

## SEMINAR REPORT

# 無線・光融合通信システムのための アンテナ電極高機能光変調デバイス



大阪大学  
大学院基礎工学研究科  
システム創成専攻  
准教授  
村田 博司氏

我々の研究室では、無線と光とを融合させた新しいデバイス、およびそのシステム応用に関する研究を行っています。

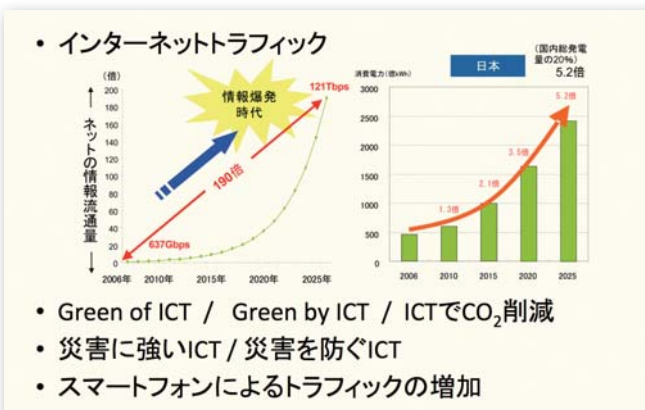
本日は、高速通信技術の動向と、無線と光の融合技術についてお話しさせていただいた後に、我々が提案しているデバイス、特にアンテナ電極を使った光変調器と、それによる空間多重無線信号の分離についてお話をさせていただきます。

### 高速通信技術の動向

#### (1) トラフィックとネットワーク、災害対応

国内外ともにインターネットトラフィックは相変わらず伸びているようです。図1は2年前の情報通信白書の「高速通信技術の動向」です。

最新の情報通信白書にはこのようなデータは出ていないようですが、増えていることは間違いありません。



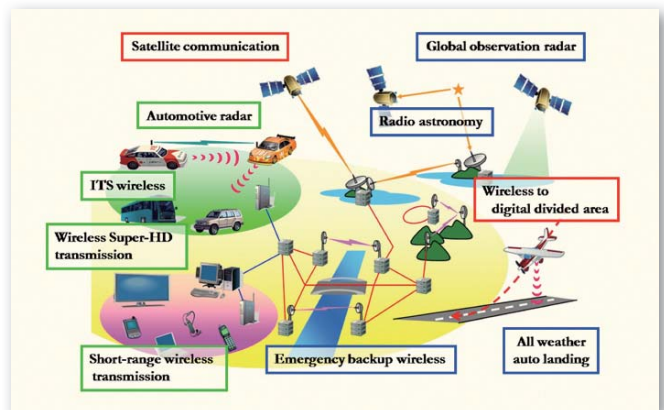
〈図1〉高速通信技術の動向

携帯電話・スマートフォンも増加しており、高速通信網をきちんと構築していくことは非常に重要になっています。

ご承知のように、2年程前まではCO<sub>2</sub>削減がトレンドでした。今は災害に強いということが重要なキーワードです。有事の際でもきちんと情報を伝送することが非常に重要になってきます。つまり、頑健性の高いICT技術を構築していくことが重要です。

また、最近、たくさんの携帯電話やスマートフォンが一度に同時に通信しようとする、トラフィックが突発的に著しく増加することも判ってきました。この多数の人が同時に接続しようとした時の輻輳による回線障害への対応も重要な課題であると思います。

図2に「無線通信ネットワーク」を示します。

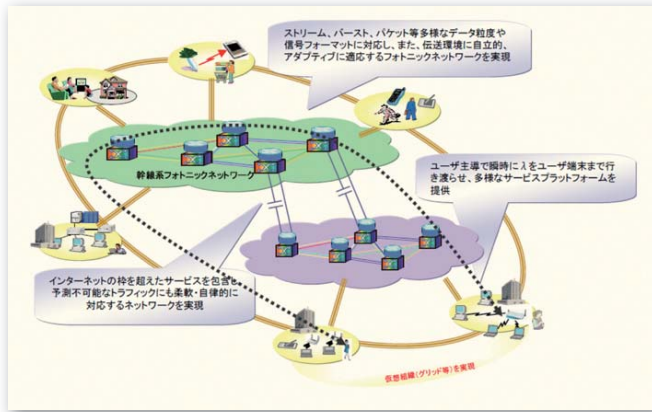


〈図2〉無線通信ネットワーク

無線通信資源を利用しているサービス・技術には携帯電話、スマートフォン、PCの他に、情報家電、ITS、ETC、レーダーなどがあります。宇宙関係も重要です。有事の際には、有線より無線の方がより機動的であり、また、突発的なシャットダウン時の再構築にも有利と考えられます。Backup wireless技術の開発も進められています。

