

一种扩展蘑菇型 EBG 结构阻带带宽的新方法

史凌峰* 王海鹏

(西安电子科技大学超高速电路设计与电磁兼容教育部重点实验室 西安 710071)

(西安电子科技大学电路 CAD 所 西安 710071)

摘要: 该文根据蘑菇型电磁带隙(EBG)结构的等效电路原理提出一种插入交指电容的方法,实现扩宽蘑菇型 EBG 结构阻带宽度,并设计一种 T 型交指电容 EBG 结构验证该方法的有效性。 -30 dB 时该结构相对于蘑菇型 EBG 结构,阻带下截止频率从 0.9 GHz 降到 290 MHz,带宽从 6.1 GHz 提高到 7.1 GHz。在不改变 EBG 结构单元面积,并增加交指单元层数和降低单元厚度的情况下,通过仿真验证该方法可有效提高抑制同步开关噪声的能力。

关键词: 电磁带隙; 电源完整性; 同步开关噪声; 阻带; 交指电容

中图分类号: TN811

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)10-2537-04

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.00141

Novel Method to Broaden the Stop-band Width of the Mushroom-like Electromagnetic Band Gap Structure

Shi Ling-feng Wang Hai-peng

(Key Lab of High-Speed Circuit Design and EMC, Ministry of Education, Xidian University, Xi'an 710071, China)

(Institute of Electronic CAD, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: According to the equivalent circuit of the mushroom-like Electromagnetic Band Gap (EBG) structure, a novel method of inserting the Inter-Digital Capacitor (IDC) to broaden the bandwidth of the stop-band is proposed in this paper. The T-shaped IDC EBG structure is designed to prove the correction and validity of the method. Compared with the mushroom-like EBG, the -30 dB stop-band of the proposed structure is broadened from 6.1 GHz to 7.1 GHz and the lower corner frequency is decreased from 0.9 GHz to 0.29 GHz. It is implemented by increasing the number of planes of IDC and decreasing the thickness of cell without changing the area of EBG cell. The results of the simulation show that the presented TIDC EBG is fit for Simultaneous Switching Noise (SSN) suppression.

Key words: Electromagnetic Band Gap (EBG); Power integrity; Simultaneous Switching Noise (SSN); Stop-band; Inter-Digital Capacitor (IDC)

1 引言

同步开关噪声(Simultaneous Switching Noise, SSN), 又称地弹噪声或者是 ΔI 噪声, 是由高速数字电路系统工作时门电路的快速同时开关产生。如果 SSN 在设计过程中不能被及时发现和抑制, 将会导致数字系统产生严重的信号完整性(Signal Integrity, SI), 电源完整性(Power Integrity, PI)以及电磁干扰(Electro-Magnetic Interference, EMI)等问题^[1]。所以伴随着数字系统向高时钟频率, 高速数据传输速率和低供电电压趋势发展, 研究如何有效抑制 SSN 的工作对于多层印刷电路板(Printed Circuit Board, PCB)的设计具有重要意义。

早期的研究工作中提出许多抑制 SSN 的方法, 主要包括使用去耦电容^[2], 嵌入式电容器^[3], 电源层分割和电源岛的方法^[4]以及采用差分信令^[5], 但是这些方法存在不足: 去耦电容由于其存在的等效串联电感只能应用在 600 MHz 以下低频范围; 嵌入式电容存在制作费用和有限阻带带宽的限制; 使用分割电源层和电源岛的缺点是破坏了电源平面电流返回路径的连续性, 当传输线经过分割层时会使 SI 严重下降; 利用差分信令技术可以提高信号的传输质量, 但需要增大 PCB 的面积和布线密度, 增加制作成本, 只适合个别数据率要求特别高的信号布线使用。

目前, 文献[6]提出使用蘑菇型(mushroom-like)电磁带隙(Electromagnetic Band Gap, EBG)结构对高速电路两层平行板电源分布网络中的 SSN 进行抑制。该 EBG 结构在阻带内有很好的 SSN 抑制能

