



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102483486 B

(45) 授权公告日 2015. 05. 27

(21) 申请号 201080037032. 9

(22) 申请日 2010. 08. 17

(30) 优先权数据

61/234, 530 2009. 08. 17 US

61/235, 506 2009. 08. 20 US

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2012. 02. 16

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/US2010/045790 2010. 08. 17

(87) PCT国际申请的公布数据

W02011/022422 EN 2011. 02. 24

(73) 专利权人 泛达公司

地址 美国伊利诺斯州

(72) 发明人 R·J·皮姆皮娜拉 G·E·图杜瑞

(74) 专利代理机构 上海专利商标事务所有限公司 31100

代理人 钱慰民

(51) Int. Cl.

G02B 6/028(2006. 01)

(56) 对比文件

CN 1630830 A, 2005. 06. 22,

Rick Pimpinella, et al., Important

Considerations For Assuring 10Gb/s Ethernet Channel Link Performance. 《LANline Magazine, Germany》. 2007,

Panduit Corp. et al., DIFFERENTIAL MODE DELAY (DMD) FOR MULTIMODE FIBER TYPES AND ITS RELATIONSHIP TO MEASURED PERFORMANCE. 《OFC/NFOEC Conference》. 2005,

审查员 杨婷

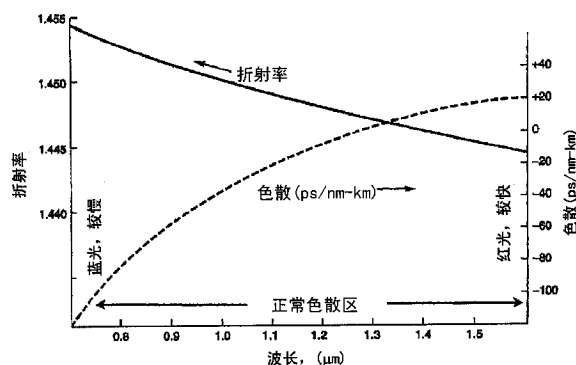
权利要求书1页 说明书6页 附图7页

(54) 发明名称

自补偿多模光纤

(57) 摘要

设计一种改善的多模光纤光缆以补偿用于高速通信系统中的激光源的波长分布和发射模式。改善的多模光纤光缆补偿波长依赖 VCSEL 极发射模式以减少模色散。披露用于减少改善的多模光纤光缆中的模色散的技术, 允许改善的误码率 (BER) 系统性能和 / 或获得在高带宽光学信道链路中的较大抵达距离。在改善的多模光纤光缆的设计和制造中已作出显著的努力以使模色散最小化, 忽略激光器中波长依赖的极发射模式的效应。材料色散效应对模色散具有显著的影响, 并通过修正标准抛物线折射率分布以补偿材料色散效应, 总模色散可减小。



1. 一种制造改善后的多模光纤光缆的方法,所述多模光纤光缆既补偿材料色散效应又补偿模色散效应,所述方法包括:

将激光器与基准多模光纤光缆耦合;

通过激光器产生多个光辐射脉冲并将其投射到所述基准多模光纤光缆中,其中每个光辐射脉冲以不同的径向偏移投射;

对每个径向偏移下的每个光脉冲,确定 DMD 波形轮廓以及脉冲延迟;

确定脉冲延迟差是否随着径向偏移增加而形成左或右 DMD 时间波形移位;以及

设计具有改善后的折射率分布的改善后的多模光纤光缆,所述改善后的折射率分布补偿每个 DMD 波形轮廓中出现的任何脉冲延迟差并补偿基准多模光纤光缆中出现的材料色散的至少一部分;以及

根据所述设计,制造所述多模光纤光缆,

其中,如果基准多模光纤光缆随着径向偏移增加表现为左 DMD 时间波形移位,则所述改善后的折射率分布在基准多模光纤光缆纤芯外区内具有低于标准抛物线的折射率;或者

如果基准多模光纤光缆随着径向偏移增加表现为右 DMD 时间波形移位,则所述改善后的折射率分布在基准多模光纤光缆纤芯外区内具有高于标准抛物线的折射率。

2. 如权利要求 1 所述的方法,其特征在于,还包括使用单模光纤以将多个光辐射脉冲中的每一个投射到所述基准多模光纤光缆中。

3. 一种设计改善后的多模光纤光缆的方法,所述多模光纤光缆既补偿材料色散效应又补偿模色散效应,所述方法包括:

产生多个光辐射脉冲并将其投射到基准多模光纤光缆中,其中每个光辐射脉冲以不同的径向偏移投射;

对每个径向偏移下的每个光脉冲,确定 DMD 波形轮廓以及脉冲延迟;

确定脉冲延迟差是否随着径向偏移增加而形成左或右 DMD 时间波形移位;以及

为改善后的多模光纤光缆设计改善后的折射率分布,所述改善后的折射率分布通过校正每个 DMD 波形轮廓中出现的任何脉冲延迟差来补偿基准多模光纤光缆中出现的材料色散的至少一部分;

其中,如果基准多模光纤光缆随着径向偏移增加表现为左 DMD 时间波形移位,则改善后的折射率分布在基准多模光纤光缆纤芯外区内具有低于标准抛物线的折射率;或者

如果基准多模光纤光缆随着径向偏移增加表现为右 DMD 时间波形移位,则改善后的折射率分布在基准多模光纤光缆纤芯外区内具有高于标准抛物线的折射率。

4. 如权利要求 3 所述的方法,其特征在于,还包括使用单模光纤以将多个光辐射脉冲中的每一个投射到所述基准多模光纤光缆中。

5. 如权利要求 3 所述的方法,其特征在于,还包括将激光器与基准多模光纤光缆耦合。

自补偿多模光纤

[0001] 相关申请的交叉引用

[0002] 本申请要求 2009 年 8 月 17 日提交的美国临时申请 No. 61/234, 530 以及 2009 年 8 月 20 日提交的美国临时专利申请 NO. 61/235, 506 的优先权, 该申请的主题通过引用整体包含在本文中。

[0003] 本申请整体包含在 2009 年 6 月 15 日提交的题为“DESIGN METHOD AND METRIC FOR SELECTING AND DESIGNING MULTIMODE FIBER FOR IMPROVED PERFORMANCE (用于选择和设计性能改善的多模光纤的设计方法和尺度)”的美国临时专利申请 No. 61/187, 137 以及 2008 年 12 月 1 日提交的题为“MULTIMODE FIBER HAVING IMPROVED INDEX PROFILE (具有改善的折射率分布的多模光纤)”的美国临时专利申请 No. 61/118, 903 中。

