

光の時代を迎えたシリコン

Graham T. Reed

シリコンチップはエレクトロニクス産業の大黒柱だが、フォトリソの分野でも優位を占めるようになるかもしれない。インテル社の研究者らが本誌に発表した論文によれば、シリコンを使って重要な構成要素である高周波光変調器を作ることができた。

原文：The optical age of silicon

Nature Vol.427(595-596)/12 February 2004; www.naturejpn.com/digest

光回路を通信に用いようとする研究は1970年代に始まった。光回路の初期の未来像は例えば「光スーパーチップ」だった。これは光エミッター、変調器、増幅器、光アイソレータ、検波器からなり、後には電子情報が加わった¹。しかしながら、このような構成要素に用いる最適な材料についてはまだ異なる見解がある。こうした状況は「光回路は光回路にとってのシリコンをまだ見つけていない」と表現されることがある。マイクロエレクトロニクス産業におけるシリコンの優越性を考慮してのことだ。シリコンは電子材料としては成功したが、光材料としてはあまり注目されていない。

だが、そうした状況は変化しつつあるかもしれない。インテル社のLiuらはシリコンの光材料としての将来により兆しとなる重要な段階に達したと、本誌2月12日号の615ページで報告している。彼らはバンド幅が1ギガヘルツ(GHz)を超えるシリコンベースの光変調器を初めて製作した。

技術的には、光材料としてのシリコンについての研究は長期的に1980年代半ばから行われている。しかしながら、Ⅲ-V族化合物(インジウム燐、ガリウムヒ素、および同族化合物)、絶縁体のニオブ酸リチウム、さらにはシリカ(一般的には基板材料としてシリコンが使われる)のようなより新しい材料と比べて、あまり進展していなかった。シリコン研究にほとんど成果がないとはいえないが、世界全体の技術的な努力はシリコン以外の材料に注がれている。

これには主に2つの理由がある。第一に、シリコンには光を放出する機構が本来的に備わっていない。シリコンは間接バンドギャップ材料であり、通常の方法ではレーザーのような効率的な発光素子を作れない結晶構造をもっている。これとは対照的に、Ⅲ-V族化合

物は直接バンドギャップ材料であり、したがって半導体レーザーの材料としてよく使われる。

第二に、シリコンはPockels効果として知られる電気光学効果を示さない。Pockels効果は光の高速変調(つまり、光の強さを選択的に変化させることによって光にデータをエンコードすること)を可能にする、従来から知られた特性である。ニオブ酸リチウムのような他の材料では、一般的にPockels効果によって変調が行われ、加えられた電場によって材料の屈折率が線形に変化する。

そのほかの光変調器では電界吸収や電界屈折として知られる電界効果が用いられるが、これらの効果はシリコンでは弱い。その代わりとして、シリコンでの変調は比較的遅い(だいたいキロヘルツ)熱的な機構によって行われるか、自由キャリア(電子や正電荷をもつ電子の片割れ、つまりホール)を導入し吸収と屈折率の変化を生じさせて行われる。後者の機構は自由キャリア分散効果として知られ、デバイス中の電荷の物理的な動きに結びついているため、これもまた比較的遅い。それにもかかわらず、この効果を用いたシリコンベースの変調器は、現実には実用的なデバイス^{4,5}は約20MHzが上限であるとはいえ、1GHzを超えるバンド幅を達成できると予測されている(例えば参考文献3)。

しかしながら、最近になってシリコンベースのオプトエレクトロニクスの運命に劇的な変化が訪れている。例えば次のようなシリコンによる光源の実現に向かったの進歩がある。エルビウムドーピングによってシリコンにおける間接バンドギャップの問題を克服し⁶、微小構造を作って有効な量子的効果を増強し^{7,8}、ディスクレーション工学やRaman効果を用いた光増幅を行う¹⁰といった今までにない方法である。Raman効果は光増幅だけでなく、ゆくゆくは光励起光源をもたらすと思

