

基于矢量有限元法的热沉结构电磁辐射研究

石 峥, 杜平安, 聂宝林

(电子科技大学机械电子工程学院, 四川成都 610054)

摘 要: 高频、高功率芯片工作时会产生大量的热, 热沉可以有效地帮助芯片散热. 然而在高频环境下, 热沉往往成为主要的电磁辐射源, 降低了整个系统的电磁兼容能力, 所以有必要对热沉的电磁辐射特性进行研究. 本文采用矢量有限元法, 从不同的接地方式、散热鳍片数目及厚度变化、鳍片高度变化几个方面分析了热沉的电磁辐射特性, 提出了影响谐振频率的关键因素, 并从电磁兼容角度提出了热沉设计的注意事项. 数值仿真表明, 合理的选择接地方式可以有效地提高谐振频率, 降低电磁能量辐射; 散热鳍片的数目和厚度变化对于谐振频率和电磁辐射没有明显的影响, 然而鳍片的高度对于电磁辐射能量影响显著.

关键词: 矢量有限元法; 热沉; 鳍片; 电磁辐射; 散射参数

中图分类号: TM 153 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372 2112 (2009) 11-2439 05

Study of Heatsink Electromagnetic Radiation Based on Vector FEM

SHI Zheng, DU Ping-an, NIE Bao-lin

(School of Mechatronics Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China)

Abstract: Heatsink is often used to cool the chip which works in high frequency and high power. However, in high frequency environment, the heatsink becomes the main electromagnetic radiation source. Because the EMC capacity of system is decreased due to the heatsink, it is necessary to study the characteristics of heatsink electromagnetic radiation. In the paper, the vector FEM for heatsink is firstly introduced based on electromagnetic field theory. Then the characteristics of heatsink electromagnetic radiation are analyzed by the aspects of grounding methods, number and thickness of cooling fins changes, height of cooling fin changes. The key factors which affect the resonant frequency and the design notes of heatsink are presented. As the simulation results show, the power of electromagnetic radiation can be decreased and the resonant frequency can be improved effectively through selecting reasonable grounding method, the number and thickness of cooling fins changes have little effects on the resonant frequency and power of electromagnetic radiation, however, the power of electromagnetic radiation is impacted remarkably by the height of cooling fin changes.

Key words: vector FEM; heatsink; cooling fin; electromagnetic radiation; scattering parameter

1 引言

在现代计算机系统及微波器件中, 芯片的工作频率均达到了 GHz 以上. 高频、高功率的芯片在工作工程中会产生大量的热. 为保证芯片工作环境温度稳定, 在芯片上广泛采用热沉结构用于散热.

热沉材料采用热的良导体, 并为增大散热面积, 普遍采用鳍片结构. 随着制造工艺的提高, 鳍片厚度越来越薄, 布置密度越来越大. 然而, 由于热沉紧贴工作芯片, 在共模电流的驱动下, 热沉成为电磁辐射源, 当共模电流频率达到热沉的谐振频率时, 会造成电磁辐射强度的激增^[1]. 可见, 热沉降低了系统的电磁兼容能力, 严重时甚至会造成系统无法通过电磁兼容标准测试.

对热沉进行电磁辐射的研究具有重要意义, 然而由

于热沉结构复杂, 尤其是鳍片间的电磁辐射耦合关系目前无法用数学模型描述, 所以数值法成为研究热沉电磁辐射的主要方法^[2].

国外学者运用数值方法对热沉结构的电磁辐射特性进行了研究. 如 K Li, C E Brench, N J Ryan 分别用时域有限差分法 (FDTD) 分析了热沉结构的辐射^[3-5], Toshihiko Matsuura 用矩量法 (MOM) 分析比较了在连续噪声源和瞬态噪声源激励下的热沉辐射^[6], Lance Covert, Jerrshan Lin 用有限元法分析了热沉的天线效应^[7], Brace Archambeault 对比了不同数值方法在分析热沉辐射时的特点^[8]. 目前, 热沉电磁辐射研究的发展趋势主要集中在散热与电磁辐射特性耦合分析、影响热沉电磁辐射关键因素研究及数值方法准确性研究几个方面. 其中, 如何正确建立和求解仿真模型一直是影响数值方法准确

