

氏名(本籍)	村瀬嘉夫(神奈川県)
学位の種類	工学博士
学位記番号	工博第229号
学位授与年月日	昭和45年3月25日
学位授与の要件	学位規則第5条第1項該当
研究科専門課程	東北大学大学院工学研究科 (博士課程)電気及通信工学専攻
学位論文題目	半導体能動濾波器に関する研究

(主査)

教授 西沢潤一 教授 真野 国夫

論文審査委員

教授 松尾 正之 教授 齋藤 伸自

論文内容要旨

第1章 緒 論

濾波器を構成する際、その多くは伝達函数として複素極の必要が生じるが、一般的な濾波器においてはその実現にコイルによるLとC、Rの組合せを用いている。しかしICにおいてはコイルのIC化に限界があるために半導体インダクタンスの実現、あるいはCR回路と能動回路を組合せる方法が行なわれている。また、CR回路としてはCおよびRを個別部品として作る他に、IC化には、より適したCR分布定数回路の利用も行なわれている。

一方、半導体内の少数キャリアの拡散は伝達函数的には \overline{CR} と等価であるが、従来 \overline{CR} で実現できていた回路を半導体内の少数キャリアの拡散を利用した素子に置換した場合、 \overline{CR} よりはかるに小面積で等価な時定数が得られる利点をもつ。また、その具体化例として、トランジスタを用いた

場合、 \overline{CR} をそのままトランジスタに置換できるとはかぎらず、回路構成上の工夫が必要な場合が多いが、1端子対として取り扱う場合、 \overline{CR} では得られない原点近傍の零が簡単に実現できる利点をもつ。ドリフト型トランジスタは \overline{CR} において、テーパをつけたのと等価であるが、ベース内の不純物分布は $10^3 \sim 10^4$ の差を持たせることが可能であって、 \overline{CR} の場合の $10 \sim 10^2$ にくらべて実現範囲がきわめて広いといえる。

このような利点を持つ半導体内の少数キャリアの拡散を濾波器の要素として用いた場合の基礎的な現象を把握するためと、機能デバイス化の観点から本論文においては、最も単純な構成として、時定数をあたえるトランジスタと能動素子としてのトランジスタ各々1つによる構成をとりあげて考察した。

第2章 従来 の 研究

半導体インダクタンスとしては、西沢によるPNインダクタンス・ダイオードをはじめ、多くの研究発表があるが、それらの中にあつて、西沢のリアクタンス・ダイオードおよび、そのHigh Q化を実現した複合リアクタンス・ダイオードが他の方式にくらべて等価直列抵抗が安定に小さく、しかも熱的にもバイアス変化に対しても安定で将来性が最も有望視されている。

一方、能動濾波器としては、ジャイレータ、NIC、O.P.Amp.等について多くの研究があるが、ジャイレータが安定性、応用の容易さなどの点ですぐれている。しかし、回路が複雑なものと虚軸に近い複素極の実現が困難なことなどの欠点がある。そこで、リアクタンス・ダイオードをベースとして、ジャイレータの構成を最も単純な回路によって実現し、ジャイレータの加算的構成に、引算的要素を加味した純1端子対回路として、帰還形リアクタンス・ダイオード(F.R.D.)を提案するに至った。

第3章 半導体インダクタンス

帰還形リアクタンス・ダイオード(F.R.D.)を図1に示すF.R.D.が良質のインダクタンス

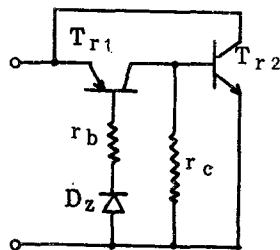


図1. F. R. D.

