A High Frequency Voltage-Controlled Active Inductor with Excellent Performances Multiformity*

KANG Yilin, ZAHNG Wanrong*, XIE Hongyun, JIN Dongyue,
NA Weicong, LI Yikang, LI Bai
(College of Microelectronics, Faculty of Information Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: A high frequency voltage-controlled active inductor (HFVCAI) with simultaneously excellent performances is proposed, which consists of the first cross coupling unit, the second cross coupling unit, both with one external voltage tuning terminal respectively, and a regulator unit with two external tuning terminals. The first and the second cross coupling units are connected in parallel, and the regulator unit is connected in series with them. Through the coordination among different units and among four external voltage tuning terminals, HFVCAI can simultaneously achieve three different excellent performances at high frequency, i.e., simultaneously high peak inductance and Q values at the same frequency, wide tunable range of inductance value while the Q peak value being basically unchanged, wide tunable range of Q value while the inductance peak value being almost constant. Based on TSMC 0.18 μm CMOS process, the three performances of the HFVCAI are verified by using the RF tool of ADS. The results show that both high inductance peak value of 2 841.49 nH and high Q peak value of 2 118 can be achieved respectively at 12.78 GHz, under high frequency of 12 GHz, the inductance value can be tuned from 23.93 nH to 123.82 nH, while the peak Q value of approximate 87 can be obtained, and under high frequency of 12.52 GHz, the Q peak value can be tuned from 26 to 1 445, while the inductance value of about 401 nH can be maintained.

Key words: active inductor; high inductance; high quality factor; voltage-controlled
EEACC: 1220 **doi**: 10.3969/j.issn.1005-9490.2023.01.002

一款多种优异性能集于一体的高频压控有源电感*

康翼麟,张万荣*,谢红云,金冬月,那伟聪,李祎康,李 白
(北京工业大学信息学部,微电子学院,北京 100124)

摘 要:提出一款多种优异性能集于一体的高频压控有源电感(HFVCAI),主要由分别配置 1 个外部电压调控端的第一交叉耦合单元、第二交叉耦合单元和配置 2 个外部电压调控端的调控单元构成。其中,第一和第二交叉耦合单元并联,且调控单元与它们串联,通过不同单元间的协同配合和 4 个外部电压的联协调控,HFVCAI 能够集 3 种优异性能于一身:电感值和 Q 值在同一高频点下皆能取得高的峰值;电感值能够在高频下大范围调谐,而与此同时,Q 峰值却能够保持基本不变;Q 峰值能够在高频点下大范围调谐,而电感值却能保持几乎不变。基于 TSMC 0.18 μm CMOS 工艺,利用射频工具 ADS 对 HFVCAI 的性能进行了验证。结果表明,电感值和 Q 值在 12.78 GHz 高频下同时取得高的峰值,分别为 2 841.49 nH 和 2 118;电感值能够在 12 GHz高频下从 23.93 nH 调谐至 123.82 nH,而 Q 峰值基本保持在 87;Q 峰值在 12.52 GHz 高频下能够从 26 调谐至 1 445,而电感值基本保持在 401 nH。

关键词:有源电感;大电感值;高 Q 值;压控调谐
中图分类号:TN722.7 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-9490(2023)01-0010-06

射频集成电路(Radio Frequency Integrated Circuit, RFIC)设计往往需要在片无源螺旋电感基本元件,但是它存在电感值不能调谐、高频下的 Q 值低等不足。为了克服这些不足,人们逐渐对采用有源器件合成的等效电感,即有源电感(Active Inductor, AI),来替代无源电感,进而来提升 RFIC 的性能产生了浓厚兴趣[1-5]。

目前,国内外对 AI 性能的研究工作大多围绕着如何提升电感值、Q 值、实现电感值或 Q 值可调谐等性能参数来开展的[6-10]。但以往的 AI 均不能实现多种优异性能集于一体,例如,文献[8]中的 AI 在 2.51 GHz 取得 Q 峰值 341,而电感峰值 180 nH 却是在 2.69 GHz 下取得的,因而不能在同一高频点下