2012-02-20 收到, 2012-07-19 改回

国家自然科学基金(60876023)和重点实验室基金资助课题

*通信作者: 史凌峰 lfshi@mail.xidian.edu.cn

力,但阻带带宽较窄。因为多层 PCB 中 SSN 分布在一个从直流到 6 GHz 的宽频率范围,且信号在 EBG 结构阻带内传输特性最好^[7],所以增加阻带带宽和降低阻带的中心频率成为研究的重点。叶状(leafy)结构^[8]和回旋 L-bridge 结构^[9]等共面型 EBG 结构可以在比较宽的频率范围内抑制 SSN,但是单元面积较大。利用阻带不同的共面型单元分别部分阵列刻蚀在电源层和地层^[10]或将共面型 EBG 与高阻抗平面(High Impedance Surface, HIS)垂直级联^[11]可增加阻带带宽。增加每个 EBG 单元的过孔数量可扩展阻带带宽^[12],但是其阻带频率位于 GHz 以上,低频范围内不能起到抑制噪声的作用。HIS 添加螺旋平面可降低阻带中心频率^[13],但阻带不连续。

本文通过对蘑菇型 EBG 结构的等效电路进行分析,提出一种扩展 EBG 结构阻带宽度的方法:插入交指电容(Inter-Digital Capacitor, IDC)法,即把蘑菇型 EBG 单元的电源层和 HIS 层之间的平行板电容用 T 型交指电容代替。使用这种电容可以显著降低截止频率,提高上截止频率,增大阻带带宽。这种方法具有连续宽阻带、单元面积小等优点。

2 蘑菇型 EBG 结构和等效电路

图 1 是蘑菇型 EBG 结构的典型设计结构,由电源层、地层和 HIS 组成。HIS 单元是由一个金属片和连接金属片到地层的过孔组成。图 2 表示蘑菇型 EBG 单元的等效电路^[14],其中 L_1 , C_1 和 C_2 组成的 π 型电路表示电源层与 HIS 层之间的平行板结构的电感和电容, L_2 表示 HIS 层的电感。 L_3 和 C_4 表示电源层与地层之间平行板结构的电感及电容, L_v 和 C_3 组成的并联电路表示连接 HIS 和地层的过孔和两层之间的电容。文献[14]给出了蘑菇型 EBG 结构的下截止频率 f_L 和上截止频率 f_H 的近似解析式:

$$f_L = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2}{2C_1(L_1 + L_3 + 2L_v)}} \quad (1)$$

$$f_H = \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{2[(L_2/L_v) + 4 - \sqrt{(L_2/L_v)^2 + 16}]}{C_3L_2}} \quad (2)$$

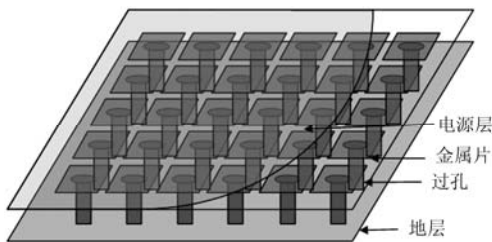


图1 蘑菇型 EBG 结构的典型设计

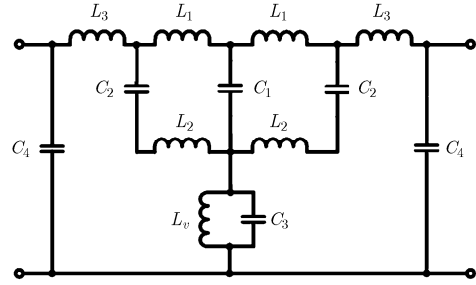


图2 典型蘑菇型 EBG 单元的等效电路

3 插入交指电容展宽阻带宽度

从式(1)和式(2)可知,增大等效电容 C_1 可以有效地降低 EBG 结构阻带的下截止频率,减小等效电感 L_2 可提高阻带的上截止频率,进而展宽阻带带宽。因此为满足实际应用中需要低频、宽阻带抑制 SSN 的需求,本文通过对蘑菇型 EBG 的电源层和 HIS 间插入交指电容来提高蘑菇型 EBG 的阻带性能。

使用插入交指电容方法设计一种新型的蘑菇型 EBG 结构,这里将其命名为 T 型交指电容 EBG (TIDC-EBG)结构。该 EBG 单元的立体结构如图 3(a)所示,图 3(b)是该 EBG 单元的侧视图。从图中可以看到,交指电容是由 $2N$ 个等间距垂直相同的矩形金属层相互嵌套构成的电容并联组成,其中 P_1 到 P_N 是 N 个垂直连接到 PCB 电源层的金属层, G_1 到 G_N 是 N 个垂直连接到 HIS 的金属层,相邻的两金属层作为每个电容的两个极板,相邻金属层之间缝隙填充的介质作为电容介质。通过增加交指的金属层数,可以显著增大并联连接的电容量。在实际 PCB 加工中,每个金属层可以近似用相互连接的盲孔并排放置构成,盲孔的孔径等于金属片的厚度,盲孔的深度等于金属片的长度。其中盲孔采用激光钻孔技术实现。