[0004] 背景

[0005] 传播通过光纤的光脉冲的降级是衰减和色散的结果。色散是在离散数据位传播通过介质时的展宽。脉冲展宽导致连续数据位之间的重叠, 这造成一个数据位被解读成逻辑 0 或 1 的不确定性增加。这种逻辑状态不确定性是依照误码率 (BER) 来量化的, 其中 BER 被定义为误码数除以在给定时间段内传输的总位数。对于高速以太网, 对于传输的每 1 万亿位, BER 不能超过 1 个误码位 ($BER < 10^{-12}$)。对于多模光纤中的总色散, 存在两种贡献: 色彩色散或材料色散, 以及模色散。

[0006] 由于材料的折射率随着光波长而改变, 因此会发生色彩色散或材料色散。这是由于特征共振频率造成的, 材料在此频率下对光 (光是传播的电磁场) 作出响应。较短的波长遭遇较高的折射率 (即较大的光密度) 并因此比较长波长行进得更缓慢。由于光脉冲通常包括几种波长, 因此光信号的光谱分量在传播时在时间上扩展或色散, 这使脉宽变宽。

[0007] 光纤近乎纯二氧化硅 (SiO_2), 因此光纤的色彩色散或材料色散基本与纯熔融二氧化硅相同。在图 1 中, 绘出熔融二氧化硅的材料色散和折射率以波长为函数的曲线图。由于材料的折射率是取决于波长 $n(\lambda)$ 的, 因此材料中的光速度也是取决于波长的, 其关系为:

$$[0008] \quad v(\lambda) = \frac{c}{n(\lambda)} \quad (1)$$

[0009] 其中, c 是真空下的光速 (299, 792, 458 米 / 秒)。

[0010] 参照等式 1, 短波长 (也称“蓝”光) 的折射率大于较长波长 (也称“红”光) 的折射率, 由此较长波长 (“红”) 的光比较短波长 (“蓝”) 行进得更快。

[0011] 对于通过具有这种特征的介质的光来说, 这种效应被称为“正常”色散。如果较短波长的折射率低于较长波长, 则这种色散被称为反常的, 因为蓝光将比红光行进得更快。

[0012] 除了材料色散外, 穿过例如多模光纤光缆 (MMF) 的光波导的光信号也经历模色散, 这通常在 MMF 中具有大得多的效果。由于光的波属性和光纤的波导特性, 光信号沿被称为模的离散光学路径穿过光纤。脉冲的光功率由离散模的总和承载。参见图 2A 和 2B, MMF 被优化以使所有模同一时间到达光纤的输出。这是通过调整或“分级”纤芯的折射率分布来实现的。以较大角度行进的模 (并因此穿过较长的距离) 必须行进得更快。这些被称为高阶模。以小角度行进的模 (低阶模) 在渐变折射率光纤中行进得更慢。光纤中的最快

和最慢模之间的传播延迟差被用来确定模间色散或简单地称为模散射。

[0013] 为了最小化模散射,设计标准渐变折射率多模光纤 (GIMMF),由此跨纤芯的折射率遵循抛物线分布(在本文被称为标准抛物线折射率分布)。表述最小模色散的折射率径向分布的公式如下给出:

$$[0014] \quad n(r) = n_1 \left[1 - 2 \left(\frac{r}{R} \right)^\alpha \Delta \right]^{1/2} \quad (2)$$

[0015] 其中 α 是接近 2 的数(对于每个光纤制造商来说是特定的), R 是光芯的半径而 Δ 如下给出:

$$[0016] \quad \Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \quad (3)$$

[0017] 用来表征 MMF 中的模色散的度量是差模延迟 (DMD),这在电信产业协会文件 No. TIA-455-220-A 中有规定并以皮秒每米 (ps/m) 为单位表示以使总延迟由光纤长度归一化。以 DMD 测得的低模色散一般导致较高带宽的 MMF。制造过程中的更好控制产生更接近标准抛物线折射率分布的分布,这使模色散最小化。需要对标准抛物线折射率分布作出改变以补偿光源的波长分布和发射模式 (pattern),从而减少超出当前能力的模色散。此外,需要使这些改变包括到当前 MMF 测试方法中以精确地表征 DMD 和光纤带宽。

发明内容

[0018] 在一个方面,提供一种制造经改善的多模光纤光缆的方法,这种多模光纤光缆既补偿材料色散效应又补偿模色散效应。该方法包括,但不限于,将激光器与基准多模光纤光缆耦合,并通过激光器产生多个光辐射脉冲并将其投射到基准多模光纤光缆中。每个光辐射脉冲以不同的径向偏移投射。该方法还包括,但不限于,对每个径向偏移下的每个光脉冲确定 DMD 波形轮廓以及脉冲延迟,并对每个 DMD 波形轮廓确定是否存在脉冲延迟差。该方法还包括,但不限于,设计具有改善折射率分布的改善多模光纤光缆,改善折射率分布补偿每个 DMD 波形轮廓中出现的任何脉冲延迟差并补偿基准多模光纤光缆中出现的材料色散的至少一部分。

[0019] 在一个方面,提供一种设计经改善的多模光纤光缆的方法,这种多模光纤光缆既补偿材料色散效应又补偿模色散效应。该方法包括,但不限于,确定因使用激光器投射到多模光纤光缆中的光辐射脉冲引起的基准多模光纤光缆中的材料色散和模色散量,并设计用于经改善的多模光纤光缆的经改善的折射率分布,这种折射率分布补偿基准多模光纤光缆中出现的材料色散的至少一部分。

[0020] 在一个方面,提供一种设计经改善的多模光纤光缆的方法,这种多模光纤光缆既补偿材料色散效应又补偿模色散效应。该方法包括,但不限于,产生多个光辐射脉冲并将其投射到基准多模光纤光缆中。每个光辐射脉冲以不同的径向偏移投射。该方法还包括,但不限于,对每个径向偏移下的每个光脉冲确定 DMD 波形轮廓以及脉冲延迟,并设计用于经改善的多模光纤光缆的经改善的折射率分布,这种折射率分布通过校正 DMD 波形轮廓中出现的任何脉冲延迟差来补偿基准多模光纤光缆中出现的材料色散的至少一部分。

[0021] 本发明的范围仅由所附权利要求书限定并不受此发明内容中陈述的影响。

[0022] 附图简述

[0023] 本发明可通过参照以下附图和描述得到更好的理解。附图中的组件不一定是按比例,相反着重示出了本发明的原理。

[0024] 图 1 示出根据本发明一个实施例的纯二氧化硅的材料色散和折射率因变于波长的曲线图。

[0025] 图 2A 示出根据本发明一个实施例的具有不同模轨道的渐变折射率 MMF 的第一横截面透视图。

[0026] 图 2B 示出根据本发明一个实施例的具有等于穿过光纤的多个模的速度的标准抛物线折射率分布的渐变折射率 MMF 的第二横截面透视图。假设在先前模型中所有模具有相同的波长。

