

基于电光聚合物缺陷光子晶体的脉冲电场测量技术

李仙丽¹,王冬冬²,李向龙¹,赵校庆¹,张航¹,张崎²,江云峰²

(1. 西安电子科技大学电子装备结构设计教育部重点实验室,陕西西安 710071;
2. 中国舰船研究设计中心电磁兼容性国防科技重点实验室,湖北武汉 430064)

摘要: 针对幅值强、频带宽、持续时间短等脉冲电场测量需求,本文提出一种基于电光聚合物缺陷光子晶体的全介质脉冲电场传感器.在周期性分布的光子晶体中引入电光聚合物作为缺陷层,外界电场的作用下,电光聚合物的折射率发生改变,这将会引起光子晶体的谐振频率偏移,监测谐振频率的变化即可实现被测电场测量.本文通过理论与数值模拟光入射角度不同且入射波的偏振状态不同时,光子晶体的结构参数对光子晶体传输光谱特征的影响规律,验证了该传感器的电场敏感特性.仿真结果表明,通过合理设计传感器的结构参数,结合波长-光强解调系统,基于电光聚合物缺陷光子晶体的电场传感器的电场分辨力可以达到约30V/m,最高可测量场强则可达兆V/m量级.

关键词: 电磁脉冲测量;光子晶体;光学传感

中图分类号: TM937

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2021)09-1691-10

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20200501

Photonic Crystal with Electro-optic Polymer Defect for a Pulse Electric Field Sensor

LI Xian-li¹, WANG Dong-dong², LI Xiang-long¹, ZHAO Xiao-qing¹, ZHANG Hang¹,
ZHANG Qi², JIANG Yun-feng²

(1. Key Laboratory of Electronic Equipment Structure Design, Ministry of Education, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;
2. National Key Laboratory of Science and Technology, China Ship Development and Design Center, Wuhan, Hubei 430064, China)

Abstract: As for the measurement requirements of the pulse electric field with high intensity, wide frequency band and short duration, an all-dielectric electric field sensor based on photonic crystal with electro-optic polymer defect was proposed in this paper. The electro-optic polymer in the form of a defect layer was inserted in the periodic one-dimensional photonic crystal structure. The variations of refractive index of electro-optic polymer under the externally applied electric fields may induce the changes of the resonance wavelength of the defect mode. Accordingly, the applied electric field may be measured by monitoring the shift of the resonant wavelength. It is theoretically shown that the minimal detectable electric field of 30V/m can be achieved and the maximum detectable field could reach up to the order of MV/m.

Key words: electromagnetic pulse measurement; photonic crystal; optical sensor

1 引言

瞬态强电磁脉冲是极大的电流在极短时间内对负载进行高压放电而产生的^[1,2].这类电磁脉冲具有上升沿快、持续时间短、峰值场强高、频谱范围宽而且时域波形在传输、辐射过程中易发生畸变等特点^[3].例如高空核电磁脉冲峰值场强可达50kV/m,脉冲上升时间在1~5ns,脉冲半宽在20ns左右,频率范围覆盖DC至几百MHz^[4];高功率微波脉冲武器以及高强度雷达上升时

间在10~20ns,脉冲半宽从10ns至1000ns,频率范围从几百MHz到几千MHz,峰值电场强度随着距离不同从几百V/m到几十万V/m.这不仅要求脉冲电场传感器具有较宽的动态测量范围及频率响应范围,同时为保证检测结果的准确性,脉冲电场检测系统需具有较高的探测灵敏度和良好的抗电磁干扰性.

集成光波导式电场传感器是由铌酸锂光波导制成的马赫增德尔干涉仪以及制作在光波导两例的金属电极和接收天线构成.被测脉冲电场经接收天线馈送到光波导

两侧的电极后转换为光波导中传输的光波相位变化或光强度变化,从而实现电场检测. 由于具有可测动态范围大、响应速度快、频率范围宽等特点,集成光波导式电场传感器是目前光学类电场检测领域的研究热点^[5,6],但是由于传感探头上具有天线和电极等金属结构,这会对被测电场的数值及分布产生干扰,进而产生测量误差,且电气安全性较差,不适于某些对传感探头电气绝缘性要求较高的应用场合. 此外,由于金属天线结构的固有带宽缺陷,集成光波导式电场传感器低频特性较差.

光子晶体是一种尺度为波长量级的介质材料周期性叠加形成的多层膜结构,其最根本的特征是存在光子禁带和光子局域态. 频率落在禁带中的电磁波的态密度为0,在光子晶体内被严格禁止传播,形成“光子绝缘体”. 如果在周期性结构中引入某种程度的缺陷,缺陷位置处的光子将会具有很高的态密度,光子自发辐射急剧增强,形成光子局域态,从而使禁带中出现频率极窄的缺陷态,也叫光子通带,宏观表现为具有高品质因子的极窄带谐振峰. 动态控制缺陷层的光学厚度,可以在禁带内移动缺陷模,从而实现可调谐光子晶体耦合器、滤波器、传感器等^[7-10].

电光聚合物是在高分子聚合物中以掺杂的形式或者以化学键连接的形式包含某种活性生色团偶极分子而形成的一种新型的有机电光材料. 电光聚合物在外加电场作用下,内部生色团分子会按照电场方向取向,引起折射率的改变. 与LiNbO₃、LiTaO₃等无机电光材料相比,电光聚合物电光系数高、击穿场强高(聚合物材料的击穿场强值约500MV/m)、相对介电常数低(约2~6)、且具有优良的成膜特性. 因此,近年来,随着高速、大容量全光网络的迅速发展,基于电光聚合物的高速光开关、光调制器等器件的研究在通信及微波光子领域得到了广泛关注.

本文将光子晶体特殊的物理性能和电光聚合物良好的电光性能有机结合在一起,提出一种基于电光聚合物缺陷光子晶体的全介质电场传感器. 在周期性分布的光子晶体中引入电光聚合物作为缺陷层,电光聚合物的折射率发生改变,这将会引起光子晶体的谐振频率偏移,监测谐振频率的变化即可实现被测电场测量. 相比其他光学电场传感技术,本文所提出的这种电场传感方法的优势在于:①传感探头为无天线和电极的全介质结构,对周围电场分布的影响很小. ②光子晶体周期性结构的物理尺寸为波长量级,传感探头体积小,可实现电场空间分布的“点探测”;③灵敏度高、动态测量范围和频率响应范围宽. 相比传统以铌酸锂晶体为代表的电光晶体,电光聚合物作为一种新型电光材料,具有电光系数大、介电常数低、响应速度快及击穿场强高等优点. 经理论分析、数值仿真估算,结合

波长-光强解调系统,基于电光聚合物缺陷光子晶体的电场传感器的电场分辨力可以达到约30 V/m,最高可测量场强则可达10⁸ V/m. 响应速度主要取决于光电探测器的响应速度,最高可达纳秒量级.

