

# レーザ通信における変調法

宮 田 豊 夫\*

## Modulation Method for Laser Communication

by Toyoo MIYATA

The spread-spectrum modulation systems for laser communication are discussed to transmit laser in the optical fibers or air.

### 1. まえがき

電話のアナログ伝送がまだ多量に行なわれていて、中継点で故意の傍聴を可能にしている。しかし電話の PCM 化が進められ、データ通信の拡大、ファクシミリの高速化、画像の高品位化など、通信のデジタル化に伴って秘密性の高いパルス高速広帯域伝送を要求される。このため副搬送波を高い周波数帯域に選定できるレーザが伝送媒体として有効となってくる。

レーザ通信においては、これらの基底帯信号によって副搬送波を時分割多重変調された変調波で、レーザ変調が行なわれる。一般には通信内容の秘密性が十分に守られているが、中継点で故意に傍受解読されることが全く不可能とは言えないと思われる。高度の秘密性を要するときにはスペクトラム拡散変調を副搬送波周波数帯に適用することが有効ではなかろうかと考える。大気中の CO<sub>2</sub> レーザ伝送による通信のときと、GaAs 系レーザを石英系光ファイバで伝送する通信とにつき検討を行なったことを報告する。これに伴い、より高い周波数に応答できる CO<sub>2</sub> レーザ検波器を検討した。

### 2. スペクトラム拡散変調

スペクトラム拡散変調は衛星を使つての中継通信における同一周波数帯の多重使用(マルチプルアクセス)の目的<sup>1)</sup>とか軍用に使用され、直接拡散(以下 DS と記す)とか周波数ホッピングおよびその複合などが使われる。あるいは精密レーダにチャープ変調として使われる。

通信情報の 1 個パルス内に数十個以上の割合で擬似信号パルス列(以下 PN 符号と記す, pseudo noise)を用いて情報パルス列と PN 符号との積を伝送する方法のうち、符号

---

\* 理工学部電気工学科教授 通信工学

1 と 0 (符号 0 は電気的には  $-1$  の位相として扱う) に対し 180 度の位相差を対応させる DS 法 (direct sequence) が利用できよう。すなわち特定送受信局間に PN 符号を予め設定し、また任意の時間後にその符号系列を更新する手法により秘密性を高くしうる。

図 1 の単パルスをフーリエ変換すれば

$$F(\omega) = \int_{-\tau/2}^{+\tau/2} f(t) e^{-j\omega t} dt = E\tau \frac{\sin x}{x} \quad \left. \begin{array}{l} x = \omega\tau/2 \end{array} \right\} \quad (1)$$

で表わしうる。

搬送波 (仮りに振幅  $E=1$  とおく)  $\cos \omega_c t$  をパルス幅  $\tau$  で切り取った波では (図 2a)

$$\begin{aligned} f(t) &\doteq \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega) \cos \omega t d\omega \\ &\doteq \sum_{i=-\infty}^{+\infty} \frac{F(\omega_i)}{2\pi} \Delta\omega_i \cos \omega_i t \end{aligned} \quad (2)$$

で表わしうる<sup>2)</sup>。すなわち正弦波形の集合となり、図 2b のように  $f_c$  の前後  $-\infty$  から  $+\infty$  までの周波数を含むが、両端の周波数  $f_c \pm 1/\tau$  の主ローブにエネルギーの 90% が集約されている<sup>3)</sup>。ただし (2) 式計算では虚数部を除いてある。

中継点での傍受解読の困難性を増すためには搬送波抑止形で送信する。すなわち図 3 の平衡変調器が利用できる。図において、いま仮りに PN 符号の代わりに  $V \cos \Omega t$  を入力し、搬送波入力トランスの出力を  $v \cos \omega_c t$  のコイル 2 組とし、リング変調器の出力の

