レーザーオリジナル

真空蒸着によるAlメッシュ出力鏡の開発

桜 井 慧 雄 *

(1982年10月14日 受理)

Development of Capacitive-Aluminium-Mesh Output Coupler by Simple Vacuum Deposition Techniques

Toshio SAKURAI

(Received October 14, 1982)

Fabrication of capacitive-Al-mesh output coupler for the optically pumped FIR laser is studied. With use of metal mesh sheet for a deposition mask, aluminium is directly deposited on the substrate of which materials are either crystal quartz, silicon, or germanium. To construct well-defined capacitive mesh structures, the deposition mask is designed so as to realize complete contact with the substrate. Output characteristics of the coupler are examined with an optically pumped $251\mu\text{m}$ CH_3OH laser as follows: (1) FIR output powers of 34 mW at $163\mu\text{m}$, 18 mW at $251\mu\text{m}$, and 8 mW at $469\mu\text{m}$, are extracted from a 25W pump (2) the coupler is capable of enhancing a particular oscillation line by adjusting mesh parameters; (3) oscillation modes in the cavity tuning curve are clear enough to assign their wavelengths easily.

1. はじめに

近年、光励起 FIR レーザーの応用研究は、目ざましい進展をとげている。特に、プラズマ診断¹⁾、サブミリ波天文学、分子分光²⁾、長さ標準³⁾、での躍進が目ざましい。

応用研究に使う光励起 FIR レーザーには、一般的にいて、(i) 良い周波数安定度、(ii) 基本モード発振、(iii) 大出力、などの条件が課せられる。

筆者は、 CO_2 レーザーの発振周波数を絶対測定するために、光励起 $251\mu\text{m}$ メチルアルコールレーザーの開発を進めてきた^{4), 5)}。

ここでは、周波数変換効率が低い、MIMダイオードでレーザーどうしの周波数混合をおこなうため、 $251\mu\text{m}$ 線は、まず、高出力でなければ

ならない。また、実際的な問題として、 $251\mu\text{m}$ 線の同定が、容易かつ確定にできなければならない。何故ならば、発振周波数測定では、測定系が複雑で、微細調整箇所が多く、実験中に、 $251\mu\text{m}$ 線の同定に、あまり注意を向けられないからである。ここで、容易かつ確実に同定ができる条件とは、

(i) 半波長だけ FIR 共振器長を変えるごとに、出力同調曲線上に得られる、出力のピークが明瞭であること；

(ii) $251\mu\text{m}$ 線に対するポンプ線で、 $163\mu\text{m}$ 、 $469\mu\text{m}$ 線も発振するが、3本の線の中で、 $251\mu\text{m}$ 線を選択的に強める性能をもつこと；を意味する。

ところで、大出力を得るひとつの条件は、出力鏡の性能である。今までに、特性の良い出力

* 計量研究所 (〒305 茨城県新治郡桜村梅園 1-1-4)

* National Research Laboratory of Metrology (1-4, Umezono 1-Chome, Sakura-Mura, Niihari-Gun, Ibaraki 305)

鏡として、Danielewicz らの MMD (Metal Mesh Dielectric) 鏡⁶⁾、Julien らの Si ファブリペロ鏡⁷⁾ など、何種類かが報告されている^{8), 9)}。

これらの出力鏡は、ポンプ光では高い反射率、FIR 光では最適結合の透過率、をもつよう工夫してある。しかし、これらの鏡は、次のいずれかの理由で、筆者の研究目的には利用できなかった。

(i) 高度な光学技術の結晶であり、実験室で簡単に製作することは難かしい。

(ii) 同一ポンプ線で、何本かの FIR 線が発振する時、必要な FIR 線の強度が、選択的に強められない。

(iii) 特定の FIR 帯域にしか利用できない。

そこで筆者は、基板上に、Capacitive mesh を真空蒸着する方法で、Al メッシュ鏡の製作を試みた。

この鏡は、はじめ、結晶水晶基板で、Wolfe らによって試みられたが¹⁰⁾、Danielewicz らが報告した、photoresist などの技法を使わず、おおかたの大学あるいは研究所にある、普通の真空蒸着装置と金属メッシュシートで、容易に製作できる利点がある。

