インピーダンス変換によるインダクタンスのIC化

ミツミ電機株式会社

浜田 誠也・渡辺 良吉

福田 敏春・宮田 武雄

今般、実用的な半導体インダクタンス素子を開発した。これはインピーダンス変換作用を原理とするもので、構造的にはシリコンプレナーチップである。この半導体インダクタンス素子により、集積回路内で、高 Q 、高安定のインダクタンスを得ることができる。本論文では、その動作原理、電気的特性、特徴および応用例について述べる。

1. ま え が き

電子回路の集積化が進むなかで、インダクタンスを含む回路は集積化からとり残されている。これは、IC技術でインダクタンスを作ることが困難なためであり、したがって集積回路の設計にあたっては、インダクタンスをできるだけ含まないように考慮する必要がある。この問題を解決するために、IC技術的にインダクタンスを作る方法について、従来から種々の試みが提案されている。

たとえば、半導体内の少数キャリアの移動特性を利用したもの^{1)~3)}、トランジスタにおける伝達関数の特徴を生かしたもの^{4)~7)}、インピーダンス変換によるもの^{8)~11)}、熱効果を利用したもの^{12)~13)}、特殊な素子を用いたもの^{14)~15)}などがあり、それぞれ得失をもっている。

これらの中で、インピーダンス変換の概念を用いるものは、安定なインダクタンスを実現する最も有望な方法であり、実用回路も種々発表されている^{16)~28)}。一般に能動素子を用いたインピーダンス変換によるインダクタンスにおいて、既存のコイルに比較して問題となる点は次のようなものである。

- (1) 安定度 (対バイアス, 対温度)
- (2) 周波数特性
- (3) ダイナミックレンジ
- (4) 消費電力
- (5) 雑音

(6) 量産性 (コスト, 歩留り)

(7) 非接地型のインダクタンスを得にくい

本論文に述べる半導体インダクタンス素子 (以下 SL と略す) は、インピーダンス変換作用とインピーダンス反転作用の相乗効果により負性抵抗とインダクタンスを得るために、高い周波数においても Q を高くとることができ、能動素子の数も従来のジャイレーターに比較して大幅に減少している。以下 SL の基本構成とその解析、特性³⁴⁾ならびに応用例³⁵⁾について述べる。

2. 構成および動作原理^{29)~31)}

SL の構成原理は、ジャイレーターと負性インピーダンス変換器の組合せと考えることができる。すなわち、ジャイレーターによって容量性インピーダンスを誘導性インピーダンスに変換し、負性インピーダンス変換器による負性抵抗によって素子内での損失分を補償して Q の高いインダクタンスを得ている。また、シリコンを材料として素子を製作する場合の再現性と歩留り、さらに素子としての温度特性の安定化という点への配慮から、インピーダンス変換特性がシリコン拡散抵抗の比率によって支配的に決まるような構成とした。

現在、シリコンチップとして製造している SL のチップパターンを写真1に、具体的な等価回路を図1に示す。図2は SL のシンボルである。SL をインダクタンス素子として用いる場合には図3のようにバイアス電源と付加素子を接続する。

現在 SL は、ハイブリッド IC 用シリコンチップとして製造しているので、これらの付加素子はハイブリッド IC 内部でチップコンデンサおよび印刷抵抗によって構成され、インダクタンスおよび負性抵抗の調整は、これ

"An Integration of Circuit including Inductances by means of Impedance Conversion" by Seiya Hamada, Ryokichi Watanabe, Toshiharu Fukuda and Takeo Miyata (Mitsumi Electric Co., Ltd., Tokyo)

写真 1 SL のチップパターン
Chip pattern of SL.

図 1 SL の等価回路
Circuit construction
of SL.

図 2 SL のシンボル
Symbol of SL.

図 3 バイアス電源と付加素子
の接続図
Connections of bias power
source and optional elements.

