
LSI上に一体集積したMEMSコイル発振器

MEMS coil oscillator fabricated with monolithic process over the LSI

矢部 友崇, 三村 泰弘, 立石 潔
Tomotaka Yabe, Yasuhiro Mimura, Kiyoshi Tateishi
高橋 宏和, 尾上 篤
Hirokazu Takahashi, Astushi Onoe

要旨 高性能な高周波LSIとMEMSプロセスによるマイクロコイルを融合させることができれば、これからの無線通信分野や超高感度容量センサーなどを実現するための重要技術の一つである。筆者らは小型ながら大きなQ値と大きなインダクタンス値を持つ直径234 μm のマイクロコイルをMEMSの作製技術を利用することで実現した。MEMSコイルの設計は3次元電磁界シミュレーションで行った。さらに設計したMEMSコイルをLSI基板上に立体的に浮かせた配置で一体集積し、GHz帯の発振器の基礎的な動作に成功した。本稿ではこれらの結果を示す。

Summary Integration technique of high-performance RF-LSI and three-dimensional MEMS micro coil is one of the key technologies to realize a future wireless telecommunication service or a hypersensitive capacitance sensor system. In this study, we realized three-dimensional micro coil of 234 μm in diameter with a higher Q and an inductance value by using MEMS fabrication techniques. The micro coil was designed with three-dimensional field simulator. Moreover, we fabricated a three-dimensional micro coil on LSI substrate isolating from the LSI substrate with monolithic technique, and also succeeded in confirming the basic operation of the integrated oscillator circuit in GHz range.

キーワード：高周波LSI, マイクロコイル, MEMS, 高Q値インダクタ, 一体集積

1. まえがき

無線通信分野ではRFフロントエンド見られるように小型ながら大きなQ値とインダクタンス値を併せ持つコイルが重要視されている。現在広くLSIに用いられているコイルは、LSIの作製技術によりコイルの小型化は可能であるが、コイルが基板上に作製されているため、小型と大きなQ値を併せ持つことが難しいと考えられている⁽¹⁾。そこでMEMSの作製技術を使用し

てこの制限を緩和できるコイルの作製を行った。MEMS技術を使用してコイルの作製を行なうことにより、コイルの巻き線を厚くすることや、構造を基板から浮かし、3次的にコイルを形成することが可能になる。コイルの構造を基板から浮かせることで、基板に生じる渦電流の影響を軽減でき、エネルギーの損失を抑えることができる。

特にGHz帯の高周波での利用になると渦電流の影響が大きくなるために、コイルの構造を基板から浮かすことによって、コイルとして高いQ値を持つことが期待される。MEMS技術を使用したコイルには基板の裏面をエッチング等のプロセスを用いて浮かせる構造を採用する方法や、柱を立てて基板から浮かせる方法はこれまでに報告されている⁽²⁾。裏面のエッチングプロセスを用いてコイルを浮かせる形状の場合は、コイルの直下に回路を形成することは難しい。本研究で作製したコイルはLSIと一体化した時に回路全体の大きさができるだけ小さくなるようにするために、柱を作製して基板から浮かせる形を選択した。このような構造にすることで、コイルの直下にも回路を構成することが出来る。また、MEMS技術で作製するデバイスをLSIに一体作製することで、接触抵抗や浮遊容量の影響が軽減されるために、LSIとコイルを別々に作製し、後から組み合わせをするものに比べて特性が良くなると期待されている。特にGHz帯の発振回路では浮遊容量や接触抵抗の影響が顕著に現れるため、不用意な浮遊容量や接触抵抗は回路の動作の妨げになる。その一方でLSI上にMEMS技術を使用して構造体を一体で形成しようとする、MEMSの構造体の作製プロセスにより、LSIが破壊されてしまう懸念もあり、使用できる作製プロセスには制限がある⁽³⁾。そのためLSIに対して破壊やダメージに繋がることのないプロセスの開発も重要になる。

