シリコン音響レンズの開発*

[JSPE-59-01]
[93-01-72]

田中伸司** 橋本久儀*** 佐藤一雄**

Development of Silicon Acoustic Lens

Shinji Tanaka, Hisayoshi Hashimoto and Kazuo Sato

In order to develop Scanning Acoustic Microscope (SAM) having high resolving power, the acoustic lens for a high acoustic frequency range which has very small spherical concave has been fabricated by micromachining. Silicon single crystal is used as the material for the acoustic lens. Suitable etching conditions to obtain excellent sphericity and minimal surface roughness demanded for a lens profile, have been investigated. The optimum etchant was mixture of hydrofluoric, nitric and acetic acids in the ratio of 2 : 3 : 3, at 50°C. The influence of the aperture diameter of the etching mask and etching time on the spherical lens profile was examined. The etched concave profile for 1 GHz range lens fabricated under the above conditions showed a maximum deviation from a perfect sphere of less than 0.2 μm . Silicon lens designed for frequency 1 GHz exhibited the theoretical resolution expected from the wave length.

key words; Scanning Acoustic Microscope, acoustic lens, micromachining, silicon, chemical etching, sphericity

1. 緒 言

超音波顕微鏡はLSI等の試料内部の非破壊検査や、薄膜の物性値を評価する手段として注目されている¹⁾。図1に走査型超音波顕微鏡 (SAM) の原理を示す。この中で音響レンズは良好な音響像を得るための重要な部品であり、音波を波長オーダのスポットまで集束させるためにレンズ形状には高い真球度と鏡面が要求される。音響像の解像度を高めるためには高い周波数の音波が使われるが、高周波領域では水中での音波の減衰が著しいためにレンズ径を小さくする必要がある。例えば、1GHz用のレンズでは半径が約50 μm であり、さらに形状精度として真球度0.2 μm 以下、面粗さ0.02 μm 以下が要求される。

従来の音響レンズの製造方法にはサファイヤ等の素材に直接機械加工する方法と熔融石英の中に存在する球状の泡を利用する方法の二つがある²⁾。しかしながら、前者の機械加工では1GHzクラスに対応する小さな径のレンズを安定して得るのが困難であり、後者の場合は目標寸法の泡を熔融石英中に

見つけるのが難しいなど歩留まり上の問題がある。

筆者等は、微細な高周波レンズの加工には微細加工性に富む半導体プロセスが好適であると考え、レンズ素材として新たに単結晶シリコンを選んだ。シリコンを音響レンズの素材とすることで以下の利点が期待出来る。

①シリコンは従来の素材である熔融石英よりも音速が速く、しかも音響の減衰が少ないなど、音響特性

Fig. 1 Schematic diagram of acoustic lens for SAM

* 原稿受付 平成4年4月17日

** 正会員 (株)日立製作所機械研究所 (土浦市神立町 502)

*** (株)日立建機技術研究所 (土浦市神立町 650)

が優れている。

②内部欠陥が少なく、しかもコスト的に安価である。

③リソグラフィやエッチング技術を用いることによりパッチプロセスで多くのレンズを高精度に形成して品質の安定化が図れる。

④アレイ状にレンズを配列したり、円筒レンズや球面レンズなど多様な形状のレンズを共存させることによって高機能レンズへの展開が可能である。

⑤シリコンレンズの表面を熱的に酸化することによってレンズ面に音響整合層となる酸化シリコンを均一な厚さに形成できる。

本報告では、単結晶シリコンにウエットの等方エッチングを行って高周波用レンズが得られる条件を探索した。

2. 実験方法

2.1 レンズ面の加工

図2にシリコン球面レンズの加工プロセスを示す。初めに、シリコンウエハ上にマスク材料のCr（厚さ：約0.4～0.6 μm ）とAu（厚さ：約0.4 μm ）の薄膜を蒸着する。その後、円形の開口部をパターンニングして、その開口部から等方的なエッチングを行って球形の凹みを形成する。なお、ノイズとなる音波を散乱させる目的でレンズ球面の周辺は機械加工でテーパ状に仕上げる。

シリコンの等方エッチング液としてフッ酸と硝酸の混合液が良く知られており、エッチャントの組成がエッチレートやエッチング表面の粗さにおよぼす

Fig. 2 Fabrication process of spherical Silicon lens

影響に関する研究がなされている^{3) 4)}。また、結晶方位によってエッチレートがわずかに変化し、その傾向はエッチング温度で変化するなど必ずしも等方的でないことが報告されている⁵⁾。

従来の研究結果は特定のエッチング条件で行われたもので、これらのデータから音響レンズの最適加工条件を求めることは困難である。本報告では、鏡面であると同時に真球度の高いレンズ形状が得られるエッチング条件を以下の手順に従って検討した。

