

## 集まる光、広がる光 —発展する光エレクトロニクス—

東京工業大学精密工学研究所長・教授 伊賀 健一



皆さんこんにちは。ご紹介いただきました、東京工業大学の伊賀でございます。

本日は、ご案内のように、光エレクトロニクスに関するお話ということで、同僚の大津元一教授とともに、われわれができる範囲の科学と技術についてご紹介申し上げたいと思います。

先ほどご紹介がありましたように、この計画を私どもが立てまして、電子情報通信学会の後援をというときに、ちょうど同学会の一つのソサエティーであるエレクトロニクス・ソサエティーの会長を務めておりましたので、面映ゆい感じで、後援をしようというふうな

お願いをした記憶がございます。

今日の講演会ポスター（図1）では、右上のマルの中と左下のマルの絵が私のもので、真ん中が大津教授の使います写真でございます。ということで、「光」についての話を始めさせていただきます。

まず光であります。光とは何であるか。太古の昔から光は存在していました。燈火とか、いろいろな使い方を昔からやっていたわけですが、情報を伝えようということで使われ始めたのが、知られているところでは7世紀、中国の唐の時代に「のろし通信」として使ったという記録がございます。テレビのコマーシャル等でも放映されています。

日本は外国のものをすぐに取り入れる技術、これは昔から今も変わらずあったようでして、すでに7世紀に、奈良の都にのろしの通信を取り入れて、韓国・朝鮮半島からの情報をいち早く都に伝える通信方式が存在したという記録がございます。

中国ののろし通信は、4本の煙、4チャンネルによるPCM、パルスコードのモジュレーションですね。煙の大きさ、途切れで通信をする。日本は何かにつけて簡単化するのが得意でして、3チャンネル、3つでやろうというふうに簡単化されたようであります。このようにして、もう千何百年前から光を使った通信のシステムが、非常に高度に利用されていたというわけです。

光を実際に送って電話にしようということを考え出したのは、19世紀の終わり、ご存じアレキサンダー・グラハム・ベルです。電話

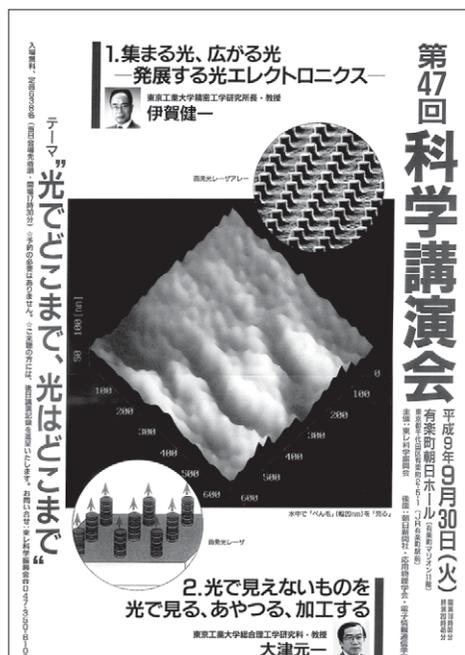


図1 光でどこまで、光はどこまで（ポスター）

の発明者であります。1880年電話の発明と同時に、光電話、フォトフォンとありますが、太陽の光を光源として望遠鏡で送って、パラボラの鏡で受けて、ワトソン君が「聞こえますよ」という実験をしております。したがって、1世紀以上に光通信というものが出ていたわけですが、これから1世紀かけて、いろいろな光通信、光を实际にしようという試みがなされてきました。

光を出して、それで実際に情報を乗せたり処理をしたいということなのですが、では、どうやって光を出すのかということですが、これは実は、今年の私どもの大学院の入学試験問題であります。私が出したんですが、もう終わっておりますからお話してもよろしいわけです。

どうやって光が、あるいは電磁波が出るかという問題ですが、プラスとマイナスの電荷があって、+の極から-の極へ、リングのような電気力線が出来ます。次に、この電荷が急にひっくり返ると、電荷が+から-に反転しますから、ここに電流が流れ、それで磁界が発生します。この+と-の電荷が行ったり来たり交互にした場合に、電界の向きが行ったり来たりします。それから磁界の向きが行ったり来たりします。こういうことで、ダイナミックに電荷の向きが変わりますと、無理やり電界・磁界が外へ押し出されて、これが電磁波として出てくるわけです。皆様お使いの携帯電話、これも同じで、アンテナのところで+と-の電荷が行ったり来たりするので、電磁波が出るという仕掛けです。

光の場合は波長が短いわけで、この電荷の間隔は非常に短い。Å（オングストローム）ではかるような大きさになるわけですが、電波が出るという仕組みは全く同じであります。

光の場合、電子の+と-がどういうふうに変化するか。いろいろな場合がございます。たとえば、原子を考えてみますと、そこには電子が束縛されています。外からエネルギーを与えますと、その束縛された電子がいろいろな状態をとるようになります。どの状態か

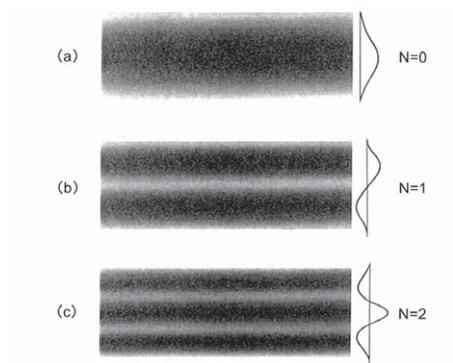


図2 光ファイバーのモードの電界強度分布と干渉

わからない状態、これを量子力学的な状態で言いますと、いろいろな状態の重ね合わせで表されるということになります。

そうしますと、電子の雲の偏りが出来て、それが振動し、それで光が出る。つまり小さいダイポールアンテナが出来るといふ仕組みで、これは携帯電話と原理は同じだと思いません。

それで、いま光の波が出てきたとします。これは波長が短いものですから、向こうに進んでいるとしても見えない。だいたい波長は1 μm（ミクロン）くらいですね。向こうへ進んでいるとしまして、これにもう1つ斜めに光を加えていくんです。そうしますと、図2の中心部のように見えてきます。これはモアレパターンと称するものですから、光の干渉とは違うかもしれませんが、このモデルとしては使えます。したがって、波長が見えないくらい短い、まあ1 μmくらいですが、それが干渉しますと、こういうふうには、われわれの身近なmmオーダーの縞が見えるようになります。

それで、先ほどの図のように上下に反射があるとします。たとえば、これは光ファイバーをお考えいただくと、全反射で、斜めの光線がこのように伝搬して縞が出来るといふことです。そうしますと、光ファイバーの中を、どういう大きさの光が伝わっているかというのがわかります。これが光ファイバーの原理で、1つの集まる光です。

先ほど、見えた光は真っ直ぐ見えたんですが、

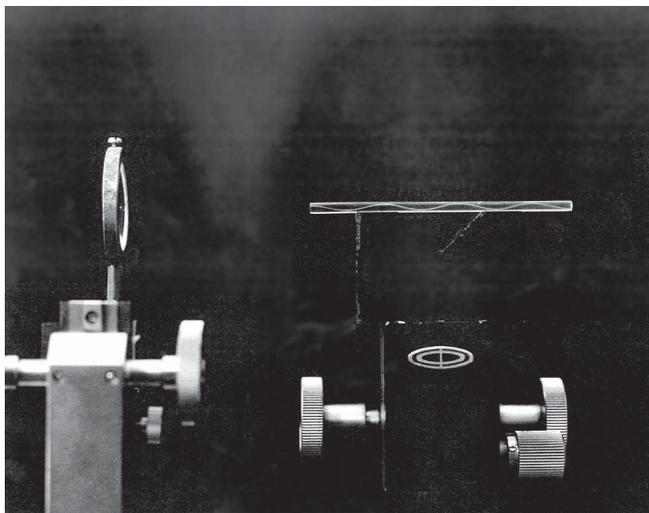


図3 分布屈折率ファイバー中のレーザ光伝搬

図3は、プラスチックのファイバーの中を、光がこのように蛇行している写真です。これは20年ぐらい前に、私どもの研究室で作ったプラスチックのファイバーです。ファイバーといっても4mmぐらいの直径ですから、比較的太い。最近話題になっておりますプラスチックの光ファイバーは、これを糸状に細く延伸すれば出来上がるということです。

