



一种避免涡流产生而减少感性元件品质因数退化的冗余金属填充方法

摘要

在芯片实际生产过程中,工艺要求各金属层填充冗余金属以保证表面化学机械抛光后的平坦度从而获得更高的良率,但冗余金属也会引入电路设计中想要避免的寄生电容,此外由于冗余金属对电磁场的干扰,冗余金属的填充会导致电感的品质因数降低。本文提出了一种放射条带状冗余金属的填充方法,在电感周围放置垂直于电感感应电流方向的辐射状金属条,在满足工艺生产需求的前提下,有效抑制了冗余金属对电感品质因数的损耗,相较于一般均匀填充冗余金属的方式,能获得更高品质因数的电感。仿真结果表明,该方法可以应用于工作在15~70 GHz的电感,相较于块状阵列填充冗余金属的方法,本方法耦合电感次级线圈和初级线圈的品质因素分别提高7.2%和17.6%。

关键词

冗余金属填充;电感;品质因数

中图分类号 TN402

文献标志码 A

收稿日期 2020-12-24

资助项目 国家重点研发计划(2018YFB18020 02)

作者简介

康泽辉,男,博士生,研究方向为压控振荡器,zehuikang@link.cuhk.edu.cn

吴亮(通信作者),男,博士,副研究员,博士生导师,主要研究方向为射频集成电路设计,wuliang@cuhk.edu.cn

0 引言

冗余金属填充是集成电路制造中一种改善表面平坦度的技术,它借助冗余金属来提高版图密度的均匀性,改善化学机械研磨后各金属层表面平坦度以提高芯片良率^[1-2]。在集成电路版图设计中,往往需要填充冗余金属来满足生产工艺对芯片各金属层金属密度的要求。然而冗余金属的填充会向芯片引入电路设计时想要避免的寄生电容,这些寄生电容增加了信号延迟、干扰噪声和能量损耗。制造厂商考虑到电路设计的实际需求提供了一种避免填充冗余金属的方法——在版图设计过程中使用 INDDMY(inductor dummy)层。通过在设计软件中用 INDDMY 层框选所需区域,该区域则会跳过对金属密度的检查,进而避免添加冗余金属。制造工艺中提供的电感模型一般自带 INDDMY 层,此外设计者也可对自己设计的电感手动添加 INDDMY 层以跳过金属密度检查。这样可以避免在电感的周围放置冗余金属,防止因为冗余金属对电感周围磁场的干扰而导致电感品质因数的下降。然而,受到生产工艺的限制,INDDMY 层所占据的面积相对于芯片整体面积必须小于一定比例,才能保证实际生产过程中芯片各金属层的平坦性。在一般的数字芯片设计中,因为几乎不使用电感,工艺规定的 INDDMY 层占总芯片面积的比例足够设计者使用。但是,由于在模拟、射频电路中电感被广泛使用,如每个电感都通过使用 INDDMY 层来避免周围填充冗余金属,INDDMY 层占总芯片面积的比例则往往会超过工艺的限制。因此,在不使用 INDDMY 层且满足工艺生产要求的金属密度的情况下,在版图中如何以恰当方式用冗余金属填充电感周围,尽量减少冗余金属对电感品质因数的损耗就成为一个需要考虑的问题。

为解决上述问题,本文提出了一种在电感周围辐射状填充条状冗余金属的方法。该方法相比于以金属块阵列形式填充冗余金属,更容易满足工艺对金属密度的要求,从而避免了在电感内部填充冗余金属。同时,条状冗余金属按照垂直于电感周围感应电场的方式填充,可以减少冗余金属内感应电流的强度,进而减少能量损耗,获得更高品质因数的电感。

1 香港中文大学(深圳)理工学院,深圳,518172

2 华南理工大学电子与信息学院,广州,510641

1 电感品质因数

电感的品质因数 Q (Quality factor) 在各种模拟射频电路中都起着关键的作用. 例如振荡器的相位噪声与 $1/Q^2$ 成正比, 调谐放大器的电压增益和 Q 成正比^[3]. 此外电感的品质因数往往限制了电路的性能, 比如振荡器的 FoM (Figure of Merit, 品质因数) 的最高值就受到该工艺下电感最高品质因数的限制, 因此, 如何提高电感品质因数成为研究热点^[4-7].