①ウエハの結晶面の方位として(100), (110), (111)の三種類を選び、レンズを作る上で最適な面方位のウエハを調べた。異方性の影響が強調されるように長時間のエッチングを行って、目標とする1GHz用のレンズよりも径の大きな凹面を形成した。

②エッチャントは図3に示すフッ酸、硝酸、酢酸の三元系の混合液を用いた。図中の陰を付けて示したエッチレートが大きくて形状制御の困難な領域やエッチレートが小さくて加工が進まない領域は避けた酢酸の体積比を37.5%と一定にしてフッ酸と硝酸の混合比が異なるA, B, C, Dの4種類のエッチャントを選んだ。

また、異方性におよぼすエッチャント温度の影響を調べるために室温(20℃)と高温(50～70℃)で比較実験した。

③上記結果で得られた最適エッチャントの条件でマスクの開口径とエッチング時間がレンズ形状に及ぼす影響を調べ、さらにレンズの真球度を高めるための条件を探索した。

2.2 レンズ面の形状評価

エッチングで得たレンズ凹面形状の評価には二つの方法を用いた。第一の手法は顕微鏡による凹面上

Fig. 3 Constituent of etchants

Fig. 4 Measuring method of lens profile

部からの外周形状の観察である。結晶方位に従って真円からずれた外周の径を測定することにより代表的な方位のエッチレートがわかり、真球度の良否を把握出来る。

凹面内部の真球度をさらに詳しく調べるために図4に示すフィゾー型のレーザ干渉計(ZYGO製, He-Neレーザ光)を用いた。本手法は参照真球面とサンプル面形状の光路差の相違の結果として現われる干渉縞を利用するものであり、一縞の与える形状誤差は $0.31\mu\text{m}$ である。この測定系で用いた基準参照面のFナンバーは0.75であり、開き角度 β が 83.6° である。これによって音響レンズの開き角度の80%の領域を測定可能である。

3. 実験結果および検討

3.1 レンズ面の加工

フッ酸、硝酸、酢酸の比が1:4:3のエッチャントB(20℃)を用いて面方位が(100), (110), (111)の三種類のウエハをエッチングした。この凹面の外周形状を測定し、レーザ干渉計による測定を行った結果、(100)ウエハの場合は他の面方位のウエハに比べて対称な面が多く現われてレンズとして好適な軸対称形状が得られることがわかった。以下の実験ではすべて(100)ウエハを用いている。

3.1.1 最適なエッチャントの探索

表1は20℃でエッチングした時にエッチャントの組成がレンズの真球度および面性状におよぼす影響の実験結果を示す。エッチャントAのようにフッ酸の量が少ない場合、エッチング面は鏡面状態となるが凹部の外形はやや四角状になって真球度が低下する現象が見られた。一方、エッチャントDのようにフッ酸の量が多い場合、凹部の外形は真円に近づく

Table 1 Effect of etchants on geometry of aperture and surface roughness of etched cavity (20℃, $D_i=140\mu\text{m}$)

	Etchant A etching time 90min	Etchant D etching time 15min
Geometry of aperture	 $D_f=295\mu\text{m}$	 $D_f=308\mu\text{m}$
Surface roughness	mirrored surface	 100 μm orange peel pattern

Table 2 Effect of etching temperature on sphericity of etched cavity (Etchant C)

	50℃, $D_i=100\mu\text{m}$	20℃, $D_i=140\mu\text{m}$
Geometry of aperture	 $D_f=390\mu\text{m}$	 $D_f=400\mu\text{m}$

が逆に面粗さは増大して音響レンズとして使用できなくなる。

このように、真円度と面粗さはレンズ形状に関しては相反する条件であることがわかった。そこで、両条件を満たす可能性が高いエッチャントCを選んで、温度を変化させてさらに詳細な検討を行った。

この結果、50℃でエッチングした時に表面粗さおよび真球度の両方を満たすレンズが得られた。表2に、液温の変化による凹部の外周形状の相違を対比して示す。この写真から明らかなように50℃の場合には真球度が向上していることがわかる。

3.1.2 マスク開口径とエッチング時間がレンズ面の真球度に及ぼす影響

上記結果で得られたエッチャントC(液温50℃)の条件で真球度に及ぼすマスク開口径とエッチング

Table 3 Fringe patterns of etched cavity measured by interferometer
(Etchant C at 51°C, n: Number of fringes)

	$D_i = 60 \mu\text{m}$	$D_i = 110 \mu\text{m}$	$D_i = 150 \mu\text{m}$
etching time 15 min	 n=5 R=97 μm	 n=10 R=146 μm	 n=15 R=188 μm
etching time 60 min	 n=5 R=150 μm	 n=9 R=198 μm	 n=11 R=235 μm

