

CO₂ レーザ通信用

MIMダイオード検波器

宮 田 豊 夫*

MIM Diode Detectors for CO₂ Laser Communication

by Toyoo MIYATA

The construction details of the metal-insulator-metal (denoted as MIM) diode detectors for CO₂ laser communication is discussed. The responsivity of the MIM diodes for the modulated CO₂ laser is investigated as functions of the incident angle and the diode resistance in order to determine the detection mechanisms.

It is indicated that the point contact MIM diode acts as a tunnel diode and its whisker acts as a long wire antenna.

1. まえがき

光を通信の媒体とすることは古くから用いられているが、多数同時に扱うことはできなかった。レーザ光は電波と同様に位相をそろえられた可干渉性（コヒーレンス）であるため、多重通信用電磁波として利用でき、マイクロ波より著しく多い通信回線数を取扱いうる可能性をもっている点に興味がある。

通信用レーザ光の伝搬媒体として、波長が短い場合はオプティカル・ファイバーの使用を考えられている。しかし CO₂ レーザでは波長が比較的長く、ファイバー径を大きくとる必要があり経済的に不利となる。しかるに CO₂ レーザの波長 10.6 [μ] は大気中透過率のきわめて良好な、いわゆる「大気の窓」と呼ばれる波長領域にあるため、大気を伝搬通路に選ぶことができ、臨時的あるいは秘密の通信に適する。通信目的には変調操作の容易さが必要であり、電気光学効果、磁気光学効果、超音波変調、および電源変調などが試みられているが、数百 [MHz] 以上で効率良く変調を行うにはなお研究が必要である。筆者ら^{1)~3)}は LiNbO₃-Ge 系超音波変調素子により強度および周波数変調のできることを示した。

変調レーザ光を受信して信号を検出するには、熱電対、焦電形検出器、ボロメータ、液晶、フォトダイオード、光導電セル、および光電子増倍管などが試みられているが、レーザの周波数に十分な応答はできない。1968年 L. O. Hocker⁴⁾ らが細い金属線と金属面との点接触ダイオードを波長数ミクロンに使用して、K. M. Evenson⁵⁾ らをはじめ多くの研究者⁶⁾ が常温で動作する検波器やレーザ光混合器などの研究をしている。筆者らはこの構造のダイオードについて指向性⁷⁾、マイクロ波変調応答⁸⁾、タングステン・ウィスカ⁹⁾、周波数特性¹⁰⁾、および温度特性¹¹⁾などを発表した。この報告ではダイオード製作条件の平易化と検出機構の検討などの点について報告する。

* 理工学部電気工学科教授 通信工学Ⅱ

2. 実験装置

2.1 信号の変換と検波器

GaAs レーザでは注入電流を信号によって変化させマイクロ波の変調と同様に振幅変調、周波数変調、およびパルス符号変調 (PCM と記号する) などの多重化方式をとりうる。しかし一般のレーザでは発振の変動を来すためこのような電源変調は使用しにくいので、超高速 PCM 変復調装置などの利用により各信号を時分割 PCM 多重化し、これをもってレーザ光を電界、磁界、あるいは超音波振動によって変調する方式が考えられている。この意味において本報告では、設備のつごうもあって、変調器として数個の孔を有する回転円板による光チョッパを用い PCM 信号に対応させるものとした。

変調されたレーザ光から信号を取出す検波器は、研摩されたニッケル平面 (Ni ポストという) へ酸化膜をつくりタングステン針 (W ウィスカという) を立てた構造のダイオードを用い、W-Ni 点接触ダイオードと名付けた。(一般に MIM 形という) 以下このダイオードについて述べる。図1は製作した W ウィスカと Ni ポストを装置した部分を示す。図示の装置は W ウィスカのレーザ光照射を受ける部分を中心に、縦軸 XY のまわりに回転できるほか、上下移動や縦軸 XY を鉛直線の向きより傾斜させることもできる載物台上に装置されている。W ウィスカの先端部は約 1 [mm] のところで 90° 折曲げられ縦支柱に固定されていて、この支柱はマイクロメータゲージを利用した微動装置により前進と後退ができて、Ni ポストへ W ウィスカの圧着力を調節できるようにされている。

ポスト材料として銀⁵⁾などを用いた文献もあるが、表面酸化膜厚の制御のしやすさと価格などの点からここでは Ni を用いた。ウィスカ材料としてはレーザ光波長といど以下の細い直径の線とする必要から、機械的強度の点で W が最適である。