电路设计者一般用 Q 来量化电感的损耗水平, Q 定义为系统的最大储能值与系统在一个周期内的能量损耗的比值. 因此影响 Q 值的一个关键因素就是电流流过电感时能量损耗的多少, 而电感的损耗主要来源于电感金属结构本身以及周围空间呈现的等效电阻^[8]. 根据 Q 值的定义, 若电感量为 L , 等效串联电阻为 R_s , 工作频率为 ω , 则其 Q 值有如下表达式

$$Q = L\omega/R_s \quad (1)$$

电感总体损耗越大, 其等效串联电阻 R_s 越大. 以下将会介绍几种造成电感损耗的机制.

1.1 金属欧姆损耗

由于用于制作电感的金属本身电导率有限, 电流流过金属时将有一部分能量以热量形式散失, 这部分损耗称为金属线的欧姆损耗. 从式(1)中可以得到, 对于给定的电感, 可以通过降低电感的金属电阻来提高品质因数. 一般来说可以通过增加电感的宽度来降低等效电阻. 不过更宽的金属线虽然会表现出更低的电阻, 但另一方面也会相对于衬底有着更大的寄生电容, 将会降低电感的自谐振频率. 因此设计者在实际电路设计中往往需要在 Q 值和寄生电容之间权衡.

在高频时, 电感内的电流分量趋向于相互排斥, 从而逐渐远离, 最终电流会趋向于在金属表面流动, 这种现象被称之为趋肤效应. 电流的实际分布从金属的表面向内遵循一个指数衰减:

$$J(s) = J_0 \exp(-x/\delta), \quad (2)$$

其中 J_0 为表面的电流密度, δ 是趋肤深度. δ 的值由下式给出

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}}, \quad (3)$$

其中 f 表示频率, μ 是磁导率, σ 是电导率.

由于高频时较小的趋肤深度导致电流流过的等效横截面积减小, 这进一步增加了其等效电阻, 从而增加了欧姆损耗.

1.2 介质损耗

由于电感和衬底之间存在电容, 因此当电感各个部分的电压随着时间发生变化的时候, 发散的电场穿过衬底和各层金属之间的介质层, 形成位移电流. 因为衬底的电阻率非理想情况, 这就不可避免地在每次电压变化的周期内, 流经衬底的电流都有一部分会被转换成损耗. 电场穿过这些介质时产生的损耗称为介质损耗, 这会进一步降低电感的品质因数.

2 版图设计

在满足冗余金属密度的情况下, 可以将冗余金属以金属块状阵列的方式排布^[9]. 但是由于冗余金属在工艺的限制下有着金属间间距的限制, 块状阵列的排布方式不可避免地导致了金属密度远比不上以长条方式排布的密度.

如图1所示, 当长宽都为 $1 \mu\text{m}$ 的冗余金属方块以间距为 $1 \mu\text{m}$ 的阵列形式摆放时, 如果该结构无限拓展下去, 则冗余金属占据的空间密度为 25%. 而当长为 $9 \mu\text{m}$, 宽为 $1 \mu\text{m}$ 的冗余金属以同样间距摆放的时候, 如果该结构无限往下拓展下去, 占据的空间密度则为 50%. 可以看出后者的填充方式相比于前者, 在同样面积的情况下, 更容易满足工艺对金属密度的要求.

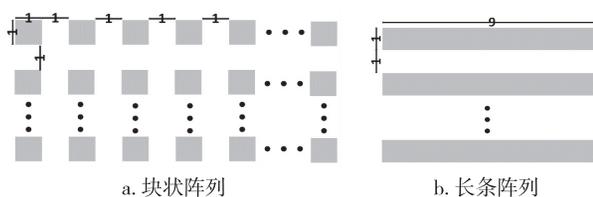


图1 两种排布冗余金属的方式

Fig. 1 Two ways of arranging dummy metals

因为金属阵列本身只占据 25% 的空间密度, 较难在占据较小面积的情况下满足工艺对金属最低密度的要求, 因此以金属阵列填充冗余金属的方式往往需要更多的面积来满足工艺金属密度要求, 比如需要在电感内部填充冗余金属. 而由于电感内部磁通密度更大, 电感内部的冗余金属在交变磁场下相较于电感周围的金属会产生更大的感应电流, 将会更显著地降低电感的品质因数. 考虑到这一情况, 本文对冗余金属的填充方式进行了改进, 用条形冗余金属代替了块状冗余金属. 冗余金属占据同一空间的情况下, 条状冗余金属的空间密度远大于块状冗余金属, 因此不在电感内部填充冗余金属时该方法

也能达到工艺对金属密度的要求.

