进行像差自适应校正的眼底高分辨成像光路设计，用于高度近视人眼的深度像差校正，通过补偿能够克服现有眼底自适应成像技术在 500 度以上近视的条件下成像对比度降低的缺点。具体地说，是一种视度自调节液晶自适应像差校正视网膜成像的光学系统。

### 背景技术

[0002] 视网膜上的血管是人体唯一可以直接看清的小血管，属于终末血管系统，任何病理性的破坏和血管梗阻都能导致组织缺氧坏死或破裂渗漏。因此眼底改变是全身疾病的表现，临床常用检眼镜观察眼底毛细血管的变化来判断病变的情况，如心脑血管及内分泌失调，动脉硬化、高血压病，中心性浆液性脉络视网膜病变，糖尿病视网膜病变等。自上个世纪 60 年代以来，检眼镜采用了眼底荧光血管造影术，使微细血管的成像对比度增加，可清晰观察直径 20 微米以上的血管。但眼球是个复杂光学系统，即使是无屈光不正的眼睛也不可避免地会存在光学像差，因此 20 微米以下的血管成像，眼底荧光血管造影术也无能为力，更谈不上观察视觉细胞。这些像差主要来源于：1、眼内各屈光介质厚度不均匀，表面曲率偏差；2、眼内各屈光介质折射率不均匀；3、眼内各屈光介质不同轴；4、屈光系统对各色光的折射率不同等。由于上述原因，为了增加成像的光强和提高成像的分辨率，经常需要扩瞳，扩瞳后人眼像差又会加剧，更加制约了眼底检查的效果和成功率。

[0003] 从上个世纪九十年代起，人们开始探讨变形镜自适应光学校正技术在视网膜成像中的应用。系统用哈特曼波前传感器测量从眼中出射的波前像差，经过计算机的数据处理，然后驱动变形镜来补偿像差。变形镜自适应光学校正技术可以在 500 度近视以下的较健康眼睛上获得 3 微米视觉细胞轮廓的清晰成像，但当近视度超过 500 度时成像效果就显著下降，即使加入近视镜初步补偿，清晰成像仍很困难。这是因为目前使用的变形镜驱动单元数一般不超过 37 单元，而随近视度增加引入的高阶像差超出了变形镜所能校正的空间频率，也称为校正器的空间分辨率。尽管利用微机电技术可以使驱动单元数增加到 2000 单元以上，此时校正量又成为问题，所以至今未在临床普及。

[0004] 液晶波前校正器的驱动单元可多达几十万到几百万个，其加工工艺非常成熟，空间分辨率大大高于传统的变形镜。借助于相息图的衍射光学方法，液晶波前校正器的校正范围可以扩展至  $5 \mu\text{m} \sim 8 \mu\text{m}$ 。液晶的响应时间是 10ms 左右，液晶自适应系统的校正频率很容易达到 20Hz，完全满足眼波前自适应校正频率的要求。另外液晶波前校正器工艺成熟，加工周期短，成本低，因此液晶自适应光学系统在眼底成像中具有很好的应用前景。

[0005] 有 4 项视网膜自适应校正成像系统的发明专利提到系统中的校正器可以是液晶校正器（张雨东，等，中国发明专利：自适应光学视网膜成像系统，ZL99115053.8，ZL99115054.6，ZL99115051.1，ZL99115052.x），其中两项专利中采用共光路设计，在校正器之前放置了 1/4 波长板，使入射校正器的光是圆偏振光。事实上液晶校正器是不能在圆偏振光中工作的。另外两项专利也不是针对液晶校正器的优化设计，置于人眼之前的分束镜

将人眼出射的光强损耗一半,这对于能量损耗较大的液晶校正器的系统来说可能是个致命缺点。

[0006] 目前只有日本报道了对 700 度近视人眼的视觉细胞成像结果 (“In Vivo measurements of cone photoreceptor spacing in myopic eyes from images obtained by an adaptive optics fundus camera,” Y. Kitaguchi, et al., Jpn. J. Ophthalmol., Vol. 51, p456–461, 2007), 虽然该报道声称可以校正更高度近视的像差,但没有给出照片。实际上,液晶校正器在校正高度近视像差时衍射效率下降,从而会产生漏光降低成像对比度,所以单纯采用液晶校正器的校正能力是很难满足 700 度近视以上像差的校正要求的。

[0007] 通常视网膜成像系统均使用平行光束进行眼底照明,人眼对平行光具有会聚能力,使入射光在眼底聚焦,形成成像区域。但对于近视人眼,平行入射光束在到达眼底前就过早聚焦,即离焦像差使视网膜成像模糊。迄今的研究结果表明,没有散光或只有微弱散光的近视人群占据人口的比例最高,而近视人眼中离焦像差会占据总像差的 80% 比例。如果能提出合理的离焦补偿办法,将大幅提高液晶自适应光学成像系统的校正能力。