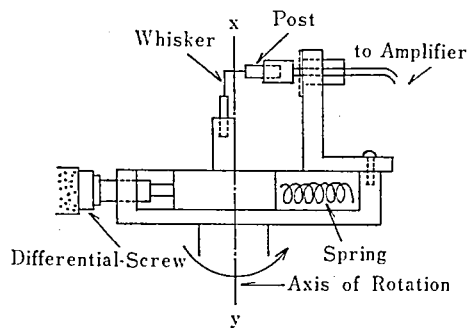


図1 ダイオードとそのマウント

2.2 Ni ポストの作成

再現性を良くするためには純度高い材料を用い、表面の結晶面の均一とくに仕事関数の均一を必要とする。このため材質を選ぶほか表面研摩仕上げに精密を必要とする。この実験では純度 99.99% (ジョンソン・マッセ社製) 5 [mm ϕ] の Ni 棒を 5.5 [mm] 長さに切断し、これをサンドペーパー、ラッピングフィルム、0.3 [μ] ダイヤモンドペーストの順に研摩剤を変えて研摩した。さらにりん酸・重クロム酸カリ混合液で電解研摩を行ったのち、順次純水洗と純エチルアルコール洗をして、アセトン液中に次の工程まで保存する。

表1 温度と厚さによる所要酸化時間

$s[\text{\AA}]$ $t[^\circ\text{C}]$	10	26	50
300	6' 36''	1hr	3hrs 40'
400	11' 16''	1' 37''	6' 07''
500	0.8''	7''	26''

研磨された Ni 表面に 所望の厚さの酸化膜を 電気炉加熱によって 作成する。このとき R. Holm¹²⁾ の実験式

$$s^2 = 5^2 + t \cdot 10^{13.3 - 6000/T} \quad (1)$$

により膜厚を算定する。この式で s は酸化膜厚 (\AA), t は加熱時間 [hours], T は加熱温度 [$^\circ\text{K}$] である。上式から温度と所望厚さになるまでの時間を計算すると 表1 となるので、必要な酸化膜厚はこの表を参考にして作成する。

2.3 Wウィスカの作成

Wウィスカは先端を鋭く円すい形に形成し、ダイオード動作のとき酸化ニッケル膜との接触部における結晶面仕事関数が経時変化しないように仕上げをする必要がある。Wウィスカ線は $1\sim 25\text{ }\mu\text{m}$ のものを使用されているが、筆者らは $8\text{ }\mu\text{m}$ を使用した。静電容量を減らし、ダイオードの変調周波数限界を高める意味からも、タングステンの Ni ポストに接近する部分は極力鋭くとがらせる必要があるので、電解エッチングを行う。この場合エッチング後の形状に均一性をもたせるため既報の電解エッチング装置⁹⁾を用いた。これは陰極を直径 $0.5\sim 0.7\text{ [mm}\phi\text{]}$ の銅線で直径 $4.5\text{ [mm}\phi\text{]}$ のリングをつくり、このリングへ1規程 NaOH 水溶液を表面張力で張り、その中央へ W 線を上から通し、W 線を陽極として直流電圧をかける。液膜から下の部分の W 線自重により、エッチング進行とともに自重切断落下を行わさせる方法としたものである。

エッチングされる W 線の上端はあらかじめ銅線巻き付けをし、この端部を $3\text{ [mm}\phi\text{]}$ 真ちゅうビス端へはんだ付けする。このビスをエッチング装置へねじ止めて W 線下部を

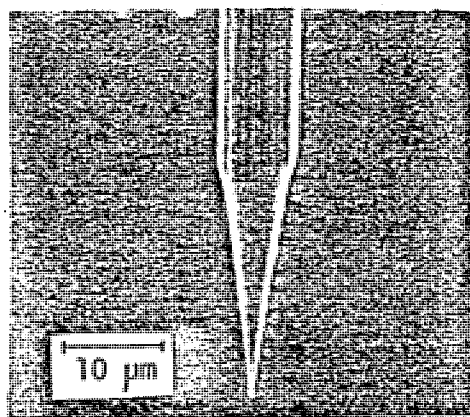


図2 タングステンウィスカー
(先端曲率 500\AA 以下)

エッチング用銅リングの NaOH 液膜中央で貫通させ、この膜下長さを適当に選定することによりエッチング終了時の W ウィスカ先端の形状を整えると同時に自重落下をさせることができる。

