単結晶ダイヤモンドドリルを用いた 単結晶シリコンの高品位穴加工*

横 溝 精 一** 窪 田 真一郎** 宇 野 義 幸***

High Performance Drilling of Monocrystalline Silicon Using Monocrystalline Diamond Drill

Seiichi YOKOMIZO, Shinichirou KUBOTA and Yoshiyuki UNO

Monocrystalline silicon is the most important material for semiconductor industry, and is also widely used as a component material of the semiconductor manufacturing equipment which needs the precision machining. However the high performance machining technology without micro cracks for brittle materials has not yet been established. Especially the high aspect ratio drilling less than 1 mm in diameter is very difficult. Therefore, the new drilling method of monocrystalline silicon was introduced in this paper. The experimental analysis made it clear that the mirror finished surface without micro cracks was obtained by using the monocrystalline diamond drill, while many micro cracks were generated in the case of sintered diamond drill. Furthermore, the removal rate and the tool life were enough for high performance drilling.

Key words: monocrystalline silicon, monocrystalline diamond drill, drilling, micro crack, reactive ion etching, brittle material

1. 結 言

単結晶シリコンは半導体産業の基盤材料として、欠かすことのできない材料であり、これから作られる各種デバイスの生産量は非常に大きな成長を遂げている。これはまたデバイス材料として使われる一方で、その製造工程で不純物混入を避ける必要から、半導体製造装置の部品としても多く使われている。その代表例がプラズマエッチング装置の電極である。この電極には厚さ約 5mm の単結晶シリコンの円板に、エッチャントガスを通すために直径 0.5mm 程度の微細穴が多数必要であり、しかもアスペクト比が高いので、一般にはダイヤモンドドリルによる穴加工が行われる。しかし硬脆材料である単結晶シリコンは加工部においてマイクロクラックが生じ易く、これは欠陥となって使用中にウェハ上に破片が落下して製品の歩留まりを悪化させるために、硬脆材料の高品位穴加工技術の確立が重要な課題となっている。このため、硬脆材料への微細穴加工について工具の改良^{1)~3)}、放電加工⁴⁾、レーザ加工⁵⁾、振動加工^{6)~8)}などの加工法の検討が行われている。しかしながら、高品位、高能率、経済性などの多面的な観点から更なる検討が望まれている現状にある。

現在、単結晶シリコンの穴加工用の工具としては一般的に電着・焼結・コーティングによるダイヤモンドドリルが使用されている。しかし、切りくずを生成する個々のダイヤモンド砥粒に着目すると大きな負のすくい角を持つため、良好な切削作用は期待できずマイクロクラックが生じない穴加工は困難であると考えられる。それに対し、単結晶ダイヤモンドをドリルに用い、更に集束イオンビーム (Focused Ion Beam: 以下、FIB と略す) 装置などで切れ刃を成形すれば、鋭利な切れ刃と同時にすくい角の改善が可能であり、高品位穴加工が可能となると思われる。そこで硬脆材料である単結晶シリコンの微細穴加工の高品位化を目的とした単結晶ダイヤモンド

ドリルを試作し、その加工性能について検討した。

2. 加工欠陥の検出

2.1 マイクロクラックの検出方法

硬脆材料の穴加工の高品位化ならびに品質管理を行っていくには、加工で生じたマイクロクラックを的確に検出し、加工技術にフィードバックしていく必要がある。従来、マイクロクラックの検出には腐食液を用いたウェットエッチングが行われていた。しかし、エッチング作用が等方的であるため、微小なクラック部は明瞭には観察できない。また、目的以外の部分も同時に腐食されるため、製品の機能を低下させる可能性がある。そこで、筆者らはウェットプロセスよりもエッチング条件の制御が容易で、異方性エッチング特性によってマイクロクラックを明瞭に検出できる反応性イオンエッチングを利用する検出法を提案した⁹⁾。本検出法で用いる反応性イオンエッチング (Reactive Ion Etching, 以下 RIE と略す) 装置は、チャンバーに導入したガスに高周波電力 (周波数 13.56MHz が一般的) を印加してプラズマ状態とし、そこで生じたプラスイオンを加速して対象物に衝突させる物理的作用と反応性ガスによる化学的作用を利用する物理的・化学的エッチングであり、条件の選定によってそれぞれの特性を強調した処理が可能である。すなわち RIE ではガスの圧力を数 Pa 以下にするとイオンの運動方向が揃うため、対象物を垂直方向に除去できる異方性エッチングが可能となる。この性質は半導体の微細加工にも利用され、デバイスの製造過程では不可欠な方法となっている。腐食液によるウェットプロセスが等方性エッチングであるのに対して、RIE の異方性エッチングは微小なクラックでも明瞭に顕在化させることができる。

