

Processing technology, structure and modeling analysis of semiconductor transformer

Wang Wanyan

Hunan University, Changsha

Abstract: A transformer is a device that converts the ac energy of a certain voltage level into the ac energy of another voltage level with the same frequency by electromagnetic induction. With the development of electronic technology, the product structure of the electronic transformer industry has changed greatly, showing the diversity of product types. The rapid development of international power electronics technology presents the trend of high frequency, high power density and miniaturization, which requires more and more performance indexes of electronic transformers. The processing technology of semiconductor transformer, solid structure and coil structure of semiconductor transformer are introduced.

Key words: Semiconductor; Transformer; Structure; Modeling; Analysis

Received: 2020-01-19; Accepted: 2020-02-03; Published: 2020-02-05

半导体变压器加工工艺及结构和建模分析

王宛延

湖南大学，长沙

邮箱: wywang_2003@163.com

摘要: 变压器是通过电磁感应原理，把某一种电压等级的交流电能转换成频率相同的另一种电压等级的交流电能的设备。随着电子技术的发展，电子变压器行业的产品结构发生了较大的变化，显现出产品类型多样性。国际电力电子技术飞速的发展呈现高频、高功率密度、小型化的趋势，相应的对电子变压器的性能指标提出了越来越高的要求。主要介绍了半导体变压器的加工工艺，半导体变压器立体结构及线圈结构，并进行了建模分析。

关键词: 半导体；变压器；结构；建模；分析

收稿日期：2020-01-19；录用日期：2020-02-03；发表日期：2020-02-05

Copyright © 2019 by author(s) and SciScan Publishing Limited

This article is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



1 半导体变压器

1.1 半导体变压器简介

随着集成电路超大规模化及片上系统集成以及各种电子元器件片式化,整机厂商对电子变压器的微、小型化需求日趋迫切,市场需求拉动这类产品向轻薄微型、高频化、低损耗、表面贴装以及新材料、新结构方向突飞猛进。

半导体变压器是一种新型变压器模型,无论是在理论基础方面、材料创新方面、电性能方面和产品体积等方面都有了很大的技术进步、改革和创新。它在一块半导体衬底的上下两面利用掺杂工艺制作出螺旋状的轨道作为原副绕组,这种轨道具有很高的载流子密度而且电阻很小,完全取代了金属线圈,同时取消了铁心,它的提出意味着真正的二维平面变压器的出现已经成为了可能,是真正意义上的“半导体”变压器。

1.2 半导体变压器优点

由于结合了半导体技术且取消了传统变压器中的铁心,和常规变压器相比,半导体变压器具有很多方面的优点,如:体积小、重量轻;由于没有铁芯的存在,所以能量损耗主要是线圈铜耗,故半导体变压器还具有较高的功率密度;传统变压器通常低频运行,铜耗不仅与电流大小有关,还与工作频率有关,当工作频率越高时损耗越大。因此,传统变压器工作频率不会很高。但是半导体变压器由于取消了铁芯且线圈的耦合系数较大,而且通常应用在微电子产品中,所以工作频率通常较高,可以达到 MHz 级。

由此可见,半导体平面变压器作为一种新型的电子变压器从整体上说,明显优于传统变压器以及其他任何带有铁心的新型平面变压器。

2 材料的选用及加工工艺

随着市场需求的断提高,考虑到加工工序的合理化、加工环境的整洁化及半导体材料的加工精度越来越高等因素,半导体制作设备必须在高精度和高安

全性、高清洁度、小型化、工件输送技术、操作简便化及加工自动化等六个方面不断有所改进。

制造该半导体变压器的材料和制造电子元器件的材料相同，都是圆形单晶硅硅片，称为硅片。半导体制造技术很复杂，有许多特殊工艺步骤，如硅片制备、芯片制造、芯片测试和挑选、装配和封装等。根据不同的制作要求，芯片被制造并封装到各种电子元器件中，由于芯片的制造成本大幅降低，所以制造半导体变压器的成本很低。

单晶硅基片之所以在诸多半导体元素或化合物半导体等材料中脱颖而出，成为超大规模集成电路器件的基片材料，原因在于Si是地球表面存量最为丰富的元素之一，其本身无毒而且具有很宽的带隙。

