

GPU协助的液晶波前校正器的过渡灰度级驱动方法

申请号：[201210007938.7](#)

申请日：2012-01-11

申请(专利权)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](#)

发明(设计)人 [宣丽 穆全全 彭增辉 胡立发 曹召良 胡红斌 刘永刚 姚丽双 李大禹 夏明亮 杨程亮 鲁兴海](#)

主分类号 [G02F1/133\(2006.01\)I](#)

分类号 [G02F1/133\(2006.01\)I](#)

公开(公告)号 [102566114A](#)

公开(公告)日 [2012-07-11](#)

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](#)



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102566114 B

(45) 授权公告日 2014. 07. 09

(21) 申请号 201210007938. 7

(22) 申请日 2012. 01. 11

(73) 专利权人 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 彭增辉 胡立发
曹召良 胡红斌 刘永刚 姚丽双
李大禹 夏明亮 杨程亮 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.

G02F 1/133 (2006. 01)

(56) 对比文件

KR 100517468 B, 2005. 09. 29, 全文.

CN 101162302 A, 2008. 04. 16, 全文.

CN 1691121, 2005. 11. 02, 全文.

田民波. 过驱动(overdrive)实现高速响应.《TFTLCD 面板设计与构装技术 台湾版》. 2010, 310-312.

Hajime Nakamura and Kazuo Sekiya. Overdrive Method for Reducing Response Times. <SID Symposium Digest of Technical Papers>. 2001,

审查员 崔丽君

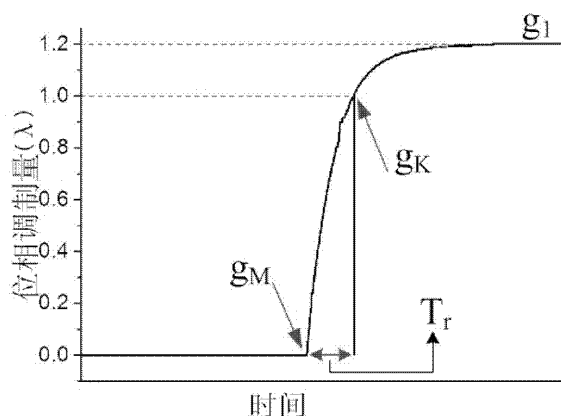
权利要求书2页 说明书20页 附图3页

(54) 发明名称

GPU 协助的液晶波前校正器的过渡灰度级驱动方法

(57) 摘要

本发明属于自适应光学领域, 是 GPU 协助的提高液晶波前校正器响应速度的过渡灰度级驱动方法, 其特征是使液晶波前校正器的位相调制量为 1.2 ~ 1.6 个波长, 针对像素上任意一组初始位相和目标位相, 设置一个比二者差值更大的过渡位相的灰度级, 以利用液晶在位相应的前阶段速度快的特点, 迅速到达目标位相对应的位置, 此刻再对其施加目标位相对应应的灰度级以保持目标位相值。本发明的关键就是采用高速运算的图形处理器 GPU 进行过渡灰度图数据的处理, 使处理时间只有 0.01ms, 是适用于高像素密度液晶波前校正器的过渡灰度级驱动方法。



1. GPU 协助的提高液晶波前校正器响应速度的过渡灰度级驱动方法,其特征是:

将液晶波前校正器 1λ 的位相调制量扩展到 $1.2\lambda \sim 1.6\lambda$, λ 代表中心校正波长;将位相调制量线性划分为 M 个灰度级,即 $1, 2, 3, \dots, K, \dots, M$, 灰度级均为整数;灰度级 1 称为 g_1 , 对应最高位相,其数值在 $1.2\lambda \sim 1.6\lambda$ 之间,灰度级 K 称为 g_K , 对应位相 1λ , 灰度级 M 为最大灰度级称为 g_M , 对应位相 0 , 灰度级 $[K, M]$ 区间对应 1λ 的位相调制量;

确定液晶波前校正器的响应时间 T_r : 在液晶波前校正器的所有像素上施加最大灰度级 g_M , 待其响应完成后变换到最小灰度级 g_1 , 位相调制量从 0 不断增加到 $1.2\lambda \sim 1.6\lambda$ 之间的最高位相, 测得液晶波前校正器的回落响应曲线;从响应曲线上截取前 1λ 位相调制量所对应的灰度级区间、即从 g_M 到 g_K 的回落时间作为液晶波前校正器的响应时间 T_r ;

测量过渡灰度级 T 的方法: 在液晶波前校正器的所有像素上施加初始灰度级 m , 共同的目标灰度级为 k , m 和 k 为灰度级 $[K, M]$ 区间任意两个灰度级;以响应时间 T_r 为限定条件, 选择过渡灰度级 T , 满足 $|T-m| > |k-m|$, 同时在 $g_T(m, k)$ 的过压驱动下, 使液晶波前校正器在 T_r 时间内从 g_m 响应到 g_k 所对应的位相位置, 即刻施加 g_k 使位相稳定在 g_k 所对应的位相位置;继续以响应时间 T_r 为限定条件, 对应灰度级 $[M, K]$ 区间所有初始灰度级、和与这些初始灰度级组合的目标灰度级, 测得 $(M-K+1) \times (M-K+1)$ 个过渡灰度级 $g_T(m, k)$, 使灰度级 $[M, K]$ 区间所有灰度级间的响应时间都一致化地缩短为 T_r , 将这些 $g_T(m, k)$ 值排列起来建立起 $(M-K+1) \times (M-K+1)$ 的过渡灰度级矩阵 G_T :

$$G_T = \begin{bmatrix} g_M & g_T(M, M-1) & \cdots & g_T(M, K) \\ g_T(M-1, M) & g_{M-1} & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & g_{K+1} & g_T(K+1, K) \\ g_T(K, M) & \cdots & g_T(K, K+1) & g_K \end{bmatrix}$$

其中对角线上的矩阵元是灰度级自身, 表明相同灰度级之间没有过渡灰度级, $g_T(M, M-1)$ 代表从初始灰度级 M 变换到目标灰度级 $M-1$ 的过渡灰度级;每一行初始灰度级不变目标灰度级逐一降低, 每一列目标灰度级不变初始灰度级逐一降低;

将测得的过渡灰度级矩阵 G_T 的数据按行顺序一行一行地读入图形处理器 GPU 中, 形成长度为 $(M-K+1)^2$ 的一维向量 $G_T(i)$, i 为 $[1, (M-K+1)^2]$ 区间内的整数, 即 $i=1, 2, 3, \dots, (M-K+1)^2$, i 与任意一对属于 $[M, K]$ 区间内的初始灰度级 m 和目标灰度级 k 的关系为: $i = (M-m)(M-K+1) + (M-k+1)$;利用 i 值, 即可在一维向量 $G_T(i)$ 中查找到过渡灰度级 $g_T(m, k)$;

液晶波前校正器上 $N \times N$ 个像素都有其相应的过渡灰度级, N 是 $[1, 2000]$ 中的任意整数, $N \times N$ 个过渡灰度级的集合构成过渡灰度图 $G_T(j)$, j 为像素的序号, $j=1, 2, 3, \dots, N^2$;

液晶波前校正器的过渡灰度级驱动过程为: 依据已知的初始灰度图 $G_m(j)$ 和目标灰度图 $G_k(j)$, GPU 在存储的过渡灰度级矩阵 G_T 中查找出每个像素上的过渡灰度级, 得出过渡灰度图 $G_T(j)$, 然后将 $G_T(j)$ 传输到计算机内存中;计算机立刻给液晶波前校正器发送过渡灰度图 $G_T(j)$, 信号传输时间为 t_s , 且有 $t_s < T_r$;当过渡灰度图 $G_T(j)$ 的施加时间达到 $T_r - t_s$ 时, 再给液晶波前校正器发送目标灰度图 $G_k(j)$, 经过 t_s 时间 $G_k(j)$ 信号传输完成, 液晶波前校正器上 $N \times N$ 个像素都同时达到各自的目标位相, 然后在目标灰度图 $G_k(j)$ 使波前位相稳定, 完成一次“过渡灰度图 $\rightarrow T_r$ 时间延迟 $\rightarrow$ 目标灰度图”的周期驱动程序。

