

論文

結晶異方性エッチング解析システム MICROCAD の開発

佐藤 一雄[†] 浅海 和雄^{††} 小林 元^{††} 入江 康郎^{††}
式田 光宏[†]

Development of an Orientation-Dependent Anisotropic Etching Simulation
System MICROCAD

Kazuo SATO[†], Kazuo ASAUMI^{††}, Gen KOBAYASHI^{††}, Yasuroh IRIYE^{††}, and Mitsuhiro SHIKIDA[†]

あらまし 複雑な3次元構造をもつマイクロマシンデバイスの加工プロセス設計を支援するツールとして、結晶異方性エッチング解析システムMICROCADを開発した。このシステムは、被加工材であるシリコン単結晶の全方位のエッチング速度をデータベースとして備えることにより、任意の結晶方位をもつウェーハ、任意のマスクパターンに対して、3次元エッチングプロファイルの時間的変化を解析する機能をもつ。全方位に対するエッチング速度の測定方法、解析システムの構成、3次元エッチングプロファイルの計算方法について述べた。本システムの適用例として、補償マスクパターンの設計、ウェーハを貫通してなお進行するエッチング形状の解析、多段階エッチングプロセスの工程設計の例を示し、このシステムの工程設計における有効性を論じた。

キーワード 結晶異方性エッチング、エッチング速度、データベース、シミュレーション、CAD

1. ま え が き

結晶異方性エッチングは、単結晶のエッチング速度が結晶方位によって著しく異なる現象である。この現象を応用した加工技術は、これまでにシリコン単結晶からなる圧力・加速度センサなど、物理量センサの構造体の加工に応用されてきた[1]。最近はこの技術を使って、インクジェットプリンタのヘッドなど、いっそう複雑な3次元デバイス構造を単結晶シリコン基板に形成することが要請されている。これに伴って、単に特定方位のエッチング速度が他の方位に比較して小さいという従来の知識だけでは、複雑なマイクロマシンデバイスの加工プロセスを設計することが困難になってきた。具体的には、エッチングマスクのアンダカットを補償する高度なマスク形状設計、多段階のエッチングプロセスからなる複雑な曲面形状の形成、基板両面からのエッチングで基板を貫通するプロセス、等々を組み合わせた高度なプロセス設計が必要になっている。更に、KOH水溶液、TMAH水溶液などのエッチング液の種類、濃度、温度などによっても異方性エッチング特性は大きく変わるので、エッチング条件の適

切な選定は加工プロセスの成否を決定する重要な要因である。しかし、現実には加工条件の選定は個々の現場のノウハウとして伝わるのみで、その方法論が確立していない。

これまでに筆者らの一人は、シリコン単結晶のエッチング形状予測にあたってWulff-Jaccodine法に基づく2次元解析において全方位のエッチング速度を考慮する必要性を論じ[2]、2次元解析システムを試作した[3]。しかし、3次元解析を行う完成度の高いシステムは世の中になく、3次元アルゴリズムの検討[4]、限られた結晶方位のみが表面に現れると仮定した解析[5]、セルオートマトンを適用した簡易システム[6]などが提案されているにすぎなかった。

以上に述べた技術的要請にこたえる目的で、筆者らはシリコンの結晶異方性エッチングにおいて全結晶方位のエッチング速度を考慮した3次元エッチングプロファイル汎用解析システムMICROCADを開発した[7]。これと前後して、全結晶方位を考慮することを前提とした3次元解析システムの試作例[7]、[8]が相次いで発表されたが、それぞれ、基板を貫通するエッチングなどの問題には適用できない[7]、あるいは汎用システムとしての構成をとっていない[8]、などの段階にある。

本論文は、MICROCADシステムにおけるエッチングプロファイル解析に必要な全結晶方位に対するエッチング速度をデータベース化する独自の方法を述べ、次に

[†] 名古屋大学, 名古屋市

Nagoya University, Nagoya-shi, 464-8603 Japan

^{††} 富士総合研究所 東京都

Fuji Research Institute Corporation, Tokyo, 101-8443 Japan

この結果を取り込んだエッチングプロファイル解析システムの全容を述べ、最後に開発したシステムによる解析結果を述べて、汎用性の高い機能を確認したことを報告する。

2. シリコンの結晶異方性エッチング特性の評価

2.1 実験方法

単結晶の全方位にわたるエッチング速度をエッチング条件ごとに測定・評価し、データベースとするため、以下のような一連の実験を行った。

シリコン単結晶からなる半球試験片を作成し、これをエッチングしたときの半球面の形状変化から全方位にわたるエッチング速度を測定した。半球試験片は単結晶インゴットを研削、ラップ、ポリッシュ加工して表面を鏡面に仕上げた。球面の半径は22mm、真球度は10 μ m以下、表面粗さRaは0.005 ~ 0.007 μ mである。機械加工後の試験片と、エッチング後の試験片の写真を図1に示す。