电感产生的交变磁场会在附近的导体中产生与电感线圈平行的感应电流,这部分电流的欧姆损耗将会降低电感的品质因数.考虑到相较于块状,条形金属由于面积更大,产生的感应电流更强,更容易造成损耗,因此需要对填充方式做进一步改善.

当金属条沿着感应电流方向摆放的时候,感应电流的流动路径更长,因此电流损耗更大,电感的品质因数下降更多.当金属条沿着垂直感应电流方向摆放的时候,条带间的空隙切断了电流的流动路径,因此能够显著降低感应电流在金属中的损耗.

所以为了避免因为冗余金属的填充导致电感品质因数的降低,条状冗余金属应以垂直于感应电流的方向,呈辐射状摆放在电感周围以尽可能降低电流的欧姆损耗.

3 仿真结果

本文使用了 HFSS 电磁仿真软件分别对两个不同的电感 A、B 和一个耦合电感进行了品质因数仿真.对每个电感分别对不加任何冗余金属,在电感周围以冗余金属块阵列的形式填充和在电感周围用条状冗余金属以辐射状填充的情况进行了仿真.

3.1 电感

本文首先对电感值为 0.38 nH,内径 35 μm 的一个两圈电感 A 进行了仿真,电感设计和冗余金属的填充方式如图 2 所示.分别在不填充任何冗余金属、按照块状阵列方式填充冗余金属、以辐射状填充条形冗余金属这 3 种情况下进行电磁场仿真,最终根据式(1)得出电感品质因数随频率变化的关系,结果如图 3 所示

由图 3 可以得知,不填充任何冗余金属时该电感品质因数 Q 最大值为 16.04,按照块状阵列方式填充冗余金属时 Q 最大值为 14.93,相比于理想状况,品质因数降低了 $(16.04 - 14.93) / 16.04 = 6.9\%$.按照本文提出的以辐射状填充条形冗余金属的方法, Q 最大值为 15.97,相较于理想状况,品质因数只降低了 $(15.97 - 16.04) / 16.04 = 0.44\%$,而相较于原本的块状阵列填充方法,品质因数则有 $(15.97 - 14.93) / 14.93 = 7.0\%$ 的提升.另外可以看到 3 种填充方式后电感 Q 最大值对应的频率不一样,这是由冗余金属引入的寄生电容导致的.