われる。最近、ST Microelectronics社はシリコン発光素子をベースとした実用的なデバイスがまもなく生まれると発表した。

これにLiuらによる有力なシリコン変調器の発表を加えれば、シリコンの光学性能をとりまく障害は次々と克服されているように思える。Liuらのデバイスは自由キャリア分散効果をベースとしており、CMOSトランジスタと多くの類似点をもつ。これは、「n型」結晶シリコン(n型とは負の電荷キャリアつまり電子が過剰になるようにドーピングされていること)のスラブとその上にのったp型多結晶シリコン(正の電荷キャリアつまりホールが過剰な結晶化した非晶質シリコン)のリブで構成されている。そして、薄い酸化物層がp型の領域とn型の領域を仕切っている(本誌2月12日号616ページ図1)。多結晶シリコンに正の電圧がかかると、電荷キャリアは酸化物の界面に集まり、素子の屈折率分布を変える。その結果、素子中を伝搬する光波に位相シフトが生じる。この位相シフトを使って光変調器を実現できる。その上、応答速度が速い。Liuらはこのデバイスを使って1GHzを超える変調周波数を実証した。

言うまでもなく、光学系の設計者はすでに1GHzをはるかに超えるバンド幅を持つデバイスを必要としているが、1GHzの壁がLiuらによって破られたことは意義深い。技術的な課題はまだ多いが、もっと近い将来にシリコンベースの変調器が製造されることになるだろう。シリコンが学術研究の主たる対象から卒業して、商用アプリケーションのための光学材料としてやっていけるという明るい兆しかもしれない。

Liuらが技術系の最大手企業であるインテル社に所属していることは注目に値する。インテル社や他の半導体技術系企業がエレクトロニクスで成功したように、フォトリソで

もシリコンの開発に成功すれば、間違いなくシリコンは光学材料として成長することになる。そのうえ、世界中に存在するシリコンを加工処理する製造基盤を考えてみよう。マイクロエレクトロニクス産業の遺産は莫大である。現在、マイクロエレクトロニクスデバイスを取り扱っている企業は、最先端技術における限界寸法である90nmを超えようと模索している。しかし、シリコンで作られるほとんどの光学デバイスは、予見できる未来には限界寸法が数百ナノメートルになる可能性が高い。光学デバイスがシリコンから製造されるならば、今後数世代にわたる光回路の製造基盤がすでに存在するということだ。

これはエレクトロニクス産業で見てきたスケールの経済が、いつの日かフォトニクス産業にも当てはまるかもしれないということだ。1GHzの壁が取り除かれたこととシリコンの発光素子が間もなく生まれることだけが、シリコンフォトニクスの未来が変化している理由ではない。ここ数年間、シリコンは光回路の基板材料として理想的だとみなされてきた。シリコンの特性はよく研究されていて、「シリコンベンチ」つまりその上に部品をのせ、位置を調整し、外界と接続する精密に加工されたシリコンの層にとって非常に優れている。さらに、未来のネットワークのために、電子情報をシリコン光デバイスに加えることは比較的単純な仕事である。他のフォトニクスプラットフォームではこうは言えない。

目下のところ、情報産業は極めて厳しい不況を経験している。そのため、費用効率の高い技術的解決策の必要性がこれまでに強く強調されている。Liuらの高速シリコン光変調器のような画期的な成果によって、低価格のシリコン光スーパーチップが間もなく現実のものとなるかもしれない。

そこでもう一度「光回路は光回路にとってのシリコンをすでに見つけた」のか否かについて考えてみよう。シリコンはすでに世界中が使い慣れた電子材料であり、フォトニクス産業においても優位を占めることになる日が、いつか来るかもしれないのである。 ■