[0008] 很多研究小组使用凹透镜来补偿离焦像差,但同时必须以微米级的精度严格调整人眼与仪器间的距离以避免再次引入离焦像差,这是临幊上很难做到的。

## 发明内容

[0009] 本发明为了克服现有技术存在的缺陷,提出一种视度调节眼底照明方式的光学设计,目的是提供一种视度自调节液晶自适应像差校正视网膜成像的光学系统。本发明能够稳定地自补偿离焦像差,用于液晶自适应像差校正的视网膜成像,使 800 度以上高度近视人眼的成像对比度大幅提高。

[0010] 视度调节的眼底照明不同于传统的平行光照明方式,而是明视距离处的点光源照明方式。为避免照明光源长时间照射伤害人眼,同时将一低功率的凝视视标点光源也设置于被检测人眼的明视距离处,利用近视人眼在该距离可以清晰视物且不易疲劳的特点,让人眼凝视视标,此时会产生屈光度自调节能力,对离焦像差进行自主补偿,然后再瞬间点亮照明点光源进行自适应像差校正成像。结合了这种照明方式的液晶自适应成像系统,对于 800 度以上近视人眼只需校正其 1/3 以下的离焦像差深度即可得到衍射极限分辨率的成像效果,解决了液晶校正器在校正深度过大时衍射效率降低而造成成像对比度下降的问题。

[0011] 本发明为使视标点光源与照明点光源能严格设置在明视距离的同一几何位置处,光学设计的思路是将视标光源与照明光源的像设置在被检测人眼的明视距离处,且像面上两光斑质心完全重合,成为同一几何位置处的两个次光源。整个成像系统的光学设计可以分为视度调节分系统、眼底照明分系统和自适应校正成像分系统三部分,下面分别进行详细描述。

[0012] 视度调节分系统:根据医学知识,人眼的明视距离等于以 mm 为单位的远点距离  $1000/D$ ,  $D$  为人眼的屈光度数,且  $D \geq 4$ ,即 400 度以下近视人眼的明视距离均为 250mm。视度调节分系统的结构如图 1 所示,由视标点光源 1、第一透镜 2、第二透镜 3、PBS 偏振分束器 (PBS 分束器) 4、第三透镜 5、线性位移机构 6、人眼 7 组成。其中,视标点光源 1 提供人眼凝视的视标光源,发光波长设置在可见光波段,且为单波长  $\lambda'$ ,位于第一透镜 2 的焦点处。第一透镜 2 和第二透镜 3 组成共轭透镜组,使视标点光源 1 成像。PBS 分束器 4 与第二透镜

3 的光轴成  $45^\circ$  角配置, 使视标点光源 1 的成像光束折轴  $90^\circ$ 。第三透镜 5 到第二透镜 3 的光路长度  $d_1$  由二者的焦距  $f_5$ 、 $f_3$  和人眼屈光度数 D 来决定, 需按公式 (1) 进行计算, 其中 D 无单位, 且  $D \geq 4$ 、当近视低于 400 度时  $D = 4$ , 其它参量单位为 mm。人眼 7 位于可 x-y-z 三向线性位移的头托架上, x-y 平面与光轴垂直, z 方向与光轴平行, 调节头托架可使瞳孔与入射光束中心对准, 且到第三透镜 5 的距离为第三透镜 5 的焦距  $f_5$ 。

[0013]  $d_1 = (1000 - Df_5) f_5 / 1000 + f_3 \quad (1)$

[0014] 公式中,  $f_3$  为第二透镜 3 的焦距,  $f_5$  为第三透镜 5 的焦距。

[0015] 在这样设计的视度调节分系统中, 视标点光源 1 发出球面波, 经由第一透镜 2、第二透镜 3 变成成像光束, 成像光束又在 PBS 分束器 4 上折轴, 在垂直于原来光轴的方向上聚焦成像, 该像点再经由第三透镜 5 成虚像于图 1 中标出的成像面上。该成像面到被测人眼瞳孔的距离即为明视距离, 该虚像光点为人眼凝视的视标。针对不同的人眼, 明视距离需要调节, 可通过线性位移机构 6 同步移动第三透镜 5 和人眼 7 来完成, 从而获得不同人眼的明视距离视标。

