

ULSI 超高速ワイヤレス配線システム (1)

—シリコン集積化アンテナ—

吉川 公磨 (ナノデバイス・システム研究センター教授, 先端研半導体集積科学専攻),
木本 健太郎 (工学部第2類 B4), 渡邊 慎治 (先端研量子物質科学専攻 M2)

1. 研究目的

LSI のトランジスタスケールリングは縮小化とともに性能が向上するが、配線スケールリングでは縮小化とともに信号遅延特性が劣化する[1, 2]。これは配線寄生容量のため、信号遅延が起こるからであり、従来の金属配線の周波数応答は3GHz程度が限界とされている。これを克服するには従来配線技術の限界を打ち破る新しい技術が必要である。

本研究の目的は10GHz以上のクロック周波数をULSIチップ内、チップ間で伝送できる技術を開発すること、および回路内の複数チャンネルに異なる信号を伝送する技術を開発し、リコンフィギュラブルなワイヤレス配線を実現することである。このためにSi-ULSIにおけるウルトラワイドバンド(UWB)ワイヤレス配線システムによるクロック信号伝送を新しく提案し、開発する。しかしながら、アンテナの基板となる導電性シリコン基板は電磁波伝送にとって損失媒体であるから、電磁波伝送特性の測定技術の確立が必要であり、物性的にはSi基板抵抗率依存性を調べる必要がある。さらに、アンテナの過渡応答特性の測定技術を開発し、集積化アンテナによるUWBデジタル信号の直接伝送を実現する。

以上のように、全く新しい分野の開拓であるから測定方法の確立に始まり、材料技術、アンテナ理論、電磁波伝送工学、シリコン超高速回路技術を統合して技術を再構築し開発する。

2. これまでの研究成果概要

図1にSi-ULSIにおける集積化ダイポールアンテナによるワイヤレス配線のコンセプトを示す。Si基板に集積化したアンテナから放射された電磁波は基板を貫通してその先のチップに到達する。そこでアンテナが受けるデジタル信号を集積回路で復調する。これによりチップ間を結ぶ金属配線が不要になり、寄生容量がないワイヤレスで超高速信号送受信が可能になる。図2、図3はSiチップ上のレイアウトパターンと送受信アンテナの平面図を示す。アンテナのテスト構造は抵抗率が $10\Omega\text{-cm}$ から $2.29\text{k}\Omega\text{-cm}$ までのシリコン基板を用い表面に $0.5\mu\text{m}$ の酸化膜を形成する。その上に通常のシリコンプロセスにより配線用アルミニウムパターンでアンテナを形成する。図4は基板を高抵抗化するためのプロトン注入する基板の断面図を示す。またプロトンドーズ量が $5\times 10^{14}/\text{cm}^2$ のときのプロトンイオンのSi基板中プロファイルを図5に示す。示す。具体的に、プロトン注入の条件として、プロトンエネルギー17.4MeV、エネルギーの吸収体と

してのアルミニウムの厚さを $1430\mu\text{m}$ からプロトン注入のシグマを $40\mu\text{m}$ と仮定し $40\mu\text{m}$ ずつ変え $1630\mu\text{m}$ まで6回照射した。その結果プロトンドーズ量が $5\times 10^{14}/\text{cm}^2$ の時の合成プロファイルは $1\times 10^{17}/\text{cm}^2$ のプロトン濃度となった。プロトンイオン注入後のSi基板抵抗率は $>0.1\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$ であった。

図6はネットワークアナライザーを用いたアンテナの周波数ドメイン測定システムを示し、Sパラメータの測定方法を示す。図7にSi基板にプロトン注入した量とアンテナ透過係数(S_{21})の周波数依存性を示す。プロトン注入した場合、20GHzにおいて、透過係数が20dB改善できる。図8はアンテナ透過係数のアンテナ間距離依存性を示す。これから、プロトン注入により基板抵抗率を上げ損失を最小にできるためアンテナ透過係数の距離依存性が小さくできる。図9に20GHzにおけるアンテナ透過係数とSi基板抵抗率の関係を示す。パラメータはアンテナ長である。これから、アンテナ長を長くし、基板抵抗率を上げれば透過係数が改善できることがわかる。インターチップの伝送特性測定のためのアンテナ配置構成を図10に示す。インターチップにおけるアンテナ透過係数の周波数依存性を図11に示す。アンテナ長2mmの送信アンテナから発射された周波数20GHzの正弦波信号が受信アンテナにおいて受信された波形を図12に示す。このことからシリコン基板間で20GHzの正弦波信号が伝送できることを実証した、さらに、抵抗率 $10\Omega\text{-cm}$ の標準基板に対して、プロトン注入した $2.29\text{k}\Omega\text{-cm}$ 基板は正弦波振幅が改善できることがわかる。

