

文章编号 1004-924X(2015)04-0956-09

基于同轴光子带隙晶体的应变传感器

史鹏飞, 高仁璟*, 刘书田

(大连理工大学 运载工程与力学学部 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116023)

摘要: 基于微波网络理论, 提出了一种基于变绝缘层的同轴光子带隙晶体应变传感器的设计方法。给出了同轴光子带隙晶体传感器的结构形式, 推导了传感器带隙极值频率与晶体电长度之间的关系。根据给定监测频点设计了传感器的几何尺寸及材料参数, 计算了传感器的 S 参数, 计算结果与仿真结果相吻合。分析了提高该传感器灵敏度和品质因数的方法, 并搭建了实验测试平台。实验结果表明: 当应变由 $0 \mu\epsilon$ 提高至 $10\,000 \mu\epsilon$ 时, 极值频率由 2.450 GHz 移至 2.432 GHz , 频移量为 18 MHz , 灵敏度为 $1.8 \text{ kHz}/\mu\epsilon$ 。得到的实验结果与仿真结果相吻合, 验证了本文所提出的基于变绝缘层的同轴光子带隙晶体应变传感器设计方法的可行性和有效性。该传感器可满足不同灵敏度需求下对应变的实时监测。

关键词: 同轴光子带隙晶体; 应变传感器; 变绝缘层; 特性阻抗

中图分类号: TP212.12 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152304.0956

Strain sensor based on coaxial photonic band gap crystal

SHI Peng-fei, GAO Ren-jing*, LIU Shu-tian

(State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Faculty of Vehicle Engineering and Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

* Corresponding author, E-mail: renjing@dlut.edu.cn

Abstract: According to microwave network theory, a coaxial photonic band gap crystal strain sensor was proposed based on a variable insulating layer. The model of the coaxial photonic band-gap crystal sensor was provided, and the relationship between the peak frequency of band gap and the electric length of the crystal was deduced. The structural size and the material parameters of the coaxial photonic band gap crystal sensor under a certain demand were designed. The S parameters were calculated, and they are well coincided with that from a simulation. The method for improving the sensitivity and quality factor of the sensor was analyzed and an experimental platform was set up. The experimental result shows that when the strain changes from $0 \mu\epsilon$ to $10\,000 \mu\epsilon$, the peak frequency of the band gap is changed from 2.450 GHz to 2.432 GHz , in which the frequency shift is 18 MHz , and the sensitivity is $1.8 \text{ kHz}/\mu\epsilon$. The simulation results coincide with the experimental one, and validate the feasibility of the designing method of the strain sensor.

Key words: coaxial photonic band gap crystal; strain sensor; variable insulating layer; characteristic impedance

收稿日期: 2014-09-24; 修订日期: 2014-11-25.

基金项目: 国家 973 重点基础研究发展计划资助项目 (No. 2011CB610304); 国家自然科学基金资助项目 (No. 11172052, No. 11372063, No. 11332004); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (No. 2342013DUT13RC(3)28)

1 引言

大型设备运行期间的结构疲劳和损伤程度、材料及结构特性等微小变化的实时准确监测,对保证设备的长期安全运转至关重要,因此研究与设计能够用于实时监测的高灵敏度、高可靠性传感器成为重要的研究课题。近年来,研究人员利用布拉格光纤光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)的波长漂移特性,设计了用于结构状态监测的FBG应变传感器^[1-4]。但FBG传感器存在自身易碎且形变量偏小的缺点,在进行大应变监测中显得力不从心。2011年,Xiao和Fan等人将FBG的概念应用到同轴线上,在同轴线外导体和绝缘层上钻周期性孔阵列,利用其频率偏移特性设计了应变传感器,并将其称为电栅^[5-7]。在电栅传感器设计中,电栅缺陷被视为一个反射面,并假设缺陷非常窄;但实际上电栅缺陷为有限宽度,其前侧和后侧存在双重反射,从而使其频域中的谐振峰值会出现双峰值分离现象,给准确读出监测频点带来困难。另外,这种电栅传感器自身存在物理结构上的缺陷,即其开口位置处有漏波。此外,电栅的存在降低了传感器的防潮防腐能力。

光子带隙晶体是具有光子带隙特性的人造电介质材料,在某一频段对电磁波具有阻带作用,可通过合理布置材料及结构来实现^[8-10]。将同轴线作为基本元件,在其绝缘层进行拓扑设计可实现同轴线阻抗不连续,从而在微波波段设计出光子带隙晶体结构^[11-13]。利用基于同轴线的光子带隙晶体取代电栅进行应变监测,在获得监测频点与应变对应关系的同时,不会出现双反射现象,有效地解决了电栅带隙双峰值分离的问题。

对均匀同轴线进行拓扑布局设计可获得所需要的同轴光子带隙晶体结构的应变监测传感器。本文基于微波网络理论,提出了一种基于变绝缘层的同轴光子带隙晶体应变传感器的设计方法,建立了传感器带隙极值频点与应变之间的关系,设计了给定频段的应变传感器,推导了传感器带隙及传感特性。最后通过仿真与实验验证了本文提出的光子带隙晶体应变传感器设计方法的可行性和有效性。

