レーザー技術ノート

光周波数通倍混合器としてのM-I-M
点接触ダイオードの製作法

黒沢 富蔵*・田中 敬一*・桜井 慧雄*

(1981年8月6日 受理)

Fabrication of Metal-Insulator-Metal Point Contact Diode
as a Harmonic Generator and a Mixer

Tomizo KUROSAWA, Keiichi TANAKA and Toshio SAKURAI

(Received August 6, 1981)

1. はじめに

金属—絶縁体—金属点接触ダイオード(metal-insulator-metal point contact diode 以後MIMダイオードと記す)は極めて細い金属線(whisker)を、鏡面研磨され適当な厚さの酸化膜をもつ金属面(post)に接触させたもので、ウィスカをアンテナとしてこれに入射する電磁波をとらえ、酸化膜と金属の境界面でのポテンシャルの障壁による非線形効果¹⁾を利用して、入射電磁波の周波数通倍混合を行う検出器として用いるものである。特に著者らがここに扱うダイオードは、マイクロ波から遠赤外、赤外領域での周波数合成検出器としてのダイオードについてであるが、その特長は格段に優れた周波数応答特性にある。このようなMIMダイオードを大規模な光周波数の測定に用いている典型的な例がEvensonらで、既にセシウム1次周波数標準から $1.52\mu\text{m}$ He-Neレーザーの197THzまでの周波数結合が確認されており²⁾、さらに、最近著者の1人(田中)がNBSボルダー研究所に同

博士を訪れた折には、同様なMIMダイオードで可視レーザー光の周波数結合に挑戦していた。

さて著者らは将来の高精度長さ標準が光速速度を介して周波数安定化レーザーの周波数の絶対測定から導かれる^{3)~6)}情勢にあることから、安定化炭酸ガスレーザーの周波数をセシウム1次周波数標準と結合するための周波数結合系の確立に従事し、これに用いるべき周波数通倍混合検出器としてのMIMダイオードの試作を行って来たので、その製作法について述べたい。

まずこの測定に必要にして欠くことのできないMIMダイオードは市販品がなく、測定者自身が手作りしなければならない。ダイオード自体は安価に製作でき、室温で動作するという長所をもつが、他方構造的に弱く不安定であり、炭酸ガスレーザーの集中光に焼けたり、電氣的ショックにも弱いなど、検出器としての寿命が短い。セシウム周波数標準と炭酸ガスレーザーの間にマイクロ波発振器や異なる複数のレーザーを中継発振器として配列し、末端の炭酸ガスレーザーの周波数を 10^{-9} 以上の精度で決定するた

* 計量研究所(〒305 茨城県新治郡桜村梅園1-1-4)

National Research Laboratory of Metrology (1-1-4 Umezono, Sakura-mura, Niihari-Gun Ibaraki-Ken, 305)

めには、各周波数結合部での測定を同時に、しかも繰り返して行い、データを集積して測定精度を上げなければならない。このような測定に要求されるMIMダイオードとしては、まずダイオードの製作過程を何らかの方法で観測し、規格化された製法によって、形状および特性の再現性のあるダイオードを手軽に、必要に応じて多数製作し、組立てなければならない。このような必要性から、ダイオードの性能に影響するウィスカとポストの製法、および組立て法にそれぞれ工夫がなされた。まずダイオードの組立て調整過程を考慮し、安定な微動調整機構をもつダイオードマウントの設計試作が田中により行われ、他方微細なタングステンウィスカの電解研磨の過程の観察から、研磨過程の末期の電解電流の急激な変化をとらえて電解終了点を自動制御する着想が桜井により提案され、たまたま見出されたEdwards⁷⁾らと同様な目的の回路を修正試作して我々の目的を果たした。これらの手段を利用したダイオードの製作と特性測定は黒沢により行われたものである。

MIMダイオードのウィスカおよびポストの製法や研磨の条件は、著者の1人(田中)がEvenson, NPLのEdwardsに聞いた所では必ずしも一致せず、またその他の内外の文献によっても、それぞれの研究者の独特の手法というものが見られ、しかも一応の検出器としての役目を果しているようにみられる。本稿ではあくまでも前述の目的に沿って著者らが試みたMIMダイオードの製法とその特性について述べ、さらに、著者らが参考とした他の例についても、必要に応じて引用するつもりである。