此外本文还对一电感值为 0.26 nH,内径 23 μm 的两圈电感 B 进行了电磁仿真,电感设计和冗余金

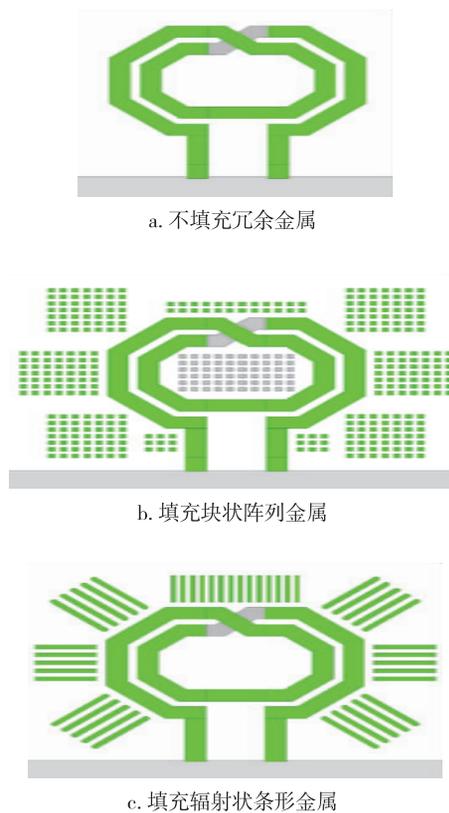


图 2 电感 A 在不同填充情况下的版图

Fig. 2 Layouts of inductor A under different filling conditions

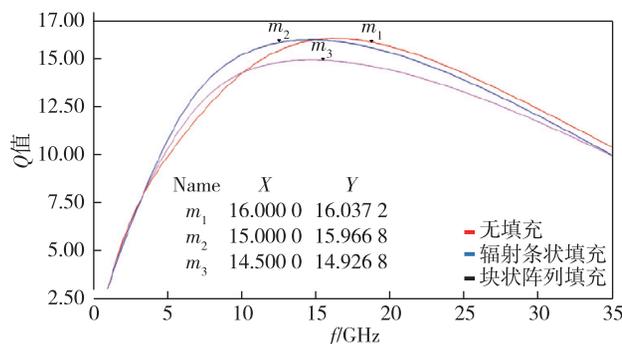
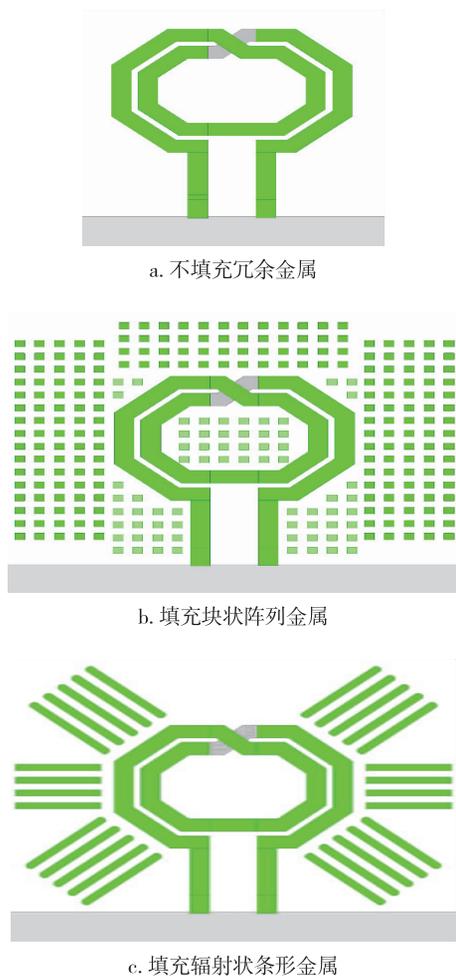
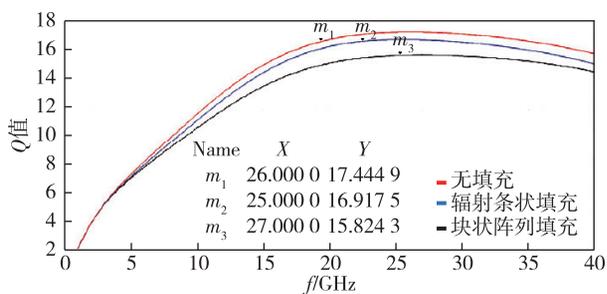


图 3 电感 A 在不同填充时 Q 值随频率的变化关系

Fig. 3 Relation between Q value and frequency under different filling conditions of inductor A

属的填充方式如图 4 所示.由图 5 可知,不填充任何冗余金属时该电感品质因数 Q 最大值为 17.44,按照块状阵列方式填充冗余金属时 Q 最大值为 15.82,相比于理想状况,品质因数降低了 9.3%.

而按照本文提出的以辐射状填充条形冗余金属的方法,电感品质因数 Q 最大值为 16.92,相较于理想状况,品质因数只降低了 3.0%,而相较于原本的填充方法,品质因数则有 6.9% 的提升.

图4 电感 B 在不同填充情况下的版图Fig. 4 Layouts of inductor B under different filling conditions图5 电感 B 在不同填充时 Q 值随频率的变化关系Fig. 5 Relation between Q value and frequency under different filling conditions of inductor B

3.2 耦合电感

本文提出的冗余金属填充方式不仅可以应用于单端口电感,同样也可以用于耦合电感.如图6所示,对一个匝数比为2:1的耦合电感进行了上述3种不同填充情况下的三维建模和电磁仿真,其中块状

阵列和辐射条状冗余金属填充后电感周围都满足工艺对金属密度的要求.

仿真后,在次级线圈端口接 50Ω 负载的情况下对初级线圈的品质因数 Q 使用式(1)进行计算,结果如图7所示.由图7可知不填充任何冗余金属时初级线圈品质因数 Q 最大值为 19.86,按照块状阵列方式填充冗余金属时 Q 最大值为 15.89,相比于理想状况,品质因数降低了 20%.而本文提出的以辐射状填充条形冗余金属的方法,品质因数 Q 最大值为 18.69,相较于理想状况,品质因数只降低了 5.9%,而相较于原本的填充方法,品质因数则有 17.6%的提升.