[0016] 照明分系统: 本发明将照明光源设计为激光点光源, 其波长  $\lambda$  依据眼底成像组织的光学特性而定, 但不同于视标光源的波长, 即  $\lambda \neq \lambda'$ 。眼底照明分系统结构如图 2 所示, 由照明光源 8、第四透镜 9、旋转毛玻璃 10、第五透镜 11、孔径光阑 12、二向色耦合分束器 13、和视度调节分系统中的第二透镜 3、PBS 分束器 4、第三透镜 5、线性位移机构 6、人眼 7 组成。其中, 照明光源 8 发出的球面波通过第四透镜 9 聚焦在旋转毛玻璃 10 上, 该焦斑直径正比于眼底被照明成像区域的直径, 调整该焦斑即可控制眼底被照明区域大小。旋转毛玻璃 10 置于第五透镜 11 的焦面处, 旋转毛玻璃 10 的用途是消除激光自相干作用以消除成像面的激光散斑。第五透镜 11 的光轴与视度调节分系统中的第二透镜 3 的光轴垂直, 通过二向色耦合分束器 13 也组成共轭透镜组, 二者之间的光路长度为第二透镜 3 的焦距  $f_3$ , 使照明光源 8 的像与视标点光源 1 的像重合。孔径光阑 12 紧贴于第五透镜 11 之后, 其孔径可调节, 以控制入眼光束略小于被测人眼瞳孔的直径。二向色耦合分束器 13 置于孔径光阑 12 之后, 并插入第一透镜 2 与第二透镜 3 之间, 形成与两互为垂直的光轴成  $45^\circ$  角配置, 反射端和透射端分别面向孔径光阑 12 和第一透镜 2。二向色耦合分束器 13 的作用是利用照明光源与视标光源的光波长不同, 分别反射照明光源、透射视标光源的光, 形成二光束共光路进入后续系统。第二透镜 3 和第三透镜 5 组成共轭透镜组, 用于将孔径光阑 12 成像于人眼瞳孔处。在这样设计的照明分系统中, 照明光源 8 发出的光, 经由第四透镜 9 成像于旋转毛玻璃 10 上, 消除了激光的自相干作用。然后光束通过第五透镜 11 变成平行光, 再经由孔径光阑 12 后光束直径约束成为略小于被测人眼瞳孔的平行光束, 到达二向色耦合分束器 13 时被反射、并与视度调节分系统的光束共光路, 经 PBS 分束器 4 反射成为 S 偏振光, 再经第三透镜 5 也形成明视距离处的虚像, 像光斑的质心与视标光源虚像的质心位置能够完全重合; 发出 S 偏振光, 形成明视距离处的点光源对眼底照明。

[0017] 将照明分系统的折轴光路拉直可以更清楚地看出各个元件之间的位置关系, 示意于图 3, 其中对光束会聚不起作用的二向色耦合分束器 13 和 PBS 分束器 4 省略。图 3 中虚线的会聚点到瞳孔的距离为明视距离,  $f_{11}$  是第五透镜焦距。

[0018] 校正成像分系统: 对眼底出射光进行视度调节后剩余像差的测量与校正, 实现对人眼视网膜的高分辨率成像。校正成像分系统结构如图 4 所示, 由人眼 7、第三透镜 5、PBS

分束器 4、第六透镜 14、液晶波前校正器 15、反射镜 16、第七透镜 17、分光棱镜 18、波前探测器 19、第八透镜 20、成像 CCD 相机 21 组成。其中，从人眼 7 出射的消偏振信号光携带着未能进入眼底的前角膜反射的 S 偏振干扰光，透过 PBS 分束器 4 时，由于只允许 P 偏振光透射使前角膜反射的 S 偏振干扰光被滤除。第六透镜 14 与第二透镜 3 通过 PBS 分束器 4 形成共焦面配置，并使第六透镜 14 的焦点向左侧偏离 L 长距离，L 为 4mm ~ 6mm，以使入射和反射出液晶波前校正器 15 的两束光分别左右偏心通过第六透镜 14。液晶波前校正器 15 置于第六透镜 14 的焦点，其校正偏振方向与 P 偏振光吻合。从液晶波前校正器 15 反射的光束在到达反射镜 16 时反射与入射二者的光轴能相隔 2L 距离，使得只有反射光束被反射镜 16 接收。反射镜 16 与第六透镜 14 光轴成 45° 角放置，将光束折轴。后续的第七透镜 17 和第八透镜 20 是共轭透镜组，二者之间的距离为第七透镜 17 的焦距，光束通过该共轭透镜组后可在 CCD 相机 21 上成像。成像 CCD 相机 21 置于第八透镜 20 的焦点处。在第七透镜 17 和第八透镜 20 中间放置分光棱镜 18，将此平行光束分成互为垂直的两束，垂直向的光束进入波前探测器 19。波前探测器 19 为哈特曼波前探测器，它与第七透镜 17 之间的光路长度为第七透镜 17 的焦距长度，以保证波前探测器 19 与液晶波前校正器 15 之间的共轭关系。在如上设计的校正成像分系统中，首先信号光从眼底反射出来成为消偏振的球面波，经人眼前角膜出射后携带着前角膜反射干扰光通过第三透镜 5 会聚其焦点处，到达 PBS 分束器 4。在 PBS 分束器 4 的透射端只有携带眼底信号的 P 偏振光出射，滤除掉了角膜反射的 S 偏振干扰光。P 偏振光再经过第六透镜 14 后成为与液晶波前校正器 15 孔径匹配的平行光束，且 P 偏振方向与液晶波前校正器 15 的校正偏振方向一致。投射到液晶波前校正器 15 的眼底信号光束经波前像差校正后反射，再经过第六透镜 14 成为会聚光，并与入射光分离，到达反射镜 16 折轴会聚成像于第七透镜 17 的前焦点处。该像点发出的光经分光棱镜 18 又被分为两束，一束进入波前探测器 19 检测校正后的残余像差，另一束在共轭透镜组第七透镜 17 和第八透镜 20 的作用下将眼底图像成像于 CCD 相机 21。

