

水晶基板のマイクロ加工技術に関する研究

—マイクロ構造の加工と形状評価—

山田 博之・西村 通喜・勝又 信行・宮本 博永・橘田 鉄雄

Study on Micro Fabrication Technology for Quartz Crystal

—Fabrication and Evaluation of Micro Structure—

Hiroyuki YAMADA, Michiyoshi NISHIMURA, Nobuyuki KATSUMATA

Hironaga MIYAMOTO and Tetsuo KITTA

要 約

水晶基板を反応性イオンエッチングで加工し、加工条件の検討を行った。反応性ガスにフッ素系ガスを用い、高周波出力および圧力を変化させて加工を行い、それぞれの条件におけるエッチング速度を求めた。その結果、高周波出力200W、処理圧力3.3Paに設定した場合、最大約40nm/minのエッチング速度が得られた。

また超薄型水晶基板を想定し、加工時あるいは組立時に基板に加わる衝撃力等の外力に対する強度予測を有限要素法による構造解析システムを用いて行った。

1. 緒 言

水晶は代表的圧電結晶素材で、その優れた電気的、機械的および光学的特性を活かし、水晶振動子をはじめ SAW デバイス（表面弾性波素子）として広く使用されている。

特に近年は、水晶振動子以外の各種センサー等への応用も提案され、また微小構造部品としても注目されている。

微小構造部品の製作技術にはエッチング、微細放電加工、エキシマレーザー加工等があるが水晶などの絶縁体についてはエッチング加工が適しているようである。エッチング加工は、薬液を用いるウェットエッチングと反応性のガスを利用するドライエッチングの2種類に大別される。後者は前者に比較して異方性エッチングが可能で微細加工性に優れていることから半導体製造工程では欠かせない技術となっている。特にウェットエッチングと異なり、結晶面方位に依存しない加工が可能であることは大変有効である。

そこで本研究では、水晶基板に対し反応性イオンエッチング装置を用い、マイクロ加工を施した場合の加工条件および形状評価方法等について検討を行った。

また水晶による微小構造物の一例として超薄型水晶基板を取り上げ、加工時あるいは組立時の衝撃力等に対する強度予測を有限要素法による構造解析システムを用いて行った。

2. 実験方法

2-1 試料の作製

エッチング試料（被加工物）は、4インチのSTカット水晶ウェハ（厚さ0.4mm）に、フォトレジスト（東京応化：OFPR800）を用いてマスクパターンを形成した後、精密切断機により15mm角に切り出したものを用いた。

2-2 エッチング

エッチングは、反応性イオンエッチング装置の中では標準的な平行平板型の反応性イオンエッチング装置（サムコインターナショナル製RIE-200L）を用いた。

反応性イオンエッチングは、印加する高周波出力、使用するガスの種類、流量および処理圧力などがエッチング速度と加工断面形状を決定する主な要因である。そこで反応ガスに CHF_3 を用い、表1に示すように高周波出力を変化させた場合（条件1）と、ガス流量、処理圧力をそれぞれ変化させた場合（条件2）について加工を行い、水晶の基本的なエッチング条件について検討を行った。

また加工断面形状の観察と測定は、電子顕微鏡（日本電子製JXA-8900RL）および走査型プローブ顕微鏡（セイコーインスツルメンツ製SPI-3800N/SPA500）を用いた。

表1 エッチング条件

	条件1	条件2
高周波出力 (W)	140~240	200
処理圧力 (Pa)	2.0, 3.3, 5.0	2.0, 3.3, 5.0, 7.5, 10.0, 15.0
ガス流量 (sccm)	15	5,10,15,20

2-3 強度解析

超薄型の水晶基板について、加工時あるいは組立時における取扱上の形状評価を目的として、衝撃力等外力に対する強度を有限要素法による構造解析システムを用いて解析を行った。

本解析では、非常に単純なマイクロ構造物として、厚み0.01mmの長方形基板を解析モデルとし、搬送作業を想定し、真空チャッキングあるいは加工機周辺（構造物の材質は炭素鋼と想定）への落下時に生じる衝撃解析を行った。解析に用いたモデルの形状および物性値¹⁾を表2に示す。

表2 解析形状及び物性値

	水晶	加工機 (炭素鋼)
形状 (mm)	1×1.5×0.01 (コーナーR0.1)	0.2×0.05×0.04
ヤング率 (GPa)	78.0 (X, Y) 103.0 (Z)	206
ポアソン比	0.135	0.3
密度 (kg/ml)	1.40×10 ⁻⁶	7.87×10 ⁻⁶

