ダイヤモンド切削工具を用いた 10nm オーダ深さの微細溝加工*

大 塚 泰 弘**

A Novel Diamond Cutting Method for Producing Fine Grooves with 10-nm Order Depth

Yasuhiro OTSUKA

Micro-fabrication with diamond cutting has been developed for machining optoelectronic components such as a diffraction grating, and MEMS components such as μ -TAS. In these components, highly accurate micromachining of submicron order has been realized. However there has been no report with regard to producing 10-nm order depth grooves by the diamond cutting. This paper describes a novel diamond cutting method which enables producing highly accurate 10-nm order depth grooves. In this method, a mirror finished glass substrate, sputter coated with thin soft metal films is used as a workpiece. The workpiece is pressed by a diamond cutting tool at a constant vertical load, while the diamond cutting tool is being moved. By using the glass substrate as a stopper layer, which is not cut by the diamond cutting tool, grooves with the same depth as the thin soft metal films thickness can be fabricated. It was experimentally confirmed that, with the proposed cutting method, a very highly accurate uniform groove, 1.0 μ m wide and 80nm deep, could be achieved.

Key words: diamond cutting, constant pressure cutting, fine groove, 10-nm order depth, soft metal film

1. 緒 言

単結晶ダイヤモンド工具を用いた超精密切削加工は、サブミクロンオーダの形状精度とナノメートルオーダの表面粗さを同時に実現できる特徴を活かし、光学部品を中心とした鏡面創成加工技術¹⁾²⁾および微細加工技術^{3)~7)}として発展してきた。特に微細加工の領域では、フォトリソグラフィ法やイオンビーム加工法等の半導体製造法では困難な“滑らかな斜面や曲面の加工が可能、溝エッジ部にダレのないシャープエッジ加工が可能、材料選択の自由度が高い”等の特徴を有し、回折格子等のオプトエレクトロニクス部品や μ -TAS 等の MEMS、バイオメディカル分野における微細加工技術として応用展開されてきた。

これらの微細加工では、サブミクロンオーダ深さの高精度な形状加工を実現しており、次なる課題は 10nm オーダ深さの微細加工の実現にある。また現状の微細切削加工では、加工の最小単位(工具切込み量)はミクロンオーダ^{3)~6)}であり、工具送り時の工具刃先の相対的な位置制御によりサブミクロンオーダの形状加工を実現している。このため、鏡面を有する工作物上に、サブミクロンオーダ深さの切込みで直接微細溝を形成することは困難であるという課題があった。なお、ルーリングエンジンによる回折格子の製作⁸⁾では、鋸刃状断面を有する 10nm オーダ深さの高精度な微細溝加工を実現しているが、パニシング加工(塑性加工)による溝形成のため、本研究で対象とするような矩形状の微細溝をバリの発生を抑制して高精度に形成することは困難である。

そこで本研究では、鏡面状工作物に直接 10nm オーダの工具切込み量を与え、10nm オーダ深さの微細溝形成を可能とする、新規の微細溝切削加工法を提案した。本報では、同加工法を用いた 10nm オーダ深さの微細溝加工の実験結果と

もに、同加工方法の加工メカニズムについて検討した結果を報告する。

2. 微細溝切削加工の精度要因

10nm オーダ深さの微細溝を実現するためには、「切り取り厚さに含まれる不確定量」を ± 10 nm 以下に抑制する必要がある。従来、このような不確定量の抑制・制御は、超高精度・高剛性の切削加工装置の開発、さらには $\pm 0.1^\circ$ C オーダの部屋全体の温度制御や防振床構造等の周辺環境の整備により実現してきた。その結果、サブミクロンオーダの形状加工が可能となったが、さらに 1 μ m 以下の 10nm オーダの形状加工となると、その実現は極めて困難な課題となる。

ここで「切り取り厚さに含まれる不確定量」の主要因を列挙すると、工作機械および工作物の熱変形、自重や切削力等による撓み、工作物表面の微小うねりへの追従誤差、加工原点の検知誤差、振動等であり、振動以外の外乱は、何れも工具と工作物の相対的な位置を、基準点からの距離(長さ)で制御しているために発生する誤差と捉えることができる。

