

未踏の光—テラヘルツ光へのアプローチ

Approach to Unexplored Frequency Range—Terahertz Radiation

平 川 一 彦*

Kazuhiko HIRAKAWA

1. は じ め に

ただいまご紹介にあずかりました生研3部の平川でございます。本日はお忙しいなかおこしくだしまして、どうもありがとうございます。本日は、皆さんのお時間を少し拝借いたしまして「未踏の光—テラヘルツ光へのアプローチ」というタイトルでお話をさせていただきたいと思ひます。

このテラヘルツ光というのはどういうものかは、後でお話いたします。

1873年、今から約120年ほど前にイギリスのジェイムス・マックスウェルという人が電磁気学の基本的な方程式を導きました。これは現在ではマックスウェルの方程式と呼ばれているものですが、このマックスウェルの方程式を使って、彼は非常に重要なことを予言しました。その予言と申すのは、皆さんの家でランプを照らしたり洗濯機を回したりしている電気といわれるもの、テレビに画像を映したりラジオから声を出すために使われている電波というもの、それから太陽から降り注いでくる光というものは、実はすべて同じものであるという驚くべきものでした。これを彼は「電磁波」と呼んだわけですが、きょうお話しするテラヘルツ光というのは非常に周波数が高い電磁波のことです。

これまで技術的な困難さから、テラヘルツ領域の光というのは、ほとんど手がつけられて来ませんでした。しかし、最近の技術的な進歩によりまして、このテラヘルツ光が今非常に注目を集めております。きょうはこの辺りの最近の展開についてお話ししたいと思います。

最初にテラヘルツ/フェムト秒領域というのはどういう領域かというお話をいたします。そのあと、テラヘルツ領域という周波数資源の開拓の必要性のお話をいたします。その次に、簡単ですが、なぜテラヘルツ領域は未踏の光になってしまったのかという話をしまして、そのあと、

*東京大学生産技術研究所 第3部

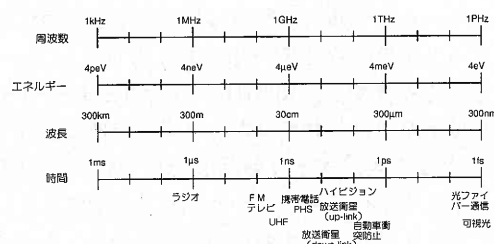


図1 電磁波のスケール

新しい原理に基づいたテラヘルツ領域の技術の新展開についてお話しして、最後にまとめさせていただきたいと思ひます。

まず最初に、テラヘルツ領域とか、フェムト秒領域と呼ばれる領域とはいったいどのような領域なのだろうかということについてお話しします。図1は電磁波のスケールを、電磁波を記述する周波数、電磁波のエネルギー、電磁波の波長、および電磁波が1回振動するのに要する時間について示したものです。

まず、周波数について着目してみましょう。周波数の単位はヘルツと呼ばれ、1秒間に1回振動すれば1Hzと言ひます。周波数が上がるにしたがって1Hz, 10Hz, 100Hzとなります。物理では3桁上がるたびに一つ接頭語がついて、名前が変わりますので、次の1000Hzのことを1kHzと呼びます。それからまた3桁上がりまして100万Hzのことを1MHzと呼びます。それからまた3桁上がりまして1GHz, その3桁上が1THz。さらにもう3桁上りますと1PHzと呼ばれます。これに対応する電磁波の波長を見ますと、1kHzの波に対しては波長は300kmという非常に長い距離になります。周波数が上がってきますと、1MHzに対しては300m, 1GHzに対しては30cm, 1THzに対しては300ミクロン(0.3mm)になります。それから、1PHzに対しては0.3ミクロンとなります。同じように時間について見ますと、1kHzは

