

Effects of Manufacturing Errors in Phase-only Sampled Chirp Gratings

Liqun Huang¹, Guang Yang²

Department of Electronics and Information, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, P.R.China

1. e-mail persistent_hlq@sina.com, 2. e-mail yangguangneueq@163.com

Abstract: The influence of manufacturing errors on the grating performance was investigated by numerical simulation. When group delay and reflectivity ripples are caused by random phase and amplitude errors, inside a grating channel, the ripple amplitude at short wavelength is larger than the one at long wavelength, and this phenomenon was qualitatively explained using the principle that the reflecting position varies with the wavelength of incident light in a chirp grating. The sub-grating length of the transfer matrix method, which is decided by the accuracy of phase mask and UV writing, exerts an influence on the ripple amplitude. For multi-channel fiber gratings, stitch error impairs the periodicity of sampling function, so this kind of fabrication error leads to unequal performance reduction in different channels, and the reduction is more serious for channels at two sides. A repeated UV writing method was proposed to mitigate the influence of random errors.

Keywords: fiber bragg grating; multi-channel; fabrication errors; dispersion compensation

制作误差对相位取样啁啾光栅的性能影响

黄力群¹, 杨光²

东北大学秦皇岛分校 电子信息系, 秦皇岛, 中国, 066004

1. E-mail persistent_hlq@sina.com, 2. E-mail yangguangneueq@163.com

【摘要】本文用数值模拟的方法分别研究了随机幅度误差、随机相位误差和缝合误差对相位取样光栅的性能影响。随机误差所产生的时延纹波其幅度会随波长逐渐减少, 运用不同波长入射光在啁啾光栅不同位置上反射的原理, 定性分析了这一现象产生的原因; 缝合误差会引起各信道性能降低的不一致性, 这是因为它损害了取样函数的周期性。

【关键词】光纤光栅; 多信道; 制作误差; 色散补偿

1 引言

本光纤光栅自 1978 年问世以来, 已得到广泛和深入的研究。随着密集波分复用 (DWDM) 系统在光传送网中占据主导地位, 光纤光栅作为窄带滤波器的缺点逐渐显现出来。用多个光纤光栅级联的方法来扩展滤波器带宽, 会使器件造价变得昂贵, 同时也会降低器件的整体性能^[1]。取样光纤光栅因其固有的宽带性质和广泛的应用前景而在最近几年成为新的研究热点^[2], 用取样光纤光栅可以制作成宽带准连续可调的半导体外腔激光器^[3]或光纤光栅激光器, 同样, 用取样光纤光栅还能实现宽带的色散补偿^[4,5]。

早期的取样光栅常利用 ON/OFF 的方波实现幅度取样, 得到的反射谱具有 sinc 函数的包络形状, 不利

于在 WDM 系统中应用。1998 年, M. Ibsen 等人用 sinc 取样函数制作出均匀的梳状光纤光栅滤波器^[6], 但其所需的最大折射率调制幅度是单个同样光纤光栅的 N 倍, (N 为滤波器信道数), 这对于高信道数的滤波器来说是难于实现的。最近 J. E. Rothenberg 等人用完全的相位取样方法制作出均匀的梳状滤波器^[7], 折射率调制幅度约等于同样单个光栅的 \sqrt{N} 倍, 而且该方法降低了取样光栅写入的技术难度。

因相位取样光栅的各信道间有强烈的耦合作用, 制作误差对光纤光栅复反射率的影响可能不同于单反射峰光栅。本文运用数值模拟的方法, 分别引入随机幅度误差、随机相位误差和缝合误差, 来观察它们对反射谱和时延曲线的影响, 这将有利于误差控制以及优化取样光栅的制作过程。