として使用できるのは、 Tr_1 の f_α 前後の周波数までであるから、 Tr_1 は比較的低い f_α をもつトランジスタを使う。線形なリアクタンスを得るためには、 Tr_2 は使用周波数範囲で周波数特性が無視できるような、 f_α の高いトランジスタを用いる。F.R.D.のインピーダンス Z は、

$$Z = \{ Z_{e1} + (1 - \alpha') r_b \} / (1 + \alpha'\beta) \quad (1)$$

$$\alpha' = (\tau_c s + \alpha) / (1 + \tau_c s) \quad , \tau_c = C_c \cdot r_b, S = j\omega \quad (2)$$

但し、 Z_{e1} : Tr_1 のエミッタ・インピーダンス、 C_c : Tr_1 のコレクタ空層容量、 β : 実効的帰還量となる。 Tr_1 の α を半円近似して

$$\alpha = (\alpha_0 - \delta \tau s) / (1 + \tau s) \quad (3)$$

として、F. R. D. の等価回路を求めると図2のようになる。

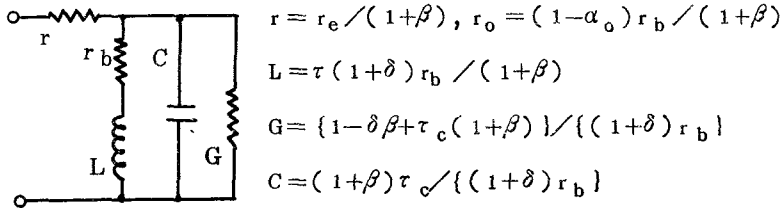


図2. 等価回路

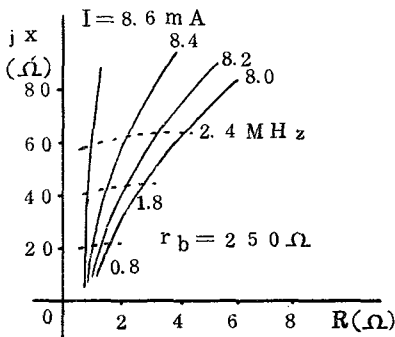


図3. インピーダンス・ダイアグラム

インピーダンスの測定結果の1例は図3のようになって、他の半導体インダクタンスにくらべて、high Q range が大きく、周波数線形性のよいインダクタンスが得られ、リアクタンスは数百 Ω が容易であるから、高周波用の一般用途のインダクタンスとして用いることができる。

第4章 共振素子

F. R. D. の共振現象は Tr_1 の f_α の数倍の周波数で生じるので α を S の3次べき級数に展開して、

$$\alpha = \alpha_0 / (1 + \tau_1 s + \tau_1 \tau_2 s^2 + \tau_1 \tau_2 \tau_3 s^3) \quad (4)$$

とすると、F. R. D. の1端子対インピーダンス Z は、

$$\begin{aligned} Z = & r_{e1} / (1 + \beta) + (1 - \alpha_0 + \tau_1 s + \tau_1 \tau_2 s^2 + \tau_1 \tau_2 \tau_3 s^3) \\ & \cdot r_b / \{ (1 + \beta) \{ 1 + (\tau_c + \tau_1 / \sqrt{1 + \beta}) s + \tau_1 (\tau_c + \tau_2 / \sqrt{1 + \beta}) s^2 \\ & + \tau_1 \tau_2 (\tau_c + \tau_3 / \sqrt{1 + \beta}) s^3 + \tau_1 \tau_2 \tau_3 \tau_c s^4 \} \} \end{aligned} \quad (5)$$

となり、 $\tau_2 - \tau_3 - \tau_c = 0$ の場合には共振周波数 f_r 、および Q は次式であたえられる。

$$f_r = 1 / (2\pi \sqrt{\tau_1 \tau_c}) \quad (6)$$

$$Q = \sqrt{\tau_1 \tau_c} / \{ \tau_1 / (1 + \beta) - \tau_2 + \tau_c + (1 - \alpha_0) \tau_c \} \quad (7)$$