2 光子带隙晶体结构及应变测量原理

如果一段传输介质等效阻抗连续,在频域中它不会对入射电磁波产生强的反射,S参数不会产生幅度和相位的突变。但在阻抗连续介质中沿波传播方向嵌入一阻抗不连续介质后,在嵌入区域连接面上会产生阻抗不连续面,在阻抗不连续面上将产生波的反射,反射强度由阻抗不连续程度决定^[6,14]。

如果阻抗不连续面处阻抗变化小,该面反射系数就小。若只考虑波在阻抗不连续面产生一次反射,忽略不连续面处的多重反射(如图1所示),传输线入射端口(00面)的反射系数可表示为^[14]:

$$\Gamma_{\text{sum1}} = \Gamma_0 + \Gamma_1 e^{-2j\beta l_1}, \quad (1)$$

其中: l_1 为嵌入的阻抗不连续介质的长度; β_1 为阻抗不连续区域的相移常数(相移常数 β 为频率的函数, $\beta = 2\pi f \sqrt{\epsilon_i}/c_0$, c_0 为真空中的光速, ϵ_i 为嵌入材料的介电常数); Γ_0 和 Γ_1 分别为两个阻抗不连续面(00面和11面)的反射系数,可由反射系数定义 $\Gamma = (Z_L - Z_0)/(Z_L + Z_0)$ 求得^[14-15]。反射系数的幅值随频率变化,在频点 f_{peak} 处会产生一个反射系数的极大值,并产生以此频点为中心的带隙。

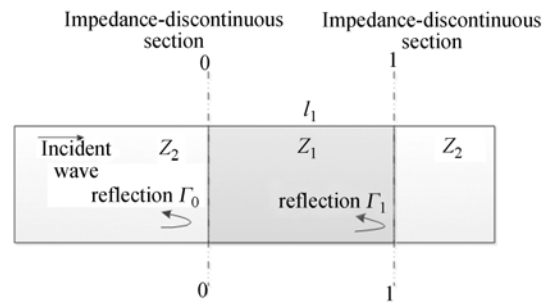


图1 不考虑多重反射情况下介质阻抗不连续面的反射形式

Fig. 1 Reflection on impedance-discontinuous sections without consideration of multi-reflection between the two sections

将这种阻抗不连续结构沿波传播方向周期排列,便构成了光子带隙晶体,如图2所示。入射端口处反射系数的幅值随频率的变化而变化, f_{peak} 处反射系数的带隙特性最强。设终端负载阻抗为 Z_2 ,阻抗不连续面两侧材料的等效阻抗变化很小,此时可忽略多重反射, n 个周期级联的光子带

隙晶体在入射端口处(00 面)的总反射系数为^[14]:

$$\Gamma_{\text{sum}} = \sum_{m=0}^{n-1} \Gamma_0 e^{-j4m\beta_1 l_1} + \sum_{m=0}^{n-1} \Gamma_1 e^{-j(2+4m)\beta_2 l_2}, \quad (2)$$

式中: β_1 和 β_2 为两种介质中波的相移常数, l_1 和 l_2 为波在两种介质中沿波传播方向的传播长度。

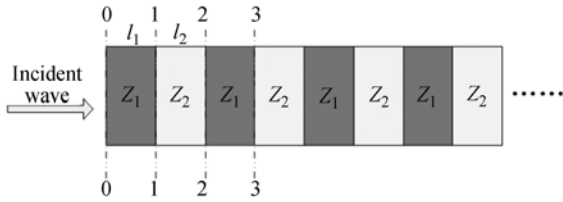


图 2 周期排列光子带隙晶体结构

Fig. 2 Structure of periodic photonic band gap crystal

图 2 中, Z_1 和 Z_2 为两段不相等的等效阻抗。这种光子带隙晶体的反射系数幅值随频率的变化而变化,并且在特定频点会产生带隙极值。通过设计入射端口的反射系数 Γ 、每节传输介质的相移常数 β 以及每节长度 l ,可在特定频带产生带隙。在光子晶体材料参数确定的情况下,特定极值频点随每节晶体长度的变化而变化,因此可以建立光子带隙晶体反射系数峰值频率与每节长度 l 的关系。在外部施加应力时,光子带隙晶体会产生应变,可通过检测带隙极值频点的偏移来实现应变量检测,这便是基于光子带隙晶体检测应变的原理。

3 同轴光子带隙晶体应变传感器设计

同轴光子带隙晶体可由两节不同绝缘层介质的同轴电缆交替串接而成,每节同轴电缆的内外径相同。电缆结构如图 3 所示,00—11 节和 11—22 节的绝缘层记为材料 1 和材料 2。保证 11—22 节的特性阻抗与外部测试端阻抗匹配。将 00—11—22 组合结构称为一个光子带隙晶体周期。 $\epsilon_i (i=1,2)$ 和 $\mu_i (i=1,2)$ 分别为同轴线绝缘层填充介质的介电常数和磁导率, a, b 分别为绝缘层内外导体的直径。同轴线的特性阻抗为^[14]:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_i \ln(b/a)}{\epsilon_i}}. \quad (3)$$

