

CO₂ レーザ通信における変調と復調

宮 田 豊 夫*

Modulators and Detectors for CO₂ Laser Communication

by Toyoo MIYATA

The construction details and characteristics of LiNbO₃-Ge modulators with diffraction to CO₂ laser are discussed. And some detecting diodes having the whisker antennas are discussed and compared with the HgCdTe detectors.

1. まえがき

CO₂ レーザの発振波長 10.6 [μ m] は大気中をきわめて良好な透過率でレーザ伝送できる波長帯域内にあって、大出力レーザも容易に得られるので、大気中通信伝送の媒体として使用することに着目されている。このため信号による変調と受信復調の技術発展が強く望まれている。

可視光付近のレーザを信号により変調する方法としては電源変調（ガリウムヒ素レーザなど）、電気光学効果（結晶の屈折率が電界に比例するポッケル効果、電界の2乗に比例するケル効果）による偏向変調、磁気光学効果（ファラデー回転）による偏向変調、および音響光学効果（ラマン・ナッス回折またはブラッグ回折）などが使われている。波長 10.6 [μ m] の赤外線レーザの変調については一般の光学材料が使いにくいこともあって、音響光学効果変調が有効なことを先に報告した¹⁾。音響光学変調素子は温度変化に対し安定であり駆動も容易で、デジタル変調や周波数変調を行いうるし、回折効率も高い。

変調された CO₂ レーザから信号をとり出すための復調について、可視光のような有効検出器が無い。熱電対、焦電形検出器、液晶、ゴレーセル (Golay Cell)、ボロメータ、アバランシェホトダイオードなどは変調赤外レーザ光の周波数に十分応答できない。しかし数十 [MHz] までの搬送波に対応できるものとして水銀カドミウムテルル (HgCdTe) の光起電力効果（光導電効果ではやや低い）の利用がある。1 [GHz] 以上の周波数に응答できるものとして、CO₂ レーザの電界成分をウィスカアンテナで受信し、MIM ダイオード²⁾³⁾で検波する素子の検討は先に報告^{4)~7)}したが、ダイオード寿命がきわめて短い。

本報告では音響光学効果による変調素子の構成法の検討を行ない、次にタングステン (W) をゲルマニウム (Ge) へ点接したダイオードと他の検波器との比較をして実用性の検討を行なった。変調信号は符号化パルス列であると仮定し、変調素子としてニオブ酸リチウム (LiNbO₃) 振動子を高純単結晶ゲルマニウム棒の端面へ導電接着剤を介して

* 理工学部電気工学科教授 通信工学

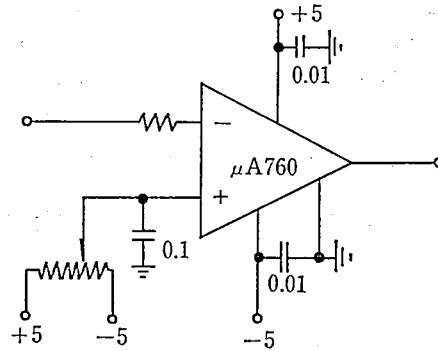


図 3 コンパレータ回路

クサに入力し、その出力を前置増幅器により出力調整して電力増幅器 (N. Y., ENI 製 403 LA) に加え、37 [dB] 増幅したもので、 LiNbO_3 へ供給する。

CO_2 レーザ出力はスリットを通して Ge へ照射されるが、レーザパワーメータ (Laser Precision Corp. 製 RL-3610) であらかじめパワー測定しておき、Ge への入射角を調節して回折レーザ出力を得るようにする。その回折レーザを検知するため液体ちっ素 77 [°K] で冷却した HgCdTe (New England Research Center Inc. 製) で受信し、信号パルスに対応した光導電効果による抵抗変化を電圧降下としてオシロスコープ上に検出する。

2.2 変調特性

はじめに超音波振動伝搬媒体である Ge 棒の遠端をトランスジューサ面と平行にした角棒を別途用意 (固有抵抗や結晶軸は図 1 と同じ) し、トランスジューサを駆動すると、パルスに対するエコーを検出できる。 LiNbO_3 の厚さに応じた電気音響変換効率の最大周波数は図 4 となり、薄くすると高い周波数へ移る。ただしこの厚さの測定器が無く、顕微鏡