[0019] 以上所述即为本发明的视度自调节液晶自适应像差校正视网膜成像的光学设计。

[0020] 本发明基于视度调节所设计眼底照明分系统，利用人眼的视度自调节功能，大幅降低了对液晶校正器校正深度的要求。在本发明中，对这种基于视度调节的眼底照明自适应系统进行了具体光学设计，能够根据不同近视度因人而异地调整明视距离，操作方法简单，形成了稳定的基于人眼视度自调节功能的液晶自适应光学眼底成像方法。

## 附图说明

[0021] 图 1 为本发明的视度调节分系统的光学结构示意图。其中，1 为视标点光源，2 为第一透镜，3 为第二透镜，4 为 PBS 分束器，5 为第三透镜，6 为线性位移机构，7 为人眼；成像面处的光斑为视标点光源 1 的虚像，即为视标，视标到瞳孔的距离为明视距离。

[0022] 图 2 为本发明的照明分系统光学结构示意图。其中，8 为照明光源，9 为第四透镜，10 为旋转毛玻璃、11 为第五透镜、12 为孔径光阑、13 为二向色耦合分束器，第二透镜 3、PBS 分束器 4、第三透镜 5、线性位移机构 6 等元件与视度调节分系统共用；在成像面处照明光源的虚像质心与视标质心的位置完全重合，形成明视距离处的点光源眼底照明。

[0023] 图 3 为照明分系统中各透镜位置及其相互关系示意图。其中， $f_5$  为第三透镜 5 的焦距，D 为人眼的屈光度数， $1000/D$  等于 mm 为单位的人眼明视距离， $d_1$  按照公式 (1) 计算，

$f_3$  为第二透镜 3 的焦距,  $f_{11}$  为第五透镜 11 的焦距。

[0024] 图 4 为本发明的视度自调节液晶自适应像差校正视网膜成像的光学结构示意图。其中, 14 为第六透镜、15 为液晶波前校正器、16 为反射镜、17 为第七透镜、18 为分光棱镜、19 为波前探测器、20 为第八透镜、21 为成像 CCD 相机; 从人眼 7 出射的光束透过 PBS 分束器 4 后使前角膜反射的干扰光被滤除, 然后偏心通过第六透镜 14, 使到达反射镜 16 的光束为液晶波前校正器 15 校正了像差的光束, 可以在成像 CCD 相机 21 上获得高分辨率视网膜的像。

[0025] 图 5 为模拟眼示意图。其中 23 为漫反射屏, 22 为双胶合透镜, 分别模拟眼底视网膜和人眼晶状体, 用于具体实施过程中的响应矩阵测量。

[0026] 图 6 为 800 度近视兼有 150 度散光人眼在本发明系统上获得的视网膜视觉细胞图像, 其中 (a) 为校正前的视网膜视觉细胞图像, (b) 为校正后的视网膜视觉细胞图像。

## 具体实施方式

[0027] 为了更清楚理解本发明, 下面结合实施方式对各个部件进行详细说明。

[0028] 所述的视标点光源 1 为单色发光二极管点光源, 发光波长  $\lambda'$  在可见光波段。

[0029] 所述的第一透镜 2、第二透镜 3、第三透镜 5、第四透镜 9、第五透镜 11、第六透镜 14、第七透镜 17 和第八透镜 20 均为双胶合消色差透镜。

[0030] 所述的 PBS 分束器 4 可在照明光波长  $\lambda$  为中心的波段内以  $1 \times 10^{-3}$  消光比的良好偏振特性透过 P 光, 对反射光束 S 光的偏振特性没有定量要求。

[0031] 所述的线性位移机构 6 为一维位移器, 位移精度 0.01mm, 行程 120mm。

[0032] 所述的人眼 7 在光学结构上等效于图 5 所示的双胶合透镜 22 与漫反射板 23 的组合。双胶合透镜 22 模拟人眼晶状体, 焦距为 20mm, 位于人眼瞳孔所处的位置; 漫反射屏 23 模拟眼底视网膜, 位于人眼视网膜所处的位置; 这种组合可以模拟无像差人眼, 本发明在实施时要用到模拟眼。

[0033] 所述的照明光源 8 为单模激光器, 其波长  $\lambda \neq \lambda'$ , 出射激光经单模光纤耦合形成点光源, 功率在 10mW ~ 20mW 范围。

[0034] 所述的旋转毛玻璃 10 为一块表面经过磨沙的玻璃片, 具有 75% ~ 80% 的透过率, 由电机控制连续旋转, 旋转速率范围 1000rpm ~ 2000rpm。

[0035] 所述的孔径光阑 12 为圆形小孔, 孔径可以在 1mm 到 10mm 范围内连续调节; 孔径光阑 12 也可以为环形光阑, 产生环形光束入射人眼, 直接滤除人眼角膜正入射区域的强反射干扰光。

