

シリコン基板上の低損失ミリ波帯受動素子

広島大学 天川修平¹
東京工業大学 岡田健一²・石原昇³・益一哉³
電子デバイス研究所 上道雄介⁴・島山英樹⁵・相沢卓也⁶

Low-loss Millimeter-wave Passives on Si

S. Amakawa, K. Okada, N. Ishihara, K. Masu, Y. Uemichi, H. Hatakeyama, and T. Aizawa

ミリ波帯を利用した数 Gbps を越える高速大容量無線通信が可能になりつつある今日、ミリ波帯で動作する無線通信機器向けの低損失配線板が重要性を増している。当社では、ミリ波配線板に搭載するための受動素子として、シリコン上銅配線技術によりミリ波伝送線路とバンドパスフィルタを設計・試作した結果、それぞれ減衰定数 0.2 dB/mm という低損失と、1 dB 帯域幅 7.0 %、挿入損失 4.67 dB という高性能を実現した。

Low-loss wiring board operating at millimeter-wave band is becoming more and more important these days because high-speed and large-data communications exceeding a few Gbps are being made available by utilizing millimeter-wave band. We designed and fabricated millimeter-wave transmission line and band-pass filter as passive components to be integrated on a millimeter-wave wiring board by using a copper wiring technology on silicon, and achieved low attenuation constant α of 0.2dB/mm in the transmission line and a low insertion loss of 4.67dB with 1-dB FBW of 7.0% in the band-pass filter.

1. ま え が き

ミリ波帯を利用した数 Gbps の高速大容量通信が提案、一部実現されつつある今日、60GHz 帯で動作する無線通信機器はより重要性を増している。国内では 59GHz ~ 66GHz という 7GHz にもわたる広い周波数帯域が特定小電力で利用可能であり、民生分野への普及が期待されている。しかしながら化合物半導体や気密封止パッケージ等といった部品から構成される従来のミリ波通信機器は高価であるため、民生への普及にはこれに取って代わる CMOS-LSI を応用した低コスト機器の実現が不可欠である。CMOS-LSI は大量生産性、低コストという長所を持つ一方、CMOS プロセスで伝送線路¹⁾、バラン²⁾、フィルタ^{3) 4) 5)} 等といった低損失な受動素子を実現することは配線密度を規定する厳密なデザインルール、利用可能な誘電体の厚さが薄いことに起因し、非常に困難である。そこで当社では、厚膜誘電体と銅配線、完全なグラウンド層が利用可能なシリコン上銅配線技術を応用することで低損失、小

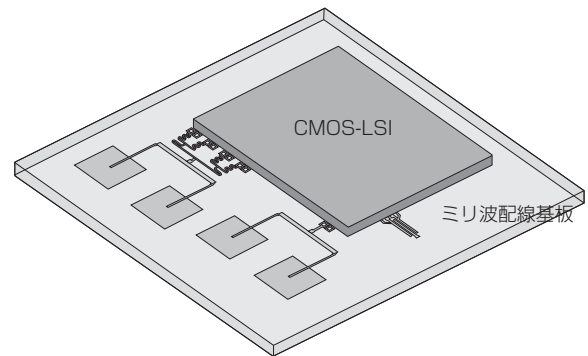


図1 提案するミリ波モジュール概念図

Fig. 1. Sketch of the proposed millimeter-wave module.

型な受動素子を集積したミリ波配線板と、この配線板に CMOS-LSI を実装したミリ波モジュールを提案している。この概念図を図1に示す。今回その初期検討として、伝送線路及びバンドパスフィルタを設計・試作・評価したので結果を報告する。

2. マイクロストリップ伝送線路

ミリ波帯では、マイクロストリップライン等の伝送線路で信号配線を形成する必要がある。CMOS-LSI に

1 先端物質科学研究科 半導体集積科学専攻
2 大学院 理工学研究科 電子物理学専攻
3 統合研究院 ソリューション研究機構
4 シリコン技術開発部
5 シリコン技術開発部 主査
6 シリコン技術開発部 グループ長

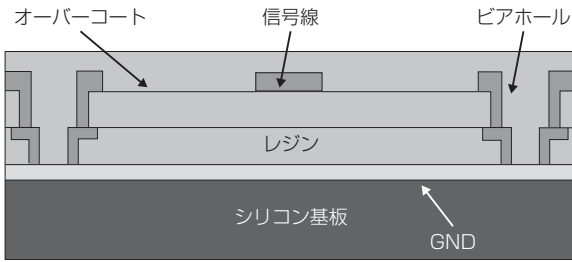


図 2 マイクロストリップ伝送線路の断面図
Fig. 2. Cross-sectional sketch of the micro-strip transmission line.