そこで本研究では、長さ以外の制御因子で工具切込み量を制御することを狙いとし、工具に印加する垂直荷重(背分力に相当する力)の大きさを工具切込み量を制御する“定圧切込み方法”に着目し、10nm オーダ深さの微細溝加工の検討を行った。

3. 定圧切込み方法の検討

3.1 定圧加工方法の原理

まず最初に、切削抵抗理論から定圧加工法における制御因子を抽出した。(1)式は、2次元切削理論(図1参照)から求めた切込み量 t と背分力 F_t との関係を示す。(1)式から、せん断角 ϕ 、工作物の降伏せん断応力 τ_0 、すくい角 α 、切削幅 b 、およびすくい面上の摩擦角 β を一定に保てれば、工具に印加する垂直荷重 F の大きさにより切込み量 t を制御できることが分かる。また同時に加工中、振動等の外乱を排除して、垂直荷重 F の変動を抑止することが極めて重要となることが分かる。このように定圧

* 原稿受付 平成 26 年 2 月 27 日

** 正 会 員 日本電気(株)(現、富士ゼロックス(株)) ; 神奈川県横浜市西区みなとみらい 6-1)

加工方法では長さ基準ではなく、力（垂直荷重）基準で工具切込み量を制御するため、長さ基準で必要とされた「熱変形や撓みに対する対策や工具刃先の原点検知」は不要であり、図 2 に示すような工作物の微小うねりに対しても、(1)式の力の釣合いを保つように工具刃先が追従することが期待できる。

$$\text{垂直荷重 } F (= \text{背分力 } Ft) = \frac{b\tau_s \sin(\beta - \alpha)}{\sin \phi \cos(\phi + \beta - \alpha)} t \quad \cdots (1)$$

3.2 工作物の構成

前節で述べたように定圧加工方法では、加工中のせん断角や降伏せん断応力、摩擦係数の変動抑制が極めて重要であり、工作物には高い均質性と等方性が要求される。また工具摩耗の点から、工作物はダイヤモンドと化学的に不活性な物質であること、および少なくとも 10nm 以下の表面粗さの鏡面を有することが要求される。そこで本研究では、図 3 に示すように 20mm 角、厚さ 5mm の研磨したガラス基板上にスパッタ法、あるいは蒸着法で形成したアモルファス状の軟質金属膜を工作物として用いた。軟質金属膜として Au のスパッタ膜を標準膜として用い、ガラス基板との付着力向上のために Cr 下地膜を形成した。以降、Cr 膜と Au 膜の膜厚の組合せにより、Cr(0.1μm)+Au(0.4μm)を試料 1、Cr 膜(10nm)+Au 膜(70nm)を試料 2 と呼ぶ。なお、工作物の表面粗さは、 $R_{\max} \leq 0.01\mu\text{m}$ 、 $R_a \leq 0.001\mu\text{m}$ を満たすようにガラス基板の表面を研磨加工し、鏡面に仕上げた。

3.3 ダイヤモンド工具

微細溝形成実験に用いた 2 種類のダイヤモンド工具（以後、工具と呼ぶ）を図 4 に示す。図 4(a)は、頂角 160 度の V 溝加工用工具であり、以後 160 度バイトと呼ぶ。図 4(b)は、刃幅が 1.0μm 前後の頂角 60 度の矩形溝形成用工具であり、以後 60 度バイトと呼ぶ。何れの工具も耐摩耗性に優れた(1 1 1)面を逃げ面に選定した。

Fig.1 Mechanics of orthogonal cutting

Fig.2 Constant-pressure cutting principles

Fig.3 Workpiece

3.4 定圧微細溝加工装置

定圧加工法では、工具は切込み方向には自由に運動ができ、その他の方向の運動は十分に拘束された切込み装置が必要となる。本研究では、図 5 に示すような桁の原理を応用した定圧切込み装置を採用した。定圧切込み装置は、支点の廻りに回転可能なアームと、その先端に取り付けられたダイヤモンド工具、および他端に取り付けられたバランスウェイトとボイスコイルモータ（VCM）により構成される。工具に作用させる垂直荷重は、バランスウェイトの位置を調整し概ね荷重の釣り合いを取った後に、VCM に流す電流値の大きさと精密に荷重制御を行った。設定荷重分解能は 0.01mN であり、最大荷重 49mN まで発生可能なように VCM を設計した。