3. まとめと今後の展望

ULSIのワイヤレス通信による信号伝送を実現するためのシリコン集積化アンテナ形成技術および超高速周波特性測定技術を開発した。測定は周波数ドメインに加えてタイムドメインでも行った。アンテナの基板となる導電性シリコン基板は電磁波伝送にとって損失媒体であるから、電磁波伝送特性のSi基板抵抗率依存性を調べた。その結果、シリコン基板内およびシリコン基板間に設置したシリコン集積化アンテナにより周波数20GHzの正弦波信号をワイヤレスで伝送できることを実証した。シリコンチップ間でワイヤレス信号を送受信したのは世界で初めてである。さらに、プロトン注入するかSi基板抵抗率をドーピングにより $75\Omega\text{-cm}$ 以上にすると基板損失を最小にできることがわかった。また、超高速信号をチップ内回路プロ

ック間やチップ間で伝送するための集積化アンテナのインターチップ伝送特性はイントラチップ特性と同等であることがわかった。以上により、インターチップワイヤレス配線の実現可能性を示した。さらに、UWB信号の過渡応答特性についても測定し、デジタル信号伝送としてガウシアンモノサイクルパルスを用い、集積化アンテナの過渡応答特性を評価した。以上の結果によりシリコンチップ上に集積化したダイポールアンテナで直接デジタル信号をチップ間に伝送できることを明らかにした。

今後は、UWB用集積化アンテナの最適設計を行い、反射損失の小さいアンテナを開発する。なお、これらの結果は2004年6月に開催されるIEEEアンテナ伝搬学会に発表する。

4. 参考文献

- [1] R. H. Dennard, F. H. Gaensslen, H-N. Yu, V. L. Rideout, E. Bassous and A. R. LeBlanc, IEEE J. Solid-State Circuits, SC-9, pp.256-268, 1974.
- [2] H. B. Bakoglu and J. D.Meindl, IEEE Trans. Electron Devices, vol. ED-32, pp.903-909. 1985.
- [3] A B M H Rashid, S Watanabe and T. Kikkawa, IEEE Electron device letter, Vol.23, No.12, Dec 2002, pp. 731-733.
- [4] A B M H Rashid, S Watanabe and T. Kikkawa, Japanese Journal of Applied Physics (JJAP), vol. 42 (2003).
- [5] Brian A. Floyd, Chih-Ming Hung and Kenneth K.O. IEEE Journal of Solid State Circuits, vol 37, No. 5, May 2002, PP. 543-552.
- [6] Moe Z Win and Robert A. Scholtz, IEEE Transactions on communications, vol 48, No. 4, April 2000, pp. 679-691.

5. 研究業績

掲載論文

1. S. Watanabe, A.B.M.H. Rashid and T. Kikkawa, "Effect of High Resistivity Si substrate on Antenna Transmission Gain for On-Chip Wireless Interconnects, Japanese Journal of Applied Physics Vol. 43, No. 4B, 2004, pp.2297-2301.
2. A.B.M.H. Rashid, S. Watanabe and T. Kikkawa, "Characteristics of Si Integrated Antenna for Inter-Chip Wireless Interconnection," Japanese Journal of Applied Physics Vol. 43, No. 4B, 2004, pp.2283-2287.
3. A.B.M. H. Rashid, S. Watanabe and T. Kikkawa, "High Transmission Gain Integrated Antenna on Extremely High Resistivity Si for ULSI Wireless Interconnect", IEEE Electron Device Letters, Vol. 23, No.12, December 2002, pp.731-733.
4. A.B.M. H. Rashid, S. Watanabe and T. Kikkawa, "Characteristics of Integrated Antenna on Si for On-Chip Wireless Interconnect", Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 42, No. 4B, April 2003, pp. 2204-2209.

