レーザー技術ノート 2

W-Ni 点接触ダイオードの製作

作 間 英 一*

(1981年1月31日 受理)

Construction of a W-Ni Point Contact Diode

Eiichi SAKUMA*

(Received January 31, 1981)

1. はじめに

レーザー周波数の安定化技術の向上によって可視域や赤外域で $10^{-11} \sim 10^{-13}$ の周波数安定度をもつレーザー線が得られるようになった。これにともないレーザー線は波長標準としてだけでなく、周波数標準としても利用できるようになり、レーザー周波数の測定技術が重要となってきた。

レーザー周波数の絶対測定には、現在周波数合成法が用いられる。すなわち測定したいレーザー周波数 ν_μ に対し、既知周波数をもつレーザー線やマイクロ波を用いて ν_μ に近い周波数 $l\nu_i \pm m\nu_m \pm n\nu_n$ を合成し、その差周波数

$$\nu_B = \nu_\mu - (l\nu_i \pm m\nu_m \pm n\nu_n) \quad \dots\dots (1)$$

(l, m, n は正整数)

を測ることから、 ν_μ の絶対値を知る。(1)式によってビート周波数 ν_B を発生させるには、 ν_μ で働く通倍・混合素子が必要となる。Javan らはマイクロ波領域で使われているW-Si 点接触ダイオードに、HCN 337 μ m レーザー線と75 GHz マイクロ波を照射し、マイクロ波の通倍周波数との間でビート信号を検出し、337 μ m

レーザー線の周波数の絶対測定を行った¹⁾。しかし、W-Si 点接触ダイオードは0.89 THz 以上では通倍・混合素子として働かないことが分り、かわってW-Ni 点接触ダイオード(W-Ni ダイオード)が使われるようになった。Evenson らは、W-Ni ダイオードを使って、絶対測定可能な周波数の上限を拡大し²⁾⁻⁴⁾、1978年にはHe-Xe 1.52 μ m (198 THz) の測定に成功した⁵⁾。

このようにW-Ni ダイオードはラジオ波⁶⁾から200 THzの広い周波数域で通倍・混合素子として働く、現在唯一の素子である。しかしながらその構造上、機械的に弱い、寿命が比較的短い、電解研磨等制御しにくい条件に影響され、同一特性のものが得にくいなどのため、今のところ製品化されたものはない。したがって使用するときは、自分で製作しなければならない。本文では筆者が用いている製作法とビート信号の検出法について紹介する。

2 W-Ni ダイオードの製作

2.1 W-Ni ダイオードの構造

W-Ni ダイオードの構造をFig. 1に示す。直径10~25 μ mのW線を図のように曲げ、その

*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, Sakuramura, Niihari-Gun Ibaraki-Ken, 305)

Fig. 1. Structure of a W-Ni point contact diode.

先端を電解研磨によって数百nm以下の径にした後、Ni ポストに機械的に接触させて作る。W 線の一部は、電磁波を受けその周波数に等しい高周波電流を誘起するアンテナとして、また接触部は高周波電流を通倍、混合および整流を行うダイオードとして働く。

2.2 W線の加工および支持

W線は白熱電球のフィラメントとして使われているものを購入した。

アンテナは電氣的な損失を小さくしたり、良好な接触状態を得るため、ポストに垂直な力がかかるように、直線状に仕上げなければならない。一般にW線はボビンに巻かれて納入されるため、曲り癖がついている。しかしアンテナ長は、照射するレーザー波長の数十から数百倍の範囲で使うので、この部分が直線であればよい。ボビンから引き出し、直線性のよい部分20~30mmを切り取って使用する。

Fig. 1の“コ”の字型の部分は、スプリングとして働き良好な接触状態を保つ役目をする。しかしながら波長の短いレーザー線（例えば3.39 μm 線）で、かつ短いアンテナを使うと、“コ”の字の部分での反射が影響してビート信号が検出しにくい場合があり、L字型で用いる方がよい。(Fig. 8 参照) W線を曲げたり“コ”の字型を作るにはピンセットの先端を利用するといよい。

製作したW線アンテナはそのままでは研磨やダイオードホルダーに固定するには不便である。そのため Fig. 2のような銅線による支持具を製作した。直径2mmの銅線を長さ20mm位に切り

Fig. 2. Supporter for a W wire antenna.