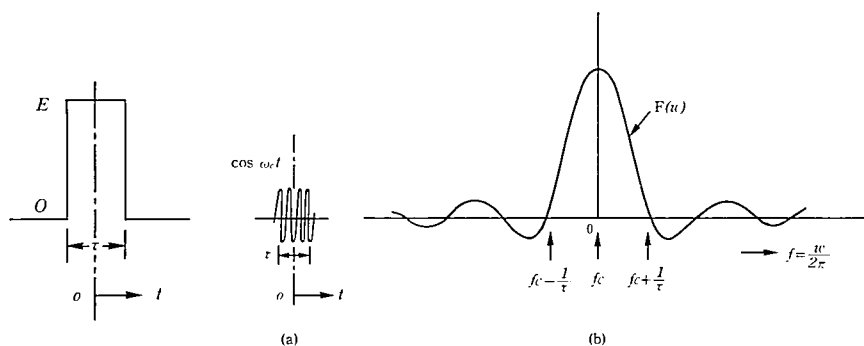


図 1

図 2

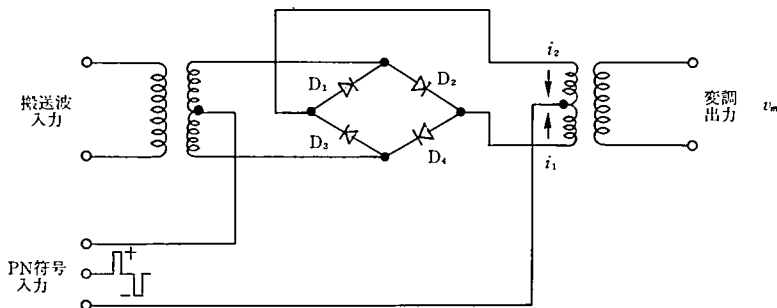


図 3

トランス一次巻線電流 (図の  $i_1, i_2$ ) を求めると次式となる。リング変調器を構成する半導体整流器は同一特性をもち、2乗特性をもつとする。 $a$  は整流器特性に関する定数とする。

$$\left. \begin{aligned} i_1 &= a(V \cos \Omega t + v \cos \omega_c t)^2 \\ i_2 &= a(V \cos \Omega t - v \cos \omega_c t)^2 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

変調出力電圧は定数を  $k$  として

$$v_m = k(i_1 - i_2) = 4kavV \cos \omega_c t \cos \Omega t \quad (4)$$

となり、角周波数  $\omega_c \pm \Omega$  の余弦波から成る。

次に PN 符号入力するとき、そのフーリエ変換した値を  $F(\omega)$  とすると次式となる。

$$v_m \propto V \sum_{i=-\infty}^{\infty} F(\omega_i) \cos \omega_i t \cos \omega_c t \quad (5)$$

$F(\omega)$  は、PN 符号の 1 と 0 に対し電氣的にはパルス +1 と -1 に対応する値であるから、図 3 でのそれぞれの出力は位相反転に対応する (phase shift keying, 略して PSK という) 波となり、 $v_m$  も PSK 波となる。

PN 符号発生器として少ない段数のシフトレジスタで構成される例として図 4 では<sup>4)</sup>、レジスタ 5 ステージのうち 2 ステージを加算 (2 個の入力が符号異なるとき 1, 等しいとき 0 を出力とする) した値をレジスタ入力へ帰還することにより、右端出力から  $2^5 - 1 = 31$  個の符号列出力がクロック駆動して得られる。

PN 符号と情報パルス列との積で搬送波を変調するには前述の図 3 の平衡変調器を用い、入力搬送波を情報で位相反転 (PSK) しておくか、あるいは情報 1  $\rightarrow$  0, 0  $\rightarrow$  1 ごとに PN 符号をそっくり位相反転させるなどの方法を用いる。

PN 符号化の簡単化された例として、情報 1 個パルスごとに PN 符号列を繰返す場合について、受信側のブロック図の図 5 では<sup>4)</sup>、受信波と自己 PN 符号との相関を扱うため同期フィルタ等を用い情報パルス 1 個に対応した三角波形 1 個 (同期すれば PN 符号が

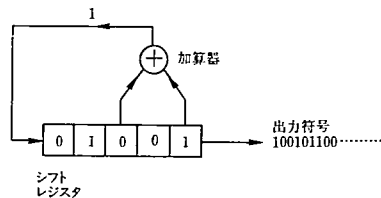


図 4

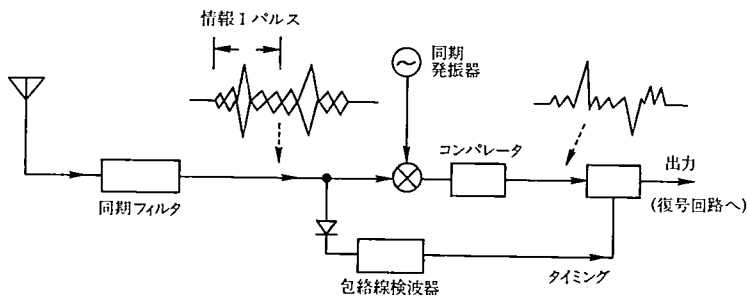


図 5

除かれ、情報パルス幅より著しく時間集約した積分波形)を得るようにし、同期検波器コンパレータにより情報パルスの位相正負に対応した出力をつくる。実際には秘密性を高くするため、送信側で多数のPN符号列のメモリを用意し、受信側ではこれに対応しプログラム作成同期フィルタを用いて電子的に送信PN符号に対応する方法を用いる。