半球面の形状測定にはカールツァイス社の3次元測定機UPMC-CARATを使用し、緯度・経度方向にそれぞれ角度2°の間隔で半球表面の座標を測定した。エッチング量は最もエッチングが進む方位で100 ~ 150 μ mの範囲になるようにエッチング時間を管理した。エッチング量を大きくするとエッチング量の測定の精度が向上する反面、半球表面が多面体化して結晶方位の一部が表面から消失してしまうという欠点がある。これを避けるために、幾何学計算から上記のエッチング量

を決定した[11]。

エッチング条件はKOH、TMAH水溶液で、それぞれ濃度、温度の異なる条件でエッチングし、異方性の温度・濃度依存性をデータベース化した。

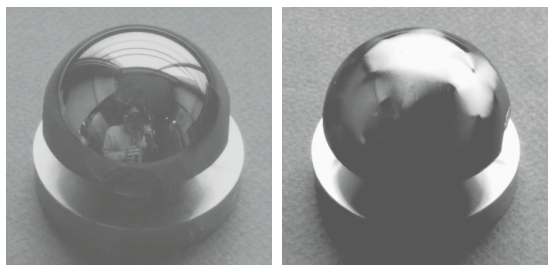
2.2 実験結果

前節の方法で測定したエッチング速度の結晶方位依存性の一例を図2に示す。この図は、40%KOH水溶液の90°におけるエッチング速度の分布を、極座標系で等高線表示したものである。エッチング速度の最小値は(111)にあり、最大値は(320)付近に存在する。また、(100)はエッチング速度が極小を示す。従来、エッチング速度は2~3の限られた結晶方位について知られてきたが、このような実験の結果、全方位にわたるエッチング速度が明らかになった。これまでの実験からエッチング速度最大の方位がKOHの濃度・温度によって変化すること[11]、同様の現象がTMAH水溶液でも現れること[12]が明らかになった。

上記の方法でエッチング速度のデータが、KOH水溶液で濃度が30 ~ 50%、温度が40 ~ 90°の範囲の12条件、TMAH水溶液で濃度が10 ~ 25%、温度が40 ~ 90°の範囲の9条件について得られた結果、工業的に使われるエッチング条件のほとんどをカバーするエッチング速度のデータベースができた。以下に述べるエッチングプロファイル解析システムは、このデータベースを使用することを前提として設計・開発した。

3. 解析システム

本システムMICROCADは、バルクマイクロマシニング



(a) (b)

図1 エッチング前後の半球試験片 (a)エッチング前 (b)エッチング後

Fig.1 Hemispherical specimen before and after etching. (a)before (b) after

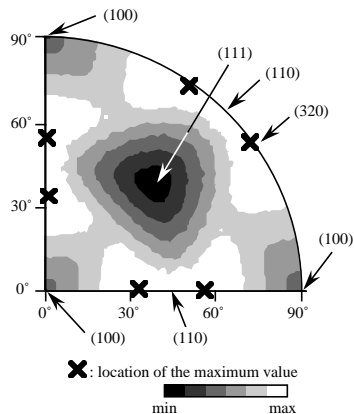


図2 全結晶方位に対するエッチング速度の(100)極座標系での等高線表示 (40%KOH,90°)

Fig.2 (100) polar plot of contour map of etching rate (40%KOH,90°).

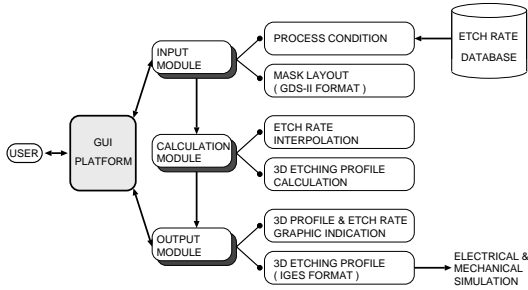


図3 MICROCAD のシステム構成
Fig.3 Structure of MICROCAD system.

