OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	光放射圧制御CMP加工に関する基礎的研究
Author(s)	木村, 景一
Citation	大阪大学, 2002, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/27635
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

大阪大学博士論文

光放射圧制御 CMP 加工に関する基礎的研究

Fundamental Study on Chemical Mechanical Polishing Controlled with Optical Radiation Pressure

木村景一

2002 年 7 月

大阪大学博士論文

光放射圧制御 CMP 加工に関する基礎的研究

Fundamental Study on Chemical Mechanical Polishing Controlled with Optical Radiation Pressure

木村景一

2002 年 7 月

光放射圧制御 CMP 加工に関する基礎的研究

博士論文目次

第1章　緒　論 …… 1
1-1 本研究の背景 …… 1
1-2 LSI プロセスと平坦化技術 …… 3
1-2-1　LSI の構造と製造プロセス …… 3
1-2-2　LSI における平坦化技術の必要性 …… 8
1-3 本研究の目的と概要 …… 13
1-4 本論文の構成 …… 15

第2章　CMP 技術による平坦化 …… 17
2-1 CMP 技術の概要 …… 17
2-1-1　CMP技術の開発経過 …… 17
2-1-2　CMP加工システム …… 19
2-1-3　CMP技術への要求仕様 …… 23
2-2 CMP 加工における材料除去機構 …… 27
2-3 CMP 加工における平坦化プロセス …… 30

第 3 章 光放射圧制御による粒子の捕捉 …… 35
3-1 緒言 …… 35
3-2 光放射圧により発生する力 …… 36
3-3 光放射圧による粒子の捕捉 …… 41
3-4 結言 …… 43

第 4 章 レーザ微粒子集積現象を利用した平坦化プロセスの基本概念 44
4-1 緒言 …… 44
4-2 凹凸面における平坦化プロセス …… 44
4-3 凸部に集積痕を形成した場合 …… 47
4-4 凹部に集積痕を形成した場合 …… 47
4-5 結言 …… 49

第 5 章 光放射圧制御による微粒子集積実験 …… 50
5-1 緒言 …… 50
5-2 微粒子集積実験装置 …… 50
5-3 光放射圧による微粒子捕捉実験 …… 55
5-4 レーザ微粒子集積実験結果と考察 …… 58
5-4-1 レーザ微粒子集積現象 …… 58
5-4-2 レーザ微粒子集積機構の考察 …… 64
5-5 結言 …… 71

第 6 章 平面におけるレーザ微粒子集積痕ポリシング実験 …… 72
6-1 緒言 …… 72
6-2 ポリシング実験装置 …… 72
6-3 レーザ微粒子集積痕ポリシング実験 …… 76
6-4 結言 …… 86

第 7 章 凹凸面におけるレーザ微粒子集積痕ポリシング実験 …… 87
7-1 緒言 …… 87
7-2 FIB による凹凸パターンの作製 …… 87
7-3 ポリシングによる平坦化プロセス実験 …… 90
7-4 多トレンチ試料のポリシング実験 …… 98
7-5 結言 …… 102

第 8 章 結論 …… 103

関連論文 および口頭発表 …… 106

参考文献 …… 109

Appendix …… 113

謝 辞 …… 117

第1章　緒　論

1-1 本研究の背景

科学技術分野において 20 世紀になされた数多くの発明のうち，最もインパクトの大きい発明の一つとして「トランジスタ」，すなわち「半導体結晶による電子回路素子」の発明があげられる．それまでは真空管により行われていた発振，増幅，スイッチングなどの動作が半導体結晶を用いた固体素子により可能になり，小型化，信頼性の向上を実現した．この半導体結晶による増幅作用はベル研究所(USA)においてW. Brattainらにより1947年12月16日に発見され，1947年12月23日に W. Brattain，W. Shockley，J. Bardeen により同研究所内で報告され，"Transistor"と名づけられた．[1)]

当初，トランジスタは製造歩留りが低く実用化は困難と思われていたが，発明から5年後の1952年にはこの点を克服して世界最初のトランジスタラジオが発売された．やがて，1958 年になると，この固体素子と抵抗，コンデンサなどの素子を複数個集合させ一つの集積回路を形成するアイデアが提案され，J. Kilby (Texas Instruments 社/USA) によりこれらの素子を一つのゲルマニウム基板の上に回路として形成した最初の発振回路の実験[2)]が行われた．さらに，1961年になるとR. Noyce (Fairchild 社/USA) により，シリコン基板上にプレーナトランジスタ構造を形成した集積回路が開発[3)]され，量産が開始された．この集積回路(IC:Integrated Circuit) は，当初，主にミサイルの制御回路など軍事用の用途に限られていたが，1964 年頃から電卓(電子卓上計算機)などに使用されるようになり，演算素子，メモリー素子として発展を始めた．

一方，それまで使われていた機械式，リレー式計算機は真空管式に移行し始め，1943 年に英国において外部プログラム方式の電子式デジタル計算機であるCOLOSSUS[4)] が開発された．その後，1946年には米国で ENIAC[4)]が開発された．1960 年代からは，真空管に替わって集積回路を電子計算機に応用した大型計算機の急激な高性能化が図られてきた．さらに，1978年にはApple Computer社からパーソナルコンピュータ Apple-Ⅱが発売され，1チップ CPU，IC メモリーが必要不可欠な素子となった．

当初は，トランジスタは個別半導体として増幅素子として用いられたが，電子計算機に応用されてからは演算素子，記憶素子としての機能が重視され電子計算機の発展とともに集積回路は，IC から LSI (LSI : Large Scale Integrated Circuit) へ，LSI から VLSI(VLSI : Very Large Scale Integrated Circuit)，ULSI(ULSI : Ultra Large Scale Integrated Circuit) へと小型化，高性能化へ向かって急速な発展を続けた．

1970 年に 1KBit DRAM (Dynamic Random Access Memory) が発表され，それを出発点として「3 年に4倍の集積度の向上」という Moore の法則 [5]にしたがい高密度化が進んできた．1970 年に 1KBit であった DRAM が 19 年後の 1989 年には 1000 倍の 1MBit となり，さらに 10 年後の 1999 年には，1GBit を達成している．それにつれて，デザインルールは 1KBit の 10 μ m から 1GBit の 0.18 μ m へと微細化している．この極めて大きな技術的進歩である，IC から LSI へと変化，発展の歴史は LSI の微細化，高集積化の歴史であり，この高集積化を達成するために LSI プロセスを中心にさまざまな新しい技術が開発され，導入されてきたことを示唆している．

このような微細化，高集積化の進展の中で，LSI の世代交代を推進する主要な技術は LSI パターンを投影露光するリソグラフィ技術であったが，集積化の進展にともない配線層数が増大する中で各露光工程の前に層間絶縁膜を平坦化しない限り良好な投影露光は困難であることが明らかになり，平坦化技術 (Planarization Technology) の重要性が認識され始めた．

それまでは，層間絶縁膜の平坦化法としては，(1)リフロー法，(2)エッチバック法，(3)リフトオフ法などが試みられていたが，各々の方法とも長所，短所があり広く使用される方法はなかった．しかし，層間絶縁膜の平坦化に対する多くの試みの中でポリシング技術が注目され，CMP 技術として新しい形式で出現してきた．「クリーンな環境が必須」としてクリーンルームでの作業を行う LSI プロセスに遊離砥粒を使用する CMP 工程の導入は，当初，非常な抵抗があったが，他の平坦化法と比較して歩留まりに優れた方法であり，また Cu 配線の形成では必要不可欠な工程であることなどから，短期間に広く使用されるようになった．

今後，LSI の集積度の向上とともに，CMP に要求される平坦性はますます高度のものとなる．しかし，現状では CMP における材料除去プロセスは未だ科学的に解明されておらず，技術の体系化もなされているとは言えない．いくつかの加工パラメータを経験により調整，制御し，なんとか要求公差内の加工精度を保っているのが現状である．このような状況では，今後要求されるより高度の平坦化要求には対応困難である．

本研究では，層間絶縁膜の高精度平坦化を可能にするため，光放射圧制御による微粒子集積痕を利用した新しい平坦化プロセスを提案し，その可能性について実験的に検討した．

1-2 LSIプロセスと平坦化技術

1-2-1 LSIの構造と製造プロセス

ICからLSIへ至る微細化，高集積化は，LSIプロセス技術の進歩に支えられ，特にリソグラフィ技術，配線技術をはじめとする前工程における技術進歩がドライビングフォースになっている．

図 1-1 はこれまでの微細化，高集積化の経過，および今後の傾向を示したものである．[6] デザインルールは1970年に10μmであったものがほぼ直線的に減少し，30年後の2000年には150nm，2003年には100nmになると予想されている．それに対して集積度は1970年の1k Bitから1999年の1G Bitへと急激な高集積化を示している．これよりわかるように，LSIの微細化，高集積化はMooreの法則にしたがって進み，今後も当分の間この傾向は続くと予想される．

図 1-2 はLSIのプロセスの概要を記述したものである．LSIの製造は，まず，単結晶シリコンの引き上げを行い，それをスライス，ラッピング，ポリシングによりシリコンウエハを製作することから始まる．この段階で，TTV(Total Thickness Variation)，ワープ等で規定されるシリコンウエハの加工精度はほぼ決定され，後のCMP工程に大きな影響を与える．

次の工程は，シリコンウエハ表面に素子を形成する素子形成工程である．熱酸化，CVD，スパッタリング等による膜形成，その表面へのレジスト塗布，ウエハステッパ，スキャナによるパターンの投影露光，およびエッチングにより素子構造を造り上げる．図 1-3 は代表的LSIであるCMOSデバイスの素子構造[7]の詳細を示している．このとき，各素子間の電気的分離を行う必要があるが，従来はこの例にも示されているLOCOS(Local Oxidation of Silicon) 構造が広く採用されていた．しかし，高集積化の進展にともない，高密度の素子形成のため最近はSTI(Shallow Trench Isolation) 構造が採用され始めた．図 1-4 にSTI構造の形成プロセス[8]を示す．隣接する素子間の分離を短い距離で確実に行うため，シリコンウエハ表面に浅い溝を堀り，そこを酸化物で埋めることにより分離をおこなっている．STI構造においてはCMPによる平坦化が必要であり，CMP技術における課題の一つとなっている．

このようにしてシリコンウエハ表面に素子を形成した後，各々の素子を接続するため配線を行う．図 1-5 [9] は7層配線のLogic ULSIの配線部(絶縁層をエッチングにより除去した)を示している．M1:W，M2-5:Cu Dual-Damascene，M6-7:Alで構成されており，動作速度は従来より10%以上向上したという．

