



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 105807598 B

(45)授权公告日 2019.03.19

(21)申请号 201610366975.5

G03H 1/04(2006.01)

(22)申请日 2016.05.27

B82Y 30/00(2011.01)

(65)同一申请的已公布的文献号

B82Y 40/00(2011.01)

申请公布号 CN 105807598 A

审查员 刘益

(43)申请公布日 2016.07.27

(73)专利权人 武汉大学

地址 430072 湖北省武汉市武昌区珞珈山  
武汉大学

(72)发明人 郑国兴 李子乐 吴伟标 吕良宇  
王宇 刘国根

(74)专利代理机构 武汉科皓知识产权代理事务  
所(特殊普通合伙) 42222

代理人 胡艳

(51)Int.Cl.

G03H 1/16(2006.01)

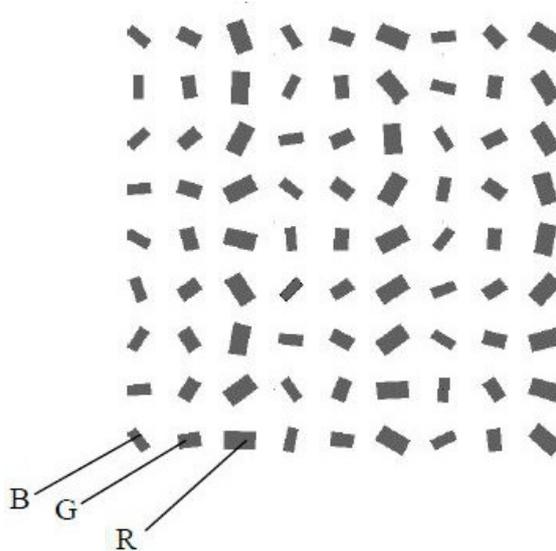
权利要求书2页 说明书5页 附图4页

(54)发明名称

应用于傅里叶彩色全息的硅纳米砖阵列结  
构及其设计方法

(57)摘要

本发明公开了一种应用于傅里叶彩色全息的硅纳米砖阵列结构及其设计方法,利用硅纳米砖的磁共振效应,实现特定波长的高效反射;通过设计不同大小的硅纳米砖,使其分别对红、绿、蓝三基色光实现窄带响应;利用硅纳米砖的朝向角对入射光位相进行精密调节,实现位相型傅里叶彩色全息。本发明工艺简单,可广泛用于真彩色显示、信息存储、防伪等领域。



1. 应用于傅里叶彩色全息硅纳米砖阵列结构,其特征是:

由第一硅纳米砖单元列、第二硅纳米砖单元列和第三硅纳米砖单元列交替排列构成,第一硅纳米砖单元列、第二硅纳米砖单元列、第三硅纳米砖单元列分别由相等数量的第一硅纳米砖单元、第二硅纳米砖单元、第三硅纳米砖单元排列构成;

第一硅纳米砖单元由介质基底和介质基底上刻蚀的第一硅纳米砖构成,第二硅纳米砖单元包括介质基底和介质基底上刻蚀的第二硅纳米砖,第三硅纳米砖单元包括介质基底和介质基底上刻蚀的第三硅纳米砖;第一硅纳米砖单元、第二硅纳米砖单元、第三硅纳米砖单元的几何尺寸均为亚波长尺度,分别对红光、绿光、蓝光窄带响应;

利用第一硅纳米砖、第二硅纳米砖、第三硅纳米砖的磁共振或电共振,来分别实现对红光、绿光、蓝光的窄带响应反射;

介质基底为长方体形,其工作面及工作面的相对面为正方形,第一硅纳米砖单元、第二硅纳米砖单元、第三硅纳米砖单元中介质基底几何尺寸相同;第一硅纳米砖、第二硅纳米砖、第三硅纳米砖为具有不同几何尺寸的长方体形;介质基底和其上刻蚀的硅纳米砖的中心点的连线垂直于介质基底工作面;