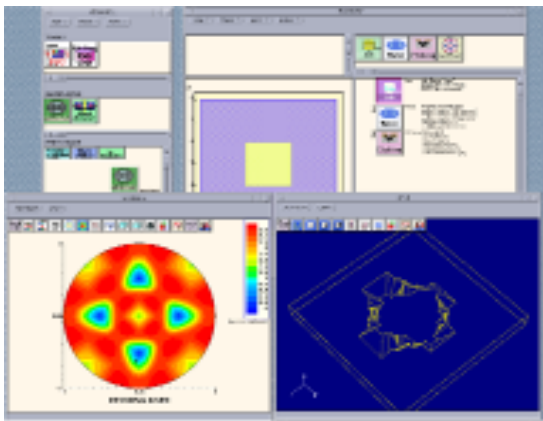


図4 MICROCAD の GUI 画面イメージ
Fig.4 Image of MICROCAD's GUI.

グによってシリコン基板上にマイクロマシンデバイスを形成するための製作プロセス設計を、従来の経験的・試行錯誤的設計から、計算機による知的設計に置き換えることを目的として開発に着手した。

その基本的機能は、結晶異方性エッチングプロセスにおける3次元エッチングプロファイルの変化を時間経過を追って解析的に予測することにある。任意の面方位をもつウェーハ、任意のマスクパターンに対応すること、また、エッチング特性の異なる KOH, TMAH などのエッチング液とその濃度、温度の効果も考慮した解析ができることを目標とした。このため、解析に必要な全結晶面方位に対するエッチング速度のデータは、前章で述べた実験によって、広範なエッチング条件で測定し、データベース化した。

3.1 システムの構成

MICROCAD のシステム構成を図3に示す。

MICROCAD はエッチング速度データベース、入力部、計算部、出力部から構成されており、GUI(Graphic User Interface)により各モジュールのコントロールを行う。図4にGUIの画面イメージを示す。

各モジュールの主な仕様を以下に挙げる。

(1) エッチング速度データベース: エッチング液として KOH 水溶液, TMAH 水溶液を用いたときのシリコンの全結晶方位に対するエッチング速度のデータを備える。新たなエッチング液・エッチング条件によるデータの追加、現在備えているデータの部分修正が可能である。

(2) 入力部: エッチング条件として KOH 水溶液, TMAH 水溶液等のエッチング液の種類・濃度・温度、エッチング時間、使用するウェーハの面方位とオリエンテーションフラット、及び加工に用いるマスクレイアウトを設定する。マスクレイアウトは GDS-II 形式で記述される。

(3) 計算部: エッチング液の濃度、温度条件に合わせて、エッチング速度の補間計算と Wulff-Jaccodine 法によるエッチングプロファイルの計算を行う。計算したいエッチング液の濃度、温度条件に一致したデータがデータベースにない場合は、既存のデータからエッチング速度の補間計算を行う。補間計算は各結晶面方位毎に、温度、濃度条件に対して行う。温度によるエッチング速度の補間にはアレニウス型の式(1)を用いた [10]。

$$R = R_0 \exp\left(-\frac{E_0}{kT}\right) \quad (1)$$

ここで R は各結晶面のエッチング速度、 T は温度、 k はボルツマン定数、 E_0 は T 近傍の温度におけるエッチング速度から求めた活性化エネルギー、 R_0 は E_0 と同様にして求めた定数である。また、濃度に対しては、エッチング速度が線形に変化すると仮定する。

エッチングプロファイルの計算方法は3.2で詳細を述べる。

(4) 出力部: 時間経過に伴うエッチングプロファイル形状図と解析に用いたエッチング速度のステレオ投影図を画面表示する。エッチングプロファイルの解析結果は IGES, AVS 形式での出力機能を備える。これにより、エッチングで製作したデバイス形状を、更に力学的な構造解析計算に入力して、マイクロマシンデバイスの機能シミュレーションを行うことが容易になる。

図4において左上がシステムのメインコントロール画面、左下がエッチング速度のステレオ投影図、右上

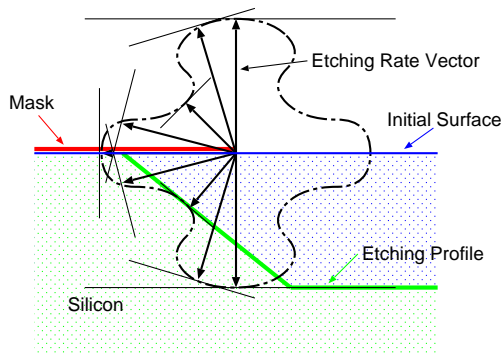


図5 Wulff-Jaccodine 法
Fig.5 Wulff-Jaccodine's method.