2. 根据权利要求1所述的GPU协助的提高液晶波前校正器响应速度的过渡灰度级驱动方法,其特征是采用了 GTX480 型号的 GPU。

GPU 协助的液晶波前校正器的过渡灰度级驱动方法

技术领域

[0001] 本发明属于自适应光学技术领域,是一种借助图形处理器 GPU 快速处理过压驱动数据、对液晶波前校正器驱动过程的优化技术,具体地说是 GPU 协助的提高高像素密度液晶波前校正器响应速度的过渡灰度级驱动方法。

背景技术

[0002] 光波前自适应校正系统的功能是对入射光的畸变波前进行实时补偿校正,得到理想的光学成像。

[0003] 基于向列相液晶材料的液晶波前校正器,采用成熟的微电子技术制备工艺,具有高像素密度的特点,不但校正精度高,而且可以利用相息图技术校正波前,只需要 1 个波长的绝对位相调制量,就可以校正深度为 10 个波长的畸变波前。因此使用液晶波前校正器的自适应光学系统在大口径望远镜成像领域具有很大的应用潜力。但是向列相液晶器件的响应速度通常较慢,尤其是位相调制量达到 800nm 的时候响应时间长于 3ms,使液晶波前校正器很难应对快速变化的大气湍流干扰。国际上曾提出利用铁电液晶材料和双频液晶材料来实现高速波前校正。但是,铁电液晶位相调制量小,无法满足校正量的要求;而双频液晶则存在驱动电压高、超过大规模集成电路载荷的问题,使得器件分辨率很难做高。1989 年美国的吴诗聪 (Shin-Tson Wu and Chiung-Sheng Wu, High-speed liquid-crystal modulators using transient nematic effect, J. Appl. Phys. 65(2), 15 January 1989) 提出对向列相液晶空间光调制器进行过压驱动,使向列相液晶的响应时间缩短到亚毫秒甚至更快。但这种方法的工作电压一般在 20V 以上,需要对液晶空间光调制器件的硬件进行特殊加工,至今没有商品出售,甚至找不到加工之处。因此,本发明基于商品化的向列相液晶波前校正器,通过过渡灰度级的驱动过程加快其响应速度。

[0004] 液晶波前校正器的正常驱动方式是:在液晶波前校正器的位相调制量为 1 个波长的电压变化区间,将其划分为 M 个位相等步长变化的电压分度值,并用整数级数灰度级来表示,即 1、2、3、……M, M 为正整数;将第 1 灰度级称为 g_1 , 对应此电压区间的最低电压分度值,以此类推,第 M 灰度级称为 g_M , 对应此电压区间的最高电压分度值;利用这 M 个灰度级准连续地驱动液晶波前校正器。

[0005] 向列相液晶波前校正器有如下响应特性:a) 从低电压(低灰度级)变换到高电压(高灰度级)时,液晶分子在电场作用下立起,光程缩短,相对位相变低,这个过程速度很快,通常小于 1ms;但是反过来灰度级从高到低变换时,液晶分子依靠弹性力从立起状态而回落,回落速度较慢,通常大于 3ms,回落过程光程增长,相对位相升高,通常把液晶分子的回落耗时定义为液晶波前校正器的响应时间;b) 液晶从高灰度级向低灰度级回落过程中开始速度较快,当接近目标灰度级、对应位相调制量约剩 0.2λ (λ 为中心校正波长)时回落速度明显变慢,称为响应拖尾;c) 液晶校正器不同像素的响应时间不一致,回落的灰度级级差越小响应拖尾所占的比例越大,响应时间越长,其中低灰度级区间(对应低电压区)的回落响应时间更长。因此,在进行自适应波前校正时,液晶波前校正器上各个像素的液晶

响应过程并非同步,导致整体波前校正的速度变慢。

发明内容

[0006] 本发明为了克服液晶波前校正器的响应拖尾问题,通过图形处理器 GPU 快速处理施加在高像素密度液晶波前校正器所有像素上的过渡灰度级矩阵,以对液晶波前校正器施加一种过压驱动,使所有像素上灰度级间的响应时间缩短,并达到一致,目的是提供 GPU 协助的提高高像素密度液晶波前校正器响应速度的过渡灰度级驱动方法。

[0007] 本发明的基本思路是:制作液晶波前校正器时,将液晶波前校正器 1λ 的位相调制量扩展到 $1.2\lambda \sim 1.6\lambda$ 。针对像素上 $[0, \lambda]$ 范围的任意一组初始位相和目标位相,设置一个比二者差值更大的过渡位相的灰度级,以利用液晶在位相变化的前阶段响应速度快的特点,迅速到达目标位相对应位置,此时刻再对其施加目标位相所对应的灰度级以稳定保持目标位相值。利用这种方法可以消除响应拖尾,显著提高液晶波前校正器的响应速度。为使所有灰度级间的响应速度都一样快,即液晶波前校正器上所有像素的响应时间相同,需在每个象素上依据其初始位相和目标位相施加不同的过渡位相灰度级。

[0008] 为了更好的理解本发明,下面详述本发明的操作过程。

[0009] 使液晶波前校正器的位相调制量为 $1.2\lambda \sim 1.6\lambda$ 。将位相调制量线性等分为 M 份,对应 M 个灰度级,即 1、2、3、……K、……、M。灰度级均为整数,灰度级 1 称为 g_1 ,对应最高位相,灰度级 K 称为 g_K ,对应位相 1λ ,灰度级 M 为最大灰度级称为 g_M ,对应位相 0。

[0010] 首先在液晶波前校正器的所有像素上施加 g_M ,使液晶分子成立起状态,位相为 0,然后再变换到 g_1 ,在这对灰度级变换中监测液晶波前校正器的回落响应曲线,示意图如图 1,横轴为时间,纵轴为位相调制量即液晶波前校正器被驱动后的位相变化,单位为波长 λ ,位相调制量选为 1.2λ ,回落响应在开始阶段很快,但位相升高到 1λ 以后的响应速度越来越慢,呈现响应拖尾现象;去掉这个响应拖尾,从响应曲线上截取前 1λ 位相调制量作为波前校正用的位相调制区间,所对应的响应时间为 T_r ;此处将 1.2λ 看作 1λ 的过渡位相,初始灰度级为 g_M ,目标灰度级为 g_K , g_1 为过渡位相的灰度级,再做 0 位相到 1λ 位相的快速响应调制:令驱动从 g_M 变换到 g_1 ,在响应过程的 T_r 时刻施加 1λ 目标位相所对应的 g_K ,可使位相稳定平衡在 1λ 处。上述驱动中,初始灰度级 M、过渡位相的灰度级 1 和目标灰度级 K 三者的关系为 $|M-1| > |M-K|$,通过过渡位相的灰度级驱动,回落响应曲线没有响应拖尾,响应时间缩短。以下将任意过渡位相的灰度级用过渡灰度级 T 表示,简称 g_T 。如果在位相调制量为 1.2λ 的回落响应曲线上截取前 1λ ,仍然不能去掉响应拖尾,可将位相调制量适当加大,在 $1.2\lambda \sim 1.6\lambda$ 中寻找一个合适值。

[0011] 将上述过渡灰度级驱动下 1λ 位相变化的回落时间 T_r 作为液晶波前校正器的响应时间。对于位相调制区间 $[M, K]$ 内任意一对初始位相 P_A 和目标位相 P_B ,对应 g_A 到 g_B 的变换,总可以在灰度级 $[M, 1]$ 区间找到一个过渡灰度级 T,使得 $|A-T| > |A-B|$,过渡灰度级驱动效果如图 2(a) 所示,液晶在从 g_A 到 g_T 的响应过程中,在 T_r 时间内到达目标位相 P_B ,此时如果不施加 g_B ,响应曲线将如同图中虚线所示,位相通过 P_B 后缓慢升高到过渡位相 P_T ,而在 T_r 时刻施加 g_B ,位相则稳定平衡在 P_B 处,将响应时间缩短为 T_r ;对比图 2 中 (b) 所示的无过渡灰度级驱动,将位相从 P_A 调制到 P_B 时简单地从 g_A 变换到 g_B ,响应时间为拖尾的 T_{AB} ,远大于 T_r 。