PN符号用同期フィルタとして固体音響振動表面波の直線性伝搬特性と圧電効果を利用した図6の構造の例がある<sup>4)</sup>。図の(a)において励振トランスジューサTの伝搬長さ方向寸法と、符号発生トランスジューサA, B, C, …の相互間隔を等しくする。PN符号の1101……1に応じ、A, B, C, ……それぞれの電極を図のような構造とする。インパルス入力によりTで発生した音響振動表面波は右へ進み(左進行の振動は吸収体で除かれる)、A点トランスジューサに達すると符号1に応じた極性の電気的振動電圧を生じ出力ブスバーへ伝える。表面波がB点トランスジューサに達すると符号1に対応する極性の振動を出力ブスバーへ伝える。同様にして図上部のPN符号に従い表面波がC点に達すると、AやBとは逆相振動を発生し出力ブスバーへ伝える。以下同様にして出力波形は(b)図となる。右端に表面波吸収体がおかれる。

この例ではPN符号が固定されているが一般には送受信間で打合せにより変更を行なうため、プログラミングできるものが使われる。すなわちPN符号発生用各トランスジューサの電極を同じ構造とし、その電気的出力と出力ブスバーとの間に極性転換スイッチ(電子的)をおくことにより、即応したPN符号を用意できる。

送信情報パルスの正負位相に対し受信側で相関をとるにも固体音響振動表面波の利用が考えられている。この場合には音響振動表面波の伝搬の非直線性(基板に $\text{LiNbO}_3$ などを用いて2乗特性を得る状態で使う)を利用し、基板の長さ方向両端のトランスジューサへ電気的信号 $f_1(t)$ と $f_2(t)$ とを加えると音響振動が伝搬し、基板長さ方向中央部の電極のところで両音響振動の相互作用の結果、両信号同相ならばピーク出力をこの電極からとり出しうるなどが考えられている。

実際上は、はじめに仮定した情報1個パルスごとにPN符号列をあてるのではなく、もっと複雑にして解読しにくくする必要がある。

### 3. $\text{CO}_2$ レーザの変調

大気中伝送の赤外線波長 $10.6[\mu\text{m}]$ の $\text{CO}_2$ レーザを変調するには、音響光学効果の利

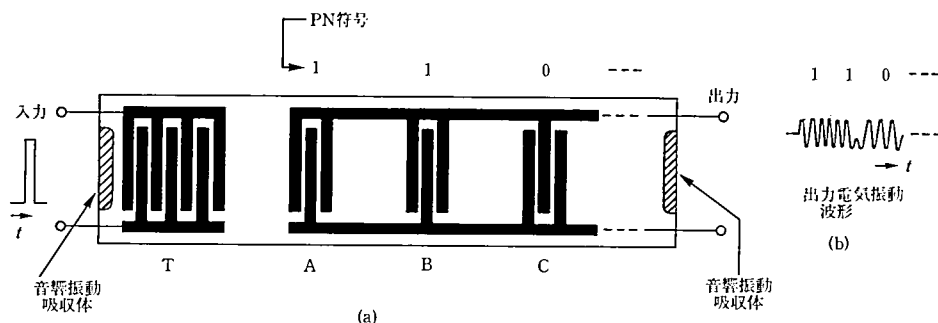


図 6

用が有効である。圧電素子  $\text{LiNbO}_3$  などの薄い単結晶板を音響振動伝搬媒体 Ge の棒へ導電接着剤で圧着した構造で、 $\text{LiNbO}_3$  の自由表面と Ge 圧着部間へ電気的入力 of 導線をそれぞれ導電接着剤でとりつけられる。Ge 棒へ  $\text{CO}_2$  レーザを入射させ回折赤外線出力を利用する方法を既報した<sup>5)</sup>。動作周波数を高くするため、 $\text{LiNbO}_3$  の厚さを薄くする加工限界は現在のところ  $0.04[\text{mm}]$  付近であり、このとき中心周波数は約  $100[\text{MHz}]$  の超音波振動を生じるが、機械的強度の考慮も必要である。