每节同轴线的特性阻抗由绝缘层填充介质和同轴线结构决定,在同轴线内外直径相同的情况下,使用不同的绝缘介质,便会形成阻抗不连续的

传输线,进而形成同轴光子带隙晶体,并在特定频段产生带隙。

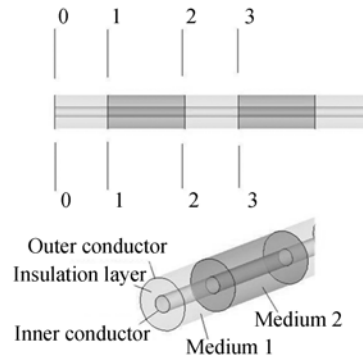


图 3 同轴光子带隙晶体传感器结构

Fig. 3 Structure of coaxial photonic band gap crystal sensor

同轴光子带隙晶体介质不连续处阻抗的匹配程度决定了同轴线反射系数的幅值,光子晶体每节长度 l 决定了反射系数峰值随频率的变化关系,而输入端口处反射系数 Γ 幅值的设计是对端口阻抗匹配程度的设计,因此可根据每节传输电线的长度来设计反射系数峰值随频率的变化关系。为了使每个阻抗不连续面产生的极值频点相同,设计需要对每节同轴线选择合适的长度,使它们产生的总反射系数同向叠加,定义 00—11 节和 11—22 节电长度相同,并为一阶带隙极值频率对应波长的四分之一^[12-13],即 $\theta_1 = \theta_2$ 。设 u_{wav} 为波在同轴线中的传播速度, f 为带隙峰值频率,任意一节光子晶体段的长度为:

$$l = \frac{u_{\text{wav}}}{4f} = \frac{c_0}{4f\sqrt{\epsilon_i}}. \quad (4)$$

根据绝缘层中介质 1 和介质 2 的介电常数 ϵ_1 和 ϵ_2 便可获得两节同轴光子带隙晶体的长度 l_1 和 l_2 。

同轴光子带隙晶体应变传感器在监测应变时,对它施加轴向方向的外部拉伸会引起同轴光子带隙晶体电长度的变化以及极值频点的偏移,极值频点的偏移量对应特定的应变量。同轴光子带隙晶体为一个微波双端口网络,其特性阻抗等于负载阻抗(即输出端匹配),此时反射系数与双端口网络的 S_{11} 参数等价,即 $S_{11} = \Gamma$ 。设拉伸前后绝缘层的介电常数分别为 ϵ_{i0} 和 ϵ_{i1} ,监测频点由初始监测频点 f_0 移至 f_1 ,频移量为 Δf ,传感器每节长度由 l 变化至 l_{strain} 。应变 ϵ_{strain} 可表示为:

$$\epsilon_{\text{strain}} = \frac{f_0}{f_1} \sqrt{\frac{\epsilon_{i0}}{\epsilon_{i1}}} - 1. \quad (5)$$

由于外部拉伸引起的绝缘层材料的介电常数变化很小,应变可近似表示为: $\epsilon_{\text{strain}} = -\Delta f / (f_0 + \Delta f)$ 。考虑到极值频点的偏移量 Δf 相对于工作频率 f_0 来说是一个很小的量,因此,应变与极值频点的偏移量之间的关系可近似为:

$$\epsilon_{\text{strain}} \approx -\frac{\Delta f}{f_0}. \quad (6)$$

通过监测同轴光子带隙晶体的带隙极值频移量可以得到对应的应变变量,从而实现结构健康监测。

定义光子带隙晶体应变传感器的灵敏度为单位应变变化引起的监测频率偏移。根据式(5)可将传感器的灵敏度表示为:

$$\frac{\Delta f}{\Delta \epsilon_{\text{strain}}} = -f_0 \frac{1}{\Delta \epsilon_{\text{strain}}} \frac{1}{(1 + \Delta \epsilon_{\text{strain}})} \left(1 + \Delta \epsilon_{\text{strain}} - \sqrt{\frac{\epsilon_{i0}}{\epsilon_{i1}}}\right). \quad (7)$$

考虑到应变变化远小于 1 以及小范围的应变拉伸引起的绝缘层介电常数变化很小,式(7)可近似为:

$$\frac{\Delta f}{\Delta \epsilon_{\text{strain}}} \approx -f_0. \quad (8)$$

由式(8)可知,传感器的灵敏度只与初始定义的监测频率有关,其值为初始监测频率 f_0 。监测频率越高,则传感器的灵敏度越高。

传感器的品质因数 Q 定义为监测中心极值频率与其幅度下降 3 dB 频率带宽的比值,即:

$$Q = \frac{f_0}{2(f_{3\text{dB}} - f_0)}. \quad (9)$$

品质因数体现了光子带隙晶体传感器 S 参数监测峰值的尖锐程度。

4 计算与仿真验证

为了验证本文提出的基于同轴光子带隙晶体应变传感器设计的可行性,以标准同轴线 syv50-3 为例设计了同轴光子带隙晶体应变传感器。定义传感器的负载阻抗为 50Ω , 11-22 节特性阻抗与其相等。同轴线内外导体均为铜导体,绝缘层内外直径分别为 0.9 mm 和 2.95 mm。00-11 节绝缘介质的介电常数为 2.6; 11-22 节介质的介电常数为 2.2, 两节同轴晶体形成了同轴光子带隙晶体结构。设传感器的初始监测频点 f_0 为