3. 結果および考察

3-1 高周波出力とエッチング速度の関係

図1にガス流量を一定(15sccm)としたときの高周波出力とエッチング速度の関係を示す。エッチング速度は高周波出力の増加に伴い、ゆるやかに増加する傾向を示し、高周波出力200W以上では、ほぼ一定の値(約40nm/min)であった。この時の加工面を走査型プローブ顕微鏡で観察した結果を図2に示す。いずれも加工量は僅かであるが、加工断面はほぼ垂直であり、底部のエッジ部分もシャープに加工されていて、異方性のエッチングが行われていることが確認できた。また図3に示すように、微細なパターン部分についても、マスクパターンの形状を正確に反映した加工が行われていることが確認できた。

3-2 処理圧力とエッチング速度の関係

図4は高周波出力を200W一定としたときの処理圧力とエッチング速度の関係を示す。ガス流量が5sccmの場合は、処理圧力の増加とともにエッチング速度は増加する傾向を示し、最大で約35nm/minであった。一方、ガス流量

10sccm以上では、3.3Paでエッチング速度は最大の約40nm/minとなり、それ以上の処理圧力では低下する傾向を示した。この傾向は、ガス流量を増加した場合、より顕著に現れ、ガス流量20sccm、処理圧力6.7Paに設定した場合、エッチング速度は約13nm/minまで低下した。

図5にその時の加工面を走査型プローブ顕微鏡で観察した結果を示す。処理圧力が5.0Paでは、溝底部は非常になめらかに加工されているが、6.7Paでは底部のエッジ部分が完全に加工されず、底部も荒れている様子が確認できた。

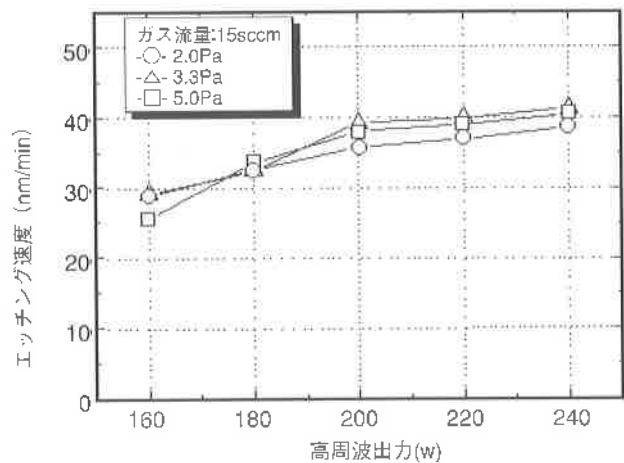
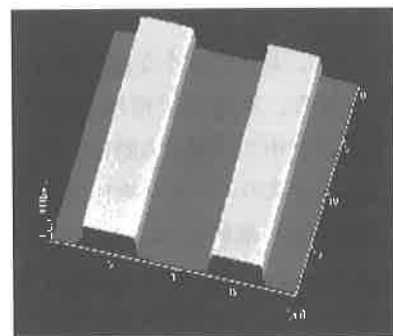
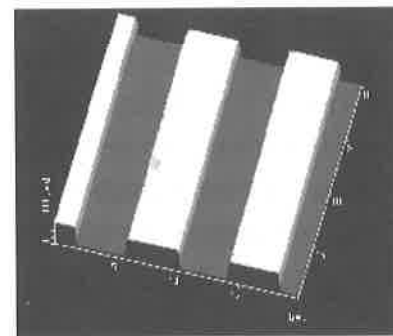


図1 高周波出力とエッチング速度の関係



(a) 高周波出力160w



(b) 高周波出力200w

図2 高周波出力を変化させたときの加工形状 (処理圧力: 3.3Pa 流量: 15sccm)