第一硅纳米砖、第二硅纳米砖、第三硅纳米砖的朝向角分别为全息片中第一硅纳米砖、第二硅纳米砖、第三硅纳米砖所对应像素点的位相的一半。

2. 权利要求1所述的硅纳米砖阵列结构的设计方法,其特征是,包括:

(1) 分别确定红光、绿光、蓝光的主波长;

(2) 对第一硅纳米砖单元、第二硅纳米砖单元、第三硅纳米砖单元的结构参数分别进行优化:

采用电磁仿真法,以左旋圆偏光或右旋圆偏光垂直入射硅纳米砖单元工作面,扫描硅纳米砖单元的结构参数,满足优化目标的结构参数即优化的结构参数;

所述硅纳米砖单元为第一硅纳米砖单元、第二硅纳米砖单元或第三硅纳米砖单元;

所述优化目标为:仅在硅纳米砖单元对应主波长处响应,且在该对应主波长下交叉偏振转化效率最高、同向偏振转化效率最低;在其他两个主波长下交叉偏振转化效率最低;

所述结构参数包括硅纳米砖单元边长C及其中硅纳米砖的长宽高;

(3) 分别计算第一硅纳米砖单元、第二硅纳米砖单元、第三硅纳米砖单元的周期:

根据 $d_x = m\lambda / (2 \tan \frac{\theta_x}{2})$ 和 $d_y = n\lambda / (2 \tan \frac{\theta_y}{2})$ ,计算对主波长 $\lambda$ 窄带响应的硅纳米砖单元

在x、y方向的周期 $d_x$ 、 $d_y$ ;  $\theta_x$ 和 $\theta_y$ 分别表示目标全息图像在x、y方向上的投影角度,m和n分别表示对主波长 $\lambda$ 产生的全息图像在x、y方向上的像素数, $\theta_x$ 、 $\theta_y$ 、m、n根据目标全息图像要求确定;所述主波长 $\lambda$ 为红光、绿光或蓝光的主波长;

(4) 分别计算单周期内第一硅纳米砖单元、第二硅纳米砖单元、第三硅纳米砖单元的数量:

根据 $M = d_x / (3C)$ 和 $N = d_y / C$ ,得单周期内对主波长 $\lambda$ 窄带响应的硅纳米砖单元在x、y方向的数量M、N;所述主波长 $\lambda$ 为红光、绿光或蓝光的主波长;

(5) 根据应用需求选择优化指标,采用位相分布优化法分别获得第一硅纳米砖、第二硅纳米砖、第三硅纳米砖所对应像素点的位相分布优化,从而获得其中各第一硅纳米砖、第二硅纳米砖、第三硅纳米砖的朝向角;

(6) 根据单周期内第一硅纳米砖单元、第二硅纳米砖单元、第三硅纳米砖单元的数量，将第一硅纳米砖单元、第二硅纳米砖单元、第三硅纳米砖单元分别排列成第一硅纳米砖单元列、第二硅纳米砖单元列、第三硅纳米砖单元列，第一硅纳米砖单元列、第二硅纳米砖单元列、第三硅纳米砖单元列交替排列。

3. 如权利要求2所述的硅纳米砖阵列结构的设计方法，其特征是：  
所述的位相分布优化法为G-S法。

## 应用于傅里叶彩色全息的硅纳米砖阵列结构及其设计方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及微纳光学及光学全息技术领域,尤其涉及一种应用于傅里叶彩色全息的硅纳米砖阵列结构及其设计方法。

### 背景技术

[0002] 傅里叶计算全息是将全息片的傅里叶谱面设置成目标全息图像,然后借助于一些优化设计算法设计全息片的位相或振幅分布,实现目标全息图像。傅里叶全息具有图案扩展角大、效率高、使用简单、图像信噪比较高等突出优点,因此在商业应用中被广泛采纳,比如激光全息键盘、体感中的随机光点发生器等。当前的傅里叶全息主要还是单色光全息,由于其色彩单调,难于满足消费电子和科学研究的持续需求,因此急需新技术的突破。