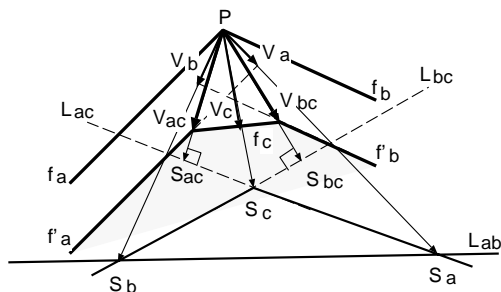


図6 Frankの作図法
Fig.6 Frank's construction.

がエッチング条件及びマスクレイアウト等の加工条件入力画面，右下がエッチングプロファイルの形状図である。

3.2 3次元エッチングプロファイルの計算方法

3次元エッチングプロファイルの計算方法にはWulffの定理を応用する。Wulffの定理は、熱力学的に安定な結晶形状は、体積が一定であれば、結晶形状の全表面エネルギーを最小とするような形として定まるとしている。Wulffの定理をもとに結晶形状を決める手法の一つにWulff-Jaccodine法[13]がある。図5にWulff-Jaccodine法の概要を示す。Wulff-Jaccodine法によれば、任意方向の結晶面の表面エネルギー密度を、そのミラー指数の関数であるエッチング速度としてデータベースから得ることで、結晶の平衡形を決めることができる。例えば、凸頂点ではエッチング速度の速い面、凹頂点ではエッチング速度の遅い面が現れることになる。また、現れる面の範囲は頂点を構成する結晶面の幾何学的な条件に依存する。MICROCADでは、エッチングプロフィ

ルの計算に、Wulff-Jaccodine法を幾何学的に応用したFrankの作図法[14]を利用する。

Frankの作図法の概要を図6に示す。この例では初期の結晶表面は頂点Pで交差する2平面 f_a, f_b からなる凸形状である。2平面の移動速度をそれぞれ V_a, V_b としたとき、 V_a, V_b の大きさの逆数を絶対値として、向きが同じベクトルを S_a, S_b と定義する。それらは図6のように描くことができる。ここで頂点Pには f_a から f_b に至る無数の表面が現れているはずであり、これらについても S_a, S_b と同様にベクトル S を考慮する必要がある。それらのベクトルの向きは S_a と S_b の間に存在する。それらすべての方位に対して、エッチング速度の逆数を長さにもつベクトル S を頂点Pから描いてみる。それらのベクトルの先端がすべて、 S_a と S_b を結んだ直線 L_{ab} に関して、頂点Pの反対側に達するのならば、2平面 f_a, f_b がそれぞれ進行しただけの2平面 f'_a, f'_b になる。しかし、図6のように例えば直線 L_{ab} に達しないベクトル S_c が存在する場合、これに対応する新たな結晶面 f_c が出現する。すなわちエッチング後の表面 f'_a, f'_c, f'_b の3平面から構成されるようになる。このような解析を進めて行く上では、結晶表面を形成する面の頂点の軌跡ベクトルを求めておくことが望ましい。この目的で、Frankの作図法では以下の手順で頂点を求める。ベクトル S_a と S_c の先端、 S_b と S_c の先端をそれぞれ通過する直線 L_{ac}, L_{bc} を引く。頂点Pから直線 L_{ac}, L_{bc} に下ろした垂線がそれぞれ f'_a, f'_b と交わる点が新たな頂点になる。こうして、頂点Pの軌跡ベクトルを求めることができる。

3.3 本システムの特徴機能

本システムは以下に挙げる機能的な特徴をもち、3次元エッチングプロファイルを解析する上で優れた能力を発揮する。

- (1) 全結晶方位のエッチング速度データを用いて解析を行うため、任意の面方位をもつウェーハ面に任意形状のマスクを設定することができる。
- (2) 解析結果として3次元CADのデータ形式であるIGES形式による出力が可能である。そのため、構造解析や熱伝導解析などの汎用ツールと形状データの交換が可能である。
- (3) 半導体関連のマスクレイアウトの記述に広く用いられるGDS-II形式でマスクレイアウトの入出力を行うため、他のマスクレイアウトCADとのデータの交換が可能である。
- (4) ウェーハをエッチングで貫通してなおエッチン

グが進行するような高度に3次元的な計算を行うことが可能であり、幅広い加工プロセス設計に対応できる。例えば、ウェーハの上面と下面にそれぞれマスクを設定して、両面からエッチングを施し、ウェーハを貫通させるような加工の解析ができる。

(5) ウェーハ材料とエッチング液の組合せで決まるエッチング速度のデータを自由に設定して入力できるから、KOH、TMAH系に限らず、異方性の強いエッチングから等方性エッチングまで対応できる。

