



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103076650 A

(43) 申请公布日 2013. 05. 01

(21) 申请号 201310013694. 8

(22) 申请日 2013. 01. 15

(71) 申请人 西南交通大学

地址 610031 四川省成都市二环路北一段
111 号西南交通大学科技处

(72) 发明人 邹喜华 戈伟伟 周丰洲 周志
潘炜 罗斌 闫连山

(74) 专利代理机构 成都信博专利代理有限责任
公司 51200

代理人 张澎

(51) Int. Cl.

G02B 6/02 (2006. 01)

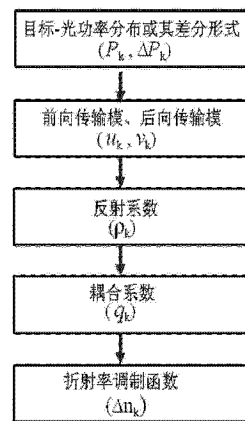
权利要求书2页 说明书7页 附图8页

(54) 发明名称

一种具有任意光功率分布的光纤光栅设计方法

(57) 摘要

本发明公开了一种具有任意光功率分布的光纤光栅设计方法, 重构出光纤光栅的折射调制函数。从给定的沿光纤光栅长度的光功率分布出发, 对光纤光栅进行分段处理, 结合光纤光栅的边界条件 ($u_N=1$ 和 $v_0=0$) 和能量守恒定律, 推导得到谐振波长处光纤光栅内部的前向传输模、后向传输模的幅度。同时, 根据传输矩阵法, 针对均匀型、切趾型光纤光栅推导得到谐振波长处前向传输模、后向传输模的恒定相位。立足于已得到的前向传输模、后向传输模的幅度和相位, 运用耦合模矩阵计算得到反射系数、耦合系数, 并从中推算出光纤光栅的折射率调制函数, 完成光纤光栅的重构设计。除适用于光纤光栅, 本发明还适用于具有任意光功率分布的均匀型、切趾型波导光栅的设计。



1. 一种具有任意光功率分布的光纤光栅设计方法,该方法包括如下步骤:

a) 首先将光纤光栅划分为 N 段,光栅段的编号为 1, 2, 3...k-1, k, ...N, 在每一段光栅中,折射率调制视为常量;归一化长度为 0~1, 在每一段的界面处,都存在前向传输模 u_k 和后向传输模 v_k , 则光纤光栅各分段点的光功率 P_k , 差分形式的光功率 ΔP_k 为:

$$P_k \propto |u_k + v_k|^2 \quad (1)$$

$$\Delta P_k = P_k - P_{k-1} \quad (2)$$

b) 定义一个归一化函数:

$$\sum_{i=1}^N f(i) = 1 \quad (3)$$

根据式 (1)-(3) 可得出:

$$P_k = P_0 + (P_N - P_0) \sum_{i=1}^k f(i) \quad (4)$$

$$\Delta P_k = (P_N - P_0) f(k) \quad (5)$$

c) 从任意给定的光功率分布 P_k 或者差分形式的光功率分布 ΔP_k 出发, 结合光纤光栅的边界条件 $u_N = 1$ 和 $v_0 = 0$ 以及能量守恒定律, 计算得到光纤光栅内部前向传输模 u_k 和后向传输模 v_k :

$$u_N = 1, v_0 = 0 \quad (6)$$

$$|u_k|^2 - |u_{k-1}|^2 = |v_k|^2 - |v_{k-1}|^2 \propto \frac{P_k - P_{k-1}}{2} = \frac{\Delta P_k}{2} \quad (7)$$

$$\arg(u_k) = 0, \arg(v_k) = \pi/2 \quad (8)$$

其中, $\arg(\cdot)$ 表示取相位;

d) 立足于已得到的前向、后向传输模, 运用传输矩阵:

$$M_k = (1 - |\rho_k|^2)^{\frac{1}{2}} \times \begin{bmatrix} 1 & -\rho_k^* \\ -\rho_k & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \exp(j\delta\Delta z_k) & 0 \\ 0 & \exp(-j\delta\Delta z_k) \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} u_k \\ v_k \end{bmatrix} = M_k \times \begin{bmatrix} u_{k-1} \\ v_{k-1} \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中 δ 为失谐量, Δz_k 为第 k 个光栅段的长度, 在谐振波长处失谐量 δ 为 0, 得到每一光栅段的反射系数 ρ_k :

$$\begin{bmatrix} u_k \\ v_k \end{bmatrix} = (1 - |\rho_k|^2)^{\frac{1}{2}} \times \begin{bmatrix} 1 & -\rho_k^* \\ -\rho_k & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} u_{k-1} \\ v_{k-1} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\operatorname{Re}(\rho_k) = \frac{(E - C)(G + A) + (F - D)(H + B)}{(G^2 - A^2) + (H^2 - B^2)}, \quad (12)$$

$$\operatorname{Im}(\rho_k) = \frac{(E - C)(H - B) + (F - D)(G - A)}{(H^2 - B^2) + (G^2 - A^2)}, \quad (13)$$

其中 $\operatorname{Re}(\cdot)$ 和 $\operatorname{Im}(\cdot)$ 分别表示实部、虚部; $A = \operatorname{Re}(u_k u_{k-1})$, $B = \operatorname{Im}(u_k u_{k-1})$, $C = \operatorname{Re}(u_k v_{k-1})$, $D = \operatorname{Im}(u_k v_{k-1})$, $E = \operatorname{Re}(v_k u_{k-1})$, $F = \operatorname{Im}(v_k u_{k-1})$, $G = \operatorname{Re}(v_k v_{k-1})$, $H = \operatorname{Im}(v_k v_{k-1})$;

e) 由于反射系数 ρ_k 与耦合系数 q_k 存在着如下对应关系:

$$\rho_k = \tanh(|q_k| \Delta z_k) \times \frac{q_k^*}{|q_k|}, \quad (14)$$

进而计算出每一段光栅的耦合系数 q_k

$$|q_k| = \left[\ln \frac{1+|\rho_k|}{1-|\rho_k|} \right] / (2\Delta z_k) \quad (15)$$

$$\arg(q_k) = \pi - \arg(\rho_k). \quad (16)$$

f) 最后, 根据耦合系数 q_k 、折射率调制函数 Δn_k 的对应关系:

$$\delta n(z) = \frac{\Delta n_k(z)}{2} \exp\{j[K_0 z + \theta_k(z)]\} + c.c \quad (17)$$

$$q_k(z) = -j \frac{K_0}{2n_0} \Delta n_k(z) \exp[-j\theta_k(z)] \quad (18)$$

其中 $K_0 = 2\pi/\Lambda$, Λ 为光栅周期, $c.c$ 表示复共轭, $\theta_k(z) = 0$, 计算出折射率调制函数 Δn_k 的幅度和相位:

$$|\Delta n_k| = \frac{2n_0\Lambda}{\pi} |q_k(z)| \quad (19)$$

$$\arg(\Delta n_k) = \arg(q_k) - \frac{3}{2}\pi \quad (20)$$

e) 具有此折射率调制函数的光纤光栅即为具有任意光功率分布的光纤光栅。

2. 根据权利要求 1 所述的一种具有任意光功率分布的光纤光栅设计方法, 其特征在于所述的光纤光栅划分为 N 段中的 N 段是均匀的。

3. 根据权利要求 1 所述的一种具有任意光功率分布的光纤光栅设计方法, 其特征在于所述的光纤光栅划分为 N 段中的 N 段是非均匀的。

4. 根据权利要求 1-3 之一所述的一种具有任意光功率分布的光纤光栅设计方法, 亦适用于均匀型、切趾型波导光栅。

一种具有任意光功率分布的光纤光栅设计方法

技术领域

[0001] 本发明主要涉及到光纤光栅、光子滤波器、光通信、微波光子学、光传感等领域,尤其涉及一种具有任意光功率分布的光纤光栅设计方法。

背景技术

[0002] 光纤光栅具有滤波性能灵活、易与光纤系统融合、插入损耗低、简单便宜等特点,因而在光通信、光信号处理、微波光子学、光传感等领域有着广泛的应用。而在不同应用场合中,对光纤光栅的特性要求也不尽相同的。譬如,在光通信中需要特殊的带内相频响应来进行色散和色散斜率补偿,或者需要多信道滤波来实施波分复用技术;在光信号处理中,可以基于特殊设计的光纤光栅对光信号进行傅里叶变换、差分与微分运算、以及慢光处理;在微波光子学中,具有高分辨率的相频响应和超窄带幅频响应的光纤光栅可以从光域上精密操控和处理微波信号;在光传感领域,双波长光纤光栅或光栅阵列被应用于感知温度和应变,消除温度和应变的交叉敏感。