2.5 GHz, 由式(4)计算得到两节同轴光子带隙晶体的长度分别为 $l_1 = 18.6 \text{ mm}$, $l_2 = 20.2 \text{ mm}$ 。改变两节同轴光子带隙晶体的长度可改变传感器的极值频点。应用微波网络理论计算传感器的 S 参数。

确定传感器的初始长度后,两节同轴线的电长度可表示为 $\theta = \beta_1 l_1 = \beta_2 l_2$ 。考虑波的多重反射,此同轴光子带隙晶体 00-11 节的反射系数为^[14]:

$$\Gamma = \Gamma_0 - (1 + \Gamma_0) \Gamma_0 (1 - \Gamma_0) e^{-2j\theta} \sum_{n=0}^{\infty} \Gamma_1^n \Gamma_1^n e^{-2jn\theta} = \frac{\Gamma_0 + \Gamma_1 e^{-2j\theta}}{1 - \Gamma_0^2 e^{-2j\theta}}, \quad (10)$$

式中: $\Gamma_1 = -\Gamma_0$ 。同理可求得 11-22 节的反射系数。当阻抗不连续面两侧的阻抗差值较小时,即 $\Gamma_0^2 \ll 1$, 式(10)可简化为式(1)。 $S_{11} = \Gamma$, S_{21} 为^[14]:

$$S_{21} = \frac{(1 - \Gamma_0^2) e^{-2j\theta}}{1 - \Gamma_0^2 e^{-2j\theta}}. \quad (11)$$

当多个周期同轴光子带隙晶体串联时, S 矩阵转换为 T 矩阵^[14]:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \frac{1}{S_{21}} & \frac{-S_{11}}{S_{21}} \\ \frac{S_{11}}{S_{21}} & \frac{S_{21}^2 - S_{11}^2}{S_{21}} \end{bmatrix}. \quad (12)$$

定义 00-11 和 11-22 节的传输矩阵分别为 \mathbf{T}_{ins1} 和 \mathbf{T}_{ins2} 。 \mathbf{T}_{ins1} 与 \mathbf{T}_{ins2} 间由于阻抗不连续存在一个阻抗转换矩阵,可表示为:

$$\mathbf{T}_{\text{joint}} = \begin{bmatrix} \frac{r+1}{2\sqrt{r}} & \frac{r-1}{2\sqrt{r}} \\ \frac{r-1}{2\sqrt{r}} & \frac{r+1}{2\sqrt{r}} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

式中: r 为同轴光子晶体串联处右侧特性阻抗与左侧特性阻抗的比值。设在 11 面和 22 面处的阻抗转换矩阵分别为 $\mathbf{T}_{\text{joint1}}$ 和 $\mathbf{T}_{\text{joint2}}$, 那么 n 个周期同轴光子带隙晶体串联所得的矩阵为:

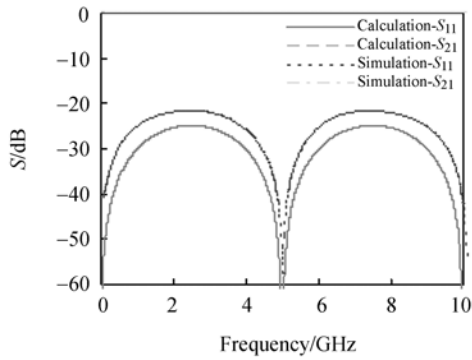
$$\mathbf{T}_{\text{total}} = \mathbf{T}_{\text{ins1}} (\mathbf{T}_{\text{joint1}} \mathbf{T}_{\text{ins2}} \mathbf{T}_{\text{joint2}} \mathbf{T}_{\text{ins1}})^{n-1} \mathbf{T}_{\text{end}}, \quad (14)$$

其中: $\mathbf{T}_{\text{end}} = \begin{bmatrix} e^{j\theta_2} & 0 \\ 0 & e^{-j\theta_2} \end{bmatrix}$ 。最终将 T 矩阵转换为 S 矩阵。

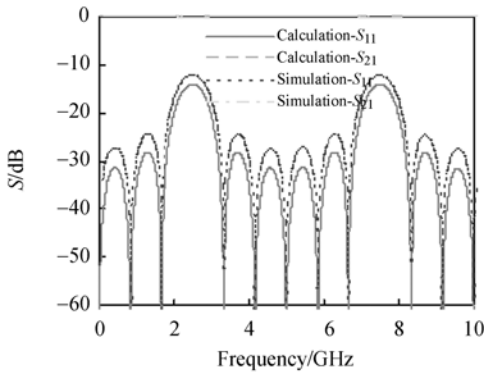
当 $\Gamma^2 \ll 1$ 时, n 个周期串联的同轴光子带隙晶体 S_{11} 参数可简化为式(2)。应用式(10)~式(14)计算得到传感器的 S 参数,如图 4 所示(彩图见期刊电子版)。图 4(a)~图 4(d)分别为不同周期数串联的传感器 S 参数曲线。在 2.5 GHz 监测频点处 S_{11} 出现极大值, S_{21} 出现极小值,以