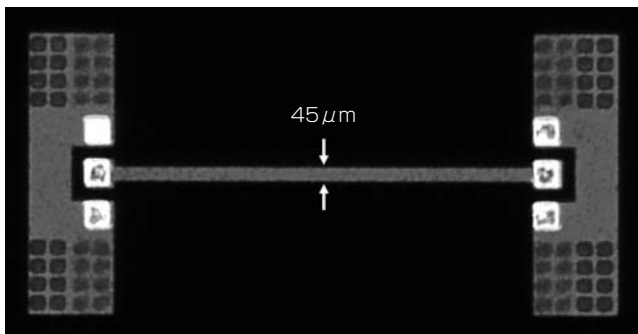


図 3 マイクロストリップ伝送線路の写真
Fig. 3. Micrograph of the micro-strip transmission line.

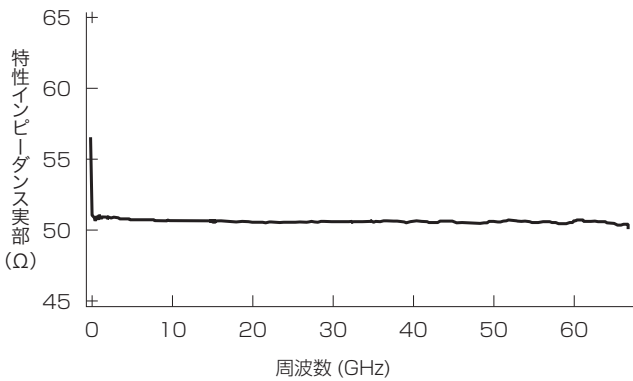


図 4 特性インピーダンス実部の周波数依存性
Fig. 4. Frequency dependence of real part of the characteristic impedance.

において特性インピーダンス 50 Ω で伝送線路を設計した場合、配線幅が細くなるために導体損が大きくなる。これは CMOS 技術で利用できる誘電体の厚さが薄いことに起因する。また、配線密度ルールにより下地のシリコン基板を完全に遮蔽するようなグラウンド層を実現することができず、渦電流損による損失が大きくなるという問題がある。これらの問題から、CMOS-LSI における伝送損失は約 2dB/mm にも達する¹⁾。ミリ波帯における電力合成・分配器等といった受動素子

は、4分の1波長 ($\lambda/4$) を単位長さとして、その N 倍程度の長さの配線で構成される場合が多く、前記の伝送損失と配線長で決まる受動素子の損失は大きなものとなる。たとえば、4分の1波長の長さ (約 0.7 mm) を有する伝送線路の損失は、約 1.4 dB に達する。また、CMOS-LSI のなかでも微細プロセスは面積あたりの単価が高額なため、受動素子の集積化は高コスト化に繋がる。これら CMOS 技術の短所を解決、補完するため我々は図 1 に示すようなシリコン上銅配線技術を応用し、低損失な各種受動素子 (伝送線路、アンテナ、カップラ、バラン、フィルタ) を集積した配線板に CMOS-LSI チップをフェースダウン実装したミリ波通信モジュールを提案しており、この初期検討として、伝送線路を設計・試作した。伝送線路を設計する前に別途 1 波長リング共振器を製作し、透過係数が極大になる周波数からミリ波帯における誘電体の実効比誘電率を 2.6、共振器の Q 値から減衰定数を 0.2 dB/mm と見積もった。その後得られた物性値からマイクロストリップ構造の伝送線路を設計した。図 2 はその断面図である。本技術では、液状樹脂の回転塗布と硬化により誘電体を形成するので、20 μm 程度の比較的厚い誘電体層が形成可能である。特性インピーダンス 50 Ω の場合は、45 μm の配線幅が確保可能である。なお、配線板にアンテナを集積する場合には特性上の観点からガラス基板が望ましいが、今回は実験の容易性からシリコン基板を用いている。今回試作したマイクロストリップ伝送線路では両者の差異は現れない。図 3 は試作したマイクロストリップ伝送線路の写真である。散乱行列の測定は 2 port ネットワークアナライザ (Agilent E8361A) を用いて行った。伝送線路本来の特性を抽出するためには、測定パッドに起因する寄生容量等の並列寄生成分や接触抵抗、寄生インダクタンス等の直列寄生成分を除去しなければならない。ミリ波帯においてこれら寄生成分の影響は直列インダクタのリアクタンスが ωL 、直列キャパシタのリアクタンスが $1/\omega C$ と表現できることに起因し、マイクロ波帯と比較して特に顕著になる。我々は寄生成分の除去 (De-embedding) を、長さの異なる 2 本の伝送線路を測定し、各々の散乱行列を演算処理することで実現した。結果として 2 本の伝送線路長さの差分長を持つ伝送線路本来の伝送特性 (ABCD 行列) が抽出可能となる。次に、得られた伝送特性から伝播定数を算出した。算出した減衰定数は 60 GHz において 0.2 dB/mm、位相定数は 2019 rad/m であった。これらの結果は先に述べたリング共振器の解析結果ともよく一致する。図 4 は抽出した特性インピーダンスの実部と周波数の関係である。ミリ波帯においても設計値 50 Ω が精度よく実現できていることがわかる。このことは前述した誘電体のミリ波帯における物性抽出が正しく行われたことを意味する。