2.2 マイクロクラックの検出例

単結晶シリコンへの穴加工の評価のため、次のようにして観察面を作製し RIE によるクラックの検出を行う。まず直径 0.5mm の焼結ダイヤモンドドリルで穴加工を行った単結晶シリコンを切断砥石によって分割後、粒径 6 μ m, 1 μ m ダイヤモンド砥粒による研磨によって鏡面にした。

* 原稿受付 平成 17 年 6 月 24 日

** 正 会 員 岡山県工業技術センター (岡山市芳賀 5301)

*** 正 会 員 岡山大学大学院自然科学研究科 (岡山市津島中 3-1-1)

Fig. 1 Longitudinal section of the hole using sintered diamond drill

Table 1 RIE conditions

RF power	200 w
Pressure	13.3 Pa
Gas	CF ₄
Gas flow rate	20 sccm
Etching time	10 min.

Fig. 2 Sintered diamond drill

図1は穴の縦断面を研磨後、RIE装置により、表1の条件でエッチングを行った場合の穴近傍の光学顕微鏡写真である。図から明らかなように、穴近傍に多数のマクロクラックが検出される。検出されたクラックはドリルの進行方向に対して斜め前に向かって進展している。さらに穴加工の初期、すなわち穴の入口付近ではクラックの発生はほとんど見られないが、出口に近づくにつれて発生が顕著となっていることも分かる。また、次の穴についても図1と同様に、クラックは入口では発生せず、出口で多数発生している。このことから、単結晶シリコンのダイヤモンドドリルによる穴加工においても、切りくずの処理が穴の品位に大きく影響していることが分かる。

3. 焼結ダイヤモンドドリルによる微細穴加工

3.1 焼結ダイヤモンドドリル

単結晶シリコンへの穴加工は一般に焼結ダイヤモンドドリルを用いて行われているが、多くの問題点がある。ドリルの問題点としては、ドリル溝部へ切りくずが固着し、切りくずの排出ができなくなったり、先端部のコーナで生じる大きな摩耗があげられる。これらが加工面のマクロクラックや穴出口部に発生する欠けとして穴の加工品質に悪影響を与えている。そのためCVDダイヤモンドドリル、ドリル形状の改良、加工条件の改善等について研究がなされている²³⁾。

本実験で使用した焼結ダイヤモンドドリルを図2に、その先端部のSEM写真を図3に示す。図3(b)は先端部の拡大図であり、粒径が約3μmのダイヤモンドで形成されていることが分かる。個々のダイヤモンドは結晶に由来する切れ刃が数多く観察される。図3(a)は先端部全体を観察するため倍率を下

Fig. 3 SEM photographs of sintered diamond drill

Table 2 Drilling conditions for sintered diamond drill

Tool	Sintered diamond drill	
Drill diameter	D	0.5 mm
Point angle	α	135°
Helix angle	β	35°
Revolution	N	15000 min ⁻¹
Feed per revolution	f	0.5 μm/rev.
Depth of step feed		0.15 mm
Coolant		solution type

げた写真である。これから分かるように表面はダイヤモンド層で覆われ、耐摩耗性は向上しているものと推測できる。しかしながらマクロの切れ刃形状を形成する稜線は非常に鈍く、大きな切削抵抗が発生するものと思われる。また、表面の微小な凹凸は切りくずの排出を困難にさせるものと考えられる。表2の加工条件で単結晶シリコンに1ステップ量ずつ切り込みを与える方法で穴加工を行った。ステップ量は0.15mmとし、ステップ毎にドリル先端部が加工物表面から1mm程度離れるまで上昇させて切りくずの排出を図った。

3.2 加工穴の評価

穴加工を行った単結晶シリコンを切断砥石で分割後、粒径6μm、1μmのダイヤモンド砥粒を用いて研磨仕上げをした試料に対し、RIE装置を用いて表3の条件でエッチングを行った。ここで行った条件は表1よりRF出力を高く、処理時間も長くしているのでエッチング量は増大し、確実にクラックが検出できるように設定されている。また、ガス圧力は6.7Paと低くすることにより、エッチングによってクラックの形状が大きく変化せず、元のクラック形状を保って検出することができる異方性エッチングの性質が顕著な条件とした¹⁰⁾。

RIE装置を用いてエッチングした穴縦断面の写真を図4に示す。図4(a)から分かるように穴入り口から1.3mm程度は光沢のある加工面となり、クラックも観察されていない。しかし、これより穴出口に向かっては0.15mmの間隔で周期的に荒れた加工面となり縞模様を呈した。その縞を拡大したものを図4(b)に示す。この写真から明らかなように縞状の荒れた加工面の下には大きなマクロクラックがドリル進行方向に対し、

Table 3 RIE conditions for drilled hole

RF power	250 w
Pressure	6.7 Pa
Gas	CF ₄
Gas flow rate	20 sccm
Etching time	20 min.