2.5 GHz为基频 f_0 , 在 $(2m+1)f_0$ 频率处周期性出现带隙极值。计算中未考虑同轴线损耗。

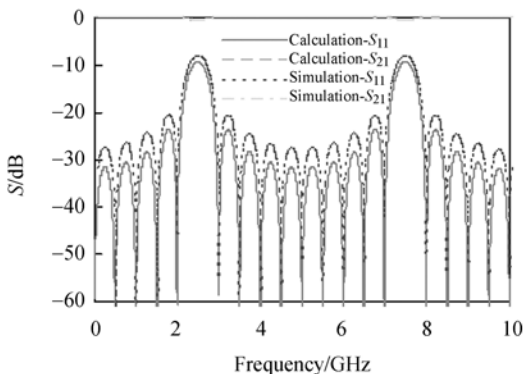
应用有限元仿真软件 Ansoft HFSS 对设计的传感器进行了仿真验证。使用波端口激励, 内导体为铜, 外导体为完美电导体。每步迭代收敛误差 ΔS 为 0.005, 初始网格单元大小 Λ 为 0.333 3, 每步迭代网格数量最多增加30%。由图4



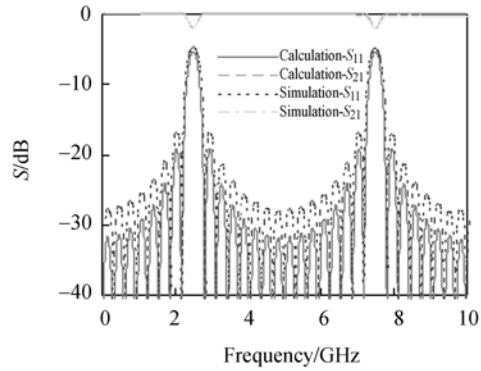
(a) 单周期传感器 S 参数
(a) S parameters of sensor with 1 period



(b) 3 周期传感器 S 参数
(b) S parameters of sensor with 3 periods



(c) 5 周期传感器 S 参数
(c) S parameters of sensor with 5 periods



(d) 8 周期传感器 S 参数

(d) S parameters of sensor with 8 periods

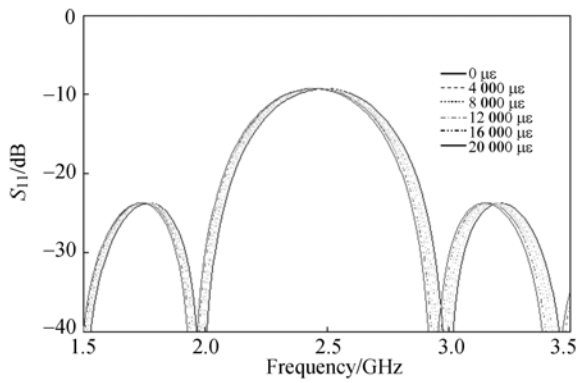
图 4 同轴光子带隙晶体传感器的 S 参数曲线

Fig. 4 Curves of S parameters of coaxial photonic band gap crystal sensors for various periods

可以看出, 仿真结果与计算结果相吻合。由于同轴线外导体存在趋肤效应, 带隙光子晶体存在损耗, 损耗随频率的增大而增大, 损耗与无损耗峰值相加会使峰值稍有偏移, 因此选择低频极值峰为光子带隙晶体传感器的监测频点。

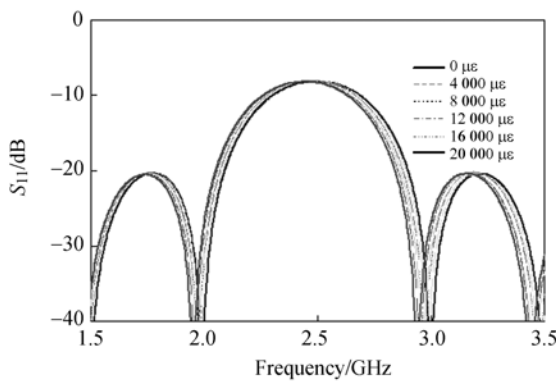
将 5 个周期的同轴光子带隙晶体级联。以 $2\ 000\ \mu\epsilon$ 为步长将应变由 $0\ \mu\epsilon$ 增加到 $20\ 000\ \mu\epsilon$, 理论计算得到的 S_{11} 变化曲线如图 5(a) 所示, 数值仿真得到的 S_{11} 曲线如图 5(b) 所示。带隙出现在 2.5 GHz 附近, 随着外部拉伸带隙极值频点向低频方向移动, 理论计算与数值仿真所得的带隙极值频点的偏移与应变之间的关系如图 5(c) 所示。当应变由 $0\ \mu\epsilon$ 增加到 $20\ 000\ \mu\epsilon$ 时, 计算所得的极值频率由 2.502 GHz 变化至 2.453 GHz, 频移量为 49 MHz, 灵敏度约为 $2.5\ \text{kHz}/\mu\epsilon$; 而数值仿真所得的极值频率由 2.492 GHz 变化至 2.446 GHz。在应变较大时, 频移与应变的关系近似线性, 误差为 $\Delta f/f_0 - \Delta f/f_1$ 。

