



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102759408 B

(45) 授权公告日 2015. 04. 15

(21) 申请号 201110103559. 3

(22) 申请日 2011. 04. 25

(73) 专利权人 中国科学院空间科学与应用研究中心

地址 100190 北京市海淀区中关村南二条 1 号

(72) 发明人 杜克铭 翟光杰 蒋远大 刘雪峰 赵清

(74) 专利代理机构 北京法思腾知识产权代理有限公司 11318

代理人 杨小蓉 高宇

(51) Int. Cl.

G01J 11/00(2006. 01)

(56) 对比文件

高睿. 基于压缩传感的匹配追踪重建算法研究. 《北京交通大学硕士学位论文》. 2009, 全文.

MACRO F. DUARTE, et al. SINGLE-PIXEL IMAGING VIA COMPRESSIVE SAMPLING. 《IEEE SIGNAL PROCESSING MAGAZINE》. 2008, 83-89.

杜克铭. 基于压缩传感的光子计数成像系统研究. 《2010 国防空天信息技术前沿论坛论文集》. 2010, 2-5.

审查员 刘丹

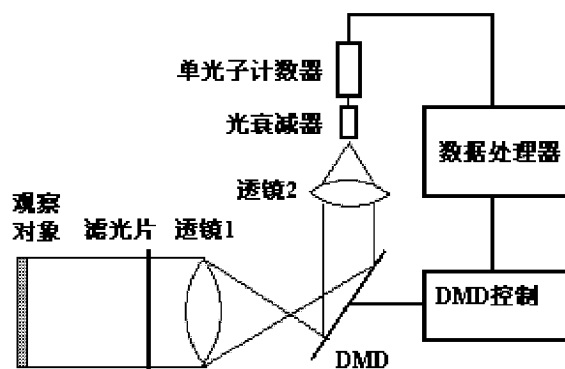
权利要求书2页 说明书5页 附图1页

(54) 发明名称

一种单光子计数成像系统及其方法

(57) 摘要

本发明涉及一种单光子计数成像系统及其方法,该系统包括:滤光片、第一透镜(1)、DMD 控制系统、第二透镜(2)、单光子计数器和数据处理单元;其中,DMD 结合第一透镜(1) 和第二透镜(2),用于将二维图像数据转化为一维数据序列完成被测信号的压缩采样,极弱光通过滤光片滤除杂光,经第一透镜(1) 在 DMD 控制系统处成像,并由 DMD 控制系统控制光子被反射到第二透镜(2) 的概率,经过第二透镜(2) 控制光子聚焦;数据处理单元结合单光子计数器完成稀疏重建,数据处理单元根据单光子计数器在一定时间内对光子进行计数折算成探测到光子数的概率作为测量值,和 DMD 控制系统上的测量矩阵经过最优化算法重建光子密度图像,解算出二维图像。



1. 一种单光子计数成像方法,该方法采用了压缩传感理论和 DLP 技术,并以单光子计数器为探测元件,实现了单光子级别的极弱光对象的二维成像,其步骤包括:1) 压缩采样的步骤;

所述的压缩采样是由 DMD 控制系统结合第一透镜 (1) 和第二透镜 (2),用于将二维图像数据转化为一维数据序列完成被测信号的压缩采样,极弱光通过滤光片滤除杂光,经第一透镜 (1) 在 DMD 控制系统处成像,并由 DMD 控制系统控制光子被反射到第二透镜 (2) 的概率,经过第二透镜 (2) 控制光子聚焦;

2) 稀疏重建的步骤;

所述的稀疏重建是由数据处理单元根据单光子计数器在一定时间内对光子进行计数折算成探测到光子数的概率作为测量值,和 DMD 控制系统上的测量矩阵经过最优化算法重建光子密度图像,解算出二维图像;所述的方法包括步骤如下:

所述的压缩采样,是被测信号由高维向低维映射的过程:

11) 假设 $x \in R^n$ 是被测数据, $y \in R^k$ 是观测数据, $\Phi \in R^{k \times n}$ 是随机投影矩阵 ($k \ll n$), $e \in R^k$ 是测量噪声,那么,压缩采样的过程可以描述为 (1) 式:

$$y = \Phi x + e \quad (1)$$

如果 x 是变换域 Ψ 下展开的系数是稀疏的,即 $x = \Psi \theta$, Ψ 是稀疏变换矩阵, θ 为稀疏系数,则 (1) 式变化为 (2) 式:

$$y = \Phi \Psi \theta + e \quad (2)$$

式中, Ψ 为小波变换矩阵, Φ 为 Gaussian 随机矩阵;

12) 假设测量数为 k , 二维图像的像素个数为 n , 则 (1) 式中的测量矩阵则为 $\Phi = \{\Phi_1, \dots, \Phi_i, \dots, \Phi_k\}$, Φ_i 是 Φ 的第 i 行的行向量, Φ_1 为 Φ 的第 1 行的行向量, Φ_k 为 Φ 的第 k 行的行向量;把 $\sqrt{n} \times \sqrt{n}$ 的二维图像的列首尾相连,化成 $n \times 1$ 的一维列向量,对应 (1) 式中的 x , 其中的每一个元素代表相应位置处的光子密度;DMD 控制系统具有同样的分辨率,它的列首尾相连,化成 $1 \times n$ 的一维行向量,对应测量矩阵 Φ 中的一行,其中的每个元素代表相应位置处光子透射到第二透镜 (2) 的概率;

13) 假设测量周期为 T ,在这段时间内,DMD 控制系统保持不变,单光子计数器探测到的光子数为 N ,那么 N/T 就相当于光子密度图像与 DMD 控制系统上的随机数阵列的内积值,对

应于 (1) 式中观察向量 y 的一个元素 $y_i = \sum_{j=1}^n \Phi_{i,j} x_j$ 式中, $\Phi_{i,j}$ 、 x_j 分别是 Φ_i 和 x 的第 j 个

元素;根据测量矩阵改变 DMD 控制系统,重复 k 次测量,就可以得到整个观测数据 y ;

14) 所述的稀疏重建是在已知观测数据 y 和测量矩阵 Φ 的条件下求解 (1) 式中的 x , 一般用最优化方法求解,可描述为 (3) 式:

$$\min_{x \in R^n} \left(\frac{1}{2} \|y - \Phi x\|_2^2 + \tau \|x\|_1 \right) \quad (3)$$

如果 x 是在变换域 Ψ 下是稀疏的,对应于 (2) 式的重建问题可以描述为 (4) 式:

$$\min_{x \in R^n} \left(\frac{1}{2} \|y - \Phi \Psi \theta\|_2^2 + \tau \|\theta\|_1 \right) \quad (4)$$

(3) 式和 (4) 式中, 第一项是最小二乘约束, 记为 $f(x)$; 第二项是对 x 稀疏度的一种约束; 两项之和是目标函数, 记为 $\varphi(x)$;

所述的最优化方法是采用 IWT 算法, 把本次迭代的估计值做 DWT 变换, 对变换系数做阈值处理, 再做 DWT 反变换得到下一次迭代的估计值;

如果阈值处理函数描述为 $S(u, v) = \text{sign}(u) \max\{|u| - v, 0\}$, 那么, 该算法可以描述为:

$$x^{t+1} = \Psi^{-1} \cdot S \left(\Psi \left(x^t - \frac{1}{\alpha} \nabla f(x^t) \right), \frac{\tau}{\alpha} \right)$$

其中, $\alpha = \|\Phi^T \Phi\|_2$ 。

2. 根据权利要求 1 所述的单光子计数成像方法, 其特征在于, 所述的方法在所述的第二透镜 (2) 聚焦后至单光子计数器的光路上, 还通过光衰减器将光衰减到单光子探测器的工作范围。

一种单光子计数成像系统及其方法

技术领域

[0001] 本发明涉及极弱光探测的技术领域,特别涉及一种单光子计数成像系统及其方法,它采用压缩传感理论和 DLP 技术,利用点探测器可以实现极弱光对象的高质量二维成像。