[0012] 以 T_r 为限定条件,对灰度级 $[M, K]$ 区间所有初始灰度级 m 和目标灰度级 k 之间的变换,按照上述寻找过渡灰度级 T 的方法,在液晶波前校正器上施加合适的过渡灰度级即 $g_T(m, k)$ 的过压驱动,其中 $m, k = M, M-1, M-2, \dots, K$,可以测得 $(M-K+1) \times (M-K+1)$ 个 $g_T(m, k)$ 。将这些 $g_T(m, k)$ 值排列起来建立起 $(M-K+1) \times (M-K+1)$ 的过渡灰度级矩阵 G_T :

$$[0013] \quad G_T = \begin{bmatrix} g_M & g_T(M, M-1) & L & g_T(M, K) \\ g_T(M-1, M) & g_{M-1} & O & M \\ M & O & g_{K+1} & g_T(K+1, K) \\ g_T(K, M) & L & g_T(K, K+1) & g_K \end{bmatrix}$$

[0014] 其中对角线上的矩阵元是灰度级自身,表明相同灰度级之间没有过渡灰度级, $g_T(M, M-1)$ 代表从初始灰度级 M 变换到目标灰度级 $M-1$ 的过渡灰度级;每一行初始灰度级不变目标灰度级逐一降低,每一列目标灰度级不变初始灰度级逐一降低。

[0015] 实际上液晶波前校正器在工作时其上每个像素的初始灰度级 m 和目标灰度级 k 都是已知的,都可以在 G_T 中找到相应的过渡灰度级 $g_T(m, k)$,通过过渡灰度级的驱动,可以使液晶波前校正器所有像素的响应时间都一致化地缩短为 T_r 。

[0016] 由于 GPU 在处理矩阵数据时比 CPU 快近 100 倍,实验测得的过渡灰度级矩阵 G_T 存入做波前计算的图形处理器 GPU 中,以缩短数据处理的时间。过渡灰度级矩阵 G_T 的数据按行顺序一行一行地读入 GPU 中,形成长度为 $(M-K+1)^2$ 的一维过渡灰度级向量 $G_T(i)$, i 为 $[1, (M-K+1)^2]$ 区间内的整数,即 $i = 1, 2, 3, \dots, (M-K+1)^2$ 。 i 与任意一对属于 $[M, K]$ 区间的初始灰度级 m 和目标灰度级 k 的关系为:

$$[0017] \quad i = (M-m)(M-K+1) + (M-k+1) \quad (1)$$

[0018] 即对于给定的一对初始和目标灰度级,一定会在 $G_T(i)$ 中找到由 (1) 式决定的唯一的一个过渡灰度级。

[0019] 当液晶校正器做波前校正的时候,灰度级在像素上的分布称为灰度图。灰度图是根据探测到的波前信号在 GPU 中换算出来的,也写成一维向量形式 $G(j)$, j 为液晶校正器像素位置的顺序数,为整数, $j = 1, 2, 3, \dots, N^2$,其中 N 表明液晶校正器的像素数为 $N \times N$ 个, N 是 $[1, 2000]$ 中的任意整数。那么任意初始灰度图即可写为 $G_m(j)$,目标灰度图写为 $G_k(j)$,过渡灰度图应为 $G_T(j)$,任意像素 j 的初始灰度级和目标灰度级分别为 $m(j)$ 和 $k(j)$,其过渡灰度级 $T(j)$ 是一维过渡灰度向量 $G_T(i)$ 上的一个元素:

$$[0020] \quad T(j) = G_T((M-m(j))(M-K+1) + (M-k(j)+1)) \quad (2)$$

[0021] 将 (2) 式中 j 按像素位置从 1 逐次变化到 N^2 ,相应有不同初始灰度级 $m(j)$ 和目标灰度级 $k(j)$,即可得到整幅过渡灰度图 $G_T(j)$ 。

[0022] 利用 (1)-(3) 式,即可在液晶波前校正器的初始灰度图 $G_m(j)$ 、目标灰度图 $G_k(j)$ 被确定时,在 GPU 中通过 $G_T(i)$ 求得过渡灰度图 $G_T(j)$ 。

[0023] 过渡灰度图驱动过程为:依据已知的初始灰度图 $G_m(j)$ 和目标灰度图 $G_k(j)$,GPU 在存储的过渡灰度级矩阵 G_T 中查找出每个像素上的过渡灰度级,得出过渡灰度图 $G_T(j)$,然后将 $G_T(j)$ 传输到计算机内存中;计算机立刻给液晶波前校正器发送过渡灰度图 $G_T(j)$,信号传输时间为 t_s ,且有 $t_s < T_r$;当过渡灰度图 $G_T(j)$ 的施加时间达到 $T_r - t_s$ 时,再给液晶波前校正器发送目标灰度图 $G_k(j)$,经过 t_s 时间 $G_k(j)$ 信号传输完成,液晶波前校正器上 $N \times N$ 个像素都在过渡灰度图 $G_T(j)$ 下响应了 T_r 时间,同时达到各自的目标位相,此刻再被施加目标

灰度图 $G_k(j)$ 使波前位相稳定,完成一次波前校正过程;随即可施加下一幅过渡灰度图;形成“过渡灰度图 $\rightarrow T_r$ 时间延迟 $\rightarrow$ 目标灰度图”的周期驱动程序。

[0024] 综上所述,要实现对于液晶波前校正器过渡灰度级驱动的快速响应,关键是要测量其响应时间 T_r 所对应的过渡灰度级矩阵 G_T 。

[0025] 设计如图3所示的过渡灰度级矩阵 G_T 的测量系统,其中1为激光器,2为准直透镜,3为偏振片,4为液晶波前校正器,5为聚焦透镜,6为示波器,7为计算机。激光器1位于准直透镜2的焦点上,发出球面波,激光波长与液晶波前校正器4的中心校正波长相同;激光通过准直透镜2后变为直径略小于液晶波前校正器4口径的平行光,且偏振方向与偏振片3的偏振方向平行,即能全部透过偏振片3进入液晶波前校正器4;偏振片3的平面与液晶波前校正器4的平面平行、且前者的偏振方向与后者的液晶取向成 45° 角,使进入液晶波前校正器4的光束等分为 o 光和 e 光。从液晶波前校正器4出射时 e 光相对 o 光产生光延迟,光延迟的大小取决于液晶波前校正器4上的灰度级。不同光延迟的光从液晶波前校正器4出射再通过偏振片3时光强衰减不同。经过聚焦透镜5后,由带有光强探测器的示波器6检测光强随时间的变化。示波器6的光强探测器位于聚焦透镜5的焦点上,以保证经液晶波前校正器4作用的光束全部进入示波器6的光强探测器,示波器6的时间分辨率为 0.1ms。相对液晶波前校正器4的入射与出射光束间夹角应与实际使用的自适应系统中的情况相同,为 $2^\circ \sim 3^\circ$;示波器6和液晶波前校正器4均与计算机7相连,计算机7中存有驱动二者的控制程序以及将光强响应曲线转化为位相响应曲线的计算程序,同时带有1个高速运算 GPU。

[0026] 测量过程为:

[0027] 1) 测量液晶波前校正器4的响应时间 T_r 。为监测方便,令计算机7向液晶波前校正器4的所有像素上发送对应0位相的 g_m ,待其响应完成后再向其发送对应最高位相的 g_1 ,示波器6上显示出光强的阶跃响应曲线,同时用计算机7采集示波器6的数据,得出如图4中虚线所示的光强随时间变化曲线;利用光强与光延迟的关系 $I = \sin^2(\varphi/2)$,其中 φ 为 e 光相对 o 光产生的光延迟,又因为光延迟与位相调制量在数值上一一对应,故可将该光强变化曲线转换为位相调制量变化曲线如图4中的实线所示,即为回落响应曲线;在回落响应曲线上截取位相变化 1λ 所对应的时间作为液晶波前校正器4的响应时间 T_r 。