筆者は、基板の材質を、Si および Ge、さらに、ポンプ光用の高反射率多層膜をつけた Si および Ge、にまで拡張し、capacitive Al

鏡¹¹⁾。

本報告は、真空蒸着による Al メッシュ鏡の製法、および、出力特性を通しての鏡の評価、について述べる。以下、基板に、ポンプ光用多層膜を施した Al メッシュ鏡を MMD 鏡、多層膜のない基板による Al メッシュ鏡を MM 鏡、と略記する。また、MMD および MM 鏡を総称して、単にメッシュ鏡という。金属メッシュは、単にメッシュと記す。

2. Inductive mesh と capacitive mesh

Fig. 1 (a) に示す inductive mesh をマスクにして、基板に Al 蒸着をおこなえば、Fig 1 (b) に示す capacitive mesh ができる。この capacitive Al mesh が、本報告で述べるメッシュ鏡である。

Inductive mesh は、シートで市販されており、そのままでも、FIR 帯の半透明鏡として働くが、光励起 FIR レーザーの出力鏡に用いれば、強力なポンプ光の熱作用で、シートの張りがたるんだり、メッシュが破損する恐れがある。しかし、capacitive mesh では、形を維持する基板が必要であるものの、基板の熱伝導率が良ければ、熱的には有利である^{*}。

mesh 鏡を試作した。そして、性能的に、251 μm 、469 μm 線の周波数測定ができるまでに至っ

(a) Inductive mesh

(b) Capacitive mesh

Fig. 1. Two types of metal mesh. Shadowed areas are metallic.

*) Positive photoresist で基板上に作った inductive mesh は、ここでの capacitive mesh と同等に考えられる。

3. マスクに使うメッシュの選択

自由空間においたメッシュの透過・反射率は、格子定数 g 、リボン幅 $2a$ 、厚さ、電気伝導度および入射波長によって表わせる¹²⁾。Fig. 1に g および $2a$ を示す。本報告で述べるメッシュ鏡では、その他に、基板の厚さ、基板の屈折率、が必要である。これは、基板内でのファブリペロ・エタロン効果を記述するためである。これらのパラメータを用い、透過率は、Wolfe らの式¹⁰⁾より計算した。

出力鏡の最適結合は透過率10%前後で達成されるが⁷⁾、蒸着した capacitive mesh の形状精度、基板厚さの研磨精度、波長依存性をもつ表面での位相とび、などの不確定要素を配慮して、次の5種の inductive mesh をマスクに選んだ。(63.5, 12.3), (102, 16.7), (102, 23.0), (169, 22.6), (224, 23.7)。ただし括弧内の前の数字は格子定数、後の数字はリボン幅で、単位はいずれも μm である。

4. 蒸着基板

4.1 基板の材質

FIR 領域で低吸収の基板材料として、Zカット結晶水晶 (ZXQ), Si, Ge を選んだ¹³⁾。SiおよびGeのFIR帯での吸収係数は、ドーピングした元素の含有率とともに急激に増加するので、メッシュ鏡の基板には、高純度のものが必要である。

筆者の用いた基板は、厚さ6.487mm、直径51mmのZカット結晶水晶、厚さ2.335mm、直径50mmのSi、厚さ2.335mm、直径40.6mmのGeである。平面度は、可視光干渉縞で、結晶水晶が2縞、それ以外は5縞である。

4.2 ポンプ光用多層膜蒸着

光ポンプ効率を良くするには、基板に、ポンプ光用の多層膜を施すことが有利である。膜の材質としては、Danielewicz らによるGeと CaF_2 の多層膜⁶⁾、Durschlag ら¹⁴⁾によるGeとZnSの多層膜がある。ここでは、SiとGe基

板の半数にGe-ZnS膜を4対(8層)蒸着した。ポンプ光での反射率は97.5%である。

5. 蒸着マスクの製作法

マスクのパターンを、できるだけ正確に基板上に写し取るためには、マスクと基板との密着性が大切である。それには、蒸着時に、基板が、しわなく、平らに張ったメッシュの上に載っている必要がある。いくつかのプロセスがあるが、順をおって述べる。

5.1 メッシュの張り方

メッシュシートは、数 μm ～十数 μm 厚で、外形寸法150mm角で供給される。まず、たち物ばさみでそれを四等分する。この時、はさみが切れないと、メッシュに細かなしわが入り、これを平らにすることは不可能である。

四等分したメッシュは、Fig. 2のように、リングA、B上に置き、アクリル円板ARPで軽い押しをした後、瞬間接着剤でリングAに止める。はみ出たメッシュをカッターナイフで取り除けば、Aは蒸着マスクとなる。リングAとBは、50 μm より良い精度で、高さをそろえてあり、定盤の上に、同心円に置いて使う。アクリル円板の目的は、メッシュに残るそりを、平らにすることである。

Fig. 2. Procedure in fastening metal mesh sheet to supporting ring A with rapid adhesive agent. M, metal mesh; B, doughnut ring; ARP, acrylic resin circular plate.

