周期性微波传输线中表面态的耦合分析

L. Ivzhenko [1,2], A. Girich [2], M. Baranowski [3], A. Kharchenko [2], S. Mieszczak [1], S. Polevoy [2], S. Tarapov [2,4], M. Krawczyk [1]，**以及 J. Kłos** [1]

[1] 亚当·密茨凯维奇大学，自旋电子学与量子信息研究所，物理学院，Uniwersytetu Poznańskiego 2, 61-614 波兹南，波兰[2] 乌克兰国家科学院 O. Ya. Usikov 无线电物理与电子学研究所，Ac. Proskura str. 12, 61085，哈尔科夫，乌克兰[3] 亚当·密茨凯维奇大学，物理学院，Uniwersytetu Poznańskiego 2, 61-614 波兹南，波兰[4] V. N. Karazin 哈尔科夫国立大学，4 Svobody Sq., 61022，哈尔科夫，乌克兰

电子邮箱：ivzhenko@amu.edu.pl

摘要 – 周期性线性结构（如周期性波导或由微元（即球体、腔体）组成的链）中的电磁波频谱，会呈现一系列传播波阻带。破坏周期性微带线的平移对称性，也可能使微波局域在微带线边缘。本文研究了工作于 GHz 频率、可视为一维光子晶体的周期性微带传输线。我们从拓扑的角度解释了表面态存在的条件。传输测量和数值计算支持了我们的理论预测。此外，我们还表明，在对称微带线中，由于微带线两侧局域模之间的倏逝波耦合，表面态会分裂为对称模和反对称模。有趣的是，两种模都能在频率带隙内实现显著的微波传**输**，这为实际应用带来了希望。

I. 引言

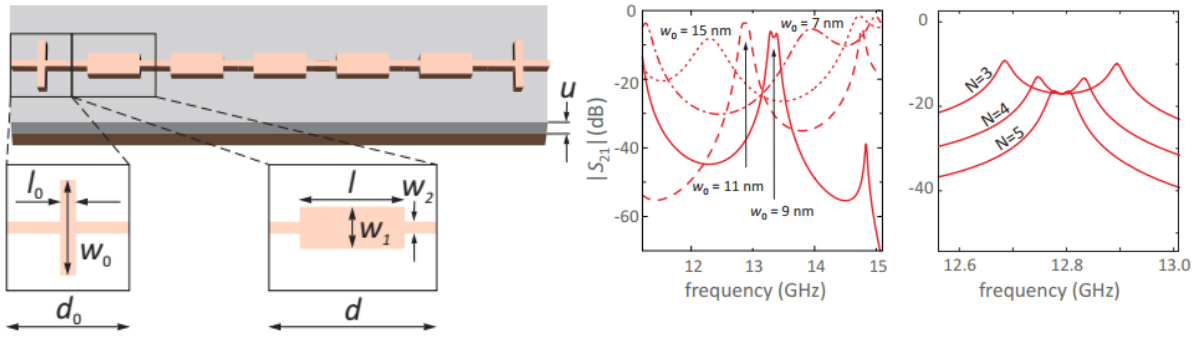
周期性结构的表面/边缘是一种天然缺陷，它会破坏晶体的平移对称性，因此可能适于实现波局域。局域于这些特殊缺陷上的波本征模称为布洛赫表面态，可在不同类型的周期性结构中观测到（例如光子晶体（PC）[1 - 3], 电子超晶格 [4] 或磁振子晶体 [5]）。它们的频率位于频率带隙范围内，因此在频域中可与通带区分开来。

由两个宽度交替变化的区段组成的微带传输线（MSTL），可视为一种典型一维光子晶体 [6]。微波系统的制作和实验研究显然比光子系统简单，却能提供关于周期系统中电磁（EM）波本质的相同基础知识。决定微带光子晶体中电磁波色散关系的体参数包括每个区段（层）的长度（一维光子晶体中的厚度）及其波阻抗，后者取决于各区段的宽度（各层的电容率）。对于具有给定体特性的截断结构，我们可以定义所谓的表面阻抗，并据此确定微带线边缘处是否存在表面态，或两段半无限微带光子晶体连接处是否存在界面态。