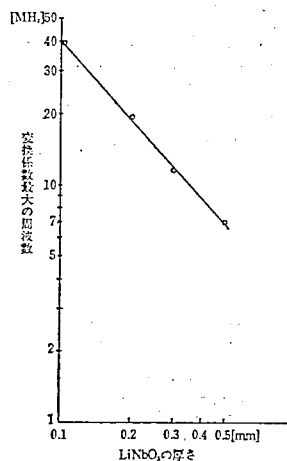


図 4 電気音響変換係数の最大周波数

デッキガラス厚さとその枚数で比較したので横軸は正確で無いが傾向として判断できる。

図2において Ge へレーザを入射する手前にチョップをおき, Ge 通過後のレーザを HgCdTe 検出器でオシロスコープ観測し, Ge なしときと比較し, Ge 中の透過度を求めると, 幅 10 [mm] に対し約 70% であった。ここにチョップは高速回転するアルミニウム円板の周辺部に直径 2 [mm] の孔 5 個を同心円上に中心角 45° 内だけにつくったものである。

次に図2による変調効果測定において, 超音波駆動電力に対する回折レーザの検出出力

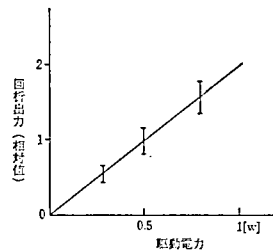


図 5 超音波駆動電力と回折出力

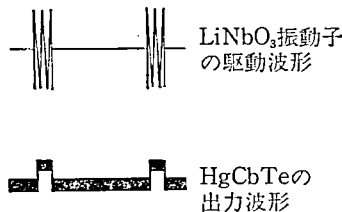


図 6 波形

は図5のように比例的であり, 信号パルスに対応することがわかる。検出波形は雑音の中でもパルス信号を検出でき (図6), また Ge 端面からレーザ照射点までの超音波伝搬時間差が見られる。2, 3 倍調波励振もできることがわかった。

CO₂ レーザの周波数を f_0 とすると音響光学素子による回折レーザ出力の周波数は, トランスジューサ駆動搬送波の周波数 f_d だけドップラ・シフト¹²⁾されるので $f_0 + f_d$ となり, 周波数変調効果を利用することも考えられる。

2.3 変調特性の検討

振動子の実験材料としては, 厚さ加工の容易さから LiNbO₃ が最適のようである。音響光学媒体としては, 10.6 [μm] 赤外線透過率の大きいものである必要上 Ge, Te, Si, GaAs, CdS などが考えられるが, 回折効率の点から Te が Ge より大きいけれども, 音速では Ge のほうが Te より遙かに大きい。また光学的吸収では Ge は小さい。これらの点から音響光学素子には LiNbO₃—Ge を用いるのが適当と思われる。

図5から駆動電力を大きくするほど回折効率が良いが, トランスジューサの破損を招かないよう注意を要する。信号源としてパルストレンを使ったが, 多重度を多くとり大気中

伝送を扱う通信として信号対雑音の比を良好に保つためには、振幅変調の搬送多重よりパルス符号化時分割多重の変調法が実用に適すると言えよう。

強度 I_0 で入射したレーザがブラッグ反射により回折された出力レーザ I は次式¹³⁾で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} I &= I_0 \sin^2 \left(\frac{\pi^2}{2} \frac{l}{H} \frac{1}{\lambda^2} M P_a \right)^{1/2} \\ P_a &= \eta_{ea} P_d \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(1)$$

ここで H , l はそれぞれトランスジューサの高さ、幅であり、 M は超音波媒体の性能指数、 λ は入射レーザの波長、 P_a は超音波の強さ、 P_d はトランスジューサの駆動電力、および η_{ea} は電気音響変換効率である。ここでは超音波伝送媒体内での超音波とレーザの減衰を省略している。上式 () 内は一般に小さく、展開近似して

$$\eta = \frac{I}{I_0} \div \frac{1}{\lambda^2} \frac{\pi^2}{2} \left(\frac{l}{H} M P_a \right) \quad \dots\dots(2)$$

η は回折効率と呼ぶことにする。超音波伝送媒体の材質と形状および駆動電力が定まると回折効率 η は電気音響変換効率 $\eta_{ea} = P_a / P_d$ に比例することになる。すなわち、 LiNbO_3 の動的インピーダンス $j\left(\omega_0 L - \frac{1}{\omega C}\right) + R$ の基本共振角速度 ω_0 において最大変換効率を生じる。(図7の等価回路で R へ最大電力が注入される)。