背景技术

[0002] 普通成像设备通过记录观察对象上某点的光强和位置获得图像。当观察对象的光强衰减到一定程度,达到单光子水平,就变成了离散脉冲信号。单光子是一种极弱光,被认为是光不可分割的最小能量单位,是可以探测的极限。单光子探测技术应用于生物自发光、医疗诊断、非破坏性物质分析、天文观测、光谱测量、量子光学等领域,并在其中扮演着重要角色。研究极弱光成像探测技术在这些领域应用的发展非常有意义。

[0003] 光子计数成像就是一种极弱光探测技术,通常它通过记录成像位置的光子计数以及探测到光子的概率,在数据处理端进行累计和融合获得一幅图像,其核心是面元探测器,面元探测器规模(阵列大小)、灵敏度范围、以及响应波段直接影响能否获得单光子水平的图象获取质量。但是,用于单光子探测水平的面元探测器不但价格昂贵,只能够在少数波段可以实现,且面元探测器灵敏度低,存在技术不甚成熟与极弱光对象二维成像的强烈需求之间的矛盾。

[0004] 压缩传感理论(CS 理论)是由 E. J. Candes 等人提出的,它打破了传统的线性采样模式,表明可压缩信号的少量线性随机投影中包含足够的信息来重建原信号。

[0005] CS 理论包括两部分:压缩采样和稀疏重建。

[0006] 压缩采样是被测信号由高维向低维映射的过程。假设 $x \in R^n$ 是被测数据, $y \in R^k$ 是观测数据, $\Phi \in R^{k \times n}$ 是随机投影矩阵 ($k \ll n$), $e \in R^k$ 是测量噪声,那么,压缩采样过程可以描述为 (1) 式:

$$[0007] \quad y = \Phi x + e \quad (1)$$

[0008] 如果 x 是变换域稀疏的,即 $\theta = \Psi x$, Ψ 是稀疏变换矩阵,那么 (1) 式变化为 (2) 式:

$$[0009] \quad y = \Phi \Psi^{-1} \theta + e \quad (2)$$

[0010] 随机投影矩阵 Φ , 也叫测量矩阵,需要满足 RIP(Restricted Isometry Property):

$$[0011] \quad (1 - \delta_s) \|x\|_2^2 \leq \|Ax\|_2^2 \leq (1 + \delta_s) \|x\|_2^2$$

[0012] 其中, δ_s 定义为使所有 s 稀疏的向量 x 都满足此不等式的最小常数,并且 $\delta_s < 1$ 。

[0013] 另外, Φ 与 Ψ 越不相关,采样所需的测量数 k 越小,所以,一般情况下 Φ 设计为随机矩阵。

[0014] 稀疏重建实际上是在已知观测数据 y 和测量矩阵 Φ 的条件下求解 (1) 式中的 x , 这是一个 ill-posed 问题,一般用最优化方法求解,可描述为 (3) 式:

$$[0015] \quad \min_{x \in R^n} \left(\frac{1}{2} \|y - \Phi x\|_2^2 + \tau \|x\|_1 \right) \quad (3)$$

[0016] 如果 x 是变换域稀疏的, 对应于 (2) 式的重建问题可以描述为 (4) 式:

$$[0017] \quad \min_{x \in R^n} \left(\frac{1}{2} \|y - \Phi x\|_2^2 + \tau \|\Psi x\|_1 \right) \quad (4)$$

[0018] (3) 式和 (4) 式中, 第一项是最小二乘约束, 记为 $f(x)$; 第二项是对 x 稀疏度的一种约束; 两项之和是目标函数, 记为 $\phi(x)$ 。

[0019] DLP 技术是美国德州仪器公司 (TI) 提出的一项技术, 它与数字视频或图形信号结合起来, 其微镜和透镜系统可以将数字图像反射到屏幕或其它表面, 其核心是 DLP 芯片——数字微镜器件 (Digital Micro-mirror Device, 简称 DMD 控制系统), 这目前是世界上精密的光开关。它包含一个多达 200 万个安装在铰链上的微镜的矩阵, 每个微镜的大小小于人的头发丝的五分之一, 每一个微镜都可以在一定角度范围内 (通常 -12° 和 $+12^\circ$) 摆动, 如果把这两种状态记为 0 和 1, 那么, 用脉宽调制波 (PWM) 来驱动微镜, 使其在 0 和 1 之间高速抖动, 就可以实现中间状态。DMD 控制系统及其相关的精密的电子元件就是所谓的 DLP 技术, 该技术有成熟产品, 广泛用于投影仪器等产品中。