[0028] 2) 以响应时间 T_r 为限定条件,测量灰度级 $[M, K]$ 区间所有灰度级 (m, k) 间变换的过渡灰度级 T ,即 $g_T(m, k)$ 。同样为监测方便,令计算机7向液晶波前校正器4的所有像素上发送相同的灰度级。记录下在 T_r 时间从 g_m 到达 g_k 所对应的所有 $g_T(m, k)$ 值;将这些 $g_T(m, k)$ 值排列为过渡灰度级矩阵 G_T ,再将过渡灰度级矩阵 G_T 的数据按行顺序一行一行地读入 GPU 中,形成长度为 $(M-K+1)^2$ 的一维过渡灰度级向量 $G_T(i)$ 。。

[0029] 本发明基于商品化的向列相液晶波前校正器,通过 GPU 快速计算每个像素上的过渡灰度级,能够对高像素密度的液晶波前校正器施加过渡灰度级驱动,不仅能加快液晶的回落响应速度,而且解决了不同灰度级间响应时间不一致的问题。

附图说明

[0030] 图1为液晶波前校正器的驱动电压从最高灰度级 g_m 变换到最低灰度级 g_1 的回落响应曲线示意图。其中横轴为时间,纵轴为位相调制量、即校正器被驱动后的位相变化,单

位为波长 λ , g_k 为位相变化 1λ 时所对应的灰度级, 时间区间 T_r 为去掉响应拖尾的液晶波前校正器的响应时间。

[0031] 图 2 为液晶波前校正器从任意初始位相 P_A 提高到目标位相 P_B 的驱动方法及回落响应曲线。其中 (a) 表明过渡灰度级驱动方法, 如其上图所示, 纵轴代表灰度级, 横轴为时间, 初始灰度级 g_A 变换到过渡灰度级 g_T , 并保持 T_r 时间, 即刻施加目标灰度级 g_B ; 对应下图, 是同样时间轴上位相发生的变化, 纵轴为位相, 对应初始灰度级 g_A 位相为 P_A , 变换到过渡灰度级 g_T 后位相经 T_r 时间正好提高到 P_B , 在随即施加的灰度级 g_B 作用下, 位相稳定在目标位相 P_B , 过渡灰度级驱动方法使 P_A 到 P_B 的响应时间为较短的 T_r ; (b) 为传统的直接驱动方法, 其上图简单地从初始灰度级 g_A 变换到目标灰度级 g_B , 对应下图, 位相从 P_A 到 P_B 的响应出现拖尾, 响应时间为较长的 T_{AB} 。

[0032] 图 3 为液晶波前校正器的过渡灰度级矩阵 G_T 的测量光路。其中 1 为激光器, 波长与液晶波前校正器的中心校正波长相同; 2 为准直透镜; 3 为偏振片, 偏振方向与液晶波前校正器的液晶取向成 45° 角; 4 为液晶波前校正器; 5 为聚焦透镜; 6 为探测光强变化的示波器; 7 为计算机。入射与出射光束间夹角为 $2^\circ \sim 3^\circ$; 6 和 4 均与计算机 7 相连, 计算机 7 中存有驱动液晶波前校正器 4 和示波器 6 的控制程序、以及将光强响应曲线转化为位相响应曲线的计算程序。

[0033] 图 4 为液晶波前校正器 4 在图 3 所示的光路中测得的响应时间 T_r 的测量曲线。其中横轴为时间, 左侧纵轴为归一化光强, 对应虚线曲线, 为液晶波前校正器 4 从初始 0 位相响应到 1.2λ (λ 为中心校正波长) 位相时示波器 6 给出的光强变化曲线; 实线为光强曲线换算后的位相变化曲线, 对应右侧纵轴, 在实线曲线上截取位相从 0 上升到 1λ 所需的时间即为液晶波前校正器 4 的响应时间 T_r 。

[0034] 图 5 为具体实施方式中所用液晶波前校正器 4 的位相调制量与灰度级的对应曲线。其中横轴为灰度级, 纵轴为位相调制量。

[0035] 图 6 为具体实施方式中液晶波前校正器 4 的初始灰度级和目标灰度级分别为 50 和 31 时测量其过渡灰度级的过程。其中横轴为时间, 纵轴为归一化光强, 曲线 I 为过渡灰度级不够低时的光强响应变化曲线, 曲线 II 为过渡灰度级过低时的光强变化曲线, 曲线 I 和曲线 II 中的响应时间为 T_{rr} , 曲线 III 为所施加过渡灰度级正合适时的光强变化曲线, 此时响应时间 $T_r = 1.55\text{ms}$, 远小于 T_{rr} 。

具体实施方式

[0036] 为了更清楚理解本发明, 下面结合实施方式对这种过渡灰度级驱动方法进行详细说明。

[0037] 1) 激光器 1 为半导体激光器, 波长 $\lambda = 785\text{nm}$ 。

[0038] 2) 准直准直透镜 2 和聚焦透镜 5 均为双胶合透镜, 焦距均为 100mm , 口径为 25mm 。

[0039] 3) 偏振片 3 为高分子偏振片, 口径 25mm , 消光比 $500 : 1$ 。

[0040] 4) 液晶波前校正器 4 为美国 BNS 公司制作的向列相液晶纯位相波前校正器, 256×256 像素, 因此确定灰度图中的 $j = 1, 2, 3, \dots, 256^2$; 采用通常的驱动方法液晶波前校正器 4 的响应时间为 3ms , 口径为 6.14mm , 中心校正波长 $\lambda = 785\text{nm}$, 具有 1.2λ 的位相调制量。由 BNS 公司提供的灰度级和位相调制量的对应关系如图 5 所示, 在 1.2λ 的位

相调制区间等位相步长对应着 50 个灰度级,其中灰度级 50 对应最高电压、0 位相调制量,灰度级 0 对应最低电压、 1.2λ 位相调制量,灰度级 11 对应 1λ 的位相调制量,因此确定过渡灰度级矩阵 G_T 中的 $M = 50, K = 11$ 。

[0041] 5) 示波器 6 为 Tektronix 公司生产的 MS03032 型,配有 New Focus 生产的可见光光子接收器。

[0042] 6) 计算机 7 为工控机,计算机 7 中存有驱动液晶波前校正器 4 和示波器 6 的控制程序,并带有 GTX480 型号的 GPU。

[0043] 7) 按照图 3 搭建测量过渡灰度级矩阵 G_T 的光路:位于准直透镜 2 焦点上的激光器 1 发出球面波,通过准直透镜 2 后变为直径略小于液晶波前校正器 4 口径的平行光,使该平行光全部进入液晶波前校正器 4,且偏振方向与偏振片 3 的偏振方向平行,即能全部透过偏振片 3 进入液晶波前校正器 4;偏振片 3 的平面与液晶波前校正器 4 的平面平行、且前者的偏振方向与后者的液晶取向成 45° 角;光从液晶波前校正器 4 出射再通过偏振片 3 时光强衰减;经过聚焦透镜 5 后,由带有光强探测器的示波器 6 检测光强随时间的变化;示波器 6 位于聚焦透镜 5 的焦点上,以保证经液晶波前校正器 4 作用的光束全部被检测到,示波器 6 的时间分辨率为 0.1ms;相对液晶波前校正器 4 的入射与出射光束间夹角与实际使用的自适应系统中的情况相同,为 2° ;示波器 6 和液晶波前校正器 4 均与计算机 7 相连。