Fig. 4 Longitudinal section of the hole by sintered diamond drill

斜め前方に発生しているのが分かる。また図 4(c) の写真からも分かるように縞状の加工面の荒れはマイクロクラックの起点となっている。この傾向は穴出口に向かって顕著となっており、この様子は基本的に図 1 と同様である。また、この周期的な縞はステップ量と一致しており、ドリルがステップバックする際、ダイヤモンド切れ刃が切りくずを巻き込むために発生していると考えられる。このため焼結ダイヤモンドドリルを用いた単結晶シリコンの穴加工においても、切りくず処理が重要な要件である。焼結ダイヤモンドドリルで穴加工を行っていくとドリル溝部に切りくずが固着し、ステップバックを行っても完全な切りくず除去が行えず、極端な場合には図 5 に示すように溝部が切りくずによって完全に埋まった状態となる。このため切りくずが固着しない溝部の表面処理あるいは切りくずが凝集しない切削油剤の開発が望まれる。

Fig. 5 Sintered diamond drill filled up by chips

4. 単結晶ダイヤモンドドリルによる微細穴加工

4.1 単結晶ダイヤモンドドリルの試作

高品位微細穴加工の要請に対し、マイクロクラックの発生は大きな問題であり、その問題の解決には鋭利な切れ刃で良好な切削状態を実現する必要があると考えられる。そこで単結晶ダイヤモンドに研磨加工を施すことにより、鋭利な切れ刃を持つドリル先端部を作製した。その仕様を表 4 に、模式図を図 6 に示す。対稜角 90° 、(111) 面で構成される先端部があり、焼結ダイヤモンドドリルのように鈍い切れ刃ではなく、鋭い切れ刃とした。この鋭利な稜線は良好な切削作用を発揮するものと思われる。また、その下部に正方形の断面を持つス

Table 4 Specification of monocrystalline diamond drill

Tool	Monocrystalline diamond drill			
Type	A-0	A-1	B-0	B-1
Drill diameter D	0.5 mm			
Point angle α	90°			
Skirt length l_s	65 μm		500 μm	
Wedge angle β	130°		90°	
Machining by FIB				
round off	--	✓	--	✓
face	--	✓	--	✓

Fig. 6 Schema of machined monocrystalline diamond drill

Fig. 7 Shaping of the cutting edge of skirt part in type A drill (top view)

カート長さ l_s の角柱状部分を形成し、この部分にはリーマ工具のように壁面を切削仕上げする機能を発揮することを期待した。スカート長さ l_s はタイプ A では 65 μm と短く、タイプ B では 500 μm と長くし、穴壁面の仕上がりへの影響を調査することにした。このダイヤモンド先端部は超硬合金のシャンクにろう付され、対角線長さ 0.5mm の単結晶ダイヤモンドドリルを作製した。

タイプ A はスカート長さ l_s を 65 μm と短くしているため、工具寿命が短いことが考えられる。またスカート部の刃物角 β は 90° であり、点对称であるのですくい角は -45° と見なすことができる。このスカート部を図 7 のように研磨し刃物角 β を 130° に加工した。この場合スカート部は大きな負のすくい角となるが、長寿命になることが考えられる。なお、タイプ B のスカート部の刃物角 β については 90° のままとした。

焼結ダイヤモンドドリルの場合、穴加工を行っていくとドリルの外周コーナは丸く摩耗してくる。この外周コーナにはドリル前方と穴壁面の双方から大きな力が作用している。そして、これはまた加工反力として同時に被削材に対しても作用する。これらはドリルの外周コーナの摩耗、壁面のマイクロクラックや穴出口の欠けの原因となっている。これらの改善のため、あらかじめその外周コーナに丸みをつけたドリルでは、これらが減少することが経験上知られている。これらの観点から切れ刃となる先端部とスカート部の稜線が交わる角部を FIB 装置により丸めることにした。図 8 は FIB で除去加工した外周コーナの丸め成形状態の SEM 写真である。写真からも明らかなような図 8(a) の FIB 加工前の外周コーナは非常に鋭い稜線で形成されている。この稜線が交わる外周コーナを FIB で丸めたものが図 8(b) である。その除去形状は図に示すように外周コーナから所定の長さ離れた点を結ぶ線に垂