(6) ウェーハの初期形状としては直方体に限らず、既に前工程で加工が施された形状、あるいは汎用のソリッドモデルで作成しIGES形式で出力された任意の3次元形状を初期形状として解析することができる。したがって、例えばマスクレイアウトやエッチング条件を変えて2段階にエッチング加工するプロセスに対応が可能である。

(7) 断面図、ワイヤフレーム図、エッチング速度ステレオ投影図等の多彩な表示方法による出力により、解析結果の検討を支援する。

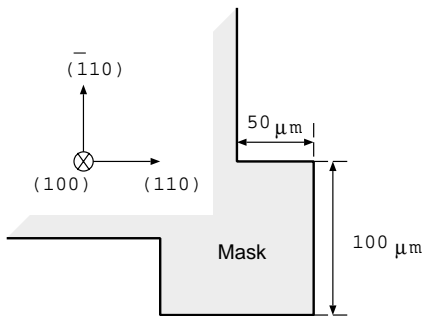


図7 補償パターンマスク
Fig.7 Mask layout of corner compensation.

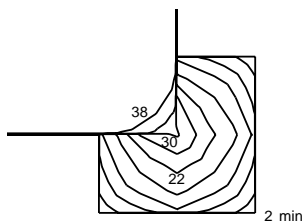
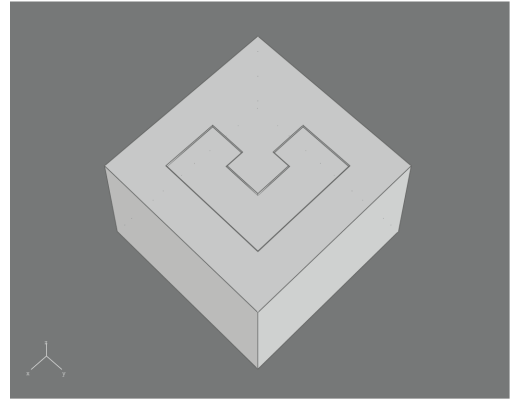
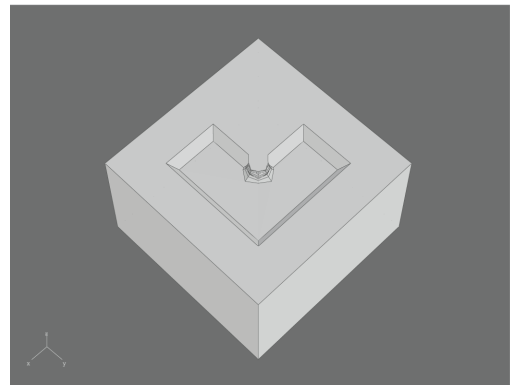


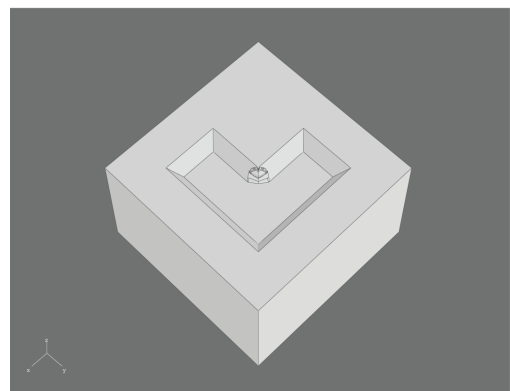
図8 補償パターン部分の時刻変化
Fig.8 Time increments of the corner compensation results.



(a)



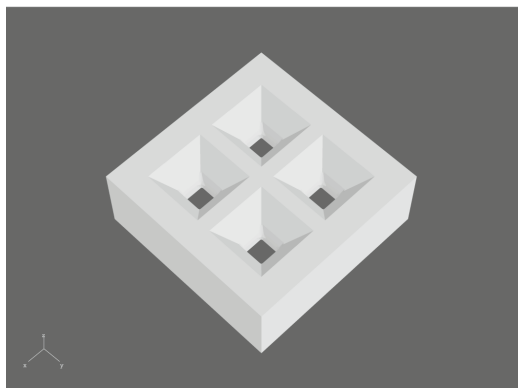
(b)



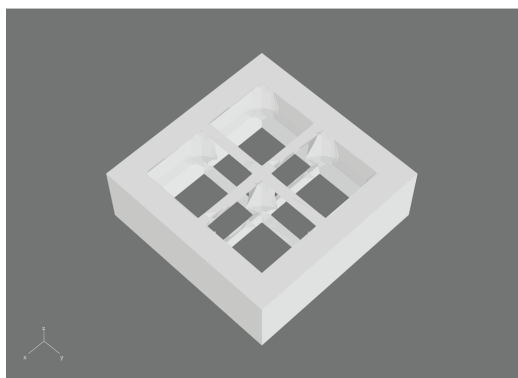
(c)

図9 補償パターン付近の3次元プロファイルの変化
(a)2分後、(b)22分後、(c)30分後

Fig.9 3D etching profiles near corner-compensation mask pattern. (a)after 2 min. (b)after 22 min. (c)after 30 min.