[0044] 8) 测量液晶波前校正器 4 的响应时间 T_r :向液晶波前校正器 4 的所有像素施加最高灰度级 50,然后变换到最低灰度级 0,在示波器 6 上获得光强响应曲线;利用光强与光延迟的关系 $I = \sin^2(\varphi/2)$,其中 φ 为光延迟、对应位相调制量,将获得的光强响应曲线换算为位相响应曲线,得出了位相变化 1λ 的响应时间为 1.55ms,据此获得过渡灰度级驱动下液晶波前校正器的响应时间 $T_r = 1.55\text{ms}$ 。

[0045] 9) 测量液晶波前校正器 4 的过渡灰度级矩阵 G_T :向液晶波前校正器 4 的所有像素施加初始灰度级 $m = 50$,设定任意目标灰度级 $k = 31$,给对应的过渡灰度级 $g_T(50, 31)$ 赋一个低于 31 的初始值 29,然后向液晶波前校正器 4 的所有像素施加过渡灰度级初始值 29,并维持 1.55ms,即刻将目标灰度级 31 施加到所有像素上;利用示波器 6 记录整个过程中的液晶响应曲线,如图 6 中曲线 I 所示,从中测量出液晶波前校正器 4 的实际响应用时 T_{rr} 超过 1.55ms,说明过渡灰度级不够低;进一步降低过渡灰度级至 27,再次进行上述测量,得到的液晶波前校正器 4 响应曲线如图 6 中曲线 II 所示,曲线 II 出现先向下后向上的过度响应,实际响应用时也为 T_{rr} 超过 1.55ms,说明过渡灰度级已经过低;进一步调整过渡灰度级至 28,获得的液晶波前校正器 4 响应曲线如图 6 中曲线 III 所示,这次响应时间正好为 1.55ms,与 T_r 相等。由此得到过渡灰度级 $g_T(50, 31) = 28$ 。令目标灰度级 k 在 $[50, 11]$ 灰度级区间逐一降低,按上述方法依次测量初始灰度级 50 与这 40 个目标灰度级的过渡灰度级,这 40 个过渡灰度级构成过渡灰度级矩阵 G_T 的第一行矩阵元;下一步将初始灰度级 m 降低为 49 级,目标灰度级 k 还在 $[50, 11]$ 灰度级区间逐一降低,分别测量初始灰度级 49 与这 40 个目标灰度级间的过渡灰度级,构成过渡灰度级矩阵 G_T 的第二行矩阵元;以此类推,将初始灰度级逐一降低至 11 级,就得到 40 个系列过渡灰度级;将每个系列过渡灰度级排成矩阵的一行,目标灰度级从左到右逐一降低,再令初始灰度级从上到下逐一降低,就得到过渡灰度级矩阵 G_T 。

[0046] 10) 将过渡灰度级矩阵 G_T 的数据按行顺序一行一行地读入 GPU 中,形成长度为

$(50-11+1)^2 = 1600$ 的一维过渡灰度向量 $G_T(i)$, i 为 $[1, 1600]$ 区间内的整数, 即 $i = 1, 2, 3, \dots, 1600$ 。获得的 $G_T(i)$ 向量如表一所示。对于任意一对属于 $[50, 11]$ 区间内的初始灰度级 m 和目标灰度级 k , 利用公式 (1) 可得 $i = 40 \times (50-m) + (51-k)$, 即可在 $G_T(i)$ 中找到其对应的过渡灰度级。

[0047] 11) 利用图 3 所示的光路按如下程序对液晶波前校正器 4 实施过渡灰度级驱动下的响应时间测量: 编写初始灰度图 $G_m(j) = 40$ 和目标灰度图 $G_k(j) = 30$, 存入计算机 7 中; 计算机 7 给液晶波前校正器 4 发送初始灰度图 $G_m(j) = 40$, 等待 2s; 计算机 7 指令 GPU 按照 (1) 式计算出 $i = 421$, 并通过 $G_T(i)$ 得出过渡灰度级 $g_T(40, 30) = 29$, 令过渡灰度图 $G_T(j) = 29$; GPU 将 $G_T(j)$ 数据回传给计算机 7; 计算机 7 给液晶波前校正器 4 发送过渡灰度图 $G_T(j) = 29$, 等待 $T_r - t_s = 1.55\text{ms} - 0.38\text{ms}$, 计算机 7 再给液晶波前校正器 4 发送目标灰度图 $G_k(j) = 30$, 经过 $t_s = 0.38\text{ms}$ 信号传输完成, 液晶波前校正器 4 上的所有像素都在过渡灰度图 $G_T(j)$ 下响应了 1.55ms 时间, 同时达到各自的目标位相, 此刻正好施加目标灰度图 $G_k(j) = 30$ 使目标波前稳定。

[0048] 查看示波器 6 记录的液晶波前校正器 4 的响应曲线, 看出响应时间只有 1.55ms, 过渡灰度图 $G_T(j)$ 的数据处理时间通过计时程序看出为 0.01ms, 而采用通常驱动方法的响应时间要长达 2.5ms, 说明本发明可减少液晶波前校正器 4 的响应延迟时间 0.94ms, 实用可行。

[0049]

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$G_T(i)$	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41
i	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$G_T(i)$	40	39	38	37	36	35	31	31	28	28
i	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$G_T(i)$	28	24	24	19	19	16	15	15	14	10
i	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
$G_T(i)$	10	7	6	6	4	2	1	1	0	0
i	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
$G_T(i)$	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41
i	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
$G_T(i)$	40	39	38	37	36	35	31	31	29	28
i	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70

$G_T(i)$	28	25	24	21	21	17	16	16	14	10
i	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
$G_T(i)$	10	8	6	6	4	2	2	2	0	0
i	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
$G_T(i)$	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41
i	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
$G_T(i)$	40	39	38	37	36	35	31	31	29	28
i	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110
$G_T(i)$	28	25	24	21	21	18	16	16	15	12
i	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120
$G_T(i)$	12	8	7	6	4	2	2	2	0	0
i	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130
$G_T(i)$	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41
i	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140
$G_T(i)$	40	39	38	37	36	35	31	31	29	28
i	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150
$G_T(i)$	28	25	24	21	21	18	18	18	15	12
i	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160
$G_T(i)$	12	8	7	7	4	3	2	2	1	1
i	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170
$G_T(i)$	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41
i	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180
$G_T(i)$	40	39	38	37	36	35	32	32	29	28
i	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190

$G_T(i)$	28	25	24	21	21	18	18	18	15	12
i	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200
$G_T(i)$	12	8	7	7	4	3	2	2	1	1
i	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210
$G_T(i)$	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41
i	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220
$G_T(i)$	40	39	38	37	36	35	32	32	29	28
i	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230
$G_T(i)$	28	26	24	22	22	19	18	18	15	12
i	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240
$G_T(i)$	12	9	7	7	5	4	2	2	1	1
i	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250
$G_T(i)$	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41
i	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260
$G_T(i)$	40	39	38	37	36	35	32	32	31	28
i	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270
$G_T(i)$	28	26	24	22	22	20	18	18	15	13
i	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280
$G_T(i)$	13	9	7	8	6	4	2	2	1	1
i	281	282	283	284	285	286	287	288	289	290
$G_T(i)$	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41
i	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300
$G_T(i)$	40	39	38	37	36	35	32	32	31	28
i	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310

G _T (i)	28	26	24	22	22	20	19	19	15	13
i	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320
G _T (i)	13	10	7	8	6	4	3	3	2	2
i	321	322	323	324	325	326	327	328	329	330
G _T (i)	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41
i	331	332	333	334	335	336	337	338	339	340
G _T (i)	40	39	38	37	36	35	32	32	31	29
i	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350
G _T (i)	29	26	25	22	22	20	19	19	16	13
i	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360
G _T (i)	13	10	8	8	6	4	3	3	2	2
i	361	362	363	364	365	366	367	368	369	370
G _T (i)	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41
i	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380
G _T (i)	40	39	38	37	36	35	33	32	31	29
i	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390
G _T (i)	29	28	25	22	22	20	19	19	16	13
i	391	392	393	394	395	396	397	398	399	400
G _T (i)	13	11	9	9	7	5	3	3	2	2
i	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410
G _T (i)	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41
i	411	412	413	414	415	416	417	418	419	420
G _T (i)	40	39	38	37	36	35	33	32	31	29
i	421	422	423	424	425	426	427	428	429	430