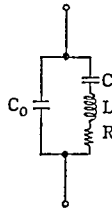


図7 LiNbO_3 振動子の等価回路

厚さを0.1[mm]以下に薄くして変調キャリア周波数を数十[MHz]以上にとることできるが、実用上加工可能な限界があろう。この数十[MHz]での回折変調は比較的容易で実用できる。

回折変調されたレーザ出力の検知を行うときの HgCdTe 光導電回路の雑音について考える。信号パルスによる光導電変化を同軸ケーブルでオシロスコープへ導き、信号波形を検出する場合に、オシロスコープ入力を増幅度高いレンジで観測する関係で外部からの誘導雑音を受け易い。

(1) レーザ発振管端子電圧変動は、陰極スポットの変動や陰極スパッタリングによる管壁黒化部電荷変動などによるものがあるが、変調周波数域1～数[MHz]の振動発生はないようである。管電圧を分圧して同軸ケーブルでオシロスコープ観測するとき、レベル変動はあるが、陰極振動や陽極振動¹⁴⁾とよぶ電気振動は生じていない。

(2) HgCdTe 光導電検出回路の雑音も観測されない。

(3) 変調回路の電力増幅器出力は同軸ケーブルで振動子へ導かれているが、Ge棒と支持台との配置如何によって HgCdTe による検出回路へ誘導雑音を生じることがある。

変調回路の同軸ケーブルに長い寸法のものを使うと、受信信号検出回路へ誘導を生じ、受信信号とわずかな位相差をもつため不安定になりやすい。極力短い同軸ケーブルを使い外導体の接地間隔に注意を要する。

3. 復調素子

3.1 復調実験の方法

W—Ni で構成された MIM トンネル効果素子では、周波数 28 [THz] に応答できることを先に報告した⁴⁾ が短寿命であるため、多重度を落としても安定動作する検波ダイオードが望まれる。ここでウォームキャリアダイオード⁹⁾ とショットキダイオード¹¹⁾ が実用上有望かどうかの検討をするため試作実験を行なった。

ウォームキャリアダイオードの試作は次の手順で行なった。あらかじめ 3 [mm] 径の真ちゅうビスの頭に固定されたタングステン [W, 直径 10~20 μm] 線の先端をとがらせるため既報の 1 規定 NaOH 液によるリングエッチング法⁵⁾ を用いて、鋭い円錐形先端をつくり、蒸溜水洗とエチルアルコール洗して検鏡する。次に硫酸ニッケル NiSO_4 を 3.75 [g], 塩化アンモン NH_4Cl を 0.375 [g], ほう酸 H_3BO_3 を 0.375 [g] 合せて 25 [cc] の蒸溜水に溶かした液をつくり、ガラス板上の純ニッケル線リングの上へ点滴し、この液中へ W ウィスカの先端部約 5 [mm] くらいを挿入し、数秒後とり出す。蒸溜水洗のあとエチルアルコール洗をして顕微鏡で Ni 塗できたかを検査する。次に硫酸インジウム $\text{In}_2(\text{SO}_4)_3$ を 1.13 [g], 硫酸ナトリウム Na_2SO_4 を 0.25 [g], 塩化ナトリウム 0.125 [g] を合せて 25 [cc] の蒸溜水に溶かした液をつくり、ガラス板上の円形 In 線の上へ点滴し、この液中へ先に Ni メッキした良好なウィスカの先端部を挿入して、数秒後とり出す。蒸溜水洗のあとエチルアルコール洗をして顕微鏡で検査する。In 先端はやわらかいので十分に注意して、先端から 2~3 [mm] の点で直角に折曲げ、移動架台上へビス部をねじ込む (図 8)。

