

海外法人便り

イムラアメリカの最近の研究

Current Research Activities at IMRA AMERICA

大竹 秀幸
Hideyuki Ohtake

概要

イムラアメリカは1990年に設立以来、主にフェムト秒ファイバレーザの先端研究に注力してきた。ここから様々なテーマが派生し、研究の幅が広がりつつある。今回は通信にも応用可能な光集積化技術であるマイクロ光コムの紹介を行う。

1. はじめに

イムラの名前はフランス語のInstitute Minoru de Recherche Avancée がその由来となっており、1986年にフランスで設立されたイムラヨーロッパが最初のイムラを名乗る研究所であった。イムラアメリカは、イムラヨーロッパに遅れること4年、1990年5月にミシガン州アナーバー市というミシガン大学の大学街に設立された^{1,2)}(図1) 設立に際してはアイシントップの以下の3つの思想が取り入れられ、現在でもよりどころとなっている。

- ①海外の優秀な人材を活用した研究推進、
- ②科学・技術の調和的発展、
- ③開発を通して世界の信頼を得る

設立当時、4つの研究テーマが多国籍チームでスタートし、その後チーム間の競争により、「フェムト秒ファイバレーザ」に淘汰・集約されていった。競争に勝ち残ったチームは情熱を持って先端研究発表を行い、レーザに関連する国際学会ではイムラの名を知らない者は“もぐり”といわれるまでになった。知財権確保に注力し、言葉の壁や弁理士が先端技術を理解してくれないという課題を抱えながらも徐々に克服し、現在では創立以来累計400件を超える成立特許を持つまでになった。

2000年代後半に遭遇した課題はフェムト秒レーザをどのような用途に使用するのか、ということであった。既に一部の読者には周知かもしれないが、フェムト秒(femto second, fs)とは 10^{-15} 秒を意味するSI接頭語fで、100fsのフェムト秒レーザと呼ばれるものは 10^{-13} 秒だけONになり、そこから数十ns～数十 μ sのOFF時間の後に、再度 10^{-13} 秒だけONになる、ということを繰り返す

すレーザである。 10^{-13} 秒、つまり10兆分の1秒の時間に光子を閉じ込めることができるため、高精度な計測や精密な加工が可能となることが大きな特長であった。さらにすべての光路をファイバで構成することができるファイバレーザの強みを活かし、外乱に強く、かつコンパクトに構成できるフェムト秒ファイバレーザが開発された。この特長により、超高速計測機器である光サンプリングオシロスコープ、白色LED生産用のレーザ、近視矯正治療機向けレーザ応用などへ展開されているが、この内容は11年前の創立20年時に吉田睦氏が詳しく寄稿されているので、割愛する¹⁾。その後、2013年から2016年にかけて高出力レーザの開発が行われ、同時にユニット生技部、機関技術部(いずれも当時)と連携したピストンの摺動抵抗低減を目指したクロスハッチ加工技術の開発も実施され、結果として30ワット級の高出力フェムト秒ファイバレーザが号口生産に利用されるようになったが、詳細は堀田芳敬氏の寄稿を参照されたい³⁾。



図1 イムラアメリカの全景

2. 現在の研究テーマ概要

現在の研究テーマは、いずれも前出のフェムト秒ファイバレーザから派生した技術を基にしたものであり、以下に述べる4つの研究テーマを進めている。

・ファイバ光コム

フェムト秒レーザのパルスを高精度制御する位相制御技術から発展した技術で、高精度計測応用などに利用される。東京大学の香取先生が東京スカイツリーで行ったアインシュタインの相対性理論の実証実験にも利用され、「地上450mにある展望台の時間は地上よりも1日に4ナノ秒(nano second, ns: 10^{-9} 秒)だけ早く進む」という実証にも貢献している。^{4,5)} 相対性理論の実証実験に用いられた「光格子時計」は香取先生が発明された超精密時計であり、時間の標準ともなり得るため、香取先生はノーベル賞候補にも挙げられている。光格子時計は小型化も進められ、先進開発部と東京大学、理化学研究所の協業で車両搭載型の光格子時計が開発されるなど、高速、低遅延を目指す次世代通信の基幹クロックとしても期待されている。⁶⁾