2 传感器的结构与电场敏感机理

所设计的电光聚合物缺陷光子晶体的电场传感器的基本结构模型如图1所示,可以等效为(AB)_NC(BA)_N. 其中A和B是周期性排列的高低折射率基元介质(可选材料为透光性良好的无机材料,例如PbTe、MgF₂、CaF₂、ZnS、TiO₂、SiO₂、AsS等),折射率和厚度分别为n_A、n_B、d_A和d_B. C是插入基元介质中的缺陷层—电光聚合物薄膜(折射率n_C、厚度d_C). N是基元介质的排列周期数,可取任意正整数. 设缺陷模谐振中心波长为λ₀,两基元介质层的光学厚度为n_Ad_A=n_Bd_B=λ₀/4,未加电场时电光聚合物缺陷层的光学厚度为n_Cd_C=λ₀/2,两侧周围介质为空气.

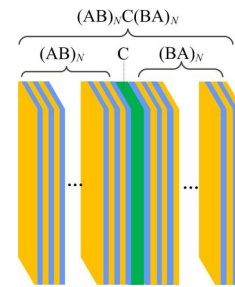


图1 电光聚合物缺陷光子晶体的电场传感器基本结构示意图

光子晶体的内部都是多层结构且均具有周期性,相邻两层空间的场强关系可用传输矩阵来表示. 利用传输矩阵,从一个层面上的场可以外推到整个光子晶体空间的场分布,将麦克斯韦方程组变成本征值求解问题,从而计算得到整个光子晶体的透射光谱、反射光谱以及色散曲线等. 根据薄膜光学理论,电磁波在介质中传播时,介质交界面处的电磁场满足边界连续条件. 因此,光子晶体基元介质与电磁波的相互作用(传输特性)均可用传输矩阵来表示:

$$M_j = \begin{bmatrix} \cos\delta_j & -\frac{i}{\eta_j} \sin\delta_j \\ -i\eta_j \sin\delta_j & \cos\delta_j \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)中:

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta_j = \frac{2\pi}{\lambda} n_j \cos\theta_j \\ \eta_j = \sqrt{\frac{\epsilon_j}{\mu_j}} \cos\theta_j (\text{TE模式}) \\ \eta_j = \sqrt{\frac{\mu_j}{\epsilon_j}} / \cos\theta_j (\text{TM模式}) \end{array} \right. \quad (2)$$

式中 $n_j, h_j, \theta_j, \eta_j, \mu_j$ 和 ε_j 分别是第 j 层基元介质的折射率、厚度、光入射角度、光学导纳、介质常量和磁导率. 设电光聚合物的电光系数是 r_{33} , 折射率为 n_c , 在外加电场 E_{ex} 作用下, 电光聚合物的折射率的变化量 Δn_c 与 E_{ex} 关系式为:

$$\Delta n_c = \frac{1}{2} n_c^3 r_{33} \cdot \frac{3}{\varepsilon_c + 2} \cdot E_{ex} \quad (3)$$

因此, K 层介质 (含电光聚合物缺陷层) 的整体传输矩阵可以表示为:

$$M = M_1 M_2 M_3 \cdots M_{K-1} = \prod_{j=1}^{K-1} M_j \begin{bmatrix} m_{11}(E_{ex}) & m_{12}(E_{ex}) \\ m_{21}(E_{ex}) & m_{22}(E_{ex}) \end{bmatrix} \quad (4)$$

综合式(1)~(4), 可以进一步得到整个电光聚合物缺陷光子晶体结构的透射率:

$$T = \left| \frac{2\eta_0}{m_{11}(E_{ex})\eta_0 + m_{12}(E_{ex})\eta_0\eta_{K+1} + m_{21}(E_{ex}) + m_{22}(E_{ex})\eta_{K+1}} \right|^2 \quad (5)$$

式中, η_0 和 η_{K+1} 分别是光子晶体两侧的光入射介质和光出射介质的光学导纳. 从式(5)可以明显看出, 电光聚合物缺陷光子晶体结构输出的透射谱是被测外界电场的函数. 当电光聚合物的折射率在外界电场作用下发生变化时, 所设计的传感结构输出的透射频谱特征改变, 从而实现电场检测.

3 数值模拟与结果分析

3.1 电光聚合物缺陷光子晶体结构的电场敏感性验证

取缺陷模谐振中心波长为 1550nm , $n_A=3.48$ (Si), $d_A=111.35\text{nm}$, $n_B=1.38$ (氟化镁 MgF_2), $d_B=280.8\text{nm}$, 周期数 $N=4$. 缺陷层电光聚合物的折射率 n_c 为 2.0 , $d_c=387.5\text{nm}$, 其电光系数 $r_{33}=1.0 \times 10^{-9}/(\text{V/m})$. 光垂直入射至光子晶体表面, 即 $\theta_j=0$. 将这些参数代入式(5)可以计算获得所设计光子晶体的透射光谱, 结果如图 2 所示. 透射率为 0 的波段为光子禁带, 该光子晶体的禁带范围介于 $1200\text{nm} \sim 2200\text{nm}$, 宽度约 1000nm . 在禁带中存在一个光子局域态, 即 1550nm 处有一个频率极窄的透射尖峰, 该峰为透射率为 1 的缺陷模, 可以几乎无损耗在晶体中传播, 符合带缺陷的光子晶体基本传输特性.

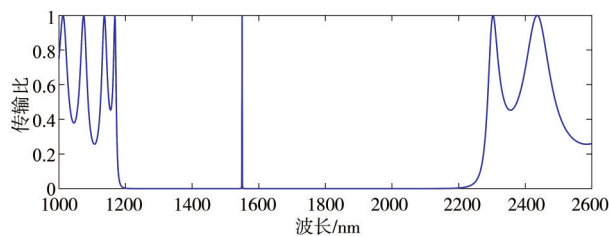


图 2 光子晶体的透射光谱($n_A=3.48, n_B=1.38, N=4$)

由式(3)可知, 在外界电场作用下, n_c 的折射率会发生变化. 电光聚合物的电光系数为 $1.0 \times 10^{-9}/(\text{V/m})$, 当外界电场从 $\pm 100\text{V/m}$ 变化到 $\pm 10^6 \text{V/m}$ 时, 对应电光聚合物的折射率变化范围为 1.9 至 2.1 (最小变化值 10^{-7}), 缺陷层的光学厚度偏离 $\lambda_0/2$, 进一步引起电光聚合物缺陷光子晶体结构输出的透射谱变化. 不同外加电场下, 传感输出的透射光谱计算结果如图 3 所示. 从图中可以看出, 外加电场强度变化时, 缺陷模峰值波长偏移. 并且, 随着电场强度的增大, 缺陷模峰值波长规律地向长波长方向移动. 该结果采用数值模拟方法证明了本文提出的基于电光聚合物缺陷光子晶体结构实现一种新型的电场传感机理的研究思路是正确可行的.