とり、その一部を削って、(a)のように加工する。次に内径100 μm の銅パイプ約5mmを(b)のようにハンダづけする。この銅パイプにW線アンテナをさしこみ、かしめて固定する*。(c)は完成後のアンテナと支持具の様子を示す。W線アンテナは、Ni ポストに接触させる際、ポストに垂直になるように方向を調整する必要があるが、その場合、100 μm の銅パイプの部分で行う方が、W線を直接調整するよりは容易である。

できあがったアンテナはその支持具を小型のバイスにはさんで、次の研磨作業に入る。

2.3 W線の研磨

W線の先端の研磨には、電解研磨法を用いる。研磨された部分は一般に円錐状になるが、良好なダイオードが先端の形によることが経験的にいえる。150~600倍程度の光学顕微鏡を使って観察し

- 1) 円錐部が先端まで一様な割合で細くなっていること。
  - 2) 研磨面がなめらかで光沢があること。
  - 3) 先端の径が数百nm以下であること。
- などが良好な先端の目安として挙げられる。

*アンテナ部が銅パイプ上端より上にくるように固定しないと、反射の影響がでる。

電源には直流を用いる方法と交流を用いる方法がある。ここではスライダックだけですむ、研磨の進行状態が観測しやすい、等の特徴をもつ、交流電源を用いる方法について述べる**。

交流電圧の場合は、半サイクル毎にW線が陰極となり、水素の気泡がでる。気泡の出かたは、液の濃度、電圧に依存しており、電解液の状態や研磨の進行状態をみるのに都合がよい。経験的には、5～10個の泡が同時に出る状態がよい研磨状態を与えた。

研磨液としてはKOHの3規定液を用い、さらに蒸留水：溶液＝4：1の割合で薄めて使用した。薄すぎるとW表面に茶色の膜が析出したり、研磨面の光沢がなくなるなど、よいダイオードが得られない。また濃すぎると研磨しにくくなるとともに、先端が丸くなり、3)の条件が得にくい。電圧も先端の形に影響を与える。1～6Vの電圧をかけるが、高すぎると先端が丸くなる。低すぎると、鋭いものができるが、円錐部全体が細くなり、接触時に曲がりやすくなる。Fig. 3に適切な濃度を電圧を与えた場合の研磨の進行状態を示す。(a)は初期の段階を示す。研磨の進行とともに(b)のように液中の部分が円錐状に細くなってゆく。ある時点で矢印で示した部分で切断され(c)のような状態になる。この時点で研磨をやると、先端の鋭いものが得られるが、円錐部は200～300 μm と長い。短い円錐部がほしいときは、一度液からひきあげた後、さらに必要な長さを残して、液中にいれ、研磨液から先端が離れる直前まで研磨する。最後に全体を研磨液にいれ、短時間研磨すると、円錐部と研磨しなかった円柱部分との境界がなめらかになる。

研磨終了後はただちに蒸留水で研磨液を洗い流した後、アルコールに侵して乾燥させる。

Fig. 4に光学顕微鏡(150倍)で観測した先端部の写真を示す。これは実際にCO₂レーザー線間の差周波数の測定に使用し、良好な結果を得たものである。

** 直流電源を用いる方法は文献7を参照されたい。

Fig. 3. Process of the etching for optimum conditions. Etching proceeds from (a) to (c) and the wire is cut at the arrowed portion.

Fig. 4. Photo of the point of the W wire antenna magnified by 150.

2.4 Ni ポストの研磨

Ni ポストの表面は機械的に光学研磨したものを用いた。直径2mmのNi棒から20mmの長さを切りとり、カーボランダムを使って切断面を平面にする。その後0.3 μm 粒子および0.1 μm 粒子のリンデ液を使って鏡面研磨を行った。研

磨終了後は、超音波洗浄器で、研磨剤を洗いおとした後、アルコールに侵して乾燥させる。

Ni ポストの表面が光沢を失うと信号が検出されなくなる。湿度の高い夏期では早めに光沢を失うがその他の時期では2～3ヶ月位はそのままで使えた。また1 W位の CO_2 レーザーを集光して照射すると、W線がとけ黄色の被膜がポスト表面につく。このように表面が変化した場合は $0.1\ \mu\text{m}$ リンデ液で再研磨すると再びつかえる。

Ni の純度は95～99.995%の範囲で調べた結果、ビート信号の強度への影響はみられなかった^{3),6)}

2.5 ダイオードホルダーの製作

2.1節で述べたように、先端の径が数百nm以下のW線を、Ni ポストに機械的に接触させるが、一方で接触圧がW-Ni ダイオードの特性に強く影響する。このため微動機構を備えたダイオードホルダーが必要となる。

