

## 学位論文題名

## 混成集積回路における構造設計および素子形成技術の研究

## 学位論文内容の要旨

本論文は窒化タンタル系薄膜を用いた混成集積回路の構造設計および製造技術に関するもので、高精度、高安定アナログ回路(RCアクティブフィルタ回路)の集積化のため新しい混成集積回路の実現を目的として行った一連の研究成果をまとめたものである。

電子装置の発展にともない、装置の小型化、高性能化、高信頼化、経済化に対する要求はより一層強くなっている。この要求を満足するものとして、半導体集積回路技術が著しい発展をとげ、必要欠くべからざるものとなった。しかし、半導体集積回路では実現できない広い範囲の電圧、電流、周波数および高精度アナログ回路の分野において、半導体集積回路と薄膜あるいは厚膜集積回路とを組み合わせた混成集積回路(ハイブリッドIC)が1970年代に実用化され、装置の小型化、高性能化、高信頼化がはかられた。通信の分野では、性能、精度、安定性の上から優れた特性を持つタンタル薄膜をベースとした薄膜混成集積回路が広く用いられている。

特に、音声周波数帯では大形で重量の重いインダクタンスを用いたフィルタが実用されていたが、小型化、高精度化に対する強い要請があり、混成集積化の容易なRCアクティブフィルタの研究が盛んとなった。RCアクティブフィルタの理論解析や実験用回路の試作は古くから行われているので、今後の研究課題は、現在の集積回路技術を応用して、いかにして小型で安定なフィルタを実用化するかにある。

まずRCアクティブフィルタ回路に適する素子として、小型・高信頼であり、かつ混成集積化が容易である分布RC素子を取りあげ、実用に耐える安定性を有する分布RC素子の製造技術について研究した。抵抗材料として使用されている窒化タンタルをベースとして考え、窒化タンタルの陽極酸化膜が容量素子形成材料(誘電体)として良好な特性を有することを見いだした。そこで、分布RC素子の抵抗部および容量部を同一材料から形成することにより、工程が簡略化され、

集中RC素子も同時に形成できる利点があるとの観点から研究を行った。

その結果、窒化タンタルの成膜条件、誘電体形成のための陽極酸化条件を選ぶことにより素子特性の温度変化が $-40 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ 程度と、良好な分布RC素子を得た。

続いて、形状が長方形の分布RC素子を組み合わせた階段形分布ブリッジTを考案し、これにより狭帯域特性が得られ、かつノッチ周波数の調節が容易となることを明らかとした。

さらに分布RC素子の安定性、信頼性に関する研究を行い、窒化タンタルから形成した分布RC素子は、 $40^\circ\text{C}$ 、 $10^5$ 時間（約11年）後のノッチ周波数の変化量は $0.02\%$ 以内、故障率は $20 \text{ FIT}$ 以下と推定され、高安定、高信頼であるとの結果を得た。

この結果から、商用に耐えることを確認し、電電公社通信機器であるジャーナルテーププリンタFS受信機の混成集積回路に導入し実用に供した。

タンタル薄膜容量素子には、純タンタルを用いて形成するものが広く用いられている。しかし、タンタル薄膜抵抗素子と比較して、温度係数、経時変化が大きくRCアクティブフィルタに用いるためには、さらに高安定、低温度係数の容量素子が必要である。

上述の分布RC素子の研究結果から、窒化タンタル薄膜をベースとした容量素子は、純タンタルを用いた素子より、安定性、温度係数、耐熱性に優れ、さらに損失が小さい等の良好な特性を有し、また信頼度も高いことが判明した。この成果を発展させ、窒化タンタル薄膜容量素子について誘電体形成のための陽極酸化条件を詳細に検討し、窒化タンタルスパッタ条件、電極蒸着条件等の素子形成条件を最適化し、故障率 $1 \text{ FIT}$ 以下の高信頼で低温度係数、低損失の容量素子を開発した。窒化タンタル薄膜容量素子は、量産技術レベルにおいてもRCアクティブフィルタを実現するための目標特性を満足することを明らかとした。

混成集積回路は多くの搭載部品を実装するため、部品に耐熱性を要求する。このため、窒化タンタル薄膜容量素子の高い耐熱性は組立接続および実装工程における温度管理を容易とする利点となる。

一方、高精度RCアクティブフィルタを構成する観点から、新しい混成集積回路構造として半田溶融接続形混成集積回路が黒沢によって提案され、製造技術の研究を開始した。当初、接続技術の2大主流である半導体ICのビームリード熱圧着技術およびフリップチップ半田接続技術を検討した。その結果、個別部品の搭載を必要とする場合には半田接続が必要であること、基板周辺部のみならず、任意の場所に接続点を設け得ること、接続面積を少なくできること、立体交差配

線が形成できること等の利点が半田接続技術に考えられた。半田溶融接続法は、従来、熱圧着接続で使用されていた薄膜回路基板に対して半田接続を導入し、個別部品、半導体 IC 等の各々の相互接続を、単一技術で行うことを可能としたものと位置づけられる。

技術の単一化のねらいは必要装置数の低減、工程の簡略化、および工程管理、検査、信頼度評価を容易とすることによる経済化にある。

半田溶融接続構造では素子の耐熱性が要求され、純タンタルから形成した薄膜容量素子を使用する場合は、半田を半溶融の状態で用いざるを得なかった。これに対し、窒化タンタル薄膜容量素子は高い耐熱性を有し、半田を完全溶融状態とすることを可能とした。このため、溶融状態の半田の表面張力により薄膜回路基板の支持ならびに接続位置の自己修正機能を持たせることが可能となり、部品偏差を吸収し、組立接続工程の余裕度を広げ、特別に寸法精度の高い部品を必要としないことを明かした。また、経済化のため厚膜技術も導入した。

