

TR - O - 0012

48

Tera Hertz Coherent Radar

Keigo IIZUKA

飯塚 啓吾

1989. 10. 27.

ATR光電波通信研究所

## 【 目 次 】

|                         |    |
|-------------------------|----|
| (A) はじめに .....          | 1  |
| (B) 原理 .....            | 5  |
| (C) 構造 .....            | 9  |
| (D) 解像度 .....           | 11 |
| (E) レーザー光の安定性の要求度 ..... | 13 |
| (F) 使用中心波長の選択 .....     | 16 |
| (G) 結論 .....            | 18 |
| 参考文献 .....              | 19 |

(A) はじめに

レーザ光の発振周波数は可なり簡単に大きく変える事ができる。この事を利用して例えば、10,000 GHz という大きな周波数変調を掛けたコヒーレント・レーザ・レーダを作ると、解像度  $5\text{ }\mu\text{m}$  という従来考えられなかった解像度のあるレーザ・レーダの製作が可能になる。もしも、この様な方式のレーザレーダが実現すれば被試験体の断面構造を破壊することなく測定出来る様になるので、応用範囲は実に広い。勿論、この様な機能を持つ装置はまだ世界中何処にも存在しない。

例えば、

- (1) 複雑な屈折率パターンを持つ dispersion shifted optical fiber やパンダ型光ファイバーの屈折率分布を紡糸工程中に、光ファイバを切断することなくファイバの側面よりその断面を観測することが出来る。(図 1 (a) 参照)
- (2) 光 IC の分野では monolithic に一つの基盤の上に出来るだけ沢山の素子を乗せようという動向があるが、全体として各素子が同時に働かなければならない。しかし、一つ一つの素子自体が複雑であるため全体としての製造行程の yield は低い。Tera Hertz Coherent Radar は欠陥検査を製作上で、行うことができるので、yield の向上に役立つ。(図 1 (b) 参照)
- (3) 又、もっと興味深い応用として、適当な波長を選択すれば、この種のレーダはマイクロチップの 3 次元の透視写真を撮ることができる撮透視カメラにも発展する可能性がある。  
(図 1 (c) 参照)