図3に「光通信ネットワーク」を示します。(次頁)

一方、石英光ファイバーは、あらゆる種類の情報伝送ケーブルの中で最良のケーブルと言えます。石英光ファイバーのエネルギー伝送損失は、わずか0.2dB/kmです。この特性を上回るケーブルはそう簡単には出てきません。したがって、当分の間、基幹ネットワークは石英光ファイバー網であることは間違いあ



〈図3〉光通信ネットワーク

りません。さらに、現在の光通信は、石英光ファイバーのポテンシャルをまだまだ使い切れていません。潜在的な伝送容量の1%も使っていないのです。したがって、利用可能な伝送容量を増やしていくために、フォトリソスイッチング、光パケット処理などによる光領域でのトラフィックコントロール技術、最近では、マルチコアやマルチモードファイバー等、いろいろな技術をどんどん取り入れていこうというのが現在の光ファイバー通信の研究のトレンドです。

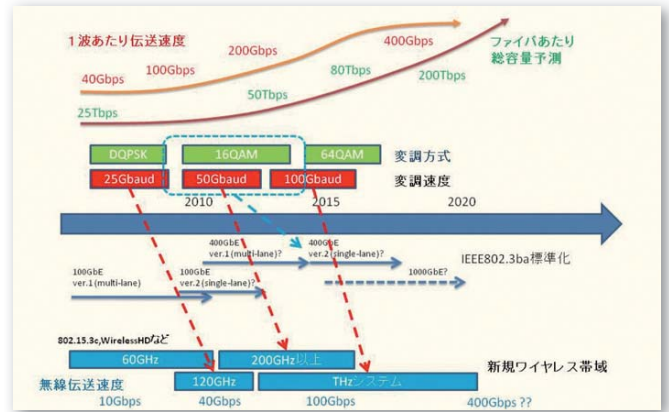
## (2) 無線通信と光通信の融合

一方、個人・オフィスネットワークでは、無線通信の利便性にかなうものはなかなか出てこないと思います。無線通信は伝送容量に難があると言われていましたが、1Gbps程度は十分実現できるようになってきました。最終的には10Gbps、あるいはさらに大容量の無線通信も可能かもしれません。無線通信は機動的であり、たとえば、有事の際における臨時の回線設営などは、有線ネットワークに比べるとはるかにフレキシブルに行うことができます。ただ、周波数資源とその用途が電波法で定められています。現在の無線通信は、主に数GHz帯までの電波を使っていますので、今後は、より高い周波数帯の電波の利用が大きなポイントです。

一方、光ファイバー通信技術は、情報伝送容量としてはペタ(10の15乗)ビット毎秒から、エクサ(10の18乗)ビット毎秒までは可能と言われています。機動性、災害耐性は少し劣りますが、光周波数資源については、まだ1%以下しか使っていないのです。したがって、無線通信の信号をそのまますべて光に変換して伝送する(Radio-Over-Fiber)技術を適用してもまだまだ余裕があります。今後は、両者の棲み分けをうまく検討していくことがポイントになると考えられます。

無線通信と光通信の融合はある意味で進んでいます。現在、情報端末が無線機器であっても、情報を長距離にわたって伝送する場合には、途中で必ず光回線を通っています。今後、スマートグリッド(電力ネットワーク)、ガス、水道をはじめとして無線通信端末が導入されるサービスはさらに増えると考えられます。すべての人が数台の情報端末を持つ時代もやってくると思います。そうなると、無線と光とを自由自在にやりとりする技術、あるいはそれらを融合させたものがますます重要になるであろう、というのが我々の認識です。