微細溝の加工は、ワークホルダー上に固定した工作物上に工具を一定の垂直荷重 F で押圧しながら、微小切込み装置（工具）をエアスライダにより一定速度で移動することにより、直線状に溝形成を行った。工具に作用させる垂直荷重は、切り込み時の衝撃力による工具刃先のチッピングを防止するため、VCM に流す電流を制御し、目標荷重まで徐々に増加させた。以上のように本研究の微細溝加工装置には、温度調整機構やインライン測長等のフィードバック制御系は一切備えていない。このようなオープンループ制御の定圧切削加工方法で、どの程度の加工精度を実現できるか、以下、実験的に検討を行った。

4. 定圧加工方法による微細溝加工実験および考察

4.1 定圧加工方法における微細溝の形状精度

まず最初に、160 度バイトを用いて V 溝加工実験を行った。工作物は試料 1 を用い、すくい角 $\alpha=0^\circ$ 、切削加工速度 1.0mm/sec で溝形成を行った。工具に作用させる荷重を徐々に増加していくと、垂直荷重 0.47mN で切削が開始したが、この切削開始点では、図 6(a)に示すようにラッピング状態が混在した不安定な状態であり、溝深さは 0~0.17μm の間で変動した。この領域は、井川らの報告⁹⁾による安定切削開始前の不安定領域に相当すると考えられる。なお本研究では、溝深さの測定は、触針式表面あらさ計タリステップにより測定した。荷重をさらに

Fig.4 Diamond cutting tools

Fig.5 Constant-pressure cutting apparatus for producing fine dimensional grooves

増加していくと、図 6(b)に示すように垂直荷重 2.45mN でラビング状態は消え切削状態（最小切削厚さに相当）へと移行したが、依然として工具切込み量は安定せず、0.30~0.38 μm の溝深さ変動が生じた。このような溝深さの変動は、工具のすくい角（ $\alpha=5^\circ\sim 2^\circ$ ）や加工速度（0.05~10mm/sec）等の加工条件を変化させても改善できなかった。また、60 度バイトを用いた実験でも同様の溝深さ変動が生じた。以上から、定圧切削加工方法の実力は、最小切削厚さはサブミクロンオーダ、溝深さ精度はレンジで 0.1 μm 程度となることが分かった。

以上のように、材料の均質性と等方性に優れるスパッタ膜を工作物として用い、せん断角や降伏せん断応力の変動抑制を図っても、単純な定圧加工方法では、高精度な微細溝形成は困難であることが分かった。このような溝深さ変動の原因は、切り屑と工具すくい面との摩擦力の変動や、(1)式では考慮されていない工作物と工具逃げ面間の摩擦力変動に起因する切削抵抗（背分力）の変動が主要因と考えられる。

4.2 ストッパー加工法の提案

そこで本研究では、このような背分力変動が生じてても、安定して一定形状の微細溝を形成できる、新規の定圧切削加工方法を提案した。本研究では、同加工方法を“ストッパー加工方法”と呼ぶ。ストッパー加工方法とは、図 7 に示すように、ガラス基板を工具切込み量を決定するストッパー層として用い、ガラス基板上に形成した金属薄膜の膜厚に等しい、一定深さの微細溝を形成する定圧切削加工方法と定義する。ストッパー加工方法では、すくい面や逃げ面の摩擦状態の変化に起因した背分力変動が生じてても、工具刃先が常にガラス基板面と弾性的に接触するように、ストッパー加工実現に必要な最小荷重 F_{min} よりも大きな垂直荷重を工具に作用させて微細溝加工を行う。 F_{min} 以上の余剰な垂直荷重は、ガラス基板の弾性変形に費やされる。