この作業では次の注意が必要である。

- (i) リングBおよびアクリル板の表面に細かなほこりが残っていないようにする。この理由は、ごく薄いメッシュをアクリル板で押さえた時、

加重がほとりの部分に集中し、その部分のメッシュを変形させるからである。

(ii) 瞬間接着剤は平たくつけず、リングA上で対角線的に1点づつ接着し、メッシュ全面がリングAに接着するまで繰り返す。

(iii) リングAの内径とBの外径はできるだけ近い方が良いが、あまり近すぎると、Aにつけた瞬間接着剤がにじみ出し、メッシュがBに接着してしまう。

筆者が用いたリングA, B, アクリル円板ARPの寸法は、外径×内径×高さが、それぞれ、 $76.3\phi \times 66.5\phi \times 10$, $63\phi \times 10\phi \times 10$, $63\phi \times 5$, である。単位はmmである。この方法で接着したメッシュは、肉眼で判定できない程、平らな張りになる。

5.2 基板とマスクの組立

Fig. 3 に基板とマスクの組立図を示す。まず、基板はホルダCにセットする。Cには割が入れてあり、割り幅を調節するネジで基板を周囲からしめつけて固定する。この時、基板の上面は、Cのツラより0.3mmとび出ている。Cに中心案内Dを載せれば、CとDは0.2mmの公差ではめ

Fig. 3. Assembly of deposition mask and substrate. A, ring for supporting metal mesh; M, metal mesh; S, substrate; C, holder; D, centering guide; E, long bolt.

合わされる。棒Eを持って、基板をゆっくりとマスクAに載せれば、まず、DがAの縁にかかり、続いて基板がマスクの中心にセットされる。

この方法では、基板は、C, E, および基板の総重量230gで、メッシュ面に直接押し付けられるので、メッシュにごく僅かのたるみが残っていても、基板はメッシュに強制的に密着される。また、厚さ5 μm のメッシュにこの重量を載せても、メッシュの破損や、基板をおろした後のメッシュのたるみ、はなかった。

中心案内Dのもうひとつの目的は、ベルジャーに大気をリークした時に、空気の流れによる基板の移動を防止することにある。何故ならば、基板が動けば、蒸着を完了したメッシュの構造を破損するからである。CおよびDには、通風孔が開けてあり、ベルジャーリーク時に、基板の上下面に、気圧の差をできるだけ生じないようにしてある。

5.3 蒸着装置へのセット

基板は、蒸着ヒータの中心を通る鉛直線上に置く。そして、この状態で、ゴミが基板面にならないことを確認する。ゴミがあれば、基板を下方より蛍光灯で照らすと、ゴミの実際の寸法よりはるかに広い面積が、それ以外の部分の基板の色とは異って見える。

基板とヒータの距離は、蒸着装置の寸法的制約から、200mmである。

5.4 ヒータおよび蒸着

ヒータは、0.5mm ϕ タングステン線3本をよったものを、らせんに巻いたヒータ（以下Wヒータと略記）を使った。ヒータの仕様は、らせん内径5mm ϕ , 7ターン, 全長110mmである。

Alは純度99.99%の0.5mm ϕ 線を用いた。Al線は長さ約1.5cmずつに切り、V字状に曲げ、らせんの各ターンに平均して載せた。1回に飛ばすAl線長は500mmで、これにより、0.2~0.3 μm 厚のAl膜を作った。

ヒータ電流を序々に増加してゆくと、とけたAlが表面張力で互にくっつき合い、らせん

の中心附近のターンに、直径3～5mmの玉になる。玉の数は1～2個である。

ここで使用したWヒーターの寿命は、500mmのAl線を2回飛ばすのが限界であった。

蒸着速度に関しては、Al表面の不純物を先に飛ばした後、約2分で0.5mmφ×500mmのAl線を蒸発させた。蒸着開始の真空度は 3×10^{-4} Pa, Alが蒸発している時は 2×10^{-3} Paである。