例えば、3.11の震災後のNICTの研究課題として、「有事等で光ファイバー網が寸断された場合に、速やかにバックアップ回



〈図4〉大容量光・無線伝送ロードマップ

線となる無線通信網を構築し、確実に情報伝送を行えるようにする」というものがあります。このような技術を追求していくのも重要ではないかと思えます。

図4の「大容量光・無線伝送ロードマップ」は、無線と光の通信容量の動向、および両者の融合技術についてまとめたものです。

これは、2年半ほど前に取り纏めのお手伝いをさせていただいた、「高速ICTデバイス技術動向調査報告書」に掲載されているものです。

光通信では1波長あたりの伝送量がどんどん増えてきています。今は1波長で100Gbpsは十分実現できます。それを束ねると数10Tbpsになります。さらには、コアをマルチにすると、1本のファイバーでペタビット毎秒が実現できると考えられます。興味深いことに、現在の光通信で用いられている変調方式は、無線で使われている方式と同じです。

また、無線通信も高速になってきています。無線通信のキャリアの周波数は光とは全然違いますが、無線通信ではQAMやOFDMなどの高度な変調方式を用いることで、60GHz帯では10Gbps、300GHz帯では20Gbpsもの大容量伝送が実現されています。

光通信と無線通信の変調方式は同じになってきています。無線通信で開発された技術を光通信に取り入れたり、あるいは、光のデバイスを使って無線の高度な変調を実現するなど、両者の融合が進んでいます。最新の技術としては、光通信ではベクトル変調技術を長距離光ファイバー通信に用いてテラビット伝送・サブペタビット伝送を実現しています。一方、無線通信では、高速光変調器をうまく使ったTHz帯でのブロードバンド無線が報告されています。

## ミリ波無線—光融合通信へ向けて

我々の研究室では、無線の技術を光に使う研究、あるいは光の技術を無線に使う研究だけではなく、もう一歩踏み込んだ研究を進めています。たとえば、無線と光を同じデバイスに載せて、直接インタラクションをさせると今までにないファンクションが出せるのではないかと考えられます。

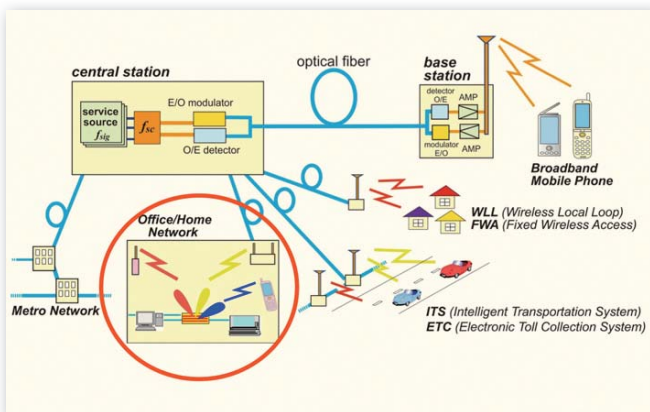
無線信号も周波数を上げていくのがトレンドだと思います。マイクロ波よりも周波数が高いミリ波を用いると無線信号の波長

は数ミリメートルになります。これは光デバイスのサイズとコンパラブルですので、ミリ波無線信号を光に載せる、あるいはその逆のことを考える上ではミリ波回路・光回路をディスクリットにするのではなく、両者を集積した方が良いのではないかと考えられます。

そこで、ミリ波空間多重通信を考えます。マイクロ波と違ってミリ波は波長が短いので、直進性が高く、同じ周波数帯でも伝搬方向ごとに異なる通信チャンネルを割り当てることができます。同じ周波数帯を使って簡単に複数の無線通信サービスをカバーすることができるのです。

また、ミリ波は周波数が高いのでマイクロ波に比べてビットレートを上げることが容易ですが、空間多重も併用すれば、さらに有効だと思います。そのためには、同じ周波数帯で伝搬方向が異なる複数の信号を分離する技術が必要になります。

一方、ミリ波は自由空間中や回路での伝搬損失が大きいという欠点があります。そこで、ミリ波を光信号に変換して、その伝送に一番損失の小さな石英光ファイバーケーブルを使う、Radio-Over-Fiber 技術を利用することが考えられます。両者を繋ぐデバイスとして、光変調技術とアンテナ技術をうまく使って集積化すると面白いものができるのではないかと考えたわけです。