[0027] 图 3 示出根据本发明一个实施例的测量在 GI-MMF 中所有模的到达时间差的 DMD 波形的曲线图。从由光纤长度归一化的时间差,将光纤分级和分类以使其遵循 OM3 或 OM4 型光纤。不同的颜色仅用于说明。所有模具有相同的波长。

[0028] 图 4A 和 4B 示出根据本发明一个实施例的具有类似 DMD 和 EMB 值的两根光纤的 DMD 波形轮廓的曲线图。两根光纤均来自同一光纤光缆。两者均具有 4540MHz·km 的 EMB。

[0029] 图 5A 和 5B 示出根据本发明一个实施例的蓝光和褐光光纤的眼图。蓝光光纤的眼图示出于图 5A 并表现为更宽的眼睛张开度,这指示更大的信噪比并因此发送具有较少错误的信息(更好的 BER 特性)。

[0030] 图 6 示出根据本发明一个实施例的因变于接收功率的蓝光和褐光光纤的 BER 轨迹的曲线图。注意到,对于 -9.9dBm 的接收光功率(10GBASE-SR 的最小光功率),BER 性能的差异大于两个量级。

[0031] 图 7 示出根据本发明一个实施例的曲线图,其示出最小化模色散要求所有模同时到达光纤输出端(针对两个低阶模示出)。在之前的实现中,模已被假设为具有相同的波长。

[0032] 图 8 示出根据本发明一个实施例的 BERT 垂直腔表面发射激光器(VCSEL)相关于距设备中心的偏移的波长依赖的曲线图。

[0033] 图 9 示出根据本发明一个实施例的曲线图,表明当将模的波长变化考虑在内时材料色散效应 $D(\lambda)$ 即使对于标准抛物线折射率分布也会使脉冲分量扩展。“蓝光”模将在比“红光”模在更晚的时间到达光纤的输出。

[0034] 图 10 示出根据本发明一个实施例的曲线图,表明在纤芯外区中具有低于标准抛物线的折射率(标准折射率用虚线表示)的光纤会加速较高阶模(“蓝光”)同时不影响较低阶模(“红光”),从而消除材料色散效应。

[0035] 图 11 示出根据本发明一个实施例的曲线图,表明在纤芯外区中具有高于标准折射率的光纤会减缓较高阶模(“蓝光”)同时不影响较低阶模(“红光”),从而加重材料色散效应。

[0036] 详细描述

[0037] 本发明利用以下发现:可设计具有一折射率分布的多模光纤光缆,以当与在不同发射模式下发射具有不同光波长的模的光源一起使用时补偿材料色散和模色散两者。所提出的多模光纤光缆在耦合到光纤模时补偿激光投射模的空间光谱分布,以减少总体模色散。所披露的多模光纤光缆通过平衡 VCSEL 模的波长依赖和多模光纤光缆的折射率分布以

减少模色散,而表现出经改善的误码率(BER)系统性能。所披露的多模光纤光缆也增加了能够以可接受的误码率传输信号的最大抵达距离。多模光纤光缆的折射率分布表现出差模延迟(DMD)波形轮廓,该波形轮廓在较大的径向偏移处移位至左侧(以ps/m为单位,如沿DMD的标准曲线图所示),从而补偿光源中的发射光波长的空间分布。

[0038] 在本公开中,我们将这些效应与玻璃光纤关联。然而,本发明同样适用于塑料光纤(POF)和其它波导结构。

[0039] 这里提供一种制造多模光纤的方法,该多模光纤既补偿材料色散效应又补偿模色散效应。该方法首先包括:确定因使用激光器投射到多模光纤中的光辐射脉冲导致的基准多模光纤中的材料色散和模色散量。该方法包括对改善的多模光纤的设计改善的折射率分布,该折射率分布补偿基准多模光纤光缆中出现的材料色散的至少一部分。

[0040] 参见图3,确定基准多模光纤内材料色散和模色散的量需要首先实现修正的DMD测量测试方法,其中产生时间短和光谱纯的光辐射光脉冲并通过激光器发射并投射到待测基准MMF的纤芯中。光辐射的光脉冲首先沿光纤的中心轴投射,并使用光检测器和采样示波器来测量输出脉冲波形。输出脉冲波形被存储以供后继分析。随后将投射的光辐射光脉冲从基准MMF的中央纤芯位移一小径向距离,通常为1或2微米,并再次测量和记录输出波形。横跨MMF的纤芯从中央至距中央径向距离X并靠近纤芯包层界面的重复该过程。例如,对于50微米的纤芯直径,X大约为23微米(± 5 微米)。为了确保只有给定径向投射偏移的模被激励,较佳地使用小直径单模光纤来将光辐射的光脉冲投射到MMF的纤芯中。

[0041] 参见图4A和4B,示出对于两种MMF(蓝光MMF和褐光MMF)的结果输出波形示例。沿垂直轴示出每一径向偏移的波形,并沿水平轴示出每一波形的脉冲延迟。理想地,对于标准抛物线折射率分布,所有脉冲应当在同一时间到达光纤的输出。然而,折射率分布均匀性的缺陷导致输出波形的时间移位。MMF的DMD或模色散是通过从最快脉冲的前沿和最慢脉冲的下降沿之间的到达时间之差减去投射脉冲时间宽度来计算。

[0042] 使用TIA-455-220-A中规定的标准DMD测量方法,MMF光纤可归类为优化的激光器(即OM3),它(理论上)能支持高达300米的10Gb/s以太网通信。光纤必须满足6种DMD掩模模板中的一种,这些掩模模板规定了在纤芯半径区域内的最大模色散(即DMD)。如果光纤满足更严格的DMD需求(由TIA规定),则光纤被表征为OM4,它能支持更大的抵达距离。由DMD测得的低模色散能转变成较高的MMF性能。

[0043] 表征MMF带宽容量的另一有用度量是以兆赫千米(MHz·km)为单位的有效模带宽(EMB)。EMB是从DMD测量中获得的脉冲波形推导出的计算度量。对这组测得的输出波形被求和以对结果的输出信号波形建模。使用至频域的数学变换,输出和输入波形被数值分割以计算光纤的带宽。施加加权函数以模拟十个典型垂直腔表面发射激光器(VCSEL)的径向光功率分布,确定最小的计算EMB(min EMB)。使用min EMB度量,通过1.13的乘法因子计算光纤的EMB(即 $EMB = 1.13 \times \min EMB_c$)。为了被表征为OM3和OM4,如高速以太网标准中所规定的,这些光纤的EMB值必须至少分别为2000MHz·km和4700MHz·km。