(a)



(b)

図10 ウェーハを貫通するエッチングプロセスの3次元プロフィール (a)180分後, (b)240分後

Fig.10 3D etching profiles penetrating wafer-thickness and lateral walls. (a)after 180 min. (b) after 240 min.

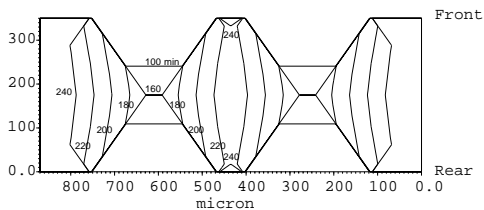


図 11 ウェーハを貫通するエッチングプロセスの断面図
Fig.11 Cross sections of penetrating etching process.

4. 解析結果の評価

開発したシステムを結晶異方性エッチングプロセス設計に応用する事例として, (1)マスクコーナ部分のアンダカット補償パターンの効果の解析, (2)ウェーハを貫通するエッチングプロセスの解析, (3)多段階エッチングプロセスによる曲面形成プロセスの解析, の三つを挙げ, 以下にそれぞれの解析例を示す.

4.1 マスクコーナ部分の補償パターン設計

方形マスクパターンのコーナ部分に, アンダカットを防ぐ目的で補償マスクパターンを設けたときのエッチングプロフィールを解析した. 解析例では, (100)ウェーハシリコン表面において(110)方向と平行な辺をもつ方形のマスクパターンがあって, この一つのコーナに補償パターンを形成する. 図7に方形の右下コーナ部分の拡大図を示す. 図のように, (110)方向と平行な4辺をもつ1辺が100 μ mの正方形補償パターンを方形マスクのコーナに設けた. 正方形補償パターンの中心はマスクコーナと一致させて配置した. エッチング液は30%KOH水溶液, 温度は80とした.

図8に注目するマスクコーナ部分のアンダカットの時間的变化を示す. 出力したエッチング時間は2分から38分までである. 図から, 補償パターンの周囲がエッチングされて消滅するまでの約30分間にわたって, 方形マスクのコーナ部分でアンダカットが抑制されていることがわかる. 方形マスクコーナ部分の3次元エッチングプロフィールの解析結果を図9(a)から(c)に示す.

本システムを適用すれば, 補償マスクパターン寸法の最適化を, 方形マスクコーナ部分のエッチングプロフィールを吟味しながら実行することができる.

4.2 ウェーハを貫通するエッチングプロセス

厚さが350 μ mの単結晶シリコンの(100)ウェーハの両面にマスクパターンを形成し, 両面からエッチングを実行してウェーハ厚さの中央部でエッチング面を貫通させ, 更にエッチングを進める場合の解析を行った. マスクの開口部は(110)方向と平行な4辺をもつ1辺が280 μ mの正方形で, 隣接する開口部の間隔は70 μ mである. エッチング液は40%KOH水溶液, 温度は78とした.

エッチング開始から180分後, 240分後の3次元プロフィールをそれぞれ図10(a), (b)に示した. ウェーハ表裏から進行したエッチング面がウェーハ厚さの中央で貫通した後に側方に進行方向を変え, 隣接する孔がウェーハ内部で連結するまでエッチングが進む. この

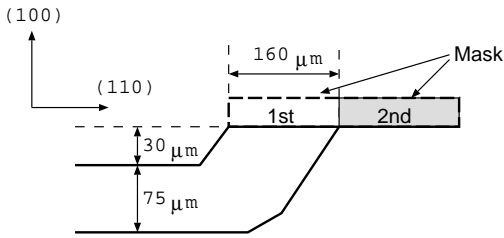


図 12 2段階エッチングによる曲面形成プロセス
Fig.12 Two-steps etching process generating a round profile.

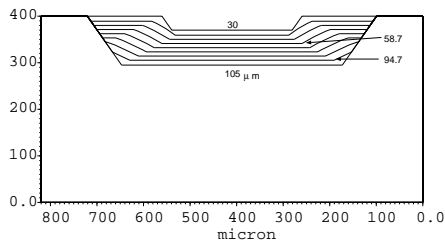


図 13 2段階エッチングプロセスにおける断面プロフィールの変化
Fig.13 Cross sections of the two-steps etching process.

