

進化を支える光

電気電子工学専攻 荒井・西山研究室



荒井 滋久 教授 1953年神奈川県生まれ。東京工業大学大学院理工学研究科電気工学専攻博士課程修了。1994年より、量子効果エレクトロニクス研究センター（2004年より量子ナノエレクトロニクス研究センターに改称）教授。



西山 伸彦 准教授 1974年山口県生まれ。東京工業大学大学院総合理工学研究科物理情報システム創造専攻博士課程修了。2006年より、同理工学研究科電気電子工学専攻准教授。

TSUBAME にも使われている光通信技術はさらに進化を遂げて、集積回路上の電気信号をも光に換えようとしている。光配線を実現するためには、レーザーの消費電力を1000分の1にしなければならない。この課題をどう解決するのだろうか。超近距離光通信用半導体レーザー技術の最先端をのぞいてみよう。

集積回路の電気配線を光配線へ

みなさんは集積回路の処理速度が限界に近づいていることをご存じだろうか。集積回路の集積度は5年ごとに10倍になると1965年に予測された。この予測は現在も技術発展の目標となっており、2020年以降もこのペースは維持されるという見解もある。一般的に集積度が大きいほど処理速度は速くなる。しかし、集積度が向上しているにもかかわらず処理速度に限界が訪れようとしている。それはなぜだろうか。答えは電子の速度の制約と金属配線による抵抗が、物理的に集積回路の信号速度の向上に歯止めをかけているからである。

一般的にコンピュータの処理速度を上げるには2つの方法がある。1つは集積回路を組み込んだ

チップを複数用いて並列的に処理させる方法である。しかしこの方法ではチップ1つあたりの処理速度は変わっていない。たとえるならば、大量の計算問題を複数人で分担して解いているようなものである。1人あたりの速さは変わらなくても、人数が2倍になれば計算時間は半分になる。この考え方で処理速度を向上させたコンピュータの代表がTSUBAMEなどのスーパーコンピュータである。この方法に対し、もう1つの方法はチップそのものの処理速度を上げることである。しかし電気配線である以上、電子の速さより速く信号を交換することはできない。また、速くしすぎること高周波信号にのみ生じる金属抵抗が発生し、消費電力が大きくなりすぎてしまう。

このような背景の中で、2000年頃に集積回路の

電気配線を光配線に置き換え、チップ自体の処理速度を上げようという新しい動きがアメリカを中心に起こった。この目標を実現するための技術をシリコンフォトニクスという。当時、長距離通信用レーザーの研究を進めていた荒井先生は、自身の研究をシリコンフォトニクスに活かせるのではないかと考え、チップの処理速度向上に向けて東工大や他大学の研究者との連携研究をスタートした。2000年頃に始まったこのプロジェクトに先生方は2014年現在も携わっている。それでは、レーザーの性質を説明した上で荒井・西山研究室で行われている最先端の研究を紹介しよう。

レーザーの基本

レーザー（LASER）は誘導放出による光の増幅という意味の“Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation”の頭文字を取った略語である。本稿では、誘導放出で増幅された光をレーザー光と呼び、レーザー光を発振する機能をもったデバイスをレーザーと呼ぶこととする。誘導放出とは、高いエネルギーをもった電子が光によって刺激されると、その電子のもつエネルギーが新たに光として放出される物理現象である。このとき発生する光は刺激に用いられた光と同波長、同位相である。そのため光は打ち消し合うことなく強め合い続けることができる。つまり、弱い光でも発生させれば、その光で誘導放出を起こし、連鎖的に強くすることができる。この誘導放出を利用してレーザーは光を増幅している。

レーザーを光の増幅器として機能させるためには、デバイスにある工夫をしなくてはならない。それは、デバイスの発光させたい部分を反転分布状態にすることと光をフィードバックするシステムにすることである。反転分布状態とは高いエネルギーをもった電子が多く存在する不安定な状態のことである。誘導放出を起こすにはこの状態にすることが不可欠だ。また、フィードバックとは増幅器に通した光を全て取り出すのではなく、ある割合だけもう一度増幅器に通す操作のことである（図1）。一般には鏡面を増幅器の両端に設置することでフィードバックを繰り返している。つま

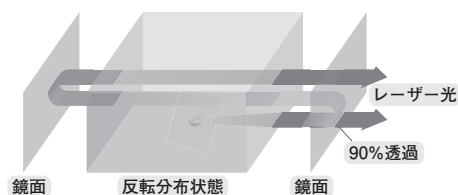


図1 フィードバック

光が連鎖的に増幅するシステムを、鏡面を用いて実現している。

りレーザーは反転分布状態の物質に弱い光を通し、誘導放出で増幅させ、さらにフィードバックで増幅を繰り返すことで強い光を発振している。

最もシンプルなレーザーは2種類の半導体を用いたサンドウィッチのような構造になっていて、その挟まれている層で光を発振するのだ。レーザーを増幅器として機能させるために、レーザーに電流を流すことで高いエネルギー状態の電子を増やし、反転分布状態にしている。また、材料となる半導体には特定方向に割れやすい結晶構造をもった半導体を用いている。この半導体は、割った面が平坦できれいな面になるため、光を反射させることができる。これにより発振器となる半導体が両端の反射鏡を兼ねているため、新しく鏡を設置することなく光をフィードバックするシステムとなっているのだ。