[0020] 这种“先采样, 后重建”的思想使得将二维信号转换为随时间分布的一维信号, 并且由单个探测器采样成为可能。而点探测器无论在探测灵敏度、波长范围具有更宽的选择范围, 成本优势明显, 利用点探测器实现单光子记数成像成为未来单光子水平成像的重要发展趋势。

发明内容

[0021] 本发明的目的在于, 为解决目前面元探测器灵敏度低、技术不甚成熟与极弱光对象二维成像的强烈需求之间的矛盾, 从而提供一种单光子计数成像系统及其方法, 以压缩传感 (Compressive Sensing, CS) 理论为基础, 采用 DLP 技术将图像信号随机变化变成随机的光强信号, 再以单光子计数器为探测元件获得记数信号, 实现了用点探测器对极弱光对象进行二维成像。

[0022] 为实现上述目的, 本发明提供了一种单光子计数成像系统, 其特征在于, 该单光子计数成像系统采用压缩传感理论和 DLP 技术, 并以单光子计数器为探测元件, 实现了单光子级别的极弱光对象的二维成像, 所述的单光子计数成像系统包括: 滤光片、第一透镜 1、DMD 控制系统、第二透镜 2、单光子计数器和数据处理单元; 其中,

[0023] DMD 结合第一透镜 1 和第二透镜 2, 用于将二维图像数据转化为一维数据序列完成被测信号的压缩采样, 极弱光通过滤光片滤除杂光, 经第一透镜 1 在 DMD 控制系统处成像, 并由 DMD 控制系统控制光子被反射到第二透镜 2 的概率, 经过第二透镜 2 控制光子聚焦;

[0024] 数据处理单元结合单光子计数器完成稀疏重建, 数据处理单元根据单光子计数器在一定时间内对光子进行计数折算成探测到光子数的概率作为测量值, 和 DMD 控制系统上的测量矩阵经过最优化算法重建光子密度图像, 解算出二维图像。

[0025] 作为上述技术方案的一种改进, 所述的第二透镜 2 聚焦后至单光子计数器的光路上还设有光衰减器, 用于将光衰减到单光子探测器的工作范围。该光衰减器的设计是为了

防止被测光子密度过大和单光子计数器的门控时间过长引起的饱和。

[0026] 为实现上述的另一发明目的,本发明还提供了一种单光子计数成像方法,该方法采用了压缩传感理论和 DLP 技术,并以单光子计数器为探测元件,实现了单光子级别的极弱光对象的二维成像,其步骤包括:

[0027] 1) 压缩采样的步骤;

[0028] 所述的压缩采样是由 DMD 控制系统结合第一透镜 1 和第二透镜 2,用于将二维图像数据转化为一维数据序列完成被测信号的压缩采样,

[0029] 极弱光通过滤光片滤除杂光,经第一透镜 1 在 DMD 控制系统处成像,并由 DMD 控制系统控制光子被反射到第二透镜 2 的概率,经过第二透镜 2 控制光子聚焦;

[0030] 2) 稀疏重建的步骤;

[0031] 所述的稀疏重建是由数据处理单元根据单光子计数器在一定时间内对光子进行计数折算成探测到光子数的概率作为测量值,和 DMD 控制系统上的测量矩阵经过最优化算法重建光子密度图像,解算出二维图像。

[0032] 作为上述技术方案的一种改进,所述的方法包括步骤如下:

[0033] 所述的压缩采样,是被测信号由高维向低维映射的过程:

[0034] 11) 假设 $x \in R^n$ 是被测数据, $y \in R^k$ 是观测数据, $\Phi \in R^{k \times n}$ 是随机投影矩阵 ($k \ll n$), $e \in R^k$ 是测量噪声,那么,压缩采样的过程可以描述为 (1) 式:

$$[0035] \quad y = \Phi x + e \quad (1)$$

[0036] 如果 x 是变换域稀疏的,即 $\theta = \Psi x$, Ψ 是稀疏变换矩阵,那么 (1) 式变化为 (2) 式:

$$[0037] \quad y = \Phi \Psi^{-1} \theta + e \quad (2)$$

[0038] 式中, Ψ 为小波变换矩阵, Φ 为 Gaussian 随机矩阵;