[0044] 由于标准DMD和EMB利用基于使用单色源作时间延迟测量的技术(如TIA-455-220-A中所规定的),它们无法在图4A和图4B中所示的两个光纤之间作出区分。包含在同一光缆中的蓝光和褐光光纤的DMD和EMB度量实质上是一致的(见表1)。但是通过分析如图5A和5B所示的眼图以及如图6所示的误码率测试(BERT)性能作为参考,它们

在测量信道性能上表现出很大的差别。

[0045] 表 1:

[0046]

光纤	内掩模 DMD (5-18 微米)	外掩模 DMD (0-23 微米)	EMB (EMB = 1.13xEMBc)
蓝光	0.122 皮秒/米	0.145 皮秒/米	4540 MHz*km
褐光	0.124 皮秒/米	0.132 皮秒/米	4540*km

[0047] BER 系统性能和 DMD 波形移位之间的关系已被发现。根本原因涉及在大径向偏移下的左、右 DMD 时域波形移位以及 VCSEL 的波长发射模式。这种差异可在图 4A 和图 4B 中观察到。VCSEL 发射与多个横模耦合的单个纵模,这导致在发射区域上波长略有不同的光分布。每个 VCSEL 模具有定义的极发射模式。该物理效应在这里被称为具有半径依赖波长的极模式。通过确定每个 DMD 波形轮廓的脉冲延迟或具有半径依赖波长的极模式中是否存在差异,可对材料色散效应和模色散效应两者作出补偿以进一步减小来自之前方法的模色散。

[0048] 下面描述这种发射模式对光纤模传播的影响。现在设计标准抛物线折射率分布(基于 α 值,如等式 2 所表示)以最小化行进通过光纤的所有模的扩展,其中假设所有模具有基本相同的波长(颜色)。参见图 7,激光源发射模式和波长分布效应已被完全忽略。

[0049] 然而,用于高速光收发器的 VCSEL 跨设备孔径发射具有不同波长的光(模)。较长的波长被发射到较小的角度中,而短波长被发射到与表面垂直的较大角度(极发射模式)。参见图 8,当耦合到光纤模中时,该 VCSEL 空间光谱分布被保留。当今使用的标准抛物线 DMD 波形轮廓仅对跨 VCSEL 孔径的相同光波长有效,此时所有耦合的光纤模被认为是具有相同的中心波长。投射到 MMF 的光波长的空间分布需要新的优选 DMD 波形轮廓,因为具有其半径依赖波长的模受材料色散效应的影响。与模色散耦合的半径依赖发射模式的效应在图 9 示出。较低阶模具有较长的波长(“红光”)并因此比具有较短波长(“蓝光”)的高阶模行进得更快。

[0050] 基于来自实验的数据,在 DMD 轮廓(ps/m 为单位的较小值)中的径向脉冲波形中表现出“左”移位的光纤对应于 MMF 纤芯的外区中的低于标准抛物线的折射率。这在图 4A 中蓝光光纤的 DMD 波形轮廓中的大径向偏移处可以观察到。较低阶模将不受该折射率移位的影响,因为它们不通过外区。尽管高阶模由于波长依赖折射率而减慢,如图 9 所示,但是由于它们在低于所谓标准抛物线折射率分布的区域内行进,它们实际赶上“红”光(见图 10)。

[0051] 对于在大径向偏移波形中具有“右”移位的光纤来说,折射率高于纤芯外区中的标准抛物线折射率。这可以从高径向偏移下的褐光光纤的 DMD 波形中看出,如图 4B 所示。低阶模将不受该折射率移位的影响,因为它们不行进通过该区域。因波长依赖折射率而减慢的高阶模,如图 9 所示,经过高于标准抛物线折射率分布的区域,并因此进一步减慢“蓝”光(见图 11)。

[0052] 我们已经确定 VCSEL 的光谱分布和极发射模式无法被忽略且因此,当前理想 DMD

波形轮廓对于最小模色散来说不是最佳的。基于这种发现,通过将 VCSEL 模的不同波长考虑在内,可减少模色散,这导致经模波长补偿的多模光纤光缆。

[0053] 最小模色散可将模波长补偿 MMF 转换成主要受其衰减限制的光纤(加上与 VCSEL 关联的其它损失,例如模分配噪声、模噪声等)。使用 IEEE 10GBASE-SR 链路模型,预计这种改进能潜在地使最大信道链路抵达距离从 125 米增加至 200 米以上。通过将 VCSEL 投射的光的空间和频域分布考虑在内,可针对改善的 MMF 设计改善的折射率分布,该折射率分布补偿模的波长依赖的至少一部分,这允许模色散相比先前的补偿方法进一步减小。

[0054] 尽管已展示和描述了本文描述的主题的特定方面,然而本领域技术人员应当理解,基于本文的教导,可以作出多种改变和修正而不脱离本文所述主题及其更宽范围,因此,所附权利要求旨在将落在本文描述的主题的真实精神和范围内的所有这些改变和修正涵盖在其范围内。此外要理解,本发明由所附权利要求书定义。因此,本发明不受限制,除非鉴于所附权利要求书及其等效物。