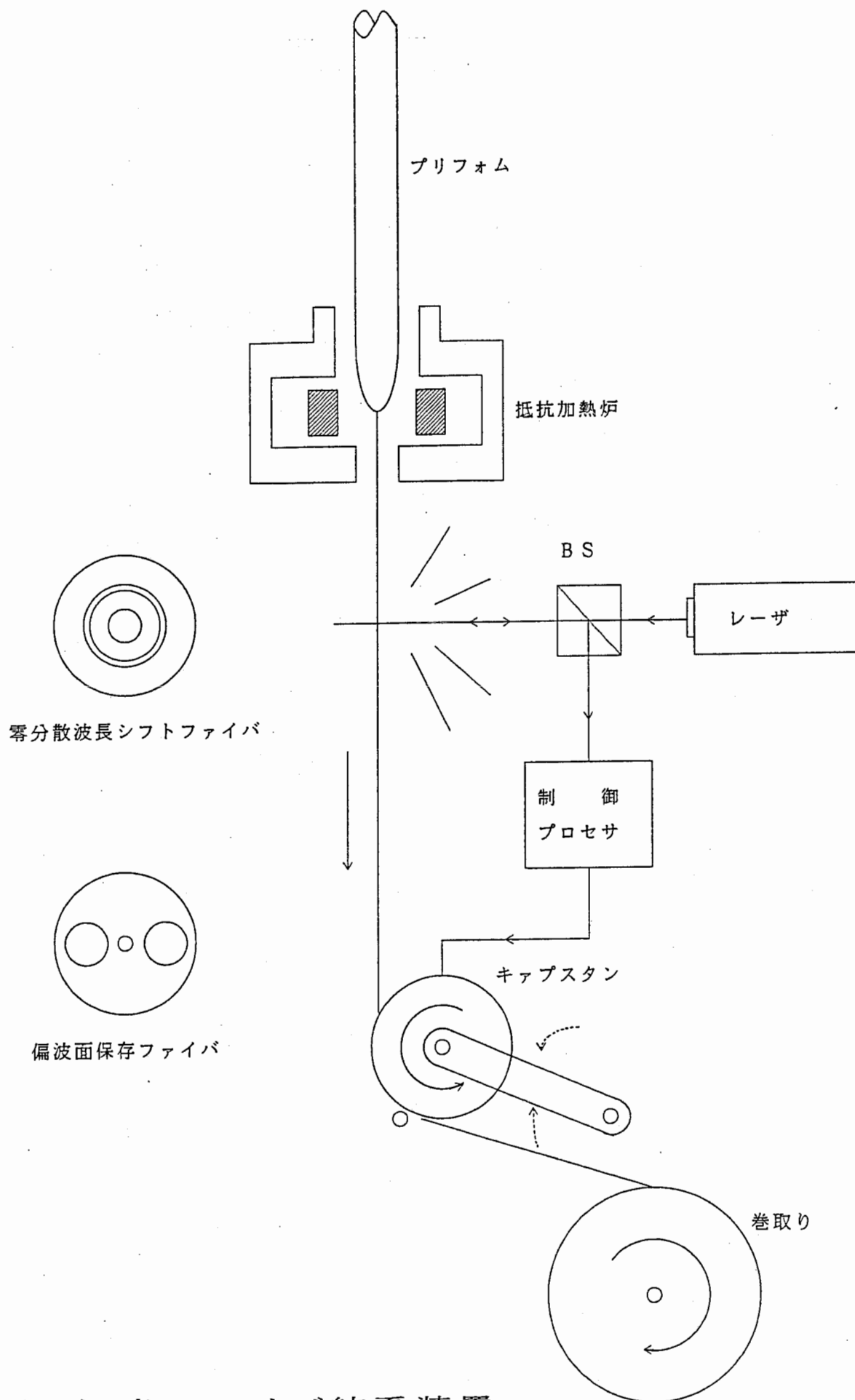


図 1 (a) 光ファイバ紡糸装置

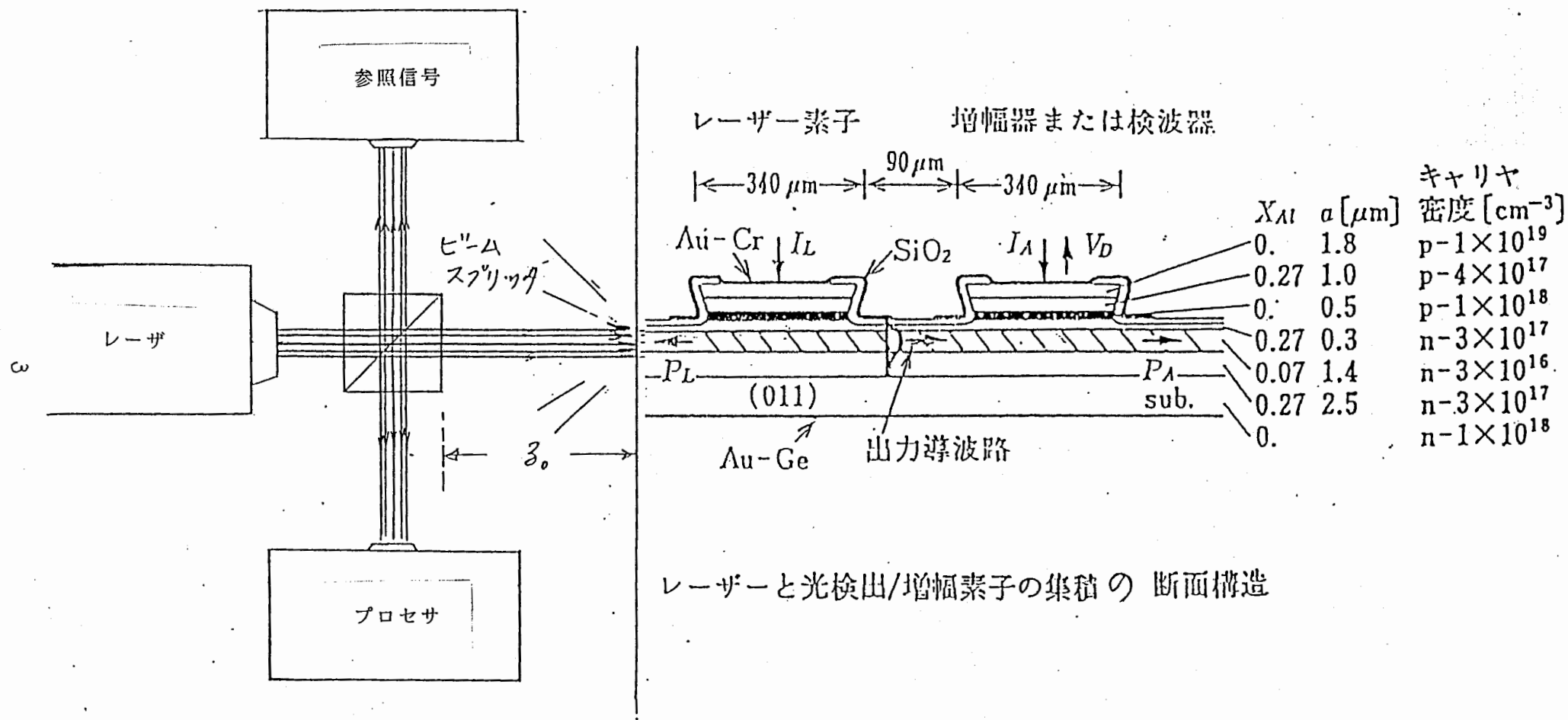


図1 (b) ICの内部構造探索

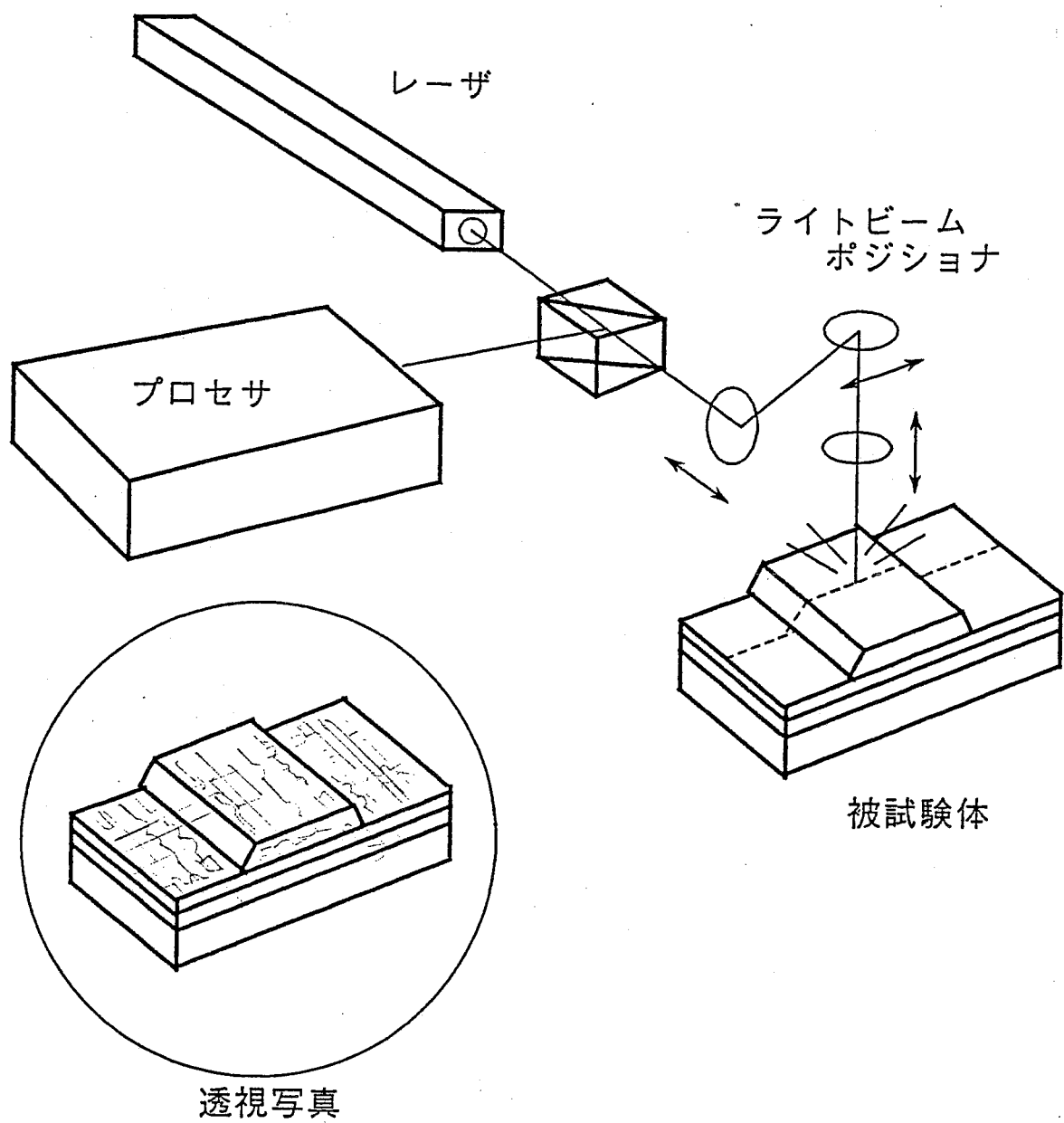


図1 (c) マイクロチップ透視写真機

## (B) 原理

本レーダは Step Frequency Radar の原理を応用したものである<sup>(1)</sup>。先ず、反射体の複素周波数特性をレーザ光の周波数を変えながら測定する。次に、測定した結果に F F T を掛けることにより、時間ドメインに変換する。反射体までの距離は時間ドメインの図より読み取ることができる。このことを図 2 を使って更に説明する。図は近い反射体  $S_1$  と遠い反射体  $S_2$  との 2 ケの反射体があった場合を示す。

レーザからの発射波を

$$E_0 e^{-j\omega t} \quad (1)$$

とすると 2 点からの反射波を表す式は

$$H_0 = \frac{E_0}{Z_1} S_1 e^{j(2\beta Z_1 - \omega t)} + \frac{E_0}{Z_2} S_2 e^{j(2\beta Z_2 - \omega t)} \quad (2)$$