本稿ではMEMSコイルをLSI上に一体作製し、GHz帯の発振器として動作をさせる事に成功したのでその報告を行なう。今回の報告では、まずMEMSコイル単体における設計、評価について述べ、次いでLSI上へ一体集積したMEMSコイルの作製プロセス、発振器の評価について述べる。

2. MEMSコイルの設計

MEMSコイルの設計はコイルの構造が3次元構造になるために、コイルの脚の影響や巻き線同士による浮遊容量の影響を考慮する必要がある。またコイルを使用する周波数が1GHz~2 GHz と高周波となるため、低周波で使用する時と比較をすると、表皮効果などの高周波特有の現象が顕著に現れてくる。これらの要素は設計に複雑に関係してくる。そのために設計には3次元電磁界シミュレーターHFSSを使用して行った。コイルの大きさは300 μm 角に入ることを前提として

設計を行った。コイルは2層構造をしており、上層は3巻、下層は2.5巻となっている。コイルの線幅は11 μm 、コイルの脚の長さは50 μm となっている。また

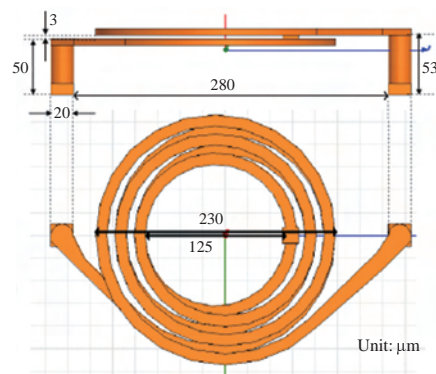


図1 MEMSコイルの概要

コイルの直径は230 μm となっている。材質は銅を選択した。コイルの構造を図1に示す。シミュレーションのモデルはコイルの向かいの基板面にGNDが無い状態で行った。シミュレーション結果よりコイルは2GHzにおける特性で抵抗値が3.02 Ω 、インダクタンス値6.44nH、Q値は26となった。本研究におけるMEMSコイルはこの設計値を基に作製を行なった。

3. 特性評価用MEMSコイル

MEMSコイル単独の特性を評価するためにSi基板上にMEMSコイルを作製した。作製したMEMSコイルを図2に示す。コイル部分は厚膜永久レジスSU-8に埋まっている構造をしている。MEMSコイルの特性の測定には、支持基板であるSi基板をエッチングで取り除き、測定用の電極が表面に出た状態でコイルの特性評価を行なった。