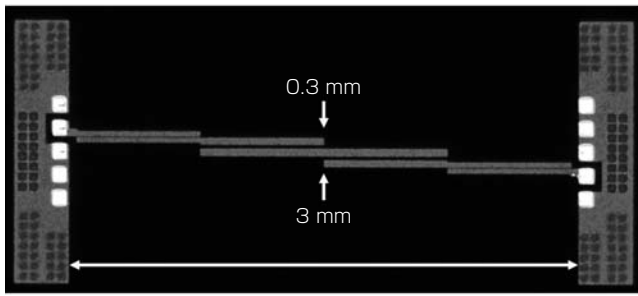


図5 バンドパスフィルタの写真
Fig. 5. Micrograph of the band-pass filter.

3. バンドパスフィルタ

バンドパスフィルタは、送信機において帯域外信号を除去するためのデバイスである。ここでは、平行2線路結合共振器から構成される、3次のチェビシェフバンドパスフィルタを設計・試作した。目標規格として、帯域内リップル、比帯域幅、中心周波数をそれぞれ0.1 dB, 10%, 60 GHzに設定した。この後、設計仕様に対応した g パラメータを用いてアドミタンスインバータを計算し、誘電体厚さを $20\ \mu\text{m}$ と仮定してレイアウト設計をおこなった。共振器の長さは $800\ \mu\text{m}$ である。3次のチェビシェフバンドパスフィルタの場合、2種類の平行2線路結合共振器から構成されるが、それらの線路幅/線間幅は $32.5\ \mu\text{m}/7.5\ \mu\text{m}$, $45\ \mu\text{m}/25\ \mu\text{m}$ となる。製作したバンドパスフィルタの写真を図5に示す。フィルタ部の大きさは $3.3\ \text{mm} \times 0.3\ \text{mm}$ である。これら実際に試作したフィルタの寸法条件を設定した後、電磁界解析を実施した。電磁界解析はSonnet EM Suitesを用い、測定は67 GHzのネットワークアナライザ(Agilent E8361A)を用いた。図6は散乱行列の測定結果と電磁界解析結果を比較したものであるが、測定結果と解析結果はミリ波帯においても非常に良い一致を示すことが分かった。56.7 GHzにおける挿入損失は測定結果が4.67 dB, 解析結果が5.05 dBとなり、0.4 dB以内で一致した。このことから、電磁界解析の結果がミリ波受動素子の設計にも十分信頼し得るものであることを確認した。1 dB帯域幅は7.0%であり、今回製作したフィルタの特性がこれまでに報告されたCMOS技術で実現された特性^{3) 4) 5)}に比べ十分に良いことを示している。今回試作したフィルタは、設計と比べて誘電体厚さが約20%小さくなっているが、仮にこれらが設計どおりに実現できれば特性はさらに改善(挿入損失3.66 dB, 1 dB帯域幅9.2%)する見込みである。参考として、図7に製作した誘電体厚さ $16\ \mu\text{m}$ のフィルタの挿入損の測定値と解析値, 設計値の誘電体厚さ $20\ \mu\text{m}$ の解析値, 誘電体厚さ $24\ \mu\text{m}$ の解析値の比較を示す。文献⁶⁾記載のフィルタの挿入損, 帯域, 共振器Q値の関係式(1)が示す通り、帯域幅が広いほど低挿入損失となり、誘