性的关键问题。现有的数值方法都有适用范围, 必须要依据实际问题来选择数值方法。其中, 矢量有限元法由于自身特点, 尤其适合分析热沉之类的复杂结构, 对内部电磁场问题建模更是具有其他数值方法无法比拟的优势^[9]。本文采用矢量有限元法, 从接地方式、散热鳍片数目及厚度变化、鳍片高度变化几方面分析了热沉的电磁辐射特性, 提出了影响谐振频率的关键因素, 并从电磁兼容角度提出了热沉设计的注意事项。

2 矢量有限元法求解电磁辐射原理

矢量有限元方法解决了传统的结点基单元表示矢量电场或磁场时, 遇到的非物理解和难于在导体表面强加边界条件, 及难于处理导体和介质边缘、角等问题。本文以一次四面体单元为例, 阐述采用矢量有限元法进行热沉结构电磁辐射分析的原理。设单元线性插值函数为:

$$L_i^e(x, y, z) = \frac{1}{6V^e}(a_i^e + b_i^e x + c_i^e y + d_i^e z) \quad (1)$$

式中, L_i^e 为节点 i 上的插值函数, V^e 为单元体积, a_i^e 、 b_i^e 、 c_i^e 、 d_i^e 为单元插值函数的系数。

则矢量函数为

$$\mathbf{W}_{i_1 i_2} = L_{i_1}^e \nabla L_{i_2}^e - L_{i_2}^e \nabla L_{i_1}^e \quad (2)$$

由于 $\nabla \cdot \mathbf{W}_{i_1 i_2} = 0$ (3)

$$\nabla \times \mathbf{W}_{i_1 i_2} = 2 \nabla L_{i_1}^e \times \nabla L_{i_2}^e \quad (4)$$

并结合式(1)可知, $\mathbf{W}_{i_1 i_2}$ 只有在以 i_1 和 i_2 为顶点的棱边上才有切向分量。定义该棱边的边长为 l , 则导出任意棱边 i 的矢量基函数为

$$\mathbf{N}_i^e = \mathbf{W}_{i_1 i_2} l_i^e = (L_{i_1}^e \nabla L_{i_2}^e - L_{i_2}^e \nabla L_{i_1}^e) l_i^e \quad (5)$$

因为模型内部有源, 热沉外部自由空间的电场满足矢量波动方程

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}) - k_0^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}) = -jk_0 Z_0 \mathbf{J}(\mathbf{r}) \quad (6)$$

式中, $\mathbf{J}(\mathbf{r})$ 为激励源电流, $k_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$ 为自由空间波数, $Z_0 = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0}$ 为自由空间的特征阻抗, 引入电型半空间并矢格林函数 \overline{G}_e ,

$$\overline{G}_e(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \overline{G}_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}') - \overline{G}_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}'_i) + 2\hat{z}\hat{z}G_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}'_i) \quad (7)$$

式中, $\overline{G}_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = (\overline{\mathbf{I}} - \frac{1}{k_0^2} \nabla \nabla) G_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \quad (8)$

$$G_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \frac{e^{-jk_0 |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}}{4\pi |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} \quad (9)$$

式中, z 为热沉的法线方向, \mathbf{r} 和 \mathbf{r}' 分别表示从坐标原点指向场点和源点的矢量, \overline{G}_0 为自由空间并矢格林函数, G_0 为时谐场自由空间格林函数, \mathbf{r}'_i 为 \mathbf{r}' 的镜像, $\overline{\mathbf{I}} = \hat{x}\hat{x} + \hat{y}\hat{y} + \hat{z}\hat{z}$ 为单位并矢, \overline{G}_e 满足索末非(Sommerfeld)辐射条件, 及

$$\nabla \times \nabla \times \overline{G}_e(\mathbf{r}, \mathbf{r}') - k_0^2 \overline{G}_e(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \overline{\mathbf{I}}\delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}') \quad (10)$$

$$\mathbf{n}' \times \overline{G}_e = 0 \quad (11)$$

式中, $\delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}') = \begin{cases} \infty, & \mathbf{r} = \mathbf{r}' \\ 0, & \mathbf{r} \neq \mathbf{r}' \end{cases}$, $\mathbf{n}' = -\hat{z}$, 通过将式