f_r および Q の測定結果の1例を図4に示す。

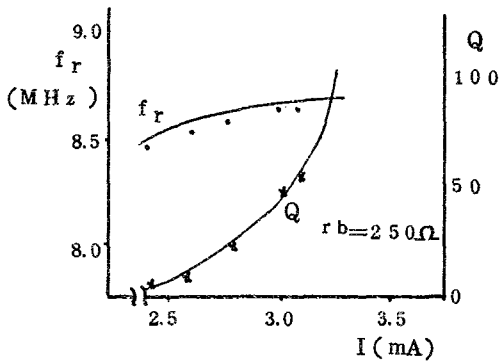


図4. f_r と Q の電流依存性

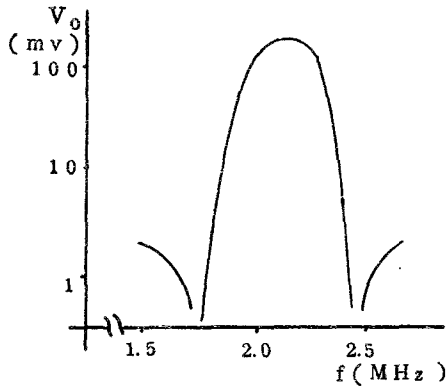


図5. 2極2零特性

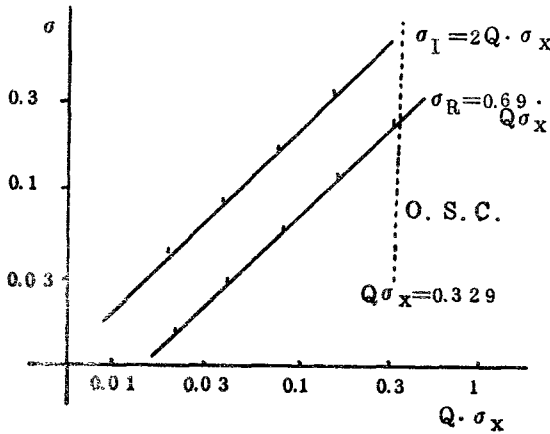


図6. $\sigma_R \cdot \sigma_I$ と $Q \cdot \sigma_x$ の関係

その他に、温度特性および線形結合解析による温度補償、複素零インピーダンスの実現、Sensitivityに関する考察、適用限界等について解析している。

第5章 帯域濾波器

第3章および第4章において、F. R. D. を1端子対のインダクタンスおよび複素極あるいは、複素零インピーダンスとして解析したが、能動濾波器においては謂ゆるBufferが容易に得られるのでF. R. D. をBufferを介して従属接続することにより、任意の伝達函数の合成が可能である。この章においては、従属接続に関する基礎的な考察、双2次函数の実現方法等について述べてあるが、2極2零形帯域濾波器に関する実験結果の1例を図5に示す。

第6章 特性のパラッキと許容誤差

半導体能動濾波器においては、Sensitivityが大きく、かつ、各素子の特性にバラッキが大きいため、製作後の調整は避けられない。この場合の誤差は無相関誤差であるから無相関誤差と特性のパラッキについて線形結合解析および、電子計算機による試行実験を行ない、許容誤差に関する設計資料を得た。2極のmaximal flat filterの極のパラッキと素子偏差および Q の関係を図6に示す。

第7章 複素極を有する低域濾波器

複素極を有する低域濾波器は従来CR回路と単位増幅との組合せで電圧モードによって回路合成されている。しかしトランジスタは入力インピーダンスが低く出力インピーダンスが高いために電流モードの回路合成が必要である。そこで従来の回路の双対回路をトランジスタで実現することによって、複素極を有する低域濾波器を合成した。その基礎回路および測定結果を図7、図8に示す。