1 ミリ秒, 1 MHz は 1 マイクロ秒に対応します。1 THz は 1 ピコ秒, 1 PHz は 1 フェムト秒に対応します。

さて、この電磁波が、これまでどういうふうに使われているの生活に役立ってきたかということを見てみましょう。われわれの使っている洗濯機のモーターを回す電気と呼ばれているものは 50 Hz で振動しています。次に約 1 MHz の電磁波は AM ラジオに、また、100 MHz ぐらいの電磁波は FM ラジオやテレビに使われています。さらにその上の 1 GHz 辺りの周波数は、最近流行の携帯電話とか、PHS に用いられています。また数十 GHz の周波数はハイビジョン放送や衛星放送に用いられています。しかし、ここにギャップがありまして、次に用いられている周波数は数百テラヘルツに飛んでしまいます。200 THz の周波数は現在盛んに光ファイバー通信に用いられています。われわれの目に見える可視光は数百 THz に対応します。

これを見てみますと、100 GHz から 100 THz の 3 桁の領域が、実は手がつけられていない暗黒の領域になっていることがわかります。きょうお話ししたいのは、この 3 桁のギャップをどうやって埋めるかということです。

補足になりますが、いまわれわれが「テラヘルツ光」と呼んでいる電磁波は、波長でいいますと、波長が数ミリからそれをやや下まわる領域に対応しますので、場合によっては「ミリ波」とか「サブミリ波」と呼ばれることもあります。また、可視光に対比して「遠赤外光」と呼ばれることもあります。

2. テラヘルツ光が拓く応用

まず最初にテラヘルツ、フェムト秒領域の電磁波の特徴を挙げてみましょう。まず最初の特徴は、周波数が非常に高く、使える周波数帯域が広いということです。つまりテラヘルツ光を用いることにより、大量の情報を高速に送ることができるのです。

例えば電話について考えてみます。電話の 1 回線は 4 kHz の周波数の幅を使って情報を伝送していますが、1 THz の電磁波は、電話 2 億 5000 万回線分の情報を一度に送ることができます。また、テレビ 1 チャンネルは 6 MHz の周波数を使って情報を送っていますが、1 THz の電磁波を使いますと、テレビ 17 万チャンネル分を一度に送ることができるのです。

2 番目の特徴は、テラヘルツ光は、水蒸気やガスにより吸収されるため、大気中や特に雨の日にはすぐに減衰して、長距離を伝搬させることができないという点です。従来の通信の使命というのは、いかに大量の情報を遠くまで送るかということにあったわけですから、これが非常に欠点として考えられていました。しかし、場合によっては、これを利点として考えようという話が最近あります。この話はあとで戻ってきます。

3 番目の特徴は、だんだん周波数が高くなってまいりますと、電磁波といっても光の性質に近くなってまいります。したがって、THz 領域では、非常に指向性の強い電磁波をつくることができます。

こういう特徴を持ったテラヘルツ領域の光の技術が、どういうふうに使われる可能性があるのでしょうか？まず最初に考えられますのは、最近話題になっていますマルチメディア時代の到来に向けた超高速・大容量の通信をテラヘルツ光に担わせてはどうかということです。近い将来、1 秒に 1 テラビットぐらいの情報を送ることが必要になると言われていますけれども、その関係の最近の新聞記事の切り抜きをご紹介します。

これは日経産業新聞の記事ですが、「新産業技術-2010 年への挑戦」というタイトルでミリ波（ミリ波とはテラヘルツ光と呼んでいる電磁波の中でも周波数の低いものを指します）を利用して大量の情報を速く伝送しようというプロジェクトが最近盛んに研究されていることが紹介されています。実際にこういうミリ波をどういうふうにする可能性があるかということについて考えてみましょう。

まず最初は、ワイヤレス LAN への応用です。これはテラヘルツ領域の光が大気中では減衰が大きくて、遠くまで伝搬しないという特徴を利用したものです。皆さんが仕事をやっておられるオフィスの中には、たくさんパソコンがあるとありますが、そのパソコン間は、お互いにケーブルを張って情報通信を行っています。ところがケーブルを張るとするのは非常に煩雑ですので、それをミリ波を使った無線でやろうというアイデアです。その場合には、室内中だけ電磁波が飛んでくれればよく、逆に、遠くまで飛びすぎると、いろんな部屋同士の混信が起きますのでちょうど 1 部屋の中だけで閉じるぐらいだけ電磁波が飛べばいいということを利用しているのです。それから、携帯電話への応用ですとか、個人対個人が、人工衛星を使って通信しようということも考えられています。