・マイクロ光コム

ファイバ光コムを半導体基板上にチップ化する光集積化を目指して研究を開始。ミリ波帯域と呼ばれる300GHzで発振可能であるため、超高速無線通信の光源としても応用できる。⁷⁾ 現在、国プロ(総務省Beyond 5Gプロジェクト)を獲得しており、1秒間・1チャンネル当たり100ギガビットを超える無線通信に成功している。現在の5Gの平均下り速度は毎秒300メガビット程度なので⁸⁾、イムラアメリカのミリ波無線通信は5Gの300倍以上の通信速度を実現している。

・グリーンレーザ

レーザ発振媒質には通常、結晶が使われるが、セラミックは大量生産が可能で低コスト、さらに材料組成の自由度も高いためレーザ媒質として期待されている。他方でセラミックは内部に生成される気孔による散乱が多く不透明となるため、特に波長の短いグリーンやオレンジの可視光領域でレーザ発振は困難とされていた。イムラアメリカでは材料と製造技術の改良によるセラミック透過率の向上を進め、透明度の高い試料が作製できるようになってきた。さらに、この内製のセラミックに対してパルス光励起実験を行ったところ、可視光(オレンジ色)での

発振に世界で初めて成功した。

・マルチガスセンサ

フェムト秒レーザを水中で金属に照射するとナノコロイドと呼ばれるナノ粒子を生成することができる。このレーザナノ化技術は様々な種類の材料に適用できるため、材料選択自由度が高く、一般的にはナノ化が難しい酸化物半導体をナノ化することも可能となる。イムラアメリカでは様々な酸化物材料の評価を進めており、これらの酸化物半導体はそれぞれ固有のガス感度や応答時間を有しているため、複数の材料を用いてマルチセンサを構成すれば、ヒトの嗅覚細胞を模倣するようにガス選択性を実現することが可能となる。また、水素計測では濃度0.1ppmが計測可能なレベルまで達している。

今回は研究トピックとしてマイクロ光コムを紹介し、その特性と応用に関して解説する。イメージをつかんでいただくために、現象的な説明を行っているので、厳密性においては十分でないことを予め宣言しておく。

3. マイクロ光コム

3.1 マイクロ光コムの動作原理

マイクロ光コムは図2(a)に示すように半導体基板上に作られた共振器で、円状導波路と線状導波路で構成される。動作原理は以下の通りである。

線状導波路(i)側から励起光が伝搬し、接合点(ii)で励起光の一部が円状導波路に入射する。円状導波路内に入った光は周上を回転するが、円状導波路内で光が定在波として存在しようとした場合、周長が波長の整数倍になる必要があるため、図2(b)の関係が必要となる。つまり、共振で許される周波数がとびとびの値となる。

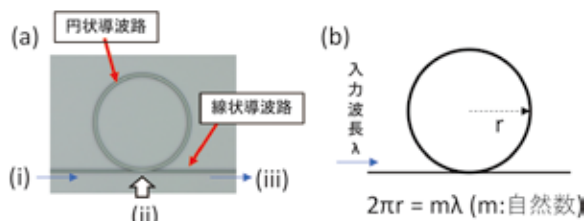


図2 マイクロ光コムの概略図

(a) 半導体基板上に作製されたマイクロ光コムの画像
(i) 励起光入射ポート、(ii)線状導波路と円状導波路の接点、
(iii) 出射ポート (b)円状導波路の寸法と共振周波数の関係
 r は半径、 λ は波長を示す。

簡単化のために図2(b)の共振条件で許された周波数を ω_0 と仮定する。(蛇足ではあるが、 $\omega_0 = c/2\pi\lambda$ 、 c : 光速、の関係である) ω_0 の光は接合点(ii)を通るたび、

一部が(iii)側へ出力される。さらに(i)側からの励起光強度を上げると、円状導波路の内部で非線形現象が発生する。この非線形現象は ω_0 とは異なる周波数の光を新たに創り出す「四光波混合」と呼ばれる現象で、同じ周波数の4つの光子が相互作用して、異なる周波数の光子を複数個創り出す現象である。簡単に述べると、元々 ω_0 であった光子2個が相互作用し $\omega_0 \pm \delta$ が生成され、次に $\omega_0 \pm \delta$ の光子が相互作用し、 $\omega_0 \pm 2\delta$ が生成される、という具合に異なる周波数が次々に発生していくことを意味している。⁹⁾ 重要な点は δ という周波数で離散的な値をもった周波数しか発生しないということである。 δ は円状導波路の長さで決まる周波数で、

$$\delta = c / (2 \pi r n), \quad n: \text{導波路の屈折率}$$

であり、 δ を300GHzにしたい場合はマイクロ光コムの直径を約10 μm にすればよい。こうして図3に示すような光コムの発生が可能になる。図3からわかるように、光コムのスペクトルはとびとびの値を取るため、櫛形状をしており、そのため英語の「櫛」という意味でComb(コム)と呼ばれている。