ホルダーの設計に際して

- 1) 再現性のよい微動ができること。
- 2) 可動範囲が10mm位とれること。
- 3) 一度セットした位置から大きく動かせ、その後再びもとの位置にもどせること。
- 4) レーザービームを接触部に照射しやすいこと。ビームの入射方向が、アンテナに対して $-10^\circ \sim 0 \sim 90^\circ$ と変えられること。
- 5) 接触部がX, Y, Z 方向に $\pm 10\text{mm}$ 位の範囲で微動できること。
- 6) 持ち運べること。

などを考慮した。

2) はアンテナをホルダーに取りつける時や、アンテナの長さを変えて使用する時に必要となる。3) は最初に信号を検出する時や、信号強度を大きくしたい時などに必要となる。アンテナの先端を一度ポストからはずすことで、接触場所が変わり、特性が改善されることが多いからである。4) は後述するようにアンテナに指向性があり、最適な方向からレーザービームを照射するために必要である。

レーザービームは、電界強度を増すため、レ

ンズで絞って照射する。このため焦点でのビームのスポットが小さく、ダイオードをスポットの位置にもってゆくのに5) の条件が必要となる。6) の条件は必ずしも必要なものではないが、実体顕微鏡を使って接触の作業を行うため、ダイオードの製作場所と信号を検出する場所が離れている方が都合がよいためである。

Fig. 5に製作したダイオードホルダーを示す。まずFig. 6のようなL型のアルミブロックに、

Fig. 5. Photo of the diode holder.

Fig. 6. L shaped supporter for a micrometer head and an antenna.

Ni ポストをつけたマイクロメーターヘッドとアンテナ支持具の固定台を固定する。マイクロメーターヘッドはNi ポストが回転しないように、並進型を使った。W線アンテナはホルダーから

絶縁され、信号はBNCコネクタを通してとり出す。アルミブロックは、マグネットベースにとりつけたX-Y-Z微動台に固定した。マイクロメーターの回転部分に約5cmのテコをつけ、その先を微動台にとりつけた補助マイクロメーターで押して、Niポストを微動する。テコはネジで固定してあり、ネジをゆるめることで、補助マイクロメーターを介さず、Niポストを粗動できる。またテコはバネを介して微動台と結ばれているため、テコをもって補助マイクロメーターからはずすように回転すると接触がはずれ、もどすと再び接触させることができる。4)の条件を満たすため、ホルダー全体を直径30cmの回転テーブルに載せて使用した。

2.6 接触と信号のとりだし

Niポストとアンテナをダイオードホルダーにとりつけ、アンテナがポストに対して垂直になるように、銅パイプで調整する。その後接触直前までNiポストを移動し、補助マイクロメーターで接触させる。接触の確認は、抵抗値の変化や接触時に観測される数mVの直流出力を利用する。この作業は実体顕微鏡を使い、ポストによるアンテナの鏡像をみながら行くと、先端を曲げてしまう失敗を防げる。

後述するが、ダイオードの位置の調整や接触圧の調整には、ダイオードからの直流成分を目安として使う。そのため直流成分とビート信号が同時に取り出せる回路をつけておくとう便利である。

3. アンテナの長さと先端の形

W線アンテナは通常の受信アンテナのように指向性をもつので、出力の弱いレーザー線を使う場合は、最適な方向から照射することが重要となる。

W線アンテナの指向性は $3.39 \mu\text{m}$ までのレーザー線に対しては、進行波アンテナ理論が適用でき^{9)~12)}、入射角を θ とすると

$$P(\theta) \sim \sin^2 \theta (A^2 + B^2 + 2A \cdot B \cos 2\phi) \cdots (2)$$

$$\sim A^2 \sin^2 \theta \cdots (3)$$

で与えられる。ここに

$$A = \sin(kL/2 - \phi)/(1 - \cos \theta)$$

$$B = \sin(kL/2 + \phi)/(1 + \cos \theta)$$

$$\phi = kL \cdot \cos \theta / 2$$

また L : アンテナの長さ、 $k = 2\pi/\lambda$ 、 λ : 波長である。(2)式はNiポストによる鏡像の効果を含むが、 θ の小さい範囲では(3)式で近似できる。