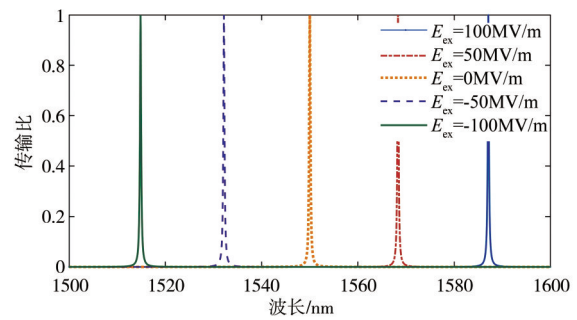


图 3 电场强度不同时透射光谱的变化

将图 3 中得到的不同电场强度处缺陷模的峰值中心波长提取出来, 就可以得到谐振中心波长偏移量与施加电场强度的标定曲线, 结果如图 4 所示. 从图中可以看出, 当外加电场强度从 0 增加到 10^8V/m 时, 传感器输出的谐振中心波长随外界电场强度的增大线性增加, 波长总偏移量达到 46.3nm , 电场探测灵敏度为 $4.63\text{pm}/(10^4 \text{V/m})$.

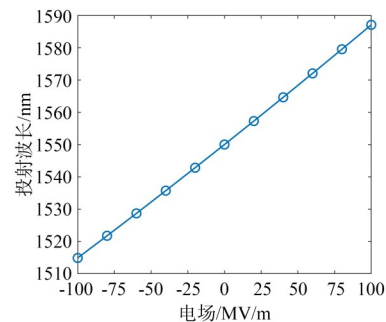


图 4 谐振中心波长偏移量与施加电场强度的标定曲线

采用传统的光谱测量装置 (如光谱仪等) 直接测量谐振光谱中心波长的变化值, 可以获得被测电场的幅值信息. 高精度的光谱测量装置的光谱分辨率可达到 1pm , 因此采用光谱测量法解调被测信号, 传感器的电场测量分辨力约为 2000V/m , 可测量最大电场强度理

论为聚合物材料的击穿场强值约 10^8 V/m. 但是光谱测量法分辨力有限,且设备笨重、价格昂贵,不便于携带. 因此,在实际应用中,通常采用光强检测法解调波长变化.

如图5所示,当谐振中心波长变化时,中心波长附近的线性变化区域内某固定波长处的光强也会发生改变. 选定该波长为工作波长,探测该工作波长处光强的变化,可以实现谐振波长的有效解调. 这种方法需要采用可调谐窄带激光器作为探测源,结构简单,不需要复杂的光谱测量装置. 并且,当传感器输出谐振光谱半带宽较小时,微小的谐振波长的变化会引起较大的光功率变化. 因此,采用该方法可实现微小电场的高灵敏度检测. 同时,该方法的检测速度主要取决于光电探测器的响应速度. 目前商用的高速光电探测器的响应速度可达到纳秒量级,带宽为几GHz甚至几十GHz. 因此,采用这种检测方法可实现脉冲电场信号的快速捕捉.

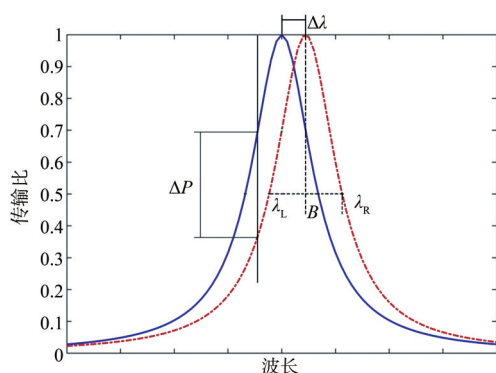


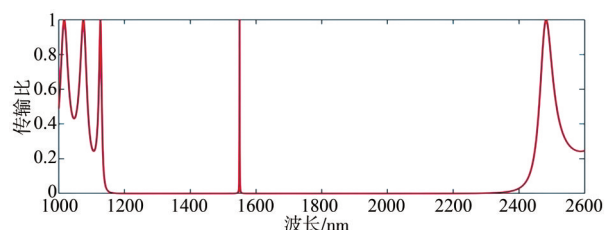
图5 波长-光强检测法

从图5还可以看出,采用光强检测法解调被测电场时,除了外界电场作用下 $\Delta\lambda$ 的偏移量外,传感系统的电场探测灵敏度还取决于光子晶体输出的缺陷模谐振光谱的半带宽 (band width) B 值 $B=(\lambda_R-\lambda_L)/2$,如图5所示, λ_R 和 λ_L 为谐振光谱上透射率为最大值的50%处对应的右、左两个波长. B 值表征了缺陷模谐振光谱的尖锐程度. B 值越小,相同 $\Delta\lambda$ 的偏移量引起的光强变化 (ΔP) 就越大,电场探测灵敏度就越高.

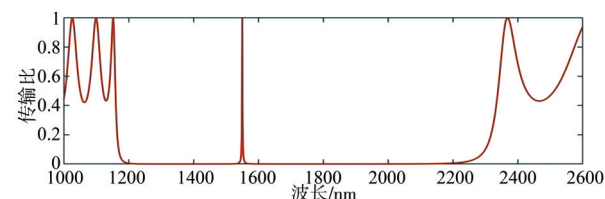
3.2 光子晶体的结构参数对电场探测灵敏度的影响分析

$\Delta\lambda$ 的偏移量和谐振光谱 B 值均取决于光子晶体的结构参数 (包括基元介质和缺陷层折射率、厚度,周期性排列规则等). 因此,本文进一步研究了这些结构参数对传感器电场探测灵敏度的影响,结果如图6至图8所示. 图6为基元介质 n_A 和 n_B 折射率不同时,聚合物缺陷光子晶体结构输出的透射谱曲线. 从图中可以看出, n_A 和 n_B 的取值会影响光子禁带宽度和缺陷模谐振谱的

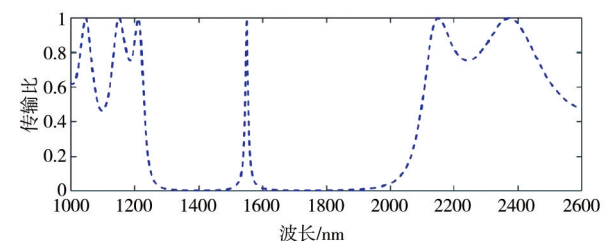
半带宽 B ,与缺陷模位置无关. 并且,随着 n_A 和 n_B 差值的增大,光子禁带宽度从 1200nm 减小至 700nm,谐振谱的半带宽 B 则从 400pm 增加至 4000pm. 更多的数据计算结果对比见表1. 表1和图6中的数据均表明 A 和 B 两种基元介质的折射差值越大,缺陷模谐振光谱的半带宽 B 值越小,越有利于提高传感器的电场测量灵敏度.