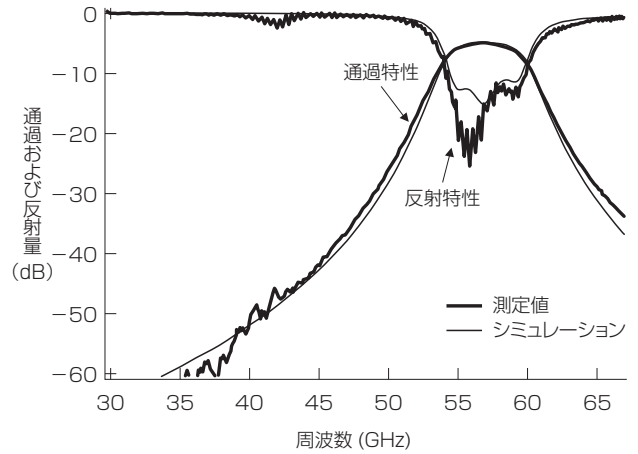


図6 バンドパスフィルタの通過, 反射特性 (実測結果, 解析結果の比較)
Fig. 6. Transmission and reflection characteristics of the band-pass filter - measurement and simulation.

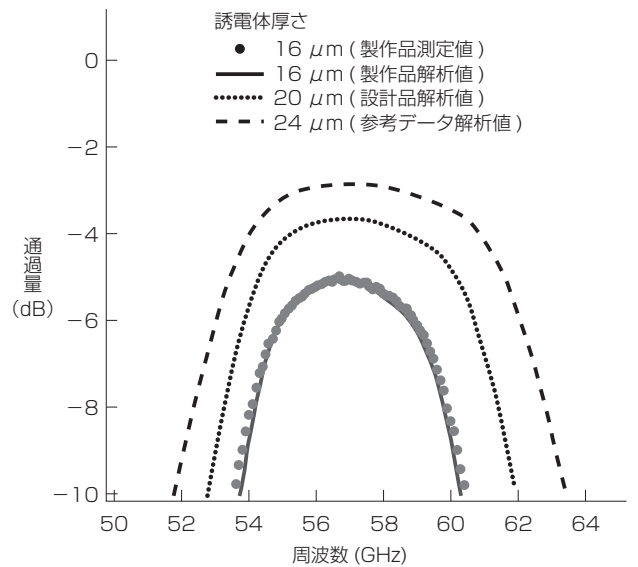


図7 バンドパスフィルタの挿入損失と誘電体厚さの関係
Fig. 7. Relationship between insertion loss and dielectric thickness of the band-pass filter.

電体厚さ $24\ \mu\text{m}$ の場合、帯域内の最小挿入損は2.89 dB, 1 dB帯域幅は11.6%と見積もられる。

4. む す び

シリコン上銅配線の技術を応用したミリ波帯受動素子集積配線板にCMOS-LSIをフェースダウン実装したミリ波モジュールの初期検討として、マイクロストリップ伝送線路とバンドパスフィルタを設計・試作した。マイクロストリップ伝送線路は60 GHz帯において減衰定数 $0.2\ \text{dB}/\text{mm}$ という低損失な伝送特性を実現し、バンドパスフィルタは1 dB帯域幅11.6%で挿

入損失 2.89 dB という, CMOS 技術と比べ格段に高い性能を実現し得ることを確認した.

参 考 文 献

- 1) I.C.H. Lai, M.Fujishima : "High-Q Slow-Wave Transmission Line for Chip Area Reduction on Advanced CMOS Processes," IEEE ICMTS, Mar. 2007, pp.192-195, 2007
- 2) J.-X.Liu, C.-Y.Hsu, H.-R.Chuang, C.-Y. Chen : "A 60 GHz Millimeter-wave CMOS Marchand Balun," IEEE RFIC-S, pp.445-448, 2007
- 3) J.Brinkhoff, F. Lin : "Integrated Filters for 60 GHz Systems on CMOS," RFIT, pp.154-157, 2007, Singapore
- 4) S.Sun, J. Shi, L.Zhu, S.C.Rustagi, K.Mouthaan : "Millimeter-Wave Bandpass Filters by Standard 0.18- μ m CMOS Technology," IEEE Electron Device Lett., Vol.28, No.3, pp.220-222, 2007
- 5) L.Nan, K.Mouthaan, Y.-Z. Xiong, J.Shi, S.C.Rustagi, B.-L. Ooi : "Design of 60- and 77-GHz Narrow-Bandpass Filters in CMOS Technology," IEEE Trans. Circuits and Systems, Vol.55, No.8, pp.738-742, 2008
- 6) S.B.Cohn : "Dissipating Loss in Multiple-Coupled-Resonator Filters," Proceeding of the IRE, Vol.47, pp.1342-1348, 1959