本文以 IDC 取 $N=1$ 时 EBG 结构的阻带宽度进行分析。图 3(c)中虚线框内电路表示 $N=1$ 时 IDC 的等效电路,其中 C_{IDC} 表示 IDC 两层之间的电容, L_P 和 L_G 表示 IDC 中分别连接电源层和 HIS 的 P_N 和 G_N 层(如图 3(b)所示)的电感, L 表示两层之间的耦合互感。相对于典型的蘑菇型 EBG 结构,使用交指电容的 TIDC-EBG 结构显著增大电源层与 HIS 之间的等效电容 C_1 ,且由于 IDC 结构使电源层与 HIS 厚度增大进而使 L_3 增大,根据式(1)可知 f_L 将下移,同时 HIS 的电感与 IDC 结构的等效电感 L_G 并联使 HIS 的实际电感 L_2 减小,根据式(2)可得 f_H 上移。

如图 3(a)所示,对 EBG 结构单元的几何参数用以下参数集($p, w, h_1, h_2, r, \epsilon_1, \epsilon_2, N, l_1, l_2, d$)表示,

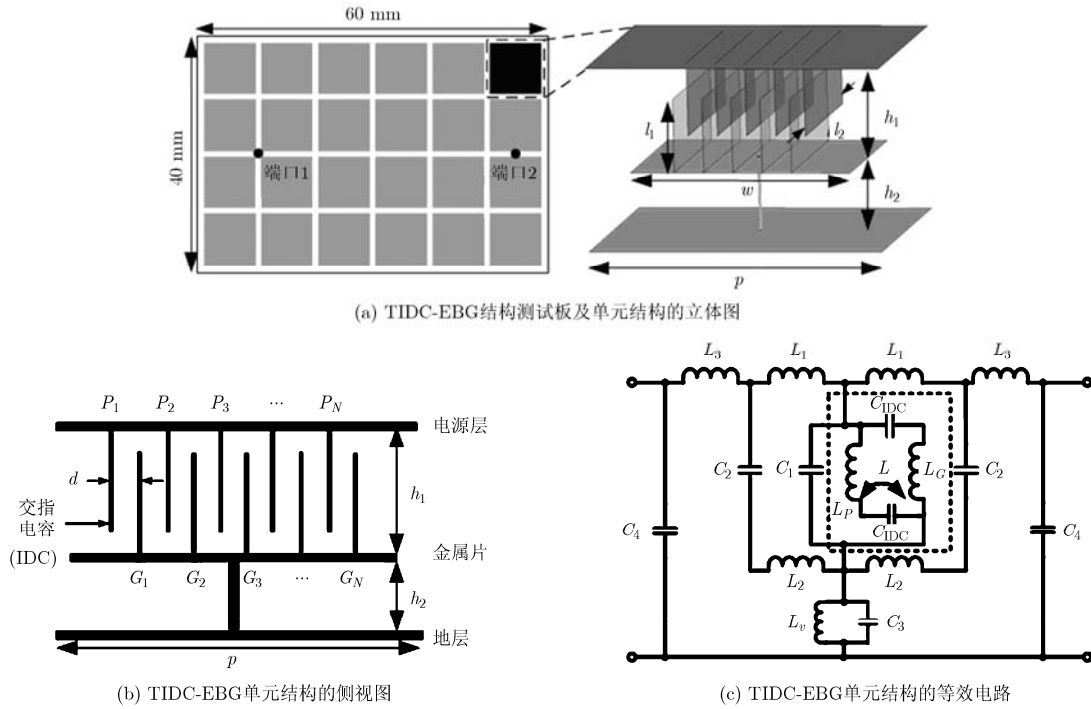


图 3 TIDC-EBG 结构的设计

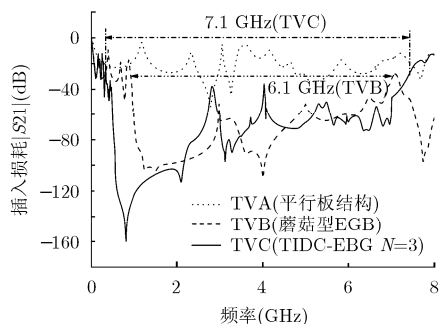
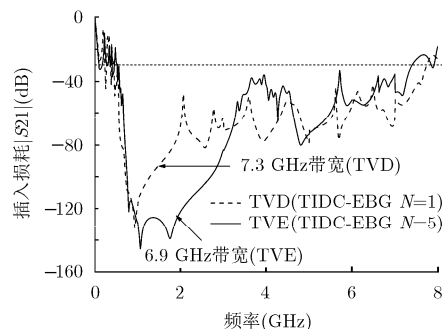
其中 p 表示单元周期， w 表示 HIS 的边长， h_1 和 h_2 分别是 HIS 与电源层和地层的距离， r 表示过孔的孔径， ϵ_1 和 ϵ_2 分别是 HIS 与电源层和地层之间介质的相对介电常数， N 表示 IDC 个数， l_1 和 l_2 分别是 T 型 IDC 每一个平面的长度和宽度， d 表示 IDC 中相邻平面之间的间距。

4 仿真结果及分析

为了验证使用 IDC 方法的有效性，分别设计 3 种不同参数 TIDC-EBG 结构的 PCB 测试板，同时利用平行板电源/地结构和典型的蘑菇型 EBG 结构进行对比。图 3(a) 为 $N=5$ 的 TIDC-EBG 测试板示意图，所有的测试板面积均为 $60 \times 40 \text{ mm}^2$ ，端口 1 和端口 2 用于测量插入损耗，以测试板左上角为坐标原点，横向为 X 轴，纵向为 Y 轴，端口 1 和端口 2 的位置分别是 (19.9 mm, 9.9 mm) 和 (19.9 mm, 54.9 mm)。