すこし毛色が変わった応用として、自動車の衝突防止のレーダーというのがあります。自動車の前方に危険になりそうなものがあつた場合には、それを察知して警報を与えたり、場合によってはブレーキをかける、そういうときに使うための衝突防止のレーダーです。このレーダーに必要とされる特徴は、一つは指向性がよくないといけないということと、もう一つは、あまり遠くのを察知して車が止まってもしょうがないわけですから、比較的まあまあの距離で減衰してしまつて、遠くからの信号は返つてこないということが必要になります。そういうのにちょうどミリ波とかテラヘルツ光というのは調子がいいわけです。

2 番目の応用分野は化学、電波天文学、環境アセスメント、バイオに関連したものです。これはテラヘルツ領域の光が、いろんな化学物質と相互作用することを利用したも

のです。テラヘルツ領域の光というのは、例えば水、炭酸ガス、オゾンなどの化学物質と非常に強く相互作用して吸収されるという特徴があります。

この特徴を利用して、宇宙開発事業団で企画されているプロジェクトの1つに、高感度のテラヘルツ光の観測装置を積んだ衛星を飛ばして、オゾン層の破壊のメカニズムを解明しようという試みがあります。

さらに話が雄大なところにまいますと、電波天文学への応用というのがあります。天文学には、われわれの目に見える可視光を使って、天体望遠鏡により、どんな星がどこで光っているかということを研究する天文学もありますが、他方、実際にはわれわれの目には見えないけれども、電磁波を出している物質の研究をする電波天文学というものがあります。宇宙の紀元や進化の過程を解明するには、実際には光る天体よりももっとたくさんある光らない物質がどのくらい宇宙に存在するかということを調べなければいけないということが言われています。それに必要不可欠なのがテラヘルツ光の技術なのです。

同じような原理を用いまして、自動車の排ガス規制とか環境アセスメントの分野への応用が考えられています。

また3番目の応用としては、サーモグラフィと言いまして、例えば人体の表面温度がどのくらいになっているかを測定する装置や、真っ暗い中で像を見る暗視装置へも応用されています。

4番目は、物理学の分野で、新しい材料系ですとか、その材料が超高速の信号に対してどういうふうに振る舞うかということを研究する、超高速電子物性という分野にも大きく貢献するであろうということが期待されています。

3. 未開拓のテラヘルツ領域

それでは、なぜテラヘルツ領域が未踏の光になってしまったのかということをご説明しましょう。

この図はエレクトロニクスの現状を周波数、時間のスケールで表したものであります。一般にエレクトロニクスの分野では、主に2種類のデバイスが使われています。一つは、電子信号のON、OFFを受け持つ電子デバイス群というもので、これの代表格はシリコンの超LSIですとか、皆さんの家庭の衛星放送アンテナの中に入っておりますHEMTと呼ばれる超高速トランジスタです。

一方、もう一種類のデバイス群は、光デバイスと呼ばれていまして、例えば半導体レーザーのような光を発生したり、光ディテクターのように光を検出してそれを電気信号に変換するという機能を受け持つデバイスです。電子デバイス、光デバイス、各々受け持つ周波数範囲というのがだいたい決まっています。電子デバイス群は高速になってきたとは言え、最高動作周波数は約数百GHzで止まっています。一方光デバイスのほうは、だいたい1ミクロンぐ

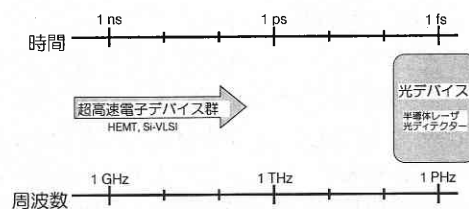


図2 エレクトロニクスの現状

らいの波長の光のところまでしかカバーしません。(図2参照)

これから見ても明らかなように、現状では100GHz から100 THz のところに半導体デバイス技術のギャップがあるわけですが、電子デバイスをさらに速くしたり、光デバイスの動作周波数を下げるといったことをやって、このギャップを埋めることができるかということ、実はそうではありません。