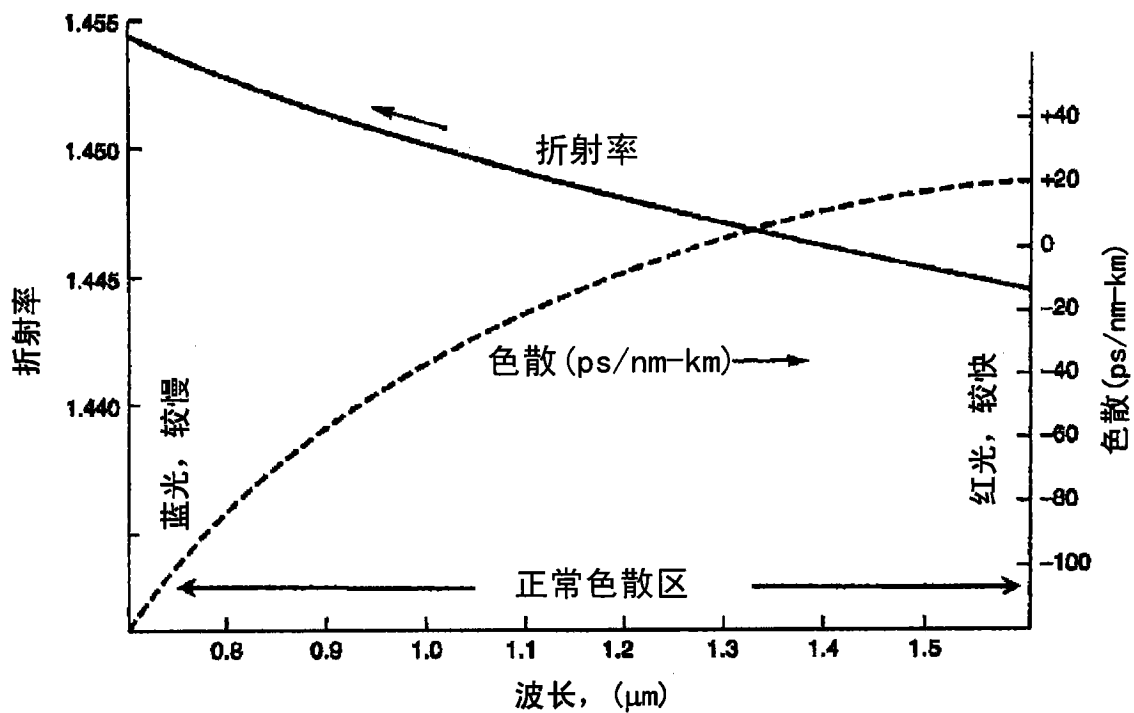


图 1

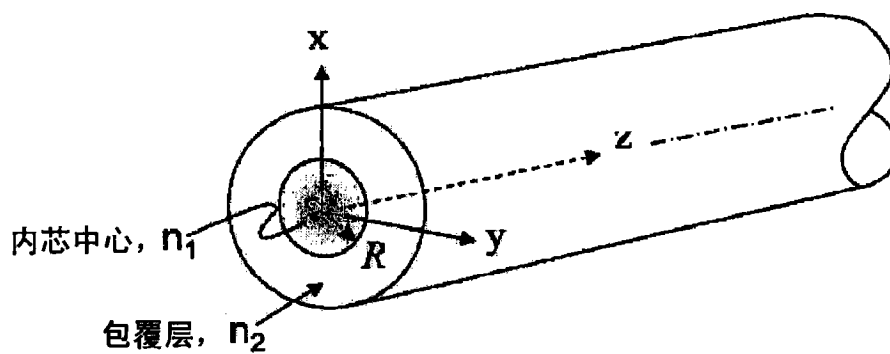


图 2A

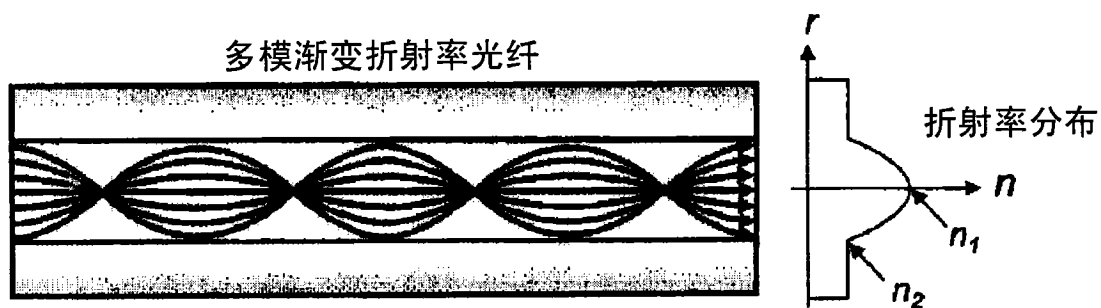


图 2B

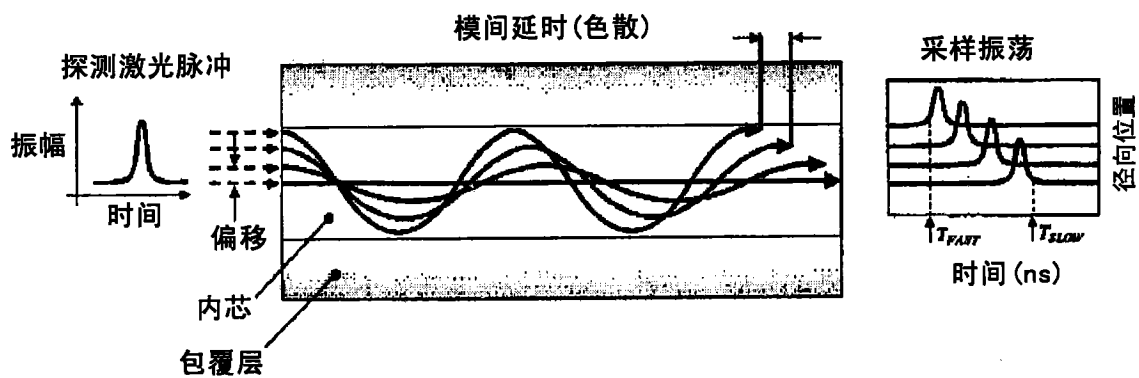