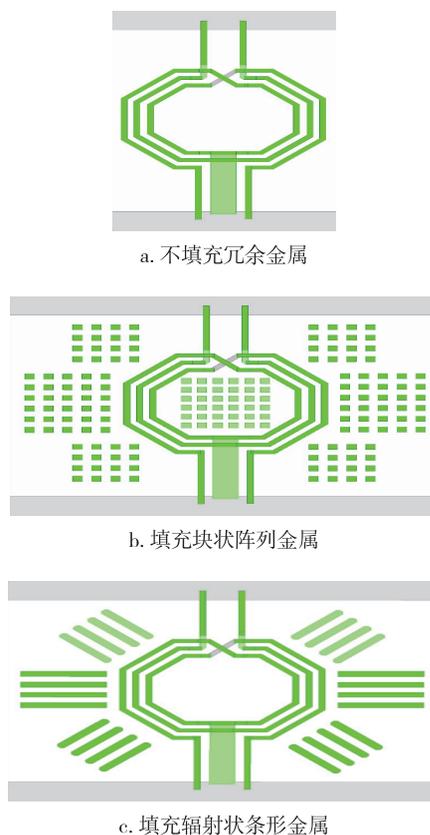


图6 耦合电感在不同填充情况下的版图

Fig. 6 Layouts of the coupling inductors under different filling conditions

同样,次级线圈品质因数 Q 随频率的变化关系如图8所示.由图8可知,不填充任何冗余金属时次级线圈品质因数 Q 最大值为 11.07,按照块状阵列方式填充冗余金属时 Q 最大值为 10.08,相比于理想状况(无填充),品质因数降低了 8.9%.而本文提出的以辐射状填充条形冗余金属的方法,品质因数 Q 最大值为 10.81,相较于理想状况,品质因数只降

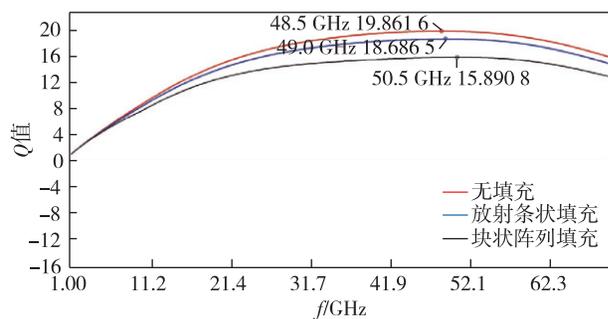


图7 耦合电感在不同填充时初级线圈 Q 值随频率的变化关系

Fig. 7 Relation between quality factor value and frequency under different filling conditions for the primary coil of the coupling inductor

低了 2.3%,而相较于原本的均匀块状阵列的填充方法,品质因数则有 7.2%的提升。

由表 1 可知,本文提出的冗余金属填充方式,可以有效地防止由于添加冗余金属导致的电感品质因数的降低.在满足工艺要求的金属密度的情况下,本文提出的冗余金属填充方法获得的电感的品质因数,相较于块状阵列的冗余金属填充方式,至少有 6.9%的提升.当应用于耦合电感时,初级线圈品质因数有 7.2%的提升,同时次级线圈品质因数最多有 17.6%的提升。

表 1 电感品质因数仿真结果

Table 1 Summary of simulated quality factors of inductors

| 电感 | 最大 Q 值 | | |
|----------|--------|--------|---------|
| | 无填充 | 块状阵列填充 | 辐射状条形填充 |
| 电感 A | 16.04 | 14.93 | 15.97 |
| 电感 B | 17.44 | 15.82 | 16.92 |
| 耦合电感初级线圈 | 19.86 | 15.89 | 18.69 |
| 耦合电感次级线圈 | 11.07 | 10.08 | 10.81 |

4 结束语

本文针对芯片生产过程中因为对金属密度的要求,需要在电感周围填充冗余金属这一状况,提出了一种垂直于感应电场方向放置辐射状条形金属的填充方法.该方法缓解了模拟和射频电路设计中 INDDMY 层因工艺限制,允许的使用面积不够设计使用的问题.仿真结果表明,该方法在不使用 INDDMY 层来忽略金属密度检查的情况下,不仅满足了工艺要求的金属密度,还切断了感应电流路径,并且避免了在电感线圈内部填充金属.经过电磁全波仿真结果表明,该方法相较于常规的均匀填充块状阵列冗余金属的方式,能够有效降低冗余金属对电感造成的损耗,对于设计高 Q 值单端口电感和耦合电感极为有利。