2. キャット・ウィスカの電解研磨

2.1 ウィスカの必要条件と整形加工

ウィスカの電解研磨はMIMダイオードを製作する上で特に重要である。ウィスカの製作は従来、電界放出および電界イオン顕微鏡の分野での、先端の鋭いチップを作る技術を利用していた。しかしながらその手法は個々まちまちで、製作者の経験と熟練に頼っていた。

ウィスカの材料として機械的性質が優れていることから、管球のフィラメント用タングステン線で直径10~25 μm のものが使用されている。線が細過ぎると真直性が悪く、10 μm 程度でもピンセットでつまみ出すのは非常に困難で取扱いにくい。高周波の応答速度を上げる目的で銀線の提案もされているが⁸⁾、実験報告は末だない。

MIMダイオードを赤外レーザーの通倍混合器として動作させるには次の項目が要求される。

- (1) 先端の曲率半径(少なくとも0.1 μm 以下)が小さいこと。これはMIMダイオードの応答速度を制限する接合部の容量をできるだけ小さくするためである。
- (2) 接触時にウィスカの先端が曲らないような強度をもつこと。そのために、頂角ができるだけ大きな円錐状にウィスカを研磨することが望ましい。
- (3) レーザー光の検出の場合、ウィスカに対して一般の進行波アンテナの理論式を適用したパワーパターンが求められている^{9)~11),14)}。しかし厳密には、アンテナの直径よりも小さな波長の光波に対しては、アンテナの形状を考慮した解析が必要であり^{12),13)}。実際に使用する立場からは、一定形状、一定寸法のウィスカを製作できることが望ましい。

著者らはタングステン線として、直径10 μm と25 μm のものを準備したが、10 μm 線は扱いにくいために、丈夫で真直度のよい25 μm 線をもっぱら使用した。

まず直径2 mm、長さ約15mmの黄銅線にタングステン線をスポットウェルダで溶接する。溶接後、タングステン線を長さ15mm程度に切る。時計修理用ピンセットを用いて、25 μm 線がよく見えるように白い紙を背景にしてFig. 1のような形状に折曲げる。ピンセットの先端で軽く線をつまんで曲げるのがこつである。整形されたウィスカの全体が同一平面上にあると、研磨もしやすいしダイオードマウントへの固定と調整も容易である。Fig. 1のような形状にする理由はウィスカをポストに圧着するとき屈曲部が、

Fig. 1. Tungsten whisker and nickel or cobalt post.

スプリングの役目をするので著者らは図の a 点より先端を約1.5mm, b点で直交する2辺の長さが約2mmで製作している。ちなみにEvensonの意見によると, $ab:cd=3:4$ の寸法比をとればW部の形状寸法によらず支持部Bの左右平行微動に対してウィスカは常にポスト(N)に対し垂直を保てるとのことである。²²⁾ この屈曲部はスプリングの役目ばかりでなく信号電流が接点部で反射し, 互いに干渉し合いアンテナパターンを歪ませない効果があると考えられている。

なおタングステン線の整形について山中(大阪大学)によれば,²³⁾ ボンのマックスプランク研究所ではFig. 1の形状を与えるプレス型の雄形, 雌形のうち片方を金属で, 他方をテフロンブロックで作し, タングステン線をプレスすることにより, 一動作で容易に整形できるとのことであり, この手法は筆者らも早速取り入れたく思っている。あらかじめFig. 1の形状のものを50本ほど作っておき, MIMダイオードとして使用する際に電解研磨を行う。

2.2 電解研磨

電解研磨の方法は直流法^{14)~16)}と交流法^{7), 13), 17), 22)}に分けられ, 電解液は水酸化ナトリウム(NaOH)や水酸化カリウム(KOH)の水溶液が使われている。