图 3

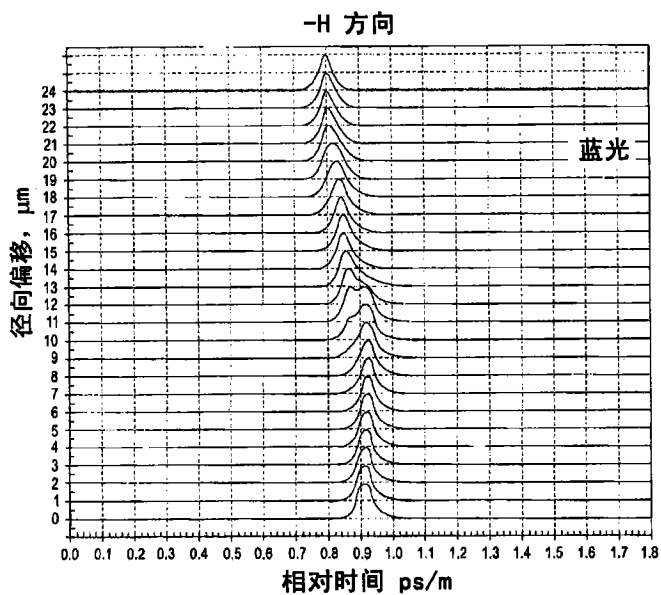


图 4A

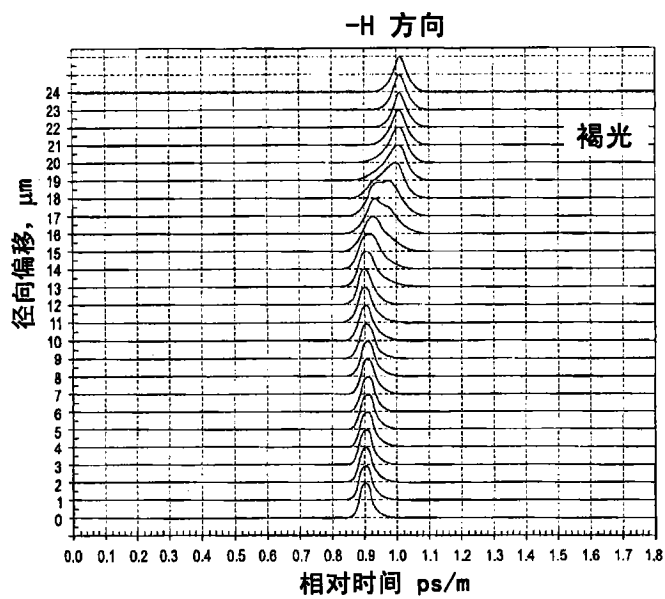


图 4B

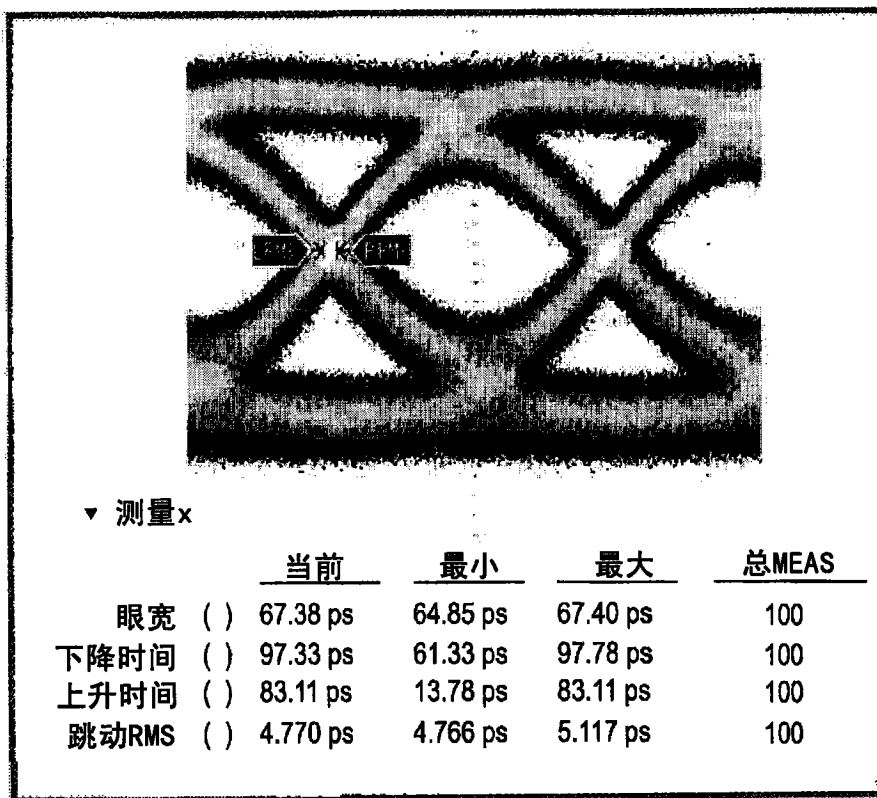


图 5A