らの素子をトリミングすることによって行なわれる。図 1 における TR_3 と TR_4 は等価的に 1 つの pnp トランジスタと考えることができるから、これを TR_1 なるトランジスタで置き換え、インピーダンス Z_1, Z_2 を付加した図 4 のような回路について動作解析する。その詳細は参考文献 29)~31) に述べてあるので、ここでは TR_1, TR_2 を理想電流増幅器と考えた図 5 の等価回路を用いて近似解析する。図 5 から SL の入力インピーダンスを計算すると (1) 式のようになる。

$$Z_{in} = -\frac{R_2 Z_1}{R_1} \cdot \frac{Z_2 - R_1}{Z_2 + \left(Z_1 + R_2 + \frac{R_2 Z_1}{R_1} \right)} \quad (1)$$

ここで $|Z_2| \gg R_1$, $|Z_2| \gg |Z_1 + R_2 + Z_1 R_2 / R_1|$ とい

図 4 基本回路
Fundamental circuit
using SL.

図 5 SL の近似等価回路
Equivalent circuit for approximate calculation.

う、実際に SL を用いる際に成立する条件を設定すると、(2) 式となる。

$$Z_{in} = -\frac{R_2 Z_1}{R_1} + \frac{R_2 Z_1}{R_1} \left(Z_1 + R_1 + R_2 + \frac{R_2 Z_1}{R_1} \right) \frac{1}{Z_2} \\ \equiv -K_1 Z_1 + \frac{K_2}{Z_2} \quad (2)$$

(2) 式の右辺第 1 項は Z_1 に対する負性インピーダンス変換作用を示し、第 2 項は K_2 を実数とすると、 Z_2 に対するインピーダンス反転作用を示している。いま Z_1 を抵抗 R_3 で、 Z_2 を容量 C_1 で置きかえると、(2) 式から入力インピーダンスは負性抵抗 $R_N = -K_1 R_3$ とインダクタンス $L = K_2 C_1$ の直列接続となることがわかる。これが SL の動作原理であるが、 K_1 は同一チップ上の拡散抵抗の比であるから、同一ウェハ内ではその値はほぼ一定であり、温度特性もきわめて良い。

すなわち、従来方式で負性抵抗を用いる場合に問題となっていた負性抵抗の安定度が、本方式では大幅に改善されたことになり、これは実用に耐え得るインダクタンスとなるための重要なポイントである。

いま、等価インダクタンスを L 、負性抵抗を R_N 、負性抵抗打ち消し用の正抵抗を R_E とし、コイルの Q を $Q = \omega L / (R_E + R_N) \equiv \omega L / \Delta r$ と定義すると、 $R_E + R_N \equiv \Delta r = 0$ であれば Q は無限大になるわけであるが、この場合は回路が発振してしまう。実用上は次に述べる理由により、 $Q = 100$ 程度が限界である。これは一般に Δr が微小であるために、 R_N および R_E がわずかに変動しただけで Δr に対しては大きく影響するためである。 R_N が変動する要因としては、周囲温度、電源等の変動が主である。

SL の機能を最も簡単に表現すると等価回路としては

図 6 SL の機能等価回路
The equivalent circuit of the circuit shown in Fig. 3.

図 6 となり ($\alpha=1+R_2/R_1$), 種々回路を検討する際に便利なものである。

3. SL の 特 性

SL の特性の一部を図 7, 図 8 に示す。図 7 は図 3 の外付素子 R_B, C_g に対する負性抵抗とインダクタンスの関係を示す。これからインダクタンスの値はコンデンサ C_g の容量値に対してほぼ直線的な比例関係をもっているのに対して、負性抵抗の値は C_g の値にほとんど無関係であることがわかる。また R_B の値はインダクタンスと負性抵抗の両者に影響を与える。

図 8 は負性抵抗とインダクタンスおよび α の温度特性

図 7 インダクタンスおよび負性抵抗と付加素子の関係
Inductance and negative resistance as a function of additional capacitance and resistance.

図 8 R_N, L および α の温度特性
Temperature dependence of R_N, L and α .