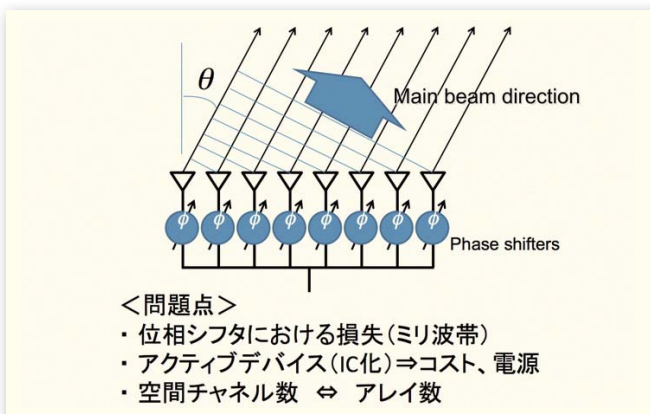


〈図5〉ROF (Radio-Over-Fiber) システム

空間多重無線信号を分離する技術としては、フェーズドアレイアンテナがあります。これは、同じ特性を持ったアンテナをアレイ状に並べたものです。

図6に「フェーズドアレイアンテナ」を示します。

たとえば、右上から飛来する無線信号を受信する場合は、遅延回路等を用いて、右側のアンテナになるほど大きな位相差を逐次与えて信号を合成すれば良いことがわかります。また、位相



〈図6〉フェーズドアレイアンテナ

差を少しずつ変えてやるとビームの方向をチルトすることもできます。これは実際にレーダーなどで使われています。

問題は、ミリ波のような高周波帯では、遅延回路や信号合成回路における信号の損失が無視できないことです。信号の損失を補償する方法として、ミリ波の増幅回路(MMIC 等)を用いることもできますが、コストがかかり電源も必要です。

もう1つの問題は、同時に複数の空間多重信号を受信する場合には、空間チャンネル数と同じアレイ数が必要になることです。信号合成回路を時間的に切替えて、受信する信号の方向をスキャンする方法もありますが、かなり面倒な処理が必要です。イージス艦などの軍事関係ではたくさんのアンテナアレイを実装したものが使われているようですが、民生応用ではあまり現実的でないと思います。

### (1) アンテナ電極高機能光変調デバイス

1つのアンテナアレイで複数の空間多重信号を分離するのがベストですが、その実現には、受信した信号を分配してそれぞれ遅延・合成処理をしなければならないことや、回路・線路において無視できない損失があること、不要な結合・誘導を避けねばならないこと、といった問題があります。そこで光技術を応用しようと考えたわけです。

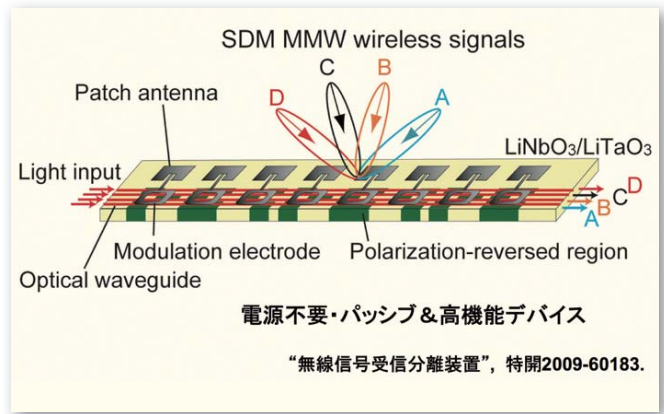
光技術を使ったフェーズドアレイアンテナのコンセプト自身は少し前から提案がありました。光を使ってアレイアンテナで受信した信号を合成する技術です。最初の提案は1990年代ですが、2000年には、NICTのグループから良い実験データが報告されています。ただし、これは1つのアレイを作っただけのようです。

一方、我々は分極反転構造をうまく使うと、1つのアレイだけで複数のアレイと同等な性能を発揮させて、複数の空間多重信号の分離ができることを見出しました。

図7の「分極反転構造を用いたアンテナ電極光変調デバイス」は面白い機能を持つ光変調デバイスです。

基板は電気光学材料のリチウムナイオバートやリチウムタンタレートなど、光変調器やSAW フィルターなどに使われている材料です。基板の表面に平面型アンテナアレイを並べています。この例ではパッチアンテナのアレイを用いています。また、赤く示してあるのが光導波路で、その上には光変調用の電極が付いており、それぞれパッチアンテナと繋がっています。