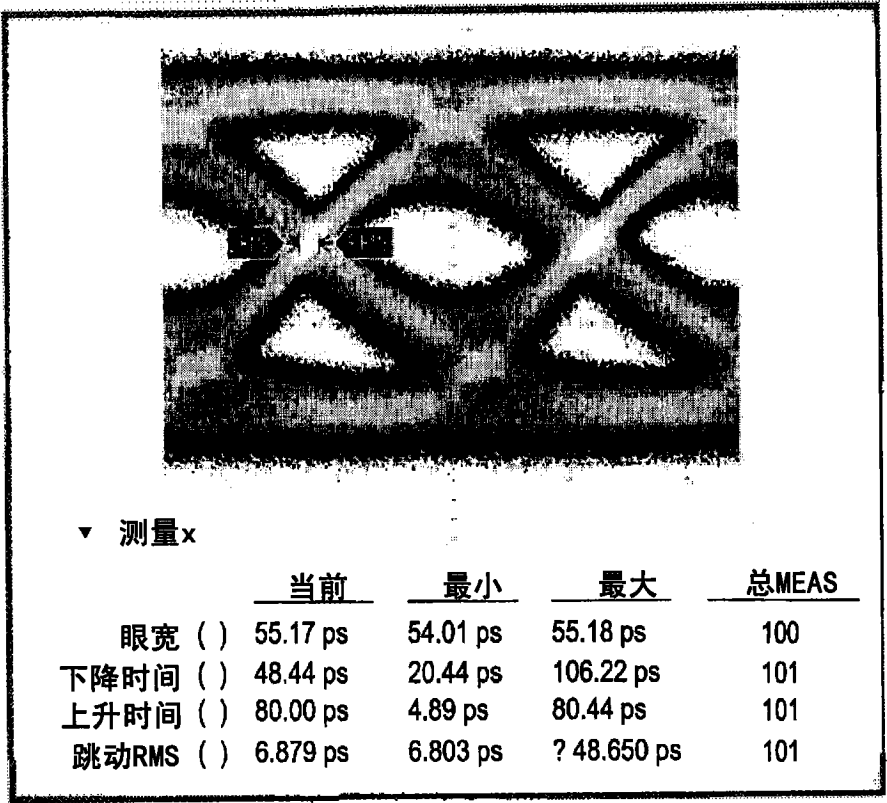


图 5B

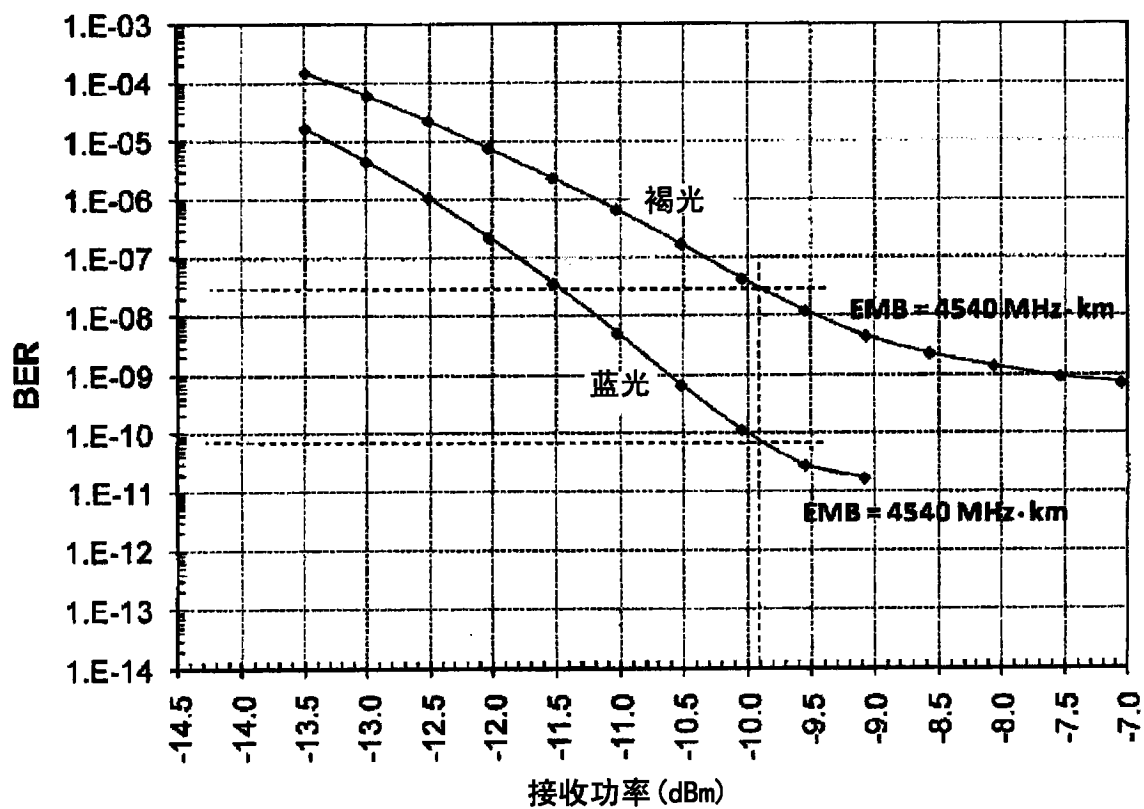


图 6

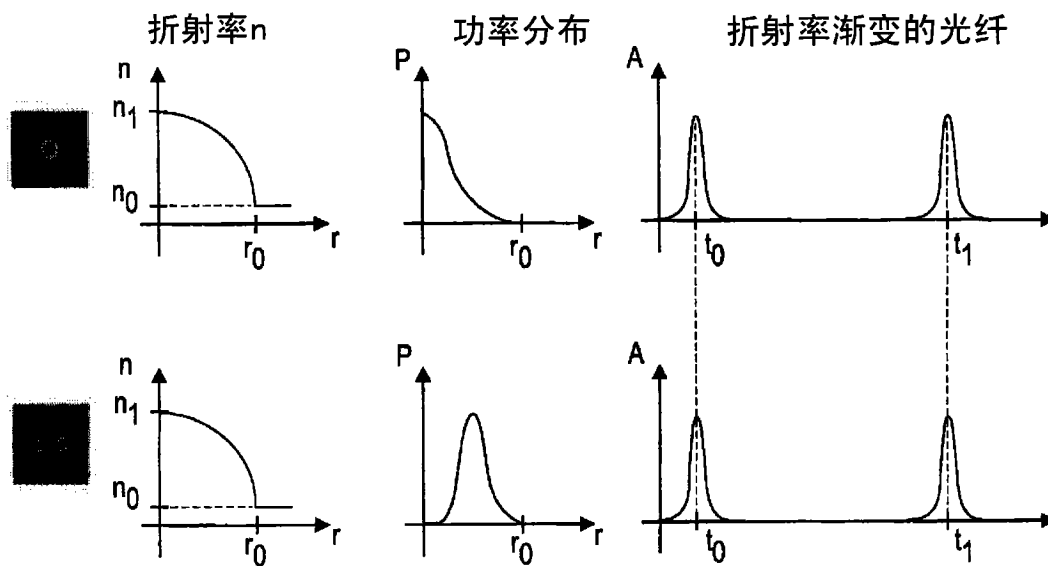


图 7

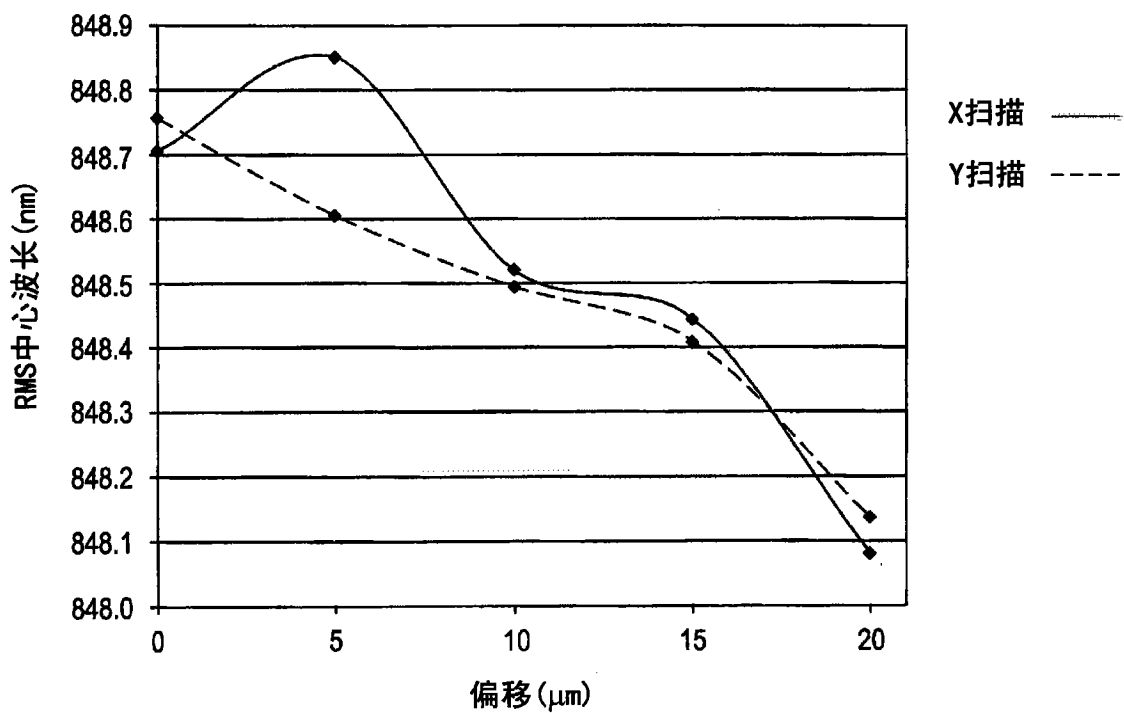