蒸着を終了した基板は、Fig. 3の棒Eを持って取り出す。Eには、長くては、はめ合いの極めてゆるいネジが切っており、Eに手を解れた時に基板が動かないようにするとともに、Eをネジ込むことにより、基板をホルダCより押し出せるようになっている。

5.5 再蒸着

基板上のAl膜はKOH溶液で簡単にはがせるから、再蒸着が可能である。多層膜を付けていない基板は、何回でも蒸着を繰り返せるが、多層膜付基板は、必要以上に長時間、KOH溶液に浸さない注意が必要である。使った溶液濃度は2Nである。

Ge-ZnS多層膜は、KOH溶液の中で、その縁が、およそ0.5mm角の膜片になってはがれる場合があるが、出力鏡として動作させても、出力の低下は認められなかった。また、一度KOH溶液に浸すと、膜全面にごく薄いしみができるが、この点も実用上問題がない。Si基板上に付けたGe-ZnSの8層多層膜の場合、3回までの蒸着を試みたが、出力特性の劣化は認められなかった。

6. 蒸着したcapacitive meshの観察

6.1 顕微干涉計による観察

Fig. 4は、Fig. 3のマスキで作ったMM鏡の顕微干涉写真である。メッシュのパラメータは、 $g=169\mu\text{m}$, $2a=22.6\mu\text{m}$, 基板はZカット結晶水晶である。白い正方形の部分AがAlの膜、黒い縦横の格子Bは露出した基板である。写真から、規則正しいcapacitive meshの構造が確認できる。

Fig. 4 Microscopic view of a capacitive-Al-mesh mirror with z-cut crystal quartz substrate. A, aluminium film; B, strip i.e. slit. Horizontal fringes are interferogram obtained by a green light. Thickness of aluminium film is measured to be about $0.25\mu\text{m}$.

水平方向の等間隔の縞模様は、緑色スペクトル線の干涉縞である。A, B部分の干涉縞位相差から膜厚が約 $0.2\mu\text{m}$, また、等間隔の干涉縞から膜厚が均一であることがわかる。

6.2 肉眼による観察

Fig. 4に示したメッシュ鏡全体を、反射照明で見た色彩は、全面一様な鏡で、細かい格子の線が縦横に走るのが認められた。豆ランプのような点光源を写せば、その像がメッシュのリボン方向に十字状に広がる。一方、透過照明で見れば、全面一様な半透鏡である。

6.3 マスク構造の相違による蒸着膜の差異

Fig. 3型マスクの他に、Fig. 5(a), (b)で示したマスクでの蒸着を試みた。(a)は、基板とメッシュ間に0.3mmのすき間がある。(b)は、Fig. 3型を簡略化したもので、基板をメッシュに直接載せる。

メッシュの張り方はFig. 3とは異なり、Fig. 5(a), (b)では、メッシュに均一な張力をかけてリングPまたはQに接着したものである。

Fig. 5. Simplified deposition mask. P, Q, ring; M, metal mesh; S, substrate.

リングP, Qの内径は、用いる基板の外径より0.1mm大きい。

まず、Fig. 5(a)のマスクでは、基板全面に一様なAl膜が付き、メッシュ鏡ができなかつ

た。しかしながら、金属顕微鏡による観察から、この膜は、全面にかぶった薄いAl膜の上に、capacitive mesh 構造が載った構造であることがわかった。

Fig. 6は、Zカット結晶水晶基板に作った $g=169\mu\text{m}$, $2a=22.6\mu\text{m}$ のMM鏡である。マスクは、Fig. 5(b)に示したものである。Fig. 6(a)は透過光線で見えたもの、同(b)は、出来たMM鏡にマスクを重ね、透過光によるモアレ縞を見たものである。(a)では基板上に大きな黒い島状の模様が観察でき、(b)との対比から、島状の部分では、完全なcapacitive mesh構造ができていないことがわかる。

いくつか作ったFig. 5(b)タイプのマスクによる蒸着から、(i)島状の形はそのマスク固有であること、および、(ii)完全に島状模様を取り去るには、メッシュの張り方に熟達が必要であること、がわかった。

7. メッシュ鏡の動作特性

7.1 光励起メチルアルコールレーザー

作製したメッシュ鏡は、光励起メチルアルコール

Fig. 6. Imperfect capacitive mesh structures deposited with a mask which is shown in Fig. 5 (b). (a) transparent illumination, (b) Moire fringe between the substrate and the mask.