(1)与 $\overline{G}_e(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ 点乘并在体积 V_s 内积分, V_s 为包含源电流 \mathbf{J} 的体积, 结合并矢格林第二恒等式及式(6)可得外部任意点电场强度为:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(\mathbf{r}) = & -jk_0 Z_0 \iiint_V \mathbf{J}(\mathbf{r}') \cdot \overline{G}_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}') dV \\ & + jk_0 Z_0 \iiint_V \mathbf{J}(\mathbf{r}') \cdot [\overline{G}_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}'_i) + 2\hat{z}\hat{z}G_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}'_i)] dV \\ & + 2 \iint_{S_a} [\hat{z} \times \mathbf{E}(\mathbf{r}')] \cdot [\nabla' \times \overline{G}_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}')] dS' \quad (12) \end{aligned}$$

式中, S_a 为热沉的表面区域, 右边第一项是由 \mathbf{J} 在自由空间产生的辐射场, 表示为 \mathbf{E}^{inc} ; 第二项为 \mathbf{J} 的镜像电流产生的场, 表示为 \mathbf{E}^{ref} 。可得

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(\mathbf{r}) = & \mathbf{E}^{\text{inc}}(\mathbf{r}) + \mathbf{E}^{\text{ref}}(\mathbf{r}) \\ & + 2 \iint_{S_a} [\hat{z} \times \mathbf{E}(\mathbf{r}')] \cdot [\nabla' \times \overline{G}_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}')] dS' \quad (13) \end{aligned}$$

在媒质的分界面上, 满足边界条件

$$\hat{\mathbf{n}} \times (\mathbf{E}_1 - \mathbf{E}_2) = 0 \quad (14)$$

$$\hat{\mathbf{n}} \times (\mathbf{H}_1 - \mathbf{H}_2) = \mathbf{J}_s \quad (15)$$

式中, \mathbf{J}_s 为分界面的面电流密度。

为了对泛函进行离散, 将求解区域细化为许多小的四面体体积单元, 通过使用矢量基函数, 在每个单元内的场可展开为^[10, 11]

$$\mathbf{E}^e = \sum_{i=1}^n E_i^e \mathbf{N}_i^e = \{\mathbf{E}^e\}^T \{\mathbf{N}^e\} = \{\mathbf{N}^e\}^T \{\mathbf{E}^e\} \quad (16)$$

式中, n 为展开项的数目, E_i^e 为未知的展开系数, \mathbf{N}_i^e 为第 e 个单元选择的矢量基函数。

泛函可以表示为

$$\begin{aligned} F(\mathbf{E}) = & \frac{1}{2} \iiint_V \frac{1}{\mu_r} (\nabla \times \mathbf{E}) \cdot (\nabla \times \mathbf{E}) - k_0^2 \epsilon_r \mathbf{E} \cdot \mathbf{E} dV \\ & + \iiint_V jk_0 Z_0 \mathbf{J}^{\text{int}} \cdot \mathbf{E} - \frac{1}{\mu_r} \mathbf{M}^{\text{int}} \cdot (\nabla \times \mathbf{E}) dV \\ & - \frac{1}{2} \iint_{S_a} \mathbf{E} \cdot \mathbf{P}(\mathbf{E}) dS \quad (17) \end{aligned}$$

式中, \mathbf{J}^{int} 和 \mathbf{M}^{int} 表示由馈源产生的内部电流源和磁流源。按照里兹方法, 取式(17)对每条棱边场 E_i 的偏导数, 并令其为 0。可得方程组

$$[\mathbf{A}]\{\mathbf{E}\} = \{\mathbf{b}\} \quad (18)$$

式中, \mathbf{b} 是由内部源引起的, 可表示为

$$\{\mathbf{b}\} = \iiint_V \left[\frac{1}{\mu_r} \mathbf{M}^{\text{int}} \cdot \left\{ \nabla \times \mathbf{N}^e \right\} - jk_0 Z_0 \mathbf{J}^{\text{int}} \cdot \{\mathbf{N}^e\} \right] dV \quad (19)$$