を示したもので、負性抵抗とインダクタンスの温度係数は 25°C において、それぞれ $+100 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$, $+400 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ となっている。測定に際して用いた R_B と C_g の温度係数は、それぞれ約 $+50 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$, $-150 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ である。

このほかの特性として、負性抵抗とインダクタンスのバイアス依存性、周波数特性があるが、前者に関しては入力エミッタ電流 I_E が 4 mA 以上ではほとんど依存性はなく、それ以下では負性抵抗、インダクタンスはバイアスの減少とともに減少する。後者の周波数特性に関しては、周波数が高くなるに従って負性抵抗、インダクタンスともに減少する。

また、文献 31) に示されているように、設計値と実測値はよい一致を示している。

4. SL の実装例

SL を当社製のハイブリッド IC に実装した例について述べる。カラーテレビ用 3.58 MHz のトラップと ARC (Automatic Resolution Control) 回路を含んだハイブリッド IC (LVI 15-D 2) と、 455 kHz 用中間周波増幅検波段を含んだハイブリッド IC (LMI 02-D 2) である。LVI 15-D 2 は写真 2 のような内部構造となっており、構成は現在一般に用いられているトラップのコイル部分を SL でおきかえたものである。LMI 02-D 2 は中間周波トランスのかわりに SL による選択回路を用いたものである。これらの外観を写真 3 に示す。

これらのハイブリッド IC は次のような特徴を持って

写真 2 LVI 15-D 2 の内部構造
Hybrid IC's construction of LVI 15-D 2.

写真 3 LVI 15-D 2, LMI 02-D 2 の外観
Hybrid IC's using SL.

いる。

- (1) コイルレスであり、磁界に無関係である。
- (2) セット組立時に調整する必要がない。
- (3) 高い信頼性を持っている。
- (4) 外付部品数が低減し、組立時の省力化がはかれる。

LVI 15-D 2 ならびに LMI 02-D 2 の規格をそれぞれ表 1, 表 2 に、標準特性をそれぞれ図 9~図 12 に示す。これらのデータからわかるように、従来のコイルに比較して SL は充分実用に耐えるといえることができる。

図 9 LVI 15-D 2 の周波数特性
Frequency response of LVI 15-D 2.

図 10 LVI 15-D 2 の温度特性
Temperature dependence of center frequency and attenuation.

図 11 LMI 02-D 2 のバンドパス特性
Band pass characteristic of LMI 02-D 2.

図 12 LMI 02-D 2 の AGC 特性とひずみ率
AGC characteristic and distortion factor of LMI 02-D 2.

表 1 LVI 15-D 2 の電気的特性
Electrical characteristics of LVI 15-D 2.

特 性	最 小	標 準	最 大	単 位	測 定 条 件
中心周波数	3 530	3 580	3 630	kHz	
減 衰 度	25			dB	3 580 kHz にて
A R C 感 度	4			V(DC)	
挿 入 損 失			26	dB	測定回路の損失を含む

(電源電圧 12 V, 周囲温度 25°C)

表 2 LMI 02-D 2 の電気的特性
Electrical characteristics of LMI 02-D 2.

特 性	最 小	標 準	最 大	単 位	測 定 条 件
中心周波数	451	455	459	kHz	
帯 域 幅	8	10	12	kHz	-6 dB
選 択 度	18	20	22	dB	±10 kHz
出 力 電 圧	-7	-5.5	-4	dBm	入力=75 dBμ
A G C 特 性		45		dB	
電 圧 利 得	41	46	51	dB	入力=45 dBμ
周 波 数 特 性		-12		dB	入力=75 dBμ
ひ ず み 率		1.7		%	入力=75 dBμ

(電源電圧 13 V, 周囲温度 25°C)

5. 検 討

SL は、インダクタンスを実現する半導体素子として開発されたものであり、インピーダンス特性としては、充分コイルに対抗できる性能を持っている。原理的には接地型のものであれば従来のコイルとそのまま置き換えることが可能であるが、単なる置き換えでは SL の特徴を十分に生かした使い方とはいえない。すなわち SL の特徴を生かした回路設計が必要であり、さらに SL に適した回路の開発が望まれる。また、これと並行して SL の基本的な特性改善が必要であり、次のような問題点の解決にも努力しなければならない。