[0003] 为了满足上述各种应用中的不同要求,国内外研究人员提出了一系列重构算法和设计方案。逆散射算法是其中比较经典的一种:任意滤波频率响应通过逆散射算法逐层计算,重构出光纤光栅的结构参数(主要是局部耦合系数和折射率调制函数)。逆散射算法(有时候称为剥层算法)能够重构设计出具有矩形带通、复杂相频响应、强反射率、均匀多信道/非均匀多信道光纤光栅,相关论文包括:1) R. Feced, M. N. Zervas, and M. A. Muriel, "An efficient inverse scattering algorithm for the design of nonuniform fiber Bragg gratings," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 35, no. 8, pp. 1105 - 1115, 1999 ;2) J. Skaar, L. Wang, and T. Erdogan, "On the synthesis of fiber Bragg gratings by layer peeling," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 37, no. 2, pp. 165-173, 2001. 。联合时频分析方法也可被拓展应用到光纤光栅重构设计中,诸如 M. A. Muriel, J. Azana, and A. Carballar, "Fiber grating synthesis by use of time-frequency representations," *Optics Letters*, vol. 23, no. 19, pp. 1526-1528, 1998 . 。另外,纯相位取样技术、迭代计算、优化算法也被广泛应用于重构多信道光纤光栅折射率调制函数的相位分布,从而获得的多信道光纤光栅具有高信道一致性和高衍射效率,比如 H. Li, T. Kumagai, K. Ogusu, and Y. Sheng, "Advanced design of a multichannel fiber Bragg grating based on a layer-peeling method," *Journal of Optical Society of America-B*, vol. 21, no. 11, 1929-1938, 2004.

[0004] 以上重构算法和设计方法集中于:从定制的频率响应(幅频响应和相频响应)出发,重构得到光纤光栅的结构参数。然而,光纤光栅在光栅长度方向上的光功率分布亦是其另一个重要特性,可以视为光纤光栅滤波特性在空间域上的一种体现。光纤光栅内部的光功率分布在光通信、微波光子学、光传感中有着特殊重要应用。如在光域中处理微波信号时对反射点(或时延)的稳定控制,短光纤激光器谐振腔的设计,基于单个光纤光栅的分布式传感等。

[0005] 目前,针对光纤光栅内部的光功率分布的研究,局限于已知结构下光纤光栅内部的光功率分布分析;即已知光纤光栅的结构参数(主要是折射率调制函数),定量分析其内部的光功率分布,例如论文 M. A. Muriel, A. Carballar, and J. Azana, "Field distributions inside fiber gratings," IEEE Journal of Quantum Electronics, vol. 35, no. 4, pp. 548-558, 1999。而一个亟待解决的问题是:设计一个具有任意或定制光功率分布的光纤光栅;即给定一个任意或定制光功率分布,重构设计出一个符合要求的光纤光栅。这一问题当前还未见有有效的解决方法或方案。

发明内容

[0006] 鉴于以上陈述的已有重构算法和设计方法的不足,本发明旨在提供一种能够设计出具有任意或定制光功率分布的光纤光栅的方法,从而有效地实现基于空间域上光功率或光能量分布的光纤光栅重构设计。

[0007] 本发明的目的通过如下过程来实现。

[0008] 一种具有任意光功率分布的光纤光栅设计方法,从任意给定的光功率分布出发,结合光纤光栅的边界条件 ($u_N=1$ 和 $v_0=0$) 和能量守恒定律,推导得到谐振波长处光栅内部的前向传输模、后向传输模的幅度。同时,根据传输矩阵法,针对均匀型、切趾型光纤光栅推导出谐振波长处前向传输模、后向传输模的恒定相位。立足于已得到的前向传输模、后向传输模的幅度和相位,运用耦合模矩阵计算得到反射系数、耦合系数,并从中推算出光纤光栅的折射率调制函数,完成光纤光栅的重构设计。

[0009] 实际执行过程为如下。

[0010] 首先将光纤光栅划分为 N 段(可是均匀分段,也可是非均匀分段),在每一段光栅中,折射率调制视为常量;光栅段的编号为 $1 \sim N$,归一化长度为 $0 \sim 1$,如图 1(a) 所示。在每一段的界面处,都存在前向传输模 u_k 和后向传输模 v_k ,如图 1(b) 所示。因而,光纤光栅各分段点的光功率、差分形式的光功率即为:

$$[0011] \quad P_k \propto |u_k + v_k|^2. \quad (1)$$

$$[0012] \quad \Delta P_k = P_k - P_{k-1}. \quad (2)$$

[0013] 定义一个归一化函数 [即 (3) 式],则 (1) 和 (2) 可以改写成 (4) 和 (5)

$$[0014] \quad \sum_{i=1}^N f(i) = 1 \quad (3)$$

$$[0015] \quad P_k = P_0 + (P_N - P_0) \sum_{i=1}^k f(i) \quad (4)$$

$$[0016] \quad \Delta P_k = (P_N - P_0) f(k) \quad (5)$$

[0017] 在此分段形式下,设计方法的流程如图 2 所示,从任意给定的光功率分布 (P_k) 或者差分形式的光功率分布 (ΔP_k) 出发。结合光纤光栅的边界条件 ($u_N=1$ 和 $v_0=0$) 和能量守恒定律,计算得到均匀型、切趾型光纤光栅内部前向传输模和后向传输模(包括幅度和相位),即 u_k 和 v_k 。

$$[0018] \quad u_N=1, v_0=0 \quad (6)$$

$$[0019] \quad |u_k|^2 - |u_{k-1}|^2 = |v_k|^2 - |v_{k-1}|^2 \propto \frac{P_k - P_{k-1}}{2} = \frac{\Delta P_k}{2}. \quad (7)$$

[0020] $\arg(u_k)=0, \arg(v_k)=\pi/2$. (8) 其中, $\arg(\cdot)$ 表示取相位。这里的幅度和相位为谐振波长处 (也可称之为 Bragg 波长处) 前向传输模、后向传输模的幅度和相位。

[0021] 立足于已得到的前向、后向传输模, 运用传输矩阵得到每一光栅段的反射系数 (ρ_k) :

$$[0022] \quad \begin{bmatrix} u_k \\ v_k \end{bmatrix} = (1 - |\rho_k|^2)^{\frac{1}{2}} \times \begin{bmatrix} 1 & -\rho_k^* \\ -\rho_k & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} u_{k-1} \\ v_{k-1} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$[0023] \quad \text{Re}(\rho_k) = \frac{(E-C)(G+A) + (F-D)(H+B)}{(G^2 - A^2) + (H^2 - B^2)}, \quad (10)$$

$$[0024] \quad \text{Im}(\rho_k) = \frac{(E-C)(H-B) + (F-D)(G-A)}{(H^2 - B^2) + (G^2 - A^2)}, \quad (11)$$

[0025] 其中 $\text{Re}(\cdot)$ 和 $\text{Im}(\cdot)$ 分别表示实部、虚部 ; $A=\text{Re}(u_k u_{k-1})$, $B=\text{Im}(u_k u_{k-1})$, $C=\text{Re}(u_k v_{k-1})$, $D=\text{Im}(u_k v_{k-1})$, $E=\text{Re}(v_k u_{k-1})$, $F=\text{Im}(v_k u_{k-1})$, $G=\text{Re}(v_k v_{k-1})$, $H=\text{Im}(v_k v_{k-1})$.