間の断面形状変化を詳しく出力したのが図 11 である。図は、隣接するマスク開口の中心を通るウェーハ断面形状の時間的変化を示したものである。両表面から進むエッチング面がウェーハを貫通後、孔の側面にはエッチング速度の極めて大きい(110)付近の結晶方位が現れる。この面が側方に貫通孔径を拡大し、初期に存在した(111)面を侵食する。隣接する孔が連結する時点で初期の(111)面は消失するが、ウェーハ表面のマスクの下部には新たに逆の傾きをもつ(111)面が形成されてマスクの崩落を防いでいる。この解析結果は、筆者らの1人が既に発表した一連の顕微鏡写真による実験結果 [3] と極めてよく一致する。

このように本システムは、複数のエッチング面がウェーハを貫通し、更に新たな方向にエッチングが進む現象を連続的に解析できるので、複雑な構造体の加工プロセス設計に適用すると効果がある。

4.3 多段階エッチングプロセス

マスクレイアウトを変えて、複数回のエッチングを実施すると、単一エッチング工程では得られないような、曲面を含む複雑なエッチング形状が実現する。ここでは、2段階エッチングで曲面を形成する工程について、解析による工程パラメータ決定の例を述べる。

単結晶シリコンの(100)ウェーハに、(110)方向と平行な4辺をもつ方形の開口をもつマスクを形成してエッチングすると(111)を斜面とする凹部が形成されることはよく知られている。しかし、その斜面と底面は多面体を形成し、鋭い応力集中が発生する。これを防ぐためにこの部分に曲面を形成することは、以下に述べる2工程のエッチングを逐次行うことで実現する。エッチング条件は第1,第2工程とも40% KOH水溶液、温度は70で行う。図12に示すように、第1工程で方形開口をもつマスクで深さ30 μm のエッチングを行うと、鋭い断面形状をもつエッチングプロファイルが生じる。次に第2工程では、第1工程のマスク開口の各辺を160 μm 後方にシフトした新たなマスクでエッチングを実施する。第2工程におけるエッチング深さが75 μm に達すると凹部と斜面の接続部に曲面が形成される。

上記第2工程におけるエッチングプロファイルの断面図を時間を追って出力したのが図13である。第1工程で形成された階段状のプロファイルが後退していく過程で斜面と底面の接続部に曲面が形成されることがわかる。しかし、更にエッチングを進めるとこの曲面は消失し、再び鋭いエッチングプロファイルが現れる。

以上の例に示すように、最終形状として曲面を形成したい場合に、工程設計のパラメータである第1工程、第2工程のマスク寸法並びにそれぞれのエッチング深さをシミュレーション結果から判断して決定すれば、工程設計を行うことができる。

5. む す び

シリコン単結晶の結晶異方性エッチングプロセスで、複雑な3次元エッチング形状を予測する解析システム MICROCADを開発した。このシステムは、独自に開発した全結晶方位のエッチング速度データベースに基づいて、任意のウェーハ面方位、マスクレイアウトに対して、エッチングプロファイルの時間的変化を予測するものである。アンダカットを補償するマスクの設計、ウェーハを貫通してなおエッチングを進めるような加工、曲面をもつ高度な3次元形状を製作するための多段階エッチング加工、などの設計に適用することで特に効果が期待される。

なお、エッチング速度の測定評価の研究の一部は、文部省科学研究費補助金(B)08455045の援助を受けた。また(株)住友シチックスにはシリコンインゴットを提供していただいた。それぞれの御援助をここに記して感謝する。

文 献

[1] 佐藤一雄, “エッチングによる微細な3次元構造体の加工,” 精密工学会誌, 61-10, pp. 1373-1376, Oct. 1995.

[2] A. Koide, K. Sato, and S. Tanaka, “Simulation of two dimensional etch profile of silicon during orientation-dependent anisotropic etching,” Proc. IEEE MEMS-91, Nara, pp. 216-220, Jan. 1991.

[3] K. Sato, A. Koide, and S. Tanaka, “Anisotropic etching simulation system as a design tool for fabricating 3-D microstructures in single crystal silicon,” Proc. of the 1st IFToMM Int. Symp. of micromechanism, Tokyo, pp. 155-160, 1993.

[4] R. A. Buser and N. F. de Rooij, “CAD for silicon anisotropic etching,” Proc. IEEE MEMS-90, Napa Valley, pp. 111-112, Jan. 1990.