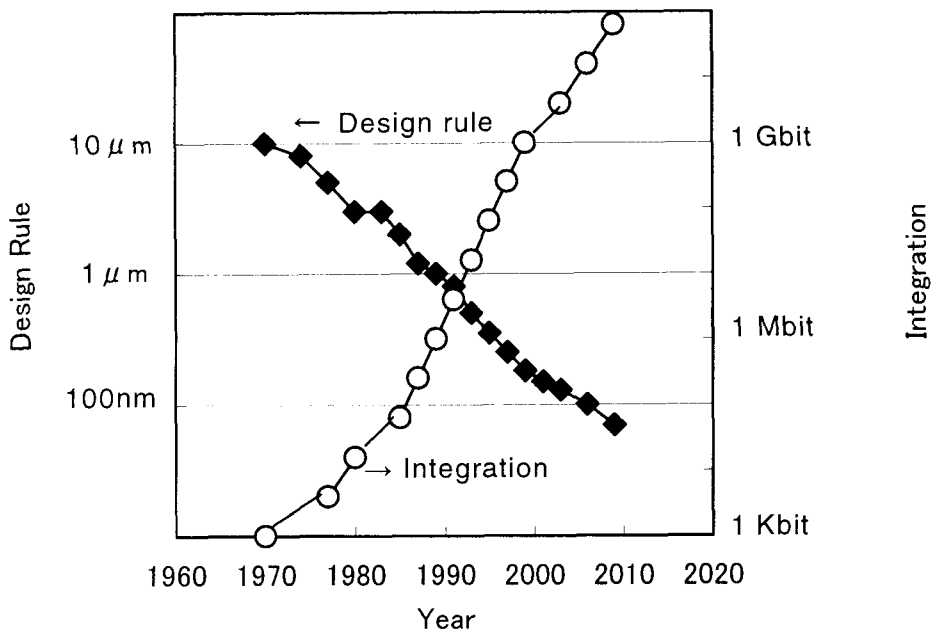


Fig. 1-1 LSIの高集積化の傾向

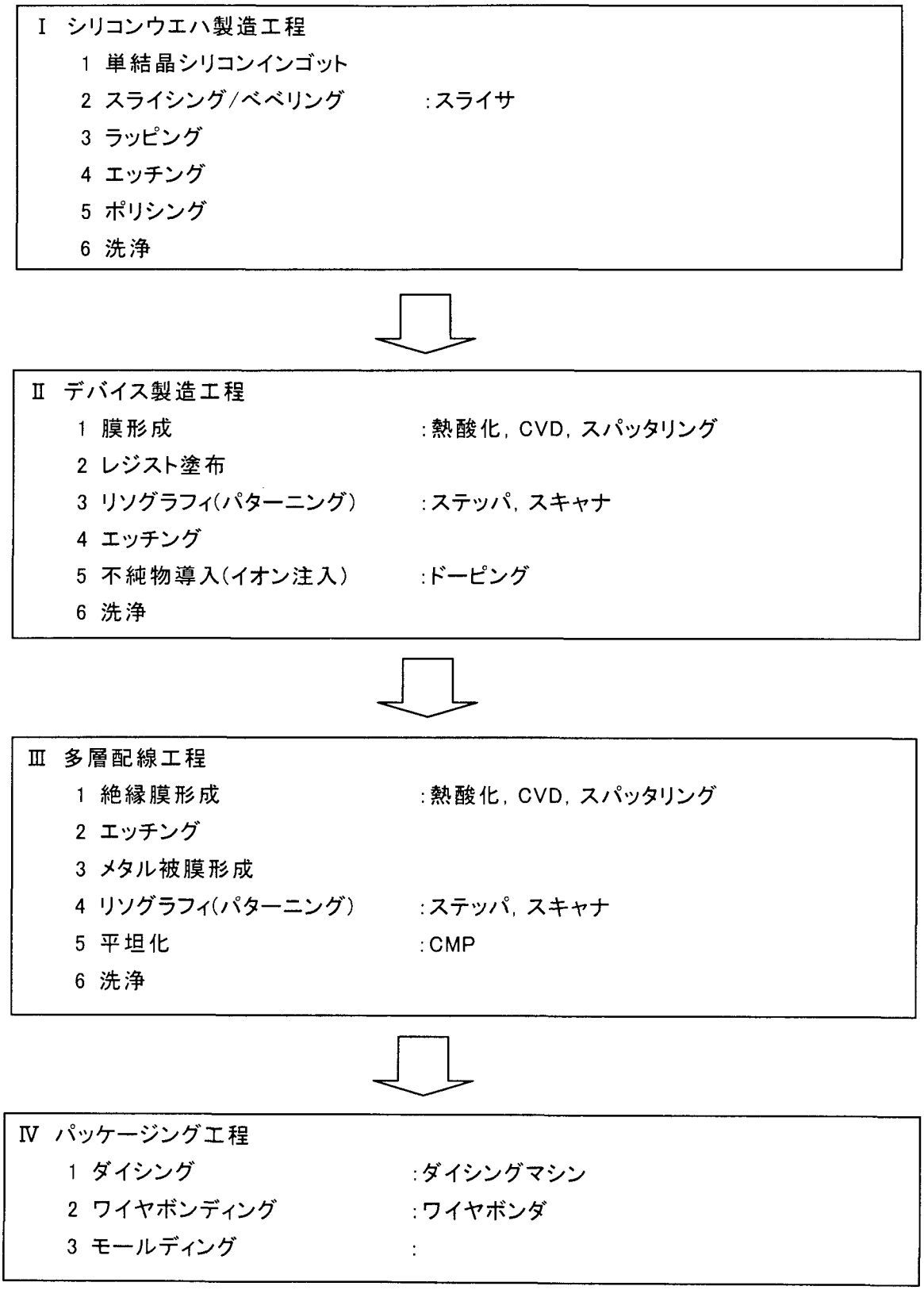


Fig. 1-2 LSIプロセスの概要

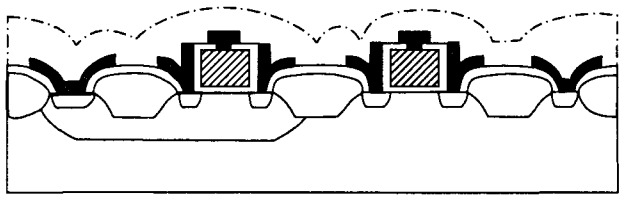


Fig. 1-3 CMOS デバイス(LOCOS 構造)

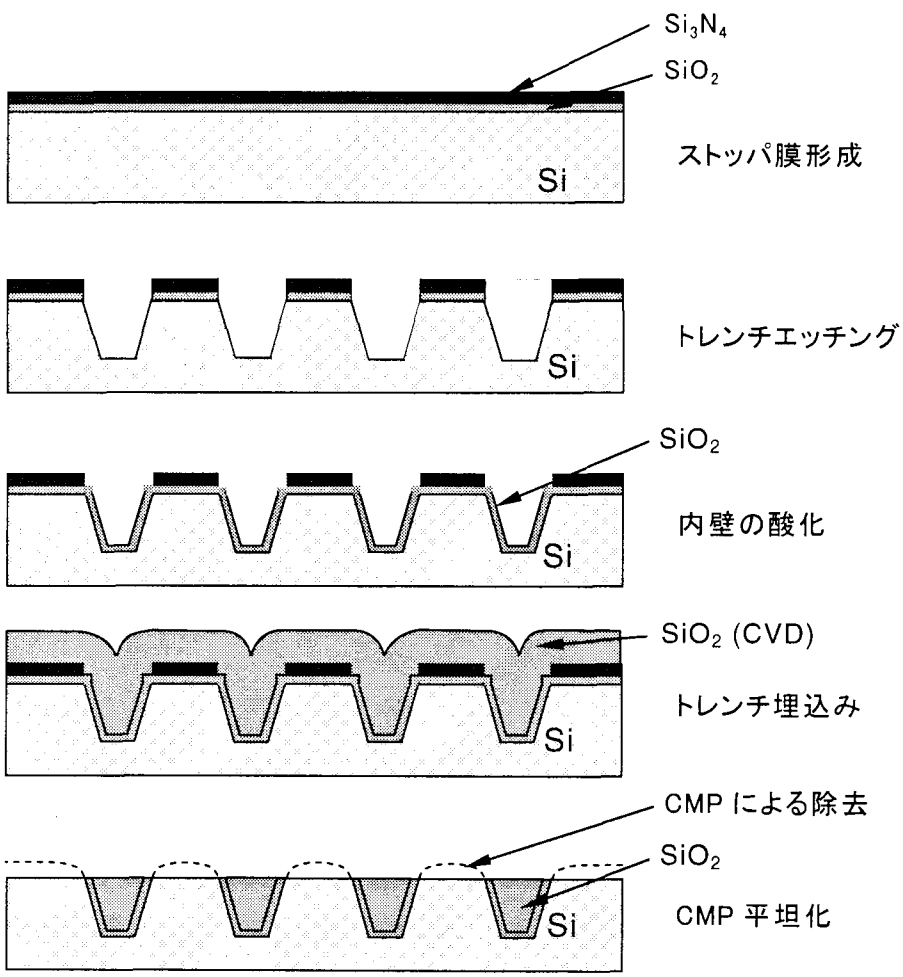
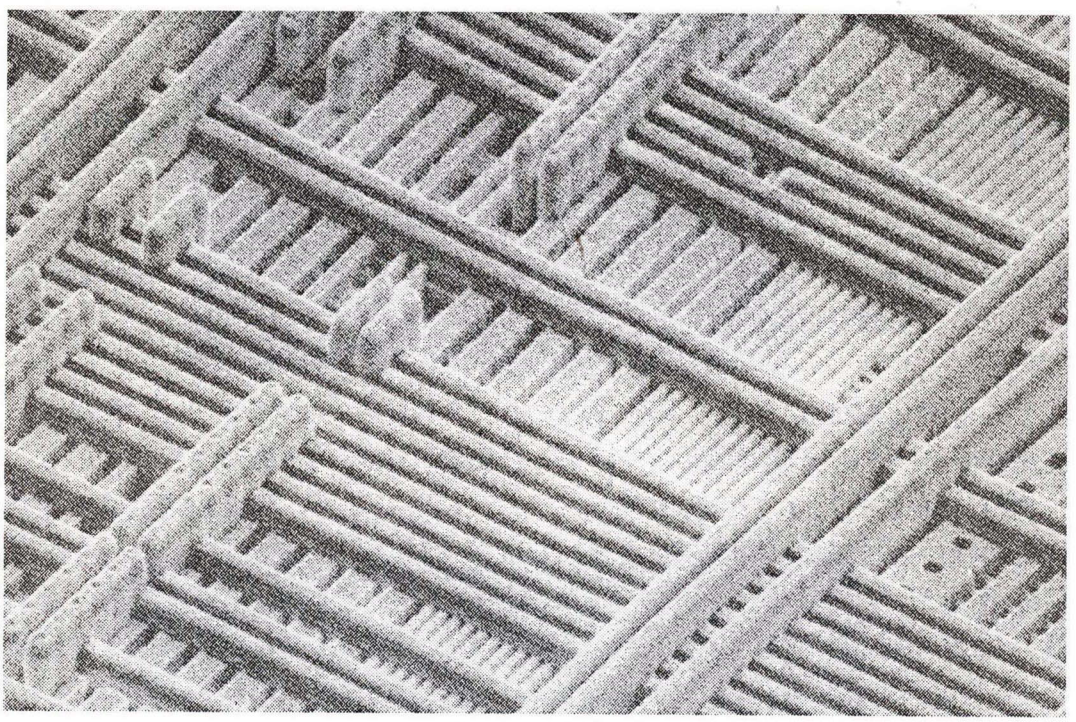


Fig. 1-4 STI の形成プロセス



Cu multi-layers interconnect
M1:W,M2-M5:Cu-Damascene, M6-M7:Al

Fig. 1-5　7 層配線 Logic ULSI の配線部

1-2-2 LSIにおける平坦化技術の必要性

LSI の高集積化にともない配線の多層化が進み，それにつれて層間絶縁膜，メタル配線層の平坦化技術の必要性が高まってきた．多層配線構造において平坦化が必要とされる理由は，次の 4 項目に要約できる．

(1) 配線の多層化にともなう段差の増大のため，絶縁膜のステップカバレージ性の低下を防止し，歩留まりを向上させる．

(2) 段差の大型化による段差斜面部での断線の防止

(3) リソグラフィ工程における投影露光レンズの焦点深度をオーバする大きな段差に起因する結像不良の防止

(4) 膜形成時に生成された余分な材料（メタル）を除去し，設計通りのデバイス構造を形成する

このように,層間絶縁膜，メタル配線層のどちらにとっても平坦化技術は必要な技術であり，特に層間絶縁膜に関する必要性は次のように考えられている．

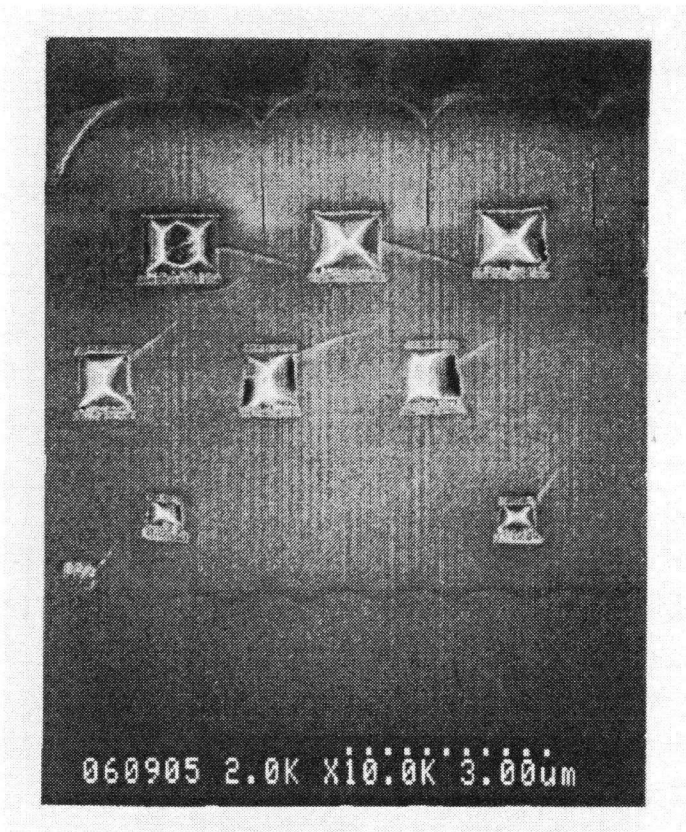
図 1-6 (a), (b) は 3 層配線構造における CMP による平坦化を行なった場合と，行なわない場合の配線構造の断面 SEM 写真を示している．Fig. 1-6(b) に示す平坦化を行わない場合は、各層での配線部を被覆する絶縁層は盛り上がり，3 層目の段差は極めて大きなものになる．このような配線構造を 6 層，7 層と積み上げていくと，絶縁層のステップ斜面部分の層厚が薄くなり，絶縁が破壊されることが危惧される．これがステップカバレージの問題である．

さらに、Al 配線部それ自体も段差斜面に形成されることもありその場合には断線の危険もある．

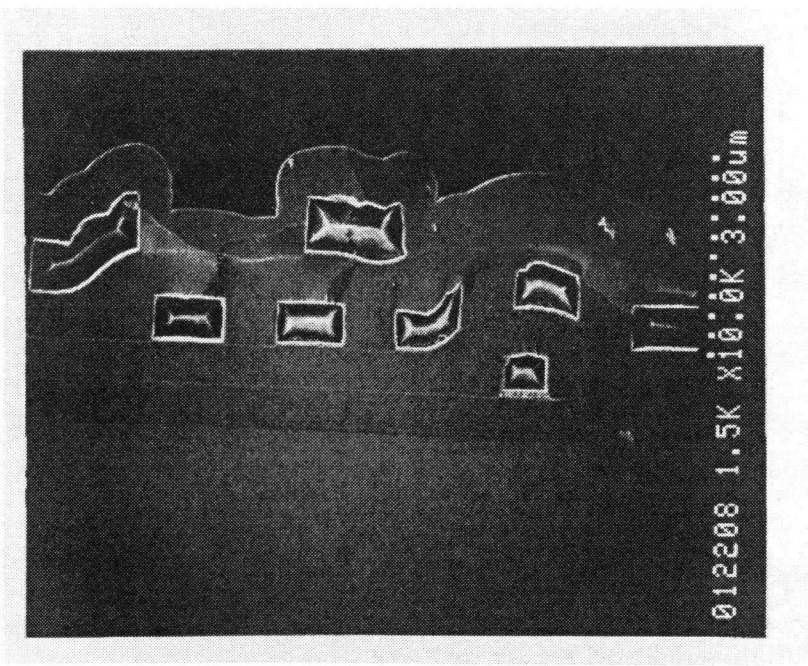
配線層の形成においては，「膜付け」→「レジスト塗布」→「パターニング」→「エッチング」のサイクルを繰り返し，配線パターンを形成していく．このとき，パターニングで使用する露光装置は高解像度の投影レンズを搭載し，投影レンズの焦点深度は極めて浅いものとなる．

Rayleigh の式 [10]より，投影レンズの解像力 R と焦点深度 DOF(Depth Of Focus) は次式で表される．ここで，k_1, k_2 はプロセスによる定数である．

$$R = k_1 * \frac{\lambda}{NA} \qquad (1\text{-}1)$$



(a)　CMP による平坦化を行なった場合



(b) CMP による平坦化を行なわない場合

Fig. 1-6　3 層配線構造における断面 SEM 写真

$$DOF = k_2 * \frac{\lambda}{NA^2} \qquad (1\text{-}2)$$

最近の投影露光装置は高解像力を得るために露光波長λは短波長化され，現在，デザインルール0.13μm用，すなわち投影解像力0.13μmのウエハステッパでは光源はKrFエキシマレーザ(λ=248nm)である．この時，光学系はNA=約0.6である．この時，DOFはきわめて小さい値となり，約500nmと言われている．装置組み立て上のさまざまな誤差を考慮すると，ウエハに要求される平坦性は130nm/1ショット領域となる．表1-1[11]はこの傾向を示したものである．デザインルール100nmでは平坦性100nm，70nmでは70nmが求められている．