施加边界条件并求解方程组, 即可求得热沉结构电磁辐射的空间电磁场分布情况。

3 热沉仿真模型建立

当激励源频率与热沉的谐振频率相同时, 热沉的辐射最强, 因此可通过谐振频率点的变化来分析接地方式和鳍片数目、厚度、高度等因素对电磁辐射特性的影响. 谐振频率采用散射参数 S_{11} 确定, 当 S_{11} 在扫描频率段出现数值急剧减小至曲线拐点时, 表明对应频率为热沉的谐振频率点. 热沉的输入功率 P_{input} 可表示为

$$P_{input} = P_{refl} + P_{rad} + P_{loss} \quad (20)$$

如果忽略由于热沉自身消耗的功率 P_{loss} , 则辐射功率 P_{rad} 可表示为

$$P_{rad} = (1 - |S_{11}|^2) P_{input} \quad (21)$$

式(21)也表明在谐振频率点时, 热沉的辐射功率最大.

本文使用 ANSOFT 公司的高频电磁场分析软件 HFSS 进行热沉的电磁辐射特性分析, HFSS 采用上节阐述的矢量有限元法进行求解. 对常见的热沉结构进行建模, 模型如图 1 所示. 芯片采用贴片天线进行模拟, 馈源位于芯片底部正中, 热沉高度 15mm, 底面积 50mm × 47mm. 通过 IHS(集成式散热器) 将热沉和芯片连接, 设置有限电导率地平面, 采用 LUMP PORT 作为馈源.

Lance Covert 和 Jenshan Lin 对矢量有限元仿真方法进行了实验验证^[7], 结果表明, 在高频段热沉结构的 S_{11} 与实验测试 S_{11} 吻合较好. 该文的热沉结构类似本文仿真模型, 其结论可用于本文. 可见, 采用矢量有限元法进行热沉结构的电磁辐射特性分析, 仿真结果真实可靠, 可用于实际工程设计.

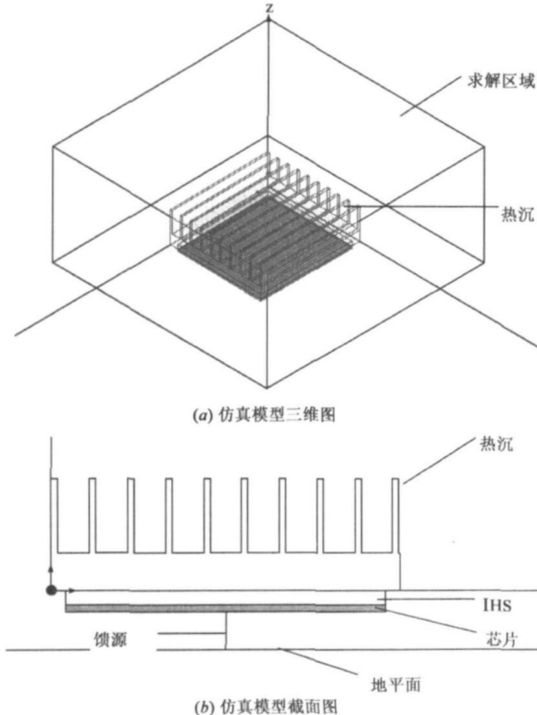


图1 热沉仿真模型

4 热沉仿真计算结果

本节通过对热沉进行多种方式的接地处理及通过对鳍片数目、厚度、高度变化等方面的仿真分析, 研究对电磁辐射的影响.

4.1 接地点数目及位置变化影响

接地点数目及位置的变化能够改变热沉表面传导电流的分布情况, 从而影响热沉结构的辐射强度并改变谐振点位置, 然而接地点数目及位置变化对热沉结构的辐射强度和谐振点的影响难以用数学模型进行准确的描述, 所以使用仿真方法是分析此类问题的主要途径. 接地点的位置安排如图 2、3 所示, 分别对单点接地、两点接地、四点接地和八点接地进行仿真分析. 选取典型的接地方式进行比较, 具体的接地布置方式如表 1 所示.