例えば、従来のトランジスタをどんどん速くしたときに、どのくらいまで速くできるだろうかということを考えてみます。それには、トランジスタと呼ばれるものの基本的な動作をまず考える必要があります。トランジスタと呼ばれるデバイスは、ソース、それからドレインと呼ばれる電極の間にゲートと呼ばれる第3の電極を使って、電子を誘起したり、空乏させることにより、電流のスイッチングを行うものです。

このトランジスタの速度を決めている要因はいくつかあるわけですが、その一つは寄生抵抗ですとか寄生容量などの外因的なものです。もう一つは、原理的な限界というのがありまして、実は現状ではそろそろこの限界に達しつつあります。

原理的な限界とはどういうものか考えてみましょう。例えばONの状態のトランジスタを、ある瞬間にOFFにしたいと考えます。そうすると、ゲートにマイナスの電圧をかけて、チャンネル中の電子を空乏させるわけですが、たまたまソースの近くにいた電子は、トランジスタのチャンネルがOFFになるためには、ソースからドレインまでの距離を走りきらなければなりません。従って、必ず電子がソースードレイン間の距離を走る時間というのが必要になります。その時間は、ソースードレイン間の距離を電子の速度で割った電子の走行時間と呼ばれるもので与えられます。これに典型的な値を入れてみましょう。ソースードレイン間の距離は、トランジスタを超微細加工技術を用いて作製しますと、だいたい0.1ミクロンぐらゐにすることができます。一方、電子の速度というのはだいたい 10^7 cm/sec と言われていますから、電子の走行時間は約1ピコ秒となります。これを周波数に直しますと、実は数百ギガヘルツになってしまひまして、従来の動作原理を用いた超高速電子デバイスは、これ以上高速に動作させるの

は難しいということがわかります。

今度は光デバイスについて考えてみましょう。半導体の結晶中に、化学結合に寄与する電子がたくさん詰まっている価電子帯という領域と、電子がほとんど空である伝導帯という領域があります。ほとんどの光デバイスは、この価電子帯と伝導帯間の電子の遷移を用いて動作しています。従って光デバイスが動作する周波数を決めているのは、価電子帯と伝導帯を遮るエネルギーギャップの大きさです。それでは、このエネルギーギャップをずっと小さくすることができるかということですが、実際の半導体を考えてみますと、テラヘルツ領域に対応するような小さいバンドギャップを持った良好な半導体結晶が得にくいという現実があります。

さらに、かりにそういう結晶ができたとしても、実はオージェ過程と呼ばれる非発光プロセス等のために非常に効率の悪いものしかできないであろうということが予想されています。そういう理由で、光デバイスの動作周波数を下げることにもままならないわけです。

このように、従来の電子デバイスや光デバイスの概念をそのまま踏襲しては、どうもテラヘルツ領域のギャップは埋まりそうにないということで、近年、新しい原理に基づいたデバイスの開発が必要だということが認識され、その研究の進歩が急激に進んでおります。残りの時間を使いまして、この辺りの状況を、われわれの最近の成果も含めてご紹介したいと思います。

4. テラヘルツ領域デバイスの新展開

新原理に基づくテラヘルツ光の発生。検出技術の新展開ということで、それぞれ2つの例をご紹介したいと思います。

その一つは、最近非常に進歩しましたフェムト秒レーザー技術を用いた光スイッチアンテナ構造からのテラヘルツ光の発生とその検出についてお話しします。第2は電子のプラズマ振動という性質を使ってテラヘルツ光の発光ダイオードを実現するという話をいたします。一方、テラヘルツ光の検出に関しましては、半導体のヘテロ構造とかナノ構造と呼ばれる半導体超微細構造中の量子効果を利用した光の検出についてと、量子ホール効果と呼ばれる2次元電子の特異な物性を用いたテラヘルツ光検出器についての話題をご紹介したいと思います。