Twu¹⁴⁾は直流電流を使い, 有効数字4桁まで規定した種々の濃度を用いて研磨を試みている。チップの長さは濃度を変えることによって ± 15

%の精度で製作できると述べている。Twuの報告では電解研磨中に, タングステン線の表面に泡が付着し, その部分だけ電解液から保護されるために不規則な節目が生じる。それを防止するのに2段階の過程をふんでいる。すなわち, 第1段階として, タングステン線を電解液に15秒間だけ浸して研磨し, 付着した泡を液面に残して, 静かに引き上げる。第2段階として, 泡が消失したら, 再び最初に浸した深さまでタングステン線を電解液に挿入し, 研磨を再開する。

また, 安岡ら¹⁶⁾は同じく直流電流で, リング陰極を利用し, 少量の電解液によって $5\sim 15\mu\text{m}$ ϕ のタングステン線の研磨を行っている。

2.3 電解研磨装置

装置は丈夫な実験台上にゴムシートを敷き, その上に置いた $200\times 250\text{mm}^2$ の鋳鉄製定盤の上に設置してある。振動により電解液の表面がゆれるとウィスカの先端を理想的な円錐状に研磨しにくい。定盤上にマグネットベースに固定されたX-Y微動台を据え, この上に電解槽を固定する。電解槽としてはガラス製のシャーレおよび安岡らの用いた金属リングを用いてみた。

Fig. 2. Precisely adjustable whisker holding arm for etching.

X-Y 微動台は電解槽内に浸されるタングステン線が槽の中心に来るように位置調整に用いる。Fig. 1 のような黄銅の柄をもつタングステン線は、Fig. 2 の微動保持具に固定する。この保持具は支持棒Aを定盤に固定したマグネットスタンドで支えられている。マイクロメータMの回転により固定スケールFに沿って微動スケールSが垂直微動する。アクリル製のアームの先端の黄銅製固定子Cにウィスカの柄を固定し、電解液への挿入の深さを精密調節する。著者らは電解研磨の予備実験として、電解液をシャーレに入れた場合と、安岡式のリングに張ったものを試みている。また、電解槽の陰極として銅線や銅板はKOHやNaOHの電解液に腐食されやすいので、シャーレには厚さ0.1mmの金円筒、リングには0.8mmφの金線を用いた。

Fig. 3. Circuit for controlling the etching time.

Fig. 3 は電解研磨の停止方法を電氣的に行うためにEdwardsの回路をもとにして桜井により試作された電解自動停止回路である。図からわかるように、この回路の動作原理は発振器から特定周波数 f の矩形波が端子A Aにより電解槽に供給される。研磨が進行すると、陽極としてのタングステン線と陰極の間の電圧が降下し、コンパレータの設定電圧と等しくなると、パルス信号がスイッチング回路に流れ、ほぼ $(1/f)$ 秒内に供給電流が切れる。それと同時に、研磨の終了を知らせる発光ダイオードが点灯する。

コンパレータの設定電圧は0～1.15Vの範囲でポテンショメータで任意に変えられる。また矩形波の周波数は $f = 1 / \{ 2 R_1 C_1 \ln(1 + 2R_2/R_3) \}$ で与えられるので発振器のコンデンサの値を変えることによって周波数を選択できる。

2.4 電解液の濃度と電解時間

本実験は電解槽として内径55mm、溶き19mmのシャーレと、これに内接する高さ約15mmの円筒陰極を厚さ0.1mmの金板で作って用いた。

直径25μmのタングステン線を用いて、KOH溶液に挿入する長さを変えたとき、液面下のタングステン線が完全に電解されてしまうまでの時間を濃度をパラメータとして測定した結果がFig. 4である。測定条件としてKOH溶液の濃度を1.0, 2.0および3.0規定に選んだ。そのと

Fig. 4. Relation between the time for completing etching and immersed length of tungsten wire into KOH solution.