[0036] 所述的二向色耦合分束器 13 具有反射波长为  $\lambda$  的照明光和透射波长为  $\lambda'$  的视标光的能力。

[0037] 所述的液晶校正器 15 为纯位相型反射式液晶波前校正器, 液晶对驱动电压的响应时间  $\leq 15\text{ms}$ 。

[0038] 所述的反射镜 16 为薄型平面反射镜。

[0039] 所述的分光棱镜 18 为普通分光棱镜。

[0040] 所述的波前探测器 19 为哈特曼型波前探测器。

[0041] 所述的成像 CCD 相机 21 为高灵敏度科学级 CCD, 像素数  $\geq 512 \times 512$  个。

[0042] 实施例

- [0043] 1) 采用发光波长  $\lambda'$  为 550nm 的发光二极管作为视标点光源 1。
- [0044] 2) 所用照明光源 8 为小型半导体激光器, 带有光纤耦合, 纤芯直径  $100 \mu\text{m}$ , 发光波长  $\lambda$  为 808nm, 输出功率在  $10\text{mW} \sim 20\text{mW}$  范围可调。
- [0045] 3) 第一透镜 2、第二透镜 3、第三透镜 5、第四透镜 9、第五透镜 11、第六透镜 14、第七透镜 17、第八透镜 20 均为双胶合消色差透镜, 且表面镀有增透膜。口径依次为 :20mm、25mm、25mm、10mm、20mm、40mm、20mm、20mm ; 焦距依次为 :50mm、250mm、200mm、30mm、50mm、250mm、86mm、100mm。
- [0046] 4) 选择人眼 7 为 800 度近视兼有 150 度散光, 其明视距离 125mm, 调节线性位移机构 6 使第三透镜 5 到第二透镜 3 的光路长度  $d_1 = 130\text{mm}$ ; 在较暗环境下瞳孔直径稳定在 6.0mm。
- [0047] 5) 制做旋转毛玻璃 10, 选取厚度为 1mm 的磨沙薄玻璃片, 眼底照明用激光的透过率为 75%; 将磨沙薄玻璃片粘贴于电机转轴上, 电机以 1000rpm 的速度旋转, 从而消除了激光散斑效应。
- [0048] 6) 所用孔径光阑 12, 采用 1mm 到 10mm 连续调节的小孔光阑, 紧贴于第五透镜 11 后; 由于被测的瞳孔直径为 6.0mm, 故将孔径光阑 12 的直径控制到 5.8mm, 略小于瞳孔。
- [0049] 7) 所用二向色耦合分束器 13, 口径 25mm, 对 808nm 波长的眼底照明光具有 95% 的反射率, 对 550nm 波长的视标光具有 95% 的透过率。
- [0050] 8) 所用 PBS 分束器 4, 直径 50mm, 当 808nm 波长的眼底照明光透过时分出的 P 偏振光的消光比为  $1 \times 10^{-3}$ 。
- [0051] 9) 所用液晶校正器 15, 纯位相型反射式 LCOS 器件, 美国 BNS 公司生产, 型号 P512-0785。
- [0052] 10) 所用的反射镜 16, 面积  $15\text{mm} \times 15\text{mm}$ , 厚度 2mm, 反射率 95%。
- [0053] 11) 所用的分光棱镜 18 为普通分光棱镜, 对 808nm 波长眼底照明光的透反比约为 1 : 1。
- [0054] 12) 所用波前探测器 19, 为哈特曼型, 有效微透镜数为  $m = 233, 2.5\text{mm}$  接收孔径, 配置的 CCD 为英国 ANDOR 公司生产, 型号 EM-DV897,  $128 \times 128$  像素, 量子效率在 808nm 波长处为 70%, 波前探测速度 200Hz, 测量误差峰谷值  $0.05\lambda$ , 均方根值  $0.01\lambda$ 。
- [0055] 13) 所用成像 CCD 相机 21, 英国 ANDOR 公司生产, 型号 EM-DV897,  $512 \times 512$  像素, 曝光时间 15ms。
- [0056] 14) 利用上述元件按照图 4 所示的光路结构搭建视度自调节液晶自适应像差校正视网膜成像光学系统, 其中第六透镜 14 与第二透镜 3 通过 PBS 分束器 4 形成共焦面配置, 并使第六透镜 14 的焦点向左侧偏离 L 为 5mm 的距离, 使入射和反射出液晶波前校正器 15 的两束光分离; 配置自适应控制与信号处理分系统, 形成了完整功能的视度自调节自适应像差校正成像系统。
- [0057] 15) 为使瞳孔能便利地与入射光轴对准, 设置瞳孔相机对瞳孔位置进行标定: 在人眼前上方  $20\text{mm} \sim 30\text{mm}$  距离处放置一红外 LED, 发光波长  $830\text{nm} \sim 900\text{nm}$ , 照明被测者瞳孔, 使瞳孔成像于第二透镜 3 的焦点处。在第二透镜 3 和二向色耦合分束器 13 之间再插入一分色片, 使红外 LED 的光束垂直反射出光路, 但不影响波长小于 830nm 的照明与视标光束通过。在第二透镜 3 的折轴焦面处设置瞳孔相机; 在瞳孔的设计位置放置一漫反射屏取代

人眼。打开照明光源 8,反射屏上一圆形区域被照亮,该亮斑的中心即为瞳孔中心应处的位置。开启瞳孔相机拍摄漫反射屏上的亮斑。以该亮斑中心为圆心,基本瞳孔半径 3mm 为半径画一圆圈,作为瞳孔的标准位置,将该圆圈保存到文件,存入程序控制计算机中。关闭照明光源 8,撤出漫反射屏。

