

論文の内容の要旨

論文題目 高温超伝導コプレーナ伝送線路とその応用

氏名 服部 渉

銅酸化物高温超伝導体 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (YBCO) は容易に冷却の可能な 90K 級の超伝導臨界温度を示し、エピタキシャル成長薄膜が容易に得られることから、薄膜デバイスへの応用を目指した研究開発が活発に行われている。YBCO 薄膜は、10GHz 程度の高周波においても 77K で常伝導金属の銅と比較して二桁程度低い導体損失を示す。この YBCO 薄膜のマイクロ波帯における低い表面抵抗を利用した高周波・高速デバイスは、今後の高度情報通信社会において不可欠のキーデバイスとなる可能性を秘めている。特に YBCO 薄膜応用としては、この特徴を生かしたマイクロ波受動素子、特に移動体通信基地局向け受信用マイクロストリップフィルタへの応用が盛んに研究されており、実用化に最も近いと考えられている。このような背景の下、本研究ではさらに新たなデバイスを追求すると共に応用上重要となる YBCO 薄膜の超伝導特性の改善を目指した。

YBCO 薄膜の高周波特性評価においては、これまでにコプレーナ伝送線路共振器を用いた特性評価の報告が多くなされている。しかしながら、表面抵抗の劣化の要因としては Hylton 等のグループの提唱した結晶粒界に超伝導の弱結合が出来ているというモデルによってのみ説明されてきた。しかしながら、特に Cu 組成の変化により T_c の変化が生じるように Cu 組成の若干多い薄膜の高周波特性が良いことが経験的に知られていた。本研究はそのような経験則であった高周波特性の Cu 組成依存性を調べると共に、結晶構造変化や DC 特性の変化、及び析出物との因果関係等を系統的に調べた。その結果、Cu の不足した YBCO 薄膜において生じる高周波特性の劣化を含む全ての実験事実を統一的に説明できる不均一な超伝導体のモデルを提案するに至った。そして高周波表面抵抗の低い YBCO 薄膜を作製するには Cu 組成が不足しないようにすることが重要であることを見出した。

さらに高品質な YBCO 薄膜を使用して、現在銅配線の使用により性能の限界を迎えている高周波・高速デジタル信号を扱う MCM 技術への適用を目指して、5 μm まで中心導体幅を細線化した YBCO コプレーナ遅延線を開発した。本研究では析出物を含んだ高周波特性の良い YBCO 薄膜を用いて、低損失で細線化された YBCO コプレーナ遅延線を作製す

るプロセス技術を確立した。このプロセスはエッチバック平坦化と、Ar イオンミリングとウェットエッチングを組み合わせたレジストステンスルを用いたエッチングプロセスから構成される。このプロセスを用いて作製した線幅 $5\mu\text{m}$ 、線路長 18.2cm の YBCO コプレーナ遅延線は、より太い線幅の遅延線と比較しても表面抵抗の劣化は観察されなかった。またこの線路の減衰定数は $10\mu\text{m}$ 幅の銅のマイクロストリップラインと比較して 2 桁小さく、さらに石英平面光導波路と比較しても 1 桁小さい値を示した。さらに、耐電力特性も高速デジタル回路で必要となる $5\sim 20\text{mW}$ の値とほぼ遜色ない値を示した。これらの結果は $5\mu\text{m}$ まで細線化した YBCO コプレーナ遅延線や伝送線路が高密度・高速デジタル回路用の MCM 配線として有用であり、現在限界を迎えている銅配線を置き換えることが可能であることを示している。

さらに、このような高品質の YBCO コプレーナ遅延線と半導体デバイスを組み合わせることにより、高温超伝導遅延線メモリを作製した。本研究では、高温超伝導デバイスと半導体デバイスを組み合わせたハイブリッドデバイスとして、半導体デバイスの性能を凌駕することを念頭において研究を行った。その結果、今後の高度情報通信社会において不可欠のキーデバイスを開発することを目指し、ATM スイッチの高速セルバッファへの応用を目指した高温超伝導遅延線メモリを提案し、実現した。このメモリはディレイフリップフロップゲートの信号伝搬時間より短いサイクルタイムで動作可能となる。したがって、同じ半導体デバイス技術を用いるならば、半導体メモリとして最も高速なシフトレジスタより高速に動作するという特徴を有する。この高温超伝導遅延線メモリをセルバッファとして用いることにより、シフトレジスタでバッファを構成した場合のクロック周波数の限界を超えて、 10GHz 以上で動作する大容量 ATM スイッチを実現できる。

第 3 章で開発したプロセスに従い作製した低損失で線幅 $10\mu\text{m}$ 、線路長 37cm の $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ コプレーナ遅延線と市販の GaAs MESFET IC から構成した 2×2 クロスバースイッチを組み合わせて実装し、高温超伝導遅延線メモリを作製した。このメモリは温度 64K 、クロック 10GHz で 32bit のパケットを収納できるメモリとして動作した。このクロック周波数は従来報告されているいかなる半導体デバイス製のバッファメモリの動作クロック周波数よりも高い値である。このメモリ特有の動作クロック周波数マージンはメモリ容量 32bit 、動作温度 64K の条件下で 9.78GHz を中心として $\pm 0.22\text{GHz}$ であった。この動作クロック周波数マージンは 10^{-6} 以下の精度で厳密に周波数の管理される通信システム中で用いるには十分広い値である。また、 10GHz 、 33bit の条件で動作する温度マージンは 71.5K を中心として $\pm 4.3\text{K}$ であった。このうち、ビットエラーレートが 10^{-13} 未満であるエラーフリー動作を $71.5\pm 3.5\text{K}$ の温度範囲で確認した。この温度範囲は十分冷凍機で制御可能な温度範囲内にある。これらの結果は、高温超伝導遅延線メモリの実用性を示している。最後に高温超伝導遅延線メモリを用いた ATM スイッチを冷却して使用した場合、消費電力の観点からも十分なメリットがあることを示した。