一方,メタル配線層の平坦化に対しては次のように考えられている．

これまでは配線材料としてAl，Wが多用されてきたが，高集積化，微細化が進むに従い様々な問題が発生し，Cu配線が提案されている．図1-7はデザインルール0.18μm Logic LSIの配線層の断面模式図[12]を示している．デザインルールの縮小により配線幅が小さくなるため比例して配線断面積が小さくなり，その結果，電気抵抗の増大，すなわち電子移動速度の低下，大きな発熱が発生している．そのため，電気抵抗の小さいCu配線が試みられた．また，エレクトロマイグレーションの発生も抑えられ，その点でもCuは適している．

さらに，配線同士の間隔も狭くなり，SiO_2のような絶縁材料中にメタル配線を埋め込んだ場合に配線間で浮遊容量を持つことになり，それによる遅延も問題となっている．これを解決するため，絶縁材料として低誘電率をもつLow-k材料の適用が検討されている．このようにCuを配線材料として使用する場合，ビアプラグと配線ワイヤ部を同時に形成するCu Dual-Damascene法が用いられる．図1-8はこのDual-Damascene法により形成されたCu配線層の断面を示している．形成したビアホール，トレンチの表面にCuイオンの拡散防止のためにTa，TaNなどのバリア層が形成され，さらにスパッタリングによりCuシード層を形成し，電気鍍金法などによりCu層を形成する．この時，Cuは1μm程度の厚さとなり，余分なCuを除去し，設計通りのCu層構造を作らなくてはならない．この時，Ta,TaNなどのバリア層のポリシングも必要になる．この時Cu除去はRIEでは不可なのでCMPによるポリシングのみが膜構造を形成する唯一の方法となる．

Year	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2010	2013	2016
DRAM ½ Pitch (nm)	130	115	100	90	80	70	65	45	32	22
MPU ½ Pitch (nm)	150	130	107	90	80	70	65	50	35	25
DRAM Total Chip Area (mm2)	127	100	118	93	147	116	183	181	239	238
MPU Total Chip Area (mm2)	310	310	310	310	310	310	310	310	310	310
Site Flatness (nm)	≦130	≦ 115	≦ 100	≦ 90	≦ 80	≦ 70	≦ 65	≦ 45	≦ 32	≦ 22

Tab. 1-1 要求されるグローバル平坦性

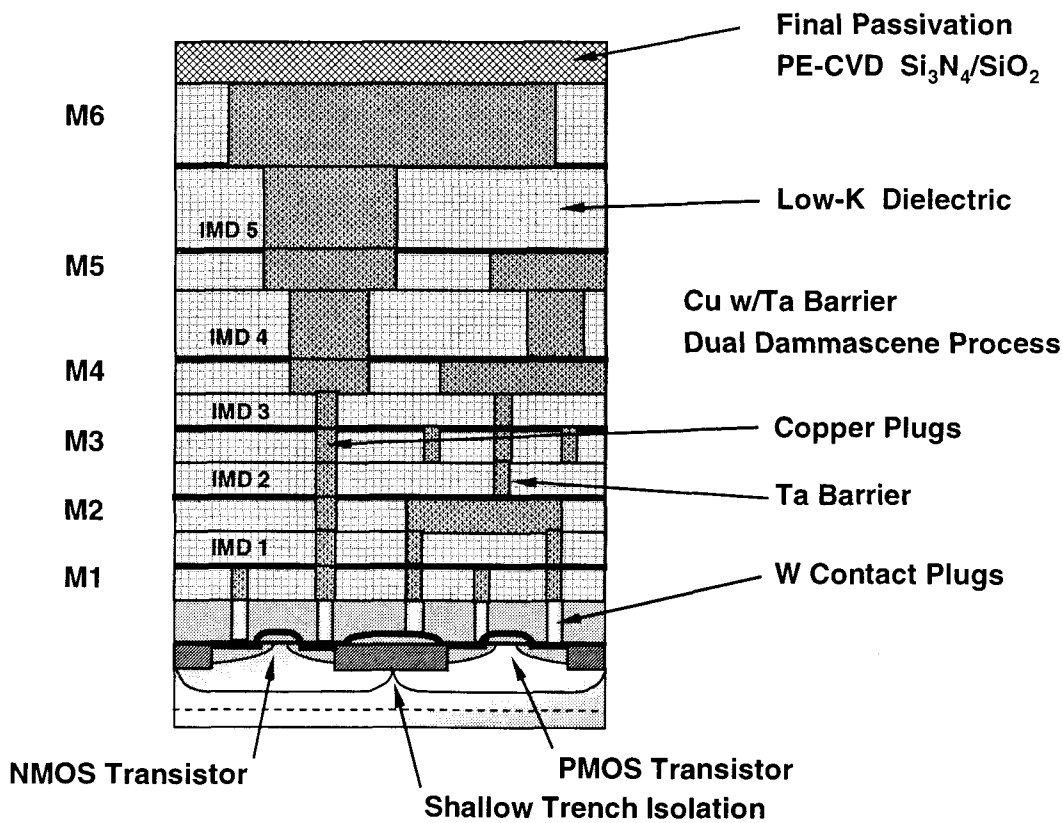


Fig. 1-7 配線層中の断面模式図

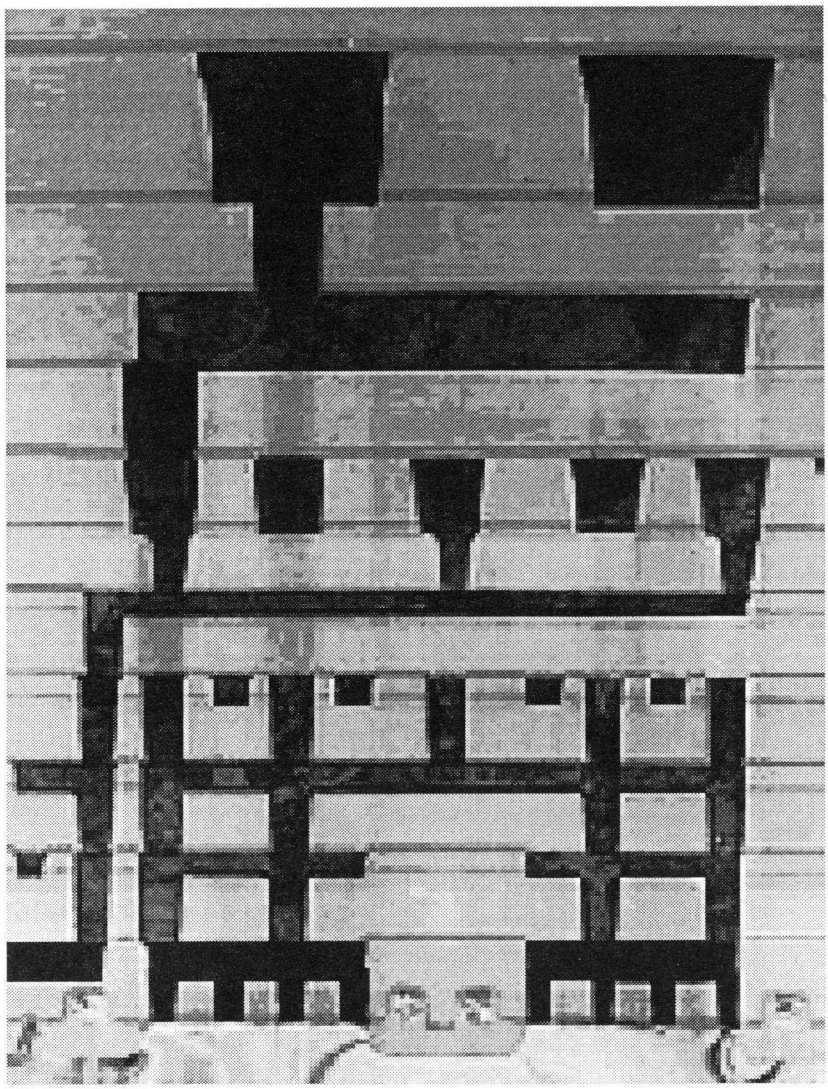


Fig. 1-8 Dual-Damascene 法により形成された Cu 配線層

1-3 本研究の目的と概要

ここまで述べたように，LSI プロセスにおける平坦化の要求はここ数年で急速に高まり，今後もさらに高度の要求が出てくるものと考えられる．平坦化を実現するCMP 加工対象は大別して次の3通りに分類される．

(1) 層間絶縁膜　　：SiO_2, P-TEOS, Low-k etc.
(2) メタル配線層　　：Cu, W, Al etc.
(3) その他，機能膜　：Si_3N_4, TaN etc.

このいずれもが技術的体系化が遅れており，将来の高精度化の要求に対して十分な対応ができているとは言えない．

本研究では，これらの中で，(1)層間絶縁膜 に焦点を絞り，より高度のグローバル平坦化を実現するため，光放射圧による微粒子集積痕を利用した平坦化法について検討した．

まず，従来からの CMP 加工技術についてサーベイした．CMP 加工技術は，この 10 年間で急速な進歩を遂げたが，基本的には従来からのポリシング技術を踏襲し，平坦性を向上させる根本的な新技術は導入されていない．ここでは，新しい平坦化技術の提案を行うため，まず，従来の CMP 技術における材料除去機構を検討し，それを基礎に平坦化プロセスを検討した．その結果として，現状のCMP 技術の問題点が明らかになり，整理された．

次に，本研究の基礎をなす光放射圧制御によるレーザ微粒子集積現象について検討した．レーザ光の波長に比較して十分大きな粒子を対象とした光放射圧制御によるレーザトラッピングに関する研究は多くなされており，光放射圧による力の発生，および，それによる粒子の捕捉現象について考察した．

さらに，光放射圧制御により形成するレーザ微粒子集積痕を CMP 加工に利用して，平坦化を実現する

『レーザ集積 CMP 法』
("LAFP method : Laser Aggregation, Filling-up and Polishing method")

について，その基本概念の考察を行った．レーザ微粒子集積痕を利用した平坦化ポリシング法としては，凹凸面の凸部に集積痕を形成し，ポリシングを行う方法と，それとは逆に，凹部に集積痕を形成し，ポリシングを行う方法とが考えられる．

次の段階として，光放射圧による微粒子のレーザ微粒子集積実験を行なった．CMP 加工で用いるスラリー中にレーザ光を照射すると，スラリー中の微粒子がレーザ光部分に集まり，最終的に基板上に集積する．本論文で扱うのはレーザ光

の波長よりも小さいコロイド粒子であり，光放射圧による微粒子捕捉現象に関する厳密な解析はなされていないが，レーザ微粒子集積の機構を推測した．

その後，シリコンウエハ表面にレーザ微粒子集積痕を形成した試料を用いて，ポリシング実験を行った．試料は，シリコンウエハ表面をそのまま平面として使用したものと，FIB 加工によりシリコンウエハ表面にトレンチ溝を形成し，そこにレーザ微粒子集積痕を形成したものとを用いた．

本研究では，シリコンウエハ表面に形成されている層間絶縁膜の平坦化において，レーザ光による光放射圧に起因するレーザ微粒子集積現象を利用した新しい平坦化法の可能性を確認し，その平坦化法を提案することを目的としている．

1-4 本論文の構成

本論文は全体で8章から成り，図 1-9 に示す構成を取っている．

第 1 章は緒論であり，本研究の背景としての LSI の製造プロセス，および，LSI の微細化，高集積化の進展にともなう平坦化技術の必要性の増大について述べた．さらに，今後の LSI の動向，および，要求されるグローバル平坦性についてその傾向を明確にした．

第 2 章はこれまでの CMP 技術の発展，および現在の技術水準を明らかにし，CMP 技術の現状について述べた．さらに，より詳細な理解のため，CMP 加工における材料除去機構を化学的，機械的観点から明らかにし，さらに凹凸面をポリシングにより平坦化するときの平坦化プロセスについて考察した

本研究の基盤的要素技術としては，

(1) 光放射圧による微粒子の捕捉,および集積に関する技術，
(2) 超精密ポリシング技術

の二つの技術が上げられる．本研究は，これらの技術を組み合わせ新しい技術としてその可能性を提示することを目的としている．

その基本的考え方を確立するため，第 3 章においては光放射圧により発生する力,および微粒子の補足について論じた．さらに，第 4 章では，これらの技術を組み合わせた平坦化のプロセスの基本概念を検討した．