表1 典型接地方式

接地方式	接地种类	接地位置
1	单点接地	图 2 中 1
2	单点接地	图 2 中 4
3	单点接地	图 3 中 1
4	两点接地	图 2 中 1, 8
5	两点接地	图 2 中 1, 6
6	两点接地	图 3 中 3, 4
7	两点接地	图 3 中 1, 8
8	四点接地	图 2 中 1, 3, 6, 8
9	四点接地	图 2 中 2, 4, 5, 7
10	四点接地	图 3 中 1, 4, 8, 5
11	八点接地	图 2
12	八点接地	图 3

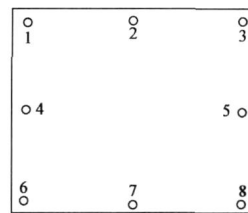


图2 接地位置排列方式

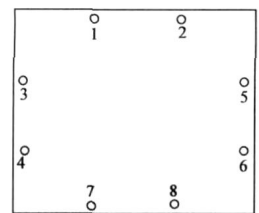


图3 接地位置排列方式

图 4 为采用单点接地三种方式的 S_{11} 比较, 可以发现三种接地方式的第一个谐振频率点均出现在 0.8GHz 处. 其中方式 2 的 S_{11} 最小, 辐射功率最大. 可见, 不同的单点接地方式对于改变谐振频率的作用不大; 接地点离馈源越近, 其谐振频率处辐射的电磁能量越大.

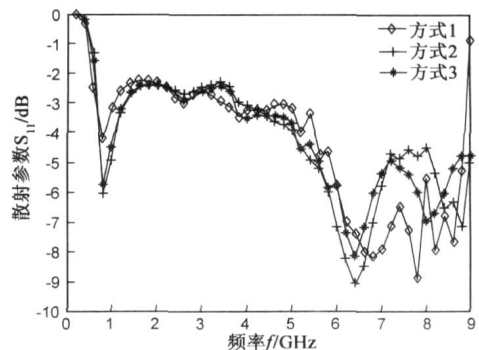


图4 单点接地方式散射参数 S_{11} 对比

图5为采用两点接地四种方式的 S_{11} 比较,可以发现采用两点接地后,四种方式的第一个谐振频率均大于单点接地方式(方式4、5、6、7谐振频率分别为1.2GHz、1GHz、1GHz、1.4GHz)。采用对角接地方式的谐振频率点要高于同侧接地方式;对角接地中,接地点距离馈源越近,其谐振频率越高,谐振频率处辐射的电磁能量也越大(例如本例中的方式7)。

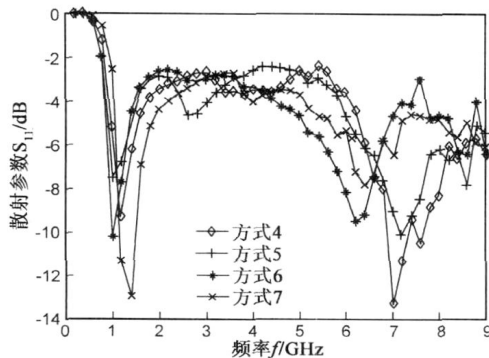


图5 两点接地方式散射参数 S_{11} 对比

图6四点接地方式散射参数 S_{11} 对比图6为采用四点接地三种方式的 S_{11} 比较,可以发现四点接地方式的第一个谐振频率均大于单点接地和两点接地方式(方式8、9、10的谐振频率分别为1.8GHz、2.4GHz、2.4GHz)。四点接地方式中,采用接地点离馈源近的方式会得到更高的谐振频率。方式8属于最常见的接地方式,可见其谐振频率低于方式9和10,并且其在谐振频率处的电磁辐射能量要远大于方式9和10

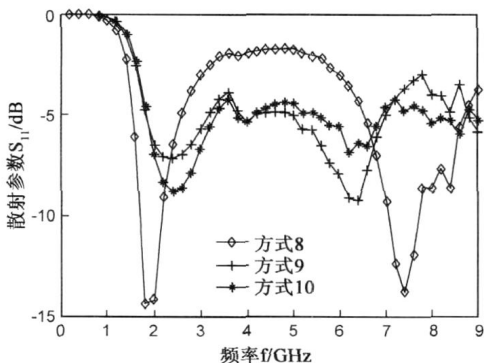


图6 四点接地方式散射参数 S_{11} 对比

图7为采用八点接地两种方式的 S_{11} 比较,可以发现八点接地方式具有比四点接地方式更高的谐振频率(方式11、12的谐振频率分别为3.4GHz、4GHz)。采用图4接地布置方式比图3接地布置方式的谐振频率要高,谐振频率处电磁辐射能量更小。

