

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 22 日現在

機関番号：32503

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04130

研究課題名（和文）AFM触針スクラッチ加工による加工現象の研究

研究課題名（英文）Study on polishing phenomenon with AFM tip scratch machining

研究代表者

松井 伸介（Matsui, Shinsuke）

千葉工業大学・工学部・教授

研究者番号：50612769

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：研磨技術の高度化を目的にし様々な要素が複合する研磨のメカニズムの解明を目指す。その一つの大きな要素としてAFMを用いて砥粒一つ一つの切れ刃としての作用を検討した。AFM触針を砥粒切れ刃と見立てAFMで荷重、軌跡を制御し、スクラッチ加工の基本特性を調べた。特に今後重要となる硬脆材料について行った。その結果、例えば、SiC、アルミナなどのダイヤモンドに次ぐ硬さを持つ触針で石英製光ファイバーを加工した場合は、ほとんど加工ダメージが発生しないことが明らかになった。延性モードで加工する限り石英に対する加工で、これらの材料でも化学的な側面が重要であることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

次世代パワーデバイス用の硬脆な半導体材料基板の研磨、電子部品として高品質化が望まれる難加工誘電体材料の研磨、半導体デバイス、光通信部品等での異種材料の平面研磨、複雑形状研磨等研磨加工は新たな段階を迎え高度化が要求されている。ところが研磨技術は、複雑な要素からなっているために、そのメカニズムの究明を難しくしている。そこでその要素を分離し、個々に検討した。AFM触針を砥粒の非常に小さな切れ刃に見立てその加工特性を検討することは、研磨における重要な要素の検討一つである。本研究における結果は、研磨における機械的、化学的側面を直接的に明らかにする重要な点の追及の端緒となった。

研究成果の概要（英文）：We aim to clarify the mechanism of polishing that combines various elements for the purpose of advancing polishing technology. Each element is examined individually, and it leads to clarification by synthesizing them. As one of the major factors, we investigated the action of each abrasive grain as a cutting edge using AFM. The AFM stylus was regarded as an abrasive cutting edge, and the load and trajectory were controlled by the AFM system, and the basic characteristics of scratch processing were investigated. In particular, we investigated hard and brittle materials that will become important in the future. As a result, when the stylus made of SiC and alumina, which has hardness second only to diamond, was used to process quartz optical fibers, almost no processing damage occurred. As far as processing is performed in the ductile mode, it seems that the processing progresses with chemical action on quartz.

研究分野：生産加工

キーワード：AFM 切れ刃 研磨加工 アルミナ SiC

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

動力源として電気の重要性がますます高まっており高性能なパワー半導体への期待は非常に大きい。そこで、従来の Si に代わり、SiC、GaN、GaO、ダイヤモンド等の次世代パワー半導体材料の採用に向け開発が加速している。しかし、これらの材料は硬脆で、化学的に安定であるため加工が難しく、このことが導入の妨げも一つになっている。また、電子部品に使われるさまざまな誘電体材料も硬脆材料で難加工のものが多い。さらに、半導体デバイス、電子部品、光通信部品等で異種材料の同一平面加工、複雑形状加工等へ要求も高まっている。このように最終仕上げ加工として研磨加工の高速化、高品質化への要求、期待は非常に高い。

しかし、研磨加工は非常に微細な砥粒の切れ刃としての加工現象、微細粒子の液中での分散、スラリーの物理・化学特性、さらには、砥粒を保持するパッドの表面状態、性質等非常に複雑な要素の複合となっており、そのメカニズムを明らかにして加工技術へのフィードバックが難しくなっている。