项目来源:国家自然科学基金资助项目(61774012,61574010,61901010);北京市自然科学基金资助项目(4192014,4204092);中国博士后科学基金资助项目(2019M650404);北京市朝阳区博士后科研经费资助项目(2019ZZ-9)
收稿日期:2021-10-22 **修改日期**:2022-01-21

电感值和 Q 值同时取得高的峰值;文献[9]中的 AI 在 3 GHz 至 4 GHz 频率范围内,Q 值峰值能够从 2.23 调谐至 23.25,但在 Q 值取得峰值的频点下,电感值却从 3 nH 变化至 8.5 nH,不能同时实现电感值在高频下大范围调谐,且 Q 峰值保持基本不变的性能;文献[10]中的 AI 则在 2.05 GHz 至 2.6 GHz 频率范围内,Q 峰值虽可以从 220 调谐至 320,但同时电感值也从 2 nH 变化到了 17 nH,不能实现 Q 峰值在高频点下大范围调谐而电感值保持基本不变的性能。之所以文献[8-10]均不能实现较好的优异性能,且不能集多种优异性能集于一体,是因为它们的电路拓扑组成单元相互配合还不理想。

为了克服上述不足,本文联合采用第一交叉耦合单元、第二交叉耦合单元和调控单元等 3 个单元,提出了一种高频压控有源电感(High Frequency Voltage Controlled Active Inductor,HFVCAI),通过各单元协同配合和它们的 4 个外部电压调控端的联合调谐,使得 HFVCAI 能够集 3 种优异性能于一体:电感值和 Q 值在同一高频点下皆能取得高的峰值;电感值能够在高频下大范围调谐,与此同时,而 Q 峰值却能够保持基本不变;Q 峰值能够在高频点下大范围调谐,而电感值却能保持几乎不变。

本文安排如下:第一节首先给出 HFVCAI 的电路拓扑,随后进行小信号等效电路分析,进而揭示它能够集多种优异性能集于一体的内在机制;第二节进行性能验证;第三节给出结论。

1　新型压控有源电感的电路拓扑

图 1 为 HFVCAI 电路拓扑结构,该结构主要由第一交叉耦合单元(单元 1)、第二交叉耦合单元(单元 2)和调控单元(单元 3)构成。单元 1 由电阻 R_1 和 R_2 与 NMOS 晶体管 M_2 和 M_3 漏极交叉耦合相连构成,并在电阻 R_1 和 R_2 的共同端连接外部电压调控端 V_{b1} 来对电感值和 Q 值进行调谐;单元 2 由电阻 R_3 和 R_4 与 NMOS 管 M_1 和 M_4 交叉耦合相连构成,并在电阻 R_3 和 R_4 共同端连接外部电压调控端 V_{b2} 来对电感值和 Q 值进一步调谐;单元 3 由并联的 NMOS 晶体管 M_5、M_8、M_{10}、M_{11} 串联 PMOS 晶体管 M_6、M_7 和 M_9 构成,M_6、M_7 和 M_9 的源极连接外部电压调控端 V_{ftune1} 构成前置电流镜来对 Q 值进行调谐,另外 M_6 的栅极连接外部电压调控端 V_{ftune2},来对晶体管 M_5、M_8、M_{10}、M_{11} 等效跨导进行精细调谐,进而对 Q 值进行进一步调谐。此外,电容 C_1 串联在 M_2 的源极和晶体管 M_5 的栅极之间,电容 C_2 和 C_3 交叉耦合连接在单元 1 和单元 2 之间,进而达到增大电路等效电感值的目的;电阻 R_1-R_4 与晶体管 M_1-M_4 串联,进而来提高 Q 值。