(1) 超高速電子材料とフェムト秒レーザー技術の融合

まず最初に、光スイッチダイポールアンテナとフェムト秒レーザーパルスを用いたテラヘルツ光の発生についてお話ししたいと思います。その原理は非常に簡単です。

皆さん、アンテナから電波が出るということはよくご存知だと思います。アンテナの電極間に電池を接続し、高速

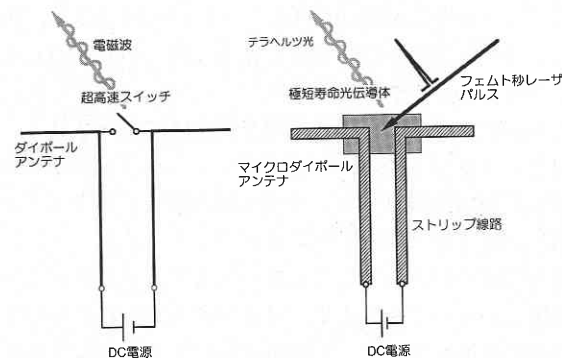


図3 光スイッチダイポールアンテナとフェムト秒レーザーパルスを用いた THz 光発生原理

にスイッチを ON・OFF しますと、その周波数でアンテナを流れる電流が変調され、それが電磁波を放出いたします。

この原理を用いてテラヘルツ光の発生ができないかということですが、それをやるためには、スイッチを 1 THz、言い換えれば 1 ピコ秒のスピードで ON・OFF しなければなりません。それを機械的にやることは不可能です。この問題を解決するために、少し工夫が入った図3のような構造の素子を使います。

これは大きく分けて3種類の要素からなっています。一つは、マイクロダイポールアンテナと呼ばれるもの、それから極短寿命光伝導体と呼ばれるもの、もう一つは、フェムト秒レーザーパルスという、この3つを組み合わせたものです。

まず最初のマイクロダイポールアンテナとは何かということですが、最初にお話しましたように、テラヘルツ領域の電磁波というのは非常に短い波長をもっています。だいたいその波長は100ミクロンぐらいですから、このアンテナも、テレビのアンテナと違っていて、人の髪の毛の半分ぐらいの寸法の非常に小さい寸法を有するものでなければなりません。(図4参照)

次にスイッチ部分ですが、それには極短寿命光伝導体というものと、フェムト秒レーザーパルスの2つを用います。

まず極短寿命光伝導体といいますのは、光が当たっていない状態では絶縁物で、光が当たった瞬間に導電性を示し、光が切れるとまた急速に絶縁物に戻ってくれるという、そういう物質です。それにフェムト秒レーザーパルスを当てたときに、テラヘルツに応答するためには、この伝導体の中にできる電子の寿命が非常に短くなければなりません。普通の半導体では、このような特性を出すことはできません。例えば伝導体として普通の半導体を用いますと、光が当たった瞬間に導電性になるということではできるのですが、光が切れてもなかなか絶縁物に戻ってくれないのです。そこで、工夫が必要になります。例えばガリウムひ素という

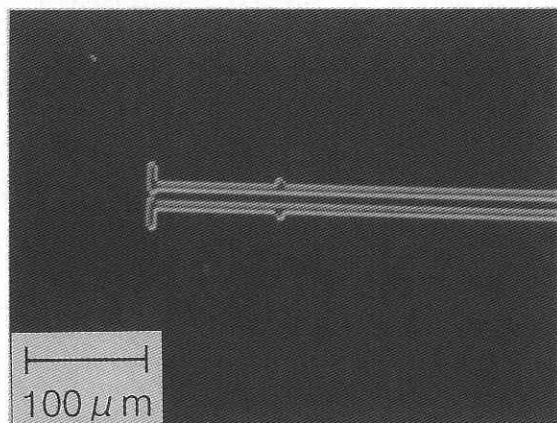


図4 光伝導ダイポールアンテナの光学顕微鏡写真

半導体があるのですが、そのガリウムひ素を、非常に低い温度で(約200°C)成長しますと、その中に普通の組成よりも1%ぐらい多くひ素が取り込まれるということがわかっています。多く取り込まれたひ素は非常に効率よく光励起された電子を捕獲するという性質がありますから、これをうまく使いますと、光を当てた瞬間に電子の数が増えて、光が切れた瞬間にまた電子がいなくなるという性質をつくることができます。特にわれわれのところで作製しました低温の成長ガリウムひ素中では、光で励起された電子の寿命として140フェムト秒という値が観測されています。