[0003] 最近几年,超材料(metamaterials)成为学术界研究的热点。这种人工结构材料具有亚波长结构特点,可用于调节入射光的振幅和位相。基于超材料的彩色全息已经有了相关报道[1],该文描述了铝纳米棒超材料实现傅里叶全息的原理:利用铝纳米棒阵列构造位相单元,再通过控制铝纳米棒几何尺寸得到所需的位相。然而,由于制造技术的复杂性(需要至少三层金属或介质薄膜、外加光刻工艺),使得实现的图案不仅过于简单、而且实际效果难于令人满意,远远达不到商业应用的标准。

### 发明内容

[0004] 针对现有技术存在的问题,本发明提供了一种可再现逼真全息图像且工艺简单应用于傅里叶彩色全息的硅纳米砖阵列结构及其设计方法。

[0005] 本发明思路为:

[0006] 采用硅纳米砖阵列结构实现傅里叶彩色全息,硅纳米砖阵列结构包括结构参数不同的三类硅纳米砖单元,可分别对红光、绿光、蓝光窄带响应;通过调节硅纳米砖单元中硅纳米砖朝向角可对红光、绿光、蓝光位相进行任意调节;通过设计三类硅纳米砖单元的排列方式,使红、绿、蓝三种单色全息图像叠加成傅里叶彩色全息图像。

[0007] 为解决上述技术问题,本发明采用如下技术方案:

[0008] 一、应用于傅里叶彩色全息的硅纳米砖阵列结构,由第一硅纳米砖单元列、第二硅纳米砖单元列和第三硅纳米砖单元列交替排列构成,第一硅纳米砖单元列、第二硅纳米砖单元列、第三硅纳米砖单元列分别由相等数量的第一硅纳米砖单元、第二硅纳米砖单元、第三硅纳米砖单元排列构成;

[0009] 第一硅纳米砖单元由介质基底和介质基底上刻蚀的第一硅纳米砖构成,第二硅纳米砖单元包括介质基底和介质基底上刻蚀的第二硅纳米砖,第三硅纳米砖单元包括介质基底和介质基底上刻蚀的第三硅纳米砖;第一硅纳米砖单元、第二硅纳米砖单元、第三硅纳米砖单元的几何尺寸均为亚波长尺度,分别对红光、绿光、蓝光窄带响应;

[0010] 介质基底为长方体形,其工作面及工作面的相对面为正方形,第一硅纳米砖单元、第二硅纳米砖单元、第三硅纳米砖单元中介质基底几何尺寸相同;第一硅纳米砖、第二硅纳

米砖、第三硅纳米砖为具有不同几何尺寸的长方体形；介质基底和其上刻蚀的硅纳米砖的中心点的连线垂直于介质基底工作面；

[0011] 第一硅纳米砖、第二硅纳米砖、第三硅纳米砖的朝向角分别为全息片中第一硅纳米砖、第二硅纳米砖、第三硅纳米砖所对应像素点的位相的一半。

[0012] 本发明硅纳米砖阵列结构中，介质基底、第一硅纳米砖、第二硅纳米砖和第三硅纳米砖的长宽高均为亚波长尺度。

[0013] 本发明硅纳米砖阵列结构中，可通过控制第一硅纳米砖、第二硅纳米砖、第三硅纳米砖的朝向角来对所响应波长进行任意位相调节。

[0014] 本发明硅纳米砖阵列结构中，三个依次排列的第一硅纳米砖单元、第二硅纳米砖单元、第三硅纳米砖单元构成一个全息片像素，全息片由若干像素排列构成。

[0015] 二、上述硅纳米砖阵列结构在傅里叶彩色全息的应用，包括：

[0016] (1) 分别确定红光、绿光、蓝光的主波长；

[0017] (2) 对第一硅纳米砖单元、第二硅纳米砖单元、第三硅纳米砖单元的结构参数分别进行优化：

[0018] 采用电磁仿真法，以左旋圆偏光或右旋圆偏光垂直入射硅纳米砖单元工作面，扫描硅纳米砖单元的结构参数，满足优化目标的结构参数即优化的结构参数；

[0019] 所述硅纳米砖单元为第一硅纳米砖单元、第二硅纳米砖单元或第三硅纳米砖单元；

[0020] 所述优化目标为：仅在硅纳米砖单元对应主波长处响应，且在该对应主波长下交叉偏振转化效率最高、同向偏振转化效率最低；在其他两个主波长下交叉偏振转化效率最低；