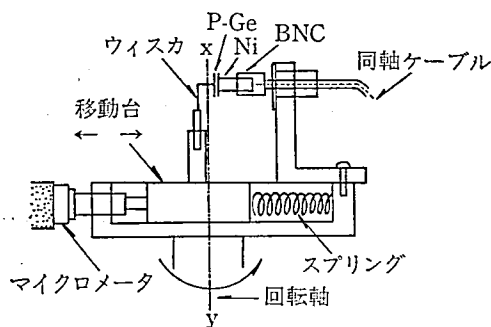


図 8 ダイオードとそのマウンド台

次に抵抗率 30 [Ωm] の p 形 Ge 単結晶ペレットの面を (111) とし、厚さ 0.6 [mm] のものを用い、これをリンデ・アルミナ粉 (純度 99.98%, 粒度 0.3 μm , ユニオンカーバイド社) で研磨したのち、機械加工による不整部分を除くためエッチング液 CP-4 A ($\text{HNO}_3 : \text{HF} : \text{CH}_3\text{COOH} = 5 : 3 : 3$) に浸し、数分のちに取出して蒸溜水洗をして、エ

チルアルコールで洗う。この Ge ペレットの片面へ In を真空蒸着し軽く熱処理して取出し、Ni 円柱 (MIM トンネル効果素子に使用したもの) の端面へ導電接着剤シルベストで圧着する。Ge 自由表面をアセトンで拭き、図 8 の装置台 (図の部分を上と前後に移動、左右に傾斜できるもの) の BNC ソケットへ Ni 円柱部を周辺絶縁して挿入し固定する。このとき BNC の中導体と Ni 円柱との接触を良くするため、細い銅線を中導体へ放射状に挿入する。ウィスカを支える荷台を左右に微動して Ge ペレット表面にウィスカの先端を軽く接触させ、この接触部へ振幅 10 [V]、くり返し 10 [KHz] の三角波パルスを数十秒前後加えてウィスカ先端部を Ge ペレットへボンディングして素子完成する (In が Ge へ接点中心に周辺へ拡散する)。ボンディングパルスは図 9 に示される。

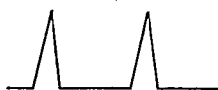


図 9 ボンディング・パルス

ショットキダイオードの試作では次のようにした。すなわち純度高い 30 [Ω -cm] くらいの n 形 Ge 単結晶 ($4 \times 4 \times 0.6$ mm) のペレットへ、10 [μ m] のタングステン線の円錐形先端 (電解エッチング法⁵⁾ によるもの) を接触させる。これらは図 8 の荷台上に装置し、マイクロメータで微動させて接触圧力を調節する。パルスフォーミングも試みた。

3.2 検波特性

ウォームキャリアダイオードの特性測定には図 10 の回路を用いた。

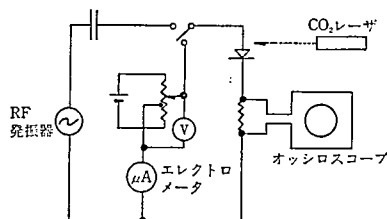


図 10 検波特性測定回路

静特性の例は図 11 のように得られた。ウィスカと Ge との接触部が広がり抵抗のみならば直線であるべきところ、このような非直線であるのは接触部電界による Ge 中のキャリア加速効果が予想される。図 11 は次に示される図 12 のショットキダイオード静特性とは著しい相異がある。サンプル中には電流少なく直線性静特性もあった。

ラジオ周波電源を用い、このダイオードの特性を求め、入力交流に対し検波出力電圧の特性も得られる。

交流電源を除き、ダイオードのウィスカ部へ CO₂ レーザを入射し角度を調節してオッ

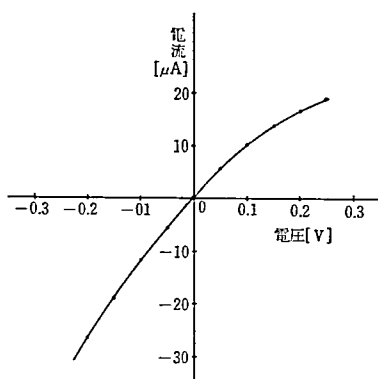


図 11 ウォームキャリアダイオードの静特性 (例)

シロスコブで観測すると、レーザ入射角 5 度付近に最大検波出力感度があり、減衰振動的で次の検波出力ピークは 10 度付近、さらに 15 度付近にあり、進行波アンテナとして動作しているとみなしうる (W—Ni のトンネル効果素子⁴⁾におけるウィスカ部と同様)。