これらを組み合わせて2つのアンテナを作製し、一方を電磁波を出すためのアンテナとして用い、他方のアンテナに、電池をつなぐかわりに電流計をつなぎ電磁波を受ける役目をさせて、いったいこのアンテナがどういふ電磁波を出すのかを見てみましょう。

図5はアンテナから出る電磁波の時間波形を示したものです。上から、アンテナの長さが400ミクロン、100ミクロン、50ミクロンとだんだん小さいアンテナになっていったときの変化を示してあります。長いアンテナからはゆっくりとした電磁波が出ますが、アンテナの長さを短くしていくと、だんだん周波数の高い電磁波が放出されていくことがわかります。これをスペクトルに直しますと、400ミクロンという比較的長いアンテナからは100 GHz ぐらいのところに感度を持ったスペクトルが得られます。だんだんアンテナの長さを短くしていきまると、2 THz ぐらいのところまで帯域を持った非常に広帯域の電磁波を発生させることができるのです。

電磁波を発生させることはできますが、これをどう使うかというのはこれから考えていかなければいけないところです。ベル研の研究者は、テラヘルツ光をX-rayにちなんで、T-rayと呼び、特殊な透視に用いることを提案しています。先ほどの電磁波を出すアンテナと電磁波を受けるアンテナの間に、例えば透視してみたいものを置きます。

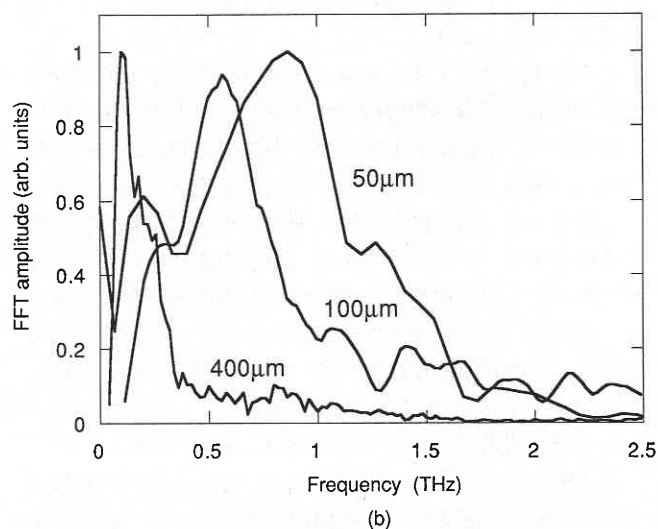
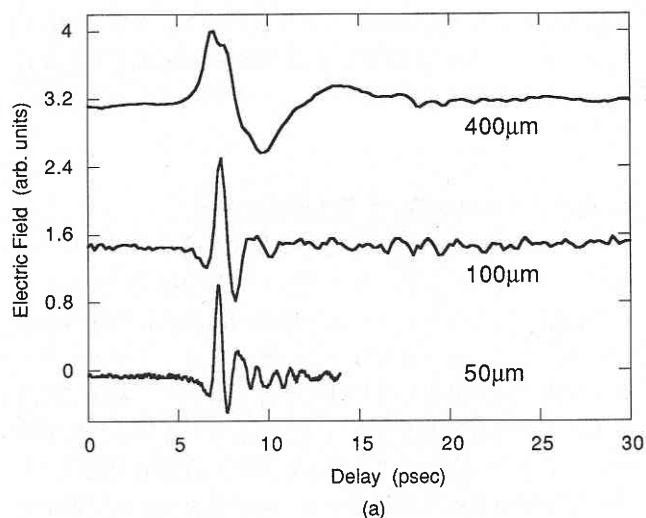


図5 光スイッチダイポールアンテナから放射される電磁波の時間波形(a)とそのスペクトル(b)。

例えば、木の葉を透視したいとします。最初に申しましたようにテラヘルツ光は、例えば水分ですとか、炭酸ガスとか、そういう化学物質と非常に強い相互作用をしますから、例えば葉っぱの中にある水分の様子を透視して知ることができます。