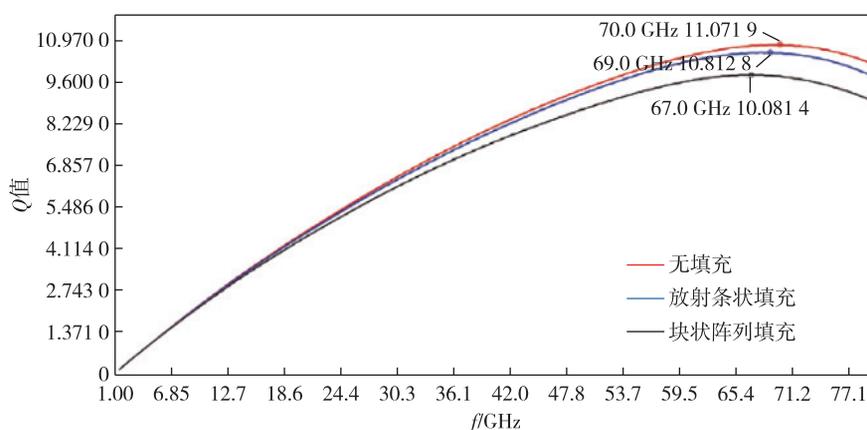


图8 耦合电感在不同填充时次级线圈 Q 值随频率的变化关系

Fig. 8 Relation between quality factor value and frequency under different filling conditions for the secondary coil of the coupling inductor

参考文献

References

[1] 杨飞,陈岚,阮文彪,等.集成电路版图图中冗余金属的填充方法:CN102456080A[P].2012-05-16
YANG Fei, CHEN Lan, RUAN Wenbiao, et al. Dummy

fill insertion method for integrated circuit layout: CN102456080A[P].2012-05-16

[2] 杨飞,何晓雄,陈岚.冗余金属对互连线电容特性的影响[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2010,33(11):1721-1724
YANG Fei, HE Xiaoxiong, CHEN Lan. Influence of

- dummy fill on interconnect capacitance [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2010, 33(11):1721-1724
- [3] 毕查德·拉扎维.射频微电子学[M].邹志革,雷鑑铭,邹雪城,等,译.2版.北京:机械工业出版社,2016
- [4] Lopez-Villegas J M, Samitier J, Cane C, et al. Improvement of the quality factor of RF integrated inductors by layout optimization[J].IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2000, 48(1):76-83
- [5] Long J R, Copeland M A. The modeling, characterization, and design of monolithic inductors for silicon RF IC's [J].IEEE Journal of Solid-State Circuits, 1997, 32(3):357-369
- [6] Visweswaran A, Staszewski R B, Long J R. A low phase noise oscillator principled on transformer-coupled hard limiting[J].IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2014, 49(2):373-383
- [7] Park M, Lee S, Yu H K, et al. High Q CMOS-compatible microwave inductors using double-metal interconnection silicon technology[J].IEEE Microwave and Guided Wave Letters, 1997, 7(2):45-47
- [8] Hastings A. 模拟电路版图的艺术[M].张为,等,译.2版.北京:电子工业出版社,2018
- [9] 张允磊.一种优化的冗余金属填充方法研究[D].上海:上海交通大学,2019
- ZHANG Youlei. Study on an optimized dummy metal insertion method[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2019

A dummy metal filling method to avoid the generation of eddy currents and the quality factor degeneration of inductive elements

KANG Zehui¹ YANG Meng¹ WU Liang¹ XUE Quan²

¹ School of Science and Engineering, The Chinese University of Hong Kong, Shenzhen, Shenzhen 518172

² School of Electronic and Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641

Abstract In silicon chip fabrication, each of the metal layers is required to have evenly distributed metal density for chemical mechanical polishing to ensure high yield. Filling dummy metal is a widely-employed solution to such requirement, however, the dummy metal will not only introduce significant parasitic capacitance but also induce eddy current due to electromagnetic coupling with the circuit components. Consequently, the inductive components such as inductors and transformers typically suffer from quality factor degradation after the dummy metals are filled. In this paper, a new approach for filling dummy metals is proposed. The dummy metals around the inductor are filled by metal stripes perpendicular to the current flowing direction, which can reduce the loss due to eddy current and thus alleviate the quality factor degradation. Simulation results show that the proposed method can improve the quality factor by 7.2% for the secondary coil and 17.6% for the primary coil of inductors working at 15 GHz to 70 GHz.

Key words dummy metal filling; inductor; quality factor