となる。但し、 $Z_1$  と  $Z_2$  とはレーザからそれぞれの反射体  $S_1$  と  $S_2$  までの距離である。

$\beta$  は伝播定数で  $\beta = \frac{2\pi f}{v}$  である。

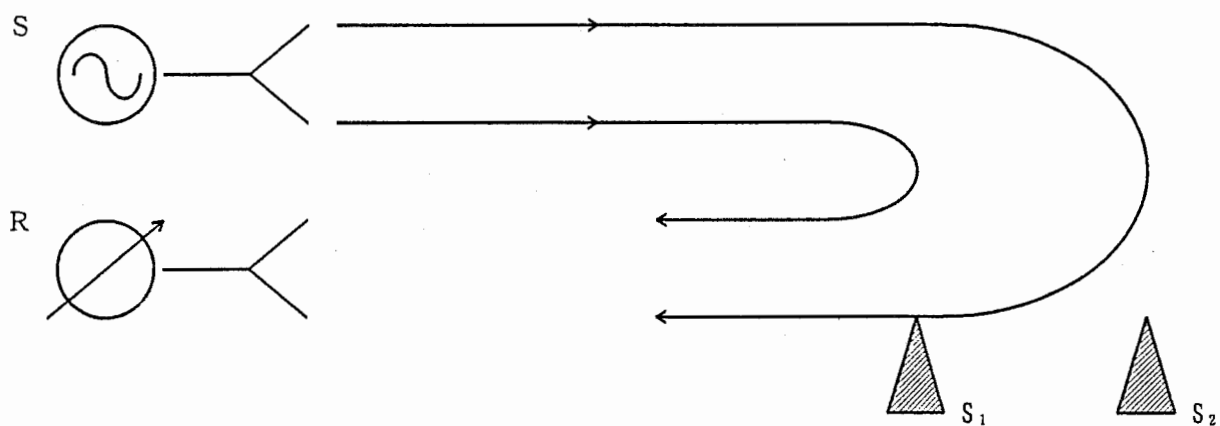


図 2. 反射体が 2 個ある場合の反射波

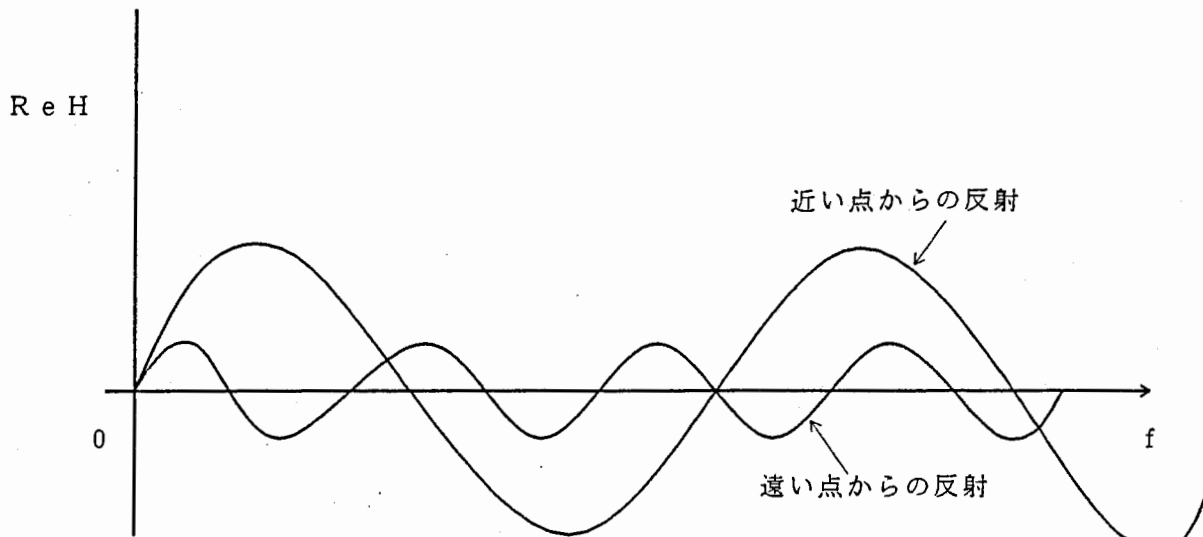


図3. 周波数を掃査した場合の反射波の実部

今、ここで、レーザの周波数  $f$  を掃査すれば、受信器  $R$  が受ける反射波の実部（虚部）は図3の様に正弦波的に変化する。

近い反射体から反射してきた波の  $f$  に対する変化速度はゆっくりであるが、遠い点から反射して来た波の  $f$  に対する変化速度は速い。

近い反射体と遠い反射体の2つの反射体があった場合には、これら2つの曲線の1本1本が測定されるのではなくて、それらの和しか測定されない。2つの正弦波的に変化した曲線の和からそれぞれの曲線成分に選り分ける方法として、フーリエ変換を使う方法がある。図3の曲線をフーリエ変換すると変換領域で反射点が2つのピークとして現れる。低い方の周波数成分が近い点からの反射であり、高い方の周波数成分が遠い点からの反射である。



次に、数式を使って上記の原理を説明する。

図2において、実際に測定を行う場合にはレーザ光の周波数を階段状にステップし、それぞれの周波数での受光器への入力光の値を集録する。集録した値にFFTを掛けて反射体の位置及びその大きさの分布を知る。

さて、第n番目のレーザ光の周波数は

$$\begin{aligned} f_n &= f_0 + n\Delta f \\ n &= 0, 1, 2, \dots, N-1 \end{aligned}$$

但し、 $f_0$ はステップ開始周波数

$f_n$ はn番目のステップの周波数

$\Delta f$ は周波数のステップ巾

第n番目の周波数をレーザより発射した場合について考える。受光器に到来する光  $H_n$  は、あらゆる反射点からの反射波の総和であるから、

$$H_n = \sum_{k=0}^{N-1} \frac{S_k E_0}{Z_k^2} e^{j4\pi[(f_0+n\Delta f)/v]Z_k} \quad (3)$$

k番目の反射体の位置  $Z_k$  を或る基準点  $Z=Z_0$  から測ることになると

$$Z_k = Z_0 + k\Delta Z \quad (4)$$

式(4)を式(3)に代入して整理すれば、

$$H_n = e^{j2\beta_n Z_0} \sum_{k=0}^{N-1} \frac{S_k E_0}{Z_k^2} e^{j4\pi f_0 \cdot \Delta Z \cdot k/v} e^{j4\pi kn \cdot \Delta f \cdot \Delta Z/v} \quad (5)$$

式(5)を更に書き換えれば、

$$H_n e^{-j2\beta_n Z_0} = \sum_{k=0}^{N-1} h_k e^{j4\pi kn \cdot \Delta f \cdot \Delta Z/v} \quad (6)$$