さらに、もう少し物理的な応用としては、THz 光を用いて半導体のなかで電子がどういふふう動いているかということを実時間で見ることもできます。例えば、ガリウムひ素とアルミニウム・ガリウム・ひ素という異なる物質を接合したヘテロ構造を用いた量子井戸を2つ、隣接させて作製します。このとき、片方の井戸にだけ電子を励起してやりますと、量子力学的な効果で電子はこの2つの井戸をコヒーレントにトンネルするという現象が予測されています。

実際に電子が振動的に動きますと、電磁波を出すわけで

すけれども、その周波数がちょうどテラヘルツの領域に当たっており、その振動的な電磁界放射を観測することによって電子の動きを可視化することも可能になって来ております。

(2) 電子プラズマを用いた発光ダイオード

次に、半導体のヘテロ構造中の2次元電子のプラズマ振動を用いた固体の1チップテラヘルツ光放射デバイスについてお話いたします。近年の半導体の結晶成長技術の進歩によりまして、例えばガリウムヒ素とアルミニウム・ガリウムヒ素という異なる半導体を1原子レベルで急峻に接合することができるようになってきました。このような構造中で、アルミニウム・ガリウムヒ素という層の中だけにドナー不純物を入れてやりますと、電子はガリウムヒ素中のほうがよりエネルギー的に安定になりますので、ガリウムヒ素側に移動します。

この時電子は、アルミニウム・ガリウムヒ素とガリウムヒ素の界面の三角形の急峻なポテンシャルの中に閉じ込められまして、層に垂直方向の動きが禁止され、面に平行な方向にのみ動くことができる2次元的な電子となります。

このような2次元的な電子の運動のモードにはいろいろあるのですが、そのなかでも特に電子がお互いに寄ったり離れたったりして粗密波をつくる振動的な運動モードがあります。これが一般にプラズマ振動と呼ばれているわけですが、この粗密波が振動している周波数は、だいたい1 THz ぐらいにありますから、これをうまく利用すると、THz 領域の発光デバイスに应用できるわけです。

このときに、プラズマ振動を光として取り出すために半導体の表面に金属のすだれ状のグレーティングアンテナをつけます。実際にその発光を見てみますと、例えばグレーティングの周期を2ミクロンの場合には、700 GHz, 1.3 THz に非常に鋭い発光を得ることができます(図6参照)。また、3ミクロンのグレーティングを作製しますと、500 GHz, 900 GHz に非常に狭い発光を得ることができます。

こういう効果は、テラヘルツ領域の固体1チップの発光ダイオードの実現に利用できます。この素子の特徴は、一つは非常にコンパクトであるということ、もう一つはプラズマ振動の周波数は、電子の密度やグレーティングアンテナの周期によりますから、波長を任意に設定できる波長可変性があるということです。

(3) 量子井戸中のサブバンド間遷移を用いた遠赤外光検出

いま2つの例を挙げて、THz 光を発生する方の話をしたわけですが、光を受信する方もいろいろ進歩があります。その一つの例として半導体量子井戸構造中のサブバンド間遷移を利用したTHz 光検出器についてご紹介したいと思います。ガリウムヒ素、アルミニウム・ガリウム