河北省教育厅科学研究计划项目, 项目编号: Z2005323

2 相位取样啁啾光栅的设计方法

频率间隔相等的 N 个信道取样啁啾光栅的折射率调制函数可表示为^[4]:

$$\sum_{n=1}^N A(z) \cdot \exp\left\{i\left[K_0 z + c_0 z^2 + (2n - N - 1)\Delta k z / 2 + \phi_n\right]\right\} = A(z) \cdot \exp[i(K_0 z + c_0 z^2)] \cdot S(z) \quad (1)$$

其中, A 是与折射率调制幅度有关的单个光栅的切趾函数; K_0 、 C_0 和 Δk 分别是与光栅周期、啁啾系数和信道频率间隔有关的物理量; ϕ_n 则是第 n 个信道光栅的相对相位, $S(z) = Q(z) \cdot \exp(i\psi)$, 它便是需要优化的取样函数。根据公式(1)可知:

$$Q(z) = \sqrt{N + \sum_{n_1, n_2=1}^N \cos[(n_1 - n_2)\Delta k z + \phi_{n_1} - \phi_{n_2}]} \quad (2)$$

$$\psi(z) = \tanh \left[\frac{\sum_{n=1}^N \sin[(2n - N - 1)\Delta k z / 2 + \phi_n]}{\sum_{n=1}^N \cos[(2n - N - 1)\Delta k z / 2 + \phi_n]} \right] \quad (3)$$

运用模拟退火算法可以搜索到一组 ϕ_n , 使得取样函数的幅度值 $Q(z)$ 的最大值与最小值之差取得最小值。然后可以通过 Gerchberg-Saxton 迭代算法进一步减小取样函数的幅度调制^[5], 在允许带外附加信道的幅度值不为零的条件下, 可以完全消除取样幅度的调制, 从而得到完全的相位取样啁啾光栅。

3 制作误差对相位取样光栅性能影响的模拟

为节省计算时间和清晰的显示, 以四信道的相位取样光栅为例。设计时, 整个取样光栅的中心波长取为 1550nm, 该值与公式 1 的 K_0 有关, 图 1 和图 2 分别显示了取样光栅的反射谱和时延曲线。

可以看出四个信道的波长间隔为 0.8nm, 在未加入随机的误差扰动之前, 四个信道的反射峰值和时延曲线几乎完全一致, 线性的时延曲线部分所对应的波长范围大于 0.4nm。然后我们引入随机的折射率幅度调制误差, 将传输矩阵法中每个子光栅的折射率调制幅度乘上一个随机变量, 该随机变量满足正态分布, 期望值为 1, 均方差值为 5%, 子光栅的长度为 0.026mm, 最后通过矩阵法便可计算有误差扰动后的取样光栅反