続いて力学的観点から接続部の理論解析を行い、接続部の構造設計法を確立した。また、各種環境条件において接続特性の評価を行った。その結果、接続点の故障率は 0.1 FIT 以下、接続強度は接続点あたり 1.5 Kg の良好な結果を得た。

半田溶融接続形混成集積回路は窒化タンタル薄膜容量素子とともに電電公社の電話交換機の中に用いる MF 受信器用としての適用を検討し、信頼性を含めた諸特性の評価の後、実用化された。

さらに、パターン微細化にともない加工技術はウエット法からドライ法へと発展した。しかしながらドライエッチングにおいて、基板内に加工の不均一が認められ、大形基板に対し問題点となっていた。均一化を目的として、エッチングガスの種類、圧力、温度等の条件について検討がなされたが、十分な均一性を得られなかった。そこで、これを解決するため、まず加工均一性に影響を与える要因を調べ、エッチングに寄与する励起原子の拡散により濃度分布が生じ、エッチング速度分布が決定されることを明らかとした。

このことから、励起原子の拡散状態を空間的に制御することによりエッチング速度分布を均一化する方法を提案した。また励起原子について拡散方程式を解くことにより均一化の効果を説明できることを明らかとした。拡散層の厚さは 2 ~ 3 mm と推定され、均一化リングとウエハとの間隔は 4 mm 程度まで近づけることにより均一性を向上できるとの結論を得た。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 武 笠 幸 一  
副 査 教 授 小 川 吉 彦  
副 査 教 授 田 頭 博 昭  
副 査 教 授 長 谷 川 英 機

## 学 位 論 文 題 名

### 混成集積回路における構造設計および素子形成技術の研究

本論文は窒化タンタル系薄膜を用いた混成集積回路の構造設計および製造技術に関するもので、高精度、高安定アナログ回路（RCアクティブフィルタ回路）の集積化のための新しい混成集積回路の実現を目的として行った一連の研究成果をまとめたものである。

電子装置の発展にともない、装置の小型化、高性能化、高信頼化、経済化に対する要求はより一層強くなっている。この要求を満足するものとして、半導体集積回路技術が著しい発展をとげ、必要欠くべからざるものとなった。しかし、半導体集積回路では実現できない広い範囲の電圧、電流、周波数および高精度アナログ回路の分野において、半導体集積回路と薄膜あるいは厚膜集積回路とを組み合わせた混成集積回路（ハイブリッドIC）が1970年代に実用化され、装置の小型化、高性能化、高信頼化がはかられた。通信の分野では、性能、精度、安定性の上から優れた特性を持つタンタル薄膜をベースとした薄膜混成集積回路が広く用いられている。

特に、音声周波数帯では大形で重量の重いインダクタンスを用いたフィルタが実用されていたが、小型化、高精度化に対する強い要請があり、混成集積化の容易なRCアクティブフィルタの研究が盛んとなった。RCアクティブフィルタの理論解析や実験用回路の試作は古くから行われているので、今後の研究課題は、現在の集積回路技術を応用して、いかにして小型で安定なフィルタを実用化する。研究の成果は以下の通りである。

1. RCアクティブフィルタ回路に適する素子として、小型・高信頼であり、かつ混成集積化が容易である分布RC素子を取りあげ、実用に耐える安定性を有する分布RC素子の製造技術について研究した。窒化タンタル薄膜をベースとした容量素子は、純タンタルを用いた素子より、安定性、温度係数、耐熱性に優れ、さらに損失が小さい等の良好な特性を有し、また信頼度も高いことが判明した。

2. 形状が長方形の分布RC素子を組み合わせた階段形分布ブリッジTを考案し、これにより狭帯域特性が得られ、かつノッチ周波数の調節が容易で、高安定性、高信頼性が得られることが判明した。その結果、テーププリンタFS受信機の混成集積回路に導入し実用に供した。窒化タンタルから形成した分布RC素子は、40℃、10<sup>5</sup>時間（約11年）後のノッチ周波数の変化量は0.02%以内、故障率は20FIT以下と推定された。
3. 高精度RCアクティブフィルタを構成する観点から、新しい混成集積回路構造として半田熔融接続形混成集積回路について、製造技術の研究を行い、熱圧着接続で使用されていた薄膜回路基板に対して半田接続を導入し、個別部品、半導体IC等の各々の相互接続を、単一技術で行うことを可能とした。
4. パターン微細化にともない加工技術はウエット法からドライ法へと発展させ、ドライエッチングにおいて、基板内に加工の不均一が認められたが、加工均一性に影響を与える要因を調べ、励起原子の拡散状態を空間的に制御することによりエッチング速度分布を均一化する方法を提案した。また励起原子について拡散方程式を解くことにより均一化の効果を説明できることを明らかとした。拡散層の厚さは2～3mmと推定され、均一化リングとウエハとの間隔は4mm程度まで近づけることにより均一性を向上できるとの結論を得た。

これを要するに、著者は混成集積回路について構造設計・素子形成技術上の新知見を得たものであり、集積回路工学、電子デバイス工学に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。