[0026] 根据 ρ_k , 进而计算出每一段光栅的耦合系数 (q_k) :

$$[0027] \quad |q_k| = \left[\ln \frac{1 + |\rho_k|}{1 - |\rho_k|} \right] / (2\Delta z_k) \quad (12)$$

$$[0028] \quad \arg(q_k) = \pi - \arg(\rho_k). \quad (13)$$

[0029] 最后, 基于 q_k 可以计算得到光纤光栅的折射率调制 (含幅度相位) :

$$[0030] \quad |\Delta n_k| = \frac{2n\Lambda}{\pi} |q_k|, \quad (14)$$

$$[0031] \quad \arg(\Delta n_k) = \arg(q_k) - \frac{3}{2}\pi. \quad (15)$$

[0032] 因此, (14)、(15) 为所获得的光纤光栅的折射率调制函数 ; 具有此折射率调制函数的光纤光栅内部的光功率分布即为给定的目标的光功率分布。至此, 完成了具有任意光功率分布的光纤光栅重构结构设计。

[0033] 基于本发明所实现的具有任意光功率分布的光纤光栅和波导光栅在光通信、微波光子、分布式传感等领域具有重要应用, 诸如光域中处理微波信号时对反射点 (或时延) 的稳定控制, 短光纤激光器谐振腔的设计, 基于单个光纤光栅的分布式传感等

附图说明 :

[0034] 图 1. (a). 光纤光栅的分段示意图 ; (b). 光栅分段后前与后向传输模、光功率分布与差分形式的光功率分布示意图。

[0035] 图 2. 具有任意光功率分布的光纤光栅设计方法的流程图。

[0036] 图 3. 均匀型光纤光栅内部的光功率分布及其差分形式。

[0037] 图 4. 高斯切趾型光纤光栅的光功率分布及其差分形式。

[0038] 图 5. 基于均匀型光纤光栅的光功率进行重构设计获得的折射率调制函数。

[0039] 图 6. 基于均匀型光纤光栅的光功率进行重构设计获得光功率分布及其差分形

式。

[0040] 图 7. 基于高斯切趾型光纤光栅的光功率进行重构设计获得的折射率调制函数。

[0041] 图 8. 基于高斯切趾型光纤光栅的光功率进行重构设计获得光功率分布及其差分形式。

[0042] 图 9. 平顶型差分形式光功率分布及相应的光功率分布图。

[0043] 图 10. 基于平顶型差分形式光功率分布进行重构设计获得的光纤光栅的折射率调制函数。

[0044] 图 11. 基于平顶型差分形式光功率分布进行重构设计获得的光纤光栅的光功率分布及其差分形式。

[0045] 图 12. 尖峰型差分形式光功率分布及相应的光功率分布图。

[0046] 图 13. 基于尖峰型差分形式光功率分布进行重构设计获得的光纤光栅折射率函数。

[0047] 图 14. 基于尖峰型差分形式光功率分布进行重构设计获得的光功率分布及其差分形式光功率的分布图。

[0048] 图 15. 鞍型差分形式光功率分布及相应的光功率分布图。

[0049] 图 16. 基于鞍峰型差分形式光功率分布进行重构设计获得的折射率调制函数。

[0050] 图 17. 基于鞍峰型差分形式光功率分布进行重构设计获得的光功率分布及其差分形式光功率的分布图。

[0051] 图 18. 多峰型差分形式光功率分布及相应的光功率分布图。

[0052] 图 19. 基于多峰型差分形式光功率分布进行重构设计获得的折射率调制函数。

[0053] 图 20. 基于多峰型差分形式光功率分布进行重构设计获得的光功率分布及其差分形式光功率的分布图。

[0054] 图 21. 高斯切趾型波导光栅的光功率分布及其差分形式的分布图。

[0055] 图 22. 基于高斯切趾型波导光栅的光功率分布进行重构设计获得的折射率调制函数和光功率分布。

具体实施方式

[0056] 下面结合附图对本发明的实施作进一步的描述。

[0057] 如图 1 所示, 首先对光纤光栅作分段处理: 以均匀分段、或者非均匀分段形式将光纤光栅分为 N 段, 光栅段的编号为 $1 \sim N$, 整个光栅归一化长度为 $0 \sim 1$; 在每一段光栅中, 折射率调制视为常量。

[0058] 当光信号输入到光纤光栅中, 在光栅内部存在前向传输模和后向传输模; 针对 N 个光栅段, 在每一界面处的前向传输模、后向传输模分别表示为 u_k 和 v_k , 如图 1(b) 所示。因而, 光纤光栅各分段点的光功率、差分形式的光功率即为:

$$[0059] \quad P_k \propto |E_k|^2 = |u_k + v_k|^2, \quad (16)$$

$$[0060] \quad \Delta P_k = P_k - P_{k-1}. \quad (17)$$

[0061] 其中 E_k 表示光场分布。

[0062] 为便于表达, 定义一个归一化函数, 即 (18) 式; 此时, (16) 和 (17) 可以改写成 (19) 和 (20) 式:

$$[0063] \quad \sum_{i=1}^N f(i) = 1 \quad , \quad (18)$$

$$[0064] \quad P_k = P_0 + (P_N - P_0) \sum_{i=1}^k f(i) \quad , \quad (19)$$

$$[0065] \quad \Delta P_k = (P_N - P_0) f(k) \quad . \quad (20)$$

[0066] 在此分段形式下,本发明提出的设计方法的流程如图 2 所示。给定任意光功率分布 (P_k) 或者差分形式的光功率分布 (ΔP_k),以之作为设计目标。根据光纤光栅的边界条件和能量守恒定律:

$$[0067] \quad u_N = 1, v_0 = 0, \quad (21)$$

$$[0068] \quad |u_k|^2 - |u_{k-1}|^2 = |v_k|^2 - |v_{k-1}|^2, \quad (22)$$

[0069] 联合 (19) ~ (22) 式,不难得到:

$$[0070] \quad |u_k|^2 - |u_{k-1}|^2 = |v_k|^2 - |v_{k-1}|^2 \propto \frac{P_k - P_{k-1}}{2} = \frac{\Delta P_k}{2} \quad . \quad (23)$$

[0071] 从而,由 (23) 式计算得到均匀型、切趾型光纤光栅内部前向传输模和后向传输模的幅度:即 $|u_k|$ 和 $|v_k|$ 。接着,采用传输矩阵,推算得到 u_k 和 v_k 的相位:

$$[0072] \quad \arg(u_k) = 0, \arg(v_k) = \pi/2. \quad (24)$$

[0073] 其中, $\arg(\cdot)$ 表示取相位。这里的幅度和相位为谐振波长处 (亦称之为 Bragg 波长处) 前向传输模、后向传输模的幅度和相位。

[0074] 立足于已得到的前向传输模、后向传输模,重构设计得到折射率调整函数,具体步骤为: $v_k, u_k \rightarrow \rho_k(z) \rightarrow q_k(z) \rightarrow \Delta n(z)$; 其中 $\rho_k(z)$ 表示第 k 段光栅的反射系数, $q_k(z)$ 表示第 k 段光栅的耦合系数, Δn_k 表示第 k 段光栅的折射率调制。