[5] C. H. Sequin, “Computer simulation of anisotropic crystal etching,” Tech. Dig. of TRANSDUCERS-91, San-Francisco, pp. 801-806, June 1991.

[6] O. Than and S. Büttgenbach, “Simulation of anisotropic chemical etching of crystalline silicon using a cellular automata model,” Sensors and Actuators, A-45, pp. 885-889, 1994.

[7] K. Asaumi, Y. Iriye, and K. Sato, “Anisotropic-Etching simulation system MICROCAD analyzing complete 3D etching profiles of single crystal silicon,” Proc. IEEE MEMS-97, Nagoya, pp. 412-417, Jan. 1997.

[8] J. Frühauf and D. Zielke, “3-dimensional simulation of the orientation dependent etching,” Tech. Dig. of Micro System Technologies 96, Potsdam, pp. 747-749, Sept. 1996.

[9] A. Koide and S. Tanaka, “Simulation of three-dimensional etch profile of silicon during orientation dependent anisotropic etching,” Proc. IEEE MEMS-97, Nagoya, pp. 418-423, Jan. 1997.

[10] 小出 晃, 佐藤一雄, 田中伸司, 加藤重雄, “単結晶シリコンの異方性エッチングにおけるエッチレート分布の温度依存性,” 精密工学会誌, 61-4, pp. 547-551, 1995.

[11] K. Sato, M. Shikida, Y. Matsushima, T. Yamashiro, K. Asaumi, Y. Iriye, and M. Yamamoto, “Characterization of orientation dependent etching properties of single crystal silicon: Effects of KOH concentration,” Sensors and Actuators, A64-1, pp. 87-93, 1998.

[12] K. Sato, M. Shikida, T. Yamashiro, K. Asaumi, Y. Iriye, and M. Yamamoto, “Anisotropic etching rates of single crystal silicon for TMAH water solution as a function of crystallographic orientation,” Proc. IEEE MEMS-98, Heidelberg, pp. 556-561, Jan. 1998.

[13] R. J. Jaccodine, “Use of modified free energy theorems to predict equilibrium growing and etching shapes,” J. Appl. Phys., vol. 33, no. pp. 2643-2647, Aug. 1962.

[14] F. C. Frank and M. B. Ives, “Orientation - dependent dissolution of germanium,” J. Appl. Phys., vol. 31, no. pp. 1996-1999, Nov. 1960.

[15] H. Seidel, “The mechanism of anisotropic silicon etching and its relevance for micromachining,” Tech. Dig. of Micro System Technologies 87, pp. 120-125, Tokyo, 1996.

[16] D. H. Shaw, “Morphology analysis in localized crystal growth and dissolution,” J. Crystal Growth, vol.47, pp. 509-517,

1979.

[17] B. Puers and W. Sansen, “Compensation structures for convex corner micromachining in silicon,” Sensors and Actuators, A-21-A23, pp. 1036-1041, 1990.

[18] D. B. Lee, “Anisotropic etching of silicon,” J. Appl. Phys., vol. 40-11, pp. 4569-4574, Oct. 1969.

(平成10年8月19日受付 12月14日再受付)



佐藤 一雄

昭45横国大・工・機械卒 (株)日立製作所入社。平6同社を退社,名古屋大学工学研究科マイクロシステム工学専攻教授,現在に至る。主な研究内容:(1)シリコンの結晶異方性エッチングの研究,(2)マイクロマシンデバイス・システムの開発,(3)マイクロ材料の機械的特性評価の研究。日本機械学会,精密工学会,電気学会,米国家電気電子学会(IEEE)等各会員。工博。



浅海 和雄

平3早大・理工・材料卒。同年(株)富士総合研究所入社。以来,数値解析シミュレーション技術の研究開発に従事。電気学会会員。



小林 元

平6早大・理工・機械卒。平9東大大学院修士課程了。同年(株)富士総合研究所入社,現在,解析技術第1部で数値解析の研究開発業務に従事。日本機械学会会員。



入江 康郎

昭57中大・理工・土木卒。昭59同大大学院修士課程了。同年(株)芙蓉情報センター(現(株)富士総合研究所)入社。以来,数値解析の研究開発に従事。応用物理学会,応用磁気学会,応用数理学会各会員。



式田 光宏

平2成蹊大学院修士課程了(株)日立製作所入社,平7同社を退社,名古屋大学工学研究科マイクロシステム工学専攻助手。主としてマイクロアクチュエータとそれを利用したマイクロシステムに関する研究に従事。工博。