きの液温は16.5℃である。また矩形波の周波数を158Hz、コンパレータの設定電圧は0Vである。測定の手順として、Fig. 3の微動装置の先端にタングステン線をセットする。次にタングステン線をKOH溶液に挿入し、液面下の部分を完全に電解研磨し、そのときのマイクロメータ

の目盛を読む。その目盛を零点とし、改めて必要な長さだけ液面に挿入し、完全に電解研磨が終了するまでの時間を測定する。この測定はFig. 4の回路の端子BBに時間間隔測定モードで動作する電子カウンタを接続して行う。挿入する長さが長くなると、測定値がばらついて来るが、この範囲では濃度の影響はみられない。研磨時間を t 、挿入する長さを d とすると、ほぼ

$$t = 8.3d$$

の関係が得られた。

2.5 電解研磨の条件と円錐部の形状

KOH溶液の濃度、矩形波周波数 f およびコンパレータの設定電圧 V_r がタングステン線の先端の形状に及ぼす効果について調べた。ここではタングステン線を溶液に挿入する長さを1mmに限定して行った。

2規定のKOH溶液(液温17°C)を使用し、 $f = 158\text{Hz}$ の場合に、コンパレータの V_r を0~1.15Vの範囲で変えて研磨した。その結果をFig. 5, 6, 7に示す。各図のaは電解進行状態を示すも

Fig. 5. a) Relation between etching time and variation of voltage across a current meter. KOH solution: 2N, Frequency of square-wave current: 158Hz, Reference voltage of comparator: 1.15V. b) Photograph of an etched tungsten wire. Magnification of microscope is 600.

Fig. 6. a) and b) are as same as Fig. 5 except $V_r = 0.46\text{V}$.

Fig. 7. a) and b) are as same as Fig. 5 except $V_r = 0\text{V}$.

ので、横軸は電解研磨時間、縦軸はwhiskerと陰極間の電圧 (Fig. 3の電流計の端子間電圧) である。A点で電解電流が流れ始め、B点で自動遮断されている。 V_r が低くなるにつれ遮断点はC点に近づき、最終段階での電解時間が伸びる。したがって、コンパレータの V_r が高すぎると、研磨が未完の状態で終る。Fig. 5 (b) 600倍の光学顕微鏡写真で、 $V_r = 1.15\text{V}$ の場合電解研磨未了のウスカの先端を示す。Fig. 6, 7でみるように、 $V_r = 0.5\text{V}$ 程度以下では光学顕微鏡で見える限り、鋭い先端が形成されている。溶

液の濃度を3規定に変えても特性曲線に差違を生じない。ただし、先端の鋭い形状を得るためにはコンパレータの V_r の最適領域が高い方にずれる。

2.6 研摩の最適条件

著者らは2規定のKOH溶液を用い、矩形波周波数 $f=158\text{Hz}$ 、コンパレータの設定電圧 $V_r=0.2\sim 0.5\text{V}$ の範囲、溶液に挿入するタングステン線の長さを 1mm として研摩している。

Fig. 1のような形状に折曲げたものを研摩する場合、電解槽としてシャーレを用いると、Fig. 3の微動保持具の金具がシャーレの縁に当り、ウィスカの最終端（垂直部）を短く仕上げるににくい。最終端が短いと、機械的に安定であるばかりでなく、アンテナパターンの主ローブのビーム幅が広がり、ダイオードで混合する際にアライメントがしやすい。そこで、著者らは安岡方式の電解槽を用い、線径 0.8mm の金線で直径 4.7mm のリング陰極を作り、注射器でKOH溶液の膜を張って使用した。リング陰極の電解槽の液面は平面でないので、タングステン線がリングの中央にセットされるようにX-Y微動台で調整する。

研摩に際して、留意すべき点を述べる。折曲げの作業に手を使うので、タングステン線の表面にごみや油が付着しやすい。特に油が付着していると、不規則形状の円錐部が出来る可能性がある。電解研摩前に、エチルアルコールまたはアセトンで洗浄してから研摩を始める。終了後は蒸留水で洗浄し、KOH溶液をおとす。さらに乾燥を早めるために上記の有機溶剤で洗浄し、光学顕微鏡で先端部が鋭利であることを確認してから使用する。洗浄が不十分ならばあいには数日後の顕微鏡による観察で、研摩面がボロボロに腐食しているのがみられる。