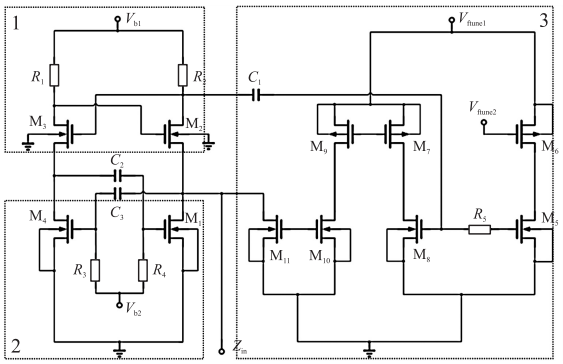

图 1　HFVCAI 的电路拓扑结构

因此,通过单元 1、单元 2 和单元 3 的有机相互协同配合,并且对它们的 4 个外部电压调控端(V_{b1}、V_{b2}、V_{ftune1} 和 V_{ftune2})进行联合调谐,HFVCAI 能够实现如下 3 种优异性能集于一体:电感值和 Q 值在同一高频点下皆能取得高的峰值;电感值能够在高频下大范围调谐,与此同时,而 Q 峰值却能够保持基本不变;Q 峰值能够在高频点下大范围调谐,而电感值却能保持几乎不变。

下面对该 HFVCAI 进行小信号等效电路分析,进而说明电路拓扑组成单元是如何相互配合,实现了集 3 种优异性能于一体的。

图 2 为 HFVCAI 小信号等效电路图。其中,C_{gs1}、C_{gs4}、C_{gs10}、C_{gs11} 分别为 MOS 晶体管 M_1、M_4、M_{10}、M_{11} 的栅源电容,g_{m1}、g_{m2}、g_{m3}、g_{m4}、g_{m5}、g_{m8}、g_{m10}、g_{m11} 分别为 M_1、M_2、M_3、M_4、M_5、M_8、M_{10}、M_{11} 的跨导。

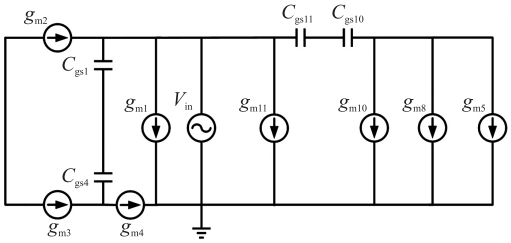

图 2　HFVCAI 的小信号等效电路

通过计算推导,该款新型有源电感的输入导纳可表示为:

$$Y_{in}\approx\frac{bg_{m4}}{j\omega a+b\left(1+\frac{ag_{m4}}{C_{gs1}C_{gs4}g_{m2}g_{m3}}\right)}+g_{m1}+g_{m11}+\frac{\omega^2 g_{m4}}{\omega^2+\frac{b^2}{C_{gs1}C_{gs4}g_{m2}g_{m3}}\left(\frac{C_{gs1}C_{gs4}}{a}+\frac{g_{m4}}{g_{m2}g_{m3}}\right)^2}+$$

$$\mathrm{j}\omega\left[\frac{\frac{bC_{gs1}C_{gs4}g_{m4}}{g_{m2}g_{m3}}\left(\frac{1}{a}+\frac{g_{m4}}{C_{gs1}C_{gs4}g_{m2}g_{m3}}\right)}{\omega^2+\frac{b^2}{C_{gs1}C_{gs4}g_{m2}g_{m3}}\left(\frac{C_{gs1}C_{gs4}}{a}+\frac{g_{m4}}{g_{m2}g_{m3}}\right)^2}+\frac{C_{gs1}C_{gs4}+g_{m4}(C_{gs1}+C_{gs4})}{g_{m4}(C_{gs1}+C_{gs4})}c\right] \tag{1}$$

式中：

$$a=C_{gs1}C_{gs4}(g_{m2}+g_{m3}) \tag{2}$$

$$b=g_{m2}g_{m3}(C_{gs1}+C_{gs4}) \tag{3}$$

$$c=\frac{C_{gs10}C_{gs11}(g_{m5}+g_{m8}+g_{m10})}{C_{gs10}C_{gs11}+(C_{gs10}+C_{gs11})(g_{m5}+g_{m8}+g_{m10})} \tag{4}$$