このようなストッパー加工法を 160 度バイトを用いた V 溝加工に適用した。垂直荷重 F を 2.45mN から徐々に増加させると、 $F=2.94\text{mN}$ で所々ダイヤモンド工具刃先がガラス基板に接触

するようになり、 $F=4.41\text{mN}$ まで垂直荷重を増加すると、図 8 に示すような溝幅 5.67 μm 、溝深さ 0.5 μm 、頂角 160 度の一定形状のサブミクロンオーダ深さの V 溝形成が可能となった。溝形成後、Au 膜、Cr 膜をエッチング除去しガラス基板の表面粗さを測定した所、ガラス基板には加工痕はなく、ガラス基板がストッパー層として作用していることを確認した。

次に刃幅 1.0 μm の 60 度バイトを用いて 10nm オーダ深さの矩形形状の微細溝加工を試みた。工作物は試料 2 を用い、加工速度 1.0mm/s で溝形成を行った。なお矩形溝加工用の 60 度バイトでは、逃げ面がガラス基板と面接触しスティックスリップの発生が危惧されるため、すくい角を 1° に設定した。垂直荷重を徐々に増加していくと、 $F=1.67\text{mN}$ で安定したストッパー加工が可能となった。図 9 に形成した溝の SEM 観察写真を、図 10 に表面あらさ計タリスステップにより測定した、形成溝のプロファイル（溝長手方向に対し、斜めに針先を走査）を示す。図 9、図 10 より、溝エッジ部にはバリの発生が殆どなく、溝幅 1.0 μm 、深さ 80nm の微細溝を高精度に形成できたことを確認した。溝深さが、Cr+Au 薄膜の合計膜厚に等しいことから、ガラス基板が溝深さを決定するストッパー層として作用したことが分かる。また図 11 に示すように、生成した切り屑は流れ型の切り屑であり、切削が安定した状態で行われたことが分かる。以上のように、提案したストッパー加工方法により、高精度かつ容易に 10nm オーダ深さの微細溝を形成できることを確認した。

4.3 ストッパー加工法の加工メカニズム

ストッパー加工法では、図 12 に示すように、工具に作用させる垂直荷重 F を増加すると、溝深さは一定のままで溝幅が徐々に増加することが分かった。ストッパー加工法では、工具刃先がガラス基板と弾性的に接触しながら溝加工が行われるため、垂直荷重 F の増加によりガラス基板の弾性変形量が増加すると考えられる。このようなガラス基板の弾性変形量に起因して、溝幅が変化すると仮定した。但し、金属薄膜がガラス基板と一体となって変形した場合には、工具刃先と金属薄膜との相対的

(a) Vertical load $F=0.47\text{mN}$

(b) Vertical load $F=2.45\text{mN}$

Fig.6 Grooves fabricated by constant-pressure cutting method with 160-deg tool

Fig.7 A novel diamond cutting method, “Stopper Layer Method”

Fig.8 Sub-micron order depth V-shaped groove by Stopper Layer Method

Fig.9 10nm order depth groove and a cutting chip by Stopper Layer Method

Fig.10 Groove profile (Talystep)

Fig.11 SEM photograph of a chip

な位置関係に変化が生じないため、溝幅に変化は生じない。そこでストッパー加工方法では、図 13 に示すように、切り屑の生成ポイントが工具刃先前方に形成されると仮定した。すなわち溝底面は、この工具刃先前方の切り屑生成ポイントにおける切削作用と工具逃げ面によるパニシング作用により形成され、溝側面は、図 13 に示す A 点から B 点間の切刃稜による切削作用で形成されると仮定した。同加工モデルでは、ガラス基板の弾性変形量に応じて A 点から B 点の切刃稜位置が変わるため、垂直荷重 F の増加により、溝深さ一定のままに溝幅が増加したものと仮定した。