[0058] 16) 人眼瞳孔对准入射光轴的步骤 :将 15) 步骤获得的标记瞳孔位置的圆圈附加到瞳孔相机的图像显示区域,以该圆圈为标准对准瞳孔。打开视标点光源 1,粗调头架以使人眼能看到视标。开启瞳孔相机,对人眼瞳孔进行录像,细调头架,直到瞳孔像与标定圆圈重合。

[0059] 17) 建立波前探测器 19 对波前校正器 15 的响应矩阵 R:首先将人眼 7 用模拟眼替代,其中双胶合透镜 22 的焦距为 20mm,放置在原人眼瞳孔所处的位置,漫反射屏 23 放置在原人眼视网膜所处的位置。开启照明光源 8,可以在漫反射屏上看到会聚光点;开启波前探测器 19 可以探测到从模拟眼出射的波前,前后移动调节漫反射屏 23 直到被测波前上的峰谷值最小。然后开启响应矩阵测量控制软件,测量前 36 项 Zernike 模式波前的响应矩阵 R。

[0060] 响应矩阵测量的基本原理 :令 Zernike 多项式每一项前面的系数为 1,以照明光源波长  $\lambda$  为单位,分别解出 36 项 Zernike 项的面形位相数值解。利用事先测好的液晶波前校正器 15 的位相—灰度级响应关系,依次将每一项 Zernike 多项式  $Z_k(x, y)$  的面形位相数值转换成液晶校正器 15 上的灰度级分布图形。其中 x 和 y 即为该位相面沿 x 轴和 y 轴方向的坐标值。然后通过计算机逐个施加到液晶波前校正器 15 上;计算机读出波前探测器 19 对应每项 Zernike 模式的微透镜焦斑阵列在 x 轴和 y 轴上的斜率分布。因为第一项为平移模式可以省略,所以由这一系列波前斜率组成一个  $2 \times (M-1)$  行、 $2 \times m$  列的二维矩阵 R,

$$[0061] R = \begin{bmatrix} R_{x_1 Z_2} & \cdots & R_{x_i Z_2} & \cdots & R_{x_m Z_2} & R_{y_1 Z_2} & \cdots & R_{y_i Z_2} & \cdots & R_{y_m Z_2} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ R_{x_1 Z_k} & \cdots & R_{x_i Z_k} & \cdots & R_{x_m Z_k} & R_{y_1 Z_k} & \cdots & R_{y_i Z_k} & \cdots & R_{y_m Z_k} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ R_{x_1 Z_M} & \cdots & R_{x_i Z_M} & \cdots & R_{x_m Z_M} & R_{y_1 Z_M} & \cdots & R_{y_i Z_M} & \cdots & R_{y_m Z_M} \end{bmatrix}$$

[0062] 此处 k 为 Zernike 多项式项序数, k 最大为 M = 36, 故 k = 2, 3, 4, … 36 ;m 为哈特曼探测器上的有效微透镜个数, 233 个。这个二维矩阵即为响应矩阵 R。

[0063] 18) 撤掉模拟眼,被测量的人眼 7 位于图 4 所示位置处,开始人眼 7 眼底的自适应校正成像过程:首先点亮视标点光源 1,令人眼 7 主动凝视成像面处的视标,直到视觉清晰。先后开启旋转毛玻璃 10、成像 CCD 相机 21 和照明光源 8,成像 CCD 相机 21 的曝光时间设置为 15ms。波前探测器 19 接收经人眼 7 反射出来的光,将其波前转化为 2m 列波前斜率向量,此处 m = 233 :

[0064]

$$\varphi = [\varphi_{x_1} \ \cdots \ \varphi_{x_i} \ \cdots \ \varphi_{x_m} \ \varphi_{y_1} \ \cdots \ \varphi_{y_i} \ \cdots \ \varphi_{y_m}]$$

[0065] 则由  $\varphi = aR$  (a 是 Zernike 多项式每一项前面的系数  $a_k$  构成的向量) 有 : $a = \varphi R^{-1}$ , 据此式即可得到所探测波前的 Zernike 方程,解出波前上的位相数值。根据液晶波前校正器 15 的位相与灰度级的关系,将波前位相数值转换为灰度级反馈给液晶波前校正器 15,液

晶波前校正器 15 进行波前校正。成像 CCD 相机 21 一直工作，记录下校正前后的眼底视网膜图像。

[0066] 19) 分析结果：

[0067] 经视度调节，被测 800 度近视人眼的离焦深度由  $36 \mu\text{m}$  减小到  $9.7 \mu\text{m}$ ，使液晶校正器能够良好校正残余像差。自适应校正前后拍摄的视网膜视觉细胞图像如图六 (a)、(b) 所示，从中可以看出本发明校正效果显著，由什么信息也看不清楚的图片看到清晰的  $3 \mu\text{m}$  直径的视觉细胞，表明了本发明的效果。