G _T (i)	29	28	25	24	24	20	19	19	16	15
i	431	432	433	434	435	436	437	438	439	440
G _T (i)	15	11	9	9	7	5	3	3	2	2
i	441	442	443	444	445	446	447	448	449	450
G _T (i)	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41
i	451	452	453	454	455	456	457	458	459	460
G _T (i)	40	39	38	37	36	35	33	32	31	29
i	461	462	463	464	465	466	467	468	469	470
G _T (i)	29	28	25	24	24	20	19	19	16	15
i	471	472	473	474	475	476	477	478	479	480
G _T (i)	15	11	10	9	7	6	3	3	2	2
i	481	482	483	484	485	486	487	488	489	490
G _T (i)	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41
i	491	492	493	494	495	496	497	498	499	500
G _T (i)	40	39	38	37	36	35	33	32	31	29
i	501	502	503	504	505	506	507	508	509	510
G _T (i)	29	28	27	24	24	22	19	19	16	15
i	511	512	513	514	515	516	517	518	519	520
G _T (i)	15	14	10	9	8	6	3	3	3	3
i	521	522	523	524	525	526	527	528	529	530
G _T (i)	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41
i	531	532	533	534	535	536	537	538	539	540
G _T (i)	40	39	38	37	36	35	33	32	31	29
i	541	542	543	544	545	546	547	548	549	550

G _T (i)	29	28	27	24	24	22	19	19	18	15
i	551	552	553	554	555	556	557	558	559	560
G _T (i)	15	14	10	10	8	6	3	3	3	3
i	561	562	563	564	565	566	567	568	569	570
G _T (i)	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41
i	571	572	573	574	575	576	577	578	579	580
G _T (i)	40	39	38	37	36	35	34	33	31	29
i	581	582	583	584	585	586	587	588	589	590
G _T (i)	29	28	27	24	24	22	19	19	18	15
i	591	592	593	594	595	596	597	598	599	600
G _T (i)	15	14	10	10	8	7	3	3	3	3
i	601	602	603	604	605	606	607	608	609	610
G _T (i)	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41
i	611	612	613	614	615	616	617	618	619	620
G _T (i)	40	39	38	37	36	35	34	33	32	29
i	621	622	623	624	625	626	627	628	629	630
G _T (i)	29	28	27	25	25	22	21	21	18	15
i	631	632	633	634	635	636	637	638	639	640
G _T (i)	15	14	10	10	8	7	4	4	3	3
i	641	642	643	644	645	646	647	648	649	650
G _T (i)	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41
i	651	652	653	654	655	656	657	658	659	660
G _T (i)	40	39	38	37	36	35	34	33	32	29
i	661	662	663	664	665	666	667	668	669	670

G _T (i)	29	28	27	25	25	22	21	21	18	15
i	671	672	673	674	675	676	677	678	679	680
G _T (i)	15	14	10	10	8	7	4	4	3	3
i	681	682	683	684	685	686	687	688	689	690
G _T (i)	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41
i	691	692	693	694	695	696	697	698	699	700
G _T (i)	40	39	39	37	36	35	34	33	32	30
i	701	702	703	704	705	706	707	708	709	710
G _T (i)	30	29	27	25	25	22	21	21	19	15
i	711	712	713	714	715	716	717	718	719	720
G _T (i)	15	14	12	12	9	7	4	4	4	4
i	721	722	723	724	725	726	727	728	729	730
G _T (i)	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41
i	731	732	733	734	735	736	737	738	739	740
G _T (i)	40	39	39	37	36	35	34	33	32	30
i	741	742	743	744	745	746	747	748	749	750
G _T (i)	30	29	27	25	25	23	21	21	19	17
i	751	752	753	754	755	756	757	758	759	760
G _T (i)	17	15	12	12	9	7	4	4	4	4
i	761	762	763	764	765	766	767	768	769	770
G _T (i)	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41
i	771	772	773	774	775	776	777	778	779	780
G _T (i)	40	39	39	37	36	35	34	33	32	30
i	781	782	783	784	785	786	787	788	789	790

G _T (i)	30	29	28	25	25	23	21	21	19	17
i	791	792	793	794	795	796	797	798	799	800
G _T (i)	17	15	14	14	10	8	4	4	4	4
i	801	802	803	804	805	806	807	808	809	810
G _T (i)	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41
i	811	812	813	814	815	816	817	818	819	820
G _T (i)	40	39	39	37	36	35	34	33	32	30
i	821	822	823	824	825	826	827	828	829	830
G _T (i)	30	29	28	25	25	23	21	21	19	17
i	831	832	833	834	835	836	837	838	839	840
G _T (i)	17	15	14	14	10	8	4	4	4	4
i	841	842	843	844	845	846	847	848	849	850
G _T (i)	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41
i	851	852	853	854	855	856	857	858	859	860
G _T (i)	40	39	39	37	36	35	34	34	32	30
i	861	862	863	864	865	866	867	868	869	870
G _T (i)	30	29	28	25	25	23	22	22	19	17
i	871	872	873	874	875	876	877	878	879	880
G _T (i)	17	16	14	14	10	8	5	5	5	5
i	881	882	883	884	885	886	887	888	889	890
G _T (i)	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41
i	891	892	893	894	895	896	897	898	899	900
G _T (i)	40	39	39	37	37	35	34	34	32	30
i	901	902	903	904	905	906	907	908	909	910

G _T (i)	30	29	28	26	26	23	22	22	20	17
i	911	912	913	914	915	916	917	918	919	920
G _T (i)	17	16	14	14	10	8	5	5	5	5
i	921	922	923	924	925	926	927	928	929	930
G _T (i)	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41
i	931	932	933	934	935	936	937	938	939	940
G _T (i)	40	39	39	37	37	35	34	34	32	30
i	941	942	943	944	945	946	947	948	949	950
G _T (i)	30	29	28	26	26	25	22	22	20	17
i	951	952	953	954	955	956	957	958	959	960
G _T (i)	17	16	15	14	12	9	5	5	5	5
i	961	962	963	964	965	966	967	968	969	970
G _T (i)	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41
i	971	972	973	974	975	976	977	978	979	980
G _T (i)	40	39	39	38	37	36	34	34	32	30
i	981	982	983	984	985	986	987	988	989	990
G _T (i)	30	29	28	26	26	25	22	22	20	17
i	991	992	993	994	995	996	997	998	999	1000
G _T (i)	17	16	15	14	12	9	5	5	5	5
i	1001	1002	1003	1004	1005	1006	1007	1008	1009	1010
G _T (i)	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41
i	1011	1012	1013	1014	1015	1016	1017	1018	1019	1020
G _T (i)	40	39	39	38	37	36	34	34	33	32
i	1021	1022	1023	1024	1025	1026	1027	1028	1029	1030

G _T (i)	32	29	28	26	26	25	24	24	21	19
i	1031	1032	1033	1034	1035	1036	1037	1038	1039	1040
G _T (i)	19	16	15	15	12	9	8	8	5	5
i	1041	1042	1043	1044	1045	1046	1047	1048	1049	1050
G _T (i)	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41
i	1051	1052	1053	1054	1055	1056	1057	1058	1059	1060
G _T (i)	40	39	39	38	37	36	34	34	33	32
i	1061	1062	1063	1064	1065	1066	1067	1068	1069	1070
G _T (i)	32	30	28	26	26	25	24	24	22	19
i	1071	1072	1073	1074	1075	1076	1077	1078	1079	1080
G _T (i)	19	17	15	15	13	9	8	8	6	6
i	1081	1082	1083	1084	1085	1086	1087	1088	1089	1090
G _T (i)	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41
i	1091	1092	1093	1094	1095	1096	1097	1098	1099	1100
G _T (i)	40	39	39	38	37	36	34	34	33	32
i	1101	1102	1103	1104	1105	1106	1107	1108	1109	1110
G _T (i)	32	30	29	28	28	25	24	24	22	19
i	1111	1112	1113	1114	1115	1116	1117	1118	1119	1120
G _T (i)	19	17	15	15	13	9	8	8	6	6
i	1121	1122	1123	1124	1125	1126	1127	1128	1129	1130
G _T (i)	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41
i	1131	1132	1133	1134	1135	1136	1137	1138	1139	1140
G _T (i)	40	39	39	38	37	36	34	34	33	32
i	1141	1142	1143	1144	1145	1146	1147	1148	1149	1150