このようなガラス基板の弾性変形を伴った加工モデルの妥当性を検証するために、図 14 に示すパニシング工具（以後、90 度バイト）を新たに作成した。ここで、すくい面と逃げ面が形成する稜線をクロスエッジと呼ぶ。図 15 に示すように、このようなパニシング工具を用いた溝加工では、クロスエッジ近傍のすくい面はガラス基板と弾性的に接触し、溝形成はクロスエッジ前方の C 点から D 点の領域のすくい面および切刃稜で行われる。同一のガラス基板の弾性変形量で比較すると、溝幅は 60 度バイトの約 4 倍増加するように設計された工具である。以下、60 度バイトと 90 度バイトの間に、このような溝幅変化量の関

Fig.12 Vertical load F vs. groove width using 60-deg tool

Fig.13 Cutting principle of Stopper Layer Method (SLM)

Fig.14 90-deg tool for examining machining principle of SLM

Fig.15 The groove formation by burnishing using 90-deg tool

係が成立するかどうか、実験検証を行った。

図 16 に 90 度バイトにより形成した微細溝の SEM 観察写真を示す。90 度バイトは、過大な負のすくい角を有すパニシング工具のため、塑性流動により溝エッジ部に大きな“かえり”が発生したが、図 12 に示した 60 度バイトによる実験結果と比べ、溝幅が大きく変化していることが分かる。図 17 に、ストッパー加工が可能となる最小荷重 F_{min} からの荷重増分 $\Delta F = F - F_{min}$ とガラス基板の弾性変形量の関係を示す。ガラス基板の弾性変形量は、図 13 に示した加工モデルに従い、形成された微細溝の溝幅と工具すくい面形状から逆算して求めた。図 17 から、同一荷重増分で比較すると、90 度バイトの方がガラス基板の弾性変形量が小さくなることが分かる。これは、90 度バイトでは、ガラス基板の弾性変形量の増加に伴い、逃げ面だけでなく、すくい面の接触面積も増加するためと考えられる。一例として、荷重増分 0.59mN におけるガラスの弾性変形量を比較すると、90 度バイトは 60 度バイトの約 0.8 倍であった。

次に、図 17 の関係から垂直荷重 F をガラス基板の弾性変形量に換算し、ガラス基板の弾性変形量と溝幅増加量の関係を求めた。その結果、図 18 に示すように、同一のガラス基板の弾性変形量で比較すると、90 度バイトの溝幅の増加量は、60 度バイトに比べ約 4 倍となることが分かった。以上から、図 13 に示したストッパー加工法の加工モデルの妥当性を確認できた。

Fig.16 Vertical load F vs. groove width using 90-deg tool

Fig.17 Increment of vertical load ΔF vs. elastic deformation of glass

Fig.18 Elastic deformation of glass vs. increment in groove width

4.4 ストッパー加工方法による微細溝形成

ここまで述べてきた全ての微細溝形成実験は、ガラス基板上に Au の薄膜 (Cr の下地膜) を形成したものを工作物として用いてきた。工具切込み量を決定するストッパー層と被削材層の 2 層構造からなる工作物であれば、ストッパー加工方法を適用できることを実証するために、表 1 に示す種々の構成の試験片を用いた微細溝形成実験を行った。

試験片 TP1~4 では、Au, Cu, Ag, Al 等の軟質金属を被削材層として用いた。Cu と Ag に関しては Au と同様に、低荷重で安定したストッパー加工が可能な事を確認した。図 19(a)に Ag の加工例を示す。一方、Al は、極めて粘り気の強い材料であり、連続型の切り屑を排出できず、図 19(b)に示すように溝側面に切り残しが発生した。但し、このような切り屑排出性に劣る Al を用いた場合でも、ストッパー加工法により Al 膜厚に等しい深さの微細溝形成が可能なことは確認できた。試験片 TP5 は、Cu (40nm) の上に Au (40nm) を積層した複合材である。このような複合材に対しても、図 19(c)に示すように安定したストッパー加工が可能なことを確認した。ここで、切り屑排出性の観点から Cu と Au を比較した。図 19(d)に切り屑をブロー除去する前の Au 膜加工直後の顕微鏡写真を示す。同図および図 11 に示したように、Au では長さ 100 μ m 程度で切り屑が分断されることが分かった。一方、Cu は切り屑排出性に優れ、図 19(e)に示すように、Au との複合材である試験片 TP5 においても、