ールレーザの出力鏡に使用し、動特性を通して、メッシュ鏡の評価を行った。

このレーザは導波管型である。導波管はバイレックスガラス製、その寸法は、長さ2.1m、内径39.6mmφである。入力鏡は溶隔石英製で、Au蒸着が施してあり、直径2mmφの入力結合孔を持つ。入力鏡へのポンプ光は、 $F=130\sim150$ のレンズ系で集光する。ポンプ線はCO₂レーザの10R(38)線で、強度は25~30Wである。ポンプ線の発振周波数は、メチルアルコールの吸収線に一致するように、周波数オフセットをかけてある。FIR出力の検出は、 $f=100\text{mm}$ のTPXレンズで集光後、焦電検出器(モレクトロンR200ラジオメータ)で行う。ポンプ光とFIR光の分離は、Zカット結晶水晶板で行う。

7.2 メッシュ鏡の出力特性

Table I に作製したMMおよびMMD鏡の代表的特性をまとめる。Table I に示した鏡は全てFig. 3型のマスクで製作した。また、金属顕微鏡で観察したメッシュ構造は、いずれの鏡も完全なものである。これらの出力データは、その都度、レーザを最良な動作に微細調整した後、収集したものである。

251 μm での最大出力は、 $g=102\mu\text{m}$ のSi基板MMD鏡(No. 2)での、18mWである。No. 2だけの出力特性でも、251 μm 線は他の線より出力が大きい。No. 2以外の鏡を個々に見ると、251 μm 線は2~3番目の強度であるから、メッシュが、例えばNo. 2鏡のように、発振線の波長に適せば、メッシュ鏡は、「その線だけを強調して発振させる性能をもつ」といえる。

Table I の各発振線に対する最大出力は、著者の知る限りでは、今まで報告されて来たものより、いずれも大きい^{15), 16)}。

Table I で示したSiのメッシュ鏡は、面に垂直な軸のまわりの回転に対し、出力特性に異方性を示した。すなわち、251 μm 線についてみると、基本モードの強度が、鏡の回転位置で10~30%変化した。そして、この強度変化の特性は、各鏡に固有である。結晶水晶のメッシュ鏡は、異方性について調べていない。

7.3 メッシュ鏡の出力同調特性

Fig. 7 に代表的な出力同調特性を示す。出力鏡は、 $g=169\mu\text{m}$ 、 $2a=22.6\mu\text{m}$ 、をもつMM鏡である。Fig. 7 から明らかなように、163 μm 、251 μm 、469 μm に対する半波長ずつのピークの

Table I. Summary of capacitive-Al-mesh mirror. MMD, metal mesh dielectric mirror; MM, metal mesh mirror. Question marks mean that output powers of the 163 μm line are so strong that those of the 251 and 469 μm lines cannot be measured. Crosses mean non-oscillation.

No.	SPECIFICATION				OUTPUT POWER		
	Type	Substrate	Grid Constant	Strip Width	163 μm	251 μm	469 μm
1	MMD	Si	63.5 μm	12.3 μm	34.0 mW	?	?
2	MMD	Si	102	23.0	4.3	18.0 mW	8.0 mW
3	MM	ZXQ	102	16.7	X	14.6	X
4	MM	ZXQ	169	22.6	1.0	0.8	4.0
5	MM	Si	102	16.7	13.0	9.8	2.8
6	MM	Si	169	22.6	27.4	16.2	7.6

Fig. 7. Typical cavity tuning curve obtained by a Si capacitive mesh mirror with $g=169 \mu\text{m}$ and $2a=22.6 \mu\text{m}$. Open circles denote the $251 \mu\text{m}$ line, inverted triangles the $469 \mu\text{m}$ line, and crosses the $163 \mu\text{m}$ line, respectively.