(a) A 与 B 分别是 PbTe 与 MgF_2 , $n_A=4.1$, $n_B=1.38$



(b) 介质 A 与 B 分别是 Si 与 MgF_2 , $n_A=3.48$, $n_B=1.38$



(c) 介质 A 与 B 分别是 AsS 与 SiO_2 , $n_A=2.6$, $n_B=1.45$

图6 基元介质折射率不同时的透射谱曲线 ($n_c=2.0$, $N=3$)

图7和图8为基元介质 A 和 B 的排列周期数不同时,光子晶体的传输光谱曲线. N_L 和 N_R 为缺陷层左右两侧介质的周期数. 从图中可以看出,缺陷模谐振峰的透过率和半带宽 B 与周期数有关. 缺陷层左右两侧介质的周期数取值相同时,即 $N_L = N_R$ 时,缺陷模谐振峰的透过率最大 (等于 1),此时随着 N_L 与 N_R 取值的增大,谐振峰半带宽 B 值减小. 观察表1中第一组数据可以看出,当 N_L 与 N_R 取值从 3 增大至 7 时, B 的值从 400pm 减小至 0.1pm,下降三个数量级. 同时,结合图8与表1中第三组数据可以看出,缺陷层左右两侧介质的周期数取值不同时,缺陷模谐振峰的透过率减小,随着 N_L 与 N_R 的取值差从 0 增加至 4,缺陷模谐振峰的透过率从 1 降低至 0.04. 因此,缺陷层左右两侧介质的周期数完全对称,且周期数越大,缺陷模谐振光谱的尖锐程度越

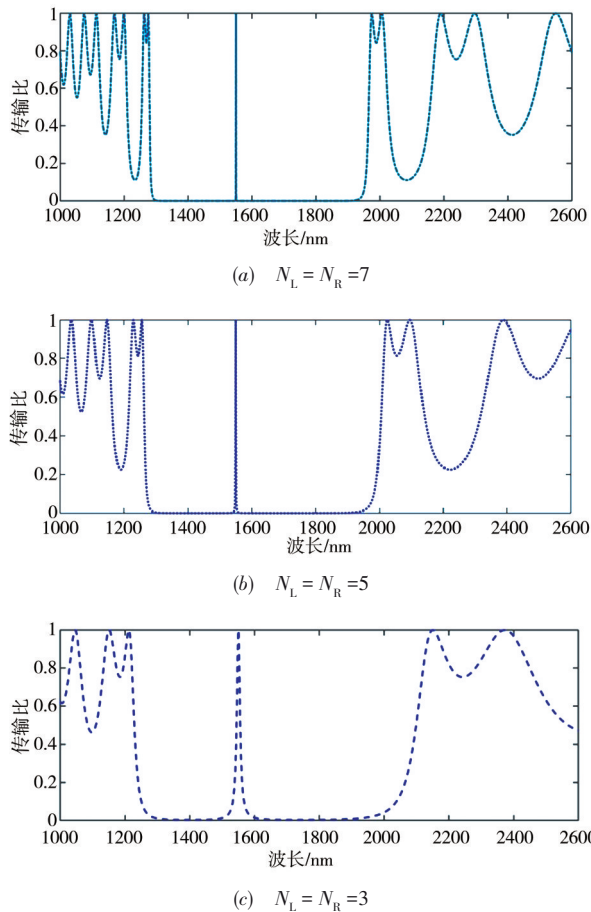


图7 周期数不同时的透射谱 ($n_A=2.6, n_B=1.45$)

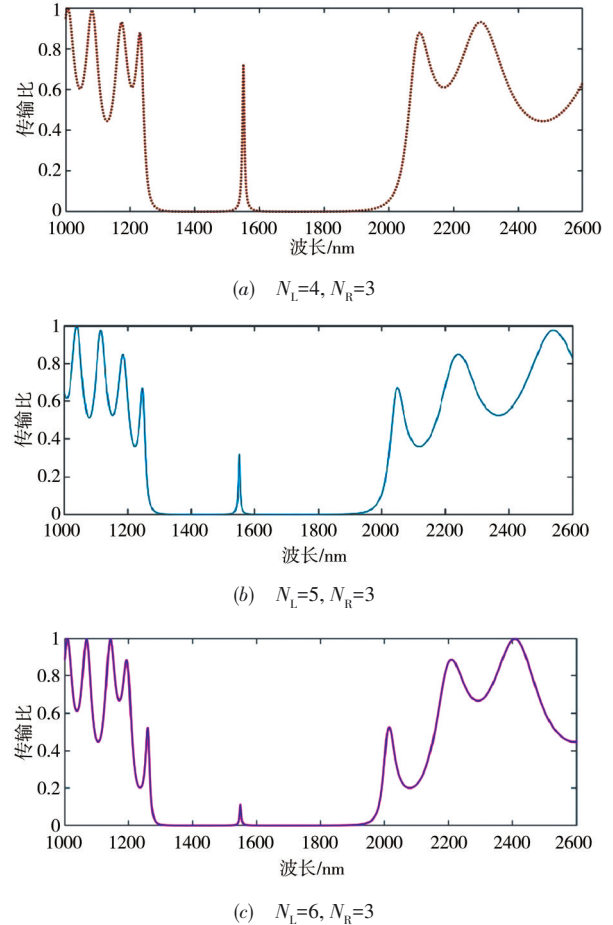


图8 缺陷层左右两侧介质的周期数不同时透射谱 ($n_A=2.6, n_B=1.45$)

高,越有利提高传感器的电场测量灵敏度。

最后,本文计算了结构参数不同时,在外加电场作用下电光聚合物缺陷光子晶体结构输出的谐振透射峰 $\Delta\lambda$ 的偏移量(用 $\Delta\lambda/E_{ex}$ 来表征),计算结果见表1所示。比较表1中第1、第2和第4组数据可以看出,首先,周期数 N 的取值变化时, $\Delta\lambda/E_{ex}$ 的值保持不变。而随着 n_A 和 n_B 差值的增大, $\Delta\lambda/E_{ex}$ 的值从 $302\text{pm}/(\text{MV}/\text{m})$ 增加至 $389\text{pm}/(\text{MV}/\text{m})$ 。当电光聚合物的折射率 n_C 从2.2变化至1.4时, $\Delta\lambda/E_{ex}$ 的值从 $353\text{pm}/(\text{MV}/\text{m})$ 增加至 $4.38\text{pm}/(\text{MV}/\text{m})$ 。这说明随着 n_A 和 n_B 差值的增大、电光聚合物的折射率 n_C 的减小, $\Delta\lambda/E_{ex}$ 的值增大,即传感器的波长偏移灵敏度提高。

据此,我们得到了高灵敏度的电光聚合物缺陷光子晶体结构的参数设计原则:基元介质A和B的折射率差值尽量大,电光聚合物的折射率尽量小,同时缺陷层左右两侧基元介质的周期数应完全对称,且周期数取值尽量大。此时,传感器输出的缺陷模的谐振峰半带宽 B 较小,而波长偏移灵敏度 $\Delta\lambda/E_{ex}$ 最高,电场探测灵敏度就越高。根据该设计原则,我们选取了一组最优值组合, $N_L=N_R=7$ 、 n_A 和 n_B 差值最大,同时 n_C 最小,即 $n_A=4.1$, $n_B=1.38$, $n_C=1.4$,并计算了该取值下对应的谐振峰半