[0021] 所述结构参数包括硅纳米砖单元边长C及其中硅纳米砖的长宽高；

[0022] (3) 分别计算第一硅纳米砖单元、第二硅纳米砖单元、第三硅纳米砖单元的周期：

[0023] 根据  $d_x = m\lambda / (2 \tan \frac{\theta_x}{2})$  和  $d_y = n\lambda / (2 \tan \frac{\theta_y}{2})$ ，计算对主波长  $\lambda$  窄带响应的硅纳米砖

单元在x、y方向的周期  $d_x$ 、 $d_y$ ； $\theta_x$  和  $\theta_y$  分别表示目标全息图像在x、y方向上的投影角度，m和n分别表示对主波长  $\lambda$  产生的全息图像在x、y方向上的像素数， $\theta_x$ 、 $\theta_y$ 、m、n根据目标全息图像要求确定；所述主波长  $\lambda$  为红光、绿光或蓝光的主波长；

[0024] (4) 分别计算单周期内第一硅纳米砖单元、第二硅纳米砖单元、第三硅纳米砖单元的数量：

[0025] 根据  $M = d_x / (3C)$  和  $N = d_y / C$ ，得单周期内对主波长  $\lambda$  窄带响应的硅纳米砖单元在x、y方向的数量M、N，即单周期内对主波长  $\lambda$  窄带响应的硅纳米砖单元总数量为  $M \times N$ ；所述主波长  $\lambda$  为红光、绿光或蓝光的主波长；

[0026] (5) 根据应用需求选择优化指标，采用位相分布优化法分别获得第一硅纳米砖、第二硅纳米砖、第三硅纳米砖所对应像素点的位相分布优化，从而获得其中各第一硅纳米砖、第二硅纳米砖、第三硅纳米砖的朝向角；

[0027] (6) 根据单周期内第一硅纳米砖单元、第二硅纳米砖单元、第三硅纳米砖单元的数量，将第一硅纳米砖单元、第二硅纳米砖单元、第三硅纳米砖单元分别排列成第一硅纳米砖单元列、第二硅纳米砖单元列、第三硅纳米砖单元列，第一硅纳米砖单元列、第二硅纳米砖

单元列、第三硅纳米砖单元列交替排列。

[0028] 对红光的主波长窄带响应的硅纳米砖单元即第一硅纳米砖单元,对绿光的主波长窄带响应的硅纳米砖单元即第二硅纳米砖单元,对蓝光的主波长窄带响应的硅纳米砖单元即第三硅纳米砖单元。

[0029] 本发明涉及如下技术原理:

[0030] (1) 硅纳米砖单元电磁共振实现窄带响应

[0031] 尺寸在亚波长量级的电介质纳米颗粒已被证明具有纳米天线的散射特性<sup>[2]</sup>,这种电介质纳米颗粒具有自己的电偶极子振荡频率,当入射光频率与电偶极子振荡频率一致时,将引起磁共振和/或电共振的现象。这种现象的对外表现是入射光将大部分被反射,且反射率具有很强的波长敏感性。由于电偶极子的振荡频率与电介质纳米颗粒的几何尺寸密切联系,因此可通过控制电介质纳米颗粒的几何尺寸来控制其响应波长。