筆者の **Graham T. Reed** はサリー大学先端技術研究所 (the Advanced Technology Institute, University of Surrey, Guildford, Surrey GU2 7XH, UK) に所属している

e-mail: g.reed@surrey.ac.uk

1. Soref, R. A. *Proc. IEEE* **81**, 1687-1706 (1993).
2. Liu, A. *et al. Nature* **427**, 615-618 (2004).
3. Png, C. E., Reed, G. T., Atta, R. M. H., Ensell, G. J. & Evans, A. G. R. *Proc. SPIE* **4997**, 190-197 (2003).
4. Tang, C. K. & Reed, G. T. *Electron. Lett.* **31**, 451-452 (1995).
5. Dainesi, P. *et al. IEEE Photon. Technol. Lett.* **12**, 660-662 (2000).
6. Franzò, G., Coffa, S., Priolo, F. & Spinella, C. *J. Appl. Phys.* **81**, 2784-2793 (1997).
7. Canham, L. T. *Appl. Phys. Lett.* **57**, 1046-1048 (1990).
8. Pavesi, L., Dal Negro, L., Mazzoleni, G., Franzò, G. & Priolo, F. *Nature* **408**, 440-444 (2000).
9. Ng, W. L. *et al. Nature* **410**, 192-194 (2001).
10. Claps, R., Dimitropoulos, D., Raghunathan, V., Han, Y. & Jalali, B. *Optics Express* **11**, 1731-1739 (2003).

研究から得られた教訓は、現代の微生物学にあっても未だに生かされている。例えば、この10年で各種の分子的手法が開発されて、固有の生息域で自然に生育した微生物種を直接、研究調査できるようになった¹。

今回Tysonたち²は、生産スケールでのゲノム配列決定法や生物情報科学解析の手法を使い、固有生息域にいる微生物の群がりやを、これまでより一歩進んだ形で直接的に観察した。彼らは本誌3月4日号37ページで、自然群集から直接回収した大量の微生物ゲノム配列を整理・編集し、その成果を報告している。

彼らのとった方法は、全ゲノムショットガン方式というDNA配列決定法である。この方法で、多種類の微生物が混合した群集からDNAを一括採取して、これを短い断片に破碎し、次にこれらをコンピューターの助けを借りてつなぎ合わせ、本来のゲノムの塩基配列を復元する。この研究成果からは、多種類の混合した微生物群集を研究するうえで、ゲノム科学を利用した戦略が有用なことが明らかになるだけでなく、この種の戦略が本来的にもつ限界の一端も浮かび上がってくる。

今回の研究成果の真価を理解するには、舞台となる環境や役者となる微生物について少しばかりの基礎知識があれば役に立つ。Tysonたちが調べた微生物群集は比較的単純なもので、人間の手で作られた希少な生息環境で暮らしている。そのすみかとは、カリフォルニア州北部のシエラネバダ山脈にある廃鉱の排水溝である。この環境は、危険物質責任対処基金(スーパーファンド)による浄化対象箇所に分類される。というのも、ここに生息する微生物が黄鉄鉱(FeS_2)の廃石と相互作用して、大量の硫酸を生成しているからである³。

ここに繁茂している微生物の集合体は、自分たちが作り出した低pH(約0.5)で中温(40°C)、豊富な地球化学エネルギー源(FeS_2)という環境に適応している。この極端に酸性度の高い条件にエネルギー資源の相当な制限が加わって、選択により比較的単純な構成の群集ができた。Tysonたちはこれを、環境に対して新しいゲノム科学的手法を試すには理想的だと考えたわけである。この排水溝で主役級の微生物は、どうやら鉄や硫化物を酸化して暮らしているらしく、生物界の三大分類群⁴の2つ、つまり真正細菌と古細菌である。

Tysonたちが今回使ったゲノム科学的手法 ▶▶

野生種のゲノムを再構築

Edward F. DeLong

世界全体の自然界に存在する微生物の性質を解明するための興味深い方法の一つが、複雑な菌叢から全ゲノムを再構築するというやり方である。極めて酸性度の高い微生物生育環境は、そういう目的を達成できるような条件を備えているといえる。

原文: *Microbiology: Reconstructing the wild types*

Nature Vol.428(25-26)/4 March 2004; www.naturejpn.com/digest

ルーウェンフック(Antonie van Leeuwenhoek)は単式顕微鏡で観察して、微生物の世界について実に多くのことを発見した。その後ヴィノグラドスキー(Sergei

Winogradsky)は、自然界における硫黄循環に微生物が果たす役割を解き明かす一方で、自然状態の生息域で微生物を直接観察することの重要性を改めて示した。こうした初期の