2.4 CO₂ レーザ

He:7, N₂:2, CO₂:1 の比に混合されたガスをボンベから減圧弁をへてレーザ管へ流し、管の他端から圧力緩衝用の 250 [mmφ] デシケータを経て回転油ポンプで排気する方法を使用した。

レーザ管は内部ミラーを間隔約 750 [cm] に置き、ペロー部で発振モードの微細調節をする。ミラーのカップリングホール 2 [mmφ] に接する NaCl 結晶板を経て外部へレーザ光が取出される。レーザ管は水冷ジャケットの流量を調節して管内ガス温度を一定に保つようにされている。

3. 実験結果

3.1 変調された CO₂ レーザ光の検波

Ni ポストの表面酸化膜に接触する W ウィスカ水平部へ CO₂ レーザ光を照射し、ダイオード検波電流を負荷 R_L へ流し、これを約 60 [dB] 増幅してオシロスコープで検出する。しかしダイオード検出電圧は W ウィスカが Ni 酸化膜へ接触する圧力によって大きく変化するので、オシロスコープで波形観測しながらマイクロメータを微動させてこの接触圧力を高感度に調整する。レーザ光は光チョップで約 4.5 [kHz] に変調されている。

図 3 にダイオード受光特性測定系を、図 4 にその検出波形を示している。この検出波形

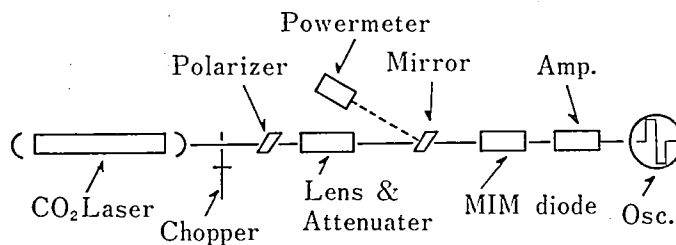
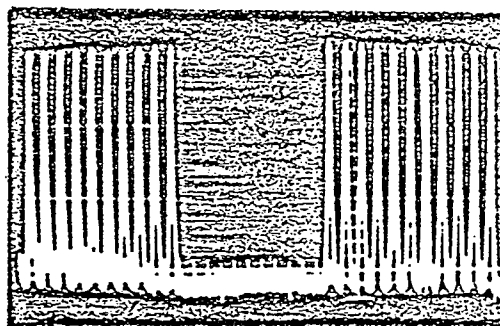


図 3 受光特性測定系



縦軸：2 mV/div., 横軸：5 m sec/div

図 4 CO₂ レーザ光に対する検出波形

の振幅を測定し出力電圧（比較値）とみなす。

3.2 CO₂ レーザ光に対する指向性と偏波の特性

水平に入射するレーザ光の方向は固定し、検波用の W-Ni 点接触ダイオードの水平部を水平面内に回転させることにより、W ウィスカ水平部とレーザ入射方向とのなす角 θ_1 を変化させる。偏光子を調節し入射レーザ光とWウィスカ水平部とのつくる平面内に電界ベクトルのあるときを偏角 $\theta_2=0$ とし、この状態から偏光子を回転することにより θ_2 を変化させるものとする。