この図では、光がこのように蛇行しているように見えます。先ほどの干渉縞が真っ直ぐであったのに比べて、これは蛇行しております。どうしてかという、屈折率がこの中で二次元状に、真ん中が高くて周りが低くなるように分布をつけてあります。そうしますと、斜めに伝搬していた光が少しずつ曲がりますので、干渉縞がこのように蛇行して見えるということになります。巨視的にこのように見えるわけです。

われわれ、光ファイバーを扱うのに、こういう模様のことをモードといいます。ファッションのモードと同じ字を書きます。中国は、模様の「模」という字を書きますね。さすがに中国の方々は漢字で英語を表すのがお上手で、1字で「模」と書くわけですね。私が中国に旅行したときに講演をして、ついでに、「模度」と、「度」をつけたらいいんじゃない

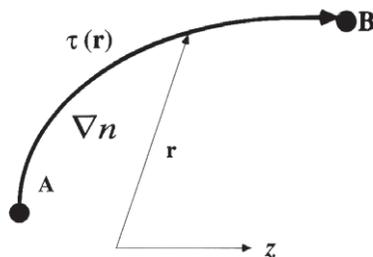
かと申し上げたことがあります。

こんなふうに光が伝搬しておりますので、光線がこのように蛇行して見えると言っても、あながち嘘ではないんですね。非常に便利ですから、「光線がこのように蛇行しながら伝搬しますよ」と、よく言います。

いま申し上げたように、光は真っ直ぐ進むかということ、それはそうではない。真空中のみ平面波が真っ直ぐ進むということです。屈折率を  $n$  とよく表しますが、これが空間的に変化しているときに、たとえば図4のA

というところからBというところに光が進む。先ほどのように蛇行して進んだりしますが、これはどのように進むかということを考えてみます。

そのとき、光学ではこの屈折率の勾配、逆三角形の  $\nabla$  という記号で微分をとったもので、勾配を表しますが、屈折率の勾配に比例した曲率で光は曲がります。この微分方程式は、屈折率分布がわかれば解くことができます。Aから始まって初期値問題と称する微分方程式を解いていけば、光がBへどう行くかというのがわかる。これは比較的理解しやすいですね。



$$\frac{d^2 \mathbf{r}}{dz^2} = \nabla n \quad (\text{光線方程式})$$

$$\tau[\mathbf{r}] = \min \quad (\text{フェルマの原理})$$

図4 光の進む方向

ところが、もう1つフェルマの原理というのがありまして、これは「AからBへ行く時間を最小にするように光が伝搬します」という原理です。両者は矛盾はしません。面白いのは、AからBへ、——私もきょう、大学からこちらの有楽町まで参りましたが、どのような原理で2点間を来るか。たとえば安く来るか、時間的に早く来るか、快適に來れるか。このような条件があるわけですが、光の場合は伝搬時間を最小にするように伝搬しろという原理で、フェルマさんが言ったんですね。これがいろいろな物理事象に矛盾しなければ、この原理は正当とみなされるわけで、実は正当とみなされているわけです。光が面白いのは、AからBへ最短時間で行きなさいと。われわれはいろいろな実験をして、AからBへ一番安く来るような実験をして、情報を得ていくわけですが、光は実験をすることなしに、最短時間で、もう、いきなり行きますよ、ということがわかっている。これは非常に不思議なことだと思っております。

もう1つは、集まる光です。図5のようにレンズがありまして、光が入ってきますと焦点に集まりますが、1点になりません。これは残念なことに、波長が有限、 $1\mu\text{m}$ といえども0ではないために、エアリーパターンと称する、ここは二重しか書いてございませんが、たくさんの輪が出来ます。一番強いところの大きさをおよそ直径としますと、これは波長に比例します。それからこのNAと書いてあるのは、レンズの開口数 (Numerical

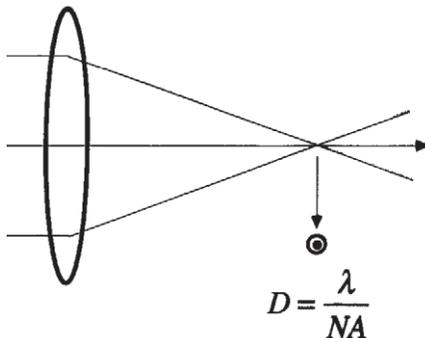


図5 集まる光

Aperture) です。この光線角度、半角 $\theta$ のサインをとったものでありますが、レンズが大きくて焦点距離が短いほど大きいわけですね。したがって、この大きさに比例するので、たとえばあとで少しご紹介します光ディスクに使う場合には、波長が短いほうがよろしいということになるわけです。これが集まる光です。

このようにして、広がる光、集まる光、これが光エレクトロニクスにどのように使われ、私どもの研究がどのようにかかわっていくかというお話を、これからさせていただきます。

まず、光を出すほうですが、1960年7月11日の「朝日新聞」の夕刊に記事があります。この記事をお教えいただいたのは、霜田光一先生です。今日おみえになっておりまして、「ジャーナリズムがレーザを取り上げたのはいつでしょう？」というご質問を申し上げたら、わざわざ送っていただきました。ここで改めて御礼申し上げます。この中には、「原子力ランプ」と書いてございまして、その原子力という言葉がいろいろ使われるわけですが、レーザこそ原子力であると私は最近思い始めています。すなわち、核の力ではなくて、原子にまつわる電子の変化によって光が出るわけですから、原子力ランプというのは、いい名前だなと思います。特に、あとでご紹介いたします、半導体で照明をしようということがだんだん出てまいりますので、このランプという言葉が、光エレクトロニクスの中でも、これから大きな比重を占めるのではないかと思っております。

レーザが出来たのが、先ほどの新聞が発表になりました1960年です。ちょうど私が東京工業大学の学生として、私の恩師であります末松安晴前東工大学長ですが、その研究室に入ったのが1962年です。レーザが出来て2年後。ちょうど半導体レーザが出来た年で、卒業研究のかたわら、初めての半導体レーザの論文を勉強したりしていたわけです。ルビーレーザを研究しようということで、レーザの研究を始めました。ルビーレーザは、

ルビーの結晶に光を当てて、先ほどのアンテナでいきますと、この固体の中に、ルビーの中にあるクロムの3価のイオン、これの原子の状態を変えてやるということから、光が出たりあるいは増幅されたりして、鏡が両方について発振する。私どもの大学におきましては、最初のレーザではないかというふうに思います。規則的なパルスで発振する緩和発振といいますが、パルス状に発振いたしません。これを当時は、きれいに周期的に出すというのが、一つの研究の目標であったわけです。

そして、何を間違ったのか、私がエラーをして、鏡を凸面に磨いてしまった。レーザをよく発振させるために、平行あるいは凹面に磨くんですが、凸面に磨いてしまった。発振をしましたがすぐに壊れてしまって、詳しいデータがうまくとれませんでした。初期的データを発表したり、いろいろ計算をしたりなんかしました。後にスタンフォード大学で、こういう共振器というのは不安定共振器とよばれるようになり、現在でも高出力レーザに、この逆向きのミラーが使われるようになってきました。あまり大きなことは言えないのですが、初期にこういう新しいレーザを作ったということになっております。

さて、図6に示すように1960年にレーザが初めて登場し、いろいろなレーザの基礎研

究が始まります。それに加えて1970年、ちょうど10年おきに大きなイベントがあるようですが、光ファイバーを使った光伝送の技術の芽生えというのがございます。これから光通信が出てくるわけです。

さらに10年間を経まして、1980年に光ファイバーも本格化して、電話が光で送られるというふうになってきて、光技術が発展します。いまの世の中に近くなった1990年、光ファイバーがネットワーク化され、国際的にも海底ケーブル等々で、地球を光ファイバーの網が覆うというふうなことになってきて、現在に至ってきております。そろそろ光技術がコンピュータの世界、インターコンネクションと申しますが、そこに入りつつあるという時代を迎えております。これから可視全域の半導体レーザとか、最近の話題をご紹介申し上げます。

こういうふうな、10年ごとにイベントがあるわけですが、その途中で光ディスクというのがございます。1984年頃です。これは皆様もお持ちだと思いますが、CD（コンパクトディスク）に半導体レーザが必ず1個入っております。光によって情報を記録し、それを読み出すという技術が、1980年代の中頃に出て参りました。これはオランダのフィリップス社と日本のソニー社が共同で開発し、現在への発展を見ております。その頃、全世界にレコードプ