从以上的分析可以发现,接地点数目相同时,不同的接地方式对于提高谐振频率的作用不大,但可通过合理选择接地方式来减少电磁能量的辐射;增加接地点的数目可以有效的提高热沉的谐振频率,然而谐振频率点的电磁辐射能量也随着接地点数目的增加而增加。

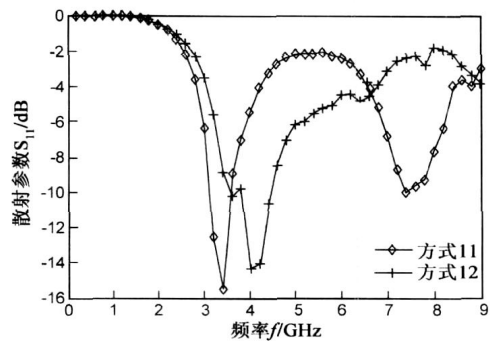


图7 八点接地方式散射参数 S_{11} 对比

4.2 鳍片数目及厚度变化对辐射的影响

图8为用于散热设置的鳍片数目变化时 S_{11} 的比较。采用最常用的接地方式8,可以发现鳍片数目的变化,基本没有改变谐振频率点,且 S_{11} 随鳍片数目变化的幅度基本可以忽略不计。

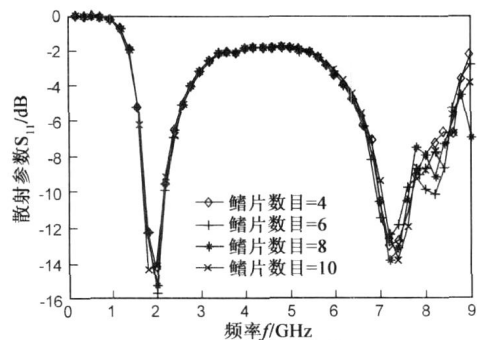


图8 不同鳍片数目散射参数 S_{11} 对比

图9为鳍片厚度变化时 S_{11} 的比较。采用最常用的接地方式8,可以发现鳍片厚度改变对于谐振频率点和 S_{11} 的影响可以忽略。可见,由于传导电流的边缘效应,不能通过改变鳍片数目和鳍片厚度来改变热沉谐振频率和电磁能量的辐射。

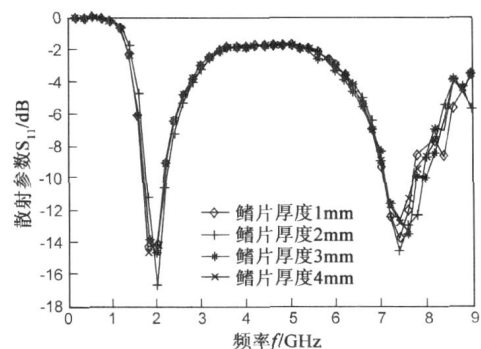


图9 不同鳍片厚度散射参数 S_{11} 对比

4.3 鳍片高度变化对辐射的影响

图10为鳍片高度变化时 S_{11} 的比较。采用最常用的接地方式8,可以发现随着鳍片高度的增加,热沉谐振频率点基本没有发生变化,然而 S_{11} 随高度增加而减小,电磁辐射能量随高度增加而增大。 S_{11} 在频率大于