本文通过实验和数值方法研究周期性微带线中边缘模出现的条件。借鉴光子学中的已知理论，我们解释了在 MSTL 中观察到的边缘特性。我们研究了该结构的传输谱，特别关注电磁波通过位于频率带隙中的表面态发生隧穿的现象。我们结合能带结构的拓扑特征，讨论了微带中微波表面态的存在条件。我们特别关注倏逝耦合对边缘模的影响。对于两端翻转后对称的 MSTL，边缘模成对出现，且频率非常接近。可以将 MSTL 视为用于频分复用的带通滤波器，它还允许引入参考导频信号，该信号作为在阻带中发生隧穿的边缘模。

II. 研究结构与数值计算

所研究的周期性微带传输线（MSTL）由 5 个相连的单元组成（图 1(a)），两端各由一个参数不同的边缘单元限定。系统参数经过选择，以确保 MSTL 的带隙中存在两个表面态。每个内部单元长为 d = 16 mm，由一段较宽的微带（宽度为 w_1 = 4 mm、长度为 l = 10 mm）和一段较窄的微带组成，后者宽度为 w_2 = 1.12 mm（阻抗为 50 欧姆）。边缘单元长为 d_0 = 11.5 mm，其中央较宽部分（宽度为 w_0 = 9 mm）长为 l_0 = 1.5 mm，较窄部分与内部单元相同。整个结构位于厚度为 u = 0.381 mm、介电常数为 ε = 2.2 的 Neltec 基板上。金属微带元件和接地平面的厚度为 35 μm。



(a) (b) (c)

图 1. 所研究的周期性 MSTL。(a) 系统几何结构；(b) 边缘单元中央部分宽度为 w_0 时的数值模拟传输系数谱（由 MEEP 计算）；(c) S 型和 A 型表面模随 MSTL 单元数 N 变化时的分裂情况（集总元件计算）。

为研究边缘单元参数对表面态的影响，我们对 MSTL 结构的传输谱进行了数值计算。计算采用开源软件包 MEEP 和基于集总元件的半解析模型。我们考虑由对称的双端网络级联而成的结构，每个网络代表一个 MSTL 单元。每个网络由一个并联电容 C、输入和输出移相器组成。并联电容与接地平面上方的一条微带的面积有关，而相移则与单元长度有关。

为获得表面态，我们通过调节这些单元的长度 d_0 和其中心部分的宽度 w_0，对边缘单元进行了修改。这导致微带边缘单元中的相位延迟和并联电容发生变化，进而改变电抗。因此，可以将 MSTL 阻抗与 Z_0 输入阻抗相匹配。

我们研究了 MSTL 结构中两个表面模的空间场分布。相对于 MSTL 的中心，较低频率和较高频率模分别具有对称（S）和反对称（A）的场分布。S 模和 A 模的存在源于系统的镜像对称性。对于具有镜像对称性的系统，所有稳态解都可以归入对称模和反对称模 [7]。

我们研究了传输谱中表面模峰宽对 w_0 的依赖关系。数值模拟结果如图 1(b) 所示。可以看出，当峰值双峰移向带隙边缘时，峰宽的增加速度快于峰间距。因此，构成双峰的两个峰会合并为一个宽峰。

A 模和 S 模之间的频率差随着 MSTL 单元数量的增加而减小（图 1(c)）。当单元数量 N 较大时，两种模式的振幅在 MSTL 内部几乎衰减至零。因此，两个表面上的高频场互不影响。于是，它们之间的相位差（表面模 S 和 A 分别观测到的 0 和 π）无关紧要。因此，表面态 S 和 A 实际上变得简并。