副搬送波周波数として  $100[\text{MHz}]$  をとり、情報パルスと PN 符号との積で変調した DS 変調の応用について考える。この DS 変調波で上記の  $\text{LiNbO}_3$  による圧電素子を励振することになる。いま PN 符号のパルス幅を仮りに  $\tau=0.1[\mu\text{s}]$  とすると DS 変調でスペクトラム拡散された主ロープの最大周波数は

$$100 \times 10^6 + \frac{1}{\tau} = 110 \times 10^6 [\text{Hz}]$$

となり、 $\text{LiNbO}_3$  圧電素子の振動可能領域にある。

中継点においては、受信した  $\text{CO}_2$  レーザを  $\text{HgCdTe}$  の光起電力または光導電素子で受信するか、または電波としてアンテナ受信しウォームキャリアダイオードかショットキダイオードで検波する。検波された DS 変調波は波形成形して増幅を行ない、送信用  $\text{CO}_2$  レーザを前述の方法で同様に変調し次の伝送区間へ送信される。

受信点においては、2. で述べた方法あるいは文献<sup>2)</sup>を参考として、PN 符号の同期および追跡を行ない、情報パルスの正負判定などをへてもとの信号へ復号される。

点接触ウォームキャリアダイオードとして、基板に Ge を用いた検波器<sup>6)</sup>よりは移動度が大きい n 形 GaAs を基板に用いれば、 $100[\text{MHz}]$  より高い副搬送波周波数に応答できると思われる。基板 n 形 GaAs は Ge のとき用いられる CP4 でエッチングを行ない、蒸留水洗して乾かし、片面へ In 蒸着し、この面を Ni 円柱ポストへ導電接着剤で圧着される。直径  $10[\mu\text{m}]$  のタングステン線の先端を NaOH の 1 規定水溶液により電解エッチングして鋭い先端円錐形をつくり、蒸留水洗して乾かし、円錐部に Ni メッキを行ない蒸留水洗ののち、さらに先端部の In メッキを行なって蒸留水洗乾かす。このウィスカ先端部を n 形 GaAs 基板へ接触させ、三角波パルス電圧を  $0.2 \sim 0.5[\text{V}]$ 、繰返し  $1[\text{kHz}]$  で短時間ウィスカと基板間に加えてボンドを行なう。このダイオードの静特性の例として図 7 が得られ、非直線性を示し、 $\text{CO}_2$  レーザの検波目的に使う。電流測定にはエレクト

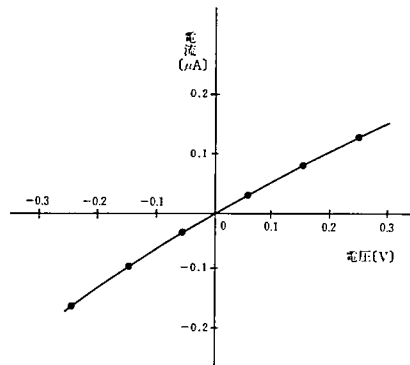


図 7

ロメータ(アドバンテスト社 TR8601)を使用した。

n 形 GaAs ショットキダイオードは先端円錐形にエッチングされた径  $10[\mu\text{m}]$  のタングステン線を用い、この先端を n 形 GaAs へ点接触して構成する。静特性の例として図 8 が得られ、 $\text{CO}_2$  レーザ検波に使用しうる。

これらのウォームキャリアダイオードとショットキダイオードとはマイクロ波領域の検波器としてすでに使用されているもので<sup>7)8)</sup>、 $\text{CO}_2$  レーザの変調用副搬送波周波数でも十分に動作しうる。