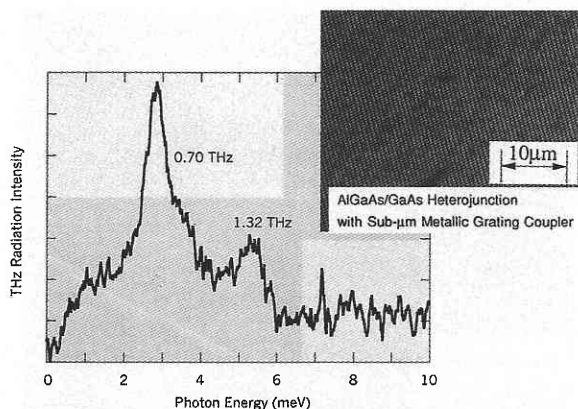


図6 AlGaAs/GaAs ヘテロ構造試料表面の金属グレーティングと2次元プラズモンからの発光スペクトル

ヒ素という異なる半導体を接合しますと、エネルギー帯構造を、矩形状の井戸型の形にすることができます。特に各層の厚さを薄くしておきますと、量子力学的な効果によりまして、電子の動きは量子化され、電子がとるエネルギーも離散的になります。このエネルギーは量子化エネルギーと呼ばれ、その大きさは、層の厚さを薄くすれば薄くするほど大きくなるという性質があります。それをうまく使ってやりますと、量子準位間のエネルギー差を所望の周波数に対応するエネルギーに合わせることができます。この構造に光が入射すると、電子は上の準位に励起され、その電子が電流を運ぶということを利用してディテクターをつくることができるわけです。この素子の特徴は、一つは量子井戸と呼ばれる層の厚さを制御することによって感度波長を設計することができること、もう一つは非常に高速のディテクターをつくることができるという点です。

その性能の例として、ベル研ではこの効果を用いて、量子井戸構造ディテクターを128×128コ集積しまして10ミクロン帯の赤外線イメージングアレイを作製しています。この素子は、非常に高い温度分解能を有しており、0.01度の温度の差まで識別可能です。

(4) 量子ホール効果を用いた超高感度遠赤外光検出

最後にもう一つ、量子ホール効果という、特異な効果を使って遠赤外ディテクターをつくるというお話をします。半導体ヘテロ構造の面に垂直に強い磁場を印加しますと、磁界の力で電子が回転運動(サイクロトロン運動)をします。このため、電子が占有できる状態(状態密度)は山・谷というような周期的な変調を受けます。この電子の状態密度の変調により素子の抵抗も振動的に変化いたします。特に、ちょうど谷に対応するところでは、素子の抵抗がゼロになってしまうという非常に特異な物性が知られていて、それは量子ホール効果と呼ばれています。この効果をうまく使って超高感度のTHz 光検出ができるのです。

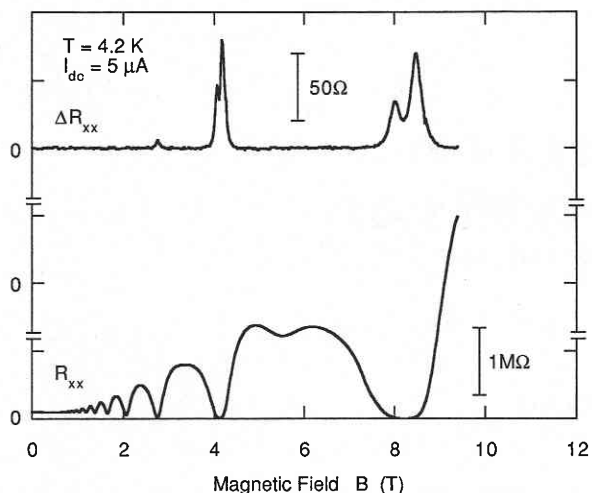


図7 量子ホール効果を用いた超高感度 THz 光検出. 素子の磁気抵抗 R_{xx} と THz 光による抵抗変化 ΔR_{xx} .

状態密度が極小値のとき電子の比熱は非常に小さくなるということが知られておりまして、ちょうどそのときに光が入射し、電子がこの光を吸収しますと、ほんのわずかなエネルギーを吸収しただけでも非常に温度が上がります。そ

の結果低抗が変化して大きな光信号を得ることができるのです。この効果を使いますと、市販のテラヘルツ光のディテクターに対して感度が100倍から1000倍ぐらい高いようなディテクターを実現することが可能であることが最近わかってきました。

5. お わ り に

後半の時間を用いまして、いくつかの THz 光素子の例をご紹介しました。そこでわかっていただけたかと思いますが、従来デバイスの延長線上では、どうしても暗黒のテラヘルツ領域というのは克服しがたいところがありました。それが最近の電子材料の開発ですとか、超微細加工ですとか、新しいレーザー技術を使ってだんだん外堀が埋まってきたという印象を持っております。この状況を生かしてテラヘルツ領域の周波数資源を開拓し、すべての周波数領域を人間が自由に使えるようにするという「周波数の完全開拓」を目指して、ますます柔らかな発想で、新しい概念のデバイスを創生していく努力が、今後ますます必要であると思っています。

ご清聴ありがとうございました。

(1996年6月6日講演)