Fig. 8 Shaping for rounding off outer corner

Fig. 9 Machining of cutting face to the skirt part

線を下ろし、その2等分した量を除去して丸みを付けた。図8(b)のタイプBはその丸み部分を正面から見たものである。

スカート部における切れ刃のすくい角はタイプAでは -65° 、タイプBでは -45° の負の値となっている。そこですくい面にFIBを用いて凹部を形成することにより、すくい角をできるだけ小さくすることを試みた。図9はFIBで加工したスカート部のSEM写真である。図9(a)から分かるように長さ $50\mu\text{m}$ の凹部が $15\mu\text{m}$ の間を開けて形成されている。図9(b)はその凹部の拡大写真である。凹部は二段階で成形されており、スカート部の平面を基準にして、最初幅 $2.3\mu\text{m}$ 、長さ $50\mu\text{m}$ で最も深い箇所が $1.7\mu\text{m}$ となるような斜面を形成し、続いて幅 $9.2\mu\text{m}$ 、長さ $50\mu\text{m}$ で最も深い箇所が $2.7\mu\text{m}$ の斜面を形成した。

このようにして、表4に示すような4種類の仕様の単結晶ダイヤモンドドリルを作製した。

4.2 単結晶ダイヤモンドドリルによる加工穴

被削材には厚さ 5mm の単結晶シリコンを用いて、結晶方位(100)の面に対して垂直方向に穴加工を行った。なお、穴出口側にはバックアップのための板材は使用せず、表5の加工条件で穴加工を行った。また、加工された穴は3.2節で行った方法と同様に切断砥石で切断後、研磨し、表3の条件(微細なマイクロクラックも検出できる条件)でRIE装置によるエッチングを行った。

タイプAのドリルを用いて加工を行った穴の縦断面を図10

に示す。焼結ダイヤモンドドリルの場合には、穴出口に近づくにつれて加工面下には大きなクラックが発生していたが、単結晶ダイヤモンドドリルの場合はFIBによる加工の有無に関わらず大きなクラックは全く発生していないことが分かる。しかし、A-0、A-1の両者とも左側に示す全断面にわたって光沢は見られない。クラックの発生しやすい穴出口付近を拡大した右側のSEM写真を見ると、光沢がないのは加工面に生じた波状の凹凸によるものであることが分かる。Aタイプの場合、スカート長さは $65\mu\text{m}$ と短いことに加え、先端の切れ刃だけが穴壁面に接しているため、 10000 min^{-1} と高速で回転させるとびり振動が発生し、波状の加工面になったと考えられる。クラックについて観察すると、FIB加工を行っていないA-0は、壁面に多くのチッピング状クラックが存在することが分かる。FIB加工を行ったA-1では一部平滑な部分も観察され、クラックも減少していることから、若干のすくい角の効果が認められた。しかし、すくい角の改善を行っても完全に平滑な壁面を得るには至らず、びり振動の問題も改善されていない。加えて大きな課題は加工能率の低さにあった。表5の送り量 $0.04\mu\text{m/rev.}$ は加工結果から見てこれ以上に大きくすることができず、ステップ量も 0.005mm より増大させることができなかった値であり、Aタイプのものは実用域の加工能率に到達するのは困難であると思われる。これはスカート部の刃物角を 130° にしたことで、切りくずの排出が困難になったことが原因しているのではないかと考えられる。

図11はBタイプのドリルを用いて加工した穴の縦断面を示す。この場合にはAタイプで見られた欠点は全く観察されない。すなわちB-0、B-1ともに穴入り口から出口まで全域に

Table 5 Drilling conditions for monocrystalline diamond drill

Type	A-0	A-1	B-0	B-1
Revolution N	10000 min ⁻¹			
Feed per revolution f	0.04 μm/rev.		1 μm/rev.	
Depth of step feed	0.005 mm		0.05 mm	
Coolant	solution type