带宽 B 和 $\Delta\lambda/E_{ex}$ 的值,结果见表1第五组数据。从表中可以看出,此时谐振峰半带宽 B 的值达到最小为 0.1pm ,而同时 $\Delta\lambda/E_{ex}$ 的值达到最高约 $463\text{pm}/(\text{MV}/\text{m})$ 。

图9为结构参数最优取值情况下,传感器输出的缺陷模处谐振峰透射谱以及透射谱中心波长随外加电场的变化情况。

从图中可以看出:首先,该结构参数下输出的谐振峰透射谱的半带宽 B 值为 0.1pm ,与理论计算结果一致;其次,在外界电场变化 $100\text{V}/\text{m}$ 时,透射峰中心波长变化 0.05pm ,如果采用常用的光谱测量方法,受其分辨力限制已经无法分辨该数量级的波长变化。而采用波长-光强检测法,将波长偏移转化为光强变化,从图中可以看出,微小的波长偏移可以转换为较强的光强变化值。 0.05pm 的波长偏移可以转换为35%的光功率传输比变化。而常规的光电探测系统对光功率传输比的分辨力至少可以达到1%,为此,可以估算得到该传感系统的电场分辨力可以达到约 $30\text{V}/\text{m}$,最高可测量场强则为电光聚合物的击穿场强,可达到百兆 V/m 。相比文献[11, 12]中报道的基于铌酸锂晶体的光纤波导耦合或集成波导电场传感器的电场检测分辨力(约 $200\text{V}/\text{m}$)

表 1 光子晶体的结构参数不同时,对应的谐振谱半带宽、透过率和波长偏移灵敏度

序号	介质折射率	周期数 N	半带宽(pm)	谐振峰透过率	$\Delta\lambda/E_{ex}$ (pm/(MV/m))
1	$n_A=4.1, n_B=1.38, n_C=2.0$	3	400	1	389
	$n_A=4.1, n_B=1.38, n_C=2.0$	4	50	1	389
	$n_A=4.1, n_B=1.38, n_C=2.0$	5	5	1	389
	$n_A=4.1, n_B=1.38, n_C=2.0$	6	0.5	1	389
	$n_A=4.1, n_B=1.38, n_C=2.0$	7	0.1	1	389
2	$n_A=4.1, n_B=1.38, n_C=2.0$	3	400	1	389
	$n_A=3.48, n_B=1.38, n_C=2.0$	3	900	1	370
	$n_A=2.6, n_B=1.45, n_C=2.0$	3	6000	1	305
3	$n_A=2.6, n_B=1.45, n_C=2.0$	$N_L=4, N_R=3$	4000	0.7	—
	$n_A=2.6, n_B=1.45, n_C=2.0$	$N_L=5, N_R=3$	3000	0.32	—
	$n_A=2.6, n_B=1.45, n_C=2.0$	$N_L=6, N_R=3$	3000	0.12	—
	$n_A=2.6, n_B=1.45, n_C=2.0$	$N_L=7, N_R=3$	2500	0.04	—
4	$n_A=3.48, n_B=1.38, n_C=1.4$	4	160	1	438
	$n_A=3.48, n_B=1.38, n_C=1.6$	4	155	1	413
	$n_A=3.48, n_B=1.38, n_C=1.8$	4	145	1	390
	$n_A=3.48, n_B=1.38, n_C=2.0$	4	140	1	370
	$n_A=3.48, n_B=1.38, n_C=2.2$	4	125	1	353
5	$n_A=4.1, n_B=1.38, n_C=1.4$	7	0.1	1	463

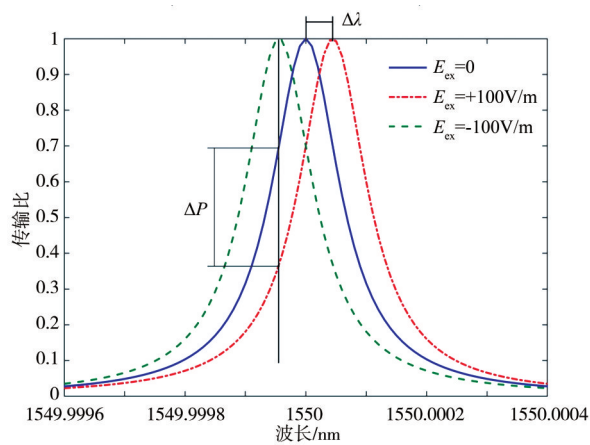


图9 谐振峰透射中心波长随外加电场的变化
($n_A=4.1, n_B=1.38, n_C=1.4, N=7$)

至 10000V/m), 本文提出的基于电光聚合物缺陷光子晶体的电场传感器灵敏度至少提高了 7 倍。

3.3 光入射角度、入射波的偏振状态对电场探测灵敏度的影响分析

在前文的仿真计算中,入射光均为正入射,即光入射角为 0° ,此时,从式(2)可以看出,当入射光角度为

0° ,即正入射时,TE 偏振(亦称 TE 模)和 TM 偏振(亦称 TM 模)的传输矩阵相同,因此,TE 模和 TM 模通过光子晶体后的传输光谱重合.而当入射角度不等于 0° 时,TE 模和 TM 模的传输矩阵不同,二者通过光子晶体后的传输光谱也不同,将出现模式分离现象.仿真计算结果如图 10 所示,从图中可以看出,在光入射角度为 60° 时,

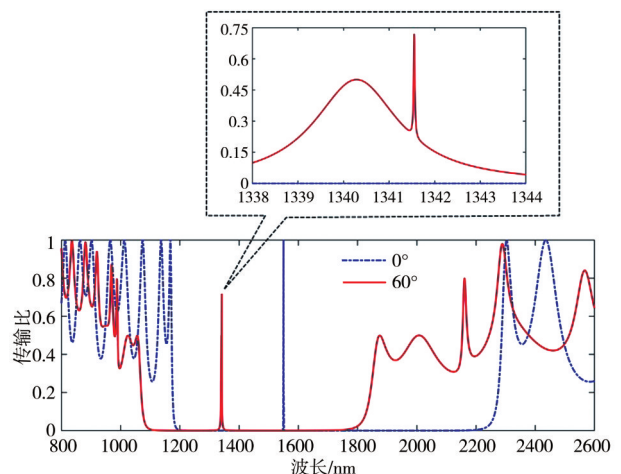


图 10 入射角度为 60° 时,TE 模和 TM 模的传输光谱出现分离现象

TE 模和 TM 模的传输光谱明显分离. 不仅缺陷模处的谐振峰中心波长不同 (TE 模的谐振中心波长为 1341.56nm, TM 模的谐振中心波长为 1340.2nm), 而且谐振峰半带宽 B 值变化 (TE 模的 B 值为 15 μm , TM 模的 B 值为 1100 μm), 基本符合理论预期一致.