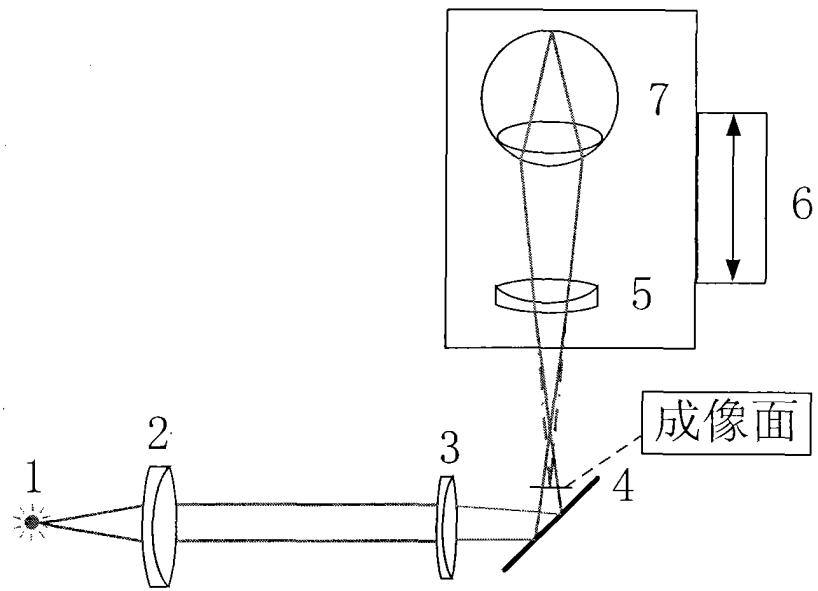


图 1

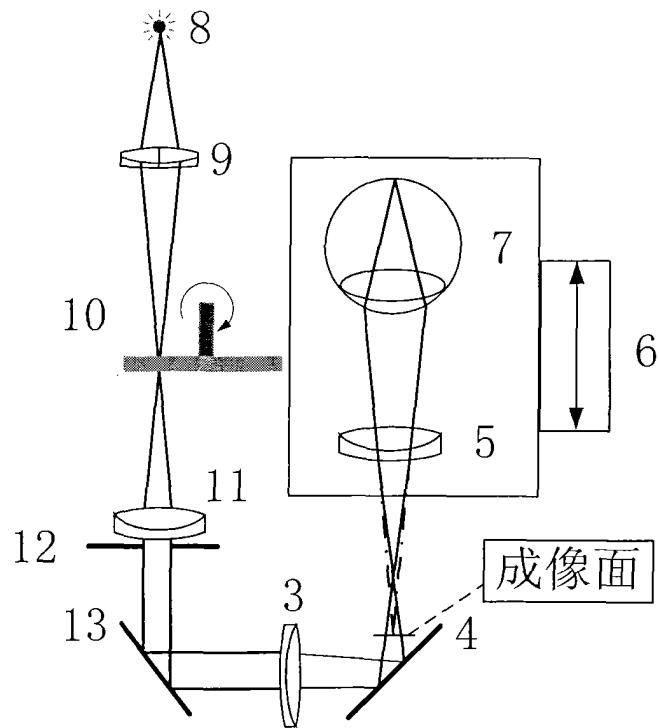


图 2

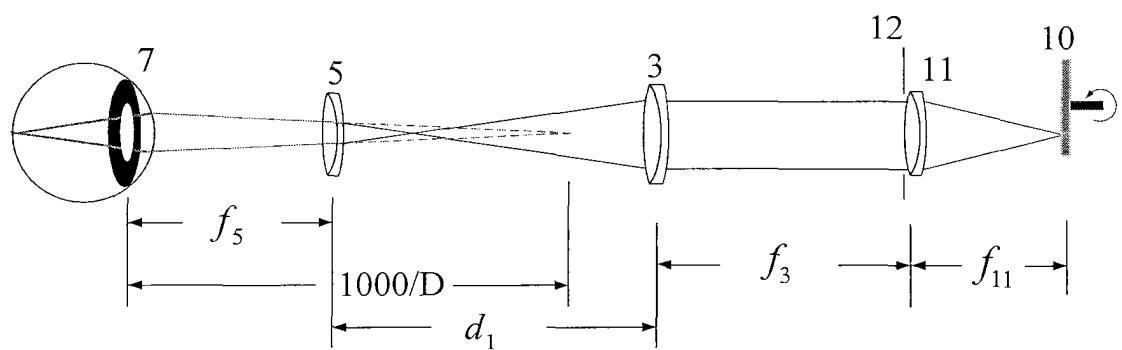


图 3