[0075] 通过传输矩阵将耦合系数和前向、后向传输模联系起来:

$$[0076] \quad M_k = (1 - |\rho_k|^2)^{\frac{1}{2}} \times \begin{bmatrix} 1 & -\rho_k^* \\ -\rho_k & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \exp(j\delta\Delta z_k) & 0 \\ 0 & \exp(-j\delta\Delta z_k) \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$[0077] \quad \begin{bmatrix} u_k \\ v_k \end{bmatrix} = M_k \times \begin{bmatrix} u_{k-1} \\ v_{k-1} \end{bmatrix} \quad (26)$$

[0078] 其中 δ 为失谐量, Δz_k 为第 k 个光栅段的长度。在谐振波长处 (Bragg 波长处) 失谐量 δ 为 0, 因而 (25)、(26) 式进一步简化为:

$$[0079] \quad \begin{bmatrix} u_k \\ v_k \end{bmatrix} = (1 - |\rho_k|^2)^{\frac{1}{2}} \times \begin{bmatrix} 1 & -\rho_k^* \\ -\rho_k & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} u_{k-1} \\ v_{k-1} \end{bmatrix} \quad . \quad (27)$$

[0080] 在公式 (27) 中 $u_k, v_k, u_{k-1}, v_{k-1}$ 已知 [详细过程见 (21) ~ (24) 式]; 因而将 (27) 式展开后,根据虚部、实部相等的原则,求解得到 ρ_k :

$$[0081] \quad \text{Re}(\rho_k) = \frac{(C - E)(G + A) + (D - F)(H + B)}{(G^2 - A^2) + (H^2 - B^2)} \quad (28)$$

$$[0082] \quad \text{Im}(\rho_k) = \frac{(C-E)(H+B) - (D-F)(G-A)}{(H^2 - B^2) + (G^2 - A^2)} \quad (29)$$

[0083] 其中 $\text{Re}(\cdot)$ 和 $\text{Im}(\cdot)$ 分别表示实部、虚部； $A=\text{Re}(u_k u_{k-1})$, $B=\text{Im}(u_k u_{k-1})$, $C=\text{Re}(u_k v_{k-1})$, $D=\text{Im}(u_k v_{k-1})$, $E=\text{Re}(v_k u_{k-1})$, $F=\text{Im}(v_k u_{k-1})$, $G=\text{Re}(v_k v_{k-1})$, $H=\text{Im}(v_k v_{k-1})$.

[0084] 由于, ρ_k 之间 q_k 存在着对应关系:

$$[0085] \quad \rho_k = \tanh(|q_k| \Delta z_k) \times \frac{q_k^*}{|q_k|}, \quad (30)$$

[0086] 因而, 由获得的 ρ_k 计算出每一段光栅的 q_k , 即从 (30) 式推算得到:

$$[0087] \quad |q_k| = \left[\ln \frac{1+|\rho_k|}{1-|\rho_k|} \right] / (2\Delta z_k), \quad (31)$$

$$[0088] \quad \arg(q_k) = \pi - \arg(\rho_k). \quad (32)$$

[0089] 最后, 从 q_k 中计算出 Δn_k ; 即根据 q_k 、 Δn_k 的对应关系和定义:

$$[0090] \quad \delta n(z) = \frac{\Delta n_k(z)}{2} \exp\{j[K_0 z + \theta_k(z)] + c.c\} \quad (33)$$

$$[0091] \quad q_k(z) = -j \frac{K_0}{2n_0} \Delta n_k(z) \exp[-j\theta_k(z)] \quad (34)$$

[0092] 其中 $K_0 = 2\pi/\Lambda$, Λ 为光栅周期, $c.c$ 表示复共轭。这里, 在均匀型、切趾型光纤光栅中, $\theta_k(z) = 0$ 。由 (33)、(34) 计算出每一段对应的折射率调制 Δn_k 如 (35)、(36), 分布为幅度和相位。

$$[0093] \quad \Delta n_k = \frac{2n_0\Lambda}{\pi} |q_k(z)| \quad (35)$$

$$[0094] \quad \arg(\Delta n_k) = \arg(q_k) - \frac{3}{2}\pi \quad (36)$$

[0095] 此时, (35)、(36) 即为重构设计得到的光纤光栅的折射率调制函数。此折射率调制函数下的光纤光栅在谐振波长处的光功率分布与目标光功率分布一致, 至此我们完成了具有任意光功率分布的光纤光栅重构结构设计。

[0096] 需要说明的是: 本发明中的重构设计方法不仅适用于光纤光栅, 而且适用于具有任意光功率分布的波导光栅的设计, 其过程与原理与光纤光栅相同, 就不再赘述了。

[0097] 为更直观展示本发明中的重构设计方法的有效性, 我们分三个层次给出了几个设计例子。

[0098] 在第一层次例子中, 分别将一个均匀型光纤光栅的光功率分布和差分形式的光功率分布 (图 3) (它们之中的任何一个作为目标, 效果是一样的)、一个高斯切趾型光纤光栅的光功率分布和差分形式的光功率分布 (图 4) 作为目标。一方面, 观察由该设计方法获得的折射率调制与原来的均匀型光纤光栅、高斯切趾型光纤光栅是否一致; 另一方面, 检验重构设计得到的光纤光栅的光功率分布是否与目标一致。运用该设计方法, 以均匀型光纤

光栅的光功率分布为目标的重构设计结果见图 5 和图 6。可见,获得的折射率调制函数为常数: $\Delta n=2 \times 10^{-4}$, 与原均匀型光纤光栅相同; 所获得的光功率分布(或差分形式光功率分布)与图 3 中的目标光功率分布(或差分形式光功率分布)高度一致, 误差小于 10^{-7} 。同样, 以高斯切趾型光纤光栅的光功率分布为目标的重构设计结果见图 7 和图 8。所获得的折射率调制函数呈现高斯函数包络, 与原高斯切趾函数光纤光栅相同; 并且, 所获得的光功率分布(或差分形式光功率分布)与图 4 中的目标光功率分布(或差分形式光功率分布)高度一致, 误差亦小于 10^{-7} 。这两个例子说明: 该设计方法对于具有常规光功率分布(或差分形式光功率分布)的光纤光栅的重构设计是非常有效的。

[0099] 在第二层次例子中, 为不失一般性, 选用了几种特殊的光功率分布, 以差分形式的光功率分布表示为: 平顶型、尖峰型、鞍型、多峰型。图 9 为平顶型差分形式的光功率分布、以及对应的光功率分布; 运用该设计方法, 获得的折射率调制函数、光功率分布和差分形式的光功率分布见图 10 和图 11。图 12 为尖峰型差分形式的光功率分布、以及对应的光功率分布; 运用该设计方法, 获得的折射率调制函数、光功率分布和差分形式的光功率分布见图 13 和图 14。图 15 为鞍型差分形式的光功率分布、以及对应的光功率分布; 运用该设计方法, 获得的折射率调制函数、光功率分布和差分形式的光功率分布见图 16 和图 17。图 18 为多峰型差分形式的光功率分布、以及对应的光功率分布; 运用该设计方法, 获得的折射率调制函数、光功率分布和差分形式的光功率分布见图 19 和图 20。通过这 4 个例子, 不难看出: 对于任意的或定制的光功率分布(或者差分形式的光功率分布), 采用该设计方法获得结果与目标一致, 验证了该设计方法在一般条件下的有效性。

[0100] 在第三层次例子中, 我们侧重验证该设计方法在波导光栅中的有效性。选一个高斯切趾的波导光栅: 其周期为 221.5nm, 占空比为 50%, 光栅周期为 50, 最大有效折射率差为 0.1; 在这些参数下, 波导光栅在谐振波长处的光功率分布及其差分形式见图 21; 以此光功率分布(或其差分形式)作为目标, 重构设计得到的折射率调制函数、光功率分布及其差分形式分别见图 22。对比图 21 和图 22, 不难发现: 运用该设计方法得到的光功率分布与目标光功率分布一致; 因此验证了该设计方法亦适用于波导光栅, 而不仅仅是光纤光栅。