[0039] 12) 假设测量数为 k , 二维图像的像素个数为 n , 则 (1) 式中的测量矩阵则为 $\Phi = \{\Phi_1, \dots, \Phi_i, \dots, \Phi_k\}$, Φ_i 是 Φ 的第 i 行, 把 $\sqrt{n} \times \sqrt{n}$ 的二维图像的列首尾相连, 化成 $n \times 1$ 的一维列向量, 对应 (1) 式中的 x , 其中的每一个元素代表相应位置处的光子密度; DMD 控制系统具有同样的分辨率, 它的列首尾相连, 化成 $1 \times n$ 的一维行向量, 对应测量矩阵 Φ 中的一行, 其中的每个元素代表相应位置处光子透射到第二透镜 2 的概率;

[0040] 13) 假设测量周期为 T , 在这段时间内, DMD 控制系统保持不变, 单光子计数器探测到的光子数为 N , 那么 N/T 就相当于光子密度图像与 DMD 控制系统上的随机数阵列的内积

值, 对应于 (1) 式中观察向量 y 的一个元素 $y_i = \sum_{j=1}^n \Phi_{i,j} x_j$ 式中, $\Phi_{i,j}$ 、 x_j 分别是 Φ_i 和 x 的第 j 个元素; 根据测量矩阵改变 DMD 控制系统, 重复 k 次测量, 就可以得到整个观测数据 y ;

[0041] 14) 所述的稀疏重建是在已知观测数据 y 和测量矩阵 Φ 的条件下求解 (1) 式中的 x , 一般用最优化方法求解, 可描述为 (3) 式:

$$[0042] \quad \min_{x \in R^n} \left(\frac{1}{2} \|y - \Phi x\|_2^2 + \tau \|x\|_1 \right) \quad (3)$$

[0043] 如果 x 是变换域稀疏的, 对应于 (2) 式的重建问题可以描述为 (4) 式:

$$[0044] \quad \min_{x \in R^n} \left(\frac{1}{2} \|y - \Phi x\|_2^2 + \tau \|\Psi x\|_1 \right) \quad (4)$$

[0045] (3) 式和 (4) 式中, 第一项是最小二乘约束, 记为 $f(x)$; 第二项是对 x 稀疏度的一种约束; 两项之和是目标函数, 记为 $\varphi(x)$ 。

[0046] 作为上述技术方案的进一步的改进, 所述的最优化方法是采用 IWT (Iterative Wavelets Thresholding) 算法, 把本次迭代的估计值做 DWT 变换, 对变换系数做阈值处理, 再做 DWT 反变换得到下一次迭代的估计值;

[0047] 如果阈值处理函数描述为 $S(u, v) = \text{sign}(u) \max\{|u| - v, 0\}$, 那么该算法可以描述为:

$$[0048] \quad x^{t+1} = \Psi^{-1} \cdot S\left(\Psi\left(x^t - \frac{1}{\alpha} \nabla f(x^t)\right), \frac{\tau}{\alpha}\right)$$

[0049] 其中, $\alpha = \|\Phi^T \Phi\|_2$ 。

[0050] 作为上述技术方案的另一种改进, 所述的方法在所述的第二透镜 2 聚焦后至单光子计数器的光路上, 还通过光衰减器将光衰减到单光子探测器的工作范围。

[0051] 本发明的优点在于: 本发明采用压缩传感理论 (Compressive Sensing, 简称 CS) 结合数字光处理 (Digital Light Processing, 简称 DLP) 技术的方案来解决利用点探测器实现高探测灵敏度的成像问题, 其灵敏度可以达到单光子水平, 分辨率与 DMD 控制系统直接相关, 而 DMD 控制系统目前可以达到很高的分辨率。本发明可广泛应用于生物自发光检测、医疗诊断、非破坏性物质分析、天文观测、国防军事、光谱测量、量子电子学等领域。