θ_2 を 0 度に固定し θ_1 を変化するとき、検出電圧の変化を図 5 に示されている。すなわ

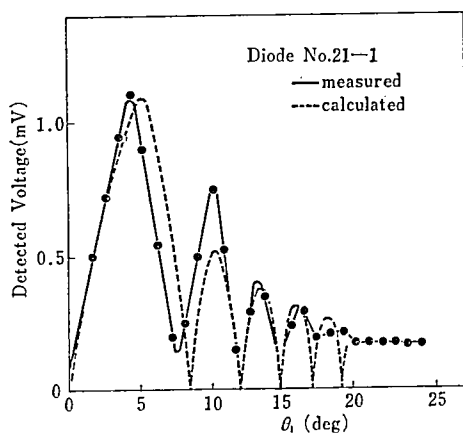


図 5 CO₂ レーザ光に対する指向特性

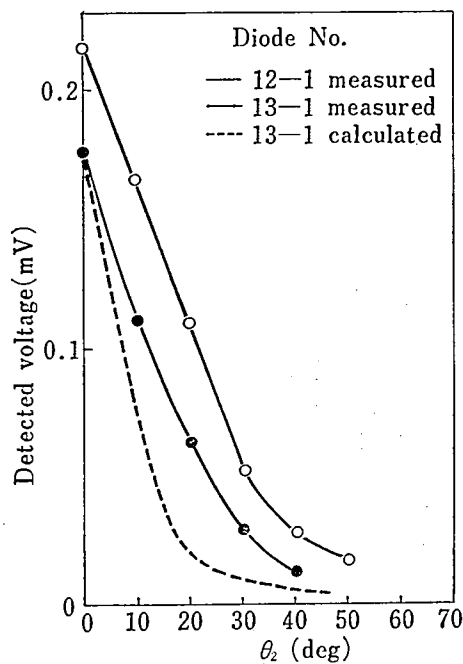


図 6 CO₂ レーザ光に対する偏波特性

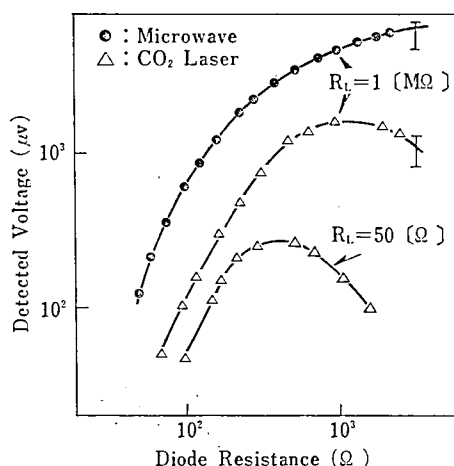


図7 ダイオード抵抗対検出電圧

ち入射方向により W ウィスカ上の各点に生じた起電力が W ウィスカ先端に伝達される
ときの合成ベクトルの大きさにより検出電圧のピークを生じ、あるいは位相差合成のため
出力の出ない谷ができる。この両点がレーザ入射角変化に伴い交互に生じている。これか
らレーザ光照射部にその波長数個が乗っているように見える。

次に θ_1 を最大振幅の指向角度に固定し、 θ_2 を変化させたときの検出電圧の変化が図 6
に示されている。 θ_2 増大とともに検出電圧減少を示している。

3.3 W ウィスカの接触圧力と検波出力

W ウィスカと Ni ポスト表面酸化膜との接触圧力を変化するとダイオード抵抗 R_D が変
化し、この R_D の変化により検出電圧が変化する。負荷抵抗 R_L によっても検出電圧が
変化する。図 7 に $R_L=50 [\Omega]$ 、 $1 [M\Omega]$ について検出電圧を R_D の変化に対応して測定した
結果が示されている。 R_D は $10 [MHz]$ の微小電圧をダイオードに加えたときの電流から
求めた値である。図 7 では検出電圧が最大となる R_D が存在し、 $R_L=50 [\Omega]$ より $1 [M\Omega]$
のほうが検出電圧大きくなることを示している。なおこの図ではマイクロ波を印加したと
きの山が R_D の高いほうにずれる傾向を示している。

次に Ni ポスト表面酸化膜の厚さを変化して検出電圧を測定すると厚さ $10 [\text{\AA}]$ 付近で
検出電圧最大となる。

4. 検 討

4.1 ダイオードの構成について

W ウィスカの先端を電解エッチングする場合、従来のようにエッチング液に浸して行
うとき液中金属表面からの泡などの影響があり注意を必要とするが、ここに用いたエッチ
ング膜方式では泡の考慮必要なく工程が容易で均一成品を得られる。

長島ら⁹⁾はダイオードの Ni ポストを微動装置によって前後移動させて接触を調節して
いるが、微細な W ウィスカの先端の状態を拡大鏡観測しながら接触調整を行うには不向
である。Ni ポストを固定し、その鏡面での W ウィスカ先端の反射像を見ながら行うほ
うが操作しやすい。

Ni ポスト表面の酸化膜厚さが検出感度に関係するので、膜の構成に精度の高い制御法の検討がこんご必要となる。W ウィスカと Ni ポスト間の静電容量を減少させるためには Ni ポストの形状を検討する必要がある。これらを解決してからダイオード構造の不安定性を除く努力が将来必要となる。W 線素材を 70 [μ] から細くする工作も可能である。

4.2 指向性について

K. M. Evenson¹³⁾ は波長 337 [μ] の HCN レーザを W-Si 点接触ダイオードに照射して指向性を測定した結果進行波アンテナとして動作していると述べている。

CO₂ レーザ光を W ウィスカに受光する場合にも進行波アンテナ（あるいは long wire antenna）とみなすとき、Ni ポスト表面酸化膜における点接触部の接触抵抗がアンテナの特性インピーダンスと整合することが、より良き出力を得ることになる。