射谱和时延曲线。

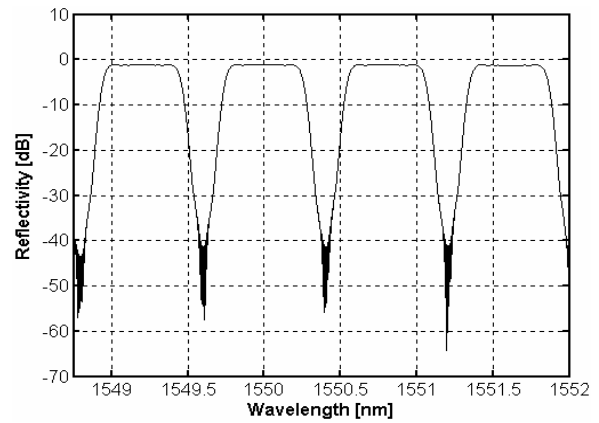


图 1. 四通道相位取样光栅的反射谱

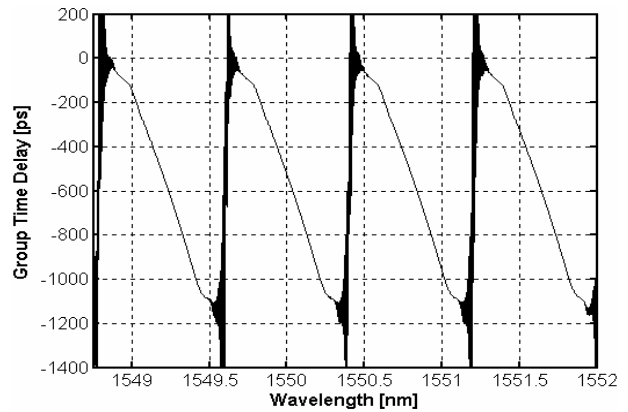


图 2. 四通道相位取样光栅的时延曲线

随机的幅度误差主要会造成反射峰的平坦度下降和时延曲线纹波 (ripple) 的增长, 图 3 的粗线对应原始的反射峰, 细线则反应了随机幅度误差对反射峰所造成的影响, 在 0.4nm 的有效带宽内反射率的不平整度增加了约 0.14dB。

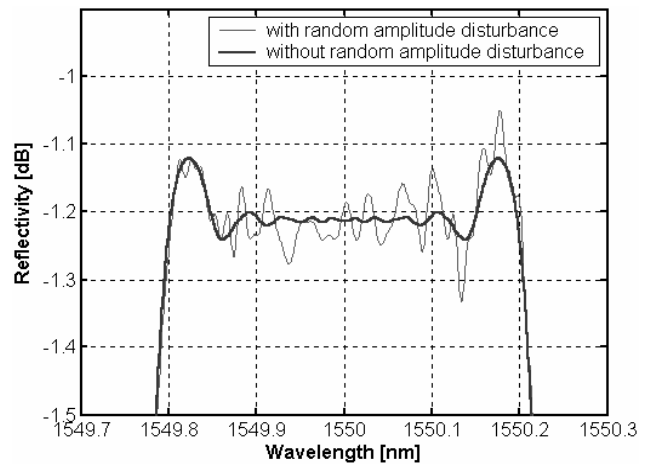


图 3. 幅度扰动前后的反射峰比较

因为幅度随机误差对其他的三个信道所造成的影响几乎相同，为了清晰地显示，图 3 中只表示出中心波长为 1550nm 的反射峰。

图 4 显示了误差扰动前后群时延之间的差值，在 0.4nm 的有效带宽内，四个信道的情况也几乎完全相同，随机幅度误差造成时延曲线偏离线性的最大幅度达到 23ps。一个有趣的现象是：在有效带宽内，时延曲线偏离线性的幅度是随着波长在逐渐减少的，在单信道的啁啾光栅中引入随机幅度误差，同样会得到相同的结果。

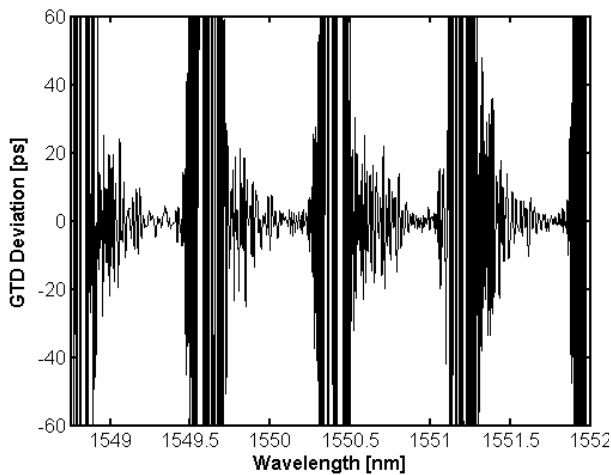


图 4. 幅度扰动前后时延曲线的偏离

我们对这一现象给出了定性的解释：长波长的入射光进入啁啾光栅后，它的绝大部分光场由光栅的前端进行反射；而短波长的入射光则相反，光场要穿过前端并由后端反射，它在穿过前端光栅时，同样会存在微弱的反射。换句话说，短波长的入射光在光栅里的行程大于长波长入射光，所经历的随机幅度误差也大于长波长的入射光，这会造成群时延偏离的进一步增加。对取样啁啾光栅来说，它的频域响应等于单个啁啾光栅谱响应与取样函数傅立叶变换之间的卷积，所以同样会出现以上现象。