2. 研究の目的

このような背景の中で研磨にけるメカニズムを明らかにすることによって、研磨の高度化を目指すために研磨のそれぞれの要素を分離し個別に検討する。そしてこの分離検討した項目を総合することによって技術の高度化を試みる。具体的には、まず、非常に微細な砥粒切れ刃の作用を AFM 触針で模擬する。材料として従来行ってきた石英のみでなく、硬脆材料も対象とする。そのため、スクラッチ加工も光ファイバーのみならず種々の材料の基板も対象とした。また、パッドについては、パッドに溝を設けることによるスラリー供給の効果をシミュレーションと実験によって比較検討する。さらに実際の研磨技術の開発の中で総合の端緒として、これらの検討と実際の研磨加工と比較検討を行った。

3. 研究の方法

AFM 触針を砥粒の微細な切れ刃と見立て矩形にスクラッチ加工し、その加工特性を調べる。触針の先端曲率半径は 0.1 から 0.2 μm と微細であり、さらに、触針の材質を砥粒に同一とすることによって砥粒の切れ刃を模擬する。AFM システムで制御することより、触針の軌跡と荷重がよく分かった加工を行うことができる。また、液中で加工し、雰囲気も変化させることによって、スラリー中の砥粒の特性を検討することができる。被加工物に光ファイバー端面を使えば、端面の反射減衰量を測定することによって、簡単に加工変質層の評価ができる。スクラッチ加工は光ファイバーのコア(直径 10 μm)を含む 20 μm 四方で行い。スキャンライン数は 512 で 2 回行った。速度は 1 ライン 1 秒である。さらに、硬脆材料の加工特性を調べるため、基板への加工特性も検討した。触針材質としても、通常 AFM で使われるシリカ、ダイヤモンドだけでなく、アルミナ、SiC などの砥粒としてよく使われる硬脆材料を用いた。また、これらの材料は、半導体、電子部品基板としても重要である。パッドの検討では、溝を表面に形成した小径の矩形パッドを用いた加工の検討を行った。溝のパターンを変え実際の研磨とシミュレーションとの比較検討をした。