プロシーディング

5. T. Kikkawa, A.B.M. H. Rashid, and S.Watanabe, "Effect of silicon substrate on the transmission characteristics of integrated antenna," Proc. 2003 IEEE Topical Conference on Wireless Communication Technology, s09p06, Honolulu, Oct. 15-17, 2003.
6. A.B.M. H. Rashid, S. Watanabe and T. Kikkawa, "Crosstalk Isolation of Monopole Integrated Antenna on Si for ULSI Wireless Interconnect", Proceedings of IEEE International Interconnect Technology Conference, 2-4 June,(SanFrancisco, USA, 2003) pp.156-158.
7. A.B.M. H. Rashid, S.Watanabe and T. Kikkawa, "Inter-chip Wireless Interconnection using Si Integrated Antenna, " Ext. Abst. of Inter. Conf. on Solid State Devices and Materials, Tokyo, Sept. 16-18, 2003, pp. 394-395.
8. S. Watanabe, A.B.M. H. Rashid and T. Kikkawa, "Effect of

High Resistivity Si Substrate on Antenna Transmission Gain for On-Chip Wireless Interconnects," Ext. Abst. of Inter. Conf. on Solid State Devices and Materials, , Tokyo, Sept. 16-18, 2003, pp. 668-669.

9. S. Watanabe, A.B.M. H. Rashid and T. Kikkawa, "Influence of Si Substrate Ground on Antenna Transmission Gain for on-chip Wireless Interconnects," Abst. Advanced Metallization for ULSI Application, pp. 94-95, 2002, Conference Proceedings, pp.543-548.

10. A.B.M. H. Rashid, S.Watanabe and T. Kikkawa, "Wireless Interconnection on Si using Integrated Antenna", Extended Abstract of 2002 International Conference on Solid State Devices and Materials, (Nagoya, Japan, September, 2002), pp.648-649.

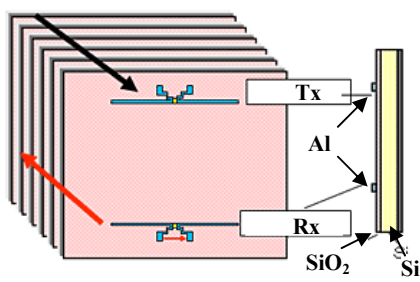


Fig. 1 The concept of inter-chip wireless signal transmission in stacked chip packaging.

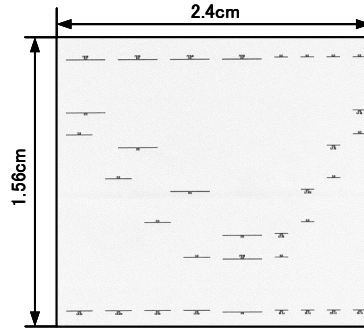


Fig. 2. Layout pattern of integrated antennas for intra-chip transmission on silicon.

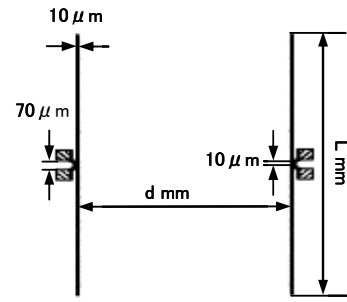


Fig. 3. A plan-view of transmitting and receiving antennas on a Si substrate.

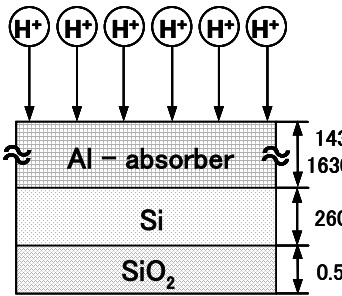


Fig. 4. Schematic diagram of proton implantation.

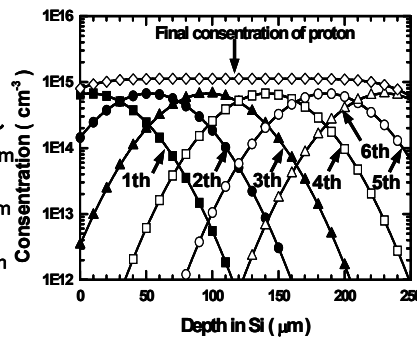


Fig. 5. Simulated concentration profile of proton in Si.