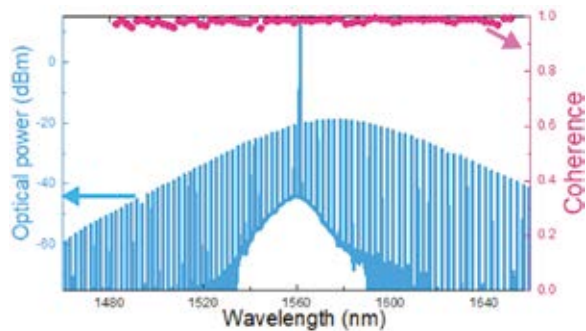


図3 光コムのスペクトル

光コムのスペクトルは離散的なピークをもつ。1560nm付近にある一番高いピークは励起光であり、このピークを中心に等間隔で光コムのピークが並んでいる。光コムの間隔は図2(b)の円形導波路の大きさに依存する。⁹⁾ 左の軸が出力、右の軸がコヒーレンスを示しており、位相が揃った光が出力されていることがわかる。

3.2 光の「集積回路」化

今までの光コムはファイバレーザで作製されており、図4左のような大きさであり、汎用性に欠けていた。しかし、マイクロ光コムは直径100ミクロンの導波路であり、しかも半導体基板上に作製できる。もし、この基板に光源であるレーザダイオードや変調器、光学素子を同一に搭載することができれば、光コムレーザがワンチップで構成されることになる(図4)。これは真空管で構成されていたコンピュータがICに集約された事実と同じことが光領域でおこる可能性を示唆している。そうなれば、ワンチップのフェムト秒レーザも夢ではなくなるのである。マイクロ光コムは光集積回路化へのきっかけとなるデバイスと認識している。

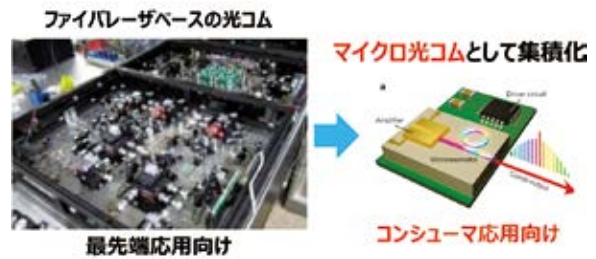


図4 光集積回路の概念

(左図)ファイバレーザで作製した光コム。定盤上に多くの光学部品が並んでいる。(右図)左図の光コムをマイクロ光コムを用いて集積化した概念図。すべての光学部品が基板上に作製され、導波路からは光コムの出力が得られる構造になっている。

3.3 ミリ波無線通信への応用

3.1で述べたように、マイクロ光コムは300GHz周辺のミリ波帯域で発振することが可能である。このスペクトルを図示すると、図5(a)のように波長1.5 μm 付近を中心に300GHzの間隔で周波数軸上に並んだ光が導波路の中を伝搬している状態、となっている。しかし、実際に無線通信を行う際にはすべての光コム信号を使う必要はなく、最低2本あれば通信が可能になる。そこで簡単化のため、この中から2本の成分だけを取り出し、図5(b)のような状態をつくることを考える。

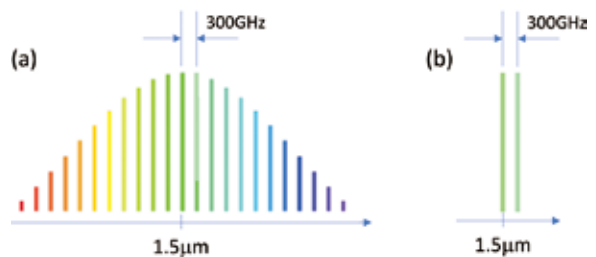


図5 マイクロ光コムで発生した光

(a)光コムの模式図。周波数軸上で300GHzの間隔で光コムが並んでいる。(b)2本の光コム成分を(a)から抜き出した状態の模式図。2本の光コムがあれば無線通信は可能になる。