W線のどの部分をアンテナ長 L とするかは、W線アンテナの形や先端の形によって異なる。Fig. 7と8は CO_2 10.6 μm レーザー線に対して観測されたアンテナパターン(θ に対する直流出力の変化)を示す。Fig. 7は図中に示されるような研磨された円錐部と研磨しない円柱部の境が不連続になっているアンテナで観測され(点線)、円錐部の長さを L とすると(2)式で与えられる理論曲線(実線)と合う。Fig. 8はFig. 4のように、円錐部と円柱部の境が連続的に変化しているアンテナで観測され(実線)る。このパターンは2つのアンテナによるパターンの重ね合わせで説明される。それぞれのアンテナは、円錐部(長さ L_s)と、円錐部と円柱部

Fig. 7. Example of an antenna pattern for a 10.6 μm laser¹⁰⁾

Fig. 8. Another example of an antenna pattern for a 10.6 μm laser with a different antenna from the one used for Fig. 7.

を合わせたもの(長さ L_i)で、その理論曲線を $P_s(\theta)$, $P_i(\theta)$ とすると、点線は

$$P(\theta) = c \cdot P_s + P_i(\theta + \alpha) \dots\dots\dots (4)$$

を示す。 c および α は観測パターンに合わせるためにいれたパラメーターでアンテナによって異なる。

Fig. 7, 8 から最適な入射角は第1ピーク (Fig. 8 の場合は L_i に対する) に相当する角度 θ_{m1} である。 θ_{m1} は(3)式から

$$\theta_{m1} = \cos^{-1}(1 - 0.371 \cdot \lambda/L) \dots\dots\dots (5)$$

で与えられる。実測された θ_{m1} は(5)式で与えられるものより小さい角度となるが、(5)式が最適入射角の目安となる。

レンズ等を配置するスペースを考慮すると、短いアンテナを作り、 θ_{m1} をなるべく大きくしたい。しかし電解研磨法では、W線の直径の2～3倍より短く、しかも先端が鋭い円錐部を作るのは難しい。径の細いW線を使うと加工がしにくくなるため、Fig. 9 のようなアンテナを作った。すなわち25 μm 径のW線の先端の一部を10 μm の径に研磨して細くし、その先端をさらに研磨して円錐部とする。このアンテナを3.39 μm レーザー線に対して使うと、 L_s または L_i に相当する部分がアンテナとして働き、25 μm

Fig. 9. W wire antenna which is used for He-Ne 3.39 μm laser.

径の部分には影響を与えないことが、アンテナパターンの観測から分る¹²⁾。従ってFig. 9 のようなアンテナによって細工が容易で、しかもアンテナ長の短いものが得られ、 θ_{m1} を大きくすることができた。

4. ビート信号の検出

筆者はCO₂ レーザー線の差周波数測定と¹³⁾、He-Ne 3.39 μm レーザー線とCO₂ 10.2 μm レーザー線との周波数比較測定の経験から¹⁴⁾、ビート信号の検出に以下の方法を使っている。

1) まず各々のレーザー線に対して負の直流出力を検出し***、それが最大になるように入

***正の直流出力でもビート信号は観測されるが、信号強度は小さい。

射角とダイオードの位置の調整を行う。CO₂レーザー線同志のように波長の近いレーザー線では、一度ハーフミラーで重ね、同一方向からアンテナに照射する。波長の異なる場合は、弱いレーザー線は直接、強いレーザー線は鏡で反射させ、方向をかえて照射する。これによって弱いレーザー線に対しては、ダイオードの位置、回転台およびレンズで調整し、強いレーザー線では、鏡とレンズで調整する。直流信号はCO₂レーザー線の場合は直接オシロスコープで観測できる。しかし 3.39 μm レーザー線のように、ダイオードの感度がおちるうえに、強度の弱い場合は位相検出する。また製作直後のダイオードは調整が充分でなく、位置も正しくセットされていないので直流出力が小さい。したがって位相検出すると早く信号が見つかる。

2) 次にダイオードの接触圧を調整し直流出力を最適にする。接触圧の変化は、補助マイクロメーターで行うが、ポストとW線の間に自然発生する酸化膜の厚さを変え、接触抵抗を変える。最適な接触抵抗値は 200～600 Ω といわれている。¹⁵⁾ 一般に接触圧を軽くする程、接触抵抗は増加し、直流出力も増すが、信号の安定

度が悪くなる。また強度の強い CO₂ レーザー線を照射すると熱で破壊されやすい。500mW の CO₂ レーザー線に対して、30mV 以上の直流出力が検出されると、短時間で破壊されることが多かった。