以 5 周期同轴光子带隙晶体应变传感器为例, 根据计算结果分析传感器的灵敏度和品质因数。当初始监测频点由 2 GHz 变化至 3 GHz 时, 传感器的灵敏度随之升高, 如图 6 所示。传感器不同监测频率与同轴光子晶体长度的关系如表 1 所示。



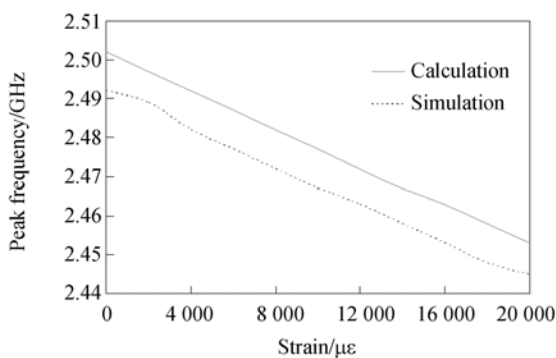
(a)理论计算所得 S_{11} 参数随应变的变化曲线

(a) S_{11} parameter as a function of stretching strain by theoretical calculation



(b)数值仿真所得 S_{11} 参数随应变的变化曲线

(b) S_{11} parameter as a function of stretching strain by simulation



(c) S_{11} 极值频率随应变的变化关系

(c) Relation between peak frequency and strain

图 5 带隙极值与应变的关系曲线

Fig. 5 Relation curves between peak frequency of band gap and strain

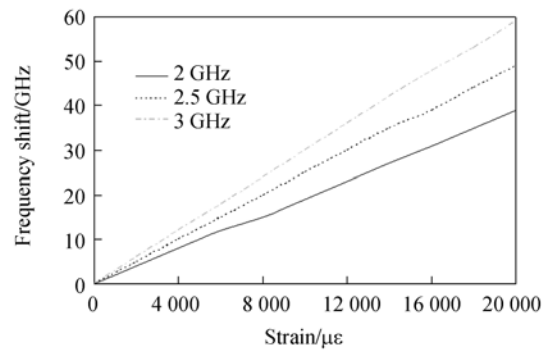


图 6 不同初始监测频率下应变传感器灵敏度

Fig. 6 Sensitivity of strain sensor at different monitoring frequencies

表 1 不同监测频率与同轴光子晶体长度的关系

Tab. 1 Relation between monitoring frequency and length of coaxial photonic crystal

| 频率/GHz | 00-11 节长度/mm | 11-22 节长度/mm |
|--------|--------------|--------------|
| 2 | 23.3 | 25.3 |
| 2.5 | 18.6 | 20.2 |
| 3 | 15.5 | 16.9 |

如图 7 所示(彩图见期刊电子版),改变 00-11 和 11-22 节材料间介电常数的差值可改变传感器的品质因数,在此固定 11-22 材料的介电常数不变,将 00-11 介电常数由 3.2 变化至 2.4,可以发现传感器的峰值尖锐程度得到提高,因此传感器的品质因数得到了提高,如表 2 所示。

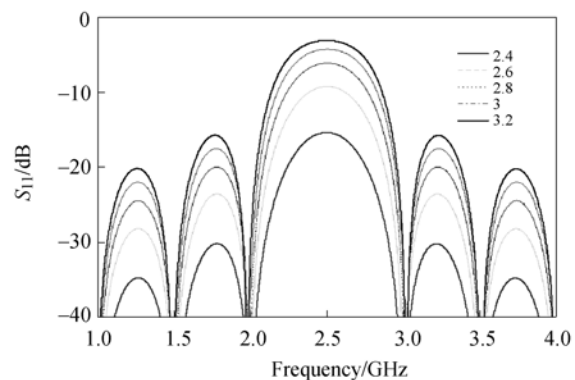


图 7 绝缘层材料介电常数变化引起的 S_{11} 参数变化

Fig. 7 Variation of S_{11} parameters of coaxial sensor with permittivity of insulating medium

表 2 不同介电常数材料对应的 3 dB 频带范围及品质因数
Tab. 2 Three decible bandwidth and quality factor of strain sensor with different permittivities of insulating medium

| 介电常数 | 00-11 节长度/mm | 3dB 频率 /GHz | 3dB 带宽 /GHz | 品质因数 |
|------|--------------|-------------|-------------|------|
| 2.4 | 19.4 | 2.286-2.710 | 0.424 | 5.89 |
| 2.6 | 18.6 | 2.279-2.723 | 0.444 | 5.64 |
| 2.8 | 17.9 | 2.266-2.739 | 0.473 | 5.48 |
| 3.0 | 17.3 | 2.248-2.756 | 0.508 | 4.93 |
| 3.2 | 16.8 | 2.225-2.771 | 0.546 | 4.58 |