[0101] 综合以上陈述, 本发明具有如下特征。1). 该重构设计方法能够实现了具有任意光功率分布或差分形式的光功率分布的光纤光栅重构设计, 将光纤光栅的滤波特性从频域拓展到空间域。2). 此重构设计方法不仅适用于光纤光栅, 亦适用于均匀型、切趾型波导光栅。

[0102] 以上所陈述的仅仅是本发明方案的优选实施方式, 应当指出, 在不脱离本发明方案实质的前提下, 在实际实施中可以做出若干更改和润色也应包含在本发明的保护范围以内。

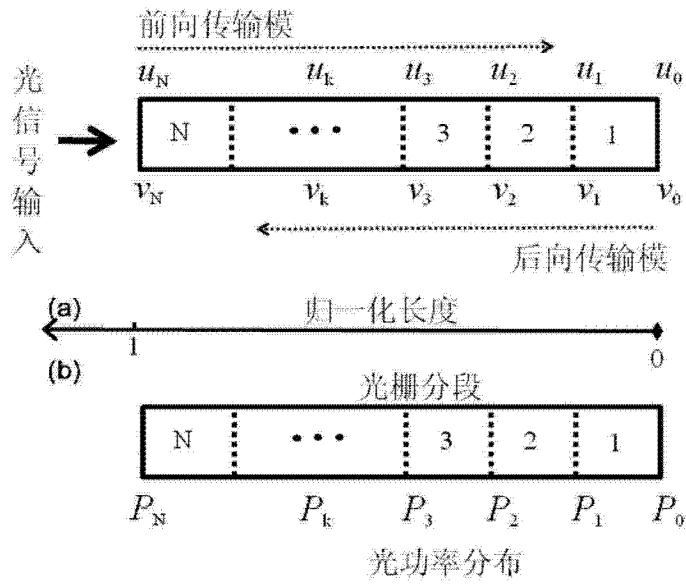


图 1

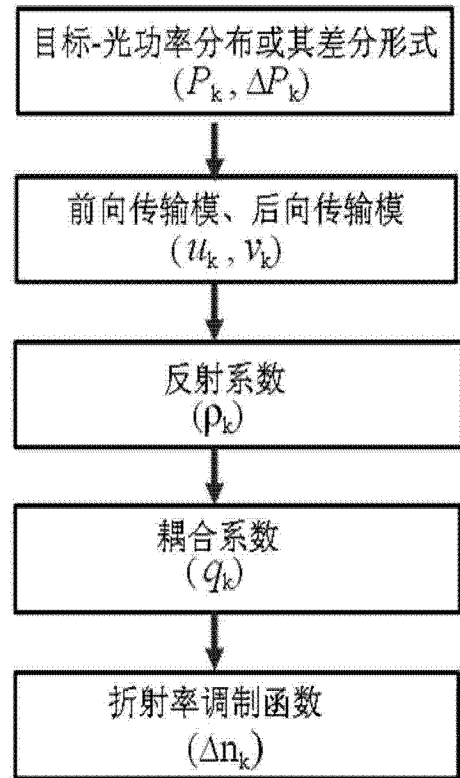


图 2

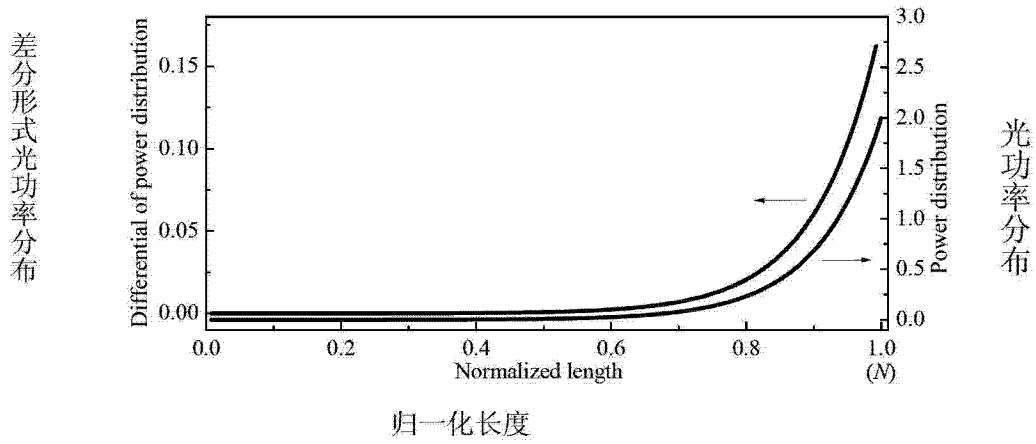


图 3

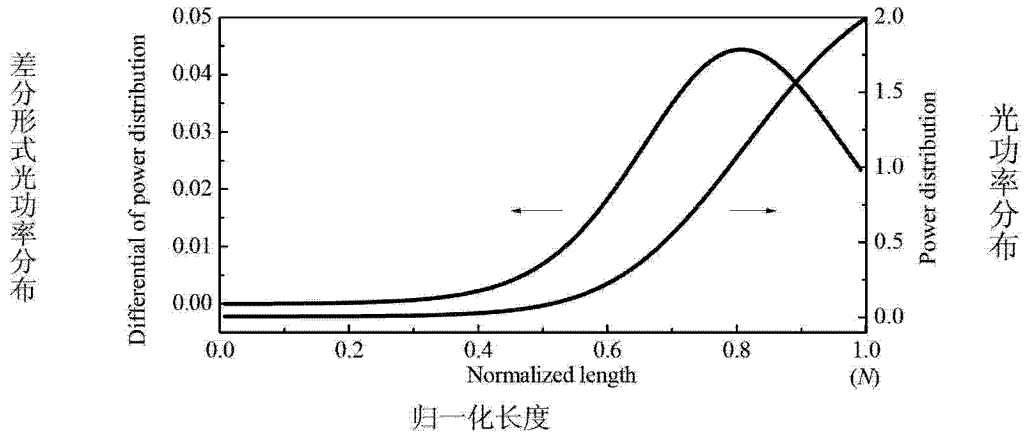


图 4

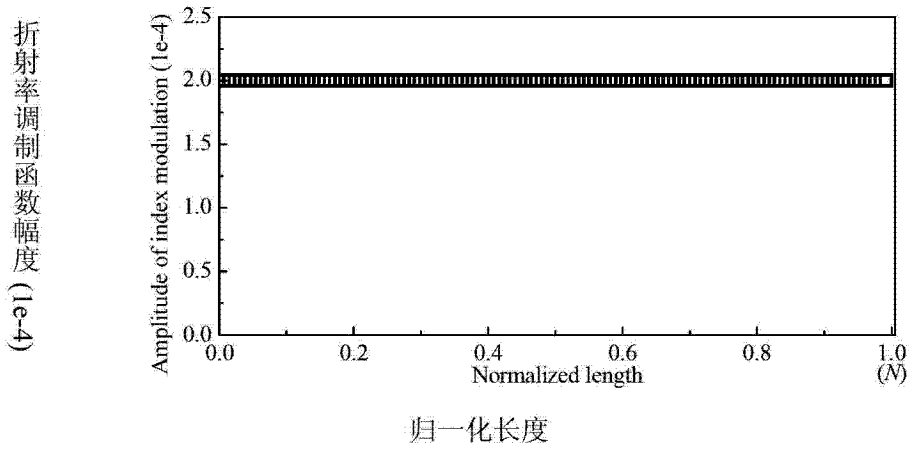


图 5

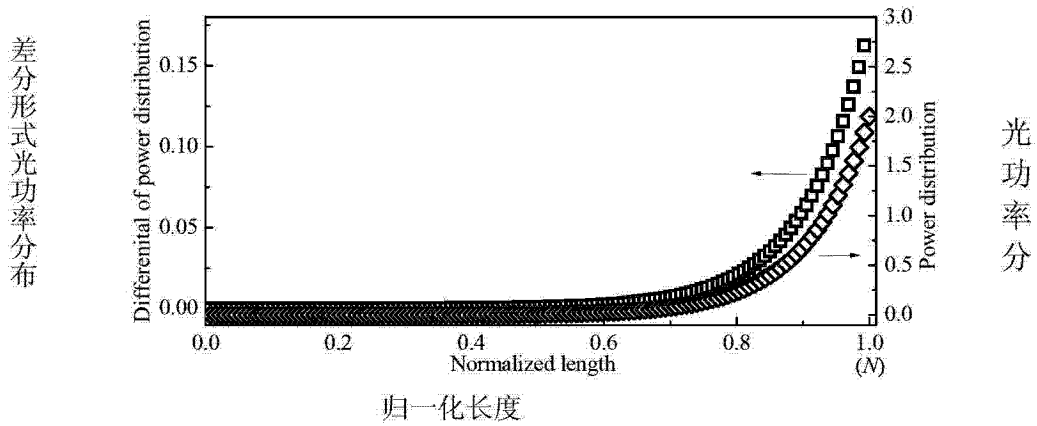
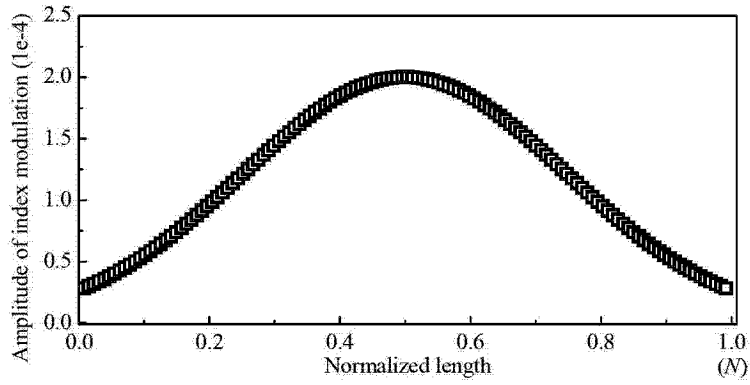


图 6

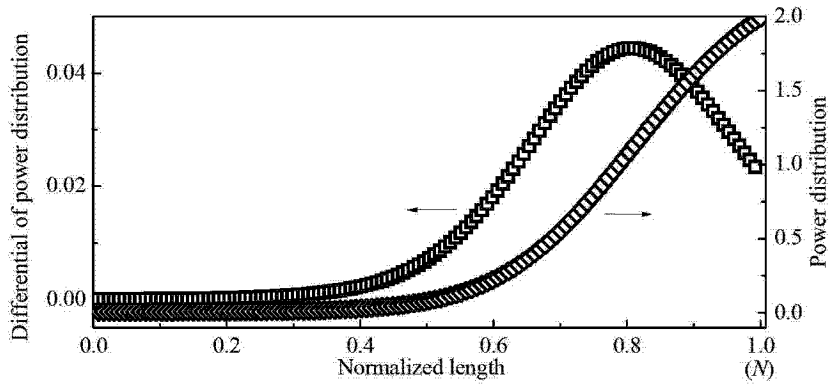
折射率调制函数幅度 (1e-4)