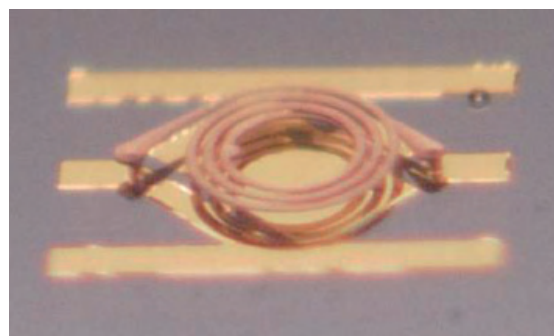


図2 特性評価用MEMSコイル

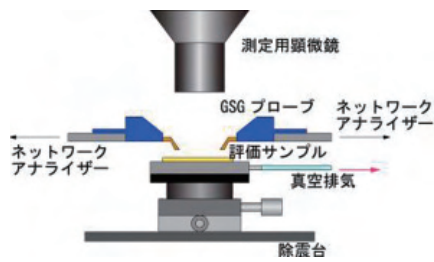


図3 MEMSコイル単独の特性評価システム

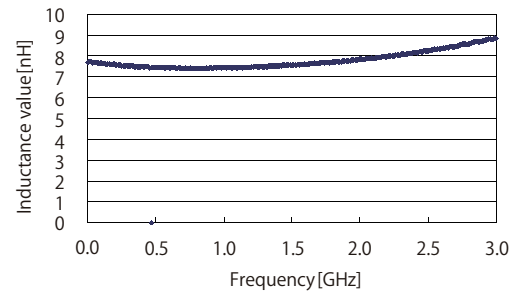


図4 インダクタンス値の周波数特性

4. MEMSコイル特性評価システム

MEMSコイルの特性評価にはネットワークアナライザーを使用し、3GHzまでの範囲で測定を行なった。コイルのインダクタンス値とQ値はネットワークアナライザーから得られたSパラメータから算出を行った。図3にその評価システムの概要を示す。MEMSコイルは1GHz~2GHzでの使用を考えているために、高周波における特性の評価を行なう必要がある。そこで、測定には特性インピーダンスを50Ωに保つためにGSGプローブを使用して測定をするシステムにした。プローブはMEMSコイルの両側から接触させることで2ポート測定を行なった。このプローブは同軸ケーブルに繋がっており、この先にネットワークアナライザーを接続してMEMSコイルのSパラメータを測定した。また評価サンプルを載せるステージは真空排気につながっており測定サンプルを固定することができる。プローブの接触状態は測定結果に影響を与えるので、微小なサンプルの接触状態を観察するために顕微鏡を備えた。これらの測定システムは振動による影響を軽減するために除震台の上に構築した。

5. MEMSコイルの特性評価結果

図4にLSI上に作製したMEMSコイルのインダクタンス値の周波数特性を示す。設計時のシミュレーションではコイルの直径は230μmで行ったが、実際のコイルの直径は234μmとなった。評価はこのコイルを使用して行った。

特性評価はSパラメーターを測定し、得られたSパラメーターから算出を行った。測定は30kHz~3GHzの範囲で行った。インダクタンス値は2GHzで6.77nH、

Q値は11.2となった。このインダクタンス値はLSIの設計時に想定した値と近いものであり、回路を動作させるのに十分な値となっている。このコイルの構造設計値を基にLSI上にMEMSコイルを一体作製した。

シミュレーションと同様にコイル下の基板面にGNDパターンが無い場合に大きなQ値が得られるかを検証するために、コイルの下にGNDパターンが無い状態のコイルの直径を234μmにしたMEMSコイルで、測定を行なった。その時のSパラメータを図5に示す。測定は30kHz~3GHzの範囲で行った。図5のS11もしくはS22の結果から、得られたMEMSコイルの特性は測定範囲における等インダクタンス面にのっている事が分かる。これら得られたSパラメータからインダクタンス値とQ値を求めた。その結果を図6と図7に示す。Q値は式(1)から求めた。

$$Q = \frac{\omega L}{R} \quad (1)$$

ω:角周波数 L:インダクタンス値 R:抵抗値

これらの結果より主だった周波数におけるインダクタンス値とQ値を表1に示す。

作製したMEMSコイルは対向する面にGNDパターンが無い状態では2GHzにおいて、インダクタンス値7.83nH、Q値22.3であった。この結果よりMEMS技術を使用してコイルを作製することにより、コイルを基板から浮かせることができ、大きいインダクタンス値と大きなQ値を併せ持つコイルが作製できた。