[0032] (2) 硅纳米砖位相调节

[0033] 硅纳米砖上建立工作面坐标系 $xoy$ ,硅纳米砖长边方向代表长轴,其短边方向代表短轴,长轴与 $x$ 轴的夹角为朝向角 $\phi$ ,朝向角 $\phi$ 用于调节位相。入射于硅纳米砖的左旋圆偏光束或右旋圆偏光束,反射光旋向相反,同时将经历 $2\phi$ 的位相延迟。因此通过调整 $\phi$ 大小,即通过调整硅纳米砖在工作面坐标系 $xoy$ 平面的朝向角,就可调节和控制反射光的位相。

[0034] 和现有傅里叶彩色全息技术相比,本发明具有以下优点和积极效果:

[0035] (1) 只需改变硅纳米砖的朝向角即可实现 $2\pi$ 范围内位相调制,可等效于任意台阶数的浮雕位相调制结构;工艺简单,对加工误差容忍度好,具有很高的稳定性与可靠性。

[0036] (2) 结构参数不同的三类硅纳米砖单元分别对红光、绿光、蓝光窄带响应,每一类硅纳米砖单元只对一种单色光进行位相调制,不同颜色的单色光间无串扰。

[0037] (3) 产生的红、绿、蓝三种单色全息图像共光轴,故能在很大的深度范围内保持傅里叶彩色全息图像良好的清晰度。

[0038] (4) 仅需要简单的二台阶微光学工艺,即可实现连续位相调制和傅里叶彩色全息功能,是激光全息领域的突破,可广泛用于真彩色显示、信息存储、防伪等领域。

## 附图说明

[0039] 图1是硅纳米砖单元的具体示意图;

[0040] 图2是图1硅纳米砖单元的俯视图;

[0041] 图3是实施例中优化后硅纳米砖单元的波长响应图;

[0042] 图4是实施例中硅纳米砖单元排列示意图;

[0043] 图5是实施例所得红光单色全息仿真效果图;

[0044] 图6是实施例所得绿光单色全息仿真效果图;

[0045] 图7是实施例所得蓝光单色全息仿真效果图;

[0046] 图8是实施例所得傅里叶彩色全息仿真效果图。

## 具体实施方式

[0047] 图1~2为硅纳米砖单元的示意图,图中,1表示硅纳米砖,2表示介质基底, $L$ 、 $W$ 、 $H$ 分别表示硅纳米砖的长度、宽度、高度; $C$ 表示硅纳米砖单元边长,即介质基底工作面边长; $\phi$

表示硅纳米砖的朝向角。

[0048] 下面将结合附图详细说明本发明具体实施方式。

[0049] (1) 本实施例,确定红光、绿光、蓝光的主波长,分别为 $\lambda_R=633\text{nm}$ 、 $\lambda_G=532\text{nm}$ 、 $\lambda_B=447\text{nm}$ 。

[0050] (2) 硅纳米砖单元结构参数的优化。

[0051] 本发明硅纳米砖单元包括第一硅纳米砖单元、第二硅纳米砖单元、第三硅纳米砖单元。本步骤采用电磁仿真软件平台进行优化,例如Comsol。

[0052] 下面以第一硅纳米砖单元说明其结构参数的优化过程:

[0053] 以左旋圆偏光或右旋圆偏光垂直入射第一硅纳米砖单元工作面,以入射圆偏光的转化效率及响应带宽为优化对象。扫描第一硅纳米砖单元边长 $C$ 及其中第一硅纳米砖的长 $L_R$ 、宽 $W_R$ 、高 $H_R$ ,以期获得优化的结构参数。

[0054] 优化目标为:仅在主波长 $\lambda_R$ 响应,且在主波长 $\lambda_R$ 下交叉偏振转化效率最高、同向偏振转化效率最低;同时在主波长 $\lambda_G$ 、 $\lambda_B$ 下交叉偏振转化效率最低。交叉偏振指反射光与入射光旋向相反,同向偏振指反射光与入射光旋向相同。