- (1) 能動素子を使用しているために、ダイナミック

レンジが狭い。

- (2) 使用周波数が十数 MHz までである。
- (3) 非接地型のインダクタンスが得られない。
- (4) 消費電力が多い。

などである。

最後に、SL とコイルの差異を記すと次のようになる。

- (1) コイルにはバイアス電源が不要であるが、SL はバイアス電源を必要とする。
- (2) コイルは磁界を発生しその影響を受け、SL は磁界を発生せずその影響も受けない。
- (3) コイルは負荷時の Q が無負荷時の Q より小さくなるが、SL では負荷時において Q の値を調整することができ、負荷 Q を高くすることができる。

このほかに、SL の特徴のひとつとして、SL の等価インダクタンスを流れる電流と同相の電圧を簡単に取出せる。これは端子からの出力電流が等価インダクタンスを流れる電流のほぼ α 倍となることによるもので、負荷に純抵抗を使用することにより電圧として取出することができるのである。コイルの場合も直列に抵抗を接続すれば電圧として取出することができるが、この場合は Q の低下をまねく。SL の場合、C 端子から見たインピーダンスは比較的大きく、共振特性にほとんど影響を与えずに行なわれ、 Q の低下をまねくこともない。

上述の特徴を用いることにより、周波数弁別回路を構成することができる。図 13 に示す SL の同調回路において、入力電圧 V_{in} と等価インダクタンスを流れる電

図 13 SL 同調回路
Tuning circuit using SL.

流 i_L との間には $\pi/2$ だけの位相差を生じる²⁹⁾。この電流の位相と同相の電圧は負荷抵抗 R_L の両端から取出すことができる。これらの入出力電圧を用いてクォドラチュア検波を行なわせることもできるが、ここでは別の例を図 14 に系統図で示した。

7. む す び

以上、このたび開発した半導体インダクタンス素子について、その構成、動作原理、特性、特徴および応用例について述べた。SL はコイルに代って集積回路の中でインダクタンス素子として用いられるものであるが、現在のところ対象はハイブリッド IC に限られている。

完全なモノリシック IC 化を行なうためには、ハイブリッド IC で行なわれているトリミングに代る何かが必要であり、あるいは回路技術的にトリミング不要の系を設計することが必要である。基本的には、SL はコイルに充分対抗できる性能をもっており、さらにある点ではコイル以上の機能をも有している。したがって、SL の開発は、その応用化開発と合わせてはじめて実用上の意義を有するものであり、集積化技術と回路設計技術の有機的な結合が必要となる。

一般に、半導体インダクタンスを含めた能動フィルターは、まえがきに述べたような種々の問題点³²⁾を持っているために、早急に従来のコイルにとってかわるとは考えられない。一方、PLL やセラミックフィルター等のコイルレス化方式³³⁾のように、回路設計の段階においてインダクタンスを含まない方式も集積化のための有効な方法である。したがって、インダクタンスを含んだ IC の実用化については、各方式に関してさらに広範囲にわたる検討がなされなければならない。

おわりに、本開発研究にあたり、種々御協力いただいた第一商研部をはじめとする当社開発センターの関係各位、さらに種々貴重な御教示、御助言を賜った東北大西沢教授、電子総研 垂井博士、東工大 柳沢教授に深く謝意を表する次第である。

(昭和 47 年 10 月 11 日受付、昭和 48 年 2 月 2 日再受付)

図 14 SL を用いた周波数弁別器の系統図
Block diagram of a discriminator using SL.