以上の条件を守って製作すると先端の円錐部の長さ約 $80\mu\text{m}$ 、半頂角約 8.5° のタングステンウィスカが再現性良く、容易に得られる。一例として、先端部を走査電子顕微鏡で観察した写真をFig. 8に示す。倍率は3万倍で、写真下部

の鋸歯状スケールは1目盛 $0.33\mu\text{m}$ を表している。拡大倍率が非常に高いため、真空排気系からの機械振動の影響により多少像がぼけているが、先端部の曲率半径が $0.1\mu\text{m}$ 以下であることが分る。

Fig. 8. Photograph of the tip of etched whisker taken by scanning electron microscope at magnification of 30,000.

3. ポストの鏡面研摩

2.6の方法で電解研摩されたタングステンウィスカの、 $0.1\mu\text{m}$ 以下の曲率半径をもつ先端を損傷しないでポストの面にある圧力で押しつけるためには、ポストの表面に対してウィスカを垂直に保ち、また周波数応答特性を良くするために接触面積をなるべく小さくしたい。そのためには、ポストの表面を平面に近い鏡面に研摩する方がよい。平面仕上げにすることは検出されたビート信号について、ポスト面での反射光の寄与を考慮した解析にも都合がよい。また鏡面研摩された面は $10\sim 12\text{\AA}$ の厚さの酸化膜で被覆されているのが良いと言われている¹⁸⁾。しかしながらMIMダイオードは大気中に露出して使用される上に、まして研摩後の酸化過程で膜厚を自由に調節し、一定の状態を保持することは実際上困難である。通常は研摩後の自然酸化によって、おおよそ、その程度の厚さになっていることが安岡らによって実験的に確認されている¹⁹⁾。ポストの材料として、ニッケル、銅、タングステン、銅、黄銅、金、モリブデン、燐鍍銅、グラファイトなどの試験結果が報告されている。

たとえば、波長 $337\mu\text{m}$ HCNレーザー (891 GHz) の12通倍の能力をもつものとして、ニッケルとグラファイトが確認されている²⁰⁾一般的にはニッケルが使用されているが、その理由は直流バイアスを印加しなくても通倍次数の奇数偶数に依存せず、大きな信号が得られるためである。

著者らはニッケルおよびこれと似た性質のコバルトをポストの材料として選んだ。複数のポストを同時に研磨する手順として、直径3mmのニッケルあるいはコバルト棒材を長さ30mmに切断し、8本用意する。研磨用治具としてFig. 9に示すように、外径52mm、内径40mm、高さ30mmの黄銅製円筒治具の端面上の直径45mmの円周に沿って、円筒軸に平行に3mmφの穴を8個あける。この穴にポストの材料を挿入し、各ポストの上端が円筒上面よりわずかに高くなるよう

Fig. 9. Holding tool for polishing metal post.

にして、側面から3mmのボルト2個ずつで固定する。このジグを旋盤を用いて円筒上面をポストと共に同一平面に仕上げ、エチルアルコールを溶剤として、超音波洗浄器で油やごみを除去する。次に、粒径 $3\mu\text{m}$ の研磨シートを用いて、回転式研磨機で研磨し、超音波洗浄器で細かいごみをおとす。順次粒径の小さいものへと同様な過程を繰返す。最終的には、粒径 $0.3\mu\text{m}$ のアルミナ懸濁液を用い。厚手の布（生地はラシャやネルなど）の上で研磨する。ここで注意すべきことは、たとえばダイヤモンドペーストなど

硬質のあらい砥粒を用いると、研磨面に砥粒が食込んで、それを除去するのに非常に時間を要する。

ていねいに研磨されたニッケルポストを $0.589\mu\text{m}$ のナトリウムランプを光源とした干渉顕微鏡で観察した結果をFig. 10に示す。周縁近くは面だれを生ずるが、大部分の面積では平行な干渉縞が得られており、 $10\mu\text{m}$ の赤外波長に対しては平面鏡とみなしてよいことがわかる。ウイスカの鋭利な先端を接触する際に、写真でも

Fig. 10. Equal thickness interference fringes of polished flat surface of nickel post. Used wavelength is 589nm of Na.