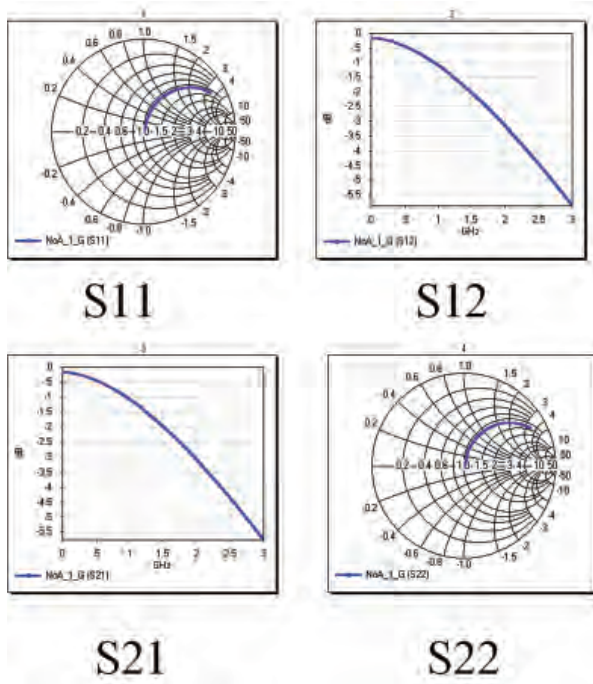


図5 MEMSコイルのSパラメータ

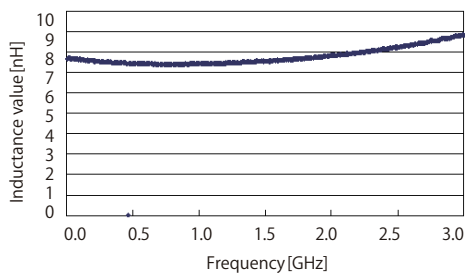


図6 インダクタンス値の周波数特性

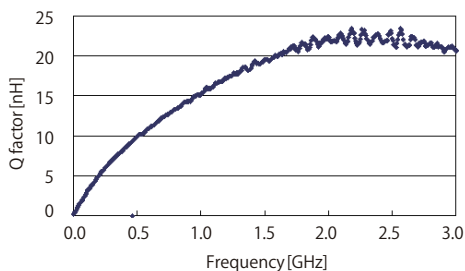


図7 Q値の周波数特性

表1 MEMSコイルの周波数特性結果

	1 GHz	1.3 GHz	2 GHz
インダクタンス値[nH]	7.43	7.49	7.83
Q値	15.2	18.0	22.3

6. 作製したLSIの仕様

LSIはBi-CMOSプロセスを使用して作製を行なった。発振器の回路構成はクラップ型の発振回路とした。発振周波数は1.257GHz(typ)となっている。また静電破壊防止として保護ダイオード (ESD) を回路に入れた。

7. LSI上のMEMSコイル作製プロセス

図2に示した特性評価用のコイルの作製法を基にLSI上へMEMSコイルを作製した。図8にその作製プロセスを示す。

まず図8の(a)に示す通りLSI上に凸凹があるためにコイルを形成する前にLSIの平坦化を行った。平坦化はLSI上にTEOS CVDでSiO₂(酸化膜)を成膜後、CMP(Cheical Mechanical Polishing)で研磨を行なった。

その後、図8(a)~(c)に示す通り、MEMSコイルとLSIの電極と接続部コンタクトまたはLSIからの信号の外部取り出し電極とを形成するためCr/Auの成膜を行った。

次に図8(d)に示す通りコイルの下層とLSIを繋ぐ導線としての脚を形成するためにシート型厚膜永久レジストSU-8を貼り付けパターニングを行った。

更に図8(e)に示す通りめっき工程を行なうためにシード層を形成し銅めっきを行い、コイル配線の厚さを調整するためにCMPで研磨を行なった。

次に図8(f)に示す通りコイルの上層を形成するためにシート型厚膜永久レジストを貼り付けパターニングを行った。

更に図8(g)に示す通りめっき工程を行なうためにシード層(Ta/Cu)を形成し銅めっきを行い、コイル配線の厚さを調整するためにCMPで研磨を行なった。

最後に図8(h)に示す通りシート型厚膜永久レジストでコイル表面を封止した。

図9にLSI上に一体作製したMEMSコイルを示す。コイルによってできた影がLSI基板上に映っており、基板からコイルの形状が浮いていることが分かる。

LSIにコイルを一体作製する上でLSI上の電極とMEMSコイルの脚やコイルの1層目と2層目の間などの各界面における接続状態や、めっきの状態は発振回路全体の特性で重要な要素になると考えられる。これら接続界面やめっきの状態を確認するために行った観察結果を図10に示す。SEM像から接続界面の乖離やめっきの鬆(ポイド)はなく、良好な状態であることを確認した。

