

論文の内容の要旨

論文題目 Study on Si hybrid MOS optical modulators by using wafer bonding
(基板貼り合わせを用いたSiハイブリッドMOS型光変調器に関する研究)

氏 名 韓 在 勲

これまでの半導体技術の進歩を担保してきたムーアの法則が終焉を迎えている中、それに代わる新しい技術が数多く研究されている。その中でも、Si photonicsを中心とした光通信の技術をSi CMOSプラットフォームに導入し、配線遅延や廃熱によるエネルギーの消費を抑えようとする技術が特に注目を集めている。この技術は、Si on insulator (SOI, 酸化膜上に形成した結晶シリコン) 上に光デバイスと電子デバイスを同時に集積する技術で、Si CMOSの技術を用いて光電子融合回路を大量かつ安価で生産できる技術として広く研究されている。Si photonicsは、Siと酸化膜の間の大きな屈折率差を利用することで、光導波路やarrayed waveguide grating (AWG, アレイ導波路格子) などの受動素子の微細加工ができるという利点を持つが、間接型半導体であるSiの限界があるため、一般的に能動素子の性能が劣る問題がある。

このような問題点を克服するため、新材料の導入が検討されている。既に、Si CMOSでは、GeやIII-V族半導体のような高移動度材料を用いて、Siの限界を打ち破ろうとする試みがなされている。Si photonicsでも、通信で一般的に使われる近赤外の波長帯 ($1.55 \mu\text{m}$ や $1.3 \mu\text{m}$ 付近) ではSiによって実現できない能動素子であるフォトダイオード、レーザを実現するため、GeやIII-V族半導体を用いた素子の研究がなされ、実用化も進んできている。しかし、もう一つの重要な能動素子である光変調器への新材料の導入は他の能動素子ほど進んではなく、いまだにSiを使ったデバイスがよく使われている。しかし、Siと光の弱い相互作用が原因による小さい変調効率が原因となり、Si光変調器の動作電圧とデバイスの大きさを小さくすることには限界がある。既存の報告の中で一番よい変調効率が報告されているSi MOS (metal-oxide-semiconductor) 型光変調器の場合でも、 π シフトを得るために1 mm以上のデバイスが必要となることが一般的なので、更なる微細化・集積化のためには、変調効率を上げることが重要となる。また、変調効

率の高いデバイスの実現することで、変調に必要なエネルギーも小さくすることが出来るので、消費電力などの面でも、変調効率を上げるということは重要であり、関連技術の開発が急務とされている。

Si MOS型光変調器は、poly-Si/SiO₂/SiのMOS構造が一般的に使われている。このMOS酸化膜の膜厚をスケールリングすることで、MOS型光変調器の変調効率を上げることが可能である。なぜなら、酸化膜の厚さをスケールリングすることは、並行平板コンデンサーの電極間の距離が小さくなることに相当するので、MOS構造に蓄積される電荷が増えることになる。この増えた電荷と光の相互作用により、変調効率は大きくなる。しかし、この方法では、MOS構造の静電容量も上がることになり、光変調器の帯域幅が劣化することになる。つまり、速く動作しなくなってしまう。このようなトレードオフ関係は、Siの物性で決まるので、Siを使う限りは克服することが出来ない。そこで、我々はSiに替わる新しい材料を導入することを提案する。光と半導体中の相互作用を考える際、光に対する自由キャリアの効果を考える必要がある。この効果は、一般的にキャリアの有効質量が小さいほど大きい効果を持つことが知られている。よって、Siより有効質量の軽い物質を導入することで、光とキャリアの相互作用を増大することが出来、変調効率を大きくすることが期待できる。そこで、我々はこの論文の中で、Siより正孔の有効質量の小さいSiGeと、電子より有効質量の小さいIII-V族半導体を導入することを提案する。このような、新材料を導入することによって、半導体中のキャリアと光の相互作用が強くなり、Siによる変調効率と変調帯域幅のトレードオフ関係を克服することが出来ると期待できる。

このような新材料をSi photonicsに導入するため、我々は酸化膜を用いた基板貼り合わせ法を使うことを提案する。基板貼り合わせ法は、貼り合わせる2つの基板の表面に酸化膜を堆積した後、その面同士で貼り合わせることで異なる基板を接合する技術をいう。この方法を使うことで、SiGeとIII-V族半導体といった新しい材料を、材料の格子整合や成長条件などを考量することなく、Si photonicsに容易に取り入れることが出来る。また、酸化膜を挟んだ二つの半導体の構造は、MOS構造そのものになっているので、この異種材料を貼り合わせたMOS構造を用いて、直にMOS型光変調器を実現することが出来る。我々は、この論文で、そのような新材料とSiを貼り合わせたMOS型光変調器の実証を目指した。

この論文では、まず、SiGeとIII-V族半導体、中でも、InGaAsPを用いた場合、どれくらいの変調効率を得られるかを理論的に予測した上で、実際新材料を導入する際に必要な、様々な要素技術を確認し、実際のデバイスを作って評価するところまで目指した。特に、InGaAsPを用いた、InGaAsP/Si hybrid MOS型光変調器に関しては、半導体デバイスの中では最高の性能が得られることが分かり、実証することまで成功した。このような技術を用いることで、世界最高の変調効率を持つデバイスを制作し、今後のSi photonicsやSi CMOS技術に貢献できると思う。