其中，测试板 TVA 是两层平行板电源/地结构，两层之间采用厚度为 0.45 mm，介电常数为 4.4 的 FR4 材料；测试板 TVB 是典型蘑菇型 EBG 结构，参数含义见第 3 节 EBG 结构单元，参数为 (10 mm, 9.8 mm, 0.05 mm, 0.4 mm, 0.15 mm, 4.4, 4.4)；测试板 TVC, TVD 和 TVE 是 3 种 N 取不同值时的 TIDC-EBG 结构，参数含义见第 3 节 EBG 结构单元，且参数集分别为 (10 mm, 9.8 mm, 5 mm, 0.4 mm, 0.15 mm, 4.4, 4.4, 3, 4.95 mm, 9.8 mm, 0.05 mm), (10 mm, 9.8 mm, 10 mm, 0.4 mm, 0.15 mm, 4.4, 4.4,

1, 9.95 mm, 9.8 mm, 0.05 mm), (10 mm, 9.8 mm, 2 mm, 0.4 mm, 0.15 mm, 4.4, 4.4, 5, 1.95 mm, 9.8 mm, 0.05 mm)。

本文采用电磁仿真软件 Ansoft HFSS V11 对测试板进行插入损耗 $|S_{21}|$ 仿真，图 4 是测试板 TVC 的仿真结果，并与测试板 TVA 和 TVB 的仿真结果进行比较。从图中可以看出，-30 dB 时测试板 TVB 的阻带为 930 MHz 到 7 GHz，阻带宽度为 6.1 GHz，而测试板 TVC 的阻带为 290 MHz 到 7.4 GHz，阻带宽度为 7.1 GHz，所以 TIDC-EBG 结构比典型蘑菇型 EBG 结构具有更宽的阻带带宽和更低的下截止频率。图 5 是改变 IDC 参数 N 和 l_1 的两种 TIDC-EBG 结构的测试板 TVD 和 TVE 插入损耗仿真结果，从图中可以看出，TVD 和 TVE 抑制 SSN 能力与 TVC 的性能接近，根据 TVD 和 TVE 的设计参数可知，相比于 TVC，TVD 的 IDC 正对面积增大，但 IDC 个数减小，而 TVE 的 IDC 正对面积减小，但 IDC 个数增大。所以在不降低 TIDC-EBG 结构性能的情况下，增大 IDC 设计参数 N 可使 IDC 正对面积相应减少，进而降低整个 EBG 结构的厚度，提高 TIDC-EBG 结构在高速多层 PCB 中宽阻带抑制 SSN 的性能。不过由于使用 IDC 结构，使得该方法在 PCB 制作成本上相比于蘑菇型 EBG 结构有所增加，采用 IDC 的个数越多，其成本越高。所以需要合理选择 IDC 的个数及其正对面积，节约 PCB 的制造成本。