時間の影響を調べた。エッチングしたときに得られる凹部の真球度を表す干渉縞パターンの例を表3に示す。一縞が示す形状のずれは $0.31 \mu\text{m}$ でレーザ波長の半分に相当する。この表から明らかなように D_i が大きい場合はエッチング時間とともに縞数が減少して真球に近づく傾向にあるが、 D_i が小さい場合にはこの傾向が見られない。表中の干渉縞パターンからエッチング後の凹部の真球からのずれの分布を定量的に求め、レンズ半球Rに関する以下の実験式を得た。

$$R = 35 + 1.025 D_i + 32.681 n \quad (t/15)$$

ここに、R、 D_i の単位は μm であり、tはエッチング時間(単位:分)である。

上式を真球からのずれとマスク開口径の関係で整理すると図5のグラフが得られる。この図から、以下のことがわかる。

①マスク開口径を一定としてエッチングした場合、開口径 D_i が $60 \sim 70 \mu\text{m}$ 以上になるとエッチング時間が増すほど真球からのずれが小さくなるが、開口径の小さな領域では逆にずれは大きくなる。開口径が小さくなると逆転する理由として、エッチング時間の増加とともに結晶の異方性の影響が強くなると思われる。

②図の△印で示す半径が $50 \mu\text{m}$ 程度の高周波用レン

ズを得るためにはマスク開口径を小さくして短時間のエッチングを行う必要がある。

筆者等は上記結果に基づいて、径の小さい高周波領域でのSAM用音響レンズを得るためにマスクの開口径 D_i を $16 \mu\text{m}$ と小さくして、10分間のエッチングを行った。この結果、半径が約 $45 \mu\text{m}$ で極めて真球に近い形状の1GHz用レンズが得られた。図6は、このレンズの真球からのずれ分布を干渉縞パターンから求めたものであり、形状が最も異なる $\alpha=0^\circ$ と 45° の二方向断面について示している。両者の相違は、エッチレートの方位依存性によって生じたと考えられるが、真球からのずれは

要求仕様($0.2 \mu\text{m}$)以内である。

3.2 シリコンレンズによる音響画像

エッチングによるレンズ球面形成後、外周のテーパ部を機械加工した。加工後の1GHz用レンズの写真を図7(a)、(b)に示す。この後、レンズ面に熱拡散で音響整合層の酸化膜を形成した。さらに、レンズ面と反対側の面に圧電膜を形成して実装し、SAMに搭載した。図8はこのレンズを用いて

Fig. 5 Effect of D_i and etching time on concave profile of etched cavity
(Etchant C at 5°C)

Fig. 6 Evaluation of cross-sectional profile of Silicon lens
($D_i=16\mu\text{m}$, etching time = 10min.)

Fig. 7 Photographs of developed Silicon lens

得られた1GHzでの音響像である。観察したテストパターンは熱酸化で形成した SiO_2 膜に溝幅と突起幅の比が1:1のラインアンドスペースのパターンをドライエッチングで加工したものである。図の数値は μm を単位としてライン幅の十倍の数値を示している。図において、 $0.9\mu\text{m}$ のラインの識別が可能であり目標値 $1.1\mu\text{m}$ をクリアしていることがわかる。なお、400MHzクラスのシリコンレンズでも目標の解像度 $2.5\mu\text{m}$ が得られることがわかり、音響レンズとして広範な領域で使用できることが実証された。

Fig. 8 Test pattern and its acoustic image taken with SAM using the lens of Fig.7

4. 結 言

レンズ素材として新たに音響特性に優れたシリコンを選んで高周波レンズの開発を行い、以下の結論を得た。

- (1) レンズ球面の加工に半導体プロセスのマイクロマシニングを採用して加工パラメータの最適化を図った。この結果、半径が $45\mu\text{m}$ の1GHz用レンズを真球度 $0.2\mu\text{m}$ の精度で得ることができた
- (2) 開発したシリコンレンズに関し、解像度 $0.9\mu\text{m}$ のレンズ性能が得られた。
- (3) 400MHzクラスのレンズにおいても理論分解能が得られることを実証し、シリコンが音響レンズとして広範な領域で使用可能であることを確認した。

参 考 文 献

- 1) C.F.Quate et al :Acoustic Microscope with Mechanical Scanning-A Review, Proc. IEEE, 67,8 (1979)1092.
- 2) マイクロ加工技術編集委員会編：マイクロ加工技術(第2版)，日刊工業新聞社 (1988) 346
- 3) B.Schwartz and H.Robbins :Chemical Etching of Silicon, J.Electrochem Soc.,123,12 (1976) 1903.
- 4) 濱口恒夫：シリコンの化学エッチング，精密機械，51,5 (1985) 129.
- 5) B.Schwartz and H.Robbins :Chemical Etching of Silicon, J.Electrochem Soc.,108,4 (1961) 365.