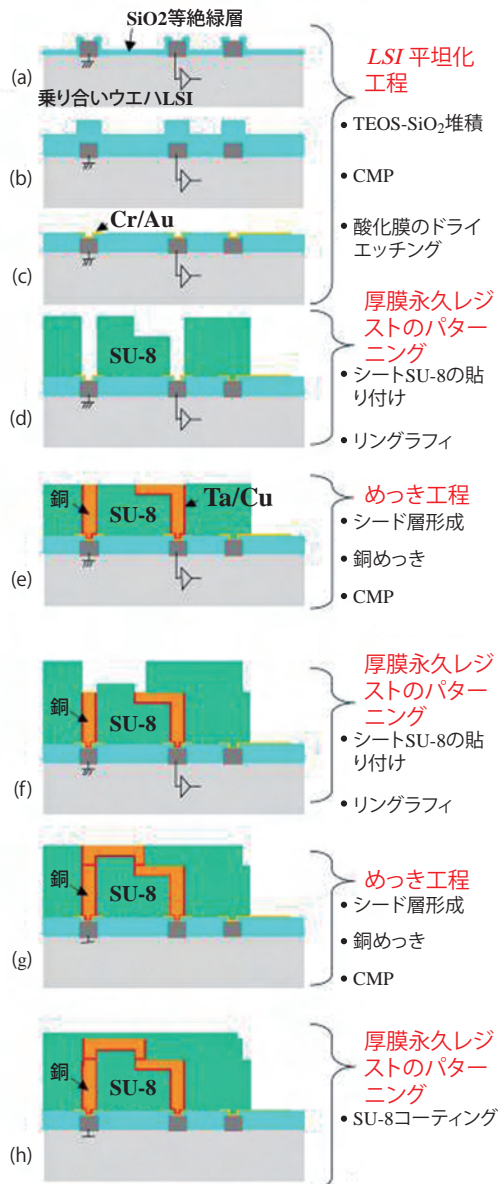


図8 LSI上のMEMSコイルの作製プロセス

8. LSI一体MEMSコイル発振器の評価

本実験におけるLSI発振器からの出力信号はGHz帯の高周波であるため、伝送路設計を行なった図11に示す評価ボードを作製した。LSIと評価ボードを接続するためにワイヤーボンディングで接続をしている。このワイヤーボンディングは等価回路ではインダクタとしての振る舞いもするため、LSIとの評価ボードを接続する直近の場所にマッチング回路を搭載しワイヤーボンディングによるLSIからの出力信号への影響を軽減する設計となっている。



図9 LSI上に一体作製したMEMSコイル

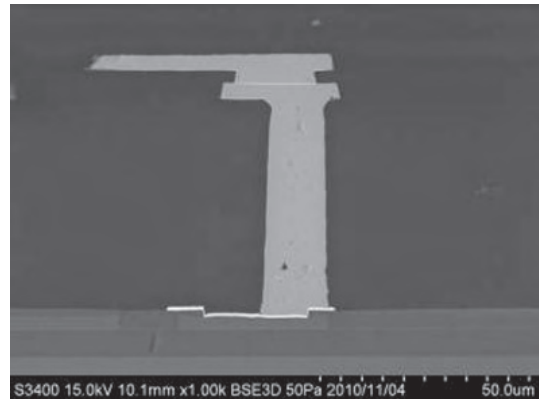


図10 コイルの断面SEM像

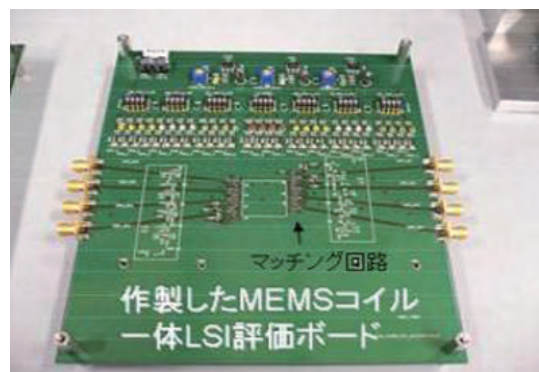


図11 MEMSコイル一体化LSI評価ボード

LSIからの出力信号はこの評価ボードを介してスペクトルアナライザまたはオシロスコープに接続して測定を行なった。オシロスコープによる出力波形を図12に示す。測定は1nsレンジで行った。この結果から連続的に発振の動作をおこなっていることを確認できる。