反復は、明瞭であり、各線の同定が容易であることがわかる。この出力同調曲線の明瞭さは、Fig. 3 型マスクで作った、全てのメッシュ鏡に共通の特徴である。

7. 4 メッシュ鏡の劣化

Table I の MM および MMD 鏡は、それぞれ、平均100時間の運転を行っている。ポンプ光入力 は25~30Wである。しかしながら、機械的にも、出力的にも、劣化は認められない。

8. 検討

8.1 光学的観察の検討

Fig. 5(a)のマスクでは、基板とメッシュ間に 0.3mm のすき間がある。この方法による鏡は、肉眼では全反射鏡、金属顕微鏡では Al 膜上の

メッシュ構造、が観察できた。

このことから、蒸発した Al 原子は、基板に衝突した位置に止まらず、少し移動した後停止する効果、あるいは、マスクのリボンで、Al 原子が散乱を受ける効果、の存在が推定できる。

このふたつの効果を仮定すれば、Fig. 6 に示した蒸着面の島状模様の形成原因は、島状部分で基板がメッシュに密着していなかったことと解釈できる。このことから逆に、完全なメッシュ構造を蒸着するには、基板とマスクの密着性が重要であるといえる。

Fig. 5(b)のマスクを使う場合には、メッシュの張り方に熟達した上で、必要があれば、基板上におもりを載せるなどして、強制的に基板とメッシュの密着性を増せば、このマスクで、良いメッシュ構造の膜を作れよう。

Fig. 3のマスクは、Fig. 5(b)型マスクの密着特性を考慮して、改良を加えたものである。このマスクを使えば、顕微鏡下で見て、完全なメッシュ構造の膜ができる。

8.2 動作特性の検討

Si 基板は、大口径で、吸収の少ないものが、比較的容易に入手できる。その意味で、Si は、光励起 FIR レーザーの出力鏡の基板材料として、最も有望であろう。

Si のメッシュ鏡を作る時、MM にするか MMD 鏡にするかの議論は大変興味がある。すなわち、MM 鏡で済めば、多層膜蒸着の必要がないから、経済的にも、また取り扱いの上でも有利になる。

Table I から $163\mu\text{m}$, $251\mu\text{m}$, $469\mu\text{m}$ 線で、最大出力を得た鏡は全て Si の MMD 鏡であるが、2 番目の出力を得た鏡は、いずれも Si の MM 鏡である。しかも、各波長での最大出力の、それぞれ80%, 90%, 95%を得ている。この点から見て、本報告に述べた方法で Si のメッシュ鏡を作り、前述の3本の発振線についてみる限り、MM 鏡は MMD 鏡と比較して、そんな色のない特性と考えられる。

Si の MM 鏡と Z カット結晶水晶の MM 鏡を、同一の格子定数 g をもつもので比較すれば、

Table I のデータでは、Si の MM 鏡の出力がまさるが、これだけから Si 基板の優位を決めることは早計である。しかし Z カット結晶水晶基板は、ポンプ光での吸収係数が高いため、動作時にメッシュ鏡の温度が上がる。ポンプ光入力 25W、1 時間運転後には約 50℃ になる。それ故、大きなパワーでポンプする場合におけるメッシュ鏡の破損、あるいは、発振周波数安定化をする場合における共振器の熱膨張、などから見て、Z カット結晶水晶は Si や Ge に一步譲る。

$\lambda=251\mu\text{m}$ で、Z カット結晶水晶製メッシュ鏡の透過率を、Wolfe らの式¹⁰⁾ から、基板のエタロン効果を含めて計算すると、 $g=102\mu\text{m}$ 、 $2a=16.7\mu\text{m}$ の時に、25~59% となる。これらのパラメータ値をもつ、Table I の鏡 No. 3 では、251 μm 線だけが発振しているから、この鏡は、251 μm の附近で、発振に適当な透過率を持つはずである。一方、文献 16 を参照すれば、251 μm は 118 μm メチルアルコールレーザーの発振より弱い。それ故、計算した透過率を、118 μm での最適透過率 15%⁷⁾ と対比すると、Wolfe らの式による透過率は大きすぎる。

さらに、 $\lambda=251\mu\text{m}$ で行った Z カット結晶水晶メッシュ鏡 ($g=102\mu\text{m}$ 、 $2a=16.7\mu\text{m}$) の透過率測定では、 $T=3\sim 8\%$ であった。そして、基板内の吸収を補正しても $T=4\sim 10\%$ である。

このふたつのことから、Wolfe らの式で透過率を見積る場合、実際の透過率は、計算値より 1 桁小さくなること、を念頭におく必要がある。

マスク上の任意の 2 点で、メッシュの画素が同一であっても、メッシュの厚さが無視できない時には、本報告の方法で蒸着した capacitive mesh では、場所が違えば画素の形が異なる。このことは、蒸発源を点光源に見立てれば、幾何光学との対応から類推できる。