1960 レーザの基礎研究	1962 ルビーレーザ単一モード化	レーヤー、アナ
1970 光伝送技術の芽生え	1965 光伝送理論と実験	ログレコードで
1980 光伝送技術の発展	1979 面発光レーザ	すが、約2億台
1984 光ディスクの芽生え	1979 平板マイクロレンズ	あったそうであ
1990 光ネットワーク化 光情報処理	1982 積層光集積回路	りますが、1～
1995 光インターコンネクション	1986 多重量子障壁提案	2年のうちにそ
1996 可視全域半導体レーザ	1988 GaAs面発光レーザ室温CW	のレコードプレ
	1991 平板マイクロレンズ実用化	ーヤーをコンパ
	1993 波長1.3μm面発光レーザ 室温連続発振	クトディスクが
	1993 アップリンク	駆逐したという
	1995 しきい値70μA	か、もっと大き
	1996 RBS発明と実用化	く発展して現在
	1997 超並列光エレクトロニクス	に至っているわ

図6 光エレクトロニクスの発展

けですね。つまり、一家に1台という時代から、1人に1台とか、車1台に1台とか、そういうふうなことになったために、非常に大きな発展をしているわけです。最近ではいろいろな形の、もっと高密度な光ディスクに発展をしています。

少し細かくなりますが、私の研究をこれからご紹介申し上げます。図6に示してありますが、先ほど申し上げましたように、レーザーの最初の頃からルビーレーザーの研究をしていました。先ほどご紹介ありました面発光レーザーを考えついで、それから同じ頃、平板マイクロレンズというレンズの集まり、これを考えつきました。それからそれを重ねて光の集積回路、光の処理をしようということを目指したのです。ちょうど1980年の前後というのが、私にとりましては、発明としては面白い3つの発明というふうに申し上げてよろしいかと思えます。それからずっと研究をしてきているわけですが、だんだん発展してきたと申し上げてよろしいかと思えます。

その前に、図7に示す光エレクトロニクス

全体を眺めてみますと、先ほどご紹介しております光通信、これは通信にとってはなくてはならないものになってきておりますし、光ディスクがマーケット的には一番大きい。それから、あとは光を使った電子機器、レーザープリンターのようなものですね。それから光センシング、ロボット等にいろいろなセンサーが必要になってこようと思っておりますので、これから本格的になると思えますね。それに光情報処理や光コンピュータということですが、いろいろな認識とか、その情報を処理しようという分野ですね。それから先ほど申し上げましたコンピュータへの光の導入ですが、ごわごわのケーブル、網の目のようなワイヤーを光ですっきりまとめようということですね。

図7は光エレクトロニクスの分野であります。右側は加工であるとか、医用応用であるとか、エネルギー開発、芸術、環境、その他というのがございますが、先ほど申し上げました照明なんか、ここに登場してくるのは間違いのないところです。右側がパワーを使う、左がその光である情報を使うと、こうい

うふうな応用として発展しつつあります。

日本の総売上を、光産業技術振興協会が毎年統計を出しておりますが、光が関係しているものを全部まとめて約4兆円規模に発展しております。エレクトロニクスが30兆円くらいということでしょうから、1割ぐらい光が関係していると申し上げてよろしいと思えますね。

いま使っておりますような、こういうレーザーポインターがポピュラーになって

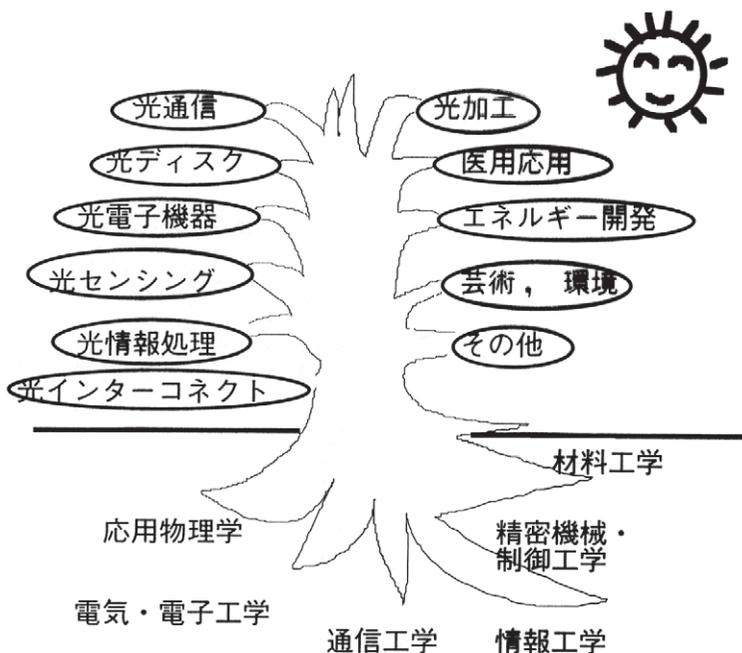


図7 光エレクトロニクスの分野

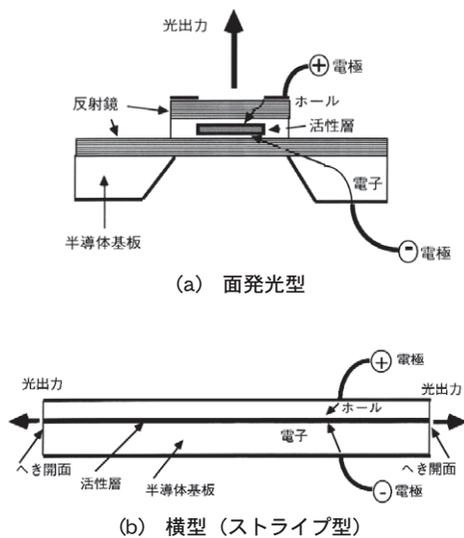


図8 半導体レーザーのモデル

参りましたが、そのほとんどが半導体レーザーです。その中身を調べてみますと、図8の(a)に示すような半導体の板があって、板に沿って光が伝搬する。大きさですが、長さが約 $300\mu\text{m}$ 、 $1\text{mm}$ に3個入るような長さ、これがレーザーポインターの中に入っているわけです。光が伝搬するわけなのですが、その大きさ、縦方向の厚みというのが、光が出るところは、なんと $100\text{\AA}$ 以下というのが、最近の量子井戸レーザーと称するものです。それから奥行きですが、これも $1\mu\text{m}$ 程度という、いわば細長い板のようなところを光が伝搬していく。これがこれまでの従来型レーザーです。

ところが、先ほどのルビーレーザーでもあったように、鏡がないとレーザーの共振器が出来ない。すなわち、光が伝搬して、反射して戻って来て、ちょうど位相が合うようなところで共振する。ちょうど音響の共振等もみんな同じですね。ときどきスピーカーがワウ音を出したりしますが、それも発振の現象で同じことです。

これを作るために、通常ほとんどの半導体レーザーでは、両端をナイフで切るわけです。きれいに割れるんですが、最近はロボット化されておりますけれども、基本的には手仕事

です。大きな半導体のウェハを割る、割るまでレーザーにならないわけですね。半導体のおせんべいのままです。

一方、エレクトロニクスにおける集積回路というのは、よくテレビ等に出て参りますが、集積回路がすでに出来ている、もう働くわけですね。それを分離するだけということです。

1977年頃、私も模型のレーザーを作っていたんですが、何とも、最初からレーザーにしたいという、そういう考えがございまして、夜な夜な考えておりました。それでレーザーの共振器が横なものだからだめだ、これを横のものを縦にしたらどうなるかということから、面発光レーザーを思いつきました。それは共振器を上下にする。ちょうど日光の鳴き龍のように、天井と床で反射させる、こういう仕組みですね。そうしたらいいんじゃないかということです。最初に思いついたのが1977年のことです。すぐ実験にかかりまして、1979年に初めて発振を得ました。

私はその頃——いまもそうなんですが、研究ノートをつけていて、夜中も枕元に置いていて、思いついた図9のようなアイデアをすぐ書きつけました。上下に鏡を置いてp-n接合、p型とn型の接合をつくって、エレクトロンをnから、ホールをpから注入して、ここをプラズマ状態にして光らせる、増幅作用を持たせる、それに加えて上下に鏡をつけ