如果引入随机的相位误差，将一个期望值为 0，均方差值为 0.015π 的随机变量加入到折射率调制的相位部分，(相当于各子光栅的调制周期有一个幅度约为 4nm 的随机误差)，子光栅的长度仍然取 0.026mm。此时，相位误差会造成单个反射峰的不平整度增加 0.05dB，时延偏离线性的最大幅度同样约为 21ps。因为所得到的结果基本与第一种情况类似，为节省篇幅，计算的图样不再给出。以上计算引入了随机误差，每次计算时，所得的纹波最大幅度值有所差别，但时延

偏离随着波长而逐渐减少的现象始终存在。

需要指出的是，子光栅长度取值增大时，相同的随机误差会造成更严重的影响。这是因为相邻的子光栅有大致相同的结构参数，随机误差所造成的影响有相互抵消的可能。而子光栅长度增加时，相邻子光栅的结构参数出现较大变化，相互抵消的可能性减弱，所以反射谱和时延曲线会出现更大的纹波。子光栅的长度需要根据不同的光栅写入过程和相位掩模板的制作精度来确定。本文的模拟计算更重视对一些现象的定性分析，子光栅长度的取值会改变纹波幅度，但不会改变以上现象的基本特性。

最后，对缝合误差所产生的反射率与群时延纹波进行了模拟计算。相位掩模板制作中的误差可能使光纤光栅中出现缝合误差，即有一小段光栅未经折射率调制。

图 5 显示了缝合误差对取样光栅反射谱的影响，此时缝合误差的宽度取值为 $25\mu\text{m}$ ，取样光栅长度为 10cm，缝合误差所处的位置与取样光栅起始端相距 3.5cm，可见它对四个信道的影响并不相同。第二个信道的中心波长为 1550nm，与整个相位取样光栅的中心波长重合，即第二个信道就是取样光栅的中间信道，它基本未受缝合误差的影响；而第四信道出现了一个 0.4dB 的顶部凹陷，所受影响最大；第一信道与第三信道所受影响基本相同。

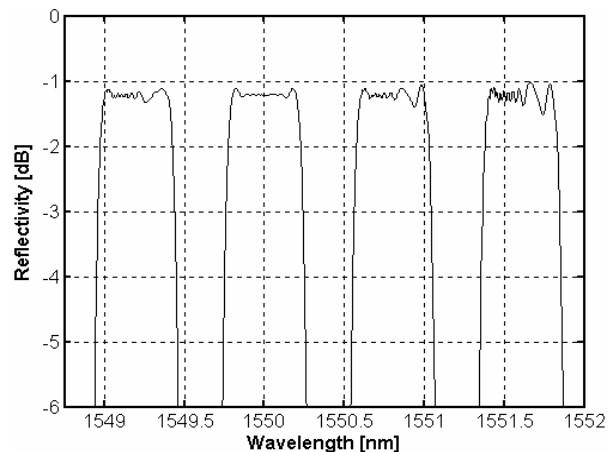


图 5. 缝合误差对取样光栅反射谱的影响

图 6 表示了缝合误差对四个信道的时延曲线的影响情况，此图只显示了信道内 0.4nm 有效带宽内的时延偏离，细实线、虚线、点线和粗实线分别对应信道 1、2、3、4。同样，信道 2 所受的影响最小；信道 4 所受影响最大，该信道群时延纹波的最大幅度值为 16ps。