このデバイスは、一見すると1つのアレイのようですが、少し工夫がしてあります。同じ周波数で伝搬方向が違う4つの無線信号、A、B、C、Dを同時にアンテナが受信したとします。このとき、4つのレーザー光を左側から入力すると、分極反転という緑色



〈図7〉分極反転構造を用いたアンテナ電極光変調デバイス

の部分4つの導波路で違うために、無線信号Aは導波路Aから、無線信号Bは導波路Bから、CはCから、DはDから出てきます。すなわち、無線信号を光に変換すると同時に分離ができるわけです。

このデバイスは、電源が不要なパッシブなデバイスであり、かつ、このようなユニークな機能を持っています。既にこのデバイスの特許を取得しています。

もう一度整理すると、同じ周波数で到来方向が違う複数の空間多重信号をアンテナで受けます。それが各変調電極に送られて、変調電界が誘起されて、それによって光が逐次変調されます。順番に変調されていくのがポイントですが、その結果として、多重化された信号が分離されて、異なる光信号が対応する導波路から出てくるわけです。

図8には、38GHz帯分極反転構造フェーズアレイアンテナ電極光変調デバイスの作製工程を示しています

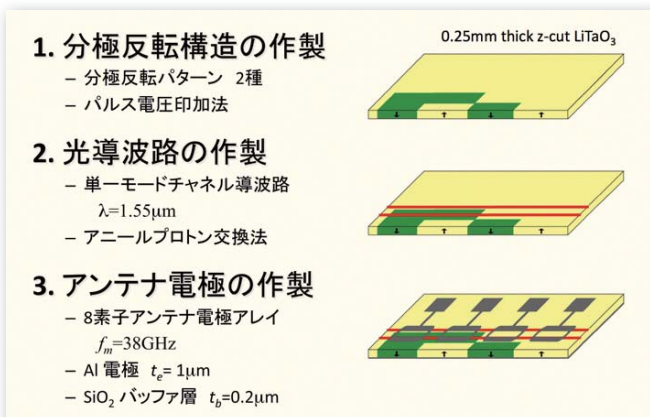
我々の研究室で学生と一緒に作りましたが、アンテナ電極のデザインが一番厄介でした。我々が従来作製してきた通信用光変調器と異なり、変調信号の入力ポートも出力ポートも持っていない特殊な構造で、かつ共振器を2つ組み合わせただけで、正確にデザインしないとうまく動作しません。

方形パッチアンテナと定在波共振電極を結合させた構造を採用したのですが、そのままでは解析することが難しいので、まず、アンテナと変調電極を別々に解析、設計しました。

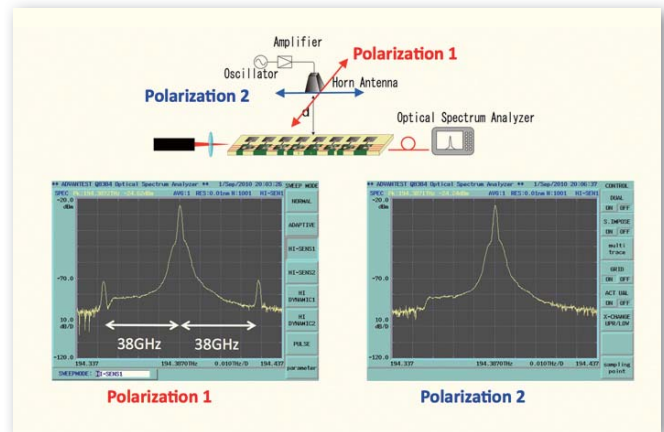
その後、別々に設計したアンテナと変調電極を繋いで、詳しい特性を調べました。すると、ある条件下では、アンテナ変調電極の真上から38GHzのミリ波信号を照射すると、パッチアンテナで無線信号を受信して、それが変調電極に送られて定在波変調電界が立つことを確認しました。その条件でデバイスの設計を行いました。