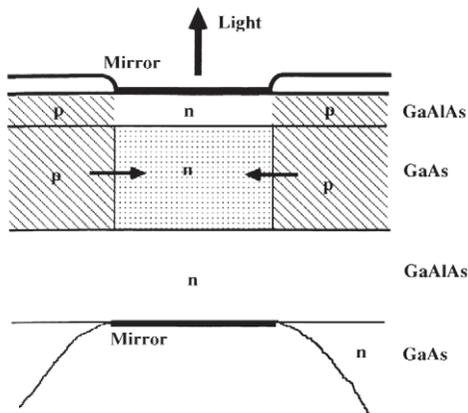


図9 最初の面発光レーザーのアイデア

たらいいじゃないかというのが、もともとの考えです。

先ほどご紹介しました1979年に、これは $1.3\mu\text{m}$ という波長の光を出しますガリウムとインジウムと砒素とリンという、この頃、私どもの大学も初めてこういう試みをしていたグループの1つであり、これが光通信の一番大事なものになっているわけですが、その材料を使って作りました。中央に光るところを作って、上下に金の反射膜を設けます。

こういうわけですから、反射率も低いし、温度を下げないと光らない。パルス状で発振をさせるための電流の大きさも1A（アンペア）という、非常に大きな値で、やっと発振してすぐ壊れてしまう。こういう状況でしたが、とにかく発振したわけです。

それで、ずっと研究を続けて、途中経過はあるんですが、「面白い形だけれども、将来ものにならないよ」と皆さんおっしゃっていたんですが、まあ、諦めずにやるのが大学の研究ですから、やりましょうと。

1988年になりまして、結晶成長技術が非常に進みまして、気相成長が私どもの研究室でもできるようになりました。これは毎年、科学研究費などを頂戴しては部品を買いために作ったものです。

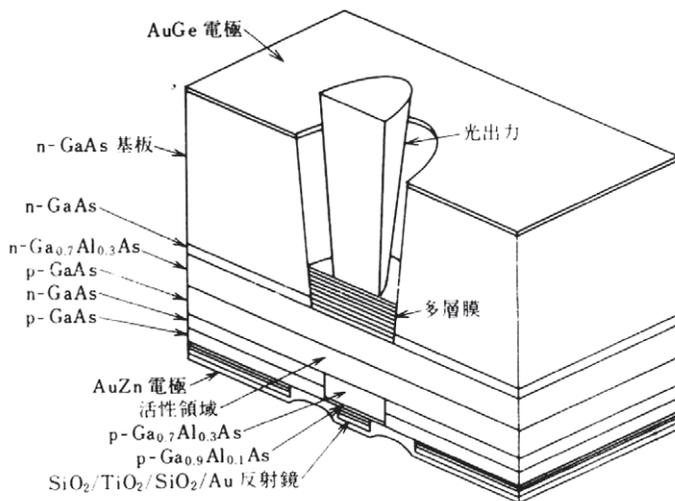


図10 MOCVD法によるGaAs系面発光レーザー  
(世界で初めての室温連続発振)

図10のように上下に反射鏡があるのは同じなんですが、各層が非常にきれいに出来るようになりました。小山二三夫助教授らの努力が実って、1988年に室温で初めて連続動作をするようになりました。これが皆さんが、面発光レーザーがものになるかもしれないなあと思われた、1つのポイントです。

翌年ですが、当時AT&Tにいましたジャック・ジュエルという人が、やはりこういう小さいレーザー、これは $10\mu\text{m}$ ですから、 $2\sim 3\mu\text{m}$ の大きさですが、こういうレーザーを作った。これ1個がレーザーになっていますね、面発光レーザーです。半導体の結晶を使いましてミラーを作るということですね。それで発振しきい値が2mA。われわれのはその当時20mAくらいまでで、室温で下がってききましたが、1桁下げた。この2つのイベントが、面発光レーザーは面白いと、そういうことになったきっかけです。

ちなみに、このいよいよ、健康足踏み器みたいなレーザーなんですが、1個のいよいよの中に、ミラーと活性層と全部入っているんですね。半導体でこういうふうな反射鏡を作れないかということで、私どもは1984年ぐらいから始めて、1986年に半導体でのミラー作りに成功しました。いまOHPを手伝って

おります、私どもの助手の坂口君が作ったものですが、それからだんだん皆さんがその真似をして、こういう半導体の結晶成長だけで共振器も作るということをおやりになるようになってきたわけです。

1979年ぐらいから最初の論文が出て、論文数が少しずつ増えているんですが、私どもの大学が主なそのソースであったわけです。この後、さっきのイベントから急激に出版数が増えています。まあ、1989年頃までは自然放出自体なんですが、1990年から研

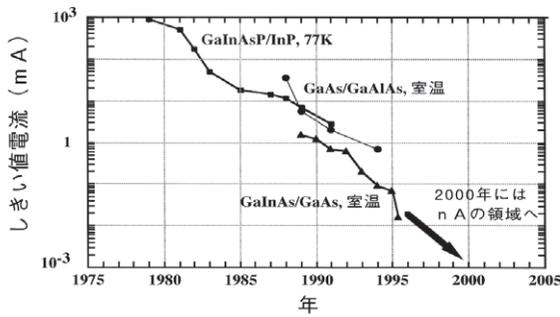


図11 面発光レーザーしきい値の推移

究の誘導放出が始まって、皆さん影響を受けてどんどん論文を出されるようになった。1996年あたりですが、年間のジャーナルペーパーの数が400件くらいというふうに統計でなっております、論文数がずっと増え続けております。

図11の横軸は年で、縦軸が面発光レーザーが発振するための電流容量です。ミリアンペアで書いています。前に申し上げましたように、最初は10の3乗mAで、1mAを90年ぐらいに切りました。最近では、サブミリアンペアといいますから、10μAぐらいのところまで達して、これが材料とか温度とか、パルスであるとか、連続波であるとか、全部違うんですけれども、どうも1つの傾向があって、今世紀の終わりぐらいには、1μAというオーダーになると予想されます。

この量がどのぐらいの大きさかといいますと、現在レーザーポインターなんかに使っております半導体レーザーのしきい値が、約10mAくらいということですから、それよりも3桁小さくなるだろうということです。したがって、そうしますと、いろいろな応用に電力を消費しないでレーザーが使えるわけですから、非常に具合がよろしい。

いずれにしても、最初から見ますと、現在5桁くらい下がってきて、どのような半

導体レーザーのしきい値も、面発光レーザーに追いつかないという状況が生まれてきております。

図12において、(a)は普通のレーザー、横型のレーザーですが、(b)は縦型のレーザー (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) で、世界中の人たちがそういうふうによびだしております。ピクセルというふうな省略を皆さんお使いです。ここではその比較をしております。一番大きな違いは反射率ですね。普通のレーザーは半導体を割っただけですから約30%ぐらいですが、これが99.9%ぐらい必要です。それからレーザーの共振器の長さが300μmぐらいというのが普通なんです、それが2分の1波長か1波長かと、本当にその波の波長の長さの共振器で発振器が出来る。マイクロ波の発振器等ではそういうふうになるわけですが、光もそうやってきたということです。ほかのレーザーはいかに大きいかということですね。

図13に面発光レーザーの特徴をまとめてみます。先ほど申し上げましたように、ウェハ

Parameters	Symbol	(a)	(b)
		Stripe Lasers	VCSELS
Active Layer Thickness	d	100Å-0.1μm	80Å-0.5μm
Reflectivity	R <sub>m</sub>	0.3	0.99-0.999
Cavity Length	L	300μm	0.3μm (λ/2-λ)
Optical Confinement Factor	ξ	0.5%	3% x2
Area of Active Region	S	3x300μm <sup>2</sup>	5x5 μm <sup>2</sup>
Photon Lifetime	τ <sub>p</sub>	0.1ps	0.1 ps
Relaxation Frequency	f <sub>r</sub>	5GHz	10GHz

図12 半導体レーザーの比較

のままレーザーにならないかということ、素子分離がなくてもレーザーの検査ができる、こういうことを動機として発明したんですけれども、最近になりますと、1個のチップのコストが非常に安くできそう、量産に向いているということがわかってきました。それからいろいろなパッケージをするんですが、そんなものは必要ないなど、もろもろの特徴が

- 1) 低チップ価格と高い量産性
- 2) 素子分離前のウェハ単位の検査
- 3) ボンディングとマウントの容易さ
- 4) 高価なパッケージ不要
- 5) 光ファイバとのモード整合容易
  - 単一モードから1mm程度の大口径まで
- 6) 1mA以下(1μAに迫る)極低しきい値動作
  - $(I_{th})/I_{in} > 100$ が可能
- 7) しきい値が温度に鈍感
- 8) 動的単一波長動作
- 9) 大きい緩和振動周波数
- 10) 任意配置の高密度2次元レーザアレー
- 11) 積層・マイクロマシンのによる3次元集積化
  - 12) 基板と垂直な光出射
  - 13) LSIとのよい整合性
  - 14) 高い電力変換効率
    - (現在の最高:>57%)
- 15) 長い寿命
  - (現在の最高予測寿命:  $10^7$  時間)