Fig. 10 Longitudinal section of the hole with type A drill

Fig. 11 Longitudinal section of the hole with type B drill

わたって良好な切削作用によると考えられる光沢面が得られ、右側の拡大したSEM写真からも分かるように、微細なマイクロクラックが検出できるエッチング条件においても、加工面にクラックは全く認められない。エッチングされた表面は研磨後の表面と同等であり、無欠陥の単結晶シリコンをエッチングしたのと同じ状態であった。このように高品位の加工面が得られたのはスカート長さが $500\mu\text{m}$ とAタイプの7.7倍の長さがあり、びびり振動が抑えられたこととドリルの外周コーナ付近では生じていた切り残しが、スカート下部に向かって漸次少なくなり、微小切り込みによる延性モード切削となったためと考えられる。さらにBタイプのスカート断面は正方形であるため、Aタイプより切りくずの排出において有利であったことが高品位加工に繋がったと思われる。以上の結果から考察すると、FIBによる付加加工よりスカート長さを長くすることの方が支配的であり、Bタイプのドリルを用いることで高品位微細穴加工が実現することが判明した。この場合の送り量は $1\mu\text{m}/\text{rev}$ ですでに実用域にあるが、ステップ量 0.05mm をさらに増大させることにより経済性も満足した高品位微細穴加工が実現するものと思われる。Bタイプでの穴加工における出口の光学顕微鏡写真を示したのが図12である。バックアップのための板材を用いていないにもかかわらず大きな欠けは発生していない。特にFIB加工を施さなかったB-0では1番目と300番目の穴の出口品質は全く同等であり、この場合にはダイヤモンドの寿命も問題ないように思われる。一方、FIB加工を行ったB-1では焼結ダイヤモンドドリルの経験からの予想に反し、300番目の加工穴は若干形状精度が低下している。これはFIB加工後のダイヤモンド切れ刃が寿命の観点からは問題があったためと思われる。

以上の実験結果より、B-0タイプのように成形した単結晶ダイヤモンドドリルを用いれば、工具寿命、加工能率の点でも実用的な単結晶シリコンへの高品位微細穴加工が可能となることが明らかとなった。

Fig. 12 Hole exit by the type B drill

5. 結 論

単結晶シリコンに対する高品位微細穴加工を目的に、単結晶ダイヤモンドドリルの適用性について実験的検討を行った。本研究によって得られた主な結論は以下のようである。

- (1) 焼結ダイヤモンドドリルを用いてステップ送りで穴加工すると、ステップ量の間隔で加工面粗さが悪化したり、マイクロクラックが生じやすい。
- (2) 鋭利な稜線を持つ単結晶ダイヤモンドドリルを用いるとマイクロクラックのない加工が可能である。
- (3) ドリル軸方向に長く鋭い単結晶ダイヤモンドの稜線は優れた切れ刃となり、高品位微細穴加工用の優れた工具となる。

参 考 文 献

- 1) 升田雅博, 大山啓, 森義典, 半田伸一, 武知清孝, 小川仁: 小径ダイヤモンド電着工具によるアルミセラミックへの通し穴加工(第1報), 精密工学会誌, **71**, 1(2005)105.
- 2) 亀岡誠司, 増田敬, 早崎浩, 本西英, 内田仁: CVD ダイヤモンドドリルによる単結晶Siの穴あけ加工性能, 精密工学会誌, **68**, 1(2002)142.
- 3) 亀岡誠司, 増田敬, 早崎浩, 本西英, 内田仁: CVD ダイヤモンドドリルの単結晶Si穴あけ加工への適用, 精密工学会誌, **68**, 10(2002)1362.
- 4) 宇野義幸, 窪田真一郎, 横溝精一, 岡田章, 田中英登: 単結晶シリコンの微細穴放電加工に関する研究, 電気加工学会誌, **30**, 65(1996)9.
- 5) 窪田真一郎, 横溝精一, 宇野義幸: エキシマレーザによる単結晶シリコンの加工特性, 1995年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1995)343.
- 6) 田中信一, 高木純一郎, 横沢毅, 長谷川徳慶, 山崎健司: 小径穴超音波加工に関する研究(第1報: 種々の加工条件が加工速さに与える影響), 砥粒加工学会誌, **48**, 6(2004)324.
- 7) 田中信一, 高木純一郎, 横沢毅, 長谷川徳慶: 小径穴超音波加工に関する研究(第2報: 工具小径化が加工速さに与える影響), 砥粒加工学会誌, **49**, 5(2005)245.
- 8) 田中信一, 高木純一郎, 横沢毅, 長谷川徳慶: 小径穴超音波加工に関する研究(第3報: 工具材質の違いが加工特性に与える影響), 砥粒加工学会誌, **49**, 5(2005)250.
- 9) 横溝精一, 窪田真一郎, 宇野義幸: RIEを用いた単結晶シリコン加工面クラックの新しい検出法, 精密工学会誌, **71**, 10(2005)1291.
- 10) Seiichi YOKOMIZO, Shinichirou KUBOTA, Yoshiyuki UNO: A Newly Developed Crack Detecting Method Using Reactive Ion Etching, Proc. of The 7th ICPMT, (2004)664.