[0052] 本发明以压缩传感 (Compressive Sensing, CS) 理论为基础, 以单光子点探测器为探测元件, 用单光子计数器实现极弱光的二维成像, 结构简单, 灵敏度可以达到单光子水平, 分辨率与 DMD 控制系统直接相关, 而 DMD 控制系统目前可以达到很高的分辨率, 解决了目前该领域中焦平面传感器灵敏度低、阵列规模小、探测波长范围相对单一与极弱光对象二维成像的强烈需求之间的矛盾。

附图说明

[0053] 图 1 是本发明的单光子计数成像系统的结构示意图。

[0054] 图 2 是对本发明的模拟实验结果, 图 2(a) 是原始光子密度图像; 图 2(b) 是一次测量中 DMD 控制系统上的随机矩阵, 黑点代表 0, 白点代表 1, 灰点代表中间值; 图 2(c) 是 IWT 算法的重建图像, 与原始图像的相关系数 $\text{Cov} = 0.9783$, 信噪比 $\text{PSNR} = 23.95\text{dB}$; 图 2(d) 是 IWT 算法的残差图像。

具体实施方式

[0055] 以下结合附图对本发明作进一步的详细说明。

[0056] 如图 1 所示, 观察对象发出的极弱光被滤光片滤除杂光, 经第一透镜 1 在 DMD 控制系统处成像, 由 DMD 控制系统控制光子被反射到第二透镜 2 的概率, 经过第二透镜 2 的控制光子会聚点, 光衰减器作用是当光过强时将光衰减到单光子探测器的工作范围, 由单光子计数器在一定时间内对光子进行计数, 该数值可以折算成探测到光子数的概率作为测量值。最后由数据处理单元根据测量值和 DMD 控制系统上的测量矩阵经过最优化算法重建光子密度图像。其中, 光衰减器的设计是为了防止被测光子密度过大和单光子计数器的门控时间过长引起的饱和。

[0057] 为了便于数学上的理解,假设测量数为 k , (1) 式中的测量矩阵写为 $\Phi = \{\Phi_1, \dots, \Phi_i, \dots, \Phi_k\}$, Φ_i 是 Φ 的第 i 行。我们把 $\sqrt{n} \times \sqrt{n}$ 的二维图像的列首尾相连,化成 $n \times 1$ 的一维列向量,对应 (1) 式中的 x , 其中的每一个元素代表相应位置处的光子密度; DMD 控制系统具有同样的分辨率, 它的列首尾相连, 化成 $1 \times n$ 的一维行向量, 对应测量矩阵 Φ 中的一行, 其中的每个元素代表相应位置处光子透射到第二透镜 2 的概率。假设测量周期为 T , 在这段时间内, DMD 控制系统保持不变, 单光子计数器探测到的光子数为 N , 那么 N/T 就相当于光子密度图像与 DMD 控制系统上的随机数阵列的内积值, 对应于 (1) 式中观察向量 y 的一个元素 $y_i = \sum_{j=1}^n \Phi_{i,j} x_j$ ($\Phi_{i,j}$ 、 x_j 分别是 Φ_i 和 x 的第 j 个元素)。根据测量矩阵改变 DMD 控制系统, 重复 k 次测量, 就可以得到整个观测数据 y , 在物理上实现 (1) 式的过程。

[0058] 根据光子学的知识, 在一个元面积 dA 内, 任意时刻在 r 点观察到一个光子的概率 $p(r)dA$ 正比于该处光强。我们用生物芯片的灰度图像模拟光子密度图像。

[0059] 生物芯片是典型的极弱光源, 目前主要通过荧光标记的方法使其便于观察。实际上生物都有自发光的特性, 并且自发光光谱包含很多重要的信息。采用光子计数成像技术就可以直接观测。实验中选择分辨率为 64×64 的生物芯片图像, 灰度为 256 级, 最高灰度级对应光子数为 $4.0 \times 10^2 s^{-1}$ 。在假设不知道原图像的情况下, 采用 Gaussian 矩阵进行压缩采样, IWT 稀疏重建算法进行图像重建, 得到图 2 所示的结果, 其中, (a) 是原始光子密度图像; (b) 是一次测量中 DMD 控制系统上的随机矩阵, 黑点代表 0, 白点代表 1, 灰点代表中间值; (c) 是 IWT 算法的重建图像; (d) 是 IWT 算法的残差图像。