III. 表面态：实验与数值结果

模拟透射光谱（S_{21} 参数）的结果如图2(a)所示，其中棕色点划线和红色虚线分别表示参考MTLS系统以及边缘单元几何形状发生畸变的MTLS系统。数值结果很好地再现了测量结果（实线）中的特征，在频率带隙内出现了明显的两个传输峰。然而，高频

带隙边缘发生了偏移，并且模拟中的传输峰向带隙内的较低频率方向偏移 。我们将这些效应归因于介电常数的频率依赖性，而数值模拟中未考虑这一点。

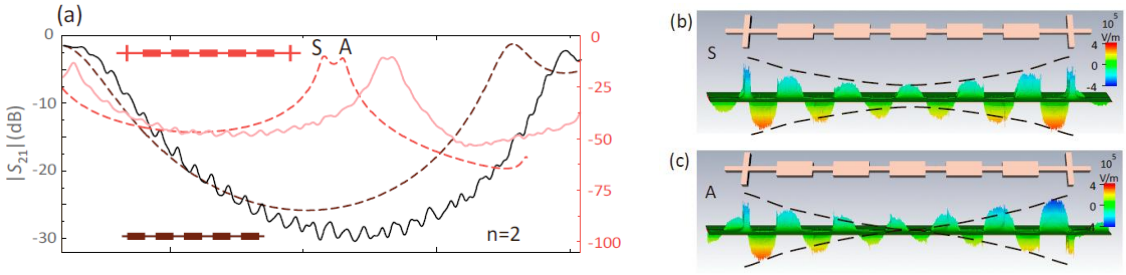


图2。（a）由5个体单元构成、没有边缘单元的MSTL的透射光谱S_{21}（棕色和黑色曲线），与包含边缘单元的同一结构的S_{21}光谱（红色和粉色曲线）进行比较。带隙中的双峰是微波经由表面态发生隧穿的特征。实验数据和数值数据（MEEP）分别以实线和虚线绘出。（b）对称表面模（S）和（c）反对称表面模（A）的空间分布，由数值计算得到，对应于（a）中可见的双峰。（b）和（c）中手绘的黑色虚线分别表示S模和A模振幅的指数衰减。

IV. 结论

我们通过实验和数值方法研究了微波在周期性调制宽度的微带传输线中的传输。我们表明，在由周期性形成的宽频率带隙内，振幅局域于微带两端的模式能够使微波隧穿整个结构。

此外，我们证明了表面态峰分裂为对称模和反对称模，其中电磁场分别在微带两端同相和反相振荡。两者都适用于实现微带中的高微波传输。我们还表明，通过调整边缘单元的几何参数，可以改变阻带内表面模的频率，调节它们之间的倏逝耦合，并控制对称表面模与反对称表面模之间的频率分裂。

致谢

This 本研究得到波兰国家科学中心资助，项目为 OPUS-LAP，编号 2020/39/I/ST3/02413。

参考文献

[1] D. Yilmaz 和 A. Yeltik，“对称性破缺表面中的布洛赫波传播高度可控”《光学快报》43，2660，2018。[2] D. Aurelio 和 M. Liscidini，“布洛赫表面波中的电磁场增强”《物理评论B》96，045308，2017。[3] A. Vinogradov 等，“一维光子晶体界面中的表面态特性”《物理评论B》74，045128，2006。[4] J. Klos 和 H. Puszkarski，“扰动表面的超晶格中 Tamm 态与肖克利态共存的条件”《物理评论B》68，045316，2003。[5] J. Rychy 和 J. Klos，“平面磁子晶体中的自旋波表面态”1 50，164004，2017 D，《应用物理学杂志 D》.[6] Y. Nakata 等，“由平移形变产生的拓扑边界模”《物理评论快报》124，073901，2020。[7] J. D. Joannopoulos、S. G. Johnson、J. N. Winn 和 R. D. Meade，《光子晶体：塑造光的流动》，第2版，普林斯顿大学出版社，2008。