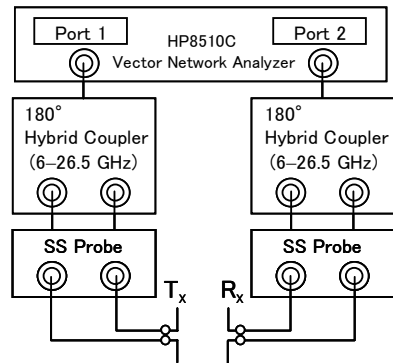


Fig. 6. Experimental set-up for inter/intra-chip antenna characterization.

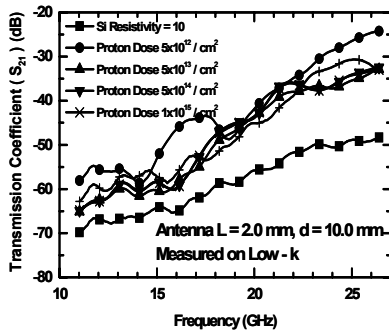


Fig. 7 Transmission coefficient (S_{21}) versus frequency. (Effect of proton dose) (Antenna $L=2.0$ mm, $d=10.0$ mm) Measured on Low- k

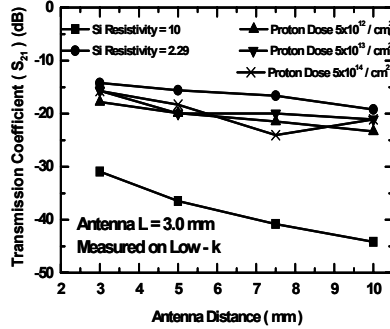


Fig. 8 Transmission coefficient versus Antenna Distance. (Effect of proton dose) (Antenna $L=3.0$ mm) Measured on Low- k

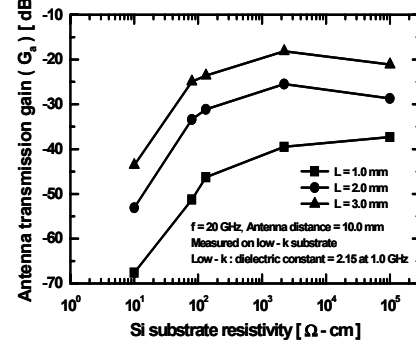


Fig. 9 Antenna transmission gain of dipole antenna versus Si substrate resistivity (ρ) with antenna length (L) as a parameter.

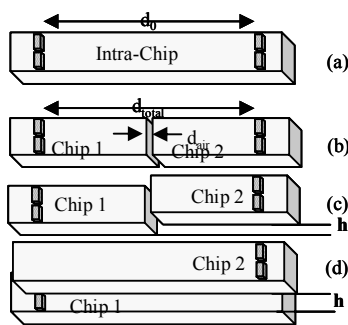


Fig. 10 Different configurations used for evaluation. (a) Intra-chip, (b) Inter-chip on the same plane ($h=0$), (c) Inter-chip with height between the chips $h=2.6$ mm, (d) Inter-chip overlapped with $h=2.6$ mm.

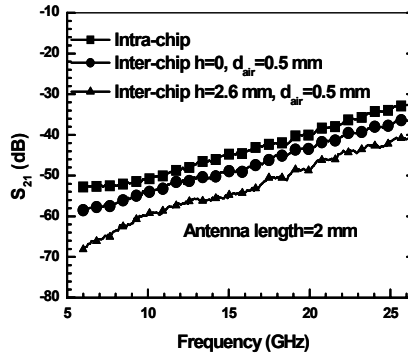


Fig. 11 Measured transmission coefficient of inter-chip wireless signal transmission in various configurations.

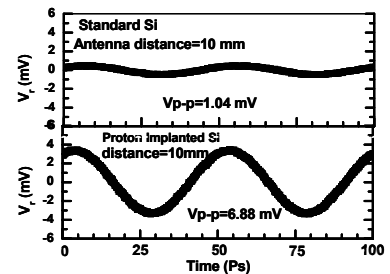


Fig. 12 Peak to peak amplitude of received signal increases from 1 mv to 6.9 mV by using proton implanted Si.