[0060] 图 2(c) 所示的重建图像与原始图像图 2(a) 的相关系数 $Cov = 0.9783$, 信噪比 $PSNR = 23.95dB$, 满足对生物芯片图像的观测需求。实验结果表明, 本发明硬件可以实现压缩采样, 软件算法可以实现图像重建。

[0061] 最后所应说明的是, 以上实施例仅用以说明本发明的技术方案而非限制。尽管参照实施例对本发明进行了详细说明, 本领域的普通技术人员应当理解, 对本发明的技术方案进行修改或者等同替换, 都不脱离本发明技术方案的精神和范围, 其均应涵盖在本发明的权利要求范围当中。

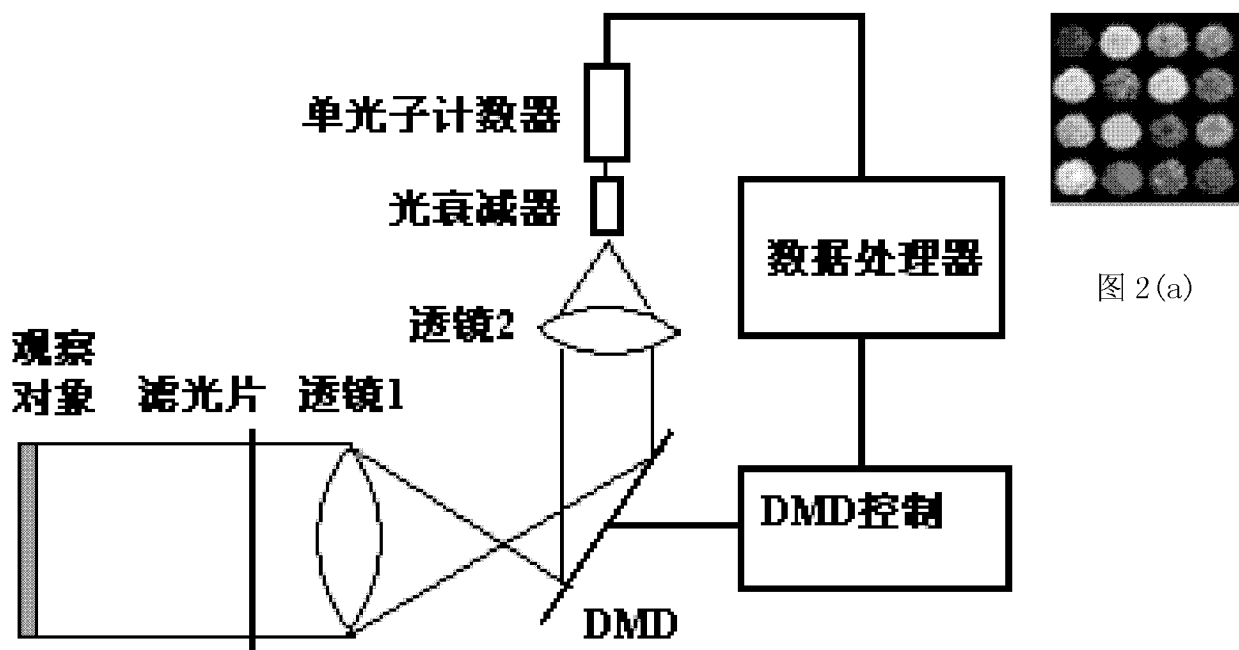


图 2(a)

图 1

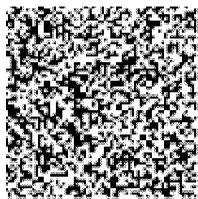


图 2(b)

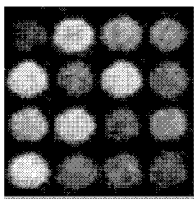


图 2(c)

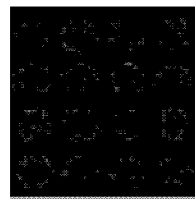


图 2(d)