5 实验验证

实验中,使用 syv50-3 同轴线制作了同轴光子带隙晶体应变检测传感器。传感器的半径、长度等几何尺寸参数与仿真验证传感器的尺寸参数相同。00-11 节绝缘介质使用介电常数为 2.6 的绝缘胶布(成分包含橡胶、沥青等)。11-22 节绝缘层为原同轴线绝缘材料,即聚乙烯,介电常数为 2.2。两种材料间用少量氰基丙烯酸乙酯粘结。使用原同轴线的内外导体及外层护套,两种

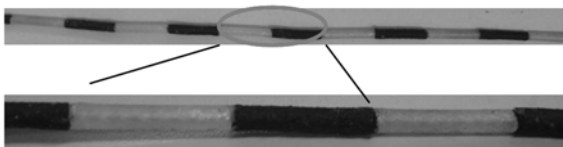


图 8 介质不连续结构实物图

Fig. 8 Discontinuous insulating medium of testing specimen

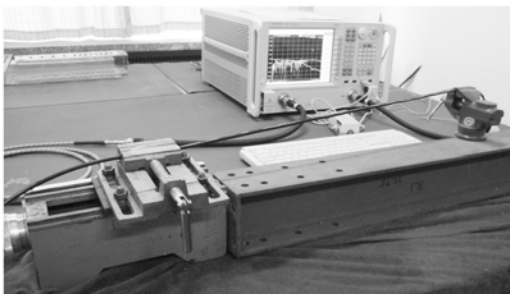


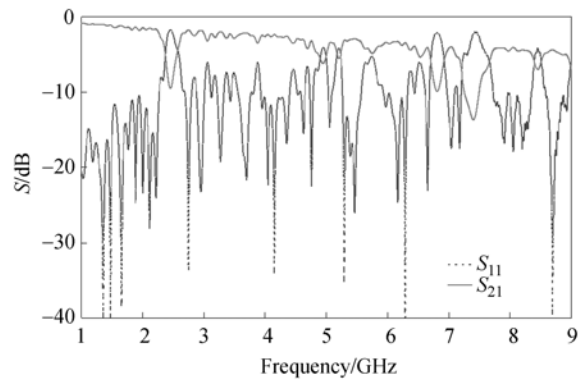
图 9 同轴光子带隙晶体传感器的实验拉伸平台

Fig. 9 Experimental stretching platform of sensor based on coaxial photonic band gap crystal

材料串接而成的绝缘层结构如图 8 所示。

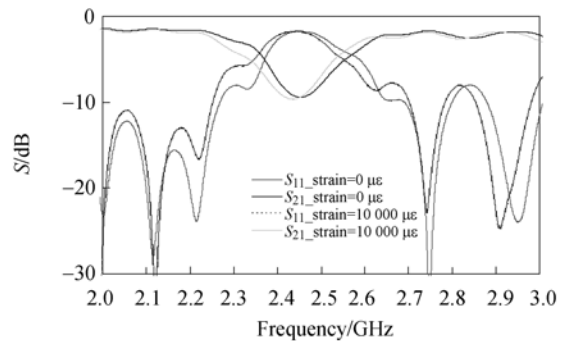
所制作的同轴光子带隙晶体包含 15 个周期,两侧安装 sma 接头。将传感器与矢量网络分析仪(Agilent N5242A)连接,读取传感器 S 参数,并获得 S 参数的极值频率。对传感器进行拉伸测试,拉伸平台如图 9 所示,可从平台上的螺旋测微器读取拉伸应变变量,这样便可以获得一定应变下所对应的 S 参数极值频点。

图 10(a)为拉伸前所测得的传感器 S 参数,图中 S_{11} 的极大值和 S_{21} 的极小值出现在 2.450 GHz,并且周期性出现在 7.41 GHz 和 12.20 GHz 位置。当拉伸传感器应变由 $0 \mu\epsilon$ 变化至 $10\,000 \mu\epsilon$ 时,频点由 2.450 GHz 偏移至 2.432 GHz。拉伸过程 S 参数的变化曲线如图 10(b)所示,应变与频点的对应关系如图 10(c)所示。实验结果与理论分析结果相符。