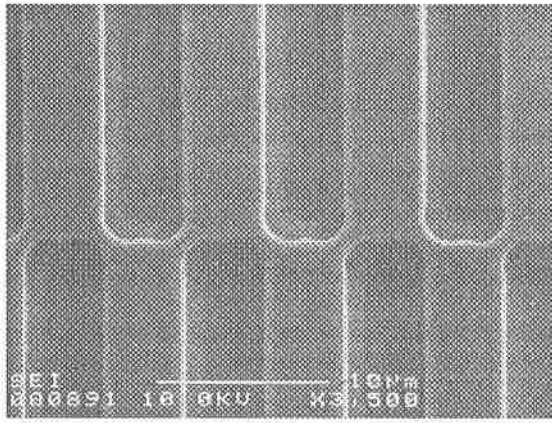


図3 加工部分の電子顕微鏡写真

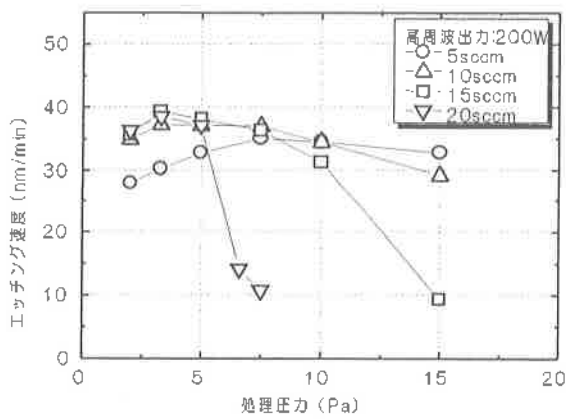
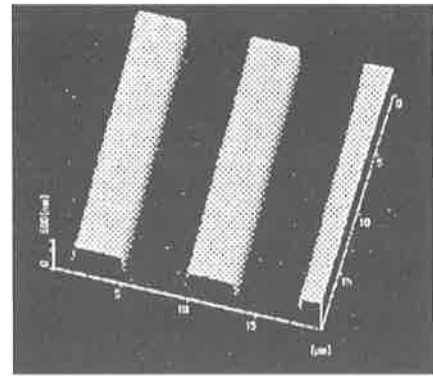
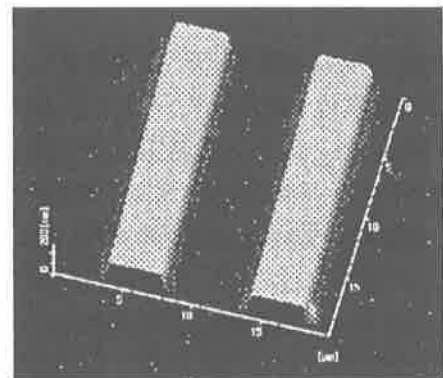


図4 処理圧力とエッチング速度の関係

この原因としては、以下のような反応槽内での反応によるものと考えられる。本研究で使用している反応ガス(CHF₃)は、プラズマ中で分解する際に、反応に寄与するエッチャーの他にC-F系のポリマーを生成する。この生成したポリマーは基板の上に堆積し、保護膜としても作用する。このためCHF₃ガスによる加工では、この堆積物を除去するために別の反応もしくはイオン衝撃を加える必要があるが²⁾、基板の上に堆積したポリマーはマスクとして機能することになる。反応槽内へのガス供給量を増やし、処理圧力を高めることは、反応槽内のガス粒子数が増加することであり、より多くのポリマーが生成し、被加工部により多くのポリマーが堆積するため、エッチング速度が低下し、またポリマーの堆積と除去が同時に進行するため加工面の荒れの原因になる。また比較的イオン照射が少ないエッジ部分には堆積が起きやすく、堆積したポリマーも除去されにくいので、やや丸みがかかった形状になったと考えられる。一方、低圧力側(2.0Pa)やガス流量が5sccmの場合は、エッチングに寄与するラジカルの減少やイオン密度が低下するためエッチング反応そのものが起きにくくなり、エッチング速度が低下したのと考えられる。



(a) 5.0Pa



(b) 6.7Pa

図5 処理圧力の違いによる加工形状への影響 (高周波出力:200W, 流量:20sccm)

3-3 強度解析結果

水晶基板を内径φ0.5mmのエアチャックを用いて吸引力10mN(而圧50KPa)で保持した場合の応力解析を行った。ただし水晶基板の自重は考慮していない。解析モデルとその計算結果を図6、図7に示す。吸引されている外周部と中央部で、圧縮応力と引張応力の集中が認められる。しかし応力値は水晶の許容応力値(約128MPa)よりもかなり小さいので、このような微小な吸引状態では破壊しないと予測される。

次に水晶基板を約10mmの高さから落下させ、金属面に衝突させた場合の時刻歴の応力解析を行った。ただし空気抵抗の影響は無視し、衝突速度443mm/secを初期条件とした。解析モデルを図8に、最大応力を示した時刻の解析結果を図9に示す。

この解析結果から、衝突後0.05msecで応力値は最大となり、10.4GPaとなった。この値はモデル(水晶基板)の許容応力をはるかに越えているため、当然破壊すると思われる。ただし本解析では空気抵抗を無視し、また衝突面に対し必ず垂直に衝突し、かついずれの方向にも倒れないという条件のもとでの解析であるため、実際の落下実験と比較し、厳しい条件であるといえる。