$\text{CO}_2$  レーザ発振管の反射鏡間約  $1050[\text{mm}]$ 、管電流  $10\sim 25[\text{mA}]$  において管電圧は  $5.2[\text{kV}]$  ( $4.4\text{Torr}$ )、 $6.0[\text{kV}]$  ( $5.6\text{Torr}$ ) でほぼ一定である。管電圧の刻々の変動と管電流変動はレーザ発振に微細な雑音を形成するので、DS 変調の場合でも S/N を悪くする。とくに規則性の振動波形が存在するとレーザ出力の変調操作に影響を生じる。このため図 9 の回路で管電圧を分圧し微分回路を使って端子 1 で観測し、管電流を抵抗  $R'$  の電圧降下から微分回路を使って端子 2 から観測した。 $R' \ll R_s$  とし、分圧抵抗  $R$  は管の見掛け上の抵抗より十分に高い値にとる。端子 1 または 2 からオシロスコープで観測したが正弦波的振動は観測できなかった。レーザ管の陰極付近ではスパッタリングで管壁黒化が著しく、空間電位に影響を与えているようで、不規則的な管電圧管電流の変動を常に観測した。したがってレーザ検波出力にも不規則雑音を検出されている。

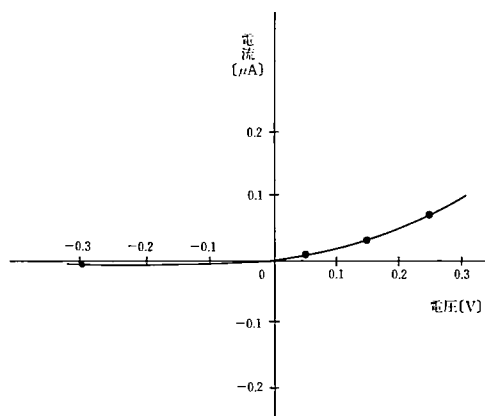


図 8

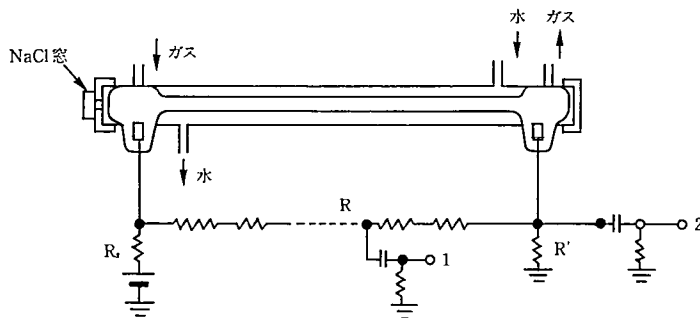


図 9

#### 4. GaAs 系レーザの変調

情報信号で変調された GaAs 系レーザを石英系光ファイバで伝送するには、単一モードファイバで約 30[km] ごと、集束形(グレーデッドインデクスモード)ファイバで約 40[km] ごとに中継を行なわれている。この場合変調レーザから、いったん副搬送波周波数帯域の電気的信号に戻して増幅し、波形形成して、送信用 GaAs レーザ発振器を変調(情報電気信号をレーザ電源と直列に入れて変調)して次の伝送区間へ送信される。この中継点での傍受を困難にするためには、発信局側で DS 変調を行なうことが考えられる。受信局では送信 PN 符号と同期をとり、追跡し、復号を行なうこと前述同様である。

また GaAs 系レーザ発振器は材料の選定によって図 10<sup>9)</sup> のように発振波長をいろいろとりうるので、10 個以上の波長帯のレーザを同時に 1 個の石英系光ファイバで伝送できる。したがって PN 符号に応じ不連続的に波長を変えることすなわち波長ホッピングを選定することが可能と思われる。中継点および受信点では光分波器を必要とする。光分波器にはプリズム(図 11)とか、回析格子(図 12)とかが用いられよう<sup>10)</sup>。波長多重度が少ないときには干渉膜フィルタでも可能であろう。このようにして分波された各レーザから副搬送波電気信号に戻され増幅され、次の伝送区間のレーザ電源を変調するのに使われる。受信点では送信側 PN 符号と同期をとり、情報への復号が行なわれる。

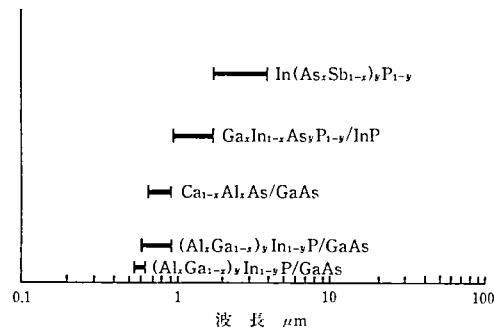


図 10 半導体ダイオードレーザの発振波長域(光産業技術振興協会光技術動向調査報告書 I (昭和 60 年)より引用)