Table 1 Test piece structure

Test piece	Stopper layer	Work material
TP1	Glass	Cr(5nm)+Au(75nm)
TP2		Cu(80nm)
TP3		Ag(80nm)
TP4		Al(80nm)
TP5		Cu(40nm)+Au(40nm)
TP6	Si	Cr(5nm)+Au(75nm)
TP7	Al ₂ O ₃ +TiC

Fig.19 Fine grooves formed in the various workpieces

少なくとも数 mm 長さに亘り途切れることなく、流れ型の切り屑を排出することを確認した。被削性の観点から金属膜の選定は必要であるが、Au に限らず切削可能な材料であればストッパー加工の被削材層として適用可能なことを確認した。

試験片 TP6,7 では、鏡面研磨した Si 基板、およびアルミナ・チタン・カーバイト基板をストッパー層として用いた。図 19(f)に、一例として試験片 TP6 上に形成した微細溝の顕微鏡写真を示すが、Si 基板およびアルミナ・チタン・カーバイト基板の何れをストッパー層として用いても、安定したストッパー加工が可能なことを確認した。

以上から、ストッパー層と被削材層の 2 層から構成される工作物であれば、ストッパー加工を適用可能な事を確認した。本報告では、バルク状の基板をストッパー層として用いたが、スパッタ法等により形成した薄膜をストッパー層として用いることにより、さらに本加工方法の適用範囲を拡大できると考えられる。この点は、今後の課題として検討を進めて行く。

5. 結 言

本研究では、定圧切削加工法による 10nm オーダ深さの微細溝加工の検討を行い、次のような結果を得た。

- (1) 単純な定圧切削加工方法では、材料物性の均質性、等方性に優れるスパッタ膜を被削材として用いても、工具と被削材間の摩擦変動等に起因する切削抵抗の背分力変動が生じるため、サブミクロンオーダ以下の深さの高精度な微細溝加工は困難であることを明らかにした。
- (2) ガラス基板上に形成した金属薄膜上に一定の垂直荷重でダイヤモンド工具を押圧しながら工具を移動し、ガラス基板を溝深さを決定するストッパー層として用い、金属薄膜の膜厚に等しい深さの微細溝を形成する、新規の定圧切削加工方法”ストッパー加工方法”を提案した。同加工方法により、10nm オーダ深さ微細溝を高精度に形成できることを示した。
- (3) ストッパー加工方法では、ガラス基板の弾性変形に伴い、工具刃先前方に切り屑の生成点が形成され、微細溝が形成されることを示した。
- (4) ストッパー層と被削材層の 2 層構造の工作物であれば、ストッパー加工を広く適用できることを示した。

参 考 文 献

- 1) 小林昭：超精密ダイヤモンド切削加工技術，日本機械学会誌，**85**,760 (1982) 241.
- 2) 日経メカニカル，nm オーダを達成した超精密加工技術 光学機器を中心に用途拡大，日本経済新聞 4.29(1991)30.
- 3) 上田勝宣，住谷充夫：微細溝の超精密切削加工，精密工学会誌，**52**,12 (1986) 2016.
- 4) 藤原三男，小園利一，牧芳郎，永島道芳：光ディスク原盤の超精密切削加工，精密工学会秋季大会学術講演会論文集 (1989)141.
- 5) 西口隆，高須周平，榊田正美：ダイヤモンド溝切削における溝形状の加工精度への影響，精機学会春季大会学術講演会論文集 (1983)327.
- 6) 小林篤史，小島一志：超精密三次元マイクロ加工用ダイヤモンド切削工具の開発，SEI テクニカルレビュー，**171**, 7 (2007)63.
- 7) 大塚泰弘：別冊応用機械工学 超精密加工マニュアル ダイヤモンド工具による微細溝加工，大河出版(1989)50.
- 8) 原田達男：回折格子の超精密加工，光技術コンタクト，**26**,3(1988)45.
- 9) 井川直哉：切削加工の精度限界，機械の研究，**24**,12(1972)1545.