图 8

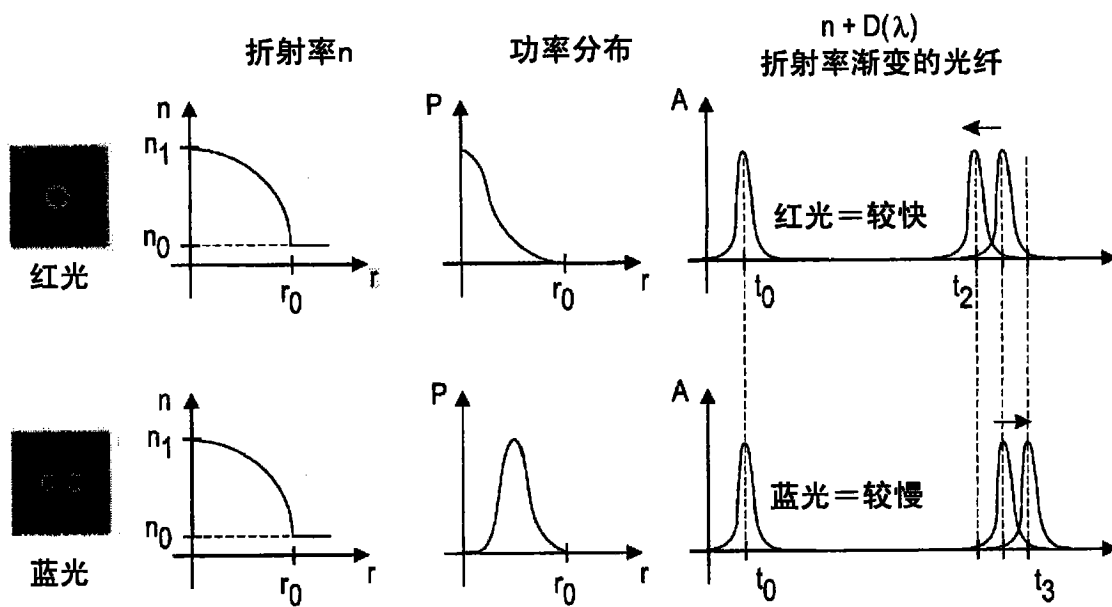


图 9

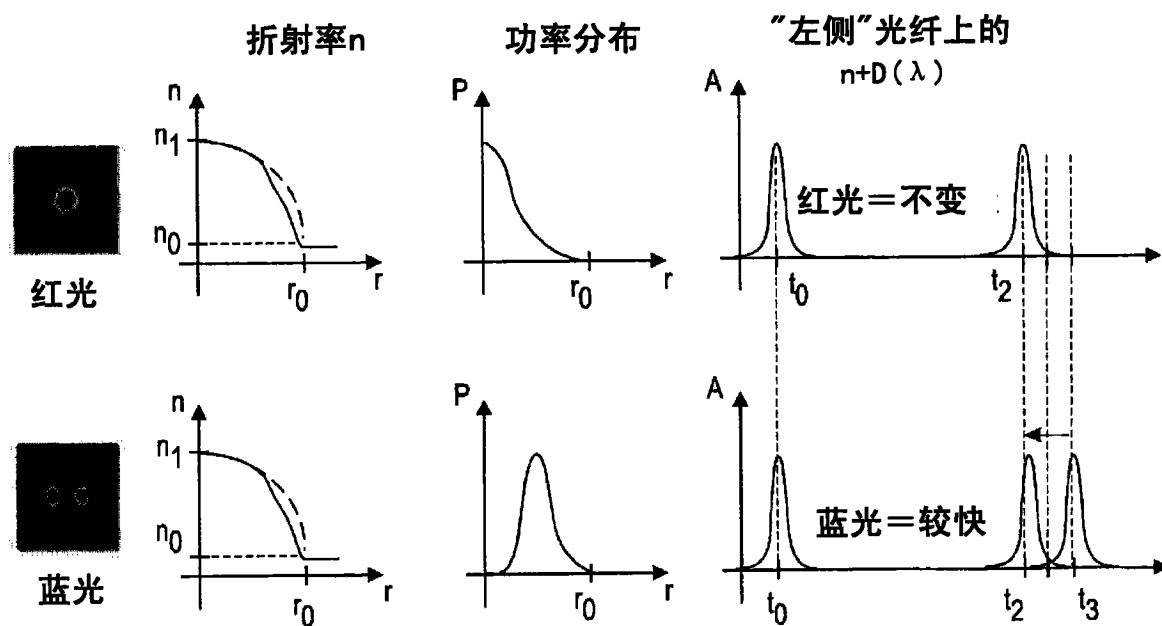


图 10

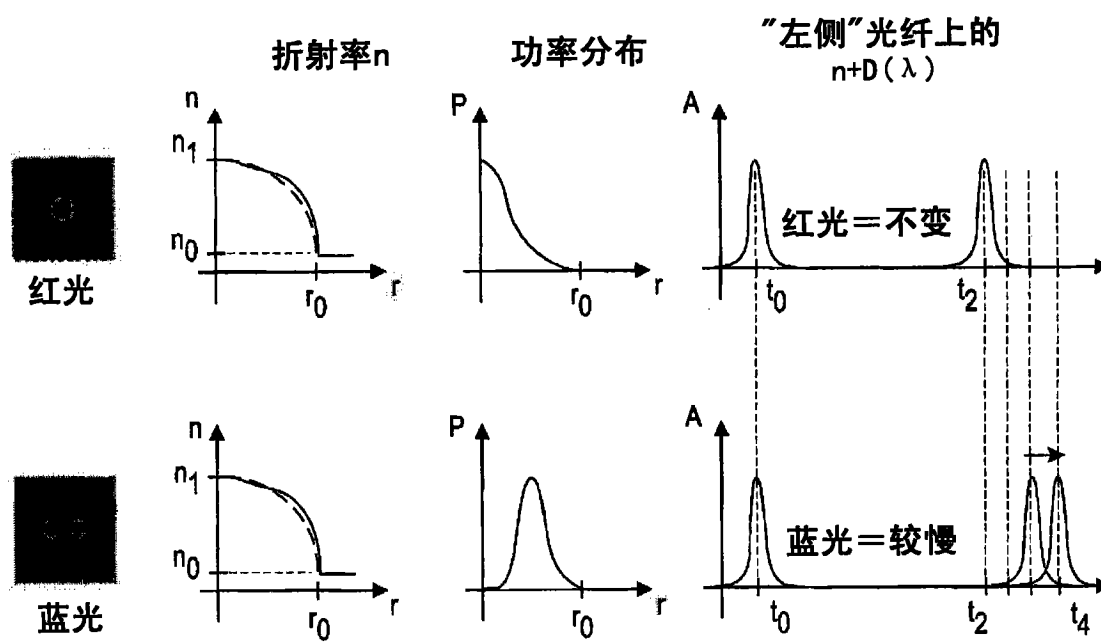


图 11