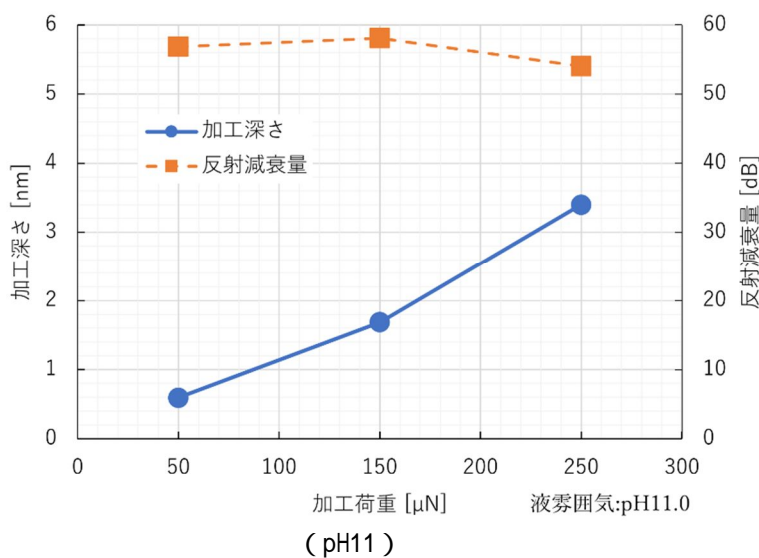
4. 研究成果

触針としてダイヤモンドに次いで硬いといわれる SiC、 Al_2O_3 (アルミナ) 製のものをを用い石英製である光ファイバ端面を加工した。50 μN の比較的低荷重で pH を変化させスクラッチ加工を行うと、サファイアでは、pH7 と 10 では、平均するとほとんど加工せず、pH11 でようやく 0.6 nm の加工深さを得た。これは同じ条件でのダイヤモンドの 1/6 である。アルミナは、ダイヤモンド、SiC に次ぐ硬い材料であり、それを考慮に入れるとこの値は小さい。しかし、アルミナは乾式でシリカ砥粒によって研磨されることがわかっており、柔らかい砥粒が硬い材料を化学的に加工するメカノケミカル加工として知られている。この場合、湿式でもその効果が表れていると考えられる。実際に、FESEM による触針の加工前後の観察による砥粒摩耗量と光ファイバ-(石英)の加工量をモルに換算して比較すると、確かに摩耗の加工に対する比が 2 となっており(純水中) そのことを明らかにしている。また、スラリーとしてアルミナを用いる時は一般にアルカリにされており、その点も本実験結果と整合する。加工が行えた pH11 では、摩耗は加工量に対し約 1/2 となっていて、この場合は、加工量の方が摩耗量より大きい。

反射減衰量測定による加工ダメージ層評価では、値がそれぞれ pH7:57 dB、pH10:56 dB、pH11:57 dB といずれも高い値を示している。反射減衰量は、値が低いと屈折率が高い加工ダメージ層による反射が大きいことを示し、その値がダメージ層の厚さの指標となる。スクラッチ加工前は 60 dB 弱の高い値(これは、シリカ砥粒による最終仕上げによって加工ダメージがほとんどない状態になっている。また、測定装置も 60 dB 前後が限界に近く誤差も大きい)であった。純水中、あるいは pH 10 ではもともと加工がほとんどないため反射減衰量がほとんど変化しない考えられるが、pH11 では加工量があるにもかかわらず、反射減衰量が高く加工ダメージが発生していない。ただ、この場合加工量は、0.6 nm と少ない。たとえば、ダイヤモンド触針を用いた実験では、最も加工量が少ない 1.7 nm で反射減衰量は 47 dB であった。ダイヤモンド触針では、小さい加工量でも反射減衰量が小さくなり加工ダメージが発生していることがわかるが、さらに小さい加工量については加工荷重の設定ができずデータがない。そこでさらに高い荷

重による加工を試みた。その結果、図1に示すように150 μN で加工深さは、1.7 nm となった。そして反射減衰量は58 dB となり先ほどのダイヤモンドでの47 dB に比べ明らかに高く、ほとんど加工ダメージが形成されていないことがわかった。ここで加工深さと加工荷重は良い比例関係となっていることも図からわかる。このスクラッチ加工でも研磨におけるプレストンの関係に従っていることがわかる。