図13 面発光レーザの特徴

出て参りまして、これから使う上では非常に面白そうだということになってきました。

図14にスペクトルを示してございますが、面発光レーザが大事な波長で、いろいろ使えるというふうになって参りました。ちょうど1オクターブというのが0.4~0.8μmなんです、オクターブというのは、ちょうど周波数が倍、半分ということですね。

余談になりますが、太陽の光は広いスペクトルを持ってまして、可視光はこの範囲にあります。植物というのは、ご存じかもしれませんが、青い光と赤い光が大好きで、色としてはピンクになるわけですね。それを吸収して成長する。緑が嫌いというんで植物は緑に見える。みんな透過したり反射したりして追い出しているわけですね。人間は緑が好きで、森へ行くのが気持ちがいいというわけですね。血が赤いというのは、赤が嫌いというわけで、赤を放出している。したがって、動物と植物というのは、太陽のスペクトルをうまくシェアして、みんな独り占めしないように、使っているようです。

それで、この色なんです、半導体でこれを全部出そうということが、最近だんだんできるようになってきました。これは日亜化学

工業が商用しました可視光のLED(発光ダイオード)ですが、共振器はついてないものなんです、こんなふうに、赤、緑、青と、RGBが出せるようになってきて、表示等にはすでに使われ始めています。これがレーザにならないか、ましてや面発光レーザにならないかというのが、私どもの最近の研究のターゲットです。

それで、半導体で光を出す材料について見てみます。ちょうどIV族というのが真ん中にありまして、これがシリコンが非常に重要でよく使われますが、その両わきにIII族、V族という元素があります。III族というのがボロンから始まって、アルミニウム、ガリウムというふうな列ですね。それからV族が窒素から始まって、リン、砒素、こういう列です。これのIV族を飛ばしまして、たとえばガリウム砒素というふうには、化合物を作りますが、こういうIII・V族とよびます半導体が光デバイスにもつばら使われております。ガリウム砒素が一番ポピュラーですが、先ほどちょっとご紹介しましたように、インジウムが入ったもの、リンが入ったもの、こういうふうな合金でいろいろな波長に対応しようということになってきております。

最近では、ガリウムに加えてアルミニウム、ちなみに、CD用ではガリウム、アルミニウム、砒素。それからレーザポインターではガリウム、インジウム、あるいはアルミニウムを加えて、リンも入っているというふうなことで、赤い光を出します。

先ほどの青い光は何かというと、ガリウム

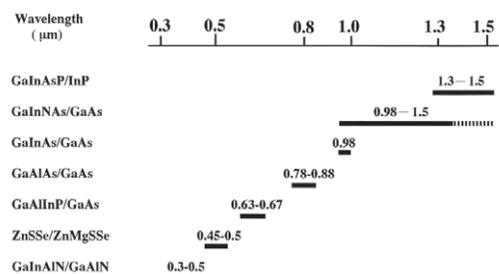


図14 広いスペクトル領域における面発光レーザ

と窒素。こういった組み合わせで、窒素が登場する。それからあとⅢ族のほうは、インジウムまではポピュラーに使われていたのが、今度はタリウムまで入れようと。温度が変わっても発光する波長が変わらないような材料ということで、タリウムの入ったものも研究されています。したがって、もうちょっと青から紫外のほうへいくとボロンもいる。こういうことでⅢ族はみんな研究のターゲットになっております。

それからⅤ族のほうも、まさか窒素が使えるとは思っていなかったのが、窒素まで使うということで、Ⅲ族、Ⅴ族を総動員という状況になってきました。われわれ闇の世界にいたのが、だんだんわかってきたということですね。これは自然界にはこういうものがありますので、われわれが実際に作っていくという、そういう作業をサイエンス、あるいはエンジニアリングの世界ではやっているわけです。

さて、面発光レーザ用の材料ですが、光通信に使うのは1.3μmとか、海底ケーブルでは1.5μmです。材料をいちいち申し上げませんが、いろいろな合金の組み合わせで出来る。それから一番短いほうは、紫外域に当たる0.3μmから0.5μmのこのあたり。あらゆる材料が面発光レーザ用に研究をされているということです。

もちろん一番ポピュラーなのは、一番真ん中の1μm前後ということでありますので、これから、最近の進展についてご紹介申し上げます。

ガリウム砒素という半導体、携帯電話の一番初段の受信機のところとそのICが使われていることが多いのですが、電子通信あるいは光通信に、このガリウム砒素は非常にポピュラーです。その上に、ガリウム砒素と、それからアルミニウム砒素という多層の結晶をつけますと、こ

こに光るもとでありますインジウム、ガリウム砒素というような、こういう材料を、80Åとか100Å以下の非常に薄い層、原子数でいきますと10層ぐらい、そのぐらいの量子井戸と称するものを成長させます。

したがって、この半導体の組み合わせは、分布ブラッグ反射鏡（Distributed Bragg Reflector：DBR）という多層膜の反射鏡に利用されます。30層ぐらいつけますから、多層の結晶成長のおけけみたいなものですね。これをコンピュータ制御の結晶成長装置がうまくいけば、プログラムどおりに作ってくれるわけです。

そのため、反射鏡そのものが内部にもう出来ている。それで光るところが非常に薄い。200~300Åというわけですね。したがって、光が共振する長さというのは、2分の1波長か1波長か、そのくらいということです。非常にぺっちゃんこのレーザですね。大きさに書いてありますが、本当は薄い。光は上に出るか下に出るか、いずれにしても表面からなので、面発光レーザと称しております。最近、私どもの研究室で作っている1μm帯の波長を出すレーザが、図15の構造をしております。上から見た大きさが5μmの丸という小さいレーザを作ったわけですが、そのときの室温で連続動作のしきい値が図16に示すように70μアンペア。したがって、商用になっておりますこういうレーザポインターの3桁

- ・カーボン高濃度ドーピングによる低抵抗化
- ・変調ドーピング量子井戸構造による低しきい値化，高速化

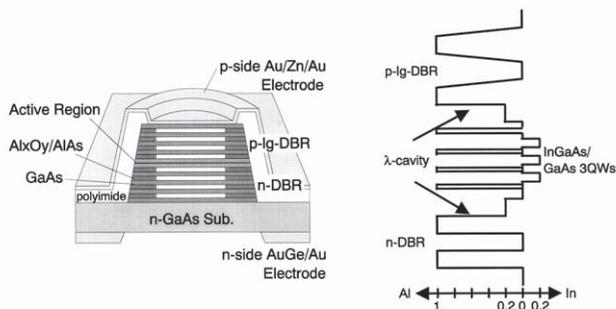


図15 面発光レーザの低消費電力化・超高速化

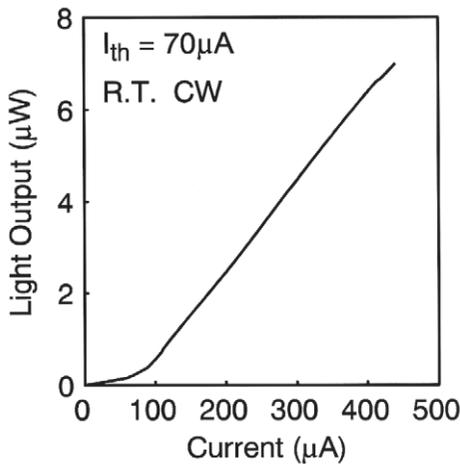


図16 低しきい値面発光レーザの出力特性

下ぐらいというふうに言ってよろしいと思いますが、こういうものが出来た。アメリカの国際会議で発表し、あるいは講演をして回ったんですが、アメリカも非常に大きな予算を使って研究をやっているもんですから、どうもトラの尾を踏んづけたみたいで、この記録はすぐ破られてしまっていて、いま世界で第3位ぐらいです。いずれにしても、こういうマイクロアンペアで測るようなというレーザが出来たわけです。電圧は約1.5V（ボルト）から2Vかけますから、電力でいきましたも、10μWとか、そのくらいの消費電力で光が出る。コヒーレントなレーザ光が出せるようになります。わりとあるわけです。