また図13に発振器のスペクトルを示す。測定はSPAN 1MHz, RBW 1kHzで行った結果である。発振周波数は中心周波数が1.21GHzでほぼ設計値である1.257GHz(typ)にほぼ近い値の周波数における動作となった。

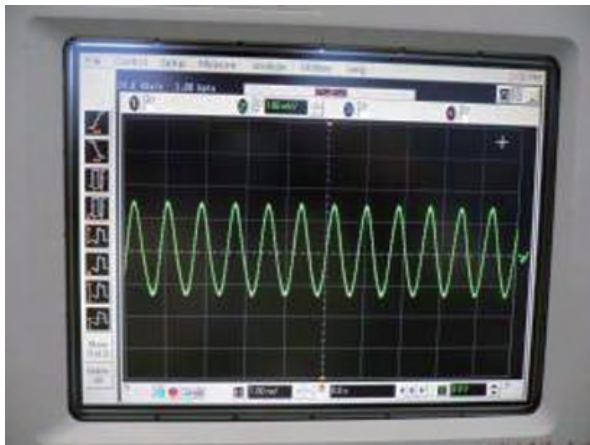


図 12 発振器の出力時間波形

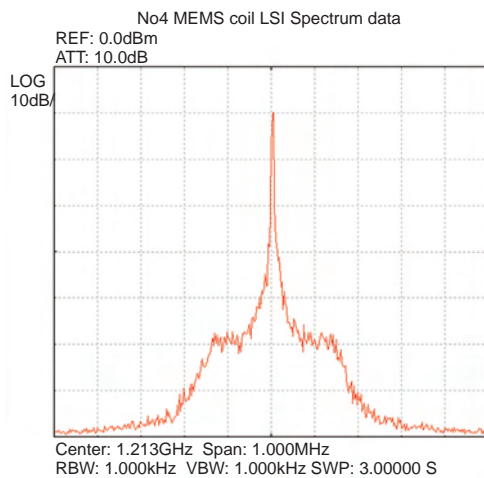


図 13 LSI一体MEMSコイル発振器のスペクトル

9. LSIに対する負荷実験

MEMSコイル作製におけるプロセスはLSIに対して性能の劣化や破壊につながる大きな負荷がかかる可能性がある。そのため、これらの負荷がLSIに対してどのような影響を与えるかを、それぞれの負荷をLSIに対して与えて確かめた。実験ではTEGとして作製したLSIコイルを搭載した発振器にそれぞれの負荷を与え、負荷を与える前後でのスペクトルの比較を行った。大きな負荷が回路に加わり、LSI内の配線の抵抗値やコンデンサーなどの定数が変わると出力の特性が変わるためにスペクトルも変化すると考えられる。実験に使用したLSIコイル発振器とはコイルをLSIのプロセスによって作製したコイルを搭載した発振器で、MEMSコイルとの構造の大きな違いは、コイルの構造が基板から浮いていないことである。その違いの概要を図14、図15に示す。LSIコイル発振器とMEMSコイル発



図 14 LSIコイル発振器



図 15 LSIコイル発振器

振器では回路の構成は同様のものになっている。負荷はMEMSコイル作製に必要なプロセスでLSIに対して負荷が大きいと考えられる①アッシング②200℃加熱③逆スパッタ④めっきプロセスを想定した電流注入の4項目に関しLSIに対して負荷を加えた。電流注入の実験を図16に示す。電流の注入では、電流を流すためのプローブをコイル部分に直接接触して電流注入を行った。そのためコイルに傷がつかないように金のワイヤーで作製したプローブを使用して実験を行った。図17に示すようにMEMSコイル作製時におけるめっきプロセスは、プロセス設計上めっき用の電極とシード層間に電流が流れるために、回路自体に電流が流れることはないと考えられる。しかし、一部の電流が回路内にも流れている可能性もあるので、回路にとってより厳しい条件であるめっきを行なうときの電流のすべてが回路内に流れる条件で実験を行った。