但し、

$$\beta_n = 2\pi(f + \Delta f)/v \quad (7)$$

$$h_k = \frac{NS_k E_0}{Z_k^2} e^{j4\pi f_0 \cdot \Delta Z \cdot k} \quad (8)$$

さて、式(6)に

$$\frac{2\Delta f \cdot \Delta Z \cdot N}{v} = 1 \quad (9)$$

の制約をつければ、

$$H'_n = \sum_{k=0}^{N-1} h_k e^{j2\pi \frac{nk}{N}} \quad (10)$$

但し

$$H'_n = H_n e^{-j2\beta_n Z_0} \quad (11)$$

$h_k$  は式(8)に示す様に所望の  $k$  th 物体の反射率  $S_k$  を含む。

式(10)がちょうど、逆DFTの式と同じ型をしているので、測定値  $H'_n$  にDFTを掛ければ、 $H'_n$

より  $h_k$  即ち  $S_k$  を求めることができる。

結局、

$$h_k = \sum_{n=0}^{N-1} H'_n e^{-j2\pi \frac{kn}{N}} \quad (12)$$

式(12)は  $N$  個の  $h_k$  の値

$$h_0, h_1, h_2, \dots, h_k, \dots, h_{N-1}$$

を与える。この内もしも、 $h_k$  が non-zero であれば、 $Z_k = Z_0 + k\Delta Z$  の位置に反射体がある事

が判る。この方法のもう一つの特長点は、所望の基準点  $Z_0$  を自由に変える事が出来ることである。

$z > z_0$  の点だけに、精度を持たせることが出来る。このレーダは写真機でいうと、“ズーム”的機

能を持つことになる。例えば、レーダから被試験体までの距離はmmのオーダーであるが、被試験体

内の精度は  $\mu m$  のオーダーで欲しい。このような場合に、“ズーム”的機能を非常に有効的に使うことが

できる。

(C) 構造

図4は Tera Hertz Coherent Radar の全体の構造を示す。

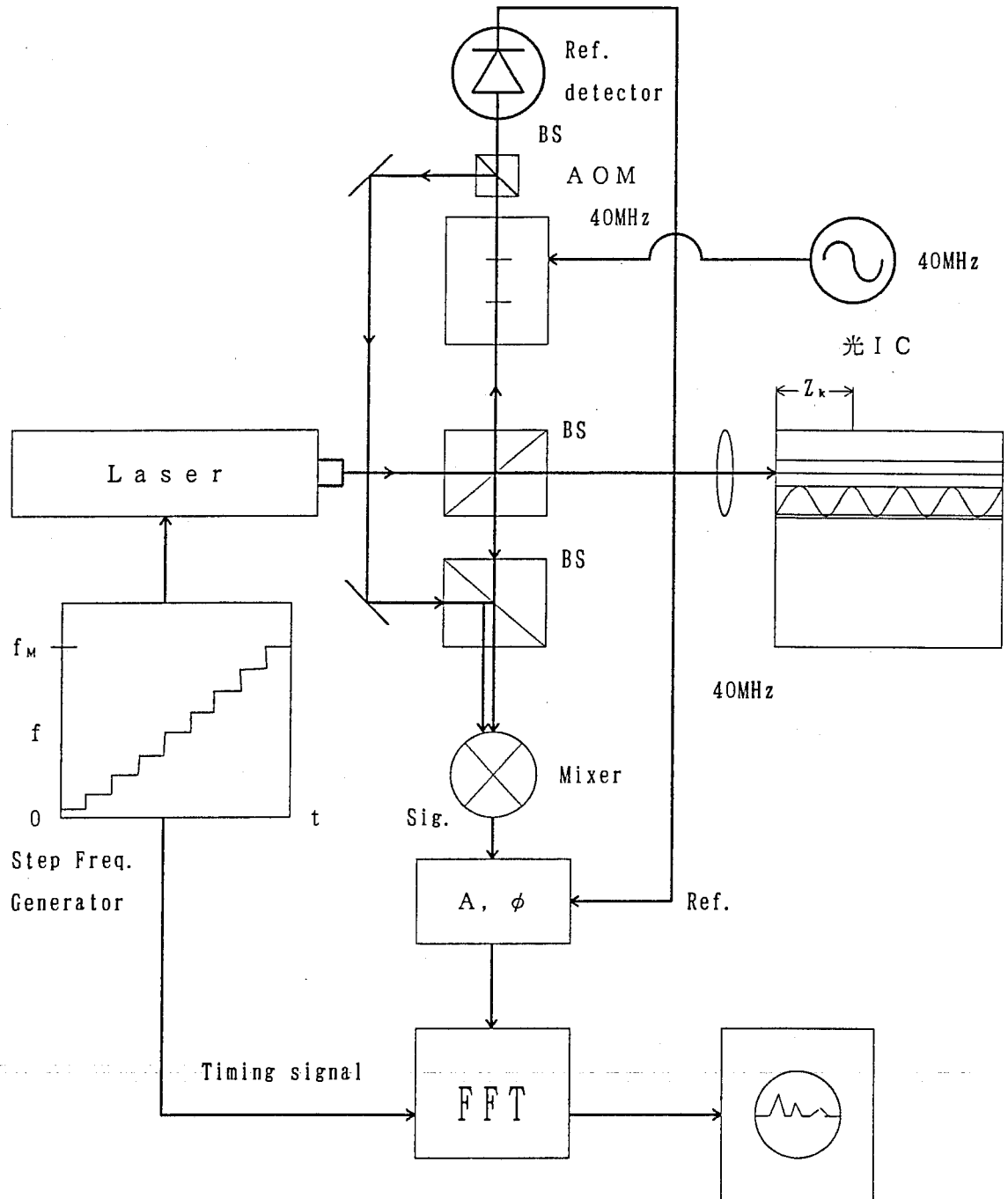


図4. Tera Hertz Coherent Radar

レーザ光は先ず、Beam splitter(BS)より被試験体の方向に進む物体波とAcousto-optic modulator (AOM)の方向に進む参照波とに分けられる。物体光は更にレンズに依り集束され、被試験体に入る。被試験体中に反射体が存在すれば、反射光を生ずる。反射光はもと来た光路を通りBSを通り抜け、Mixerに入る。