点光源を通る鉛直線と基板の交点を原点にとる。原点近傍では入射角が 0 であるから、マスクのリボンと、その影の形は等しい。しかし、原点から離れた画素では、リボンが斜から照明

されるので、リボンの影は、厚さに相当する分だけ広がる。

メッシュの対称性を考慮すれば、基板上の画素の形状は、原点に垂直な軸のまわりの回転に対し、90° 周期で繰り返すことがわかる。

本報告で使用した装置では、マスクの厚さを 15 μm とすれば、斜入射によるリボン幅の拡がりには、高々 2 μm である。マスクのリボン幅はおおよそ 20 μm であるから、蒸着した capacitive mesh のリボン幅の、マスクからの変形は、大きくても 10% である。

しかし、90° の周期性が FIR 出力に与える影響は、さらに詳しい実験と解析が必要である。

9. まとめ

市販の金属メッシュをマスクとし、真空蒸着で Al 薄膜の capacitive mesh 鏡を作製した。そして、それを、光学的観察および動作特性の両面から評価した。

金属顕微鏡による観察では、メッシュ構造の良否は、マスクと基板の密着性により決定されることを指摘した。そして、密着性の良いマスクで作ったメッシュ鏡を光励起メチルアルコールレーザーに用いれば、

(i) 25W ポンプで、163, 251, 469 μm の発振線が、それぞれ、34, 18, 8 mW 程度の出力で得られる;

(ii) メッシュのパラメータを適切に選べば、必要な発振線を、選択的に強められる;

(iii) 出力同調曲線上で、発振モードが明瞭であり、発振線の同定が容易である;

ことがわかった。これらの特性は、CO₂ レーザー周波数測定に用いる。光励起メチルアルコールレーザーの条件を満たすものである。

今後の課題として、強いポンプ光に耐えるメッシュ鏡の製作、および、蒸着条件と FIR 出力の異方性との関連の明確化、などを挙げることができる。

10. 謝辞

メッシュ鏡について有益な御教示をいただい

た大阪大学工学部山中正宣助教授に感謝する。
また、終始理解と激励をおしなかつた北海道
大学工学部田中敬一教授に感謝する。

参 考 文 献

- 1) 例えば, 西沢, 野田, 藤田, 山中, 武田, 岡島, 牧野, 長坂, 小泉, 篠崎, 高井, 村上, 長島, 綱脇, 近, 近藤, 仲田: 核融合研究 **45** (1981) 476.
- 2) 例えば, J. Q. Henningsen: IEEE J. Quantum Electron. **QE-13** (1977) 435.
- 3) 例えば, D. J. E. Knight, G. J. Edwards, P. R. Pearce, and N. R. Cross: IEEE Trans. Instru. Meas. **IM-29** (1980) 257.
- 4) 田中, 桜井, 伊藤, 黒沢, 盛永, 岩崎: 第42回応物学会学術講演会予稿集 (1981) 190.
- 5) K. Tanaka, T. Sakurai, N. Ito, T. Kurosawa, A. Morinaga, S. Iwasaki: Proceedings of the second International Conference of Precision Measurement and Fundamental Constants, June 1981, NBS Gaithersburg.
- 6) E. J. Danielewicz and P. D. Coleman: Appl. Opt. **15** (1976) 761.
- 7) F. Julien and J-M. Lourtioz: Int. J. Infrared and Millimeter waves **1** (1980) 175.
- 8) D. T. Hodges, F. B. Foote, and R. D. Reel: IEEE J. Quantum Electron. **QE-13** (1977) 491.
- 9) P. M. Plainchamp: IEEE J. Quantum Electron. **QE-15** (1979) 860.
- 10) S. M. Wolfe, K. J. Button, J. Waldman, and D. R. Cohn: Appl. Opt. **15** (1976) 2645.
- 11) T. Sakurai, T. Kurosawa, and A. Morinaga: to be published.
- 12) R. Ulrich: Infrared Phys. **7** (1967) 37.
- 13) E. V. Loewenstein, D. R. Smith, and R. L. Morgan: Appl. Opt. **12** (1973) 398.
- 14) M. S. Durschlag, S. J. Petuchowski, and T. A. DeTemple: Infrared Phys. **20** (1980) 309.
- 15) 山中正宣: レーザー研究 **3** (1976) 253.
- 16) D. J. E. Knight: NPL report no. Qu 45, 6-th issue Feb. 1981.