[0055] 第二硅纳米砖单元和第三硅纳米砖单元的结构参数优化过程相同。经优化,得到优化的结构参数为:硅纳米砖单元边长 $C=300\text{nm}$ ,第一硅纳米砖单元中第一硅纳米砖长宽高为 $180\text{nm} \times 100\text{nm} \times 220\text{nm}$ ,第二硅纳米砖单元中第二硅纳米砖长宽高为 $130\text{nm} \times 80\text{nm} \times 180\text{nm}$ ,第三硅纳米砖单元中第三硅纳米砖长宽高为 $140\text{nm} \times 60\text{nm} \times 100\text{nm}$ 。

[0056] 图3是结构参数优化后的第一硅纳米砖单元、第二硅纳米砖单元、第三硅纳米砖单元的波长响应图,第一硅纳米砖单元、第二硅纳米砖单元、第三硅纳米砖单元的波长响应曲线分别对应图中红光、绿光、蓝光曲线。从该图可看出,各硅纳米砖单元对应的中心波长窄带范围内同时实现了交叉偏振的高效率转化和同向偏振的有效抑制,中心波长窄带范围外对光波几乎不产生响应。

[0057] (3) 根据目标全息图像要求获得硅纳米砖单元周期。

[0058] 本步骤对第一硅纳米砖单元、第二硅纳米砖单元、第三硅纳米砖单元分别进行。

[0059] 主波长 $\lambda_R=633\text{nm}$ 下,选取目标全息图像在 $x$ 、 $y$ 方向的投影角度 $\theta_{Rx}=30^\circ$ 、 $\theta_{Ry}=48.1^\circ$ ,采用离轴设计方式以避免零级与目标全息图案重合,得到 $m_R=347$ 、 $n_R=578$ , $m_R$ 、 $n_R$ 分别表示对主波长 $\lambda_R$ 产生的全息图像在 $x$ 、 $y$ 方向上的像素数。根据投影角度和全息图像像素数,得第一硅纳米砖单元的周期 $d_{Rx}=410\mu\text{m}$ 、 $d_{Ry}=410\mu\text{m}$ 。

[0060] 类似的,对主波长 $\lambda_G=532\text{nm}$ ,选取目标全息图像在 $x$ 、 $y$ 方向的投影角度 $\theta_{Gx}=30^\circ$ 、 $\theta_{Gy}=48.1^\circ$ ,计算全息图像像素数 $m_G=347$ 、 $n_G=578$ ,并得到第二硅纳米砖单元的周期 $d_{Gx}$ 、 $d_{Gy}$ 。对主波长 $\lambda_B=447\text{nm}$ ,选取目标全息图像在 $x$ 、 $y$ 方向的投影角度 $\theta_{Bx}=30^\circ$ 、 $\theta_{By}=48.1^\circ$ ,计算全息图像像素数 $m_B=347$ 、 $n_B=578$ ,并得到第三硅纳米砖单元的周期 $d_{Bx}$ 、 $d_{By}$ 。

[0061] (4) 根据硅纳米砖单元周期计算单周期内硅纳米砖单元数。

[0062] 本实施例中,对第一硅纳米砖单元,其单周期内 $x$ 、 $y$ 方向的数量分别为 $M_R=455$ 、 $N_R=1366$ 。

[0063] (5) 采用G-S法分别获得第一硅纳米砖单元、第二硅纳米砖单元、第三硅纳米砖单元的位相分布,从而获得其中各第一硅纳米砖、第二硅纳米砖、第三硅纳米砖的朝向角 $\phi(i, j)$ , $(i, j)$ 表示硅纳米砖在全息片所对应像素点坐标。

[0064] (6) 根据单周期内第一硅纳米砖单元、第二硅纳米砖单元、第三硅纳米砖单元的数量,将第一硅纳米砖单元、第二硅纳米砖单元、第三硅纳米砖单元分别排列成第一硅纳米砖单元列、第二硅纳米砖单元列、第三硅纳米砖单元列,第一硅纳米砖单元列、第二硅纳米砖单元列、第三硅纳米砖单元列交替排列,即,硅纳米砖阵列结构各列上硅纳米砖单元结构参数相同,列方向上结构参数相同的硅纳米砖中心间隔 $C$ ,行方向上结构参数相同的硅纳米砖中心间隔 $3C$ ,见图4,图中,R、G、B分别表示第一硅纳米砖、第二硅纳米砖、第三硅纳米砖。