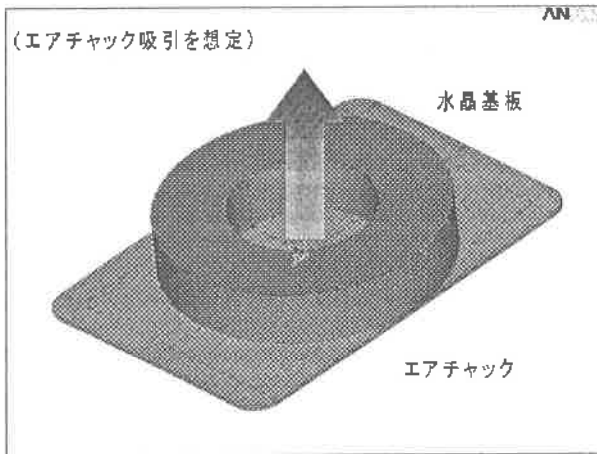


図6 解析モデル

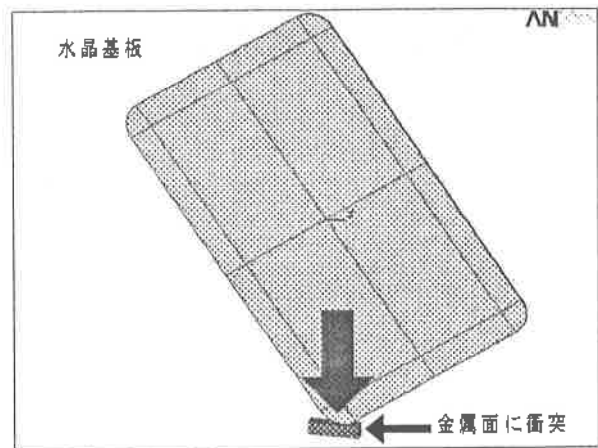


図8 解析モデル

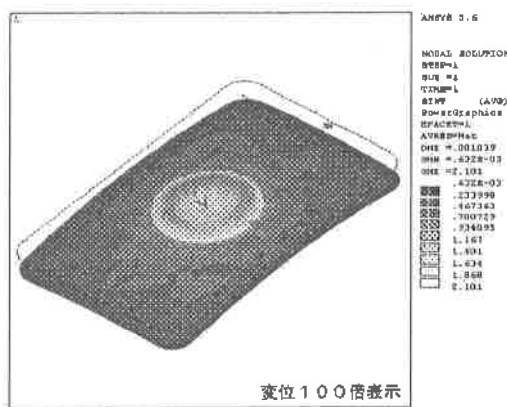


図7 面圧を受けた時の応力解析結果

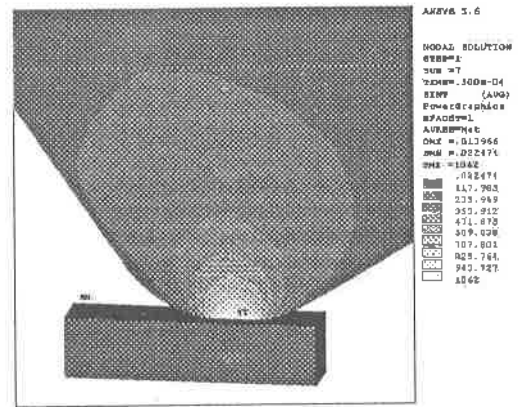


図9 衝突した時の時刻歴応力解析結果(最大応力時)

4. 結 言

水晶基板に対し、反応性イオンエッチング装置を用いて加工した場合の加工条件および形状評価方法について検討を行った。またマイクロ構造物の一例として、超薄型水晶基板について加圧時あるいは衝撃力印加時における強度解析を行った。

その結果を以下に示す。

1. 反応性ガスに CHF_3 を用いて加工を行った場合、高周波出力を200W以上、処理圧力を3.3Paに設定した場合、加工速度は約40nm/minであった。またマスク形状を反映した微細な加工を行うことができた。
2. エッチング処理圧力が高くなると加工速度は低下する傾向を示した。この傾向は、ガス流量が増加した場合、より顕著に現れ、また加工形状も丸みを帯び、加工面も荒れている様子が観察された。
3. 構造解析の結果、厚さ0.01mmの超薄型水晶基板の場合、衝撃力に対する強度不足のため、端部の欠け等の発生が想定され作業上ならびに取扱上問題があることが判った。したがって、単純な薄肉長方形基板の外周部のみ

厚さを増すなど、何らかの補強を施す必要があると思われる。

参考文献

- 1) 国立天文台編:理科年表平成12年版,丸善, P.456 (1999)
- 2) 徳山巍:超微細加工技術, オーム社, P.216 (1997)
- 3) 徳山巍:半導体ドライエッチング技術, 産業図書株式会社, P.83 (1992)