見られる穴傷に入ると、先端が損傷されるおそれがある。そのためには更に平滑にするための研磨が望ましいが、著者らはこの程度のポストで傷をさけてダイオードを組立て、後に示すようなビート信号を得ている。炭酸ガスレーザー（出力0.5W程度）2台のビート検出実験を行ったあとで、光学顕微鏡でポストの面を観察すると、ウイスカの先端に集中されたレーザー光の熱効果により、表面が荒れているが、再生のためには、前述した研磨プロセスを毎回繰返す必要はなく、アルミナ懸濁液で軽く再研磨するだけで、再び使用することができる。

4. ダイオードマウント

ダイオードの接触圧の微妙な変化は接触抵抗を変化させ、MIMダイオードの特性に大きく影響を及ぼす。特に通倍能力を向上させる場合はマウントの微動装置の良し悪しが重要となる。微動装置はスムーズかつ微妙に接触圧を変える

ことができ、その上微動を停止させたときに、機械的に安定であることが要求される。そうでなければMIMダイオードで検出される信号強度は非常に不安定なものとなる。

Fig. 11が試作された微動装置で固定板BTとポストを固定するレバー板LPから構成され、

Fig. 11. Structure of diode mount.

両者は厚さ1mmの燐青銅の板ばねSで結合されている。最小目盛2 μ mのマイクロメータMBの先端部にスチールボールがついており、これと接触するレバー板LPの裏側にはサファイヤ板を接着してある。またマイクロメータのバックラッシュを防ぐために、固定板とレバー板はコイルばねでつなぎ、張力を与えてある。固定板には円筒の絶縁体部Pの上にタングステンウイスカの固定子が載っている。黄銅製の固定子は円筒の中心部を通して銅線でBNCコネクタと接続されている。この固定子にFig. 1の形状のウイスカの黄銅棒を挿入し、ポストの端面の中央部に接触時に垂直になるよう高さを調節してビスで固定する。マイクロメータMBはポストの末端を押し、粗調整によりウイスカに近づける。このダイオードマウントはX-Y- θ の変位が可能な微動台に設置して使用する。これらの全体は高さ方向を調節できるように、細目ねじの3本脚をもつ台の上に載っている。マイクロメータMBを1 μ m変位させると、ポストの中心は約74nm変位し、縮小率1/13.5の微動動

作を行う。

これらの性能を確認した後、実際に2台のCO₂レーザー(9.4 μ mバンドP(20)とP(22))とマイクロ波Xバンド11GHz)を同時にタングステン・ニッケルMIMダイオードに照射し、ウイスカを繰返し接触させたときのビート信号のS/Nを調べたのがFig. 12である。この場合マイクロ波の5通倍とレーザーの差周波数のビートを観測している。2の方法で研磨したタングステンウイスカと3の方法で鏡面研磨したニッケルポストをダイオードマウントにセットする。あらかじめ小さなマイクロメータMSでニッケルポストを押し、ウイスカに近づける。

Fig. 12. Signal to noise ratio of beat signal measured by a W-Ni diode at repeated contact.

ここで実体双眼顕微鏡で観察しながら、ウイスカとニッケルポストの面に写るウイスカの像の先端を一致させる。この状態ではビート信号は現れない。これより更にマイクロメータを微少回転して接触圧を増すと、初めて信号が現れる。恐らくウイスカの先端は非線形効果を生ずるに丁度よい深さまで酸化膜にめり込んでいることと考えられる。急激に接触させると、Fig. 13のように先端が曲ってしまう。ビート信号が現れた状態でマイクロメータMBの目盛を読み、同時にビートのS/Nをスペクトラムアナライザ上で読みとる。ここでスペクトラムアナライザのダイヤル設定は横軸10MHz/div,縦軸10dB/div,バンド幅300kHz,走査速度5ms/div, cut-off周波数10kHzのビデオフィルターを使用している。ビート信号が消失するまでマイクロメータを戻し、再び接触を試みる。この操作を繰返し

Fig. 13. Bent whisker tip caused by rough contact.

