シリコンフォトリニクス現状と将来

木村 忠正

電気通信大学 電子工学科 (〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘1-5-1)

Preface to Special Issue on Frontiers of Silicon Photonics - Present Status and Future

Tadamasa KIMURA

Department of Electronic Engineering, University of Electro-Communications, 1-5-1 Chofugaoka, Chofu, Tokyo 182-8585

(Received April 3, 2007)

Key Words: LSI-scaling, Optical interconnection, Silicon photonics, CMOS compatible, Silicon optical devices

LSIの縮小化が1974年のMooreの法則の提唱以来、およそ一世代(3年)毎に $\times 0.7$ のスピードで進んできた。ITRS (International Technology Roadmap for Semiconductors) 2005¹⁾では、この縮小化の努力は今後もしばらく続き、高性能ロジックテクノロジーでは第1層のメタル配線のハーフピッチの値は2010年に45 nmを切ると予測している。しかし、スケールアップが技術的にもコスト的にもますます難しくなることは明らかである。デバイス性能面では、短チャネル効果、電流リーク、発熱、配線構造の複雑化、信号遅延などの課題がある。なかでも、配線の多層化、複雑化、および、配線幅の縮小と配線長の増大による信号遅延は解決すべき重要な問題である。IBMが1997年に導入したCu配線も、配線幅の縮小化で粒界散乱、界面散乱により抵抗率が増加し、32 nmノードではAl配線の抵抗率を超え、何らかの対策が求められている。クロックの高速化に伴う信号劣化や消費電力増大、電磁干渉などの問題も深刻化し、15~20 Gbps程度で頭打ちになると予測されるなど、その限界が見えつつある。

金属配線の限界解決のために期待されているのがチップ内光配線である。光による信号伝達は、高周波においても信号損失が少なく、クロストークもほとんど発生しないなど、広帯域の通信をサポートできるという利点がある。この光配線をシリコンチップ内に光導波路として関連するフォトニックデバイスとともに導入し、信号遅延、複雑多層配線の問題を解決する動きが始まっており、LSIの中に組み込み可能な種々のシリコン光デバイスや光回路に関する研究が報告されている。ただし、このような新しい光デバイスを既存の高度に成熟したシリコンLSIと共に集積化して使うためには、作製プロセスが材料も含めてシリコンCMOS プロセスに適合すること、サイズが十分に小さいこと、性能やコスト面で光デバイスを導入するメリットが大きいことが要求される。

シリコンフォトリニクスが現実のものとして注目されるようになった契機の一つに、シリコン光導波路の開発があげられる。LSIの微細化やMEMSの進歩に伴うナノメータ精度のシリコン微細加工技術の進歩により、光通信波長帯(1.3-1.6 μm)において1 dB/cm以下の低い伝送損失、マイクロメータオーダーの曲げ半径が可能なサブミクロン幅のシリコン光導波路が、フォトリニクス結晶やシリコン細線を用いて作製可能となった²⁾。基本的で重要な光導波路が可能になったのを受け、シリコンを用いた共振器、方向性結合器、分岐結合、合分波、AWG (Arrayed Waveguide Grating)、10 Gbpsを超える高速光変調や光スイッチなどが次々と発表された。シリコンの半導体的性質が利用でき、電氣的制御が可能であることも大きな特徴である。ここに、単なる光配線ではなく、LSIの電気信号処理と光信号処理を混載あるいは融合した技術としてのシリコンフォトリニクスの可能性が生じた。

遅いと思われたプラズマ分散効果(自由キャリアによる屈折率変化)による光変調、スイッチも、マイクロリング(ディスク)共振器あるいはMach-Zehnder共振器と逆バイアス pin 構造とを組み合わせることで高速化が可能であることが示され、現時点で20 GHz、30 Gbpsという値が報告されている³⁾。また、単結晶シリコンには無い大きな非線形光学係数($\chi^{(2)} \sim 15 \text{ pm/V}$)をひずみシリコンが示すことが報告され⁴⁾、さらなる高速変調、スイッチが期待される。微細化した光導波路の大きな群屈折率の発見は、光デバイスの課題であった光メモリー機能実現の可能性を示す⁵⁾。光ファイバとシリコン細線などの光導波路との結合技術、アセンブリー技術などの周辺技術の開発も急速に進んでいる。

このように、シリコンフォトリニクスへの期待は大きい。LSIの立場からはフォトリニクスデバイスの個々のサイズがまだまだ大きい点、個々の光デバイスの機能により構

造やプロセスが様々である点が課題である。そのような理由から、まずは、高速、大容量、配線の簡易化、低コスト化が見込まれるボード間、チップ間に光インターコネクションと関連デバイスが導入されるであろう。実際、CMOSフォトリソ技術で作製した10 Gbpsを超えるXFP型(10 Gigabit small Form-factor Pluggable)光トランシーバがLuxteraから発表されている[†]。東大の和田一実教授の提唱している、単一構造光デバイスの回路構成で種々の光機能を実現するという方向は、LSIにおけるCMOSFETの回路構成の工夫で種々の機能を実現するという考え方を取り入れたもので、シリコンフォトリソが実際にLSIに組み込まれるために考慮すべき重要な点である。最終的に残された課題は、シリコンフォトリソ用の光源、光増幅器である。当面は、III-V化合物半導体LDを外部からあるいはSiチップ上に組み込むことで進むと思われるが、Erを含むシリコン系材料、シリコンナノクリ

スタル、局所ひずみ導入シリコンにおける直接遷移の可能性などの研究が進んでおり、高効率Si-LEDはもとより、電気励起光増幅器、LDの実現も夢ではない。

参考文献

- 1) ITRS INTERNATIONAL TECHNOLOGY ROADMAP FOR SEMICONDUCTORS 2005 EDITION.
- 2) K. K. Lee, D. R. Lim, L. C. Kimerling, J. Shin, and F. Cerrina: Opt. Lett. **26** (2001) 1888.
- 3) A. Liu, R. Jones, L. Liao, D. Samara-Rubio, D. Rubin, O. Cohen, R. Nicolaescu, and M. Paniccia: Nature **427** (2004) 615.
- 4) R. S. Jacobsen, K. N. Andersen, P. I. Borel, J. Fage-Pedersen, L. H. Frandsen, O. Hansen, M. Kristensen, A. V. Lavrinenko, G. Moulin, H. Ou, C. Peucheret, B. Zsigri, and A. Bjarklev: Nature **441** (2006) 199.
- 5) M. Notomi, K. Yamada, A. Shinya, J. Takahashi, C. Takahashi, and I. Yokohama: Phys. Rev. Lett. **87** (2001) 253902.

[†] URL: http://www.luxtera.com/news_press_2006_0822.htm