该款 HFVCAI 可等效为如图 3 所示的等效 RLC 电路，其中 L 为等效电感、R_s 为等效串联电阻、G_p 为等效并联电导、C_p 为等效并联电容。根据式(1)至式(4)，等效 RLC 电路各参数分别表示为：

$$L=\frac{C_{gs1}C_{gs4}(g_{m2}+g_{m3})}{g_{m2}g_{m3}g_{m4}(C_{gs1}+C_{gs4})} \tag{5}$$

$$R_s=\frac{1}{g_{m4}}+\frac{g_{m2}+g_{m3}}{g_{m2}g_{m3}} \tag{6}$$

$$G_p=g_{m1}+g_{m11}+\frac{g_{m4}}{1+\frac{(C_{gs1}+C_{gs4})^2[g_{m2}g_{m3}+g_{m4}(g_{m2}+g_{m3})]^2}{\omega^2C_{gs1}C_{gs4}g_{m2}g_{m3}(g_{m2}+g_{m3})^2}} \tag{7}$$

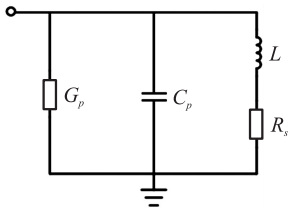

图 3 HFVCAI 的 RLC 等效电路

$$C_p=\frac{C_{gs1}C_{gs4}(C_{gs1}+C_{gs4})[g_{m2}g_{m3}g_{m4}(g_{m2}+g_{m3})+g_{m4}^2(g_{m2}+g_{m3})^2]}{\omega^2C_{gs1}C_{gs4}g_{m2}g_{m3}(g_{m2}+g_{m3})^2+(C_{gs1}+C_{gs4})^2[g_{m2}g_{m3}+g_{m4}(g_{m2}+g_{m3})]^2}+\frac{C_{gs1}C_{gs4}+g_{m4}(C_{gs1}+C_{gs4})}{g_{m4}(C_{gs1}+C_{gs4})}\cdot\frac{C_{gs10}C_{gs11}(g_{m5}+g_{m8}+g_{m10})}{C_{gs10}C_{gs11}+(C_{gs10}+C_{gs11})(g_{m5}+g_{m8}+g_{m10})} \tag{8}$$

此外，有源电感的品质因子 Q 值可以表示为：

$$Q=\frac{\mathrm{Im}(Z_{in})}{\mathrm{Re}(Z_{in})}\approx\frac{\omega L}{R_s^2G_p} \tag{9}$$

联合式(5)至式(9)，该款 HFVCAI 的 Q 值可以表示为：

$$Q\propto\left[\frac{C_{gs1}+C_{gs4}}{C_{gs1}C_{gs4}}(g_{m1}+g_{m11})\left(\frac{g_{m2}^2g_{m3}^2}{g_{m2}+g_{m3}}+g_{m4}\right)\right]^{-1} \tag{10}$$

现在结合表达式(5)至式(10)，对该 HFVCAI 通过联合调谐单元 1-3 的 4 个外部电压调控端 V_{b1}、V_{b2}、V_{ftune1}、V_{ftune2}实现 3 种优异性能的机理进行详细说明。

①电感值和 Q 值在同一高频点下皆能取得高的峰值。通过式(5)可知，HFVCAI 的电感值与晶体管 M_2、M_3、M_4 的跨导有关。调谐外部电压调控端 V_{b1}可以改变 g_{m2}、g_{m3}，调谐外部电压调控端 V_{b2}可以改变 g_{m1}、g_{m4}，因此通过联合调谐 V_{b1}、V_{b2}来改变晶体管 M_2、M_3、M_4 的等效跨导，进而对 HFVCAI 电感值进行调谐以实现电感值能够在高频点取得高的峰值。通过式(10)可知，Q 值与晶体管 M_1-M_4、M_{11}的跨导有关，联合调谐 V_{b1}、V_{b2}同时会引起 Q 值的变化。因此，为了补偿这一变化，可联合调谐外部电压调控端 V_{ftune1}、V_{ftune2}来改变晶体管 M_{11}的跨导 g_{m11}，进而改变电路的等效并联电导以对同一频点下的 Q 值进行调谐来取得高的峰值，与此同时，电感值在高频点下取得高的峰值且能基本不变，最终在同一高频点下电感值和 Q 值同时取得高的峰值。