ショットキダイオードの静特性の例は図 12 のようで非直線性を示し、このダイオードも検波に使いうる。しかし両ダイオードの変調波感度は MIM より落ちる。

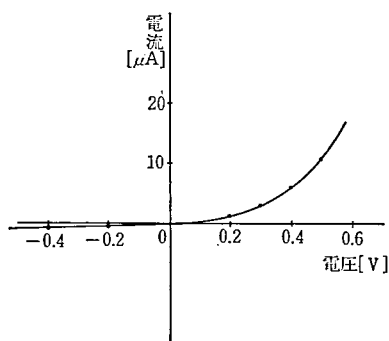


図 12 ショットキダイオードの静特性 (例)

3.3 検波特性の検討

この両ダイオードは信号パルスの検波目的に使用できることがわかった。ウォームキャリアダイオードでは In メッキされた先端がやわらかいので、Ge との接触を調整する間に先端を害することもあり、安定したボンド構成には他の 3 価材料を選ぶとか、組立作業とかに検討を要する。

ウォームキャリアダイオードの動作については、次のように説明されている⁸⁾⁹⁾。W 線ウィスカの先端半球面 (半径 a とする) が比抵抗 ρ の p 形 Ge 半導体単結晶に接触した構造について、広がり抵抗 R_s はウィスカ先端半径 a に比して半導体厚さ h が十分に大きいと、 $2h$ の間隔に影像点電荷正と負を考慮して¹⁵⁾計算され次式が導かれている。ダイオードにかかる電圧を V 、通過電流を I とする。

$$|V/I| = R_s = \frac{\rho}{2\pi a} \left(1 - \frac{a}{h} \log 2 \right) \approx \frac{\rho}{2\pi a} \quad \dots\dots (3)$$

点接触部半径 a のすぐ外側の電界 E を放射状とみると (3) を用いて

$$E = -\left(\frac{dV}{dr}\right)_{r=a} = \frac{\rho I}{2\pi a^2} = \frac{V}{a} \quad \text{.....(4)}$$

この部分で消費される電力密度 p は、全入力を P とすると

$$p = \frac{E^2}{\rho} = \frac{I^2 R_s}{2\pi a^3} = \frac{P}{2\pi a^3} \quad \text{.....(5)}$$

この p によってボルツマン分布をする正孔エネルギーを温度へ換算して T_0 から T_e へ温度上昇させるものと考え、次式が得られている¹⁶⁾。

$$\frac{3}{2}k(T_e - T_0)n = \frac{E^2}{\rho}\tau_e = \frac{P\tau_e}{2\pi a^3} \quad \text{.....(6)}$$

ここに正孔温度 T_e では正孔平均エネルギーが $(3/2)kT_e$ であるとし、格子温度は不変で T_0 と考える。 k はボルツマン定数、 τ_e は正孔エネルギー緩和時間、 n は正孔密度とする。加速された正孔の熱電能 Q に次式が得られている¹⁷⁾。 τ_e は 10^{-11} [sec] 以下とされる。

$$Q \approx \frac{k}{q} \left(\frac{3}{2} - \frac{E_f}{kT_e} \right) \quad \text{.....(7)}$$

この式で、フェルミレベル E_f と温度 T_e に関してボルツマン分布の正孔密度 n は次式で定められる。

$$n = 2(2\pi mkT_e h^{-2})^{3/2} \exp(E_f/kT_e) \quad \text{.....(8)}$$

m は正孔実効質量、 h はプランクの定数、 q は正孔電荷量である。 Q による熱起電力 V_{th} は

$$V_{th} = \int_{T_0}^{T_e} Q dT = Q(T_e - T_0) \quad \text{.....(9)}$$

(9) に (6) の $T_e - T_0$ を用い、 E に (4) を用いて得た式を要約すると

$$V_{th} \propto QE^2 \propto V^2 \quad \text{.....(10)}$$

となる。 V_{th} の極性はウィスカが負極となる。

図 11 の静特性は (3) によるオーム性電流と (9) による電流 V_{th}/R_s との重ね合せとなり、直線からのずれをつくるものと説明される。

すなわちウォームキャリア素子では W ウィスカから p 形 Ge ペレットへの正電荷移動は加速され、電圧電流特性に非直線性をつくるものと考えうる。

いっぽうショットキダイオードの導電は薄い空乏層と金属とのショットキ効果の導電となること周知のとおりである。

4. 受信検波器の比較検討

変調された CO₂ レーザをウィスカ・アンテナで受信するとき、大気中伝送であるので、ゆらぎ (かげろう現象) の対策が必要となる。このアンテナ受信では $10 \sim 20$ [μm] の W 線ウィスカへ 10 度以内の特定角度で CO₂ レーザを入射させることも実用上不利な点である。これに対し HgCdTe 赤外検出器は面 (たとえば 2×2 [mm] あるいはそれ以上) で受信するから非常に有利であるが、液体ちっ素温度 77 [$^{\circ}\text{K}$] に冷却を必要とする不便さがある (これは Bi-Te 系電子冷却材料によって実用を容易にしうる)。また空中の水蒸気凝結を除くため、真空容器に入れることと赤外透過窓を用いて対策しうる。周波数応答はやや不足である。