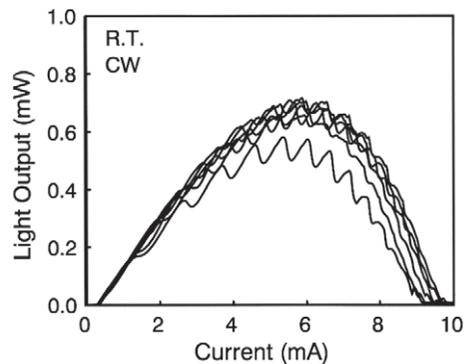
図17は同じ材料の最近のものですが、出力1~2mWぐらいが1つのターゲットですが、そのくらいは出せる。これは横軸が電源で縦軸が出力ですが、何個かこういうふうに合わせて、2次元アレイ状に作っています。もうちょっとこれは密に詰めることはできるわけです。こういうふうな、アレイと申しますが、そういうものがちゃんと出来るように、だんだん参りました。

これを情報伝送に使おうといったときに、光の情報が乗せられないといけません。どうやって乗せるかといいますと、連続的に光っているものは、情報を送っていません。ただ、光っているだけというわけですね。これをパ

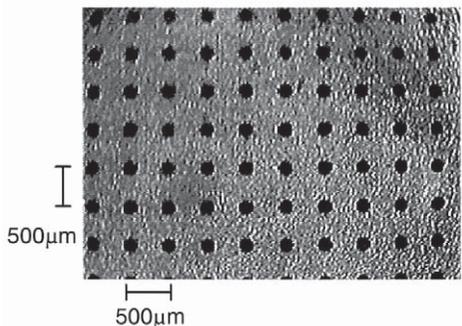
ルス状に変調することによって、情報をわれわれは伝えるわけです。その速さが速いほどよろしい。最近の実験では、周波数でGHz（ギガヘルツ）以上の速さまで、この面発光レーザが応答することがわかってきました。研究室では12GHzぐらいまで変調をかけています。世界記録に近いところですよ。

それで、ファイバーで少し伝送してみようということで、100mのファイバーで情報を実際に伝送して、誤り率なくうまく伝送できているということを示しました。これはコンピュータを繋ぐとか、そういう応用を目的としておりますので、そう何キロも先でなくてもよろしいわけです。

面発光レーザを上から見ますと丸です。偏波というのが光にありまして、電界の方向の向きを指すことが多いです。普通のレーザボ



(a) Current Confinement Region : 5μm x 5μm



(b) VCSEL Array Image

図17 低しきい値GaInAs/GaAs面発光レーザ (a) とアレイ (b)

インターのようなレーザは、例外なく直線偏波をしております。これは断面の横・縦の大きさが違うものですから、自然にそうなるんですが、面発光レーザの場合、上から見たレーザというのは円ですから、偏波面を決める要素が非常に弱い。実は、弱いんですけども、面発光レーザを作ってみますと、例外なく直線偏波で発振します。そうでないものは発振してないと言ったほうがいいですね。

ところが、温度が変わったり、いろいろな状況が変化しますと、その偏波面が変わる。これは応用上具合が悪いんですね。何とか安定しないといけない。これが面発光レーザの欠点といえば欠点なんですが、これまでいろいろな方法で安定化させようという試みをしてきました。たとえば、グレーティングを切って、反射率に電界のある向きと直交した向きで差をつけようとか、そういう研究をしてきました、まあ、うまくいったことはあったんですが、面倒くさいわけです。

そこで、図18のように、ごく最近ガリウム砒素の基板なんですけれども、(311)という結晶が傾いているものを使おうという研究を始めました。これですと、この中に電子とホールを注入しますが、そのときに、一番最初に申し上げました電子の雲が出来て、その干渉によって電荷の偏りが出来ると申し上げましたが、こういう上から見たときに、横

と縦で性質が違うような基板を使いますと、その電子の雲、ダイポールモーメントとよくいいますが、それに差がつく。したがって、光り方とか、それから光を増幅する能力が、上から見て横・縦で違うようになるんですね。こういうレーザを作ってみました。

それでいまの面発光レーザから出てくる偏波面、電界の振動方向なんですけど、これが非常に安定化される。すなわち、検光子の角度をぐるっと回してみますと、直線偏波で安定に発振するということがわかりました。

ごく最近、気相成長法によって、その(311)基板に成長する。これまで技術的にp型のドーピングができないとか、いろいろ難しかったんですが、それを何とかクリアして、1 mAよりも低いしきい値で発振するようなレーザが出来ました。

いまのは、だいたい1  $\mu\text{m}$ の波長とか、短い波長で、これは実用になっているレーザがあって、あとでご紹介しますが、売っている時代になりました。ところが、波長を横軸にとって光通信を見てみますと、1.3  $\mu\text{m}$ 、これはいま光ファイバー通信に使われている波長、それから1.5  $\mu\text{m}$ 、海底通信で使われている波長ですが、光ファイバー、シリカファイバーの伝送損失が非常に小さい、分散が非常に小さいということで使いやすいわけですね。この辺の面発光レーザが欲しいんですが、技

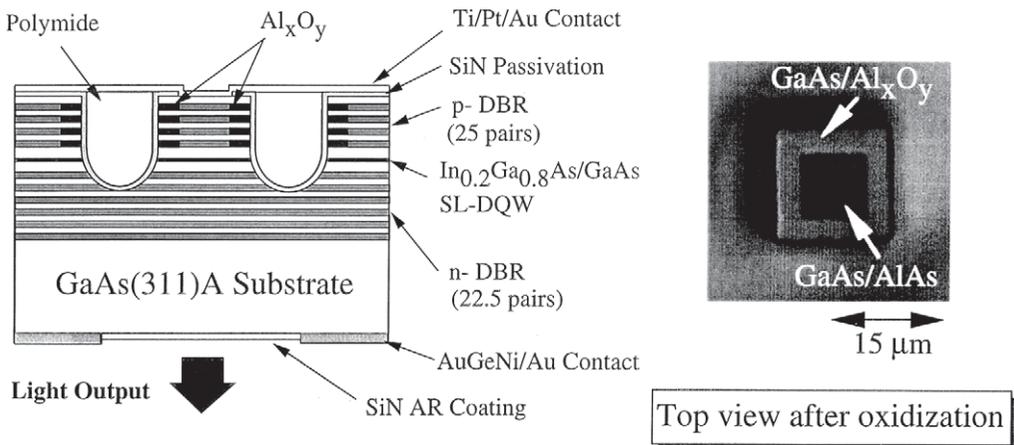


図18 (311) 基板上面発光レーザ

術的に非常に難しいわけです。そこをチャレンジしようというのが長年の夢なんです、それについて研究をしています。

図19では、 $1.5\ \mu\text{m}$ 帯のレーザなんです、中央にレーザが光る活性層と称するところがありまして、上下にミラーをつけて、という工夫で、77K（液体窒素温度）でしきい値0.3mAというのを記録しました。これは数年前なんです、これで何とか見通しがついたんですが、室温、われわれの住んでいる温度で、どうしても動作しにくいということで問題がありました。最近では世界的にも研究が広がっていて、室温で連続的に動作するようなレーザがぼちぼち出来始めております。

それでごく最近ですが、もうちょっと窒素を入れましょうという動きが出てきました。これは日立製作所の中央研究所、あるいは株式会社リコーの研究所などの先駆的な研究がありますが、それによってガリウムとインジウムと、窒素、砒素、これを使って半導体レーザが出来ないかという気運が、ここ1年強くなってきました。私は直観的に、ガリウム

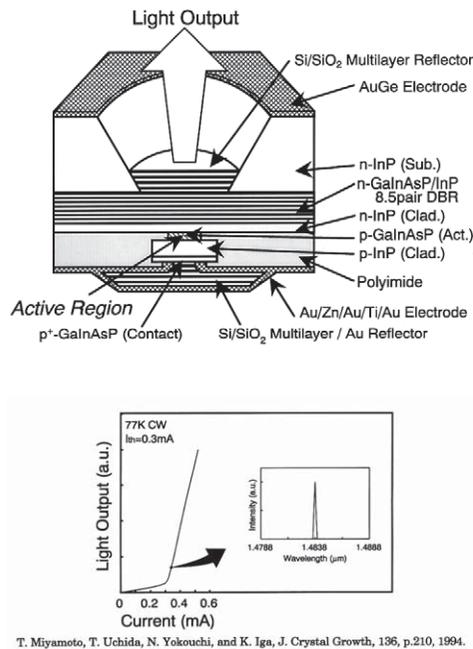
砒素の基板を使って面発光レーザが出来ないかということ、1996年4月のヨーロッパでありました国際会議で初めて申し上げました。長波長の面発光レーザのために、この材料というのは非常に具合がいいと思っていて、いま鋭意研究を進めております。