た。Fig. 12は繰返しの順番を横軸に、縦軸には観測されたビート信号のS/Nを表してある。また25回以上の接触にも耐える程ウィスカの先端は丈夫であると共に、ダイオードマウント微動装置はスムーズに変位でき、かつ機械的に安定であることを証明している。

5. 通倍混合素子としての性能

MIMダイオードを構成している3要素がよく製作されていてもS/Nの良い、大きな信号が得られるとは限らない。S/Nの良い信号を得るにはレーザー光とマイクロ波の照射パワー、照射角度、接触抵抗、波面の重ね合せなどを適切に行う必要がある。

9.4 μ mバンドの発振周波数 f_1 , f_2 をもつ2台のCO₂レーザーとXバンドのマイクロ波 f_m を同時にMIMダイオードに照射し、rfビート周波数がMHz単位で、

$$20 < |f_1 - f_2 \pm N \cdot f_m| < 200$$

(但しNはマイクロ波の通倍数)

を満たすように f_1 , f_2 , f_m を適当に選んで、W-Ni及びW-Co MIMダイオードの通倍能力とバイアス効果を調べた²⁾ Fig. 14はその結果を示す。

混合次数を $M=N+2$ と定義すると、 $M=5 \sim 15$ の範囲で、ほぼ $M^{-7.4}$ の傾きでS/Nが急激に低下した。特にW-Coダイオードの場合はMが奇数のときにW-NiダイオードよりもS/Nの良いビート信号が得られたが、偶数のときは逆に小さく、適当なバイアス電圧を印加することに

Fig. 14. S/N values obtained with W-Ni and W-Co diodes at versus mixing order.

Fig. 15. Beat signal between two 9 μ m CO₂ lasers at R (26) and R (24) lines oscillation and microwave of 12.1GHz. Mixing order is 5. Fig. 16. Beat signal between two 9 μ m CO₂ lasers at P (22) and P (18) lines oscillation and microwave of 8.4GHz. Mixing order is 15.

よってW-Ni ダイオードのレベルまで改良することができた。Fig. 15はW-Co ダイオードのビート信号の例で、 $9.4\mu\text{m}$ 帯のR (26) 及びR (24) で発振させた2台のCO₂ レーザーと12.1GHzのクライストロンを用い、観測されるビートの周波数を $\Delta\nu$ GHzとして、

$$\Delta\nu = [f_{9R(26)} - f_{9R(24)}] - 3 \times 12.1 \text{ (GHz)}$$

の関係から70MHzのビート信号で、混合次数M=5, S/N=48dBを示している。また、Fig. 16は同様にP (22) とP (18) に発振させたCO₂ レーザーと8.4GHzのクライストロンを用いて

$$\Delta\nu = [f_{9P(18)} - f_{9P(22)}] - 13 \times 8.4 \text{ (GHz)}$$

の関係から53MHzのビート信号で、M=15, S/N $\approx$ 10dBを示している。この測定でのスペクトラムアナライザのダイヤル設定は横軸10MHz/div, 縦軸10dB/div, バンド幅300kHz, 走査速度5ms/div, ビデオフィルタのカットオフ周波数は10kHzである。

著者らは上記のR (26) 及びR (24) に安定化したレーザーの周波数安定度の測定において、Xバンドクライストロンを安定化しておき、61MHzのビート周波数を長時間計数してそのゆらぎから安定度の評価を行っている。

6. おわりに

レーザー光の周波数通倍、混合検波器として使用することを目的として、MIM ダイオードの再現性のある製法と附帯装置の開発を行った。試作した電解研磨自動遮断回路やダイオードマウントなどはダイオードの試作、特性測定などで満足すべき機能を示し、操作もしやすく我々の最終目的であるCO₂ レーザー光の周波数の絶対測定に十分実用できる見通しを得た。本文に述べたウィスカ及びポストの研磨と特性に関する記述は、現在まで行って来た実験結果の要約である。今後なお研磨条件、あるいは特性測定に関する諸パラメータを変え、データの集積をはかりたく考えている。