②电感值能够在高频下大范围调谐，而与此同时，Q 峰值却能够保持基本不变。联合调谐外部电压调控端 V_{b1}、V_{b2}可以改变 g_{m1}-g_{m4}，进而对晶体管 M_2-M_4 等效跨导进行双重调谐，因此结合式(5)可知，HFVCAI 的电感值能够进行大范围调谐。通过式(7)和式(10)可知，联合调谐外部电压调控端 V_{ftune1}、V_{ftune2}可以改变 g_{m11}进而改变电路等效并联电导，进一步来补偿大范围调谐电感值伴随的 Q 值的变化，使得 Q 值能够在高频点下取得峰值，且基本不变，与此同时电感值在同频下能够进行大范围调谐。最终可同时实现电感值在高频下大范围调谐，而 Q 峰值能够保持基本不变的性能。

③Q 峰值能够在高频点下大范围调谐，而电感值却能保持几乎不变。通过式(5)和式(6)，联合调谐 V_{b1}、V_{b2}会改变 g_{m2}-g_{m4}，进而改变电路等效串联电阻，以实现对电感值和 Q 值进行调谐。更进一步，通过式(5)和式(7)可知，联合调谐 V_{ftune1}、V_{ftune2}可以改变 g_{m11}，进而改变电路的等效并联电导，却几乎不改变电路等效电感，进而实现 Q 值可以相对于电感值进行大范围调谐。因此，为了最终实现 Q 峰值在同频下相对于电感值可以进行大范围调谐，可

以先通过联合调谐 V_{b1}、V_{b2} 以获得较大的电感值和较高的 Q 值峰值,接着在不改变 V_{b1}、V_{b2} 下联合调谐 V_{ftune1}、V_{ftune2} 实现 Q 值的峰值在高频点下大范围调谐而电感值保持基本不变的性能。

综上所述,通过 HFVCAI 电路拓扑中 3 个单元的相互协同配合,并且对它们的 4 个外部电压调控端联合调谐,实现了 HFVCAI 的上述 3 种优异性能集于一体。

2　新型压控有源电感的性能验证

本文基于 TSMC 0.18 μm CMOS 工艺,采用射频工具 ADS,对 HFVCAI 能够集 3 种优异性能于一体的特性进行验证。

首先,在联合调谐 V_{b1}、V_{b2}、V_{ftune1} 和 V_{ftune2},即在组合偏置 V_{BIAS1} 下(如表 1 所示),电感值和 Q 值随频率变化的曲线如图 4 所示。可以看出,在 12.78 GHz 高频点下,不但电感值取得了高的峰值 2 841.49 nH,而且 Q 值也取得了高的峰值 2 118。因此,HFVCAI 的电感值和 Q 值能够在同一高频点下取得高的峰值。

表 1　组合偏压 V_{BIAS1} 的情况

组合偏压	V_{b1}/V	V_{b2}/V	V_{ftune1}/V	V_{ftune2}/V
V_{BIAS1}	2.52	0.78	2.51	2.06

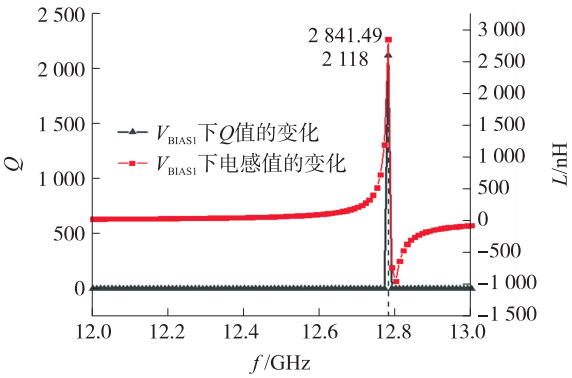

图 4　HFVCAI 的 Q 值和电感值变化曲线

另一方面,联合调谐 V_{b1}、V_{b2}、V_{ftune1} 和 V_{ftune2},即在组合偏压 V_{BIAS2}、V_{BIAS3} 下(如表 2 所示),电感值、Q 值变化曲线分别如图 5、图 6 所示。可以看出,在12 GHz 高频点下,电感值可从 23.93 nH 调谐至 123.82 nH,而在该频率下,Q 取得峰值(Q_{peak})且基本能保持在 87。因此,HFVCAI 的电感值能够在高频下大范围调谐,而同时 Q_{peak} 却能够保持基本不变。