〔参 考 文 献〕

- 1) J. Nishizawa, S. Iwasa and Y. Watanabe: Science Report of Research Institute of Tohoku University, B-(Elect. Comm.), **10**, 1, July (1958) 45
- 2) J. Nishizawa and Y. Watanabe: International Solid State Circuit Conference (Feb. 1960)
- 3) 舩岡, 北村, 西沢: 信学論誌, **54-C**, 2 (1971) 163
- 4) 庄司, 西沢, 渡辺: 信学会トランジスタ研究会資料 (昭35.5)
- 5) 舩岡, 北村, 西沢: 信学論誌, **53-C**, 5 (1970) 271
- 6) 村瀬, 西沢: 信学論誌, **53-C**, 6 (1970) 370
- 7) 舩岡, 西沢: 信学論誌, **54-C**, 10 (1971) 941
- 8) 西沢: 半導体装置, 近代科学社 (1961) 105
- 9) 川城, 中原, 垂井: 昭40年信学全大予, 546
- 10) 柳沢: 信学誌, **52**, 6 (1969) 699
- 11) 副井, 米田: 信学論誌, **55-C**, 1 (1972) 33
- 12) J. Nishizawa: Science Report of Research Institute of Tohoku University, B-(Elect. Comm.), **11**, 1 (1959) 1
- 13) 野口, 森村: 信学論誌, **52-C**, 9 (1969) 524
- 14) 川城, 垂井: 電気試験所集報, **29**, 1 (1965) 63
- 15) S. Kataoka and N. Hashizume: Solid-State Electronics, **11** (1968) 155
- 16) K.I. Su: Proc. IEEE, **54**, 12 (1966) 2025-2027
- 17) D.F. Sheahan: Electronics Letters, **2**, 10 (1966) 390-391
- 18) T.N. Rao: Electronics Letters, **2**, 7 (1966) 250-251
- 19) S.K. Mitra: IEEE International Convention Record, **14**, 7 (1966) 319-326
- 20) T. Yanagisawa: Electronics Letters **3**, 7 (1967) 311-312
- 21) H.T. Chua: Electronics Letters, **3**, 5 (1967) 182-184
- 22) Fromberg, M. SC: Electronic Eng., **40**, 479 (1968) 12-15
- 23) 柳沢: 信学誌, **52**, 6 (1969) 699
- 24) W.H. Holmes: IEEE J., **SC-4**, 3 (1969) 162-163
- 25) S.S. Haykim: IEEEJ., **SC-4**, 3 (1969) 164-166
- 26) L.M. McGregor: IEEE J., **SC-4**, 1 (1969) 53-54
- 27) G.H. Allen, E.L. Renshler: Proc. Elect. Component Conf. (1970) 277-282
- 28) J.J. Golembeski, T.N. Rao: Proc. Elect. Component Conf. (1970) 294-300
- 29) 宮田, 浜田: 信学会トランジスタ研究会資料, SSD 71-74 (1972)
- 30) 浜田, 宮田: 電気学会電子回路研究会資料, ECT-72-30 (1972)
- 31) 浜田, 渡辺, 宮田: テレビ全大予, 5-17 (1972)
- 32) 柳沢: 昭46年電気四学会連大
- 33) G.S. Moschytz: Proc. Elect. Component Conf. (1970) 243-268
- 34) 福田, 渡辺, 宮田: テレビ全大予, 5-18 (1972)
- 35) 渡辺, 浜田, 宮田: テレビ全大予, 5-19 (1972)

テレビジョン9月号予定目次

【随 想】	TV難視解消によせて.....	NHK	松浦 準雄
【展 望】	色素レーザー開発の現状.....	電通大	氏原紀公雄
【解 説】	光伝送とその問題点.....	武蔵野通研	大川原忠義
	マイクロ波IC.....	日立	前田 稔
【論 文】	眼の焦点調節機構の誤差信号に関する検討.....	阪大	藤井 克彦・笠井 健
	フィルタリング処理による画像の反転方式の検討.....	日本コロムビア	米山 正秀
	記録針のない静電記録管.....	シャープ	田川 孝生
【資 料】	撮像蓄積管とその画像処理への応用.....	浜松テレビ	鈴木 義二・倉沢 一男
【講 座】	半導体物性とデバイス (第3回)		
	半導体素子の特性.....	東芝	尾沢 修