图4 测试板 TVA, TVB, TVC 插入损耗 $|S_{21}|$ 仿真图图5 测试板 TVD, TVE 插入损耗 $|S_{21}|$ 仿真图

5 结论

本文基于蘑菇型 EBG 结构提出一种新颖的展宽阻带宽度的方法,并设计 TIDC-EBG 结构,从理论上分析 IDC 结构提高阻带宽度的原因。通过仿真验证该 EBG 结构可以有效的抑制高速多层印刷电路板中存在的 SSN,并经分析讨论在不改变 TIDC-EBG 结构性能的情况下,适当增大 IDC 设计参数 N 可以降低 EBG 结构的厚度,为宽带多层 EBG 设计方法提供理论参考。

参考文献

- [1] Jong Hwa Kwon, Dong Uk Sim, Sang Il Kwak, *et al.* Novel electromagnetic bandgap array structure on power distribution network for suppressing simultaneous switching noise and minimizing effects on high-speed signals[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2010, 52(2): 365-372.
- [2] Kim Yong-ju, Yoon Han-sub, Lee Seong-soo, *et al.* An efficient path-based equivalent circuit model for design, synthesis, and optimization of power distribution networks in multilayer printed circuit boards[J]. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, 2004, 27(1): 97-106.
- [3] Prathap Muthana, Krishna Srinivasan, Arif Ege Engin, *et al.* Improvements in noise suppression for I/O circuits using embedded planar capacitors[J]. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, 2008, 31(2): 234-245.
- [4] Wu Chun-te, Shiue Guang-hwa, Lin Sheng-mou, *et al.* Composite effects of reflections and ground bounce for signal line through a split power plane[J]. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, 2002, 25(2): 297-301.
- [5] Abhari R, Eleftheriades G V, and Deventer-Perkins E V. Analysis of differential vias in a multilayer parallel plate environment using a physics-based CAD model[C]. *IEEE International Microwave Symposium Digest*, Phoenix, AZ, USA, May 2001: 2031-2034.
- [6] Siveenpiper D, Zhang Li-jun, Jimenez Broas R F, *et al.* High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1999, 47(11): 2059-2074.
- [7] 丁同浩, 李玉山, 张伟, 等. 电磁带隙结构的信号完整性分析[J]. *电子与信息学报*, 2010, 32(5): 1267-1270.
- [8] Ding Tong-hao, Li Yu-shan, Zhang Wei, *et al.* The signal integrity analysis of electromagnetic band-gap structure[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(5): 1267-1270.
- [9] He Y, Li L, Liang C H, *et al.* Leafy EBG structures for ultra-wideband SSN suppression in power/ground plane pairs[J]. *Electronics Letters*, 2010, 46(11): 768-769.
- [10] 史凌峰, 侯斌. 一种适用于高速电路中 SSN 抑制的紧凑型电磁带隙新结构[J]. *电子与信息学报*, 2011, 33(9): 2283-2286.
- [11] Shi Ling-feng and Hou Bin. A novel compact electromagnetic band-gap structures using for SSN suppression in high speed circuits[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(9): 2283-2286.
- [12] He Yan, Liang Chang-hong, and Liu Qing-huo. Novel array EBG structures for ultrawideband simultaneous switching noise suppression[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2011, 10: 588-591.
- [13] Wang Ting-kuang, Hsieh Chia-yuan, Chuang Hao-hsiang, *et al.* Design and modeling of a stopband-enhanced EBG structure using ground surface perturbation lattice for power/ground noise suppression[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2009, 57(8): 2047-2054.
- [14] Zhang Mu-shui, Li Yu-shan, Jia Chen, *et al.* A power plane with wideband SSN suppression using a multi-via electromagnetic bandgap structure[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2007, 17(4): 307-309.
- [15] He Hui-sen, Lai Xin-quan, Xu Wen-dan, *et al.* Efficient EMI reduction in multilayer PCB using novel wideband electromagnetic bandgap structures[J]. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 2011, 21(4): 363-370.
- [16] Wu Tzong-lin, Chuang Hao-hsiang, and Wang Ting-kuang. Overview of power integrity solutions on package and PCB: decoupling and EBG isolation[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2010, 52(2): 346-356.
- [17] 史凌峰: 男, 1970年生, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电子系统集成、控制与检测。
- [18] 王海鹏: 男, 1987年生, 硕士生, 研究方向为电子系统集成、控制与检测。