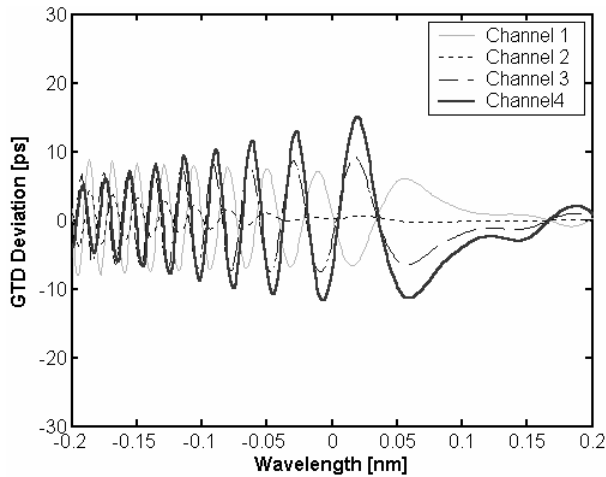


图 6. 缝合误差对取样光栅时延曲线的影响

缝合误差宽度分别为 10 和 50 μm 的情况下, 所得结果有数量上的差别, 但中间信道所受影响的程度始终最小, 越靠近两侧, 则纹波幅度越大, 以上计算结果与子光栅长度的取值无关。

缝合误差对各信道影响的不一致性可以解释为它损害了相位取样函数的周期性, 使得取样函数的傅立叶变换在各信道上表现出差异。

4 结论

本文通过分别引入符合正态分布的随机幅度误差变量和随机相位误差变量, 用矩阵法数值模拟了它们对相位取样啁啾光栅的反射谱和群时延曲线的影响, 并定性的分析了时延曲线纹波的幅度随波长逐渐减少的原因。计算所得的数据和子光栅长度的取值有关, 子光栅长度越大, 同样的随机误差变量对取样光栅的性能影响越严重, 子光栅长度的取值应根据具体的写入过程和相位掩模板的精度来确定。

如果紫外写入激光器的输出功率稳定性较差, 或扫描装置运行的精度不够, 便可以减小紫外光输出功率或提高扫描速度, 并采用多次重复扫描的办法来提高光栅的制作质量。这一方面有利于随机误差通过叠加而获得减小, 另一方面可使随机误差的分布变得更加精细, 此时, 可采用较小的子光栅长度来模拟随机误差对光栅性能的影响。

相位取样光栅的缝合误差会引起各信道性能降低的不一致性, 这是因为缝合误差损害了取样函数的周期性。模拟计算的结果显示: 中间信道受缝合误差影响的程度较小, 两侧信道受缝合误差影响的程度较大。缝合误差不是满足正态分布的随机变量, 可以看作是系统误差, 其产生的影响不同于随机误差。

References(参考文献)

- [1] D. Pastor, A. Martínez, J. Capmany, et al., Impact of fiber Bragg grating based OADM outband dispersion in DWDM-SCM Systems [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, 14: 567-569.
- [2] Xiaoying He, Yonglin Yu, Dexiu Huang, et al, Analysis and Applications of Reflection-Spectrum Envelopes for Sampled Gratings, [J]. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 2008, 26: 720-728.
- [3] A. Bergonzo, J. Jacquet, D. De. Gaudemaris, et al., A very simple and efficient widely tunable sampled fiber Bragg grating external cavity laser [C]. *Proc. OFC*, 2003, Paper ThF3: 462-464.
- [4] 黄力群, 黄卫平, 陈根祥等, 弱非周期性相位取样啁啾光栅的优化方法 [J], *中国激光*, 2004, 31 (9): 1099-1102
Huang Liqun, Huang Weiping, Chen Genxiang, Optimization of Weakly Aperiodic Phase-Only Sampled Chirp Gratings [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 31 (9): 1099-1102 (in Chinese).
- [5] J. Rothenberg, F. Babian, Z. Brodzeli, et al., Phase-only sampling for fabrication and design of high channel-count fiber Bragg gratings [C]. *Proc. OFC*, 2003, Paper ThL3: 516-517.
- [6] M. Ibsen, M. K. Durkin, et al., Sinc-sampled fiber Bragg gratings for identical multiple wavelength operation [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, 10: 842-844.
- [7] J. Rothenberg, H. Li, Y. Li, et al., Dammann fiber Bragg gratings and phase-only sampling for high channel counts [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002., 14: 1309-1311.