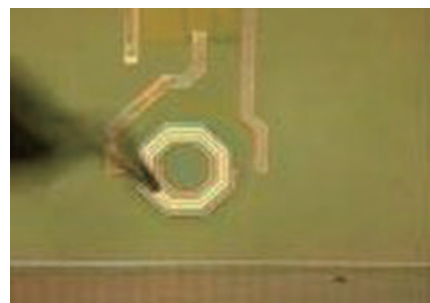


図 16 電流注入実験

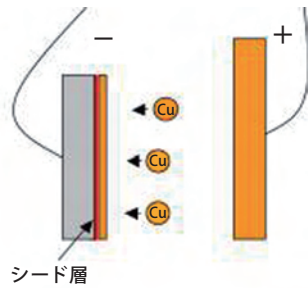
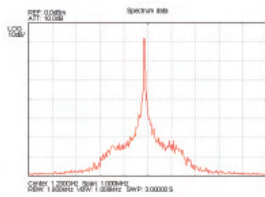


図 17 MEMコイル作製時のめっきプロセス

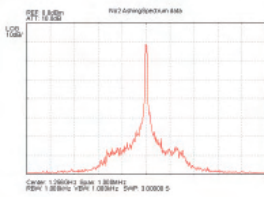
10. LSIに対する負荷実験の結果

LSIに対して負荷を加えない状態のスペクトルを図18(a)に示す。またアッシング、200℃加熱、逆スパッタ、電流注入後のスペクトルを図18の(b)~(e)に示す。負荷を加えない状態でのスペクトルとそれぞれの負荷を加えたスペクトルでは変化が見られなかった。

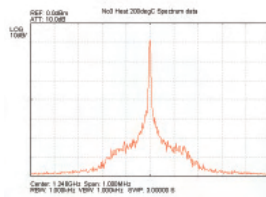
この結果よりMEMSコイル作製におけるプロセスにおいて、LSIに対して性能の劣化や破壊につながる大きな負荷はかかっていないと考えられる。



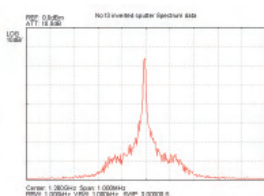
(a)負荷なし



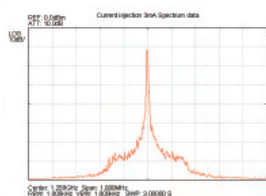
(b)アッシング



(c)200℃加熱



(d)逆スパッタ



(e)電流注入

図 18 LSIに対する負荷実験の結果

11. 考察

図13で示したLSI一体化MEMSコイル発振器によるスペクトルでは、100kHzオフセット付近にスペクトルの広がりが見られる。このスペクトルの広がり、LSIの電極と外部基板のワイヤーボンディングによる配線で出力信号が高周波であるために出力信号と電源等が干渉をして変調がかかっているためだと考えられる。

LSIに対する負荷実験ではアッシング、逆スパッタ、電流注入の負荷に対してMEMSコイルを作製するのに十分な耐性があった。

これは回路中に保護ダイオードを含んでいること、回路の作製にBi-CMOSプロセスを使用したためだと考えている。

MEMSコイルの評価実験において表1で示すように2GHzにおいてインダクタンス値7.8nH、Q値22でインダクタンス値とQ値で大きな値を併せ持つコイルの作製に成功した。しかし、シミュレーション値のQ値26と比較すると小さな値となっている。図10に示すコイルの脚の断面SEM像から接続界面の乖離やめっきの鬆(ポイド)は確認できなかった。しかしMEMSコイル作製の各工程において各界面の酸化やレジストの残渣発生可能性がある。これらの影響はコイルの抵抗値を上げることになる。各界面の酸化やレジストの残渣の改善によりQ値を上げることは可能であると考えている。GNDパターンがある場合のMEMSコイルはGNDパターンが無い状態のMEMSコイルに比べてQ値が小さくなっている。これはMEMSコイルの脚の部分とGNDパターンが影響をしていると考えられる。