7. 謝 辞

半導体に関する専門的基礎知識をもち合わせぬ著者らが、未経験のMIMダイオードを手作りしながら、これを用いて32THzの炭酸ガスレーザーの周波数をセシウム周波数標準に結合する仕事に進むには、かなり勇気を要することであった。この仕事を始めるに先立ち、昭和50年の夏頃、著者の1人(田中)が東京大学電気工学科の岡村研究室を訪れた折、伊地智幸一氏(現在三菱電気鎌倉製作所勤務)が他の研究室よりもらい受けたタングステン線を手持ちで電解研磨し、古い真空管のプレートから切取ったニッケル板の小片を真鍮製の3ミリのボルトの先端に半田付したものをポストとしてダイオードを組立て、炭酸ガスレーザーのブランチ間ビート(50GHz)を観測しておられるのを拝見し、このダイオードが精度 10^{-9} 以上を必要とする精密測定に実用できるという確信を得た。貴重な参考意見と資料を提供してくださった、伊地智氏ならびに田宮寿美子氏に謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) A. Javan and A. Sanchez: Laser Spectroscopy, ed. by R. G. Brewer and A. Mooradian (Plenum Press, New York, London, 1974) pp. 11.
- 2) K. M. Evenson, D. A. Jennings, F. R. Petersen and J. S. Wells: Laser Spectroscopy III, ed. by J. L. Hall and J. L. Carlsten (Springer-Verlag, Berlin, 1977) pp. 56.
- 3) K. M. Evenson, J. S. Wells, F. R. Petersen, B. L. Danielson, G. W. Day, R. L. Barger and J. L. Hall: Phys. Rev. Lett., **29** (1972) 1346.
- 4) T. G. Blaney, C. C. Bradley, G. J. Edwards, B. W. Jolliffe, D. J. E. Knight, W. R. C. Rowley, K. C. Shotton and P. T. Woods: Nature, **251** (1974) 46.
- 5) B. G. Whitford and D. S. Smith: Optics Communi., **31** (1977) 363.
- 6) K. Tanaka, T. Sakurai, N. Ito, T. Kurosawa, A. Morinaga and S. Iwasaki: Proc. Second Int. Conf. Precision Measurement & Fundamental Constants (National Bureau of Standards, Gaithersburg, 1981)
- 7) G. J. Edwards and P. R. Pearce: J. Phys. D. Appl. Phys., **11** (1978) 761.

- 8) H. D. Riccius: *Optics Commun.*, **18** (1976) 42.
- 9) L. M. Matarrese and K. M. Evenson: *Appl. Phys. Lett.*, **17** (1970) 8.
- 10) Bor-long Twu and S. E. Schwarz: *Appl. Phys. Lett.*, **26** (1975) 672.
- 11) E. Sakuma: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **16** (1977) 877.
- 12) 岡村, 伊地智: 東京大学工学部総合試験所年報**33** (1974) 121.
- 13) T. Kurosawa, A. Kuriyagaw and K. Tanaka: *Bulletin of NRLM*, **30** (1981) 8.
- 14) Bor-long Twu: *J. Electrochem. Soc.*, **122** (1975) 1560.
- 15) 作間, 長島, 田幸: *応用物理*, **49** (1975) 298.
- 16) 安岡, 桜田, 宮田: *電気学会論文誌C*, **97** (1977) 201.
- 17) 作間: *レーザー研究*, **9** (1981) 182.
- 18) H. D. Riccius: *Appl. Phys.*, **17** (1978) 49.
- 19) Y. Yasuoka, T. Sakurada and T. Miyata: *Jpn. J. Appl.*, **17** (1978) 171.
- 20) C. C. Bradley and G. J. Edwards: *IEEE Quantum. Electron.*, **QE-9** (1973) 548.
- 21) T. Kurosawa, T. Sakurai and K. Tanaka: *Appl. Phys. Lett.*, **36** (1980) 751.
- 22) K. M. Evenson: private communication.
- 23) 山中正宣: private communication.