この標準的な半導体レーザーは1970年頃に直流での動作に成功し、常温で安定して動作させる研究や任意の波長で発光させる研究などがなされた。しかし1990年頃までの研究テーマの根底には、レーザーは長距離通信用レーザーの研究は進んでいなかったため、実用化には課題がある。その課題とはなんだろうか。また、その解決のために荒井・西山研究室ではどのようなアプローチを取っているのだろうか。

光閉じ込めと小型化

一般的な半導体レーザーは長距離通信のために開発されているが、その技術の大部分は超近距離の光通信に応用することが可能だ。しかし、従来の電気配線に比べて消費電力が100～1000倍と非常に大きいことが問題であった。よって、光配線

の実用化を考えると、集積回路に載せるレーザーは従来の1000分の1程度の消費電力で動作させる必要がある。では、この課題を解決するための荒井・西山研究室の2つのアプローチを紹介しよう。

1つ目は半導体薄膜 (membrane semiconductor) を用いた光閉じ込めである (図2)。光閉じ込めの基本となる考え方は光ファイバーと同様で、光を閉じ込めたいコア層の周りをそれより屈折率の低いクラッド層で囲み、全反射を繰り返させることで光をコア層に閉じ込めるのである。従来型の半導体レーザーのクラッド層とコア層の屈折率差は5~10%であるのに対し、先生の半導体薄膜で用いられているクラッド層とコア層の屈折率差は30~50%である。これにより全反射を起こす角度の幅が広くなり、コア層から光が漏れにくくなった。結果として、荒井・西山研究室のレーザーは増幅率を今までの3倍に高めることができ、従来のレーザーに比べて3分の1程度の電流で必要な出力が得られた。

荒井・西山研究室では、この大きな屈折率差を実現するために、クラッド層に使われていた半導体を非常に屈折率の低いガラスやポリマーなどの絶縁体に置き換えた。このアイデアは電流注入で動作するデバイスに絶縁体を用いるという点で非常に斬新であった。しかし電流注入によって動作するデバイスに絶縁体を用いると、電気が流れないなど種々の問題が発生する。この問題に対し、荒井・西山研究室は光増幅機能をもつコア層をわずか150~200 nmという薄膜にし、さらにその層に周期構造を組み込むことで非常に狭い空間をもつ構造にした。この微視的な空間では、目で見える巨視的な空間では起こらない物理現象が起こる。この現象を利用することで、電流注入によりデバイスを室温で動作させ、しかも従来の半導体レーザーより一桁小さい電流でレーザー光を発振させることに成功したのだ。

2つ目のアプローチは小型化である。電流を流す領域が小さくなれば、そこで消費される電力も小さくて済む。小型化にもさまざまな技術が用いられているが、最終的な調節では顕微鏡を見ながらデバイスに医療用のメスで傷を入れて折るため、手先の器用さが要求される。先生はこの工程

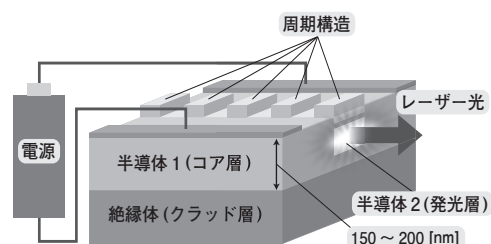


図2 半導体薄膜レーザー

屈折率の低い絶縁体をクラッド層に用いることで、増幅率を3倍にすることに成功した。

の精度次第で動作電流をあと一桁下げることができると考えている。現在、荒井・西山研究室では幅360 μm の半導体レーザーの作製に成功している。日本人の髪の毛の断面の直径は80 μm 程度であるから、このレーザーがいかにか小さいか想像できるだろう。荒井・西山研究室では集積回路技術を用いてデバイスを30 μm 以下の幅に小型化することを目標としている。

荒井・西山研究室はこれら2つのアプローチによって、かつての長距離用レーザーの100分の1の消費電力で動作させることに成功している。さらに、30 μm 以下の幅が実現できれば、1000分の1の消費電力での動作が可能になるところまで研究は進んでいる。先生が開発したレーザーの載った半導体素子が、私たちの使うコンピュータに導入される日もそう遠くないのかもしれない。

執筆者より

「誰も考えないような、一見、非常識に見える課題を設定して、それを証明するというようなことは、大学に身を置く者の特権のようなものです。」先生の研究の醍醐味はこの一言に集約されているかもしれません。

およそ50年前に初めて半導体レーザーが発光して以来、レーザーはさまざまな産業で応用されてきました。この度の取材を通して、代々受け継がれてきた技術と研究に対する情熱、日本の半導体技術を支え続けていく力強さが感じられました。

お忙しい中、快く取材に協力くださった荒井・西山研究室のみなさまにこの場を借りてお礼申し上げます。
(漆館 巧)