又、AOMに入射した参照光はAOMにより周波数が $\Delta\omega_c$ だけshiftされ、その後、同じくMixerに入る。

物体光と参照光の位相差は

$$\phi = \frac{\omega_c}{\nu} 2d_r - \frac{\omega_c}{\nu} 2d_n = 2 \frac{\omega_c}{\nu} (d_r - d_n) \quad (13)$$

である。

但し、 $d_r$ は、参照光のレーザからMixerまでの全光路長であり、 $d_n$ は物体光のレーザから第n番目の反射体から折り返して、Mixerに到達した全光路長である。Mixerからの出力は $\Delta\omega_c$ をCarrierの周波数とし、物体光と参照光との位相差 $\phi$ を位相値とした電流になる。

レーザ光の発振周波数 $\omega_c$ を階段状に掃引する。(例えば $1.3\mu\text{m}$ のNd YAG ring laserの場合だと、共振器の大きさをPZTに依って電氣的に変化させて発振周波数を変える)

Mixerからの出力の位相と振幅とをステップ毎に、測定して順次FFTに入力する。FFTからの出力を標示すれば、周波数軸が反射体までの距離に比例し、そのフーリエ変換値が反射体の反射率に比例する。

#### (D) 解像度

実際に測定を行う場合には、周波数のスラップの数  $N$ 、及び総掃引周波数巾  $\Delta f \cdot N$  に限度がある。

その限度によって Radar の解像度が決まる。

解像度  $\Delta Z$  は式(9)より

$$\Delta Z = \frac{c}{2 N \Delta f n} \quad (14)$$

で与えられる。但し

$\Delta f$  = 測定周波数間隔

$N$  = 測定周波数の数

$n$  = 被試験体の屈折率

$c$  = 光の真空中の速度

式(14)の特長は Carrier の中心周波数に関係がないという事である。この事は次の利点につながる

- (1) 光を Carrier に使えば、 $(N \Delta f)$  の値を極端に大きく取る事が出来る。
- (2) Carrier の中心周波数に関係がないから Carrier の中心周波数を変えても、Processing のシステムを変える必要がない。
- (3) Carrier の中心周波数を被試験体の透過領域に選べば、被試験体の透視が可能になる。
- (4) 異なった Carrier の中心周波数領域で実験を繰り返すと被試験体内の特定の場所の波長特性を測ることができる。

ここで、実際の数字を入れて解像度を検討する。

| $N \Delta f$ (GHz) | $N \Delta \lambda$ (nm) | $\Delta Z$ ( $\mu\text{m}$ ) |
|--------------------|-------------------------|------------------------------|
| 1, 000             | 2. 08                   | 50                           |
| 10, 000            | 20. 8                   | 5                            |
| 30, 000            | 61. 6                   | 1. 6                         |

(屈折率を  $n = 3$  とし、中心波長を  $0.8 \mu\text{m}$  とした)

レーザの中心スペクトラムを  $2 \text{ nm}$  程振らせると、 $50 \mu\text{m}$  の分解能を持たせる事ができ、また  $60 \text{ nm}$  振らせると  $1.6 \mu\text{m}$  という異例の分解能を得る事が出来る事が判る。

又、光波の位相の情報を測定に使っているため、 $2 \pi$  radian の roll-over がある。roll-over distance 以遠からの反射に対しては測定値に roll-over distance だけ加算しなければならない。

Roll-over distance  $\Delta ZN$  は式(14)より

$$L_{\text{MAX}} = \frac{C}{\Delta f n} \quad (15)$$

である。 $\Delta f$  を小さく取れば、大きくなる。今  $N = 1,024$  であるとすれば、Roll-over distance は  $1.64 \text{ mm}$  となる。又、その時の周波数のステップ巾は  $\Delta f = 29.3 \text{ GHz}$  である。

(E) レーザ光の安定性の要求度

Coherent radar の精度はレーザ光の安定性によって大いに左右されるので、レーザの許容安定度について検討を進める。

基準点 $Z_0$ から $Z_k$ 離れた処にある物体から反射し、ビーム・スプリッタを通過して、mixer に入る物体光  $E_s$  とビームスプリッタから直接、Acousto-optic modulator を通過してmixer に入る参照光  $E_r$  は

$$E_s = S_k \cos \left\{ \omega_c t + 2\beta_n Z_k + \theta \left( t - \frac{2Z_k}{c} n \right) \right\} + n_s(t) \quad (16)$$

$$E_r = \cos \{ (\omega_c + \Delta \omega_c) t + \theta(t) + \theta_m(t) \} + n_r(t) \quad (17)$$