归一化长度

图 7

差分形式光功率分布

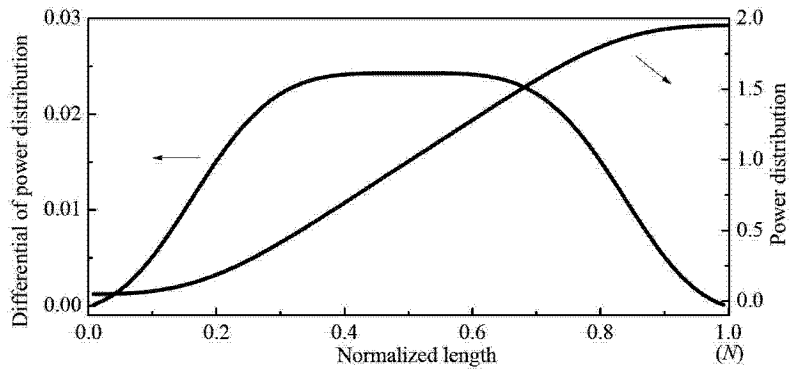


光功率分布

归一化长度

图 8

差分形式光功率分布



光功率分布

归一化长度

图 9

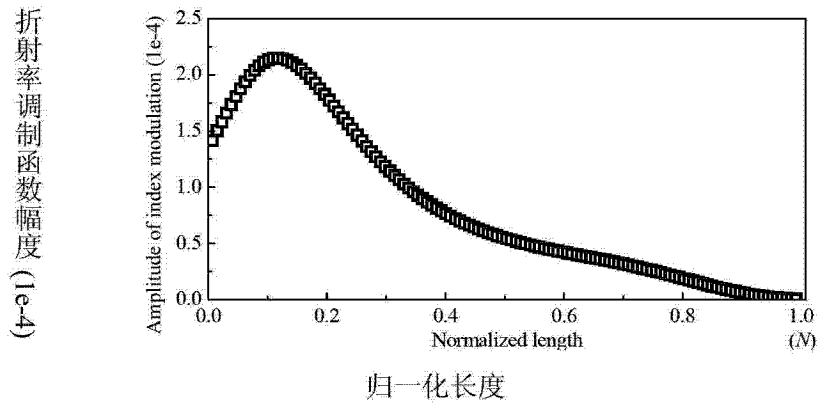


图 10

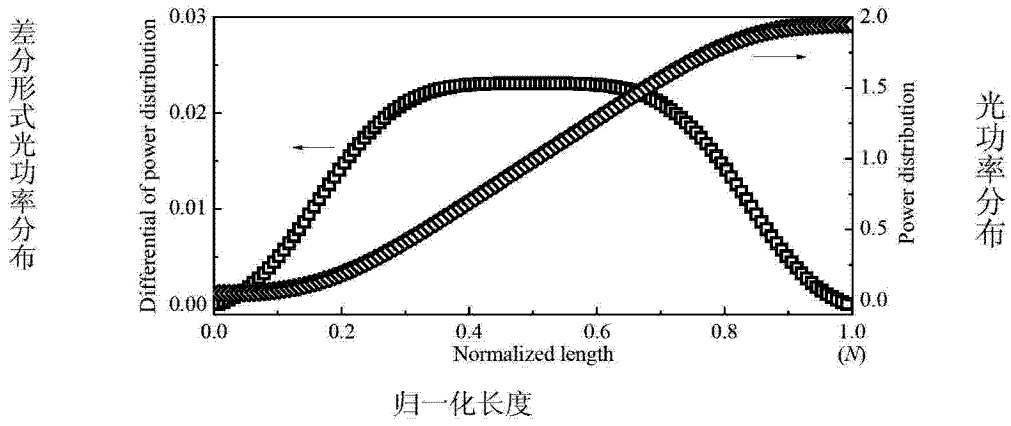


图 11

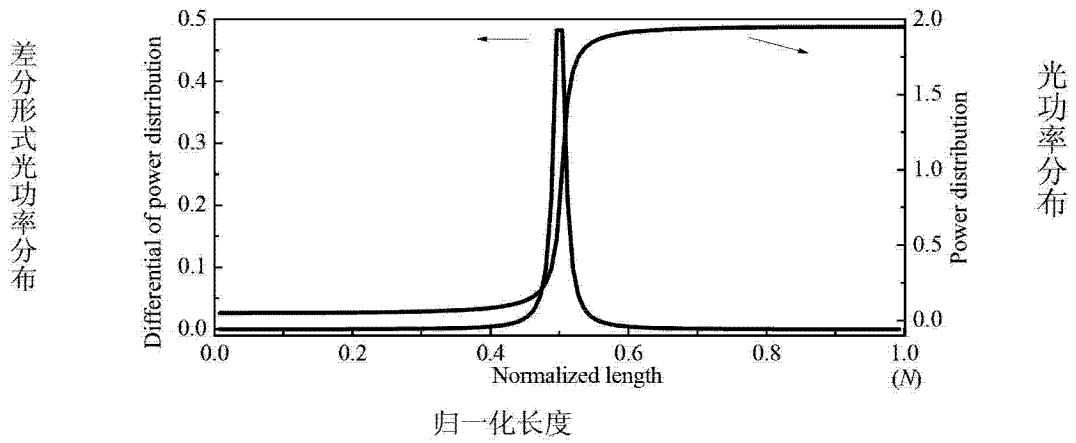