图 11 和图 12 分别对比了光入射角度不同时 TE 模和 TM 模的传输光谱. 从图 11 和图 12 可以看出, 随着入射角度的增大, TE 模和 TM 模的缺陷模位置谐振峰透过率均为 1, 中心波长则均向短波长方向移动, 同时光子禁带的波段整体向短波长方向偏移. 不同的是, 在入射光角度从 0° 增加至 80° 时, TE 模的光子禁带宽度基本无变化, 始终保持在 1000nm 左右, 而 TM 模的光子禁带宽度则从 1000nm 减小至 500nm.

表 2 详细列出了光入射角度不同时, TE 模和 TM 模的缺陷模谐振峰中心波长、 B 值以及波长偏移灵敏度. 对比表中数据可以发现, 在入射光角度从 0° 增加至 80° 时, TE 模的 B 值从 0.14nm 减小至 0.003nm, $\Delta\lambda/E_{\text{ex}}$ 的值从 387 $\mu\text{m}/(\text{MV}/\text{m})$ 增加至 526 $\mu\text{m}/(\text{MV}/\text{m})$. 这说明随着入射光角度增加, TE 模的半带宽减小, 波长偏移灵敏度增加. 而 TM 模则正好相反, 随着入射光角度增加, TE 模的半带宽增加, 波长偏移灵敏度减小. 因

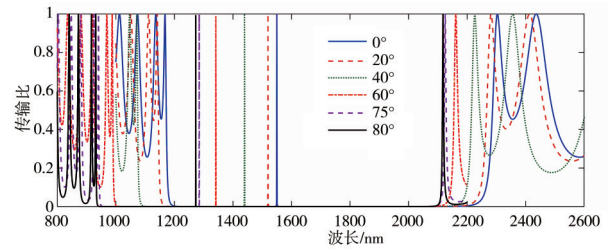


图 11 入射角度不同时, TE 模的传输光谱

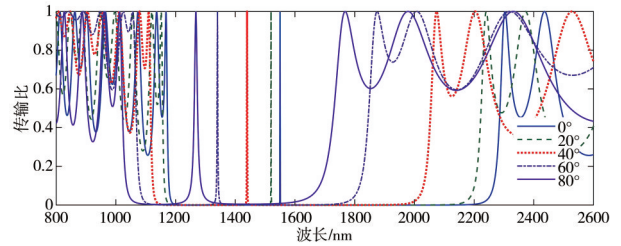


图 12 入射角度不同时, TM 模的传输光谱图

此, 对于本文提出的电光聚合物缺陷光子晶体电场传感结构, 当光入射角度不等于 0° 时, 采用 TE 偏振模式作为入射光源, 更有利于提高传感器的电场探测灵敏度.

表 2 入射角度不同时, TE 模和 TM 模对应的谐振谱半带宽、透过率和波长偏移灵敏度

特征模	介质折射率	周期数	入射角度	$B/\mu\text{m}$	中心波长/nm	消光比	$\Delta\lambda/E_{\text{ex}}/(\mu\text{m}/(\text{MV}/\text{m}))$
TE 模	$n_A=3.48, n_B=1.38, n_C=2.0$	4	0	140	1550	1	387
	$n_A=3.48, n_B=1.38, n_C=2.0$	4	20	110	1519.74	1	382
	$n_A=3.48, n_B=1.38, n_C=2.0$	4	40	50	1439.5	1	425
	$n_A=3.48, n_B=1.38, n_C=2.0$	4	60	15	1341.6	1	481
	$n_A=3.48, n_B=1.38, n_C=2.0$	4	70	7.5	1300.53	1	510
	$n_A=3.48, n_B=1.38, n_C=2.0$	4	75	5	1284.75	1	518
	$n_A=3.48, n_B=1.38, n_C=2.0$	4	80	3	1273	1	526
TM 模	$n_A=3.48, n_B=1.38, n_C=2.0$	4	0	140	1550	1	387
	$n_A=3.48, n_B=1.38, n_C=2.0$	4	20	160	1519.73	1	370
	$n_A=3.48, n_B=1.38, n_C=2.0$	4	40	350	1439.5	1	360
	$n_A=3.48, n_B=1.38, n_C=2.0$	4	60	1100	1340.25	1	349
	$n_A=3.48, n_B=1.38, n_C=2.0$	4	70	2400	1298	1	330
	$n_A=3.48, n_B=1.38, n_C=2.0$	4	80	5500	1268	1	322

3.4 验证与讨论

为了验证与解释上述计算结果, 我们根据波导模式理论, 采用多物理场耦合分析软件仿真分析了光子晶体内部电场分布情况, 结果见图 13 和图 14. 图 13(a) 和(b)

分别是无缺陷层和有缺陷层的一维光子晶体内部场强以及能流密度分布情况, 从图中可以看出, 光垂直入射至无缺陷层的光子晶体时 (入射光波长为 1550nm), 大部分光能量被约束在与光子晶体的表面, 无法穿过光子晶体结

构,即入射光被禁止传播.加入缺陷层后,入射光则形成传导电磁波模式,缺陷层中具有强局域电场(见图13(b)z方向4.5 μm 左右的“台阶状”能流分布曲线),这表明缺陷位置处的光子自发辐射增强,形成光子通带,宏观表现为

窄带透射峰.这一仿真结果与图2的理论计算结果一致,电光聚合物缺陷光子晶体结构的透射光谱会在中心波长1550nm处有一个频率极窄的透射尖峰,可以几乎无损耗在晶体中传播,符合带缺陷的光子晶体基本传输特性.