第 5 章では，これらの検討を実証するため，光放射圧による微粒子集積の実験を行い，レーザ照射により微粒子が集積する状況を確認した．

第 6 章では，シリコンウエハ表面に形成したレーザ微粒子集積痕をポリシングし，そのときのポリシング面の挙動を実験的に確認した．

第 7 章では，FIB 加工により形成したシリコンウエハ表面の凹凸の凹部にレーザ微粒子集積痕を形成し,そのときの平坦化プロセスについて実験的に検討した．

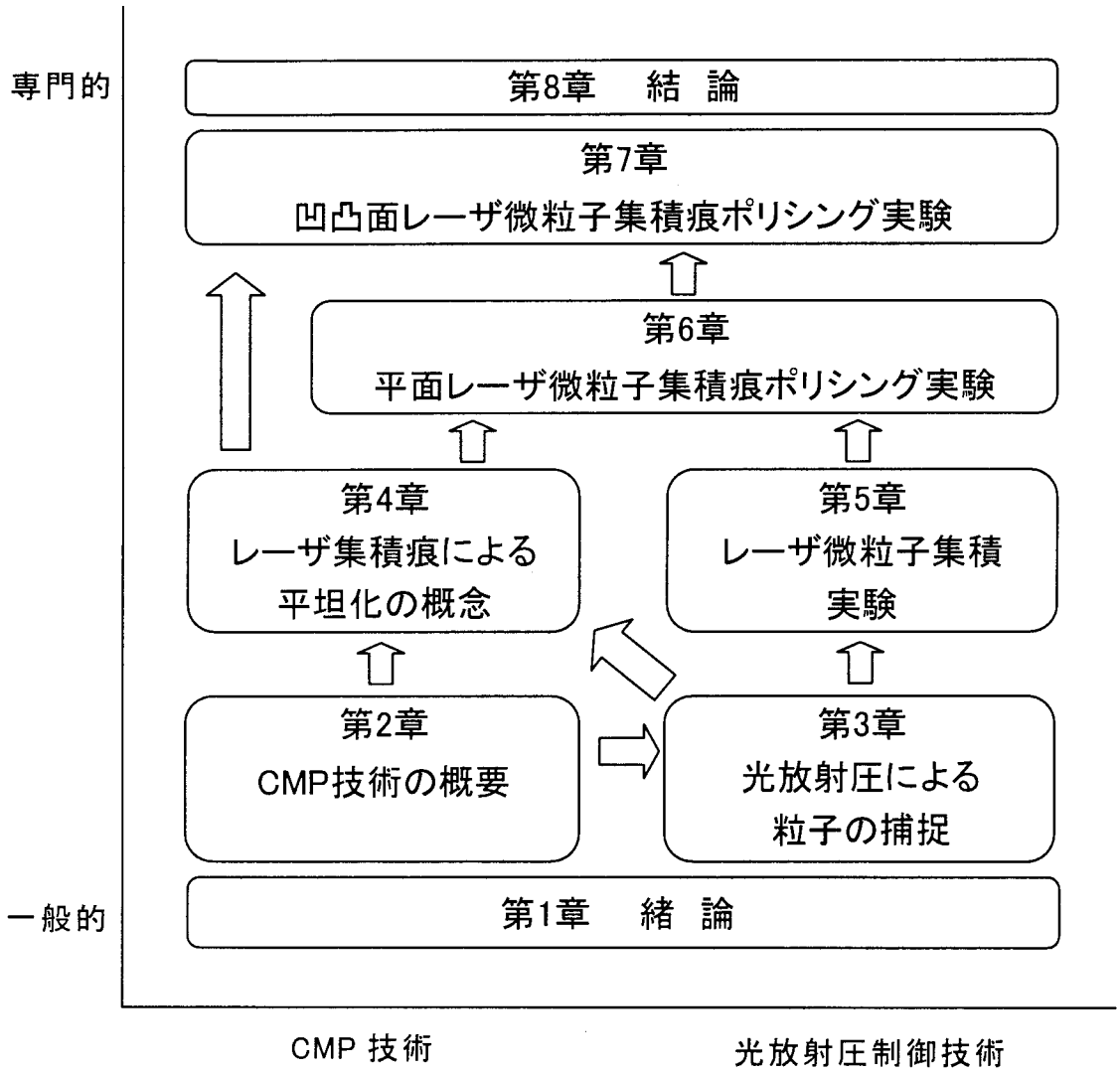


図 1-9 本論文の全体の構成

第 2 章　CMP 技術による平坦化

2-1 CMP 技術の概要

2-1-1 CMP 技術の開発経過

層間絶縁膜平坦化の重要性が認識されるにしたがいさまざまな平坦化法が試みられたが，最終的に化学的機械的ポリシングを主体とする CMP 法が注目を集めるようになった．LSI プロセス技術において CMP 技術が初めて発表されたのは 1989 年の IEDM(International Electron Devices Meeting) における IBM の B. Davari による STI 構造の形成に適用した研究 [13] であろう．その後，1991 年の VMIC(VLSI Multilevel Interconnection Conference) において IBM の R. P. Uttecht ら [14] は 4 層配線の層間絶縁膜の平坦化に CMP 技術を適用し，また，C. W. Kaanta ら [15] は Dual-Damascene プロセスの基本概念を発表し，Cu 配線の試みとともに Cu 材料に対する CMP 技術は広く注目されるところとなった．その後，これらの発表を契機に CMP 技術に関する多くの研究が発表されている．

特許に関しては，IBM による基本特許の出願は 1985 年に米国でなされ，日本では 1987 年に公開 [16), 17)] された．これらの特許の内容は 1989 年，1991 年の発表の内容とほぼ等しいと考えられる．しかし，日本においては 1980 年に富士通株式会社から V 溝部分にポリシリコンを埋め込んだ際，余剰部分を KOH 溶液を用いてポリシングにより除去するという内容で特許出願 [18] されており，1983 年には日本電気株式会社から絶縁膜の CMP 平坦化プロセスそのものがメカノケミカルポリシングという用語を用いて出願 [19] されている．

この事実は IBM 社が CMP 技術を確立する以前に，既に日本の 2 社が CMP 技術を開発し，生産に応用していたことを示している．しかし，この CMP 技術はクリーンルーム内でスラリーを使用することから，当時の半導体プロセス技術の体系では『異端』と考えられ，日本では平坦化のための普遍的技術として広く実施されることはなかった．これらの経過からわかるように，CMP 技術は超 LSI の高集積化に対応するために 1980～1990 年代にかけて試みられた新しい平坦化法であり，他の平坦化法と比較して歩留まりに優れるなどの長所があったため LSI プロセ

スにおけるキーテクノロジーとして発展を始めた.

CMP 技術はその開発初期の段階で今日問題となっている CMP 技術上の課題, すなわち, 層間絶縁膜の平坦化, Cu Dual-Damascene プロセス, および, STI 構造形成など全ての課題に関して試みられており, CMP 技術は開発の初期段階からこれらの問題解決を意図して開発された技術であることを示している.

最近のLSIプロセスにおいてはLSI構造, LSI材料の二つの面においてこれらの新しい試みが導入されようとしている. LSI のデザインルールの微細化により, より小さい面積中に, より多くのトランジスタ素子を形成しなければならず, 従来のLOCOS(Local Oxidation of Silicon)構造からSTI (Shallow Trench Isolation) 構造への転換が求められている. また, 同様に, より小さい面積中に多数の複雑な配線を行なわなければならず, 必然的に配線層数の増大が要求されている. また, 配線の細線化による配線断面積の減少に起因するエレクトロマイグレーションの発生, 配線抵抗の増大と演算時間の増大, さらに配線間距離の減少による配線間容量の増大にともなう演算時間の遅延の問題を解決するために, Cu(銅)配線, およびLow-k(低誘電率)材料の適用が図られている.

このようなCMP技術に対する新しい要求は, 1997年頃にデザインルール0.25 μm 世代のプロセス開発段階で顕在化し, 今後も, さらなる高集積化に対応することが望まれている. しかし, CMP 技術の理論的解析, 技術的体系化が十分に進んでいない現状では対応困難な部分もあり, さらなる技術開発が望まれている. 同時に, CMP 技術の基本とも言うべき面内均一性, グローバル平坦性を創成する平坦化プロセスの確立も求められている.

2-1-2 CMP 加工システム

CMP 加工は基本的に超微粒遊離砥粒を用いたポリシング加工であり，CMP 加工システムは次のユニットより構成されている．

(1) ポリシング加工ユニット
(2) シリコンウエハ搬送ユニット
(3) シリコンウエハ洗浄ユニット
(4) システム制御系ユニット

CMP 加工システムはクリーンルーム内に設置され，CMP 作業によるクリーンルーム汚染を防止するため装置全体が密閉されている．シリコンウエハはカセットのまま CMP システムに投入され，一枚ずつ取り出されて搬送ユニットにより装置内を適切に移動させる．ポリシング加工は遊離砥粒によるため，ポリシング後はシリコンウエハ表面での砥粒の残留を防止するため，洗浄を行う必要がある．

ポリシング加工ユニットは一般に図 2-1 に示す構造を持つ．CMP加工機は，大型の回転するポリシングテーブル表面にポリシングパッドを貼付し，その表面にポリシング面を下向きにしてシリコンウエハを接触させ，スラリーを供給してポリシングを行なう．この時、シリコンウエハはウエハキャリアに保持され，回転運動とともに垂直荷重を与えられる。シリコンウエハとポリシングパッド間に常にスラリーを供給するためポリシングパッドはドレッサにより常に適切な凹凸を保つようにし，ポリシング性能の維持に努めている。

スラリーは，シリカ(SiO_2)，セリア(CeO_2) などの微粒子をアルカリ性水溶液に分散させたものであり，いくつかの種類がある．表 2-1[20] に主なスラリーを示す．

層間絶縁膜のポリシングに最も多く使用されるのはシリカ系スラリーである．シリカ系スラリーの代表例であるコロイダルシリカ(Colloidal Silica) は，珪酸ナトリウム $NaSiO_2$(水ガラス)を原料とし，

$$NaSiO_2 + H_2O \rightarrow SiO_2 + NaO \qquad (2\text{-}1)$$

の化学反応で生成され,イオン交換法により調整される．コロイダルシリカは,シロキサン構造を持つ負に帯電した粒子が水中に分散してコロイド状となり，pH8～11 程度のアルカリ性で安定している．反応プロセスを制御することにより粒径 20～200nm 程度まで調整可能である．コロイダルシリカはイオン交換法により生成されるため，沈降性シリカに比べると金属汚染レベルが低く，シリコンウエハのポリシング用スラリーとして使用されてきたが，プロセス中のシリコンウエハの CMP 加工

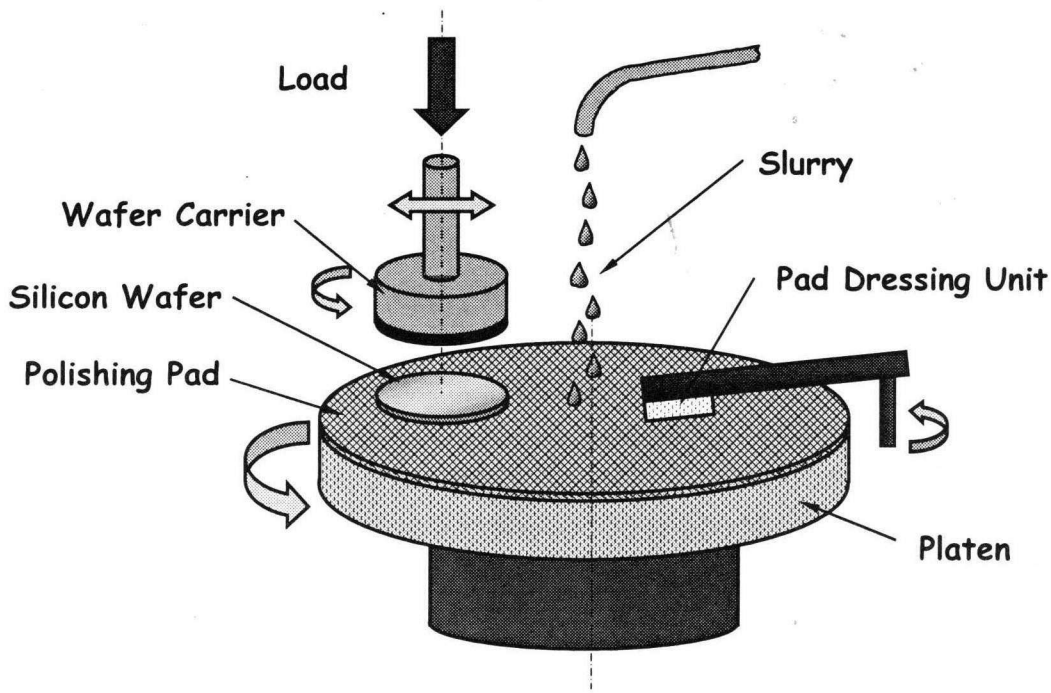


Fig. 2-1 Polishing unit

Tab. 2-1 スラリーの種類

スラリー材質		適用対象	
		CMP 加工	CMP 加工以外
SiO_2 (Silica)	沈降性シリカ		Si
	ヒュームドシリカ (Fumed Silica)	SiO_2 (ILD)	
	コロイダルシリカ (Colloidal Silica)	SiO_2 (ILD)	
	合成シリカ		
CeO_2 (Celia)	低純度セリア		
	高純度セリア	SiO_2 (ILD)	Photomask, Glass Disk
Al_2O_3		Al,Cu,W,SiO2	
ZrO_2		SiO_2 (ILD)	Si,Glass
MnO_2		SiO_2,Al,Cu,W	

Tab. 2-2 ポリシングパッドの種類と特性

ポリシングパッド				材質
独立発泡体		無気泡タイプ		ポリウレタン
	添加剤による発泡	気泡混入タイプ	充填粒子なし	
	発泡剤による発泡		充填粒子なし	
			充填粒子あり	
連続発泡体	不織布タイプ	一次樹脂処理		
		二次樹脂処理		
	スウェードタイプ	貼り合せ形		
		直接発泡形	カーボン補強	
			カーボンフリー	
二層複合体	上記2タイプの貼り合せ		高変形タイプ	
			低変形タイプ	
	スポンジ層との貼り合せ			

においては残存するNa成分を完全に除去することができておらず，現状では使われることは少ない．

一方，ヒュームドシリカ(Fumed Silica) は四塩化珪素 $SiCl_4$ を原料とし，(2-2)に示すように火炎中の酸化反応により生成され，脱塩の後，精製される．

$$SiCl_4 \rightarrow SiO_2 + HCl \qquad (2\text{-}2)$$

通常,コロイダルシリカ，ヒュームドシリカのどちらの一次粒子もおよそ20～40nm程度の粒径を持ち，スラリー中ではそれらがいくつか集まった二次凝集体として100～200nm 程度の粒径を持つ．

セリア系スラリー(CeO_2)は従来からガラスの研磨に広く用いられ高い研磨能力を示すことが知られている．しかし,高純度のものは高価であり，さらに粒子径分布が広い等の理由によりCMP加工にはあまり使用されていない．

アルミナ系スラリー(Al_2O_3) は酸化剤とともにタングステン(W)，銅(Cu)，アルミニウム(Al)などの配線用メタルのCMPに多く用いられる．

この結果,層間絶縁膜用のスラリーとしては，Na汚染の少ないヒュームドシリカが多く使用され，二次凝集径 100～200nm 程度であり，溶媒には KOH(K^+)，NH_4OH(NH_4^+) を使用して電気的に安定させている．

ポリシングパッドは発泡性ポリウレタン，ポリエステルの不織布などを素材としたシートであり，ポリシングテーブル表面に貼り付けられてスラリーとともにシリコンウエハに直接接触し,工具として作用するものである．表2-2[21]にポリシングパッドの種類と特性を示す．ポリシングパッドは弾性体であり，シリコンウエハとの接触状態，すなわち接触部の弾性変形量と応力分布がポリシング状態に大きな影響を及ぼす．通常，硬質のポリシングパッドが弾性変形量が小さく平坦性に優れているといわれているが，その一方で硬質のポリシングパッドほどスクラッチが入りやすい．これらの問題を解決するため，硬質/軟質のポリシングパッドの長所をあわせ持つように2層貼り合せのポリシングパッドも用いられている．

2-1-3 CMP 技術への要求仕様

CMP 加工はシリコンウエハのポリシングを行い,その表面を平坦化することを目的としている. そのため, CMP 加工に対する基本的な要求項目には次の4項目があげられる.