[0065] 采用本发明所得红光、绿光、蓝光单色全息仿真效果分别见图5、6、7,三者合成之后的傅里叶彩色全息效果见图8。

[0066] 文中涉及如下文献:

[0067] [1]Huang,Yao-Wei,et al.Aluminum plasmonic multicolor meta-hologram.Nano letters15.5(2015):3122-3127.

[0068] [2]Zhao,Qian,et al.Mie resonance-based dielectric metamaterials.Materials Today12.12(2009):60-69.

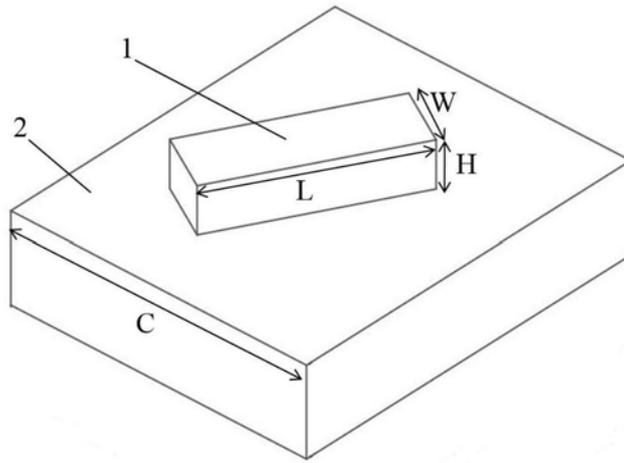


图1

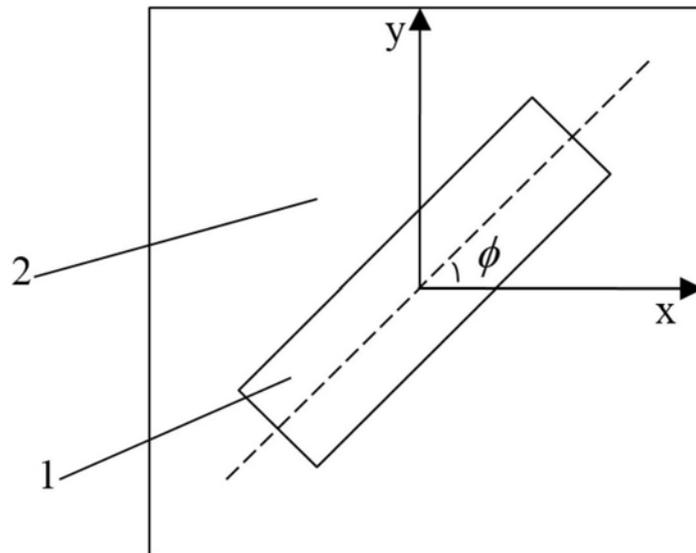


图2

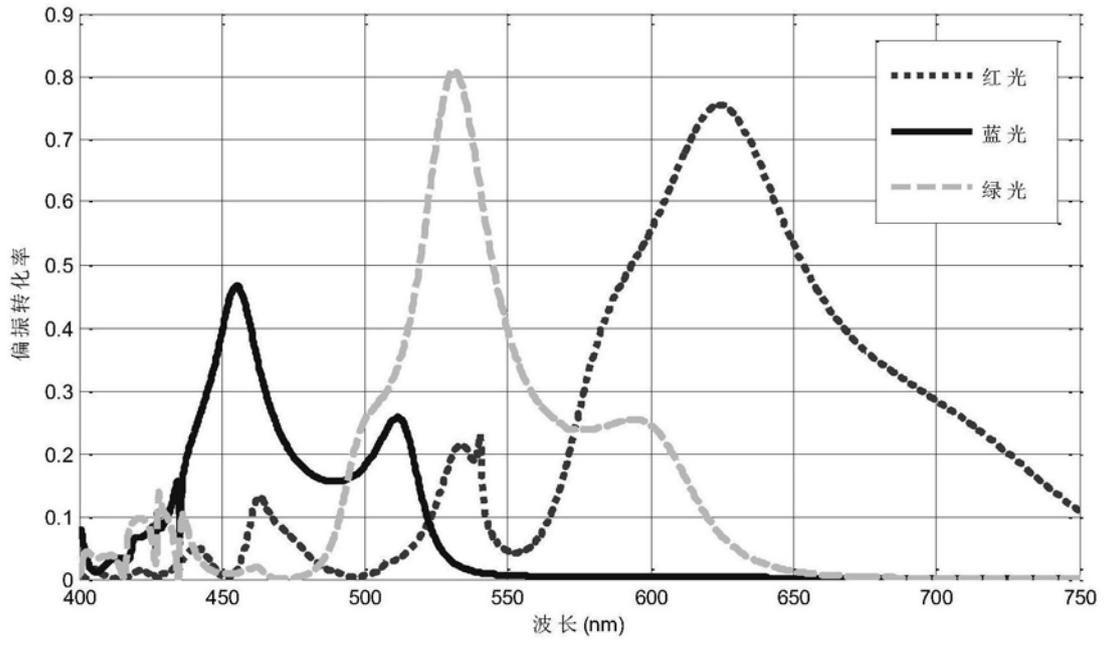


图3

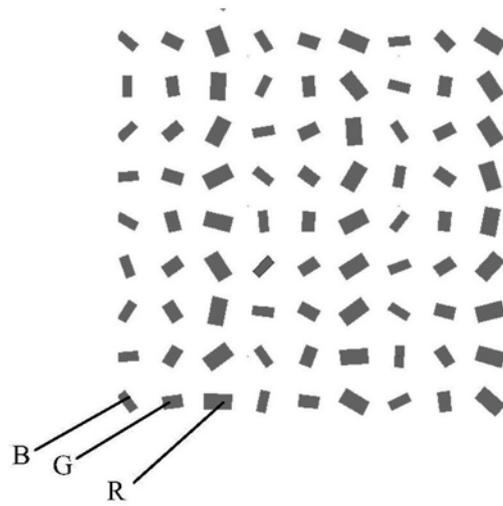


图4

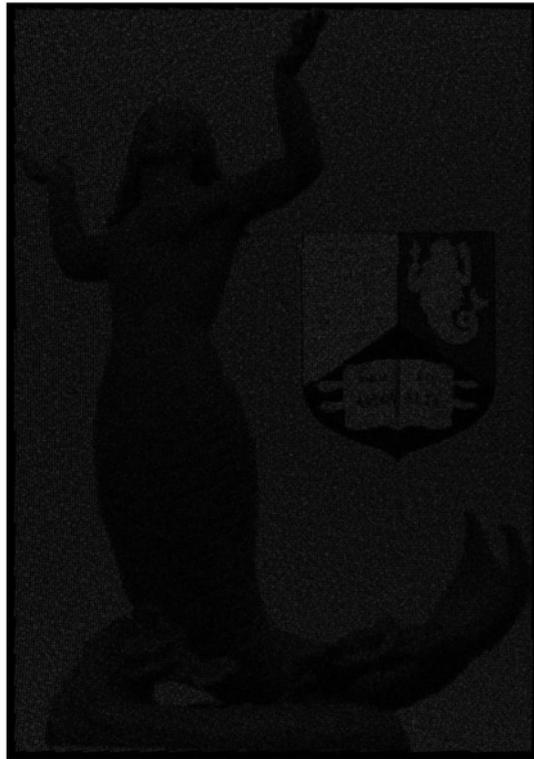


图5



图6



图7



图8