6GHz 以上时, 由于鳍片高度超过四分之一波长, 故电磁辐射能量随鳍片高度增加而增大的趋势更加明显。

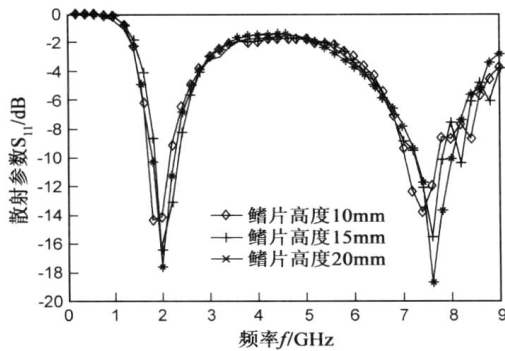


图10 不同鳍片高度散射参数 S_{11} 对比

5 结论

通过对热沉电磁辐射特性的仿真分析可知:

(1) 热沉的设计应当尽量提高谐振频率, 减少电磁能量辐射. 通过增加接地点数目可以有效提高热沉的谐振频率; 接地点数目相同时, 不同的接地方式对于提高谐振频率的作用不大, 但可通过合理选择接地方式来减少电磁能量的辐射。

(2) 由于传导电流的边缘效应, 鳍片数目和厚度变化对于谐振频率及电磁能量辐射的影响几乎可以忽略. 在进行热沉设计时, 可以按照散热要求来选择鳍片数目和厚度。

(3) 虽然增加鳍片的高度可以有效增大散热面积, 但不会显著增大谐振频率, 反而会造成电磁辐射能量的增加, 尤其是当鳍片高度为波长四分之一的整数倍时, 热沉类似于有效辐射的单极天线, 成为系统内主要的 EMI 源。

参考文献:

- [1] S K Dasand, T Roy. An investigation on radiated emissions from heatsinks[A]. Proceedings of IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility[C]. USA: IEEE Press, 1998, vol. 2, 784– 789.
- [2] B Archanbeault, C Brench, O M Ramahi. EMI/EMC Computational Modeling Handbook[M]. 2nd Edition, Springer, 2001.
- [3] K Li, C F Lee, S Y Poh, R T Shin, J A Kong. Application of FDTD method to analysis of electromagnetic radiation from VLSI heatsink configurations[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1993, 35(2): 204– 213.
- [4] C E Brench. Heatsink radiation as a function of geometry[A]. Proceedings of IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility[C]. USA: IEEE Press, 1994. 105– 109.

- [5] N J Ryan, D A Stone, B Chambers. Applications of the FD-TD method to modeling the electromagnetic radiation from heatsinks[A]. Proceedings of the 10th International Conference on Electromagnetic Compatibility[C]. USA: IEEE Press, 1997. 119– 124.
- [6] Toshihiko Matsuura. Radiated emission analysis of a heat sink with electrically long noise sources[A]. Proceedings of IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility [C]. USA: IEEE Press, 2001. 661– 666.
- [7] Lance Covert, Jenshan Lin. Simulation and measurement of a heatsink antenna: a dual function structure[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2006, 54(4): 1342– 1345.
- [8] B Archanbeault, S Prapatneni, L Zhang, D C Wittwer. Comparison of various numerical modeling tools against a standard problem concerning heatsink emissions[A]. Proceedings of IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility [C]. USA: IEEE Press, 2000. 1341– 1346.
- [9] 吕英华. 计算电磁学的数值方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
Lv Yinghua. The numerical method of Computational electromagnetic[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006. (in Chinese)
- [10] 金建铭. 电磁场有限元方法[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1998.
Jin Jianming. The Finite Element Method of Electromagnetic Field[M]. Xi'an: XiDian university press, 1998. (in Chinese)
- [11] 杜平安, 甘峨忠, 于亚婷编著. 有限元法原理、建模与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004
Du Ping an, Gan Erzong, Yu Yating. The Principle, Modeling and Application of Finite Element Method[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004. (in Chinese)

作者简介:

石 峥 男, 1977 年出生, 电子科技大学机械电子工程学院硕士研究生, 主要研究方向为电磁兼容性设计与仿真。

E mail: shizheng_73962@163.com

杜平安 男, 1962 年出生, 电子科技大学机械电子工程学院教授, 博士生导师, 主要从事数字化设计、仿真与制造等研究。

E mail: dupingan@uestc.edu.cn

聂宝林 男, 1985 年出生, 电子科技大学机械电子工程学院, 博士研究生. 主要研究方向为电磁兼容性设计与仿真。

E mail: nblmiracle@uestc.edu.cn