G _T (i)	32	30	29	28	28	25	24	24	22	19
i	1151	1152	1153	1154	1155	1156	1157	1158	1159	1160
G _T (i)	19	17	15	15	13	9	8	8	7	7
i	1161	1162	1163	1164	1165	1166	1167	1168	1169	1170
G _T (i)	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41
i	1171	1172	1173	1174	1175	1176	1177	1178	1179	1180
G _T (i)	40	39	39	38	37	37	35	35	33	32
i	1181	1182	1183	1184	1185	1186	1187	1188	1189	1190
G _T (i)	32	30	29	28	28	26	25	25	22	20
i	1191	1192	1193	1194	1195	1196	1197	1198	1199	1200
G _T (i)	20	19	16	16	14	10	8	8	7	7
i	1201	1202	1203	1204	1205	1206	1207	1208	1209	1210
G _T (i)	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41
i	1211	1212	1213	1214	1215	1216	1217	1218	1219	1220
G _T (i)	40	39	39	38	37	37	35	35	33	32
i	1221	1222	1223	1224	1225	1226	1227	1228	1229	1230
G _T (i)	32	30	29	28	28	26	25	25	22	20
i	1231	1232	1233	1234	1235	1236	1237	1238	1239	1240
G _T (i)	20	19	16	16	14	10	8	8	7	7
i	1241	1242	1243	1244	1245	1246	1247	1248	1249	1250
G _T (i)	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41
i	1251	1252	1253	1254	1255	1256	1257	1258	1259	1260
G _T (i)	40	39	39	38	37	37	35	35	34	33
i	1261	1262	1263	1264	1265	1266	1267	1268	1269	1270

GT(i)	33	30	29	28	28	26	25	25	24	20
i	1271	1272	1273	1274	1275	1276	1277	1278	1279	1280
G _T (i)	20	19	17	16	14	12	10	10	8	8
i	1281	1282	1283	1284	1285	1286	1287	1288	1289	1290
G _T (i)	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41
i	1291	1292	1293	1294	1295	1296	1297	1298	1299	1300
G _T (i)	40	39	39	38	37	37	35	35	34	33
i	1301	1302	1303	1304	1305	1306	1307	1308	1309	1310
G _T (i)	33	30	29	29	29	26	25	25	24	22
i	1311	1312	1313	1314	1315	1316	1317	1318	1319	1320
G _T (i)	22	19	17	17	15	12	10	10	8	8
i	1321	1322	1323	1324	1325	1326	1327	1328	1329	1330
G _T (i)	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41
i	1331	1332	1333	1334	1335	1336	1337	1338	1339	1340
G _T (i)	40	40	39	38	37	37	35	35	34	33
i	1341	1342	1343	1344	1345	1346	1347	1348	1349	1350
G _T (i)	33	30	29	29	29	26	25	25	24	22
i	1351	1352	1353	1354	1355	1356	1357	1358	1359	1360
G _T (i)	22	19	17	17	15	14	10	10	8	8
i	1361	1362	1363	1364	1365	1366	1367	1368	1369	1370
G _T (i)	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41
i	1371	1372	1373	1374	1375	1376	1377	1378	1379	1380
G _T (i)	40	40	39	38	37	37	36	36	34	33
i	1381	1382	1383	1384	1385	1386	1387	1388	1389	1390

G _T (i)	33	32	31	29	29	28	26	26	24	22
i	1391	1392	1393	1394	1395	1396	1397	1398	1399	1400
G _T (i)	22	21	17	17	16	14	10	10	9	9
i	1401	1402	1403	1404	1405	1406	1407	1408	1409	1410
G _T (i)	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41
i	1411	1412	1413	1414	1415	1416	1417	1418	1419	1420
G _T (i)	40	40	39	38	37	37	36	36	34	33
i	1421	1422	1423	1424	1425	1426	1427	1428	1429	1430
G _T (i)	33	32	31	30	30	28	26	26	25	23
i	1431	1432	1433	1434	1435	1436	1437	1438	1439	1440
G _T (i)	23	21	19	19	16	16	12	12	9	9
i	1441	1442	1443	1444	1445	1446	1447	1448	1449	1450
G _T (i)	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41
i	1451	1452	1453	1454	1455	1456	1457	1458	1459	1460
G _T (i)	40	40	39	38	37	37	36	36	34	34
i	1461	1462	1463	1464	1465	1466	1467	1468	1469	1470
G _T (i)	34	33	32	30	30	29	28	28	25	23
i	1471	1472	1473	1474	1475	1476	1477	1478	1479	1480
G _T (i)	23	22	19	19	18	16	14	14	10	10
i	1481	1482	1483	1484	1485	1486	1487	1488	1489	1490
G _T (i)	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41
i	1491	1492	1493	1494	1495	1496	1497	1498	1499	1500
G _T (i)	40	40	39	38	38	37	36	36	34	34
i	1501	1502	1503	1504	1505	1506	1507	1508	1509	1510

$G_T(i)$	34	33	32	30	30	29	28	28	25	23
i	1511	1512	1513	1514	1515	1516	1517	1518	1519	1520
$G_T(i)$	23	22	19	19	18	16	13	13	10	10
i	1521	1522	1523	1524	1525	1526	1527	1528	1529	1530
$G_T(i)$	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41
i	1531	1532	1533	1534	1535	1536	1537	1538	1539	1540
$G_T(i)$	40	40	39	39	38	37	36	36	34	34
i	1541	1542	1543	1544	1545	1546	1547	1548	1549	1550
$G_T(i)$	34	33	32	30	30	29	28	28	26	25
i	1551	1552	1553	1554	1555	1556	1557	1558	1559	1560
$G_T(i)$	25	23	20	20	19	18	13	13	11	11
i	1561	1562	1563	1564	1565	1566	1567	1568	1569	1570
$G_T(i)$	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41
i	1571	1572	1573	1574	1575	1576	1577	1578	1579	1580
$G_T(i)$	41	40	39	39	38	37	36	36	34	34
i	1581	1582	1583	1584	1585	1586	1587	1588	1589	1590
$G_T(i)$	34	33	32	30	30	29	28	28	26	25
i	1591	1592	1593	1594	1595	1596	1597	1598	1599	1600
$G_T(i)$	25	23	20	20	19	18	13	13	11	11