この2本のコムを高速応答するフォトダイオードに入射させると、どうなるであろうか?(図6)結論から言うと、ミリ波が空中に放射される。フォトダイオードに入射する2本のコムは波長が1.5 μm 帯域で、周波数が300GHz離れた光である。このような光が入射すると「うなり」の現象が観測される。実際にフォトダイオードへ光が入射すると、伝導体へ励起される電子はうなりによる変調を受け、300GHzで高速に揺さぶられる。マックスウェル方程式によれば、電流の時間微分が電磁波の放射を発生させるのであるから、電子が300GHzで変調されれば、時間微分の項が発生し、結果としてフォトダイオードから300GHzの電磁波、つまりミリ波が放射される。これがミリ波の発生原理(送信過程)となる。¹⁰⁾

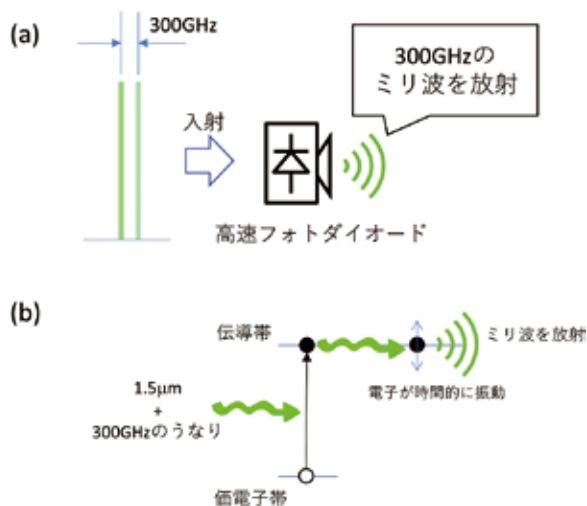


図6 ミリ波発生原理

(a)2本の光コムが高速フォトダイオードに入射すると、うなり成分である300GHzのミリ波が空中に放射される。このミリ波を用いて無線通信を行う。(b)ミリ波が発生する原理の模式図。300GHzで変調された光(1.5 μ m+300GHzのうなり)が価電子帯から伝導帯へ電子を励起し、その電子が300GHzで振動し、ミリ波を空間に放射する。

受信過程はこの逆過程となる。空間を伝搬してきたミリ波がアンテナを通じてフォトダイオードに照射され、内部の電子が300GHzの変調を受け、その信号は電気的な300GHzの信号に変換される。

この装置を実際の無線通信に利用する構成が図7である。通信形態はアナログ無線通信に似た形式で、セルフヘテロダインと呼ばれている。通常、変調と復調を同じ光源で行う構成をホモダインと呼ぶが、その場合、ミリ波を発生させた際に搬送波の片側にしかサイドバンドが存在しない。これを両方に存在させるには光源をオフセットさせる必要があり、そのような操作を行ったホモダインをセルフヘテロダインと呼んでいる。マイクロ光コムで生成された2本のコムは分波器で分岐され、上側が信号伝送、下側が復調に使用される。上側の信号は強度変調器(IM)に任意波形発生器からの信号を導入し、搬送波の両側にサイドバンドとして信号を乗せる。これを高速フォトダイオード(Uni-Traveling Carrier Photo Diode, UTC-PD)に入射し、ミリ波を発生させる。ミリ波はうなり成分であるので、300GHzの無線となり空間を伝搬していく。これを検出器であるミキサに導入する。他方で下側の復調用信号は到達距離調整を行う遅延を通過した後、同様に高速フォトダイオードに導入され、300GHzの電気信号を発生させる。¹⁰⁾