(1) シリコンウエハ全面を対象とする加工精度
(2) リソグラフィ工程における 1 ショット露光エリア内での加工精度
(3) 無欠陥のシリコンウエハ加工表面
(4) 汚染のないシリコンウエハ加工表面

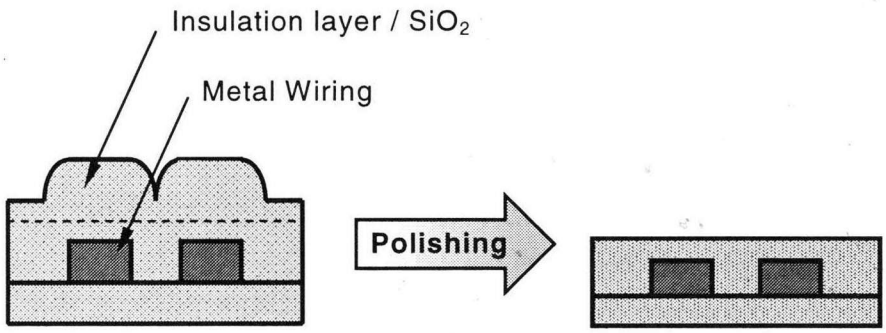
シリコンウエハ全体を対象とする加工精度に関しては, シリコンウエハ全体の膜厚分布を評価指標とする膜厚に関する「面内均一性」(WIWNU : Within Wafer Non-Uniformity) が代表的な要求仕様である. しかし, 実際に回路パターンの形成されたシリコンウエハでは, 面内均一性の評価は困難であるため, 通常はシリコンウエハ表面に P-TEOS 膜を均一に形成した評価用ウエハを CMP 加工し, 加工前後の膜厚を膜厚測定装置を用いてウエハ表面の 81 点(または 49 点)について測定し, その差を除去膜厚として分布を標準偏差(σ), または[Max-Min]法により表す. この方法は,実際のパターンウエハをポリシングするわけではないので,実際の加工パフォーマンスの評価はできず, CMP 加工装置の精度面での加工能力の評価項目として用いられているにとどまる.

1 ショット露光エリア内での加工精度は, 「グローバル平坦性」(Global Planarity) が代表的要求仕様である. 1-2-2 で述べたように, 平坦化プロセスは露光時の投影レンズの焦点深度が極めて浅いために必要とされている. それゆえ, 約□30mm の露光領域で結像を確実にする平坦性:約 200nm を達成することが重要になる.

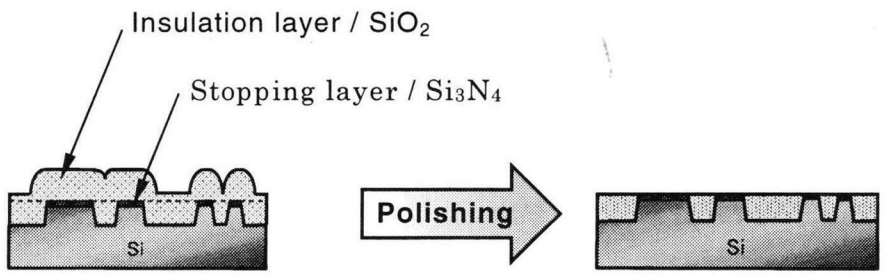
グローバル平坦性を考える場合, シリコンウエハ表面のパターンにより形成されている凹凸を微視的に把握することが必要になる.

図 2-2 (a) は ILD(Inter Layer Dielectrics) と呼ばれる層間絶縁膜の断面模式図を示している. Al などの金属配線の周囲を P-TEOS(Plasma-Tetra Ethoxy Silane) などにより CVD 被覆し, 周囲との絶縁を行う. この時, メタル配線の上部はその高さだけ凸形状となり段差が大きくなるので, 平坦化を行う必要がある. この平坦化プロセスへの要求としては, P-TEOS 層の平坦化を行い段差を小さくすることはもちろんであるが, ポリシングにより凸部を除去すると同時に所定の絶縁層を残し, 次層との絶縁性を確保しなければならない.

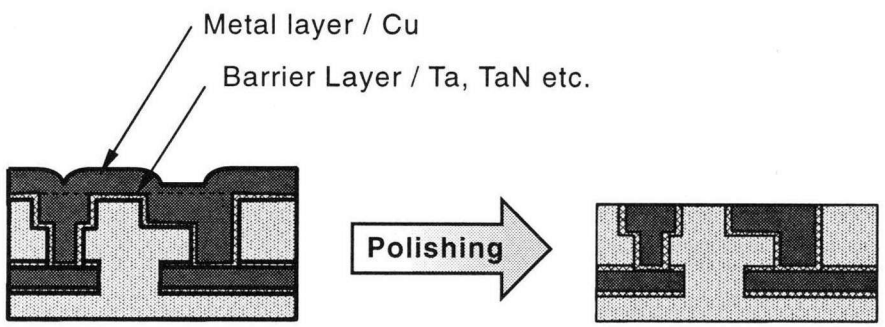
図 2-2 (b) は STI(Shallow Trench Isolation) と呼ばれる素子分離構造の断面模式図を示している. 従来は LOCOS 構造が主流であった素子分離法は, 素子の微細化の要求から STI 構造が検討されるようになってきた. STI はシリコン



(a) ILD/IMD CMP process



(b) STI CMP process



(c) Cu Dual-Damascene CMP process

Fig. 2-2 CMP 加工の適用対象

ウエハに RIE(Reactive Ion Etching) によりトレンチを形成し，そこに CVD により SiO_2を埋め込み，その後 CMP により平坦化することにより隣接領域から電気的に分離された微小活性化領域を形成する. この時,シリコンウエハの表面には Si_3N_4 膜がストッパ層として形成されており，ポリシングはストッパ層に達したときに完了する.

図 2-2 (c) は Cu(銅)配線における Dual-Damascene 構造のプロセスを示している. Dual-Damascene 構造とは金属配線部分の埋め込みにより下層の配線とのコンタクトホールと上層の配線とを同時に形成するプロセスである。エッチングでコンタクトホールとトレンチを形成し、その表面にバリア層(Ta、TaN etc.) を形成し、さらにその表面に Cu シード層を被覆し、電解メッキ法により Cu(銅)を堆積させる方法である。この時，Cu 層は約 1000nm 程度厚く堆積するため，不要部分を除去し所期の配線構造を確立する必要がある。Cu は RIE により除去することができないため、CMP での加工が唯一の除去法となる.

実際の回路パターンの上に形成された凹凸面を CMP 加工する場合には，凹凸の形状，疎密などにより平坦性が大きく影響を受ける.

最も典型的な例として，図 2-3 に示すディッシング、エロージョンがある. シリコンウエハ表面の凹部の幅が広く、そこに SiO_2 が充填されている場合、CMP 加工を行なうと周辺の Si_3N_4 部と比較して凹部の SiO_2 が急速に除去され，SiO_2 部分のみ凹形状になる。これは，同一面内に Si_3N_4 と SiO_2 という機械的性質の異なる2種類の材料が存在するため，より軟質の SiO_2 が多く除去されるために発生する現象であり、その形状から「ディッシング」(Dishing)と呼ばれる。

これとは逆に、STI のように凹凸部のパターン密度が高い場合は，異種材料からなる凹凸面全体が凹形状になる。この現象は「エロージョン」(Erosion)と呼ばれる。ディッシング，エロージョンとも平坦性の低下，配線層の機能不全につながり、グローバル平坦化を阻害する要因として CMP 加工上の大きな問題である。

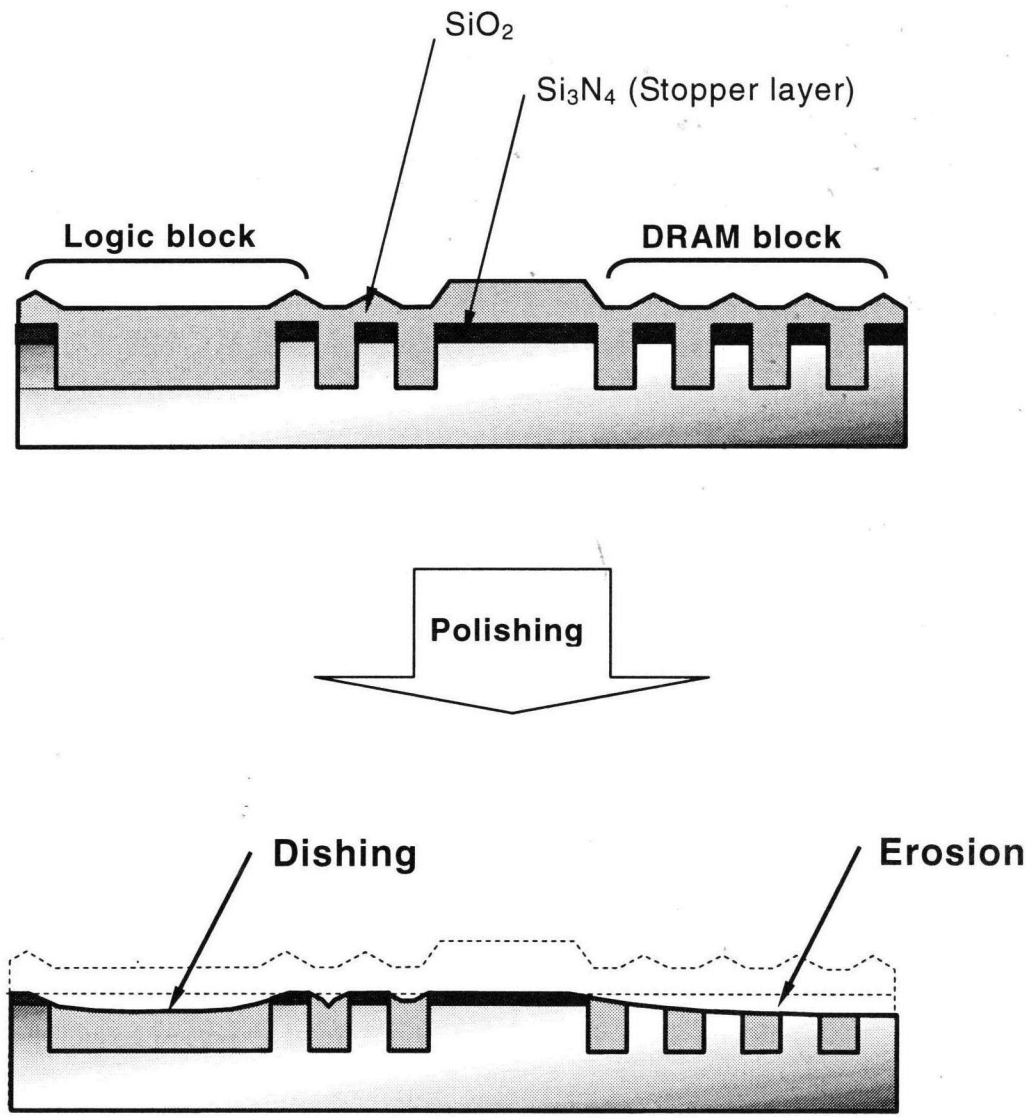


Fig. 2-3 平坦化におけるディッシングとエロージョン

2-2 CMP 加工における材料除去機構

ポリシングは古くからガラス研磨，レンズ研磨などの精密加工に適用され，その材料除去機構についてはさまざまな観点から多くの検討がなされてきた.その多くは砥粒の機械的作用，すなわち微小砥粒によるスクラッチおよびマイクロクラック発生説，および表面流動説を基礎とする考察が多かった。

その中で,ポリシング加工におけるポリシング条件と材料除去の関係を示す式として Preston の式[22] が知られている。Preston の式によれば，除去量:M はポリシング圧力:p，ポリシング速度:v，ポリシング時間:t に比例する。この考え方は直感的には受け入れやすいものであるが、この式は実験式であり定量的な材料除去機構の検討から導かれた式ではないため詳細な技術的議論は困難である。

$$M = \eta \cdot p \cdot v \cdot t \qquad (2\text{-}3)$$

一方,泉谷[23),24)] による光学レンズのポリシングに関する詳細な検討で明らかにされたように，ポリシングによる材料除去はポリシャ，研磨液，ガラス間の化学反応により行われ，ガラスの研磨特性はガラス表面に形成される水和層の硬度によって決定されると考えられる.

ガラスとしての SiO_2 のポリシングによる除去機構については、Cook[25)] による詳細な解析が知られている。CMP における層間絶縁膜は SiO_2 または SiO_2 系材料から構成されており，そのポリシングは本質的にガラスのポリシングと等しいと考えられる. 図 2-4 は Cook により示されたガラスの除去機構をシリコンウエハに拡張し模式的に示した.

シリコンウエハ表面の SiO_2 はシロキサン結合をしており、スラリー中の水分子と反応して表面に水和層を形成する。

$$(SiO_2)_x + 2H_2O \rightleftarrows (SiO_2)_{x-1} + Si(OH)_4 \qquad (2\text{-}4)$$

この水和層に砥粒が作用し、荷重下ですべり運動を行なうと、砥粒近傍では応力場が発生して砥粒進行方向先端では静水圧と圧縮応力が作用するとともに，温度上昇を示す。この時、SiO_2 表面で次の反応が発生し，溶解現象が進行する。

$$\equiv Si-O-Si\equiv + H_2O \rightleftarrows 2\equiv Si-OH \qquad (2\text{-}5)$$

さらに pH 値が高い場合には，溶液中の OH 基により H+が取られ,次式のように≡Si－O が生成される.