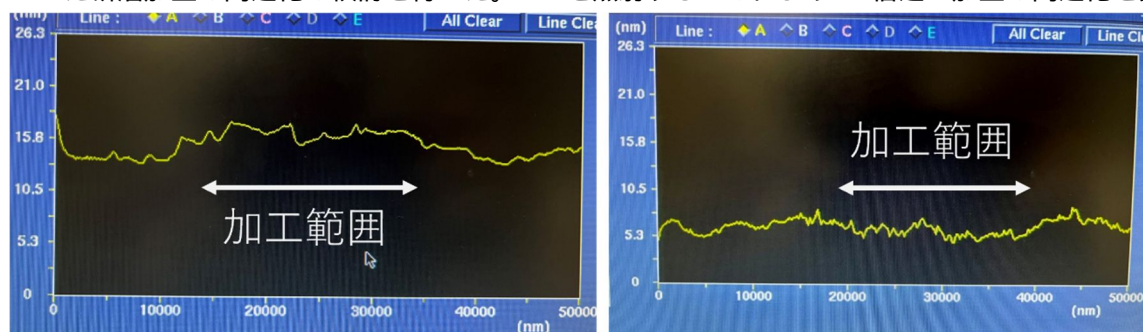
図1 アルミナ触針によるスクラッチ加工荷重に対する加工深さと反射減衰量の関係



SiC 触針では、純水、pH11 で、加工深さはそれぞれ 0.7 nm、0.4 nm となり、SiC 触針では、純水中、pH11 とともに加工確認されたがやはり加工深さはダイヤモンド比べ小さい。そして反射減衰量は、58 dB と 56 dB となりやはり高く加工ダメージほとんど発生していないと考えられる。実際この場合も加工荷重を 150 μN 、250 μN と増加させると pH11 で加工量は、1.7 nm、2.5 nm となった。この場合も荷重と加工量は正比例している。そして反射減衰量は、いずれも 50 dB とやはり加工ダメージのほとんどない高い値を示した。ダイヤモンド触針の場合は、2.4 nm の加工深さを得るには、50 μN の荷重が必要で、反射減衰量は、加工ダメージより 45 dB まで低下してしまう。アルミナ、SiC 触針での延性モードによるこの様なスクラッチ加工では、ダイヤモンドと比べ小さい加工深さしか得られないことが分かった。これは、ダイヤモンドの硬さの違いを考えても少ないと思われる。そして、加工ダメージがほとんど発生していないことも考えると化学的要素を含んだダイヤモンドとは異なる加工形態で加工が進んでいる。pH による加工量の材料固有の変化もこのことを裏付けている。

パッドの検討については、パッドに形成した溝の効果を実験とシミュレーションによって検討した。溝を形成すると加工基板に溝パターンに従ううねりが発生する。そのうねりは、局所的な荷重と、その部位の軌跡からシミュレートした形状と一致した。しかし、加工量は、溝の本数が多いほど、溝の形状が大きいほど、シミュレーションした形状より多くなった。シミュレーションには、研磨液のパッドへの供給および、研磨中の挙動についての効果がないためこの差が発生すると考えられる。これにより、研磨におけるスラリーの供給、挙動の効果の検討の端緒をつかむことができた。

研磨メカニズムと実際の研磨との比較検討の一環として、UV 照射による光化学反応を援用した研磨加工の高速化の検討を行った。UV を照射することにより 30 倍近い加工の高速化を実現



(a) 純水中

(b) pH 11

図2 Si 基板のダイヤモンド触針によるスクラッチ加工断面
(加工荷重: 150 μN)

した。また、この実験の中で UV を照射する際メッシュ状のポリシャを用いた。これにより、基板への接触率が大きく減ることになるが、同一条件の加工では、従来の SUBA800 と加工速度は

変わらないことも見出した。さらにここで用いたメッシュポリシャは、ポリアリレート系のエンジニアプラスチックを用いた、耐薬品、耐紫外線効果がある。

基板に対するスクラッチ加工特性の評価では、シリコン基板へのダイヤモンド触針による加工において、純水中では、スクラッチされたシリコン表面が若干膨らむことが分かった。図 2(a)にその AFM による観察結果を示す。加工荷重を増やすとこのふくらみは大きくなり $150\mu\text{N}$ で $2\sim 3\text{ nm}$ になった。大気中でシリコン基板にスクラッチ加工をすると極表面がアモルファス化した酸化膜になるといわれており、液中でもこのことが起きたと考えられる。一方 pH11 のアルカリ液中では、 $80\mu\text{N}$ ではほとんど変化がなかったが、 $150\mu\text{N}$ では、 2 nm 程度の加工量が得られた。極表面の酸化と同時に、材料がケモメカニカル研磨されたと思われる。図 2(b)は pH11、 $150\mu\text{N}$ 加工した様子を示す。