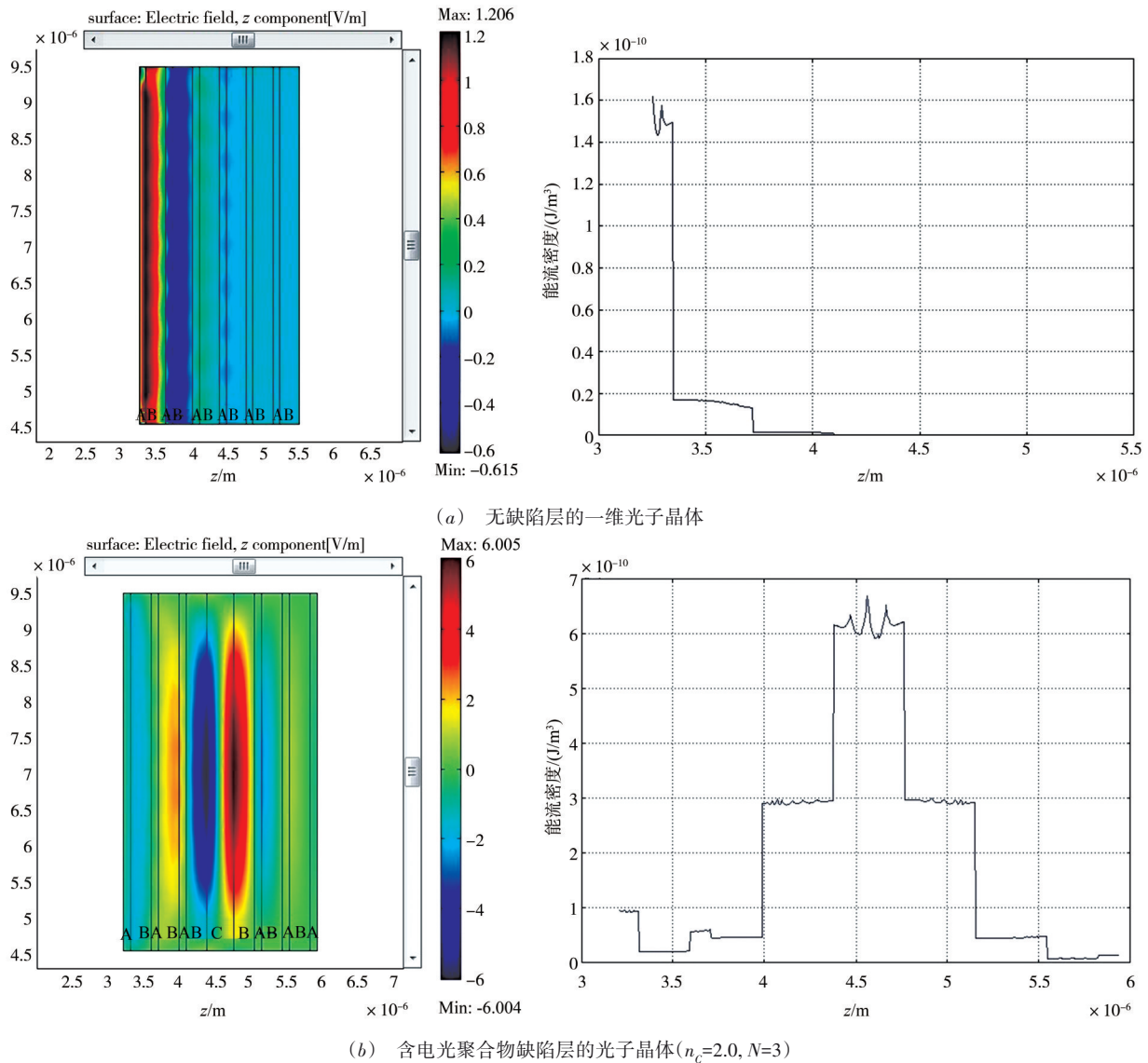


图13 光子晶体内部场强以及能流密度分布(A与B分别为为PbTe与MgF₂, $n_A=4.1, n_B=1.38$)

图14为基元介质 n_A 和 n_B 折射率不同时,电光聚合物缺陷光子晶体结构内部场强以及能流密度分布情况.从图中可以看出,随着两种基元介质的折射差值的增大,缺陷层附近的能流密度从 $2.2 \times 10^{-10} \text{J/m}^3$ 迅速增加至 $6.0 \times 10^{-10} \text{J/m}^3$,局域电场场强也明显增加,即局域限制作用增强,此时光要通过光子晶体就更加困难,宏观表现为光子晶体的透射光频带越来越窄,缺陷模谐振光谱的半带宽 B 值也就越小,越有利于提高传感器的电场测量灵敏度.这很好地解释了图6中的理论计算结果.

采用相同的建模方法,我们可以进一步仿真得到缺陷层左右两侧基元介质的周期数、缺陷层的折射率以及光入射角度不同时,入射波的偏振状态对光子晶体内部电场分布的影响(由于篇幅限制,此处不再赘述).结果显示,随着缺陷层左右两侧基元介质的周期数的增加和缺陷层折射率的减小,缺陷层内部的电场强度就越强,此时缺陷模谐振光谱的半带宽 B 值也就越小,而波长偏移灵敏度 $\Delta\lambda/E_{\text{ex}}$ 最高,电场探测灵敏度就越高,与前文的理论计算结果一致.

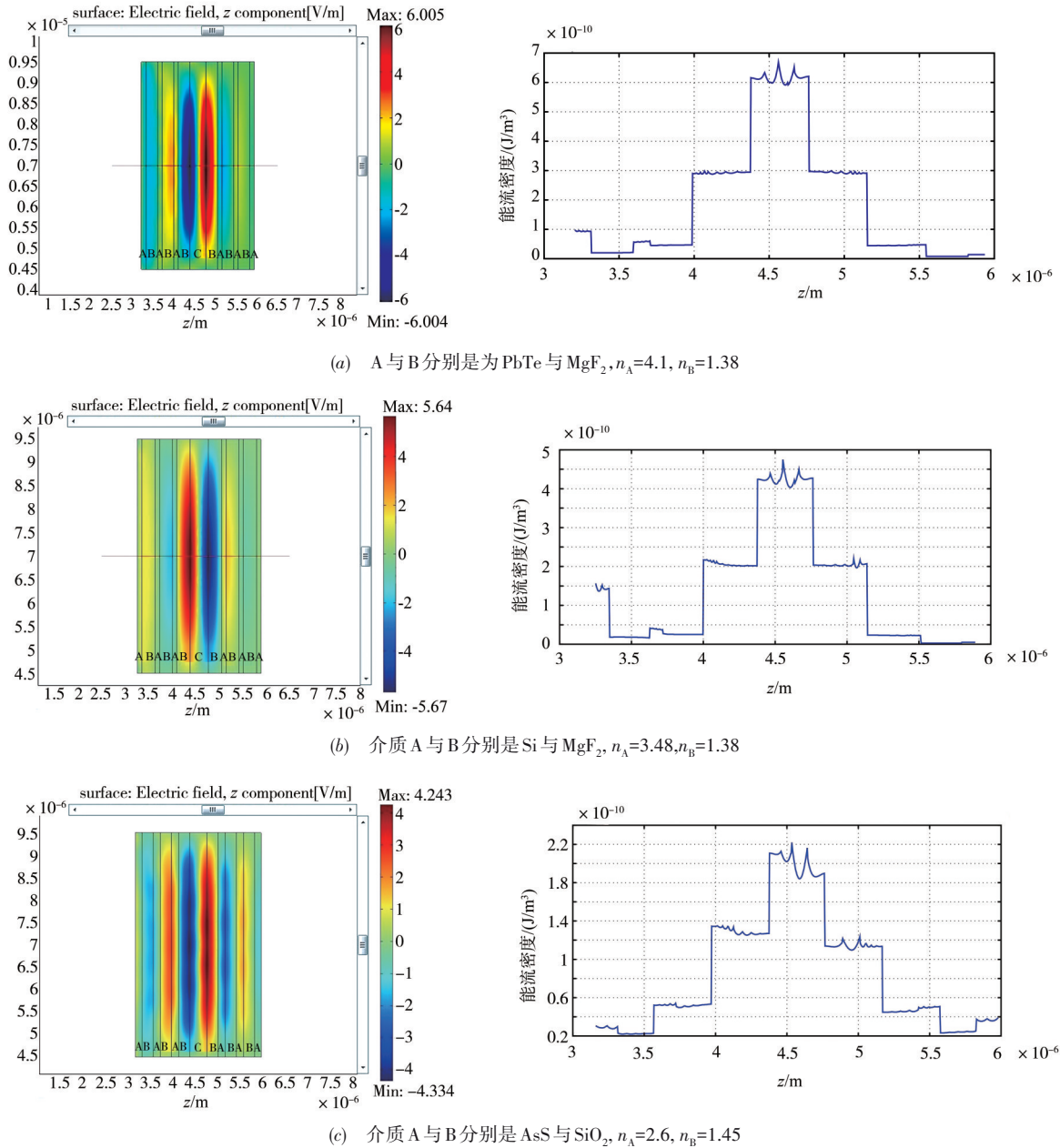


图 14 基元介质折射率不同时光子晶体内部场强以及能流密度分布($n_c=2.0$, $N=3$)