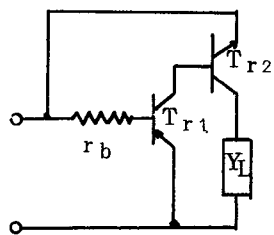


図7. F. R. D. による
低域濾波器

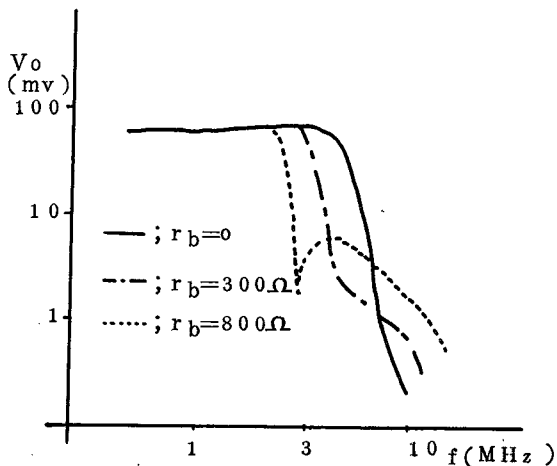


図8. 周波数特性

第8章 総合的検討

F. R. D. によってQの高いインダクタンス(Sの1次インピーダンス)および、あらゆる形式のSの2次函数の1端子対あるいは2端子対インピーダンスが実現できたが、この回路構成が複素極を得るための最も単純かつ共通な回路であると云える。回路形式はジャイレータあるいは、O. P. Amp的手法であって、直流的には負帰還回路であるが、交流的には単に加算的構成のみでなく引算的要素によって、high Q化を行なっている。

今後の問題点としては、Sensitivity 低減のための加算的分散を考慮した回路合成、および非線形性の解析等がある。

第9章 結論

リアクタンス・ダイオードに帰還を掛けることによって、半導体インダクタンスとしては、従来の素子にくらべてhigh Qで線形性のよい素子が得られることを示したのをはじめ、共振素子および帯域、低域能動濾波器等の合成法を示し、各々の場合についてその諸特性を解析し、半導体能動濾波器としての設計資料を得た。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、終始懇切丁寧なる御指導、御鞭撻を賜った西沢潤一教授、有益なる御教示、御助言を賜った真野国夫教授、松尾正之教授、斎藤伸自教授、ならびに熱心な御討論を賜った多くの方々に深く感謝する次第である。

審査結果の要旨

半導体を用いた回路構成は集積回路に見る如く現在非常に活発に開発が行なわれている分野であるが、アナログ回路の集積化における最大の困難の一つは、濾波器である。従来はインダクタンス成分を半導体で実現することは殆んど全く放棄されて来ており、RC回路或いはサンプリング方式によって行なおうとする研究開発が活発に行なわれていた。しかし、集積化技術、半導体工学の技術の進歩によって実現できる素子特性の再現性が著しく向上した現在、インダクタンス素子による濾波器回路の検討が重要になって来ている。本研究は、濾波器回路を総合的に検討し、二三の有望なものを指摘し、それらを具体的に構成して試験と実測とを行なった結果について述べたものである。

本論文は総論と本文9章とよりなる。第1章は本研究の意義と目的について述べたものであり、第2章はこの分野の従来の研究の主要なものを総合し批判を加えたものである。

第3章では半導体デバイスでインダクタンスを実現する方法についてのべ、第4章では特に帰還形リアクタンス回路を新しく提案し、優れた特性が得られることを示した。この方式は市販の或いは通常の集積回路に容易に組み込み得るトランジスタを用いて構成することができ、位相補償が行なわれるから高いQを持った共振回路が容易に実現できることを示した。

第5章では帯域濾波器を実現する他の色々の方法との比較を行なって簡便さにおいて負性インピーダンス変換器による方法に遙かに勝るから、半導体インダクタンスを用いる方法が非常に有望であることを述べている。

第6章では以上の議論を安定性、再現性について行ない、比較検討すると共に、帰還形リアクタンス・ダイオード回路の設計資料を与えている。

第7章では、同様の検討を低域濾波器、高域濾波器回路について行ない、従来RC分布回路で実現されていた濾波器回路を双対なトランジスタ回路で実現できることを示し、その特性について検討している。第8章では以上の比較検討の総合と、今後検討すべき問題点について述べている。第9章は結論である。

以上述べた如く、本論文は従来殆んど捨て去られていた半導体インダクタンスの実現方法、それらを応用したものと従来用いられて来たいろいろの濾波器回路との比較検討の研究を広汎な範囲について行なったもので、電子工学に多くの新しい知見を加えたものであるといえることができる。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。