これはどういうことかといいますと、先ほどのガリウム砒素とか、アルミニウム砒素を基板とするような材料が全部使える。すなわち、ボディは出来ている。あとはエンジン。エンジンのつけ替えということでレーザが出来そうということなんです。いまのところ、結晶成長が非常に難しく、エンジンがまだ大丈夫というところまでいきませんが、これからよくなるかもしれません。ガリウム砒素に窒素を入れるということで結晶成長しておりまして、何とか窒素が入るとのご紹介だけにとどめさせていただきます。

それからブルー、青のほうであります、ガリウムと窒素を入れた面発光レーザが出来ないかということで、これも結晶成長をスタートとして、面発光レーザを目指して研究しております。こういうものが出来ると、ブルー・青、あるいは紫外の面発光レーザ、あるいは半導体レーザ、これから白色光を出せる。すなわち、蛍光をいまして緑と赤を発する。そうしますと白色が出来て、世の中の白色電灯というのが半導体化されるものになるかもしれないというわけですね。現在使われております蛍光灯の電力から光への変換効率が20%くらいで、かなり高いんですね。LEDですと10%ぐらいしか変換効率がとれませんので、どうしてもレーザでないといけません。紫外のレーザというのは照明のポイントだと思いますね。ブルーか紫外です。

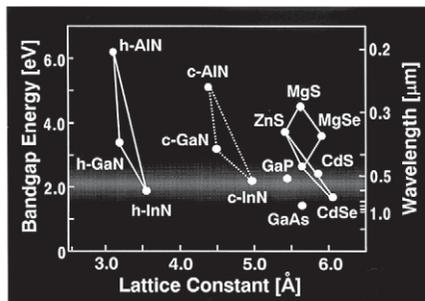
図20のような面発光レーザのお饅頭のような、これは直径 $1\ \mu\text{m}$ ですから非常に小さいんですが、こういうふうな面発光レーザの土台みたいなものをつくろうかという研究を続けております。もうちょっと実現には時間がかかるかもしれません。

図21はポスターの写真に使わせていただ



T. Miyamoto, T. Uchida, N. Yokouchi, and K. Iga, J. Crystal Growth, 136, p.210, 1994.

図19 マッシュルーム型面発光レーザ

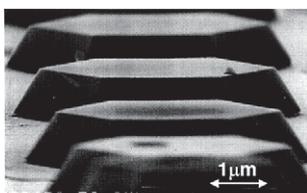


- ・有機金属気相成長を用いた選択成長法によるGa<sub>2</sub>N微小構造製作
- ・基板前処理法による結晶品質の改善
- ・面発光レーザのための極微ドライエッチング技術の確立
- ・高反射率を有する誘電体および半導体多層膜反射鏡の形成

図20 紫外・青色面発光レーザのための微細構造

いたものですが、このレーザの構造が中に全部含まれていて、この大きさが数ミクロンというものが並んでいます。これは電子ビーム露光装置でこういうパターンを描いて、イオンビームのような気相エッチングでエッチングしますと、きれいに真っ直ぐのものが出来るというわけですね。こんなふうに、研究室で加工法を研究をしまして、出来るようになってまいりました。直径0.5～1 μm以下で、高さは5 μmくらいですからかなり長細いですね。これはガリウム砒素系の材料なんですね。ガリウム砒素は比較的加工しやすいものですから、こんなモヤシのような構造も出来ます。波長のオーダーに近づいていくということが考えられるわけです。ただ、まだレーザは出来ていません。構造だけです。

この共振器の厚みが1波長ぐらいだと申し上げたんですが、この大きさも1波長ぐらいにしたらどうなるかということですね。普通のレーザは大きいので、電子とホールが再結合して光るときに全世界を見ているんですね。光のアンテナが全世界を見ているんです。量子力学の教科書によると、大きな箱を考えまして、そこで共振する波長は何かということを考える。2分の1波長の整数倍で共振するという原理は同じです。その箱が大きいものですから、たくさんの波長で共振するわけです。その箱の大きさを無限大にすると、ここ



選択成長によって形成された直径5ミクロンのGa<sub>2</sub>N

の中心になるアンテナがどれだけ自然に光を出せるかという、そういう能力が計算できるわけです。

ところが、この箱が小さい波長のオーダーですと、2分の1波長の1個か2個というふうになります。このアンテナが出せる相手というのが限られてくるようになります。

この問題というのは、面発光レーザを私どもがやっていて、小さいレーザが出来るということが、物理学者の人たちの興味をかきたてまして、自然放出制御、そういう分野が非常に発展しております。

電流を流すと光が出るんですが、先ほど来申し上げているように、普通のレーザですと、あるところまで励起を強くしていかないと、こういうコヒーレントな光が出せない。この、いわゆるしきい値以下は自然放出で、全世界を見ながらエレクトロンとホールが再結合して光を出しているわけですね。そういうものが禁じられてくると、電流を流すといきなりレーザの光として出てくるかもしれない。無しきい値のレーザというのがあるかもしれないというわけです。

ところが、このしきい値というのが、10mAであるとか、そのくらいのときですと、ほ

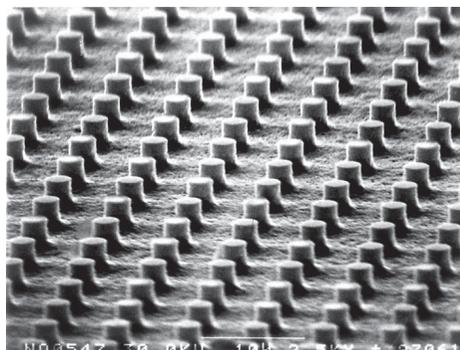


図21 極微構造の面発光レーザ

とんどしきい値がないよというふうに気楽に言っていたんですが、この値が $\mu A$ ぐらいになってきますと、よほど慎重にしないとしきい値がないと言えなくなってきた。非常に難しい、技術と科学の接点が非常に厳しくなった状況であります。そういう問題が出て参りました。

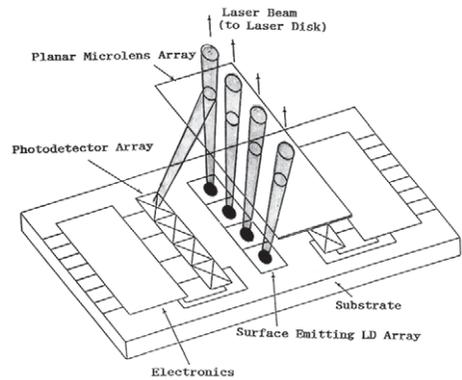
面発光レーザはいろいろ発展してきました、現在では全世界数十機関といますか、ほとんどの研究所で研究しております、いろいろな応用を考え始めております。一番大きな応用が、光でコンピュータを繋ぐ、インターコネクトと言っております。そういったものですね。それからあとは、うまくいけば光メモリの様なもの、それから光センシングの様なもの、こういったいろいろな応用に使えるだろうと思えます。

ヒューレット・パッカードのワン博士という、元気のいい若い研究者は、20世紀の終わりまでに、ほとんどの半導体レーザが面発光レーザに置き替えられるだろうなんていうOHPを、国際会議で見せて息巻いておりますが、ある部分はそうなるかもしれません。

アクティブに面発光レーザの研究あるいは製造をしている会社をご紹介します。アメリカの会社を中心としたもので、モトローラ、OETC、POLO、ピクセル、この辺が全部面発光レーザを使っています。これは、アメリカの国家的プロジェクトではイノベティブ・テクノロジーが必須ということで、面発光レーザが新しいということから取り上げたものです。

たとえばヒューレット・パッカード社は $0.85\mu m$ の面発光レーザを使ってモジュールを作っております。3×4cmくらいの大きさで、100Mb/sぐらいの通信速度でワークステーションを繋ぐというものです。こういうものが出来て商用化されて売っております。ハネウェル社、モトローラ社なども、面発光レーザが10個入っているモジュールやチップも売っている状況です。

日本もNTTをはじめ大きな会社が研究を



K. Iga, Surface Operating Electrooptic Devices and Their Application to Array Parallel Signal Processing, 16th European Conf. Optical Comm., vol.2, no. WeB2-1, pp.895-932, Sept. 1990.