で表される。

ここで、 $\theta(t)$  及び  $\theta_m(t)$  はそれぞれ、レーザ及び AOM が持つ phase jitterであり、 $\Delta \omega_c$  は AOM の周波数、 $\beta_n Z_k$  は参照光と物体光との光路差である。但し参照光と物体光の光路長とが測定基準点で一致する様調整済みであると考える。 $n_s(t)$  と  $n_r(t)$  とは物体光と参照光の振幅雑音である。又、参照光の振幅を単位に取った。

さて、これら  $E_s$  と  $E_r$  とが mixer に入射した時の mixer からの出力電流は、 $\langle [E_s + E_r]^2 \rangle$  に比例し、その値は

$$i_s = \frac{\eta e}{h\nu} S_k \cos \left[ \Delta \omega_c t - 2\beta_n Z_k - \theta \left( t - \frac{2Z_k}{c} n \right) + \theta(t) + \theta_m(t) \right] \quad (18)$$

となる。但し、自乗検波した場合に出てくる定数、和の周波数を持つ項、及び振幅雑音の項、等全て省略した。

次に、AOM から出る 0 次と 1 次の回折波とを一緒に受信出来る様にすれば、reference detector からの信号電流  $i_r$  は

$$i_r = \frac{\eta e}{h\nu} \cos (\Delta \omega_c t + \theta_m(t)) \quad (19)$$

となる。

さて、reference detector の出力と mixer からの出力とを phase comparator に印加すれば、

その出力は

$$i_o = \left( \frac{\eta e}{h\nu} \right)^2 S_k \cos \left\{ 2\beta_n Z_k + \theta \left( t - \frac{2Z_k}{c} n \right) - \theta(t) \right\} \quad (20)$$

となる。

Phase comparator の参照電流  $i_s$  は AOM の driver 電圧をそのまま使ってもよいのであるが、  
 上述の様に reference detector の出力を使えば、AOM の phase jitter  $\theta_m(t)$  が完全に取り  
 除かれることが式(20)から判る。

結局、残された phase jitter は参照光の光路長と物体光の光路長との差に起因することが判る。

即ち、式(20)において、同時にレーザを離れた波同志干渉するのではなくて、 $t = t$  の時点でレーザを  
 離れた波と  $t = t - \frac{2Z_k}{c} n$  の時点でレーザを離れた波とが干渉するためである。

次に、被試験体の長さが 2 mm である場合について、レーザの許容周波数幅を計算してみる。

レーザの出射時間差  $\Delta t$  は

$$\Delta t = \frac{2Z_N n}{c} = \frac{2 \times 2 \times 3}{3 \times 10^{11}} = 4 \times 10^{-11} \text{ 秒} \quad (21)$$

即ち 40ps である。

この時間内に位相が例えば  $\pi/4$  radian 変わる様な jitter の周波数は、

$$\begin{aligned} \frac{\pi}{4} &= 2\pi \Delta f \cdot \Delta t \\ \Delta f &= \frac{1}{4 \times 2 \times 4 \times 10^{-11}} \\ &= 3.1 \text{ GHz} \end{aligned} \quad (22)$$



この考察の結論として、ローダミン 6 G の CW 色素レーザを使うと、スペクトルの安定度が 1 MHz 以下<sup>(2)</sup>であるので充分この実験に使用可能なることが判る。

又、最近、富士通で開発された<sup>(3)</sup>  $1.5\mu\text{m}$  帯の狭スペクトル線幅波長可変半導体レーザは 1 MHz 以下の狭いスペクトル線幅を保ったまま、 $1.9\text{nm}$  の波長可変幅を持っている。このレーザ 1 個が与える可変幅では解像度は低い、中心波長の異なった半導体レーザをスターカプラに接続し、バイアス電流を順次印加すれば、波長の可変幅を広げることが出来る。半導体レーザを使用した場合にはレーダのサイズが極度に縮まるという利点がある事はいうまでもない。

#### (F) 使用中心波長の選択

透視を行う場合、光が物体中を透過すると言うことが第一必要条件である。物体中の光の吸収は光の波長に大きく左右される。一般に言って、光の quantum  $h\nu$  がその物体の energy band gap より大きい場合には、光子が electron-hole pair を作り、そのために光が吸収されるが、反対に quantum  $h\nu$  が energy band gap より小さい場合には、electron-hole pair を作るだけのエネルギーがなく光は吸収されない。InGaAsP 半導体レーザ光の波長は  $1.5\ \mu\text{m}$  ( $h\nu = 0.83\text{ eV}$ ) であるから、光 I C のウェーファーとして最もよく使われている  $\text{Si}$  ( $h\nu = 1.1\text{ eV}$ ) や  $\text{GaAs}$  ( $h\nu = 1.4\text{ eV}$ ) などを透過する。従って、InGaAsP の半導体レーザは透視像を作るのに最適である。詳しい  $\text{Si}$  と  $\text{GaAs}$  の吸収曲線を図 5 (a)(b) <sup>(4)</sup> に示す。