試作も自分たちで行っています。デバイスの基板は市販の電気光学結晶基板を使っています。今回は、厚み0.25mmのリチウムタンタレート基板を用いました。リチウムナイオベートを用いることもできます。あらかじめ設計した場所に電極を付けて、絶縁破壊電圧の手前まで電圧をかけると、電極を付けた領域だけ自発分極が反転します。しかし、光学特性やマイクロ波・ミリ波特性は変わりません。

かなり高い電圧をかけないと分極が反転しないということは、一旦反転させた後はその構造が安定に保たれるわけです。その後、光導波路を作りました。アンテナ電極アレイは、図では4素子のアレイになっていますが、実際には8素子のものも作製しました。



〈図8〉プロトタイプデバイスの試作



〈図9〉ミリ波偏波依存性

動作実験を行ったところ、ミリ波無線信号で光変調が起きることを確認しました。

図9は「ミリ波の偏波依存性」を示したのですが、Polarization 1の偏波を持つミリ波を照射した状態で光を入力すると、38GHzの設計周波数付近で綺麗に光変調サイドバンドが観測できました。

一方、ミリ波の偏波の方向をPolarization 2にすると、全く光サイドバンドが見られません。パッチアンテナ自身はどちらの信号も受信できるのですが、設計したデバイスでは、Polarization 1の偏波の場合のみ受信信号が変調電極に送られて変調がかかります。実験結果は、まさに設計通りの特性を示しており、きちんと動作していることが判りました。

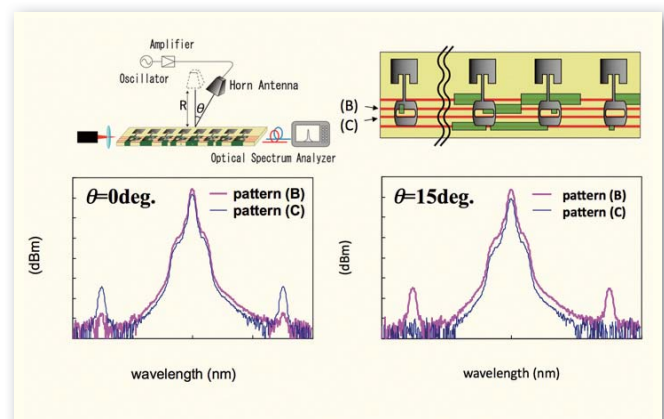
周波数特性もほぼ設計通りのものが得られました。試作デバイスでは、送信アンテナとの距離を1m離しても光変調を確認できています。無線から光への変換効率をもう少し向上させれば、実環境でも使用できると考えています。

さて、肝心の空間多重信号の分離特性についても実験を行いました。

図10に「空間多重信号の分離実験」の結果を示します。

真ん中の導波路2本でデータを取りました。Pattern (B)、(C)とありますが、それぞれ最大の光変調特性が得られる入射角度が違ってきます。(C)は、デバイスの真正面から信号が入射した時に最も変調がかかります。一方、(B)は、プラス15度で信号が入射した時に最も変調がかかる設計となっています。ご覧いただけるとわかると思いますが、真正面、プラス15度のミリ波信号を入射して、それぞれの導波路からの出力を測定したところ、狙った通りの特性が得られていることを確認しました。

それぞれの導波路間での無線信号分離のアイソレーションは



〈図10〉空間多重信号の分離実験

13dBで、設計値とほぼ一致しました。設計通りにデバイスが動作することを確かめました。

我々のデバイスは無線信号を分離して光信号に変換するものですが、光デバイスとして見ると光の位相変調器です。位相変調の方が強度変調器よりもリアリティが取れる範囲が広く、かつ、光バイアスの設定が不要です。無線・光信号変換デバイス部分は電源が不要で、無線信号と光を入力するだけで信号が分離されて取り出されるので非常に使い易いデバイスです。

光位相変調信号からミリ波信号を取り出すには、少し工夫が必要ですが、これには、光ファイバー通信で用いられているフォトニック技術を利用することができます。例えば、光のフィルターを用いて信号を処理すれば、位相変調信号を強度変調信号に変換できます。シャープカットフィルターを用いると実効的な変調深さを大きくすることもできます。その後で、光アンプで増幅してフォトダイオードで受光するとミリ波信号に再変換することができます。実験を行ったところ、この手法を用いてC/N比が20dB程度確保できることを確認しました。したがって、データ伝送にも応用できそうだとことが判りました。