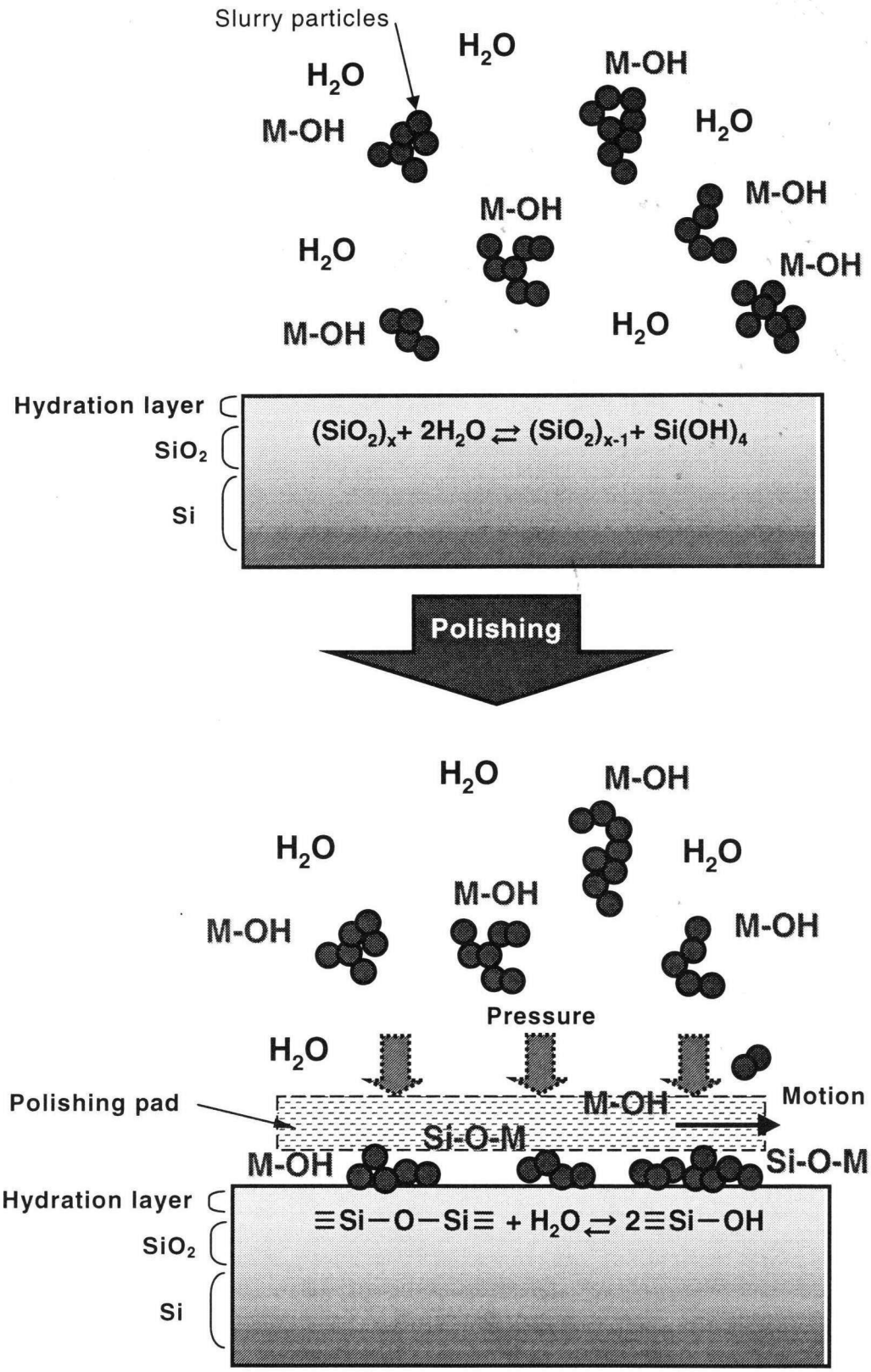


Fig. 2-4 ポリシングにおける SiO_2 の除去機構の模式図

$$\equiv Si-OH_2 \rightleftarrows \equiv Si-OH \rightleftarrows \equiv Si-O^- \qquad (2\text{-}6)$$

一方,スラリー中の金属微粒子をMとした時,アルカリ中の微粒子Mの表面では M-OH 結合ができ,さらに Si-O-M 結合が形成される.この時,パッドの移動により微粒子に歪が作用すると, Si-O結合とO-M結合のうち強い結合は残り,弱い結合部で切断される.このことから,スラリー中の微粒子の材質の違いによるポリシング能力の差は微粒子表面のM-OH結合の密度とO-M結合の強さの違いによるものと推定される.この結果,スラリー中の微粒子表面での -OH 結合が多いほど研磨面の SiO_2 との結合する比率が増え,ポリシング量が増大することになる.

2-3 CMP加工における平坦化プロセス

層間絶縁膜におけるCMP加工では膜厚1μm程度のSiO_2膜を200～300nm程度の深さで除去加工し，面内均一性，グローバル平坦性を確保するとともに，極めて滑らかな表面粗さと欠陥のないポリシング面を実現することが要求されている．そのため,材料除去においては極めて小さい加工単位が必要であり,CMP加工では化学的作用と微小粒子を用いた機械的ポリシングによりそれを実現している．

一般に，表面に凹凸を持つ材料を平坦化するには，図 2-5 に示すように，

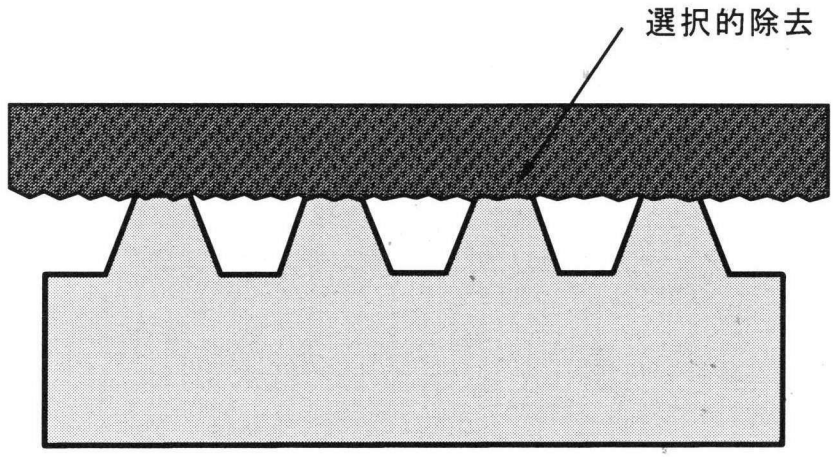
(a) 凸部の選択的除去による平坦化
(b) 凹部の埋め立てによる平坦化

の2つの方法が考えられる．

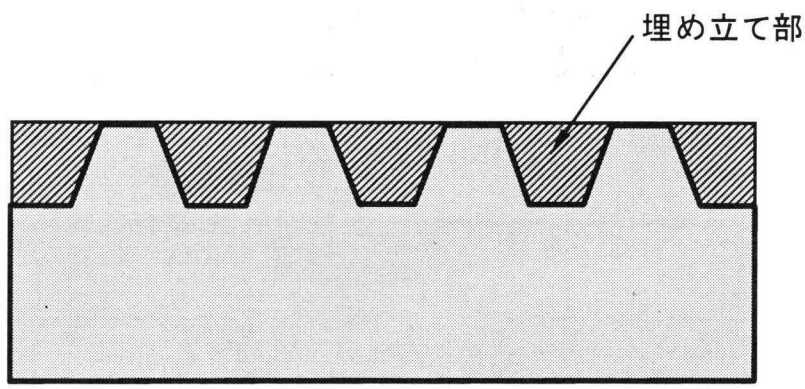
(a) に示した凸部の選択的除去とは，凸部の頂上部のみを除去する加工法であり，一般的に除去加工による平坦化はこの方法を意図している．しかし，ポリシング加工においては凸部のみを選択的に除去しようとしても凹部底面も同時に除去されてしまい，凸部のみの選択的除去は難しい．図 2-6 は，凹凸面をポリシングしたときの段差緩和プロセスを模式的に示したものである．当初，高度 s の位置にあった凸部頂上はポリシングが進むにしたがい凹面底部の高度 v に向かって低下していく．同時に，凹部底面も材料除去が進み，その位置は低下していく．やがて，凸部の頂上が初めの高度 v の位置まで低下した時には，凹部底面は高度 b の位置まで低下する．平坦化は凸部頂上の材料除去速度と凹部底面の材料除去速度との差により進行して行くが，通常は両者の速度差は小さく平坦化は容易には達成されない．

一般的にシリコンウエハ表面とポリシングパッドの接触状態は図 2-7 に示すように理想化されて考えられている．シリコンウエハ凹凸面の凸部頂上とポリシングパッドは限定された領域で弾性接触していると考えられており，シリコンウエハの凹凸に応じて応力が発生し，応力の大きい部分では除去量も大きくなるという経験則により平坦化が進むと考えられていた．平坦化を進めるには弾性変形の小さい高剛性の硬質ポリシングパッドを使用すればいいと考えられているが，その場合でも凹面底部のポリシングは進み,段差緩和は緩やかなものであった．

図 2-8 はシリコンウエハとポリシングパッドの実際の接触状態の模式図である．シリコンウエハ表面は 1μm 程度の凹凸を持ち，その水平面内での幅はサブμmから数 10μm 程度である．一方，ポリシングパッドは多孔質ポリウレタンなどで形成されており，スラリー保持，およびポリシング屑排出のため，表面は幅，深さとも20～40μm程度の大きな凹凸を有し，さらにドレッシングにより表面に繊維状の

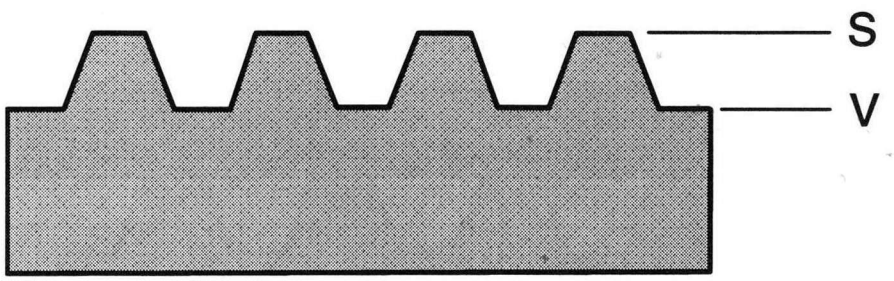


(a) 凸部の選択手的除去による平坦化

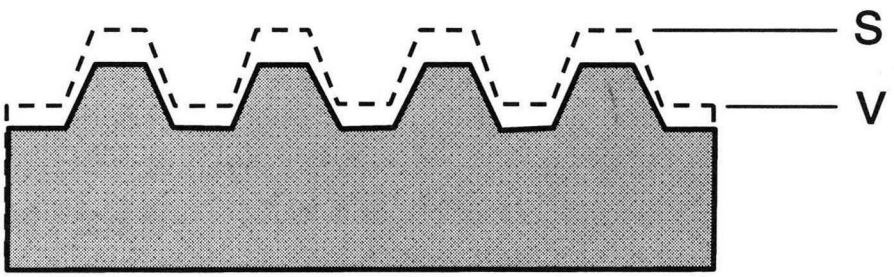


(b) 凹部の埋め立てによる平坦化

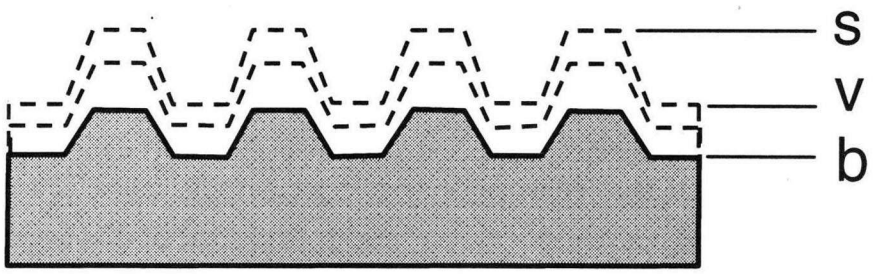
Fig. 2-5 凹凸面の平坦化法



(a) ポリシング前



(b) ポリシング中



(a) ポリシング後

Fig. 2-6 凹凸面をポリシングしたときの段差緩和プロセス

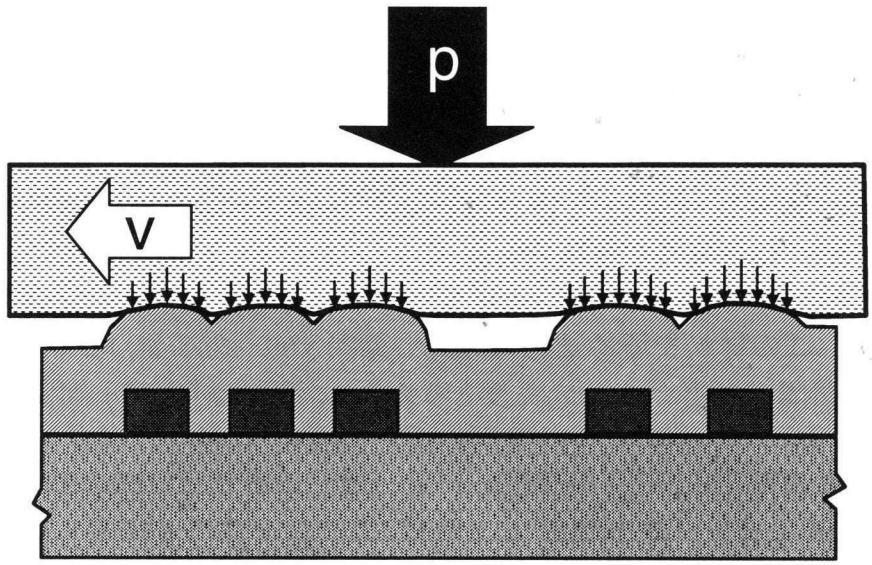


Fig. 2-7 シリコンウエハとポリシングパッドの接触状態モデル

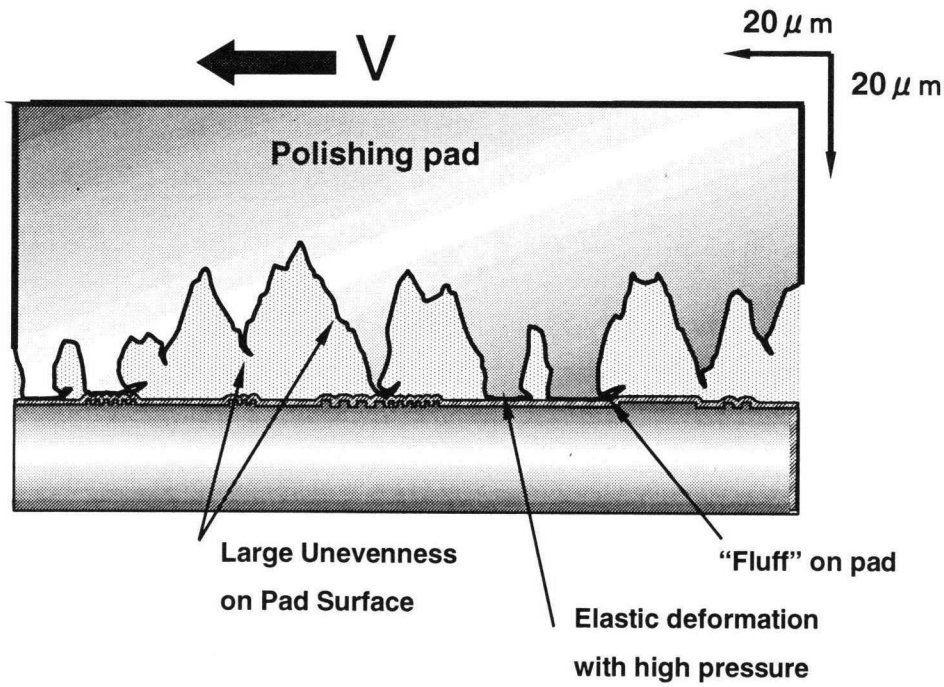


Fig. 2-8 シリコンウエハとポリシングパッドの実際の接触状態

毛羽立ちを形成している. その結果, シリコンウエハに接触するのはポリシングパッド表面の繊維状の部分であり, この繊維状部分は周囲の状況により容易に変形するためポリシングパッドとシリコンウエハとの接触位置は特定できない. それ故, 凸部の頂上, 凹部の底面ともポリシングパッド表面の繊維部分と接触し, わずかにその接触確率, および接触応力が異なるため, 凸部の材料除去速度が多少大きく, 緩やかに平坦化が進行するという現象が発生する. この結果, 通常のポリシング作業では, 凸部と同時に凹部の材料除去も進むので短時間で平坦化を実現することはきわめて困難である.