シリコン酸化膜への加工では、シリカ触針を用いて荷重 $80\mu\text{N}$ で純水中では 1 nm であった加工深さが、pH11 では 9 nm となった。また、摩耗量と加工量の比は両者とも 1 となった。これは、光ファイバーに対する同様の実験と同一となっていることが確認できた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計17件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Taichi ISONO , Shinsuke MATSUI , Norihiro TORII
2. 発表標題 Evaluation of machining characteristics by Atomic-force-microscopy scratching
3. 学会等名 19th International Conference on Precision Engineering (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shinsuke MATSUI , Kouta HIROSHIMA , and Atsunobu UNE
2. 発表標題 Characterization of high-speed polishing system with small rectangular pads by quantification of material-removal amount and comparison with simulation
3. 学会等名 19th International Conference on Precision Engineering (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kanaeda Tomoki , Matsui Shinsuke , Yamamoto Eichi , Yajima Toshiyasu and Ninomiya Daisuke
2. 発表標題 Highly efficient polishing of GaN substrates by direct UV irradiation assist
3. 学会等名 19th International Conference on Precision Engineering (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 磯野 泰地, 松井 伸介, 鳥居 典博
2. 発表標題 AFM スクラッチによる研磨加工特性の評価 第 11 報: 各種材料基板に対するスクラッチ加工
3. 学会等名 2022年度 砥粒加工学会 学術講演会 (ABTEC2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 磯野泰地, 松井伸介
2. 発表標題 AFMスクラッチによる加工特性評価ー第10報: アルミナ, SiC触針による加工の比較検討ー
3. 学会等名 砥粒加工学会全国大会 ABTEC2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 金枝知季 松井伸介, 山本栄一, 矢島利康 二宮大輔
2. 発表標題 UV直接照射アシストによるGaN基板の研磨の評価第3報 ~ 研磨速度に対するポリシャの効果 ~
3. 学会等名 精密工学会秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 廣島康太 松井伸介, 宇根篤暢
2. 発表標題 矩形小型パッドによる高速研磨技術の検討 (第4報) -パッドに形成した溝効果による加工形状と加工量の検討-
3. 学会等名 精密工学会秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木春成, 松井伸介
2. 発表標題 光ファイバ先端マイクロ形状加工の検討
3. 学会等名 精密工学会秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 赤坂孝幸, 松井伸介
2. 発表標題 AFMによる光ファイバ端面のナノ・マイクロ加工 第9報 SiC触針による加工の検討
3. 学会等名 2020年度砥粒加工学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 上田大成、松井伸介、山本栄一、坂東翼、矢島利康、二宮大輔
2. 発表標題 UV直接照射アシストによるGaN基板の研磨の評価 第2報 ~酸化剤を用いた研磨高能率化~
3. 学会等名 精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 赤坂 孝幸、松井 伸介
2. 発表標題 AFMスクラッチ加工による研磨加工特性評価
3. 学会等名 2019年度 砥粒加工学会 学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木拓磨、松井伸介、矢島利康、二宮大輔
2. 発表標題 小型研磨機によるSiC基板の研磨特性の評価(第2報)
3. 学会等名 2019年度 砥粒加工学会 学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 上田大成、松井伸介、矢島利康、二宮大輔、山本栄一
2. 発表標題 紫外線照射・小型研磨機による酸・アルカリの効果と評価
3. 学会等名 2019年度 砥粒加工学会 学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 赤堀瑞樹、松井伸介、矢島利康、二宮大輔、山本栄一、坂東翼、上田大成
2. 発表標題 UV直接照射アシストによるGaN基板の研磨の評価
3. 学会等名 2019年度精密工学会秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木拓磨、松井伸介、矢島利康、二宮大輔、山本栄一
2. 発表標題 小型研磨機を用いたGaNの研磨加工の検討 酸化剤とpH及びUVの効果
3. 学会等名 2019年度精密工学会秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中野亮仁、松井伸介、宇根篤暢
2. 発表標題 矩形小型パッドによる高速研磨技術の検討（第3報）;パッドに形成した溝効果による高速化の検討と形状評価
3. 学会等名 2019年度精密工学会秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shinsuke Matsui, Mizuki Akahori, Takuma Suzuki, Eiichi Yamamoto, Tsubasa Bando, Yasutoshi Yajima and Daisuke Ninomiya
2. 発表標題 UV-light assist chemical mechanical polishing of GaN with mesh polisher made of chemical durable plastics
3. 学会等名 2020 euspen 's international conference and exhibition (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------