半导体变压器采用刻蚀技术利用掺杂工艺将线圈刻蚀在半导体基片上，加工工艺简单。

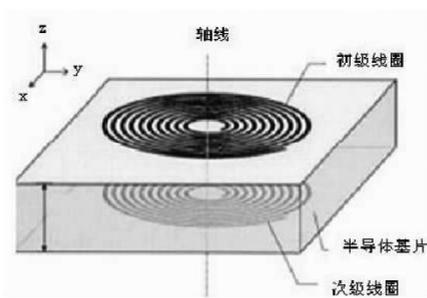


图 1 半导体平面变压器立体结构图

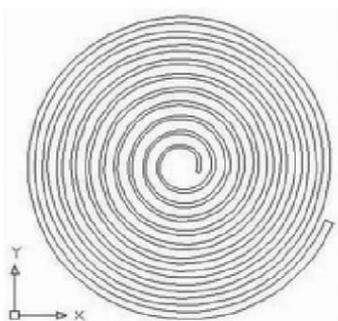


图 2 初、次级线圈尺寸结构示意图

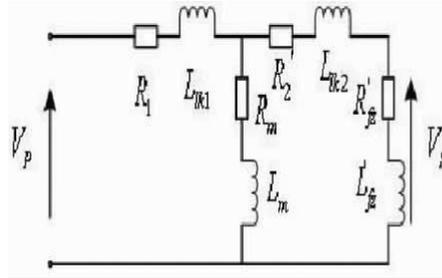


图3 传统单相变压器 T 形等效电路

3 结构尺寸

传统变压器的绕组常常是绕在一个磁芯上，且匝数较多。而半导体平面变压器是一种新型变压器，它在一块半导体衬底的上下两面利用掺杂工艺蚀刻出螺旋状的轨道作为原副绕组，其立体图结构如图1所示。这种轨道具有很高的载流子密度而且电阻很小，完全取代了传统线圈，由于初、次级线圈之间间隙极小，耦合系数较大，可以取消铁心。

本文只研究初、次级线圈的几何尺寸及材料等属性完全相同的情况，然后对该变压器模型进行分析。这种变压器可以用作光耦或隔离变压器。如果需要电流隔离，通常会采用光耦来获取低成本。然而，光耦的传输特性较慢而且会随着时间的推移而退化。较为昂贵的替代方案是采用脉冲变压器。将平面变压器的绕组集成到一个 IC 上，不但降低了成本而且保持了高绝缘性能。

初、次级线圈结构平面示意图如图2所示，其中，初、次级线圈几何尺寸完全相同。其结构尺寸如下所示：外圈直径为 5mm；内圈直径 0.5mm；半导体衬层厚 1mm；线宽 0.1mm；线圈间距初、次级线圈各 10 匝。

4 建模分析

在传统变压器分析中，常运用等效电路的方法进行分析。如图3所示为一台单相变压器的 T 形等效电路。借鉴传统变压器的分析方法，可以同样建立半导体变压器的等效电路模型。因为半导体变

压器取消了铁心，不同于常规变压器会在铁心中存在铁耗以初、次级等效

电路之间只有互感而没有形成铁耗的等效电阻。当半导体变压器高频运行时，初次级线圈之间就会形成极间电容，这点也区别于低频运行的常规变压器。综上所述，得到该半导体变压器的高频等效电路，如图4所示。

其中

- R_1 初级线圈电阻；
- R_2' 次级线圈电阻；
- L_{1K1} 初级线圈电感；
- L_{1K2} 次级线圈电感；
- C_{12}' 初次级间电容。
- C_1' 初级线圈电容
- L_M 初、次级线圈互感
- C_2' 次级线圈电容及外加电容之和
- R_L' 外加负载
- V_P 输入电压
- V_S 输出电压
- n 初、次级线圈圈数比

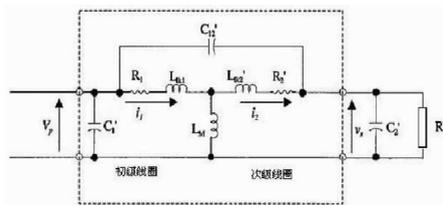


图4 半导体平面变压器高频等效电路

5 半导体变压器应用范围

半导体变压器与常规变压器相比取消了铁心，高度得到了最大的缩小。这一特色对电源设备中在空间受到严格限制的场合下具有相当大的吸引力，从而可成为许多电源设备中首选的变压器。半导体变压器结构上的优势，也为它的电气特性带来了许多优点：功率密度高，效率高，漏感低，散热性好，成本低等。

由于平面变压器的突出特点是体积小、效率高。因此最适合的应用领域是空间存在限制或对节能及散热要求苛刻的地方。目前的典型应用有通信领域的AC/DC前端和DC/DC转换器、模块开关电源及UPS。有望应用于国防、航空航天、通讯、计算机、汽车电子、数码产品等多个领域，具有重要意义。

随着技术的进步，大批量生产的可能性越来越大，其价格也会大幅下降，平面变压器也会从中高档应用走向消费类电子等主流产品市场，成为电子变压器中的佼佼者。

参考文献

- [1] 尹克宁. 变压器设计原理 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [2] 张植保. 变压器原理与应用 [M]. 北京: 北京化学工业出版社, 2007.
- [3] 刘传彝. 电力变压器设计计算方法和实践 [M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2002.