(b)に示した凹部の埋め立てによる平坦化とは, 凹部に外部から材料を埋め込む方法である. この材料を埋め込む寸法は, 深さ 100～500nm, 幅 1～数 10 μm 程度, ピッチ間隔 1～数 10 μm 程度と考えられ, 通常は「成膜→エッチング」工程以外にこのような微小領域に高精度の埋め立てを行う方法はない. しかし, 凹部底面の除去作用を止めるという観点から、まず、埋め立てを行って凹部底面をマスクした後, エッチング等の除去加工法により余分な部分を除去し平坦面を得るという2段階のプロセスが実行可能であるならば、高度の平坦化の可能性が予測される.

この検討の結果, 凹凸面の平坦化加工を行なうためには,

［Ⅰ］凸部を除去すると同時に、凹部底面の加工の進行を止める

または,

［Ⅱ］凹部を埋め立て、その後, 余分な部分の除去, 平坦化を行う

ことが必要となる.

第 3 章　光放射圧制御による粒子の捕捉

3-1 緒 言

古くから「光」は一様な媒質中では直進し，鏡やプリズム，レンズにより反射，屈折することが知られていた．この光の直進，反射，屈折という性質を取り扱うための基本概念として光を「光線」として考える幾何光学が確立された．

しかし，その後，光の回折，干渉，偏光等のさまざまな性質を説明するため物理光学が確立され，J. C. Maxwell によって光は波長およそ 10Å～1mm の電磁波であるということが明らかにされた．

さらに，20 世紀に入ると，J. Stark, A. Einstein により光量子仮説が提案され，光はエネルギーを持つ質量 0 の粒子（フォトン，光量子）であり，振動数 ν の光の伝播は $h\nu$ のエネルギーを持ち，進行方向に $h\nu/c$ の運動量を持つと考えられるようになった．(h:プランク定数)

フォトンの持つ運動量に基づく力を「光放射圧」と呼び，フォトンと物質の相互作用により屈折，反射，散乱といった現象により発生する．また、「光放射圧」は電磁波が物体の表面に及ぼす圧力とも考えられ，その存在は J. C. Maxwell により予言され，1899年に P. N. Lebedev の実験によりその存在が確認された．

光放射圧による粒子の捕捉は，1970 年に Ashkin[26] らによって行なわれた 2 光束による誘電体微粒子の捕捉実験に始まる．その後，1 本の光束で微粒子を捕捉するレーザトラッピング技術が開発され [27]，さまざまな応用の試みがなされてきた．これらの試みとして，微生物等に対してレーザ光放射圧による無損傷の補足 [28] を可能にし，また，マイクロ構造デバイス [29]，計測プローブ [30] などが提案されている．

第 3 章では，光放射圧により発生する力の発生プロセスを検討し，光放射圧による誘電体粒子の捕捉現象を検討した．次に，光放射圧による微粒子の捕捉，および集積のメカニズムについて考察した．

3-2 光放射圧により発生する力 [31), 32)]

光線はフォトンの流れとみなすことができ，運動量を持つ粒子の流れと考えられる．そのため，光線の進行方向が変化するときには運動量変化が起こり，それにともない力が発生する．

フォトン1個が持つ運動量は次式で表されることは知られている．

$$hk/2\pi \tag{3-1}$$

ここで，

h ： プランク定数，
k ： 波数ベクトル($|k|=2\pi n/\lambda$)
λ ： 真空中の光の波長
n ： 媒質の屈折率

光束はこのような運動量を持つ多数のフォトンにより構成されている．フォトン1個のエネルギーは $h\nu$ で表されるので，単位時間当たりエネルギー E を持つ光束のフォトンの数は次式で与えられる．

$$E / h\nu \tag{3-2}$$

E ： 単位時間当たりのエネルギー
ν ： 光の振動数

式 (3-1), (3-2) より単位時間当たりのエネルギー E の光束の持つ時間当たりの運動量を求めると，

$$nE / c \tag{3-3}$$

となり，運動量の方向は光束の進行方向と一致している．式(3-3) より，光束の持つ単位時間当たりの運動量の大きさは，光束のエネルギー E と屈折率 n のみに依存し，光の波長に無関係であることがわかる．

異なる媒質の界面に光束が入射すると，反射，屈折などにより光束の方向が変化する．それにともない，光束の持つ運動量が変化し，放射圧が発生する．

まず，光束が媒質の界面に入射し，反射した場合に発生する放射圧について考える．図 3-1 は単位時間あたり E のエネルギーを持つ光束が反射面で反射

する場合を示している. 入射角 ϕ で入射した光束は正反射し, 運動量は不変であるがその方向が p から p' に変化するため, 光放射圧 Fz が発生する. Fz は z 軸方向の単位時間あたりの運動量変化に等しいので, 次式で与えられる.

$$Fz = \frac{2\,n\,E}{c}\cos\phi \tag{3-4}$$

Fz は反射面を押す方向に作用し, y 軸方向の運動量変化はないので y 軸方向には力は発生しない.

次に, 誘電体表面に単位時間当たりエネルギーE を持つ光束が入射する場合について考える. 図 3-2 に示すように, 界面の両側で屈折率 n_1, n_2 の二つの媒質が存在し, n_1 側から n_2 側に入射する場合について考える.

入射光の p 偏光, s 偏光のそれぞれの成分の運動量は(3-3)より,

$$\langle p_p \rangle = \frac{n_1 E_p}{c} \quad , \quad \langle p_s \rangle = \frac{n_1 E_s}{c} \tag{3-5}$$

と与えられる.

E_p, E_s は p 偏光, s 偏光の単位時間あたりのエネルギー, 〈 〉は時間平均を表す. 反射光の運動量 p', 屈折光の運動量 p" は、反射率 R_p, R_s, 透過率 T_p, T_s として、次式のように表される。

$$\langle p_p' \rangle = \frac{n_1 R_p E_p}{c} \quad , \quad \langle p_s' \rangle = \frac{n_1 R_s E_s}{c} \tag{3-6}$$

$$\langle p_p'' \rangle = \frac{n_2 T_p E_p}{c} \quad , \quad \langle p_s'' \rangle = \frac{n_2 T_s E_s}{c} \tag{3-7}$$

反射率 R_p, R_s, 透過率 T_p, T_s は Fresnel の振幅反射率 r_p, r_s を用いて次のように与えられる.

$$R_p = |r_p|^2 \quad , \quad R_s = |r_s|^2 \tag{3-8}$$

$$T_p = 1 - R_p \quad , \quad T_s = 1 - R_s \tag{3-9}$$

ここで, ϕ, ϕ' は入射角と屈折角であり, r_p, r_s, t_p, t_s は次式の通りである.

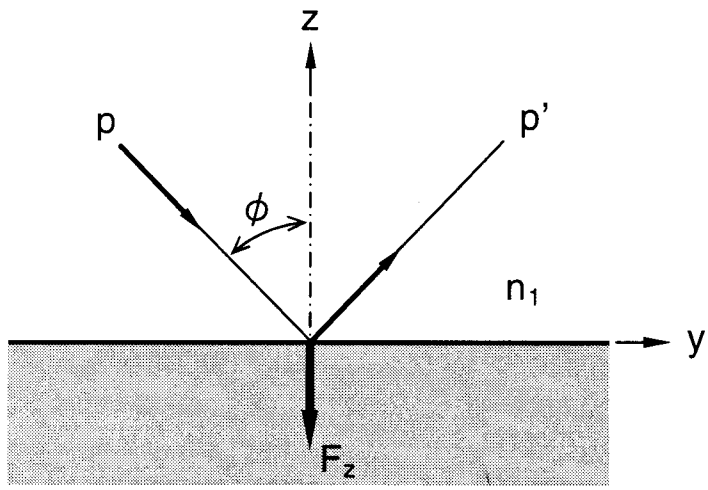


Fig. 3-1 反射面で発生する放射圧

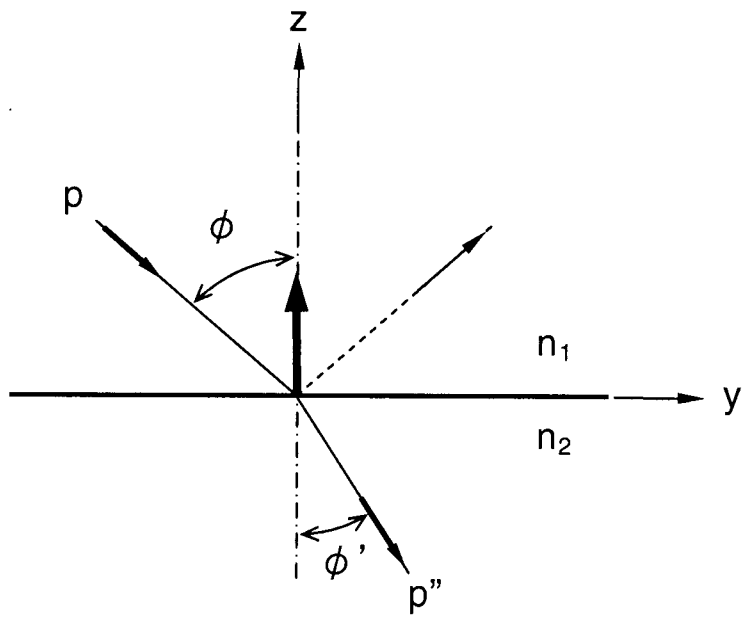


Fig. 3-2 界面で屈折する場合の放射圧

$$r_p = \frac{\sin\phi\cos\phi - \sin\phi'\cos\phi'}{\sin\phi\cos\phi + \sin\phi'\cos\phi'} \tag{3-10}$$

$$r_s = \frac{-\sin\phi\cos\phi' + \sin\phi'\cos\phi}{\sin\phi\cos\phi' + \sin\phi'\cos\phi} \tag{3-11}$$

$$t_p = \frac{2\sin\phi'\cos\phi}{\sin\phi\cos\phi + \sin\phi'\cos\phi'} \tag{3-12}$$

$$t_s = \frac{2\sin\phi'\cos\phi}{\sin\phi\cos\phi' + \sin\phi'\cos\phi} \tag{3-13}$$

入射光の運動量のz成分は,

$$p_{pz} = p_p\cos\phi \quad , \quad p_{sz} = p_s\cos\phi \tag{3-14}$$

$$p_{py} = p_p\sin\phi \quad , \quad p_{sy} = p_s\sin\phi \tag{3-15}$$

であり, 反射光, 屈折光の運動量の各成分は(3-6), (3-7)より, 次のようになる.

$$\langle p'_{pz}\rangle = \frac{n_1 R_p E_p}{c}\cos\phi \ , \ \langle p'_{sz}\rangle = \frac{n_1 R_s E_s}{c}\cos\phi \tag{3-16}$$

$$\langle p''_{pz}\rangle = \frac{n_2 T_p E_p}{c}\cos\phi' , \ \langle p''_{sz}\rangle = \frac{n_2 T_s E_s}{c}\cos\phi' \tag{3-17}$$

$$\langle p'_{py}\rangle = \frac{n_1 R_p E_p}{c}\sin\phi \ , \ \langle p'_{sy}\rangle = \frac{n_1 R_s E_s}{c}\sin\phi \tag{3-18}$$

$$\langle p''_{py}\rangle = \frac{n_2 T_p E_p}{c}\sin\phi' , \ \langle p''_{sy}\rangle = \frac{n_2 T_s E_s}{c}\sin\phi' \tag{3-19}$$

二つの媒質の界面に垂直な方向(z 方向)に関する運動方程式は, 次のようになる.

$$p_{pz} = -p'_{pz} + p''_{pz} - \Delta t\, F_{pz} \tag{3-20}$$

$$p_{sz} = -p'_{sz} + p''_{sz} - \Delta t\, F_{sz} \tag{3-21}$$

$$p_{py} = -p'_{py} + p''_{py} - \Delta t\, F_{py} \tag{3-22}$$

$$p_{sy} = -p'_{sy} + p''_{sy} - \Delta t\, F_{sy} \tag{3-23}$$

(3-16)～(3-23) より、発生する力 F は, 次の通り求められる.

$$F_{pz} = \frac{E_p}{c}(n_2 T_p\cos\phi' - n_1 R_p\cos\phi - n_1 \cos\phi) \qquad (3\text{-}24)$$

$$F_{sz} = \frac{E_s}{c}(n_2 T_s\cos\phi' - n_1 R_s\cos\phi - n_1 \cos\phi) \qquad (3\text{-}25)$$

$$F_{py} = \frac{E_p}{c}(n_2 T_p\sin\phi' - n_1 R_p\sin\phi - n_1 \sin\phi) \qquad (3\text{-}26)$$

$$F_{sy} = \frac{E_s}{c}(n_2 T_s\sin\phi' - n_1 R_s\sin\phi - n_1 \sin\phi) \qquad (3\text{-}27)$$

(3-24), (3-25)式に Fresnel の反射率, 透過率を代入すると, 界面に発生する力 F は, P 偏光, S 偏光に対応して次式のように求められる。

$$F_{pz} = \frac{2 E_p n_1 \cos\phi \sin^2\phi (n_2^2-n_1^2) (\sin^2\phi +\cos^2\phi')}{c n_2^2(\sin\phi\cos\phi +\sin\phi'\cos\phi')^2} \qquad (3\text{-}28)$$

$$F_{sz} = \frac{2 E_s n_1 \cos\phi \sin^2\phi (n_2^2-n_1^2)}{c n_2^2(\sin\phi\cos\phi' +\sin\phi'\cos\phi)^2} \qquad (3\text{-}29)$$

ここで, (3-26), (3-27)式に Snell の法則を適用すると,

$$\sin\phi' = \frac{n_1}{n_2}\sin\phi \qquad (3\text{-}30)$$

より, y 軸方向の力は次のようになる.

$$F_{py} = 0 \quad , \quad F_{sy} = 0 \qquad (3\text{-}31)$$

この結果は, 光が屈折する場合にも y 軸方向には力が発生しないことを示しており, 光放射圧による力の発生方向は常に光の入射面に対して垂直(法線)方向であることを示している.