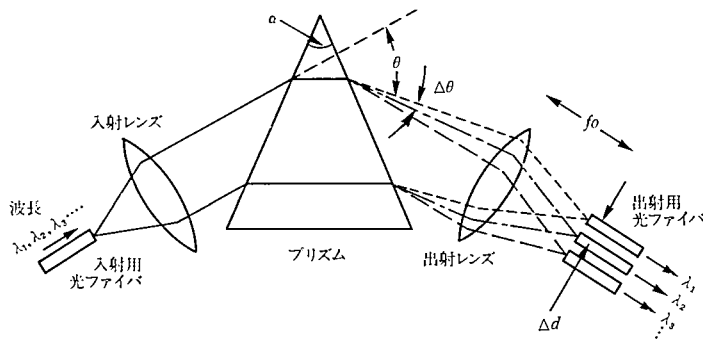


図 11

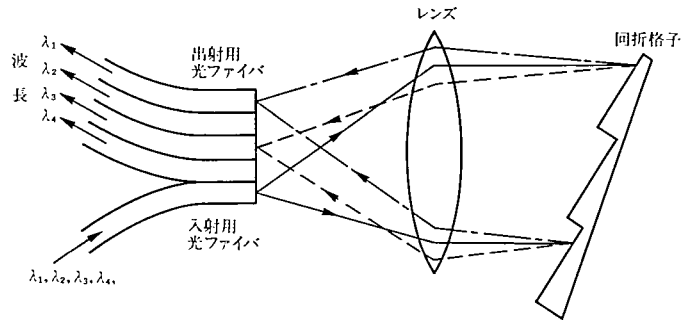


図 12

GaAs 系レーザの検波器としてはアバランシェホトダイオードなどが使われる。

石英光ファイバでは  $1.55[\mu\text{m}]$  で最低損失  $0.2[\text{dB/km}]$  が得られているが、波長  $2.0[\mu\text{m}]$  以上では減衰著しい。この波長以上で低損失のものとして、ふっ化物光ファイバ<sup>11)12)</sup> (波長  $2.63[\mu\text{m}]$  で  $0.7[\text{dB/km}]$ ) が実用となる可能性をもつ。この場合レーザ発振源にこの波長付近のものの選定を必要とする。この波長でも DS 変調は可能と思われる。

## 5. ま と め

情報で変調された  $\text{CO}_2$  レーザの検波目的に n 形 GaAs 基板をもつウォームキャリアダイオードとショットキダイオードの試作を行ない、非直線性静特性を得た。なお n 形 GaAs と In のオーミック接触別例は文献<sup>13)</sup> にもある。

大気中伝送の  $\text{CO}_2$  レーザと光ファイバ伝送の GaAs レーザについて、中継点での故意の傍受を困難にする手段として、スペクトラム拡散変調を副搬送波周波数に適用することの提案を述べた。

関連する部分的研究を行なった昭和 62 年度と 63 年度卒業研究学生の労を多とする。

## 参 考 文 献

- 1) 角川, 塚本: 電子通信学会誌 Vol. 65(1982) No. 10 pp. 1053
- 2) 尾崎弘: 過渡現象論, 2 版, 共立出版, 昭 57
- 3) R. C. Dixon (立野, 片岡, 飯田訳): 最新スペクトラム拡散通信方式, ジャテックス出版, 昭 53
- 4) D. P. Morgan: Surface-Wave Devices for Signal Processing; ELSVIER, Amsterdam, 1985
- 5) 安岡, 高橋, 宮田: 電子通信学会論文誌 Vol. J63-C(1980) No. 5 pp. 287
- 6) 安岡, 原川: レーザ研究 Vol. 10 (1982) pp. 200
- 7) 菊池, 古川: 電子通信学会論文誌 Vol. J64-C (1981) No. 10 pp. 658
- 8) 植之原道行: マイクロ波半導体デバイス, コロナ社, 昭 46
- 9) 前田三男: 量子エレクトロニクス, 昭晃堂, 昭 62
- 10) 福光於菟三: 光エレクトロニクス入門, 昭晃堂, 昭 62
- 11) 高橋: 電子情報通信学会誌 Vol. 70 (1987) No. 3 pp. 254
- 12) 岩崎裕: オプトエレクトロニクス材料: 電子通信学会, 昭 58
- 13) R. K. Willardson, A. C. Beer: Semiconductors and Semimetals, Vol. 15(Contacts, Junctions, Emitters) Academic Press, 1981