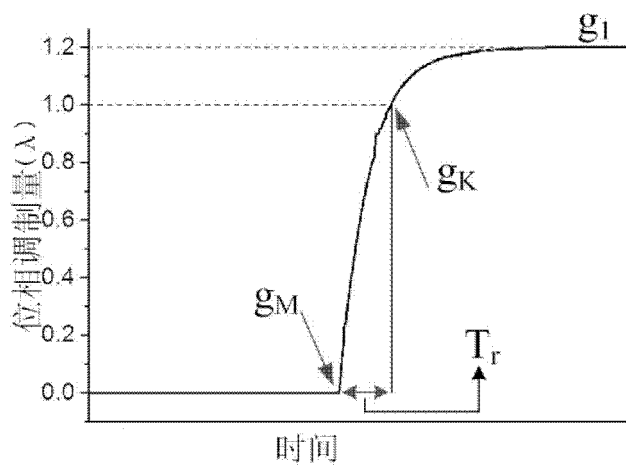


图 1

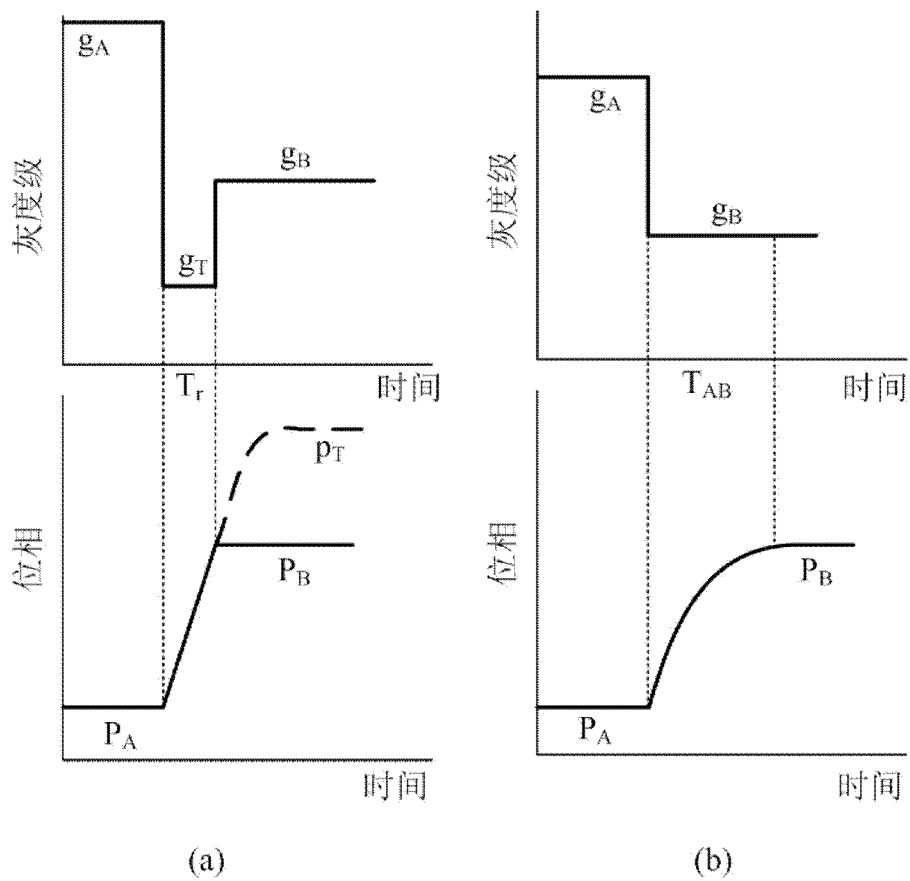


图 2

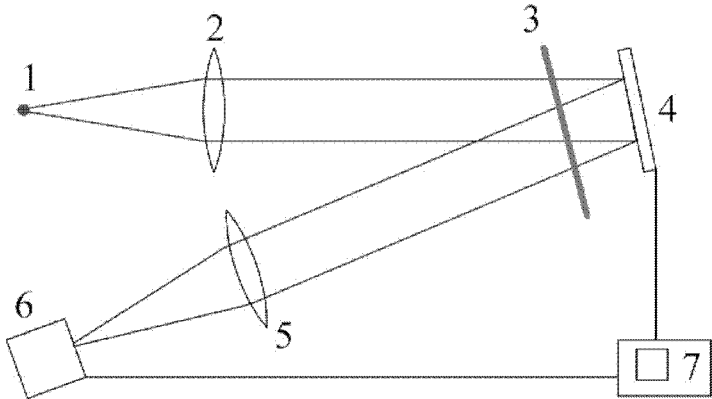


图 3

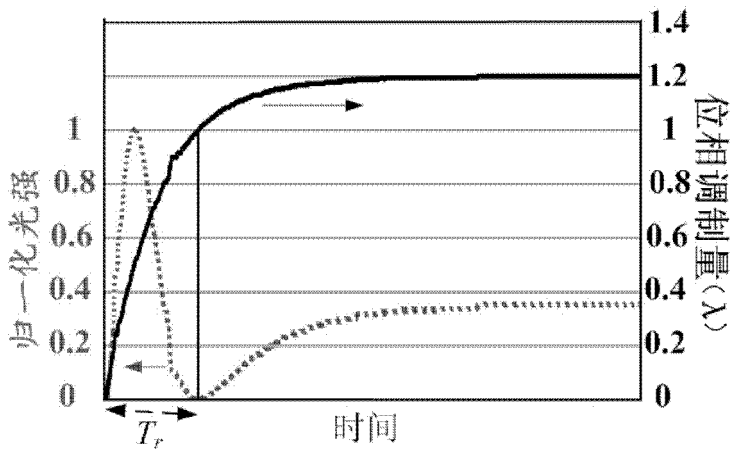


图 4

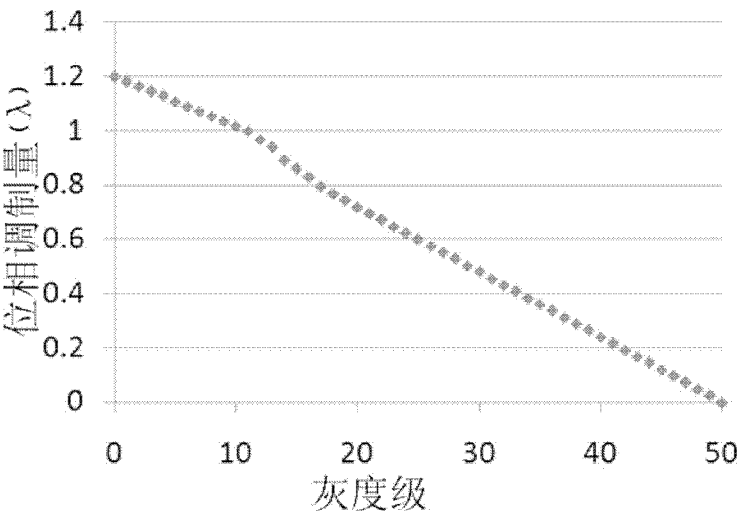


图 5

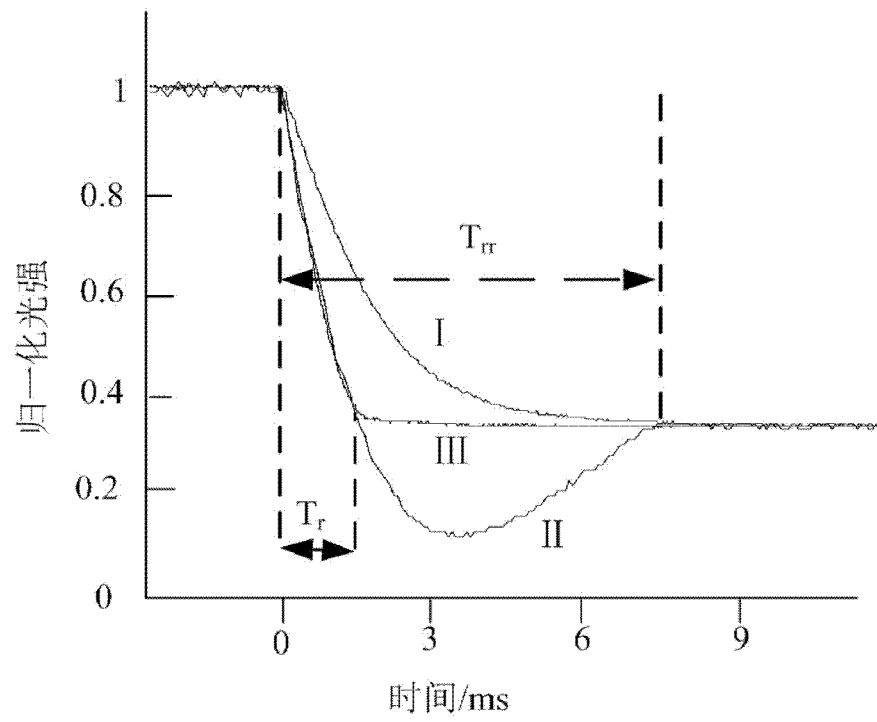


图 6