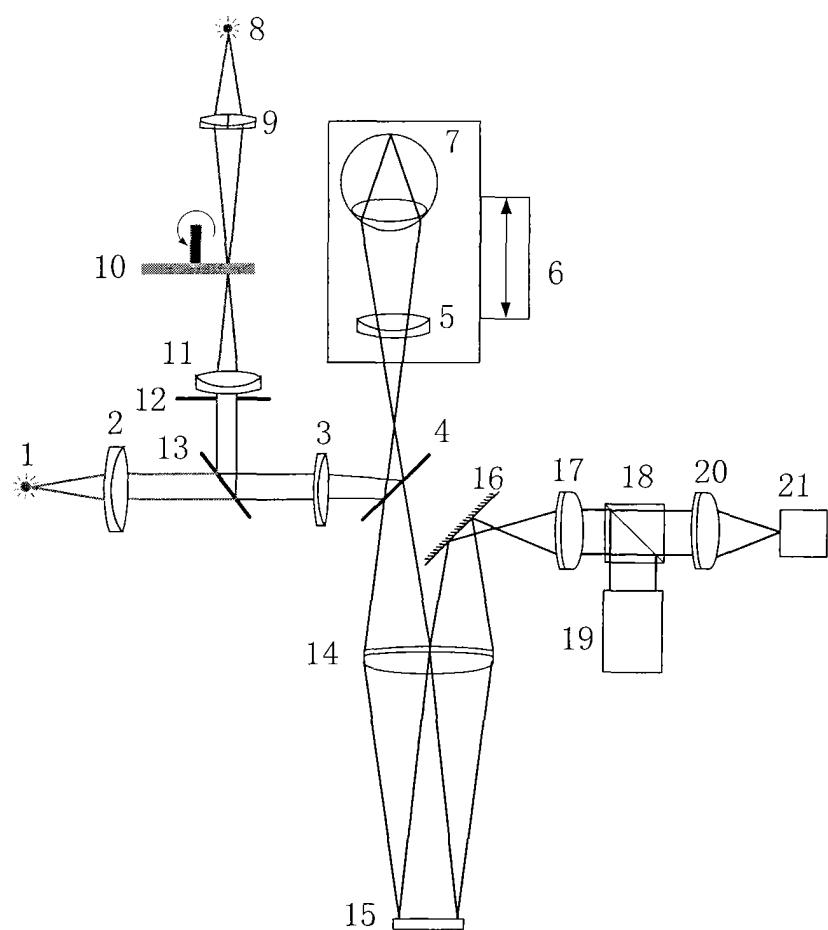


图 4

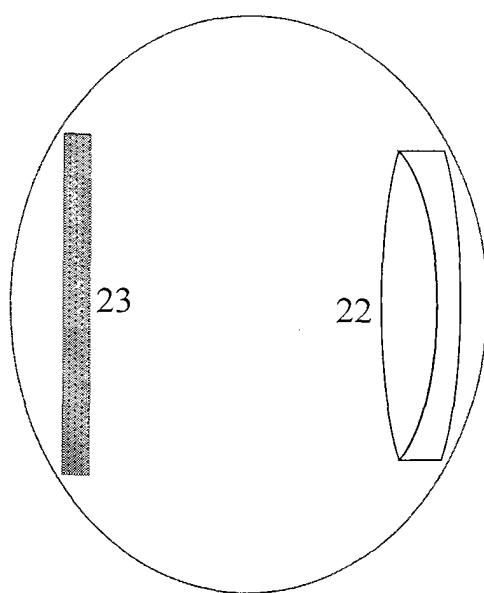


图 5

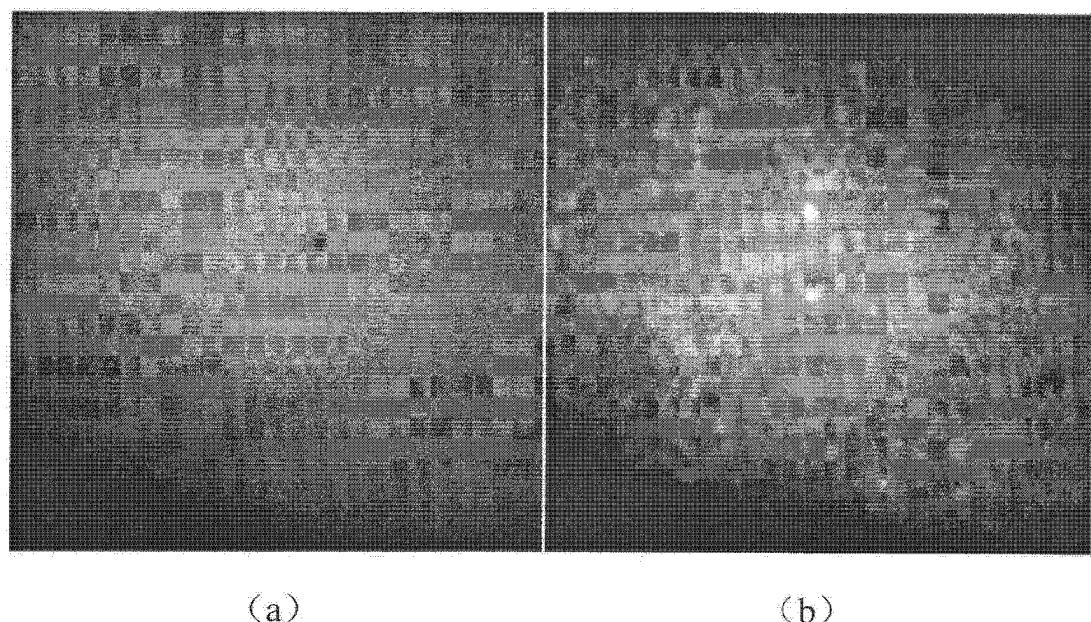


图 6