さらに, 光線が反射する場合は界面に垂直, かつ反射体を押す方向に力が発生し, 光線が屈折する場合は界面に垂直で屈折体を引っ張る方向に力が作用する.

3-3　光放射圧による粒子の捕捉[31),32)]

3-2 の考察により，光を透過する誘電体粒子表面に直径が無限小の1本の光線が入射しその光線が反射，屈折するとき，光線を構成するフォトンの運動量の変化により力が発生することが理解できた．この力は，光線が反射する場合には反射面に垂直かつ反射面を持つ物体内部方向に作用し，光線が屈折する場合には屈折面に垂直かつ物体外部方向に力が発生する．有限の広がりを持つ光束が入射する場合は，その光束が多数の無限小の光線束であると考えれば，反射と屈折は粒子表面において同時に発生し，それによりさまざまな力が同時に作用するが，最終的にはそれらの合力として界面に対して垂直な内向き，または外向きの力が残る．この力が粒子に作用する捕捉力となる．

図 3-3 は，収束レーザ光の焦点付近に微小球体が位置する場合の，粒子に作用する捕捉力について示している．レーザ光は上方から入射し，対物レンズを通ってビームウエスト O で焦点を結ぶ．この時，粒子の屈折率(n_2)は周囲の媒質の屈折率(n_1) より大きい($n_2>n_1$) とする．既に 3-2 で述べたように，粒子表面にレーザ光が入射し，反射，屈折を行うことによりフォトンの運動量変化にともなう力が発生する．この時，レーザ光が反射する場合には界面に垂直で粒子中心方向の力が働き，屈折する場合には界面に垂直で外向きの力が発生する．これらの反射，屈折は同時に起こり，力は合力として表面に対する垂直内向き，または外向きの力が残る．

光軸付近の入射光線は屈折角が小さく，反射により発生する力が支配的となり，粒子を下向きに押す力が発生する．逆に，図 3-3 中の光線 A,B のような周辺光では屈折により発生する力が支配的となり，f_A, f_B のような粒子を引き上げる力が発生する．粒子全体で考えると，光軸付近での押し下げようとする力と周辺での引き上げようとする力との合力が作用することになるが，周辺光の影響が大きい場合には粒子を引き上げようとする力が発生することになる．

また，図 3-3 のように光軸に対して粒子が左側にずれている場合を考えると，B 光線よりも A 光線の屈折角が大きく，B 光線により発生する力よりも A 光線により発生する力のほうが大きくなり，結果として右方向，すなわち粒子を光軸方向に移動させる力が作用することになる．

最終的には，これらの力の合成として，図 3-3 の F で示す力が発生する．この力が粒子を光軸上に保ち，押し下げ力と引き上げ力のバランスする位置に移動させようとする力となる．

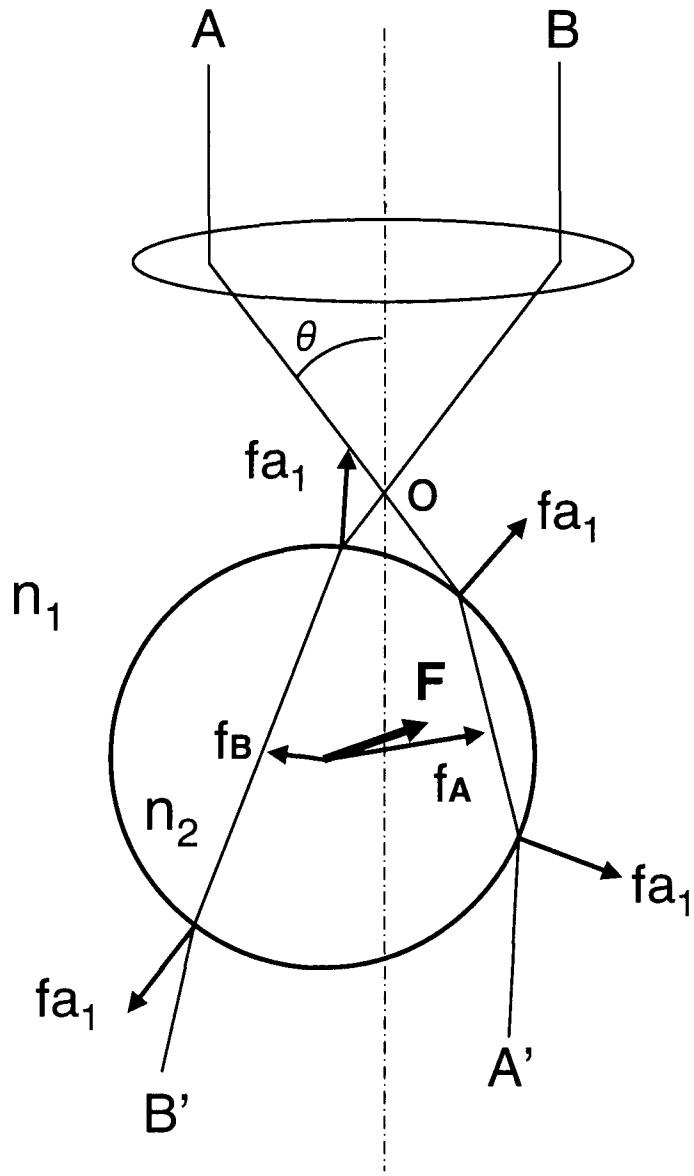


Fig. 3-3 レーザ光による粒子の捕捉

3-4 結 言

第 3 章では，本研究の基本的要素技術の一つである光放射圧制御による粒子の捕捉について解析を行い，その機構を明らかにした．

本解析においては，光放射圧の発生はフォトンの運動量変化を基礎として考えたが，よく知られているように，Maxwell の応力として考えても同様の結果が得られる．

さらに，この光放射圧により発生する力によって，粒子を光軸上に保とうとする捕捉力（レーザトラッピング力）が作用するが，これについても捕捉力の発生に関する機構の一例を示した．

本研究で取り扱う，スラリーのようなコロイド溶液中のコロイド微粒子に対して作用する光放射圧による力，およびそれに起因する捕捉力に関しては，微粒子の寸法が波長よりも小さいため，同一の概念では論することはできない．この点に関しては未だ不明の点が多く，統一的な理論による理解は困難であるため，第 5 章において実験結果に対する推論として述べることとした．

第 4 章　レーザ微粒子集積現象を利用した平坦化プロセスの基本概念

4-1 緒 言

CMP加工は，一般に，ポリシングテーブル上に貼付けられたポリシングパッドにシリコンウエハを一定圧力で押しつけ，相対運動を与えつつスラリーを供給しポリシングを行なう．この場合，ポリシングは圧力転写方式[33]により実行され，シリコンウエハの凸部がポリシングパッドに接触し，周囲より高い圧力が作用して材料除去速度が上昇する結果，選択的除去作用による平坦化が進展すると期待されている．しかし，実際には，凹凸面の凸部ばかりでなく凹部においても除去作用は進行し,ポリシング時間が経過して材料除去が進んでも平坦化は進まない．

第 4 章においては，凹凸面に対する平坦化を実現する方法についてさまざまな加工法を検討し，2-3 で示した平坦化の条件が実現可能なレーザ微粒子集積痕を利用する二つの平坦化法の基本概念について考察する．

4-2 凹凸面における平坦化プロセス

CMP 加工において，1チップ領域内でのグローバル平坦性を考える場合，平坦化の対象となる凹凸はシリコンウエハの形状によって形成される TTV, Warp などの大規模な凹凸ではなく，シリコンウエハ表面の配線パターンなどにより形成された小規模な微小凹凸パターンであり，その寸法は面内方向で最小線幅(現状では0.13 μ m)から約 20 μ m，高さ方向で約 1000nm であり，凹凸は緩やかである．このような凹凸面を圧力転写方式により除去加工するポリシングパッド表面が精度基準として機能するには十分な平面度を有し，面内方向の凹凸のピッチがシリコンウエハの凹凸ピッチより十分小さく，シリコンウエハ凹凸面の凸部のみと接触し，その接触部分のみでポリシング圧力が上昇することが必要である．しかし，図 2-8 に示したように，実際のポリシングパッド表面はスラリー供給の安定化のため深さ，ピッチとも 20～40 μ m程度の凹凸を有し，さらにドレッシングによる繊維状

の毛羽立ちで覆われている．このようなポリシングパッドをシリコンウエハ表面に押しつけてもシリコンウエハ凸部のみで接触するとは限らず，接触位置の制御は困難である．その結果，シリコンウエハとポリシングパッドは両者の凹凸形状に関わらずさまざまな位置で接触する機会を持ち，材料除去は全凹凸面においてほぼ一様に発生すると考えられる．この結果，限られたポリシング除去深さでの比較的短いポリシング時間によるシリコンウエハ表面の段差緩和，および平坦化の進行は期待できず，段差は残留したままポリシングが行なわれる．このようなポリシングメカニズムを考慮すると，CMP 加工において平坦性を向上させるには，積極的にウエハ表面の凹凸の凸部のみを選択的に加工し，さらに凹部底面のポリシングの進行を止めて段差緩和を進めることのできる加工法が必要であることに気づく．

表 4-1 は，このような条件を満たす可能性を検討するため，考えられる主な平坦化プロセスをリストアップした．最も一般的と考えられる除去加工においては，超小型工具による選択的除去加工が考えられるが，工具の製作，および加工時間の増大に対する加工コスト増の問題があり，現実的ではない．従来から行われているエッチバック法はこの除去加工法における化学的加工法として分類されるが，エッチング後にマスク周辺部表面に鋭い凹凸が形成されるなどの問題があり普及していない．

リフロー法は変形加工法の一種と考えられるが，加熱流動というプロセスの要求精度への対応能力の問題，取り扱い材料が限定されるなどのため，やはり一般的ではない．

付加加工法では，SOG 法は材料,プロセスが限定されるため一般的ではなく，STP(Spin coating film Transfer and hot-Pressing)法 [34] は，現在開発途上の技術である．この結果，平坦化を可能にする新技術は見当たらない．そこで，これらの技術と新しい技術を結合することにより，次の新しい平坦化法を考えることができないか検討する．

誘電体微粒子にレーザ光を照射すると光放射圧により微粒子がレーザ光に捕捉される現象はレーザトラッピング現象として知られ，同様に，コロイドであるスラリー中のシリコンウエハの表面をレーザ光により走査すると，シリコンウエハ表面のレーザ光走査軌跡上に微粒子が集積し固化するレーザ微粒子集積現象 [35] も光放射圧によるレーザトラッピング現象の一つとして確認されている．一方，ポリシング加工はある程度平坦な面をさらに滑らかにするには適した加工法であるが，2-3 に示した理由により，必ずしも凹凸面の形状を大規模に修正し平坦化する作業に適した方法とはいえない．しかし，これらの二つの技術を組み合わせることにより，平坦化を実現する可能性があることに気づく．

本研究では付加加工法として，スラリー中のシリコンウエハ表面にレーザ光を照射しレーザ微粒子集積現象により局部的に微粒子集積痕を形成した後，そこをポリシングすることにより凸部の選択的材料除去，または凹部の材料除去停止

表 4-1 考えられる平坦化プロセス

加工プロセス		特徴・問題点
1.除去加工法	1)機械的除去加工	a) 超小型工具による選択的(修正)加工 －工具製作が困難 －加工コスト大
		b) ポリシング法, CMP 法 －ポリシングによる微小加工単位,
	2)熱的除去加工法	c) レーザ加工, 放電加工 －加工面のダメージ －微小な点の加工 －加工コスト大
	3)(電気)化学的除去加工法	d) エッチバック法
		e) FIB 加工 －加工コスト大
2.変形加工法	1)成形加工法	
	2)塑性加工法	a) リフロー法
3.付加加工法	1)付着加工法	a) SOG 法
		b) レーザ微粒子集積法 －微小部分への集積可
	2)接合加工法	c) STP 法

を実現する2段階の平坦化プロセスを想定することができる. 4-3, 4-4 では、この平坦化プロセスの概念について詳細な検討を行なう.

4-3 凸部に集積痕を形成した場合

シリコンウエハ表面にレーザ光を照射して光放射圧によるレーザ微粒子集積痕を形成し, その後 CMP を行う方法として, まず, 凹凸面の凸部に集積痕を形成する方法について考える. 図 4-1 は凸部に集積痕を形成し, CMP加工を行なう場合を示している.

集積痕はスラリー中の微粒子が凝集したものと考えられ, その凝集強度はそれほど大きくないので, ポリシングを行うと比較的容易に崩壊する. この時, 集積痕周辺では崩壊した集積微粒子が再度砥粒として作用するようになり, その結果スラリー中の砥粒が高集中した状態となり, 凸部の材料除去速度の局所的向上が期待できる.

4-4 凹部に集積痕を形成した場合

図 4-2 に第2の方法としてレーザ微粒子集積痕を利用した凹凸面の凹部に集積痕を形成し, CMP 加工を行なう場合の基本概念図を示す. 凹凸を持つシリコンウエハ表面において通常のCMP加工を適用した場合, シリコンウエハの凹凸は小さいため, ポリシングパッドの弾性変形を考慮すると, 凸部と凹部とのポリシング圧力にはほとんど差はなく, また, 2-3 に示した理由により段差緩和は緩やかに進行して長時間のポリシング後