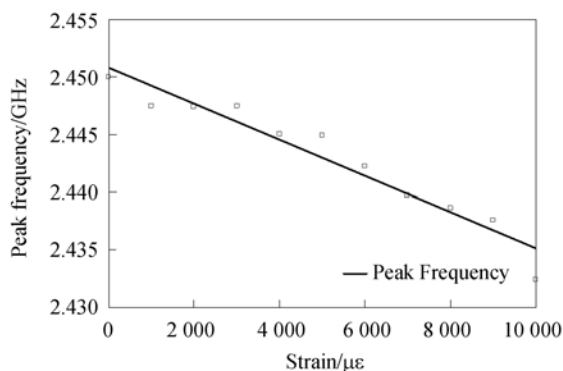
(a)实验测得的传感器初始 S 参数曲线

(a) S parameters of coaxial sensor without stretching tested from experiment



(b) 拉伸时 S 参数的平移

(b) S parameters shifted with different strains



(c) 实验测得的极值频率随应变的变化

(c) Peak-frequency shift at different strains from experiment

图10 实验测得的S参数随应变的变化

Fig. 10 Relationship between S parameters and strain from experiment

参考文献:

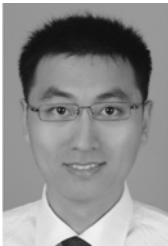
- [1] MELTZ G, MOOREY W W, GLENN W H. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method [J]. *Opt. Lett.*, 1989, 14(15):823-825.
- [2] 吴晶,吴晗平,黄俊斌,等.用于传播结构监测的大量程光纤布拉格光栅应变传感器[J].*光学精密工程*,2014,22(2):311-317.
WU J, WU H P, HUANG J B, *et al.*. Large range FBG sensor for ship structure health monitoring[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(2): 311-317. (in Chinese)
- [3] 王宏亮,宋娟,冯德全,等.应用于特殊环境的光纤光栅温度压力传感器[J].*光学精密工程*,2011,19(3):545-551.
WANG H L, SONG J, FENG D Q, *et al.*. High temperature-pressure FBG sensor applied on special environments[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(3):545-551. (in Chinese)
- [4] 吴俊,陈伟民,章鹏,等.粘接层弹性模量对光纤Bragg光栅传感器应变传递性能的影响[J].*光学精密工程*,2011,19(12):2941-2946.
WU J, CHEN W M, ZHANG P, *et al.*. Influence of bond layer characteristics on strain sensing properties of FBG sensors[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(12):2941-2946. (in Chinese)
- [5] WEI T, WU S, HUANG J, *et al.*. Coaxial cable Bragg grating[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, 99: 113517.
- [6] HUANG J, WEI T, LAN X, *et al.*. Coaxial cable Bragg grating sensors for large strain measurement with high accuracy [J]. *SPIE*, 2012, 8345: 83452Z.
- [7] HUANG J, WANG T, HUA L, *et al.*. A coaxial cable Fabry-Perot interferometer for sensing applications[J]. *Sensors*, 2013, 13:15252-15260.
- [8] YABLONOVITCH E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, 58(20):2059-2062.
- [9] FU J X, LIAN J, LIU R J, *et al.*. Unidirectional channel-drop filter by one-way gyromagnetic photonic crystal waveguides[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, 98:211104.
- [10] BREEZE J, OXBORROW M, ALFORD N M. Better than Bragg: optimizing the quality factor of resonators with aperiodic dielectric reflectors[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, 99:113515.

6 结论

本文以改变同轴线绝缘层的方式实现了一种新型同轴光子带隙晶体应变传感器。首先分析了传感器的带隙极值频点与晶体电长度的对应关系,以2.5 GHz监测频点为例设计了光子带隙晶体应变监测传感器。理论推导了不同周期光子晶体的带隙及传感特性,仿真结果与计算结果相吻合。提高初始监测频点可提高传感器的灵敏度,减小阻抗失配程度可以改善传感器的品质因数。最后制作了实验试件并搭建了实验测试平台,实验结果表明:当应变由0 $\mu\epsilon$ 变化至10 000 $\mu\epsilon$ 时,检测频点由2.450 GHz变化为2.432 GHz,验证了本文所提出的基于同轴光子带隙晶体设计应变传感器的可行性与有效性。该传感器可在不同的灵敏度需求下进行应变实时监测。

- [11] HACHE A, POIRIER L. Anomalous dispersion and superluminal group velocity in a coaxial photonic crystal: theory and experiment[J]. *Phys. Rev. E*, 2002, 65:036608.
- [12] SANCHEZ-LOPEZ M M, DAVIS J A, CRABTREE K. Coaxial cable analogs of multilayer dielectric optical coatings[J]. *Am. J. Phys.*, 2003, 71:1314-1319.
- [13] MUNDAY J N, ROBERTSON W M. Slow electromagnetic pulse propagation through a narrow transmission band in a coaxial photonic crystal[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, 83(5):1053-1055.
- [14] POZAR D M. *Microwave Engineering* [M]. 4th ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2012.
- [15] WALKER L R, WAX N. Non-uniform transmission lines and reflection coefficients[J]. *J. Appl. Phys.*, 1946, 17:1043-1045.

作者简介:



史鹏飞(1983—),男,吉林省吉林市人,博士研究生,2008年于大连理工大学获得学士学位,主要从事计算电磁学、结构健康监测等方面的研究。E-mail: pfshi@aliyun.com



高仁璟(1964—),女,山东烟台人,博士,教授,2011年于大连理工大学获得博士学位,主要从事电磁超材料、生物传感器、结构健康监测等方面的研究。E-mail: renjing@dlut.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)