12. まとめ

今回の実験ではマイクロMEMSコイルを一体集積した発振器での動作に成功した。また、MEMSの作製技術を使用することにより、基板からコイルの構造を浮かし、シミュレーションと同様GNDパターンが無い状態で、大きなインダクタンス値とQ値を併せ持つコイルが作製できることを示した。

これらの結果は、高周波LSIとMEMSデバイスを融合させた発振器による超高感度の容量センサーを実現するための基礎となる。今後、MEMSコイルとLSI回路を一体化するための設計及びプロセスの更なる改良による性能の向上を実現することで、筆者らが研究を行ってきた超高密度強誘電体ストレージ用^{(4)・(7)}の超小型ヘッドや、超高感度ガスセンサー、無線通信分野など今後有望な他のMEMSデバイスへの応用が期待される。

13. 謝辞

本研究は『マイクロシステム融合拠点』（先端融合領域イノベーション創出拠点形成プログラム，文部科学省／科学技術振興調整費）プロジェクトの一環として実施された研究であり，日頃よりご指導いただいております東北大学院工学研究科の小野崇人教授，山口正洋教授，室賀翔氏，東北大学原子分子材料科学高等研究機構の江刺正喜教授および社内外の関係各位に深く感謝を致します。

参考文献

- (1) 石原昇，水落裕，天川修平，益一哉：“RFCMOS回路とMEMS回路の融合”第26回センサ・マイクロマシンと応用システムシンポジウム論文集pp124-129(2009)
- (2) Gabriel M.Rebeiz:”RFMEMS THEORY, DESIGN, AND TECHNOLOGY” WILEY INTER-SCIENCE (2003)
- (3) 桑原啓，佐藤昇男，森村浩季，小館淳一，石井仁，佐藤康博：“集積化RFCMOS-MEMS技術”第26回センサ・マイクロマシンと応用システムシンポジウム論文集pp120-123(2009)
- (4) Y.Cho, S.Hashimoto, N.Odagawa, K.Tanaka, and Y.Hironaga:”Realization of 10Tbit/in.2memory density and subnanosecond domain switching time in ferroelectric data storage”,Appl.Phys Lett.87,pp.232907-1-232907-3,2005
- (5) 藤本健二郎，前田孝則，尾上篤:”新トラッキング方法を用いた強誘電体へのデータ記録再生”，第54回応用物理学会学術講演会講演予稿集No.2, pp.632, (2007)
- (6) 矢部友崇，立石潔，前田孝則，尾上篤:”能動的周波数制御を用いた強誘電体からの信号検出”，映像学技法Vol.31, NO45, pp.29-31, MMS2007-48, Oct.2007
- (7) 矢部友崇，立石潔，高橋和宏，尾上篤:”フィードフォワードによるノイズキャンセルを用いた強誘電体からの信号検出”，信学技法Vol.109 No.282 pp35-38, MR2009-35

筆者紹介

矢部 友崇 (やべ ともたか)

研究開発部 第1研究部。強誘電体プローブメモリーの研究開発を経て，現在MEMSデバイスの開発に従事。

三村 泰弘 (みむら やすひろ)

研究開発部 第1研究部。二波長集積半導体レーザー，強誘電体プローブメモリーの研究開発を経て，現在MEMSデバイスの開発に従事。

立石 潔 (たていし きよし)

研究開発部 第3研究部。レーザーディスクLSI開発，DVD，Blu-ray制御技術開発，ホログラフィックメモリーシステム，強誘電体プローブメモリーの研究開発を経て，現在生体センサーの開発に従事。

高橋 宏和 (たかはし ひろかず)

研究開発部 第1研究部。GaN系青紫色半導体レーザー，強誘電体プローブメモリーの研究開発を経て，現在MEMSデバイスの開発に従事。

尾上 篤 (おのえ あつし)

研究開発部 第1研究部。磁気ヘッド，薄膜結晶SHGデバイス，強誘電体プローブメモリー，二波長集積半導体レーザー，生体センサーの研究開発を経て，現在MEMSデバイスの開発に従事。