4 结论

本文提出了一种基于电光聚合物缺陷光子晶体的强脉冲电场测量技术. 首先,通过理论推导和仿真计算的方法验证了该传感器的电场敏感特性;其次,数值模拟了光正入射时,光子晶体的结构参数(主要包括基元介质和电光聚合物的折射率、缺陷层左右两侧基元介质的周期排列数等)对光子晶体传输光谱特征(包括光子禁带、缺陷模位置、谐振峰半带宽以及波长偏移灵敏度等)的影响规律. 最后,进一步计算分析了光入射角度不同时,入射波的偏振状态对光子晶体传输光谱以

及传感器电场探测灵敏度的影响.

在此基础上,本文总结了高灵敏度的电光聚合物缺陷光子晶体结构参数的设计原则:基元介质 A 和 B 的折射率差值尽量大,电光聚合物的折射率尽量小,同时缺陷层左右两侧基元介质的周期数应完全对称,且周期数取值尽量大. 此时,传感器输出的缺陷模的谐振峰半带宽较小,而波长偏移灵敏度 $\Delta\lambda/E_{ex}$ 最高,电场探测灵敏度就越高. 当基元介质 A、B 和电光聚合物的折射率分别为 4.10, 1.38 和 1.40, 缺陷层左右介质的周期数均为 7 时,谐振峰半带宽的值达到最小为 0.1pm, 而同

时 $\Delta\lambda/E_{ex}$ 的值达到最高约 $463\text{pm}/(\text{MV}/\text{m})$ 。采用波长-光强检测法解调估算得到该传感系统的电场分辨力可以达到约 $30\text{ V}/\text{m}$, 最高可测量场强则可达 $10^8\text{ V}/\text{m}$ 。这些结果对于下一步设计制备基于电光聚合物缺陷光子晶体的电场传感器具有一定的理论指导价值。

参考文献

- [1] 张举丘, 梁志珊. 高空核爆电磁脉冲 E2 部分对架空管道的影响[J]. 电子学报, 2019, 47(8): 1762 – 1767.
Zhang J Q, Liang Z S. Effects of intermediate-time HEMP (E2) on overhead pipeline[J]. Acta Electronica Sinica, 2019, 47(8): 1762 – 1767. (in Chinese)
- [2] 刘钰, 韩峰, 陆希成, 等. 电子系统电磁脉冲易损性评估的分层贝叶斯网络模型[J]. 电子学报, 2016, 44(11): 2695 – 2703.
Liu Y, Han F, Lu X C, et al. EMP susceptibility modeling and assessment of electronic system based on hierarchical Bayesian networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(11): 2695 – 2703. (in Chinese)
- [3] Weber T, ter Haseborg J L. Measurement techniques for conducted HPEM signals[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2004, 46(3): 431 – 438.
- [4] 谢彦召, 孙蓓云, 周辉, 等. 地面附近的高空核爆电磁脉冲环境[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(7): 680 – 684.
Xie Y Z, Sun B Y, Zhou H, et al. High-altitude electromagnetic pulse environment over the lossy ground[J]. High Power Laser & Particle Beams, 2003, 15(7): 680 – 684. (in Chinese)
- [5] 吴克勤, 周炯, 徐得名, 等. 超快电磁脉冲辐射的产生与检测[J]. 电子学报, 1997, 25(9): 60 – 63.
Wu K Q, Zhou J, Xu D M, et al. Generation and detection of ultrafast electromagnetic pulses radiation[J]. Acta Electronica Sinica, 1997, 25(9): 60 – 63. (in Chinese)
- [6] Zeng R, Yu J J, Wang B, et al. Study of an integrated optical sensor with mono-shielding electrode for intense transient E-field measurement[J]. Measurement, 2014, 50: 356 – 362.
- [7] 任国斌, 王智, 娄淑琴, 等. 相移光纤布拉格光栅的光子晶体理论研究[J]. 电子学报, 2004, 32(3): 421 – 424.
Ren G B, Wang Z, Lou S Q, et al. On the application of photonic crystals theory for investigating phase-shifted fiber Bragg gratings[J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(3): 421 – 424. (in Chinese)
- [8] 方云团, 王誉雅, 夏景. 基于光学 Parity-Time 对称微腔结构的大范围电场传感器[J]. 物理学报, 2019, 68(19): 194201.
Fang Y T, Wang Y Y, Xia J. Large-range electric field sensor based on parity-time symmetry cavity structure[J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(19): 194201. (in Chinese)
- [9] 柏宁丰, 孙小菡. 基于耦合边界的紧凑型光子晶体定向耦合器的优化设计[J]. 电子学报, 2007, 35(2): 220 – 223.
Bai N F, Sun X H. Optimum design on compact photonic crystal waveguide directional coupler based on adiabatic coupling[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(2): 220 – 223. (in Chinese)
- [10] 于文兵, 田婕, 王英. 选择性填充光子晶体光纤应变特性研究[J]. 电子学报, 2016, 44(9): 2164 – 2167.
Yu W B, Tian J, Wang Y. Strain characteristics for selectively infiltrated photonic crystal fibers[J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(9): 2164 – 2167. (in Chinese)
- [11] Gibson R, Selfridge R, Schultz S, et al. Electro-optic sensor from high Q resonance between optical D-fiber and slab waveguide[J]. Applied Optics, 2008, 47(13): 2234 – 2240.
- [12] Zhang J H, Chen F S, Sun B, et al. Integrated optical waveguide sensor for lightning impulse electric field measurement[J]. Photonic Sensors, 2014, 4(3): 215 – 219.

作者简介



李仙丽 女, 1985年5月出生, 山西临汾人. 讲师、硕士生导师. 2008和2015年分别毕业于天津大学和西安交通大学获工学学士和工学博士学位. 主要从事光学检测、电磁测量等方面的研究工作.

E-mail: lxli@xidian.edu.cn



王冬冬 男, 1984年3月出生, 河南临颖人. 2011年毕业于复旦大学获博士学位. 现就职于中国舰船研究设计中心工作, 从事电磁兼容及防护技术方面的研究工作.