图 12

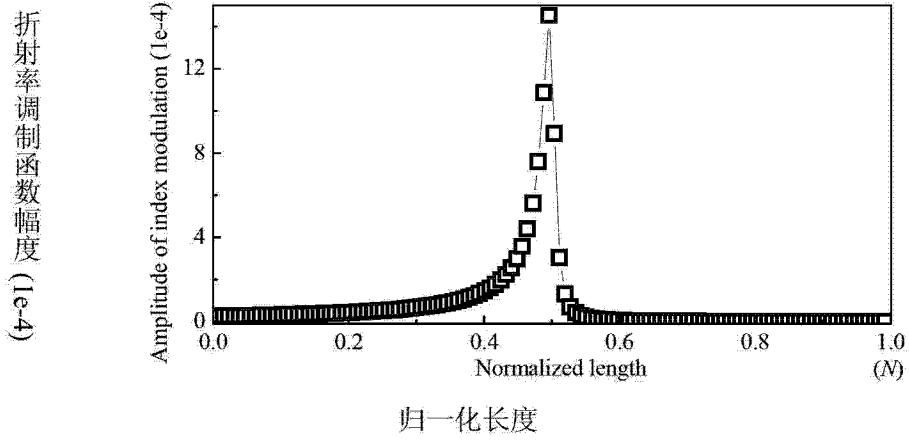


图 13

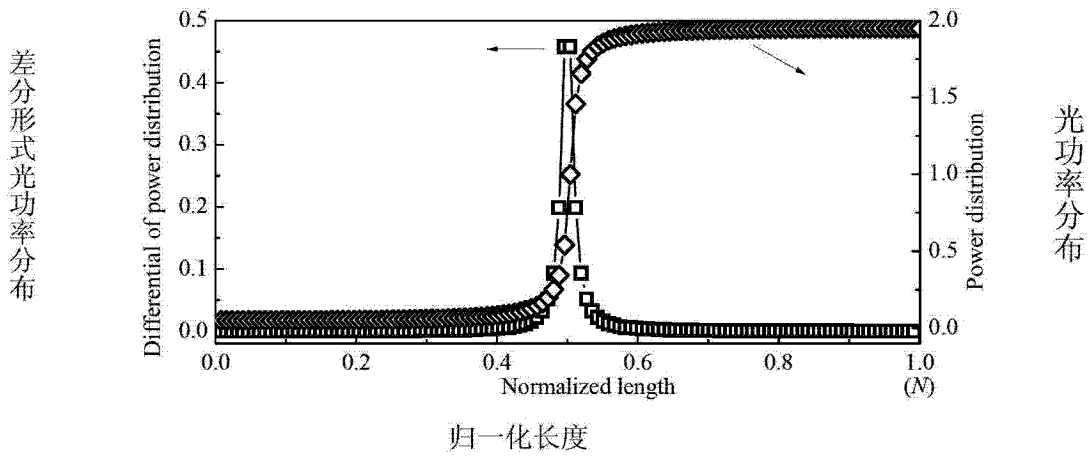


图 14

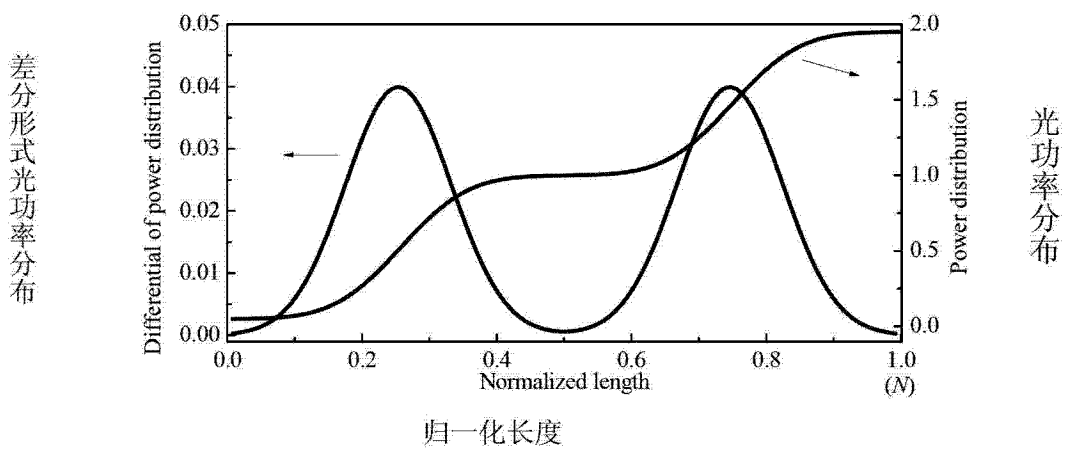


图 15

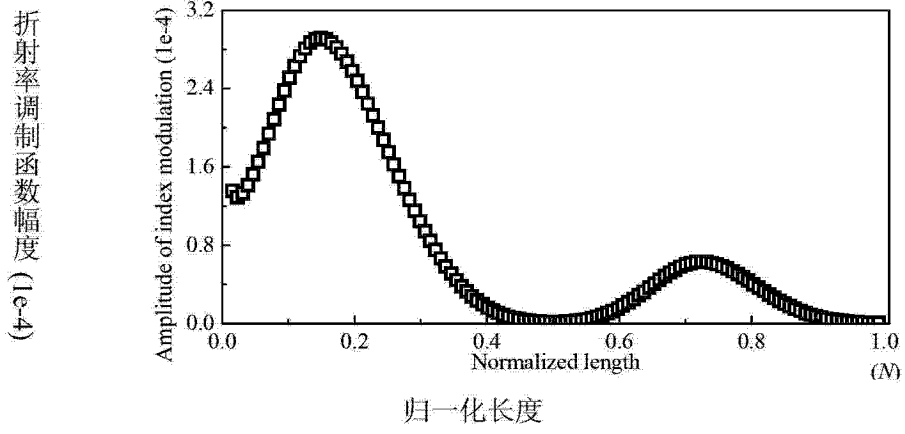


图 16

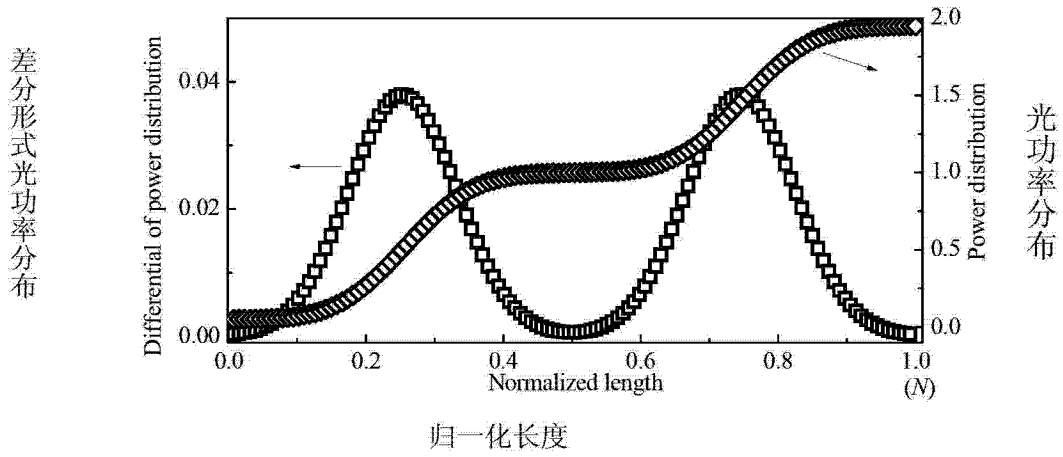