表 2　两种组合偏压(V_{BIAS2}、V_{BIAS3})的情况

组合偏压	V_{b1}/V	V_{b2}/V	V_{ftune1}/V	V_{ftune2}/V
V_{BIAS2}	2.40	0.75	0.37	0.40
V_{BIAS3}	2.22	0.92	3.35	0.50

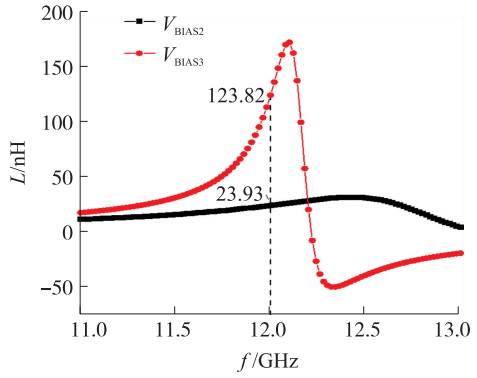

图 5　V_{BIAS2} 与 V_{BIAS3} 下 HFVCAI 的电感值变化曲线

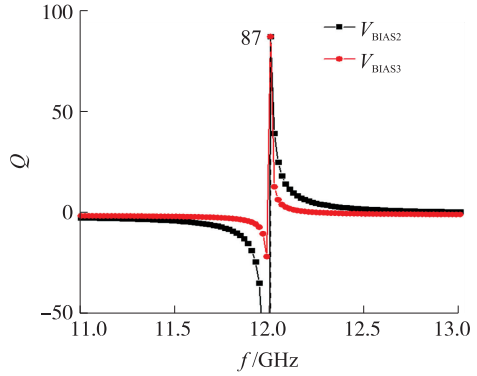

图 6　V_{BIAS2} 与 V_{BIAS3} 下 HFVCAI 的 Q 值变化曲线

最后,联合调谐 V_{b1}、V_{b2}、V_{ftune1} 和 V_{ftune2},即在组合偏压 V_{BIAS4}-V_{BIAS8} 下(如表 3 所示),Q 值和电感值的变化分别如图 7 和图 8 所示。可以看出,在 12.52 GHz高频点下,Q 值取得峰值(Q_{peak}),且可从 26 调谐至 1 445,而与此同时电感值基本保持在 401 nH。因此,HFVCAI 的 Q_{peak} 能够在高频点下大范围调谐,而电感值却能保持几乎不变。

表 3　五种组合偏压(V_{BIAS4}至 V_{BIAS8})的情况

组合偏压	V_{b1}/V	V_{b2}/V	V_{ftune1}/V	V_{ftune2}/V
V_{BIAS4}	2.70	0.75	3.00	0
V_{BIAS5}	2.70	0.75	1.00	1.6
V_{BIAS6}	2.70	0.75	1.84	2.35
V_{BIAS7}	2.70	0.75	1.50	2.00
V_{BIAS8}	2.70	0.75	2.00	2.50

