

## 如何选择 FBG 传感器的参数指标

### FBG 传感器阵列的指标

当设计传感器测量方法时，应该仔细考虑 FBG 的特征。一些指标是通用的，几乎针对所有应用；别外一些指标可能是为满足一些特殊应用而定制的。下面所指出的是主要针对应变和温度测量的，测量其他的参数像压力、位移或湿度需要特殊的要求。

#### 1. 传感器波长

传感器波长指的就是 FBG 反射谱中的尖峰的中心波长。这些峰值波长随着应变和温度的改

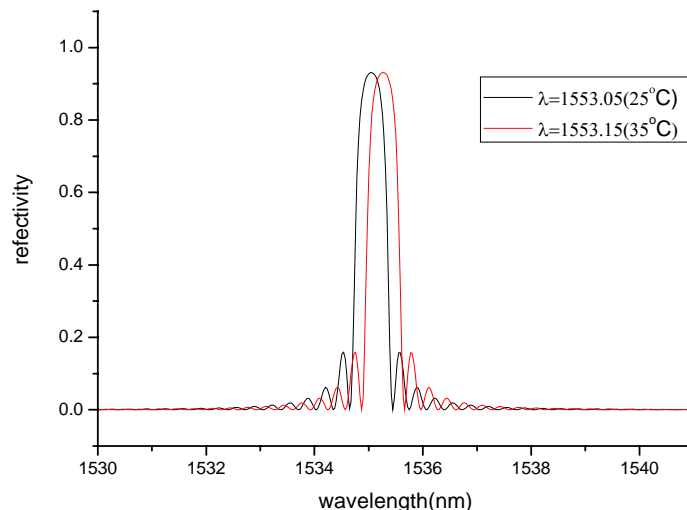


图 3 传感器波长

变而改变。当温度升高或应变增大时，FBG 传感器的峰值波长变长。图 3：如果一个峰值波长 1535.050nm 的传感器从 25°C 加热到 35°C，传感器的峰值波长将增加到 1535.150nm（每 °C 变化 10pm）。大多数 FBG 查询系统工作在 50nm 窗口范围内，从 1520nm 到 1570nm。

#### 2. 传感器带宽

传感器带宽就是每个 FBG 反射峰所对应的带宽。理论上 FBG 的带宽越小测量精度越高，但从实际的制作工艺水平和可行的精度来看，最合理的值应该在 0.2nm 和 0.3nm 之间，通常取 0.25，如图 4 所示。此外一般的解调设备的峰值探测算法通常是在假设带宽为 0.25nm 和谱形为光滑的高斯型的基础上设计出来的，带宽过宽会降低波长测量的准确性。当然其他的带宽和峰型也是可行的，但对波长准确性可能会产生一定的影响。

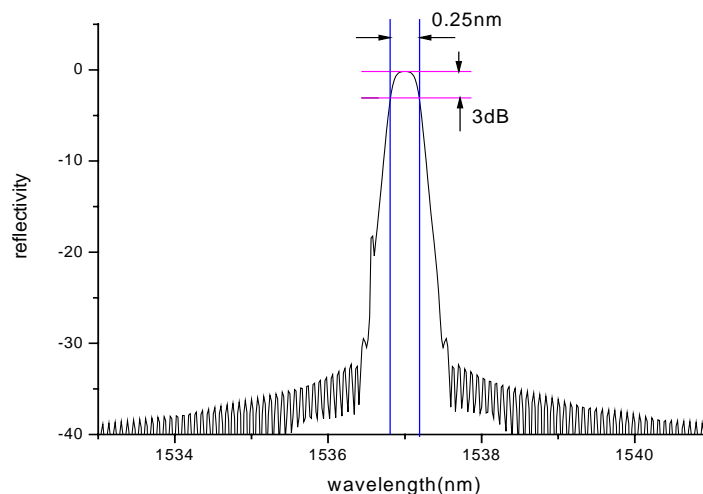


图 4 FBG 的带宽

### 3. 反射率

光纤光栅的反射率越高，返回到测量系统的光功率就越大，相应的测量距离就越长。而且反射率越高，带宽较窄，光栅越稳定。如果反射率越小，噪声对其的影响就越大，对于波长查询仪的工作要求就越高，影响测量精度。为了获得最好的性能，推荐光栅反射率应该 $>90\%$ 。但是，单纯的强调高反射率的同时，也要同时考虑边模抑制。也可以说，反射率决定信号强度，边模抑制决定了信噪比。