图 17

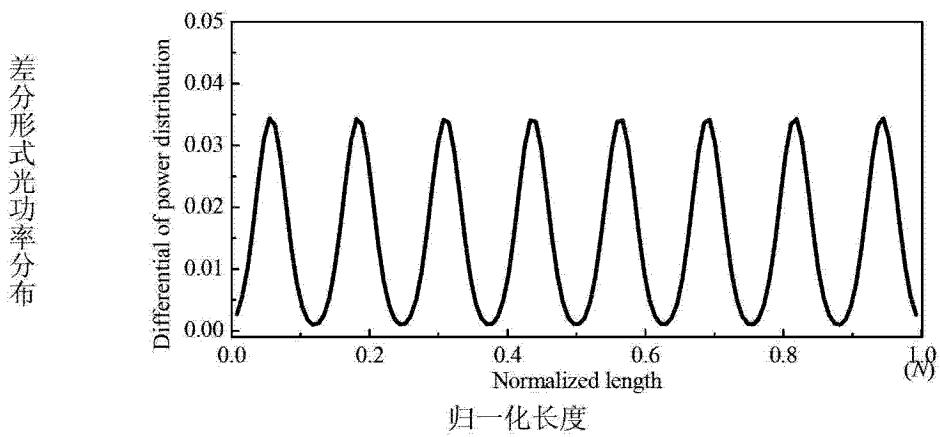


图 18

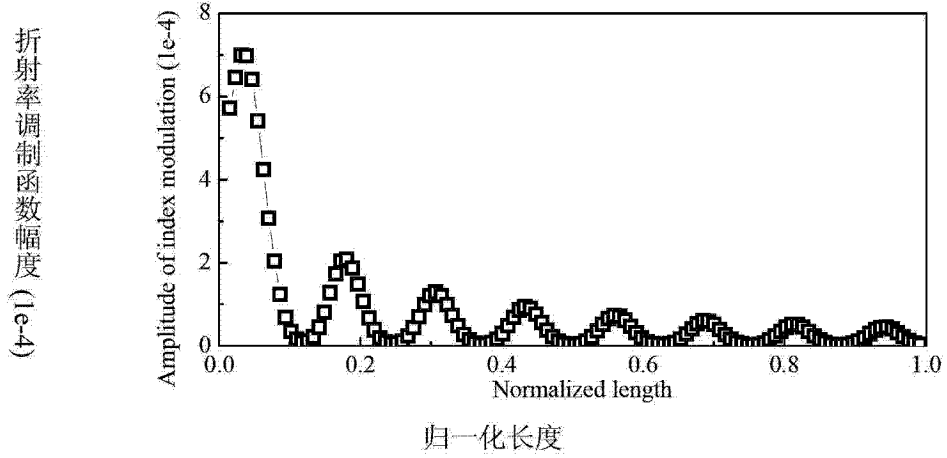


图 19

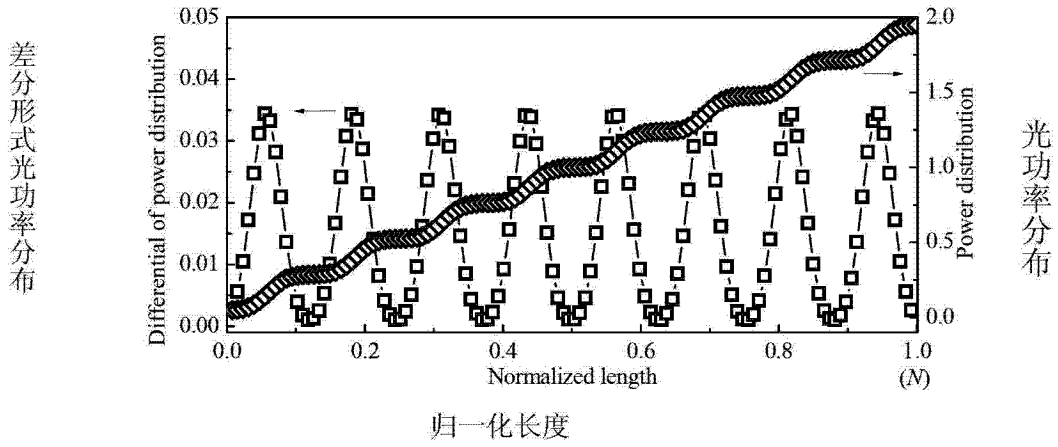


图 20

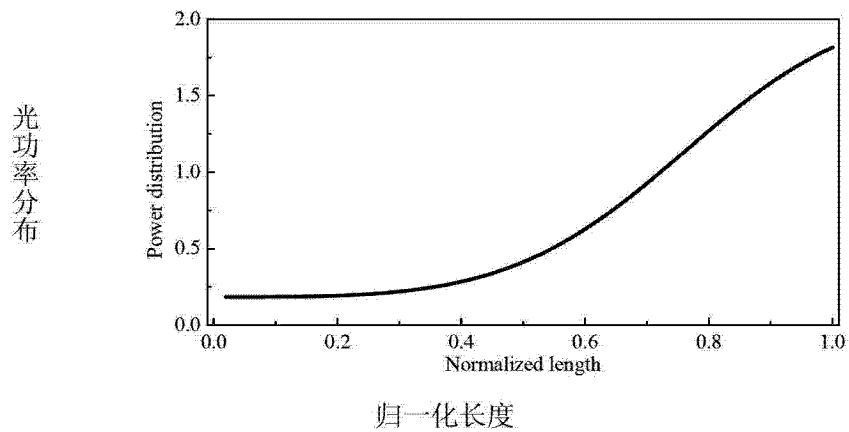


图 21

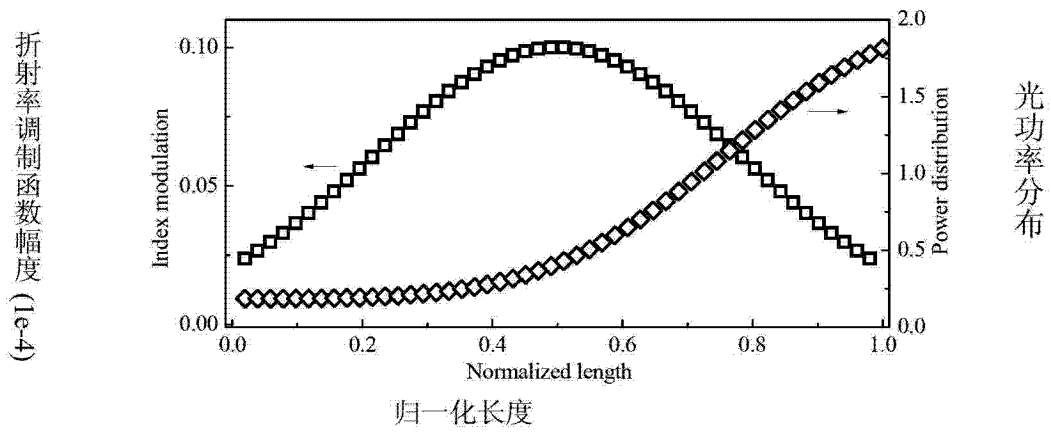


图 22