W ウィスカがアンテナとして動作するとみなされるときアンテナ電流 I は¹⁴⁾

$$I = \frac{E \sin \theta_1}{2z} \frac{\exp[L\{\alpha' + j(\beta' - \beta \cos \theta_1)\}] - 1}{\alpha' + j(\beta' - \beta \cos \theta_1)} \times \exp[-L(\alpha' + j\beta')] \quad (2)$$

ここで L , z , α' および β' はそれぞれアンテナ長さ、特性インピーダンス、減衰定数および位相定数とし、 β は自由空間での位相定数、 E は電界である。この場合、 α' と β' は求めにくいので、 $\alpha' = 0$, $\beta' = \beta$ と仮定すると指向性係数 $D(\theta_1)$ は

$$D(\theta_1) = \cot \frac{\theta_1}{2} \sin \left[\frac{\beta L}{2} (1 - \cos \theta_1) \right] \quad (3)$$

となり、 I が最大となるレーザ光入射角度 $\theta_{1\max}$ は

$$\theta_{1\max} = \cos^{-1} \left(1 - \frac{m\lambda}{2L} \right) \quad (4)$$

となる。ここで $m = 0.742, 2.93, 4.96, 6.97, 8.99, 11, 13, \dots$ であり、 λ はレーザ光波長である。

図 5 では、 $L = 710$ [μ] として計算値と実測値がほぼ対応している。図 6 においても、測定値が計算値（2 乗検波特性と仮定）とほぼ類似の傾向の曲線であることを示している。以上の結果から W ウィスカが進行波アンテナとして動作しているとみなされる。

なお W ウィスカへ照射される赤外線による熱が W ウィスカ先端まで導かれ、Ni 酸化膜との接触部を加熱することも考えられるが、同時に 90 度折曲げの垂直部から放熱されるので、ダイオード部の温度上昇は軽微ではないかと思われる。この熱効果は指向性測定 of 山と谷についての性質には関係しない。

4.3 ダイオードの検出機構

既報の温度特性¹¹⁾から、温度に関する導電電流はショットキ効果であり、1000[Å] 付近以上の Ni 酸化膜厚のときである。この酸化膜が数十 [Å] 以内のとき、電流は温度に関係なくトンネル効果と見られる。CO₂ レーザ検出に使用された W-Ni 点接触ダイオードでは Ni 酸化膜が約 10[Å] 程度の薄膜であり、トンネル効果が支配的とする文献^{15,16)}とも合致する。

図 8 にこの点接触部におけるエネルギーレベルの模型を示している。電位障壁を求めるにはショットキ効果が支配的な厚さのものを試作し、その電圧電流特性と電流温度特性を液体ちっ素温度から常温まで測定すれば、酸化膜界面の W 側障壁電圧 ϕ_1 と Ni 側障壁電圧 ϕ_2 が求められる。電圧印加極性で ϕ_1 か ϕ_2 が定められる（別途報告）。

熱間線引加工によってつくられた W 線を電解エッチングした鋭い先端を負電極に、そ

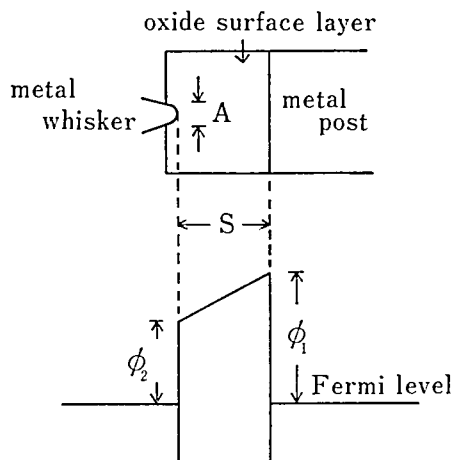


図8 接触部のエネルギーモデル

の前方に陽極リングをおき、 10^{-9} [Torr] 以上の高真空中で約 1 万 [V] かけて電界顕微鏡観測すれば、中心(011)面のまわりに先端からの曲率に対応した結晶面が規則的に露出している状況が仕事関数の低い面からの電界電子放出像として観測できる。このとき仕事関数は Muller¹¹⁾ によると面(111), (116)で 4.36 [eV], (001)で 4.53 [eV], (110)で 4.65 [eV] および (112)で 4.66 [eV] などが得られていて、先端 (011) は最も仕事関数高く電子放出像は見られない。一般には平均として W の仕事関数 4.54 [eV], Ni の仕事関数 4.61 [eV] として扱われているが、この両数値はきわめて接近しており、W ウィスカ先端付近の低仕事関数部が Ni 酸化膜との接触状態によって電流方向が変わる可能性も考えられる。観測された電流は W ウィスカの接触部各結晶面に対する総合として考えるべきで、障壁電圧 ϕ_1 と ϕ_2 を測定して検討すべきである。