3) 各レーザー線に対して調整がすんだら、マイクロ波を照射する。マイクロ波は上方から開口導波管で照射したが、同軸ケーブルの先に銅線を取りつけ、それによって照射してもよい。ビート信号を検出するには、負の直流出力で最小約10mV 位が必要であった。

マイクロ波を照射した場合、その直流出力中に雑音の多いダイオードがある。このようなダイオードではビート信号が検出されないことが多かった。

4) 次にダイオードの周波数応答性をみる。3.39 μm レーザーの場合は、内部モード間のビート信号が観測できればよい。CO₂ レーザー線のように単一モードで発振している場合は、レーザービームを短形的にチョップし、その時の直流出力が、短形波に近いものであればよい。ダイオードの接触をしなおしたり、ホルダーを軽くたたいたりすることで、良好な結果が

Table DC output of the diode for each radiation source which is necessary for detecting a beat signal.
Radiation power is also given for the DC output.

Source	DC output from a diode	Radiation power
He-Ne 3.39 μm	1-2 mV	～ 60 mW
CO ₂ CO ₂ 9-10 μm	10-20 mV	～ 500 mW
Microwave 10 and 48 GHz	10-20 mV	～ 200 mW****

**** Output power of a Klystron.

Radiation power on the diode is estimated few percents of it.

得らるる場合がある。この後で再び1)～3)を繰り返し、各周波数源に対して直流出力が最適になるようにする。Table 1 にビート信号を得るために必要な直流出力の目安とその時の各周波数源の強度を示す。

5) 以上の調整を行なった後、各レーザー線を照射する。次にスペクトル分析器を観測しながら、マイクロ波強度を増加してゆくと、ビート信号が観測されるはずである。普通の環境ではテレビ電波の信号等も観測される。ビート信号と区別するには、各レーザー線やマイクロ波の周波数を変えてみたり、レーザー線をブロックしてみるとよい。

4. おわりに

W-Ni 点接触ダイオードの製作とビート信号の検出法について、 $10.6\mu\text{m}$ および $3.39\mu\text{m}$ レーザー線を使った経験をもとにして述べた。

広帯域で働き、しかも 200 THz もの高い周波数に応答する W-Ni ダイオードが、一方で室温で働き、安く製作できるため実験室での取扱いが簡単であるという長所をもつ。本文が W-Ni ダイオードを使用する際に何らかの役に立てば幸いである。

参 考 文 献

- 1) L. O. Hocker, A. Javan, D. R. Rao, L. Frenkel and T. Sullivan: Appl. Phys. Lett., **17** (1970) 147
L. O. Hocker and A. Javan: Phys. Lett., **25A** (1967) 489
- 2) K. M. Evenson, J. S. Wells, L. M. Matarrese and L. B. Elwell: Appl. Phys. Lett., **16** (1970) 159
- 3) K. M. Evenson, G. W. Day, J. S. Wells and L. O. Mullen: Appl. Phys. Lett., **20** (1972) 133
- 4) K. M. Evenson, J. S. Wells, F. R. Petersen, B. L. Danielson and G. W. Day: Appl. Phys. Lett., **26** (1973) 192
- 5) D. A. Jennings, F. R. Petersen and K. M. E. Evenson: Appl. Phys. Lett., **26** (1975) 510
- 6) E. Sakuma: Jpn. J. Appl. Phys., **14** (1975) 569
- 7) 作間, 長島, 田幸: 応用物理, **44** (1975) 298
- 8) E. Sakuma and K. M. Evenson: IEEE J. Quantum Electron., **QE-9** (1974) 599
- 9) L. M. Matarrese and K. M. Evenson: Appl. Phys. Lett., **17** (1970) 8
- 10) Borg-Long Twu and S. E. Schwarz: Appl. Phys. Lett., **26** (1975) 672
- 11) E. Sakuma: Jpn. J. Appl. Phys., **16** (1977) 877
- 12) E. Sakuma: Jpn. J. Appl. Phys., **19** (1980) L 633
- 13) 作間: 応用物理, **49** (1980) 695
- 14) 作間, 大井: 応用物理, **50** (1981)
- 15) K. M. Evenson, D. A. Jennings, F. R. Petersen and J. S. Wells: *Laser Spectroscopy III* ed. J. L. Hall and J. L. Carlsten (Springer-Verlag, Berlin) 1977, pp56-58