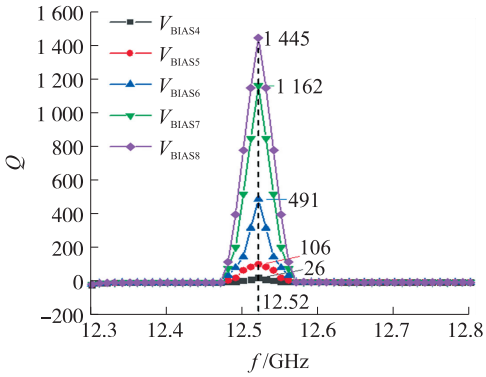

图 7　V_{BIAS4}-V_{BIAS8} 下 HFVCAI 的 Q 值变化曲线

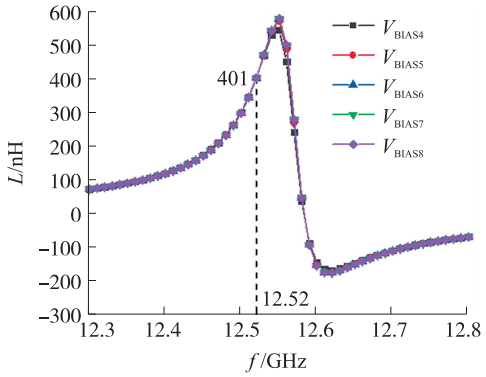

图 8 V_{BIAS4}-V_{BIAS8}下 HFVCAI 的电感值变化曲线

由于本文的 HFVCAI,一个电路能够同时表现出上述三种优异的性能,且在本节的先前部分得到验证,而文献中一个有源电感电路,往往只能关注一种电感性能,还不能够集多种优异性能于一体。因此,针对本文 HFVCAI 的三种优异电感性能,选取近年来具有代表性的 3 篇文献[8-10]的电感性能进行比较,分别如表 4 至表 6 所示。

表 4 本文的电感值和 Q 值在同一高频点下皆能取得高的峰值电感性能与文献电感性能的对比

名称	[8]	[9]	[10]	本文
L_{peak}/nH	240	26.2	17	2 841.4
Q_{peak}	341	23	220	2 118
L_{peak}对应频点/GHz	2.69	5	2.4	12.78
Q_{peak}对应频点/GHz	2.51	3.75	2.6	12.78

表 5 本文的电感值在高频点下大范围调谐同时 Q_{peak}基本不变电感性能与文献电感性能的对比

名称	[8]	[9]	[10]	本文
L 变化范围/nH	25.7~180	4~26.2	1.5~17	23.9~123.8
对应频点/GHz	0.79~2.69	5	2~2.6	12
Q 变化情况	10~341	1.5~5	200~320	87

表 6 本文的 Q_{peak}在高频点下大范围调谐同时电感值基本不变的电感性能与文献电感性能的对比

名称	[8]	[9]	[10]	本文
Q_{peak}变化情况	341	2.2~23.2	220~320	26~1 445
对应频点/GHz	2.51	3.15~3.75	2.05~2.6	12.52
L 变化情况/nH	120	3-8.5	2-17	401

通过比较可以看出,本文的 HFVCAI 能够同时表现出三种不同的优异性能,且均优于文献[8-10]的电感性能。从表 4 可以看出,文献[8-10]的三个 AI 均不能在同一高频点下取得高的电感峰值和高的 Q 值峰值,而本文 HFVCAI 能够在高频点 12.78 GHz下取得;从表 5 可以看出,文献[8-10]的三个 AI 均不能在高频点下使得电感值大范围调谐的同时 Q 值取得基本不变的峰值,例如文献[8]的 AI 在频带 0.79 GHz ~ 2.69 GHz 下电感值在 25.7 nH~180 nH 范围内变化,同时 Q 值也从 10 变化至 341,文献[9]的 AI 在频点 5 GHz 下电感值可从 4 nH 调谐至 26.2 nH,但 Q 值却从 1.5 变化至 5,文献[10]的 AI 在频点 2.6 GHz 下电感值从 1.5 nH 变化至 17 nH,但 Q 值在频带 2 GHz~2.6 GHz 下却从 200 变化到 320,而本文 HFVCAI 能够在高频点 12 GHz 下使得电感值从 23.9 nH 调谐至 123.8 nH,且 Q 值能够取得保持基本不变的峰值 87;从表 6 可以看出,文献[8-10]的三个 AI 均不能在高频点下使得 Q 峰值大范围调谐的同时保持电感值基本不变,例如文献[8]的 AI 在频点 2.51 GHz 下取得 Q 峰值 341,但没有说明调谐情况,文献[9]的 AI 在频带 3.15 GHz~3.75 GHz 下 Q 峰值在 2.2~23.2 的范围内变化,但电感值也相应在 3 nH~8.5 nH 的范围内变化,文献[10]的 AI 在频带 2.05 GHz~2.6 GHz 下 Q 峰值在 220~320 的范围内变化,但电感值也在 2 nH~17 nH 的范围内变化,而本文 HFVCA 能够在高频点 12.52 GHz 下使得 Q 峰值在 26~1 445 的范围进行调谐,而与之同时还能够保持电感值基本维持在 401 nH。