4.4 ダイオードの寿命

W—Ni 点接触ダイオードは構造上、振動に対し鋭敏に変化するのでこんごの改良を必要とする。また Ni ポスト表面の酸化膜が長時間使用中に変化し、検出感度の低下を来すことも考えられ、あるいは W ウィスカの接触部表面状態の変化があるかも知れない。これらは W ウィスカからの熱伝導によるものかどうか未確認である。これらの対策のとりにくい問題点があり寿命は短い。

5. まとめ

W—Ni 点接触ダイオードの製作上の要点とくに再現性のある工作法を述べ、試作ダイオードにより CO₂ レーザ光の検出特性を測定し検討した。要約すると次のようである。

(1) ダイオードを構成する W ウィスカは CO₂ レーザ光に対し進行波アンテナとして動作するものと考えうる。入射電磁波の周波数に対応した電流が W ウィスカと Ni 酸化膜の接触部および Ni 極の間で非直線性の整流を受け出力として検出される。

(2) Ni 酸化膜がトンネル効果として動作すると見られるときに検出感度があり、最高感度の酸化膜厚とダイオード抵抗値がある。

(3) ダイオードは W ウィスカの先端付近と Ni 酸化膜をはさみ Ni ポスト面との接触面積およびその形状に関する静電容量があり、ダイオード抵抗 R_D と並列に動作し、RC

時定数で変調周波数の限界をつくるので、できるだけ鋭いウィスカを用い、接触面積も減らす必要がある。

終りにこの研究に対し協力をしていただいた防大安岡義純教授と桜田智実研究員（元）に深く感謝する。明星大学通信工学研究室における実験において、検出用増幅 IC についてご援助いただいた井上実教授に感謝し、除震機構工作について昭和54年度卒研究生、チョッパ、エッチング装置、酸化炉、微少電圧増幅器およびダイオード装置台などの製作について昭和55年度卒研究生の労を謝します。

参考文献

- 1) 桜田, 安岡, 宮田: 電子通信学会論文誌 J61-C (1978) pp. 555
- 2) 高橋, 安岡, 宮田: 電子通信学会光・量子エレクトロニクス (1978) OQE-78-150
- 3) 安岡, 高橋, 宮田: 電子通信学会論文誌 J63-C (1980) pp. 287
- 4) D. O. Hocker, et al: Appl. Phys. Lett. 12 (1968) pp. 401
- 5) K. M. Evenson, et al: Appl. Phys. Lett. 20 (1972) pp. 133
- 6) たとえば: M. Faris, T. K. Gustafson: J.E.E.E., J. Quantum Electro., QE-8 (1972) pp. 558;
長島, 田幸: 電子通信学会技術研究報告 (1975) OQE-75-3
- 7) 桜田, 安岡, 宮田, 長谷川: 電子通信学会光・量子エレクトロニクス OQE-74-64 (1974), OQE-76-83 (1977)
- 8) 桜田, 安岡, 宮田: 電子通信学会論文誌 J59-C (1976) pp. 777
- 9) 安岡, 桜田, 宮田: 電学論文誌 97-C (1977) pp. 201
- 10) 桜田, 安岡, 宮田: 電子通信学会論文誌 J61-C (1978) pp. 25
- 11) Y. Yasuoka, T. Sakurada, T. Miyata: J. J. Appl. Phys. 17 (1978) pp. 171
- 12) R. Holms: Electric Contact Theory and Application, Berlin, Springer (1967)
- 13) L. M. Matarrese and K. M. Evenson: Appl. Phys. Lett. 17 (1970) pp. 8
- 14) E. A. Wolff: Antenna Analysis, Jhon Willey, New York (1966) p. 357
- 15) S. P. Kwok, et al: J. Appl. Phys. 44 (1971) pp. 554
- 16) S. I. Green: J. Appl. Phys. 42 (1971) pp. 1166
- 17) E. W. Muller: J. Appl. Phys. 34 (1955) pp. 732