フォトンドラッグ検出器 (浜松エレクトロニクス B-749 を用いた) は良い周波数応答とされている (τ_e が 10^{-11} [sec] 以下¹⁶⁾) が、感度小さく、レーザ通信の受信に使いにくい。

アンテナ受信を使う MIM ダイオード、ショットキダイオードおよびウォームキャリアダイオードはいずれも周波数応答良好であるが、アンテナ受信に精細な調節を必要とする点で実用上不利となる。MIM ダイオードは特別に周波数応答が良いが短寿命である点を不利とする。ショットキダイオードよりもウォームキャリアダイオードは W ウィスカと Ge ペレット間の接触部構造に安定していて実用性あるが変調周波応答にやや不足する。

GaAs 系レーザの光ファイバ伝送における受信検波器にはアバランシェホトダイオード APD またはホトダイオード PD を用いるが、光の領域に近い波長のため通常の半導体技術を容易に使用できる。しかし、これに比べ約 10 倍の波長域にある CO₂ レーザでは熱線であり、直接 APD や PD で受信できない。

5. む す び

大気中伝送の CO₂ レーザ通信を実用化するための変調と復調の素子について検討した。10 [km] 中継距離ではミリ波より安価な設備維持ができると思われる。

変調には圧電振動子 LiNbO₃ を搬送波 1～数十 [MHz] で振動させ (信号でパルス変調)、この音響振動を Ge 棒に進行波伝送させる途中へ CO₂ レーザを入射させて回折レーザを得る変調法は有用であることがわかった。

復調にはウォームキャリアダイオード、ショットキダイオード、および HgCdTe 赤外検出器などがあり、最後者がよい。

終りにレーザ用光学台など各種の援助をいただいた電気工学科井上教授に感謝し、コンピュータ回路の試作に協力いただいた横倉助手に感謝します。昭和 57～61 年度の卒業研究として、設備不十分な状況下しかも 10 [μm] という細いウィスカを扱って、それぞれの分担実験をされた学生諸君に感謝します。

参考文献

- 1) 安岡, 高橋, 宮田: 電子通信学会論文誌 J 63—C (1980) pp. 287
- 2) K. M. Evenson, et al: Appl. Phys. Lett. 20 (1972) pp. 133
- 3) M. Faris, et al: IEEE J. Quantum Electronics, QE—8 (1972) pp. 558
- 4) 桜田, 安岡, 宮田: 電子通信学会論文誌 J—59 C (1976) pp. 777
- 5) 安岡, 桜田, 宮田: 電気学会論文誌 97—C (1977) pp. 201
- 6) 桜田, 安岡, 宮田: 電子通信学会論文誌 J 61—C (1978) pp. 25
- 7) Y. Yasuoka, T. Sakurada, M. Miyata: Japan. J. Appl. Phys., Vol. 17 (1978) pp. 171
- 8) 菊池, 古川: 電子通信学会論文誌 J 64—C (1981) pp. 658
- 9) 安岡, 原川: レーザ研究 Vol. 10 (1982) pp. 200
- 10) L. W. Aukerman, et al: Opt. Lett., 1 (1977) p. 178
- 11) 井上, 安岡: 電子通信学会論文誌 J 67—C (1984) pp. 270
- 12) 桜田, 安岡, 宮田: 電子通信学会論文誌 J 61—C (1978) pp. 555
- 13) E. J. Gordon: Proc. IEEE Vol. 54 (1966) pp. 1391
- 14) 宮田: 電気学会誌 79 巻 (1959) pp. 1615
- 15) 谷安正: 静電場, 河出書房 (1942)
- 16) I. R. Harrison et al: Proc. IEEE Vol. 54 (1966) pp. 588
- 17) J. Zucker: J. Appl. Vol. 35 (1964) pp. 618