現在は、さらなる高周波化と高感度化を目標に、60GHz帯での試作実験を進めています。60GHzになると変調電極がかなり短くなります。また、電気光学結晶基板の誘電率が高いのでアンテナのサイズも自由空間波長に比べてかなり小さくなっています。そこで、アンテナの受信電力を大きくするためにアンテナをペアにして2つ並べたダブルアンテナ構成を考えました。また、アンテナ部分は誘電率の低い石英ガラス(SiO<sub>2</sub>)基板の上に作製して両者を繋げる構成を採用しました。これにより、20dB以上無線・光信号変換の感度が向上することを確認しました。現在、無線信号分離特性の評価を継続中です。

## (2) 光差周波数発生によるミリ波発生デバイス

最後に、新しいタイプのマイクロ波・ミリ波発生デバイスについてお話しします。これは、光信号からマイクロ波・ミリ波信号を得るデバイスです。光信号からマイクロ波・ミリ波信号を得るデバイスとしては、フォトダイオード(PD)があります。PDは、非常に高効率で高速動作も可能です。しかし、PDは、通常、非線形な応答を示すデバイスです。例えば、多値振幅変調された光信号をPDで受信すると、その出力は光信号の振幅の関係とは異なるものとなってしまいます。従来の光通信では、光の2値ASK信号を用いていたので、むしろ多少の非線形性があつた方が望ましかったのですが、多値変調信号を受信する場合には注意が必要となります。

光差周波発生は、非線形光学効果による光のミキシング現象です。たとえば、レーザーポインターにも使われている光の波長(周波数)を変える技術の1つです。この光差周波発生を利用して、周波数が異なる2つの光波から、その差周波をマイクロ波・ミリ波として取り出そうというものです。この現象自体は昔から実験、研究がなされてきましたが、発生した信号をマイクロ波・ミ

リ波回路に結合して評価する技術は余り検討がなされていませんでした。

そこで、我々はこの光差周波発生を利用するための新しい構成を考えました。ポイントは非線形結晶でマイクロ波・ミリ波に対する単一モード導波管を構成することです。

このデバイスを用いると、所望の光信号成分のみを取り出して他の光信号は通過させるという、選択的な光信号変換が可能になります。また、リアリティが非常に高いこと、つまりダイナミックレンジが広いことも特長です。一方、エネルギー利用効率は低くなります。その理由はフォトンエネルギーで考えれば理解できます。光は200THzのフォトンですが、マイクロ波・ミリ波はたかだか数十GHzのフォトンですので、変換効率が100%だとしても、入出力のエネルギーの差は0.1%になるわけです。

実際に、プロトタイプデバイスを作ってみました。デバイスの構造は簡単です。結晶を設計したサイズで切り出した後、4つの側面を蒸着して方形導波管とします。このデバイスに、15GHzで強度変調された光を入れて、出力端から放射されるマイクロ波信号を測定してみました。その結果、設計周波数において明瞭な信号を確認することができました。プロトタイプデバイスの周波数特性では、位相整合と導波管共振器の特性で決まる3つの周波数で出力信号のピークが見られました。以上のように、設計通りの周波数特性が得られることを確認しました。また、差周波発生による信号を導波管共振回路に直接入力できることも確認しました。現在は、さらなる高出力化と高周波数化を目指して研究を進めています。

## まとめ

本日は、我々の研究室で進めている、無線と光の融合に関する研究の中から、無線通信技術とフォトニクス技術を融合させたデバイスを紹介しました。これらのデバイスは、特に、ミリ波、ROF(Radio-Over-Fiber)システムにおいて有効と考えています。

高周波回路では、電気信号の周波数が上がれば上がるほど発熱量が大きくなります。たかだかクロックが3GHzのノートパソコンでも、かなりの熱を出すのは皆さんもご承知の通りだと思います。したがって、10GHzや60GHz級の信号を処理する超高周波回路は大変な熱を出すことになります。現状では、その冷却にまた電気を使っています。マイクロ波・ミリ波と光技術を上手く組み合わせると、低消費電力で面白い機能、良い性能が得られるのではないかと考えています。皆様のご意見をお聞かせいただけると幸いです。ありがとうございました。