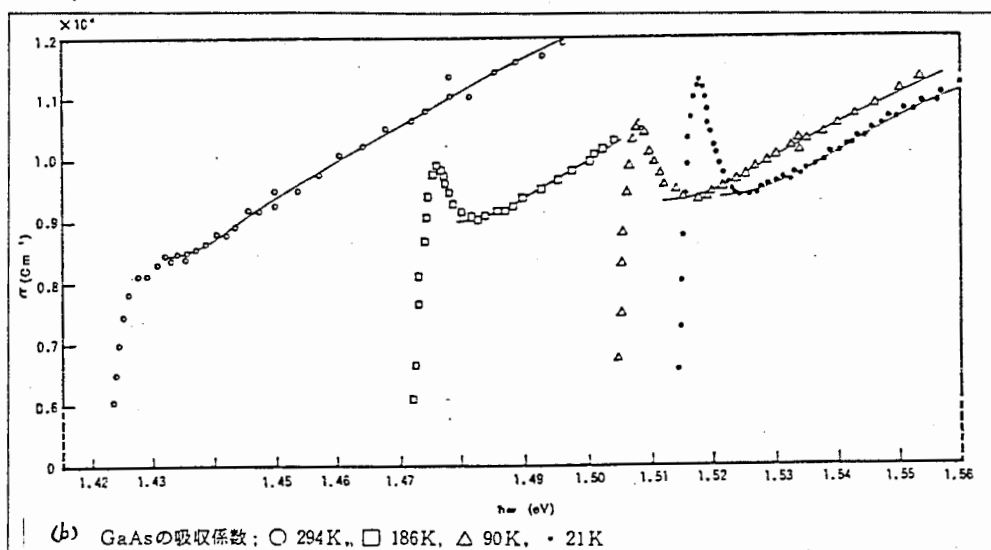
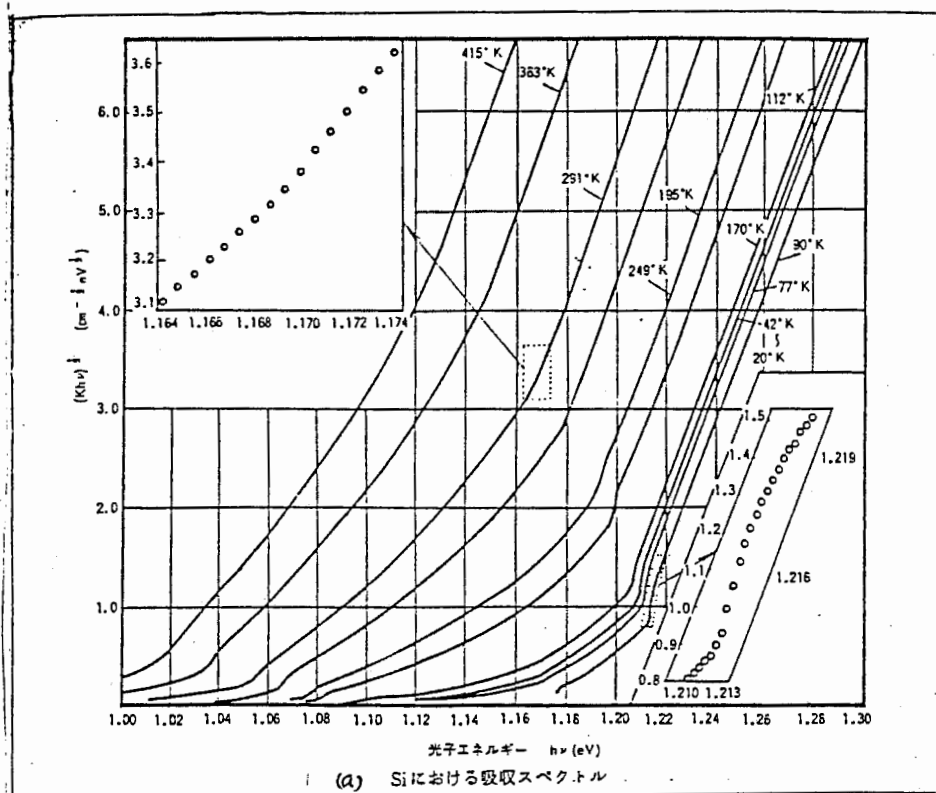


図5 SiとGaAsの吸収計数. いずれもInGaAsPの0.8 eVの光には透明であることが判る。

## (G) 結論

光の変調周波数幅がマイクロ波などに較べて莫大に大きい事を利用した。ミクロン・オーダの解像度を持つ Tera Hertz Coherent Radar の試作を提案した。本レーダの応用として考えられるものに

- (1) 光 I C チップ用 fault locator
- (2) 光ファイバ紡糸作業中断面測定装置
- (3) 集積回路透視写真機

などがある。

現在、光電波通信研究所内で行われている研究と本 Tera Hertz Coherent Radar の研究との関連について最後に一言すれば、

- (1) 宇宙間レーザ・レーダのレーダに関する技術の距離を他の極限に持って来たと考えてもよく、  
両技術の共通点は多い。
- (2) 当研究所で行われている一般的な光・変調復調の問題は本 Tera Hertz Coherent Radar 制作上、欠かす事の出来ないものである。
- (3) MM I C の技術との関連は、この様なレーダが出来上がれば、MM I C の製作行程で補佐する  
のではないかと思う。

本レーダーの製作必要期間は大体 One man one year 程度だと推測する。

参 考 文 献

- (1) K. Ilzuka, A. Freundorfer, K. H. Wu, H. Mori, H. Ogura and V. K. Nguyen, "Step Frequency Radar"  
J. App. Phys. 56(9) November, PP2572-2583, 1984.
- (2) Laser Society of Japan "レーザハンドブック" P263, 1982.
- (3) 矢野 "狭スペクトル線幅波長可変半導体レーザの開発" 電気情報通信学会誌、Vol. 72, No. 7,  
PP721-836, 1989.
- (4) 財光産業技術振興協会 "光エレクトロニクス材料マニュアル" オプトロニクス社、1986