図22 面発光レーザを用いる光ピックアップ

しておりますが、なかなか売り出すところまでいっていないのが現実です。一方、アメリカは大きな会社、あるいは小さいベンチャーが果敢に商用化を図っています。

図22は1990年に私がアイデアの図を描いたものですが、光ディスク用の面発光レーザの姿です。たとえば4チャンネルの面発光レーザで光をマイクロレンズでディスクに当てて、集積回路で一体化したこういう簡単なピックアップが出来るだろう、ということを行いました。実際に韓国のSamsung社が、いま商用化しつつあります。こういうヘアピンよりも小さい簡単なピックアップですね。私が描いたのと同じようなピックアップで、現在CD用のピックアップを生産しようとしております。

せっかくレーザがこういうふうにならぶことができますので、あとはレンズを並べたらどうかというので、マイクロレンズアレイというのが、私のもう1つの発明だったわけです。それを図23のように並べて超並列にしようというのが、最近の研究のターゲットで、「超」というのは、常識では考えられないようなものを司る、それから非常に多くのものを並列化する、それから並列化により数から質の変化を生み出す、こういったことであります。ファイバーもたくさん並べて繋げたいものですから、マイクロレンズのアレイを使

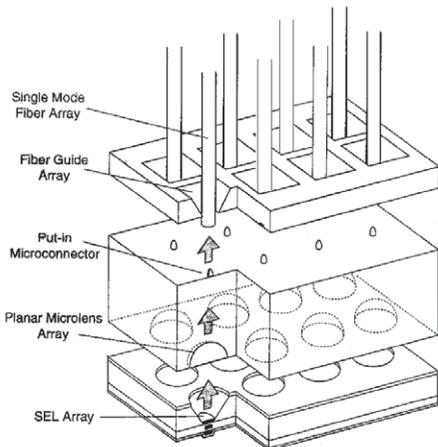


図23 光通信用積層光集積回路

って一体化して、こういうふうにはファイバーの突起を使ってやろうと。プッチンマイクロコネクタと日本語で言っていますが、英語ではPut-in、これは造語ですが、こういった勉強をしています。

その前に、マイクロレンズなんですけど、これもだんだん発展してきておまして、これはシャープ株式会社が液晶のプロジェクターに使って、液晶のところによく光を集めるために、このマイクロレンズアレイ、ちょうど4×6cmぐらいの中に40万個のレンズアレイが入っております。これは日本板硝子株

式会社が生産して搭載しているわけですが、これによってプロジェクションタイプのビデオプロジェクターが明るくなりました。

マイクロレンズですから画像が複製できます。画像が複製できるものですから、図24のように並列化して、あとは周波数空間でフィルタリングをかけて、画像を瞬時に並列処理によって認識しようと、そういう情報処理の研究も、研究室の一部でやっております。これですと、ぱっと見たときに、もうすでに認識できるという仕掛けができています。

それから最後ですが、広がる光の1つをご紹介します。図25のようにファイバーを使います。ファイバーにレーザービームを斜めに入れますと、これはジグザグ光線が出来るというのは、一番最初に申し上げたとおりなんですけど、実は、丸いものを使いますと輪になります。こういう輪がなかなかいままでも出来なかったんですね。私がいま手にしておりますガラスの棒、ファイバーの太いものですが、こういったもので、非常に均一な円錐ビームが出来ることになります。これはたとえばチェレンコフ放射光のシミュレーターであるとか、円錐プリズムで折り返して水平ビームにし、(株)川口光学産業と共同でレーザーレベルという水準器を作るような工学的な応用も

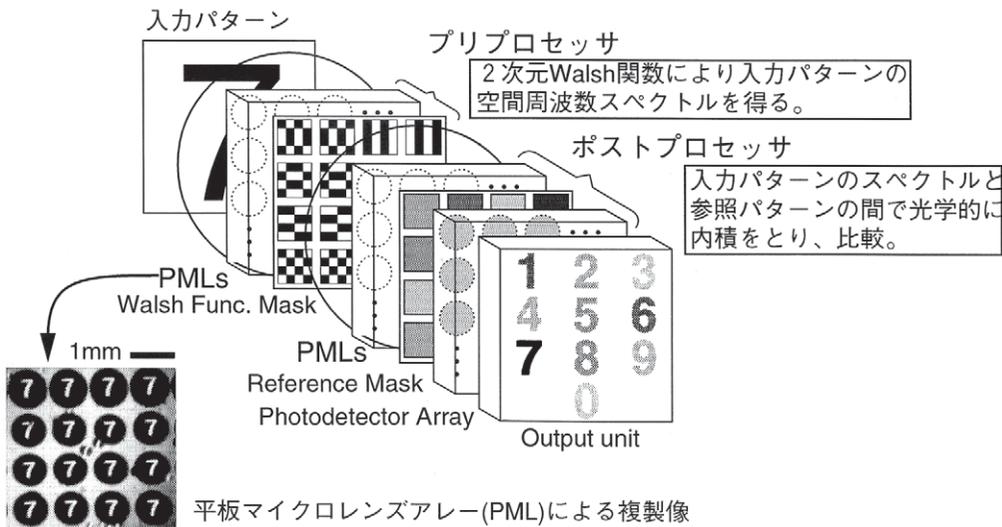


図24 微小光学系による光パターン認識システム

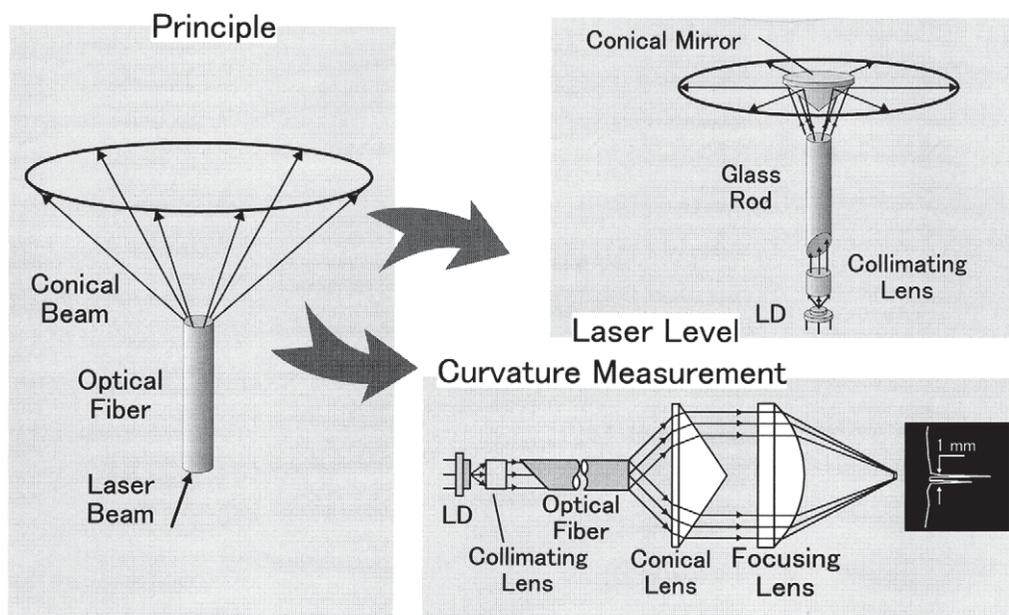


図25 リングビームシステム

進めています。それから円錐光を集めて、非常に小さい円錐あるいは円筒状のビームを作って、その中に原子を閉じ込めようと。これは大津先生の話でちょっと出るかもしれませんが、そこにも使えるかもしれない。これは広がる光の一つなんですけれども、私の発明の1つです。

この面発光レーザのようなアレイのもの、レンズをアレイ化して超並列化することで、先ほど言いましたように10から数10 Gb/sぐらいの情報を並列化してやると、非常に速く動画といったような、超高速の情報がやり取りできるのではないかな、というのが夢であります。

それでは時間になりましたので、このぐらいにさせていただきますが、私の研究の範囲で申し上げますと、光を出す、光を広げる、それから光を集める、こういったものが光エレクトロニクスのいろいろな装置、システムに応用される。そこにまつわるサイエンスとテクノロジーを、自分たちの研究室で開拓しながら、ゆっくりとした研究をしているという状況であります。

さて、広がる光、集まる光、これしかないかということなんです、あります。この答えは次の大津元一教授の話に出てくるかと思えますので、ご期待ください。

本日は、つたない話をさせていただきましたが、皆様、ご清聴まことに有難うございました。