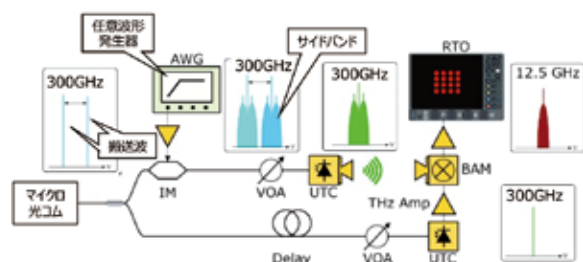


図7 無線通信機構の概要

IM:強度変調器,VOA:光学アッテネータ,BAM:バランスアンプミキサ,Delay:光学遅延回路,THz Amp:テラヘルツ領域の電気アンプ,UTC:単一走行キャリアフォトダイオード。

両者はミキサに導光されるが、ミキサは両者の差分をとる素子として機能する。つまり、上側信号から下側信号の差分を取ることで、搬送波成分である300GHzの成分が差し引かれ、先ほどIMで乗せたサイドバンドの成分だけ、つまり信号だけが低周波の電気信号として抽出される。実験ではこの低周波信号をオシロスコープなどで計測し、その信号品質をモニタし評価を行っている。

現在、図7に示した装置を用いた通信実験では1秒間、1チャンネル当たり100ギガビットを超える通信速度を実現しており、これらはマイクロ光コムを用いた世界記録となる通信速度に達している。今後は更なる高性能化を図り、2023年度末には1秒間、1チャンネル当たり200ギガビットを目指して研究を進めている。このような高速、高密度通信は通信の時間遅延(レイテンシ)が非常に小さくなるため、自動運転や隊列走行などのモビリティ応用だけでなく、車車間、車歩間、車路間の超多数同時接続を利用した新たなサービスの創出、少しの遅れが致命的となる遠隔手術などの医療応用など、様々な分野への応用が期待されている。このような期待はあるものの、ミリ波の物理的特性として遠くまでは飛ばないため、カバーできる領域が狭いというデメリットや、直進性が良いため電波のような回り込みができないなどのデメリットもある。上記のような特性をもった技術をどのようにに社会実装していくかということになると、様々な用途を俯瞰した開発が必要となるが、イムラアメリカ単体では実現が困難であるため、アイシンと一体となって用途開拓を進めている。また、通信で使われるデバイスは単体でもセンサとして機能するため、これらを応用する用途開拓も併せて行っている。

4. おわりに

現在までにお世話になっていた顧客、共同研究者、アイシン関連部署の方々、トップを含めた上司、イムラアメリカの研究者とその家族に深く感謝し、今後とも温かい目と叱咤激励をいただく事をお願いしたい。

参考文献

- 1) 吉田睦(アイシン技報):イムラアメリカ創立20周年を迎えて, pp.74-78(2011)
- 2) 戸嶋裕基(アイシン技報):イムラヨーロッパの近況, pp.53-55 (2020)
- 3) 堀田芳敬(アイシン技報):超短パルスレーザを用いたピストンスカート部の低フリクション化技術, pp.19-22(2019)
- 4) 大前宣昭, 久世直也, Martin E. Fermann, 香取秀俊(応用物理学会77回秋季学術講演会):光格子時計比較の安定度向上に向けた全偏波保持・単一ポートエルビウムファイバコムの開発および安定度評価, 15p-C32-12(2016)
- 5) Masao Takamoto, Ichiro Ushijima, Noriaki Ohmae, Toshihiro Yahagi, Kensuke Kokado, Hisaaki Shinkai and Hidetoshi Katori (Nature Photonics):Test of general relativity by a pair of transportable optical lattice clocks, Vol.14, pp.411-415(2020)
- 6) 牛島一朗 量子計測・センシング技術推進委員会若手インタビュー:https://qforum.org/topics/qms_young_interview02
- 7) Tomohiro Tetsumoto, Tadao Nagatsuma, Martin E. Fermann, Gabriele Navickaite, Michael Geiselmann and Antoine Rolland (Nature Photonics):Optically referenced 300 GHz millimetre-wave oscillator, Vol.15, pp.516-522 (2021)
- 8) 株式会社イード Automotive Media Response:<https://response.jp/article/2021/07/03/347336.html>
- 9) Amnon Yariv(丸善出版):光エレクトロニクス 展開編, pp.101-110(2014)
- 10) Thomas Kurner, Daniel M. Mittelman, Tadao Nagatsuma (Springer) :THz Communications, pp.299-316(2022)

筆 者



大竹 秀幸

イムラアメリカインク
社長 博士(理学)技術士(応用理学)