3 结论

本文提出一款多种优异性能集于一体的高频压控有源电感(HFVCAI)。联合采用第一交叉耦合单元、第二交叉耦合单元和调控单元等 3 个单元,通过各单元的相互协同配合和对它们的 4 个外部电压进行联合调谐,实现了 3 种优异性能集于一体:电感值和 Q 值在同一高频点下皆能取得高的峰值;电感值能够在高频下大范围调谐,而与此同时,Q 峰值却能够保持基本不变;Q 峰值能够在高频点下大范围调谐,而电感值却能保持几乎不变。验证结果表明,该 HFVCAI 在 12.78 GHz 高频点下,电感值和 Q 值分别取得了 2118 nH 和 2841 高的峰值;在 12 GHz 高频点下,电感值能够从 23.93 nH 调谐至 123.82 nH,同时 Q 值在该频率下取得峰值,且基本维持在 87;在 12.52 GHz 高频点下,Q 峰值可从 26 调谐至 1 444,同时电感值能够基本维持在 401 nH。

参考文献:

[1] Razavi B. The Active Inductor[J]. IEEE Solid-State Circuits

Magazine,2020,12(2):7-11.

[2] Tomoyuki Y,Fumitaka K,Max H,et al. Emergent Electromagnetic Induction in A Helical-Spin Magnet [J]. Nature,2020,586(7828):232-236.

[3] Kumar V,Mehra R,Islam A. A CMOS Active Inductor Based Digital and Analog Dual Tuned Voltage-Controlled Oscillator[J]. Microsystem Technologies,2017,25(5):1571-1583.

[4] 张正,张延华,温晓伟,等. 采用可调谐高 Q 有源电感的高优值 VCO 的研究[J]. 电子器件,2021,44(2):272-277.

[5] Ahmed A,Wight J. A Q- and Bandwidth-Enhancing Design Technique for Active Inductors Using Parasitic Cancellation[C]//2008 2nd International Conference on Signals,Circuits and System[ISSCS]. Nabeul,Tunisia,2008:1107-1109.

[6] Leoni A,Pantoli L,Leuzzi G,et al. Bandpass Filter Design with Active Inductor by Means of Wave Digital Approach[C]//2017 13th International Conference on Advanced Technologies,Systems and Services in Telecommunications(TELSIKS). Nis,Serbia. 2017:339-342.

[7] Saad S,Mhiri M,Ben Hammadi A,et al. A New Low-Power,High-Q,Wide Tunable CMOS Active Inductor for RF Applications[J]. IETE Journal of Research,2016,62(2):265-273.

[8] Bharath L,Anila D,Ajay C N,et al. A Wide-Band,Low-Power Grounded Active Inductor with High Q Factor for RF Applications[C]//The International Conference on Communication, Computing and Electronics Systems 2019,Coimbatore,India,2019:541-548.

[9] Sayem A S,Rashid S,Akter S,et al. Performance Analysis and Simulation of Spiral and Active Inductor in 90 nm CMOS Technology[C]//2018 4th International Conference on Electrical Engineering and Information & Communication Technology(iCEEiCT). Dhaka,Bangladesh,2018:571-576.

[10] Slimane A,Tedjini S A,Haddad F. Novel CMOS Active Inductor for Tunable RF Circuits[C]//2018 IEEE 61st International Midwest Symposium on Circuits and Systems(MWSCAS),Windsor,ON,Canada. 2018:917-920.

康翼麟(1997—),男,汉族,北京人,现为北京工业大学硕士研究生,研究方向为射频 SiGe 器件与射频集成电路,kangyilin@emails.bjut.edu.cn;

张万荣(1964—),男,汉族,河北人,教授,现任北京工业大学博士生导师,研究方向为 RF 器件与 RFIC、微电子器件与集成电路可靠性研究,wrzhang@bjut.edu.cn。