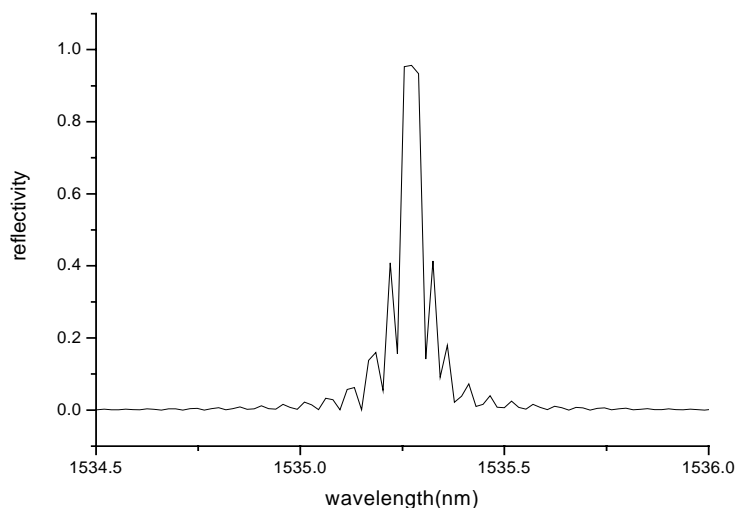


图 5 光纤光栅的反射率

### 4. 边模抑制

对一个两边有许多旁瓣的 FBG 传感器，FBG 查询仪会错误的把某些旁瓣当作峰值。所以一个好的传感器谱图除了要具有一个光滑的峰顶外，光滑的两边也是非常重要的。控制边模，提高边模抑制比需要 FBG 的制造商有较高的工艺水平。但它同时也是决定 FBG 传感性能较重要的一个参数，直接决定了信噪比。在 FBG 反射率大于  $90\%$  的情况下，边模抑制比应高于  $15\text{dB}$ ，高于  $20\text{dB}$  是更理想的。选用高质量的全息相位掩模板，切趾可以平滑传感器的光谱，消除两边的旁瓣，确保边模不会干扰峰值的探测。通常的切趾在短波长方向仍然存在许多旁瓣，切趾补偿技术（使光栅的平均折射率波长一致）是一个已经被证明了的可行的方法，可以消除短波长方向的旁瓣，实现整个光谱上平滑。

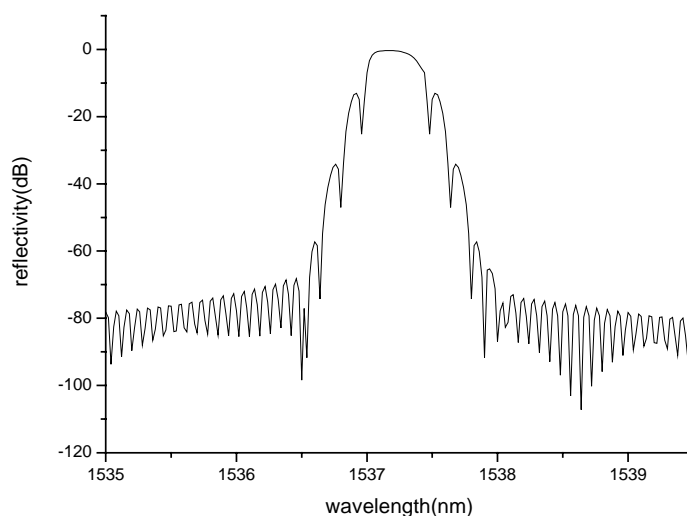


图 6 未切趾

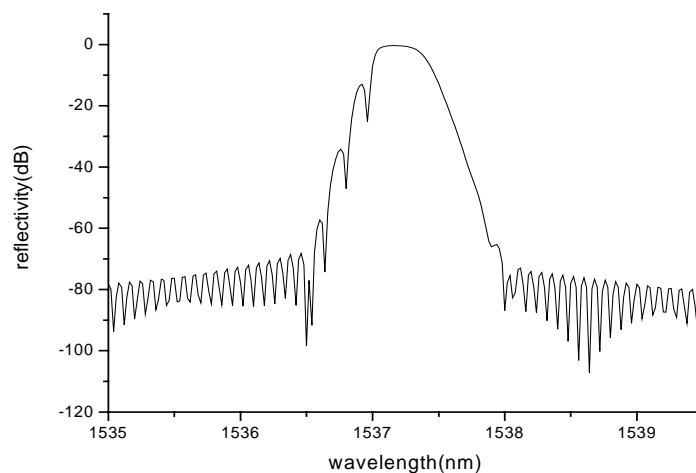


图 7 高斯切趾（未切趾补偿）

目前，光栅写入技术的进步和光学精细度的提高已可以制造出边模抑制比超过 20dB 的光纤光栅，完全满足了 FBG 传感器的要求。下图出示了一个经过高斯切趾后的光纤光栅的反射谱图，其中图 6 未切趾，图 7 未进行切趾补偿，图 8 进行了切趾补偿。

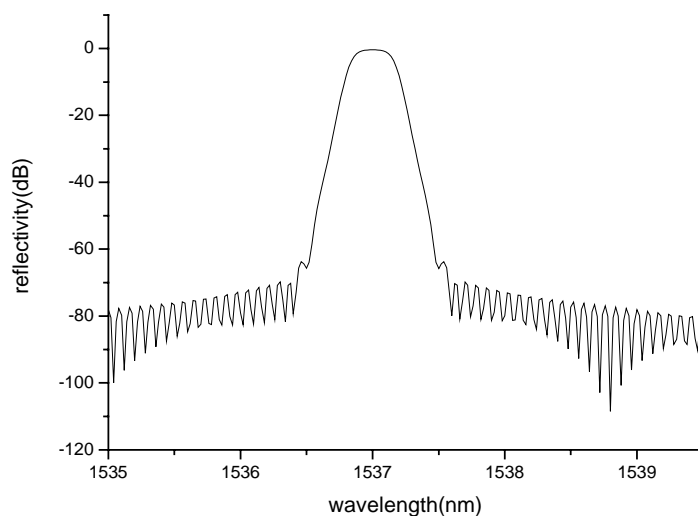


图 8 高斯切趾（切趾补偿）

## 5．传感器的长度

传感光栅的长度决定了测量点的精确程度，理论上光栅的长度越小，测量点越精确。而实际制作光栅时要综合光栅的各种参数，光栅越短，反射率越低，带宽越宽。很短的光栅，其反射率和带宽都很难达到要求，因此要在三者之间做一个中和。所以，对于 0.25nm 的带宽，推荐传感器光栅的物理长度应为 10mm，这个长度适合于大多数应用。当然通过改变带宽，不同的长度也是可以满足一定的要求。

## 6．传感器波长间隔

传感器波长间隔就是两个 FBG 的中心波长的差。FBG 传感器阵列包含了大量传感光栅，因此必须保证能“寻址”每一个光栅，即根据独立变化的中心波长确认每一个光栅。为此，要求每个通道内各个光栅的中心波长  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$  及其工作范围  $\Delta\lambda_1, \Delta\lambda_2, \dots, \Delta\lambda_n$ ，互不重叠，如图 9 所示。所以其中有两个方面需要考虑：传感光栅之间的缓冲区（buffer）和每个传感光栅的探测范围  $\Delta\lambda$ 。而探测范围  $\Delta\lambda$  是由测量范围决定的，测量范围越大，探测范围就越大。例如若测量范围为  $\pm 3000\mu\epsilon$ ，探测范围就为 6nm。每个传感器都需要具有足够的波长漂移的空间以捕捉所期望的应变和温度的变化范围。

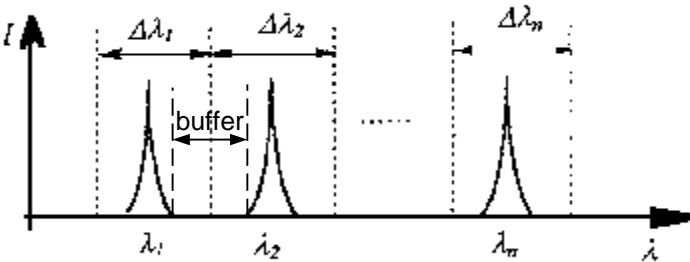


图 9 传感器波长间隔

7. 缓冲区（buffer）

两相邻传感光栅之间必须留有一个缓冲区以保证第一个光栅的最大波长与第二个光栅的最小波长不相交。通常，FBG 制作过程中总存在一些制造误差，一些厂商所标出的传感器中心波长可能存在超过  $\pm 0.5\text{nm}$  的误差，最新的 FBG 自动化写入技术可以使该误差有一个数量级的优化，大约为  $\pm 0.05\text{nm}$ 。现在合理需要是  $\pm 0.1\text{nm}$ ，这个误差必须被加到缓冲区中以确保设计出合适的间隔。此外，当 FBG 传感器用于测量应力测量时，应考虑不同位置的环境温度对各个 FBG 中心波长的产生的变化差，这个影响也应该加到缓冲区中确保更加合理的间隔。

例如：大桥构架上的结构体需要 4 个传感器。传感器 1、2 和 3 牢固的粘在大桥构架上测量应变（和温度）。传感器 4 只测量温度。这个构架上最大的期望应变是  $\pm 1,000\mu\epsilon$ ，最大的温度范围从  $-40^\circ\text{C}$  到  $+80^\circ\text{C}$ 。

参数	测量范围	变换因子	波长范围
应变	$2,000\mu\epsilon$	$1.2\text{pm}/\mu\epsilon$	2.4nm
温度	$120^\circ\text{C}$	$10\text{pm}/^\circ\text{C}$	1.2nm
传感器间缓冲区			0.5nm
传感器制作误差( $\pm 0.1\text{nm}$ )			0.2nm
最小波长间隔			4.3nm

通常，推荐对所有阵列传感器波长的间隔为 5nm，这可以满足大多数应用范围，每个阵列可以提供 8-10 个传感器。当更多的传感器被需要时，一个方法就是减小波长间隔(但要注意测量范围)。例如，如果一个阵列中的所有传感器对应变的敏感相似，相邻传感器间的相对波长变化就非常的小，则波长间隔可以被大大的减小。

所以，要综合传感器数、传感器波长间隔、缓冲区和测量范围几个方面，以达到所需的要求。

8. 退火

通常情况，未经退火的 FBG 的稳定性很差，其中心波长会随着时间的推移有所变化，而且反射率会有所下降。实验发现，经过退火处理后的光纤光栅虽然在处理前后中心波长有一个

微小的减小，但是处理以后中心波长将不再随着时间的推移而有所改变，且温度和应力的特性仍然保持着良好的线性关系，并没有影响 FBG 的传感特性。因此，退火处理不但可以消除光栅的结构缺陷，而且也是制作性能稳定的光纤光栅的重要步骤，可以保证光纤光栅正常工作 15 年以上。

**其它应注意的问题：**

1. 在选择 FBG 传感器阵列时，应尽量选择反射率一致的 FBG，这样可以避免次峰和伴模对传感器波长查询仪的干扰。
2. 目前 FBG 生产商提供的 FBG 反射谱图，一般是用光谱分析仪（OSA）测量得出的，其测量精度比较低（在 10pm-30pm 之间），光谱的许多细节不能真实的被反映，许多边模不能够被显示。在高精度 FBG 传感系统中，应考虑制造商的测试设备与工艺水平。建议用高精度的可调谐激光器测量出的谱图做参考。
3. 纵观 FBG 的制造及工艺，共有二十几个相关的专利，包括相位掩模技术、载氢技术，以及 FBG 的退火与老化等等。这些专利技术，大多数由加拿大政府和美国运用技术公司拥有，有专门的知识产权部门负责推广和颁发执照。建议在选择 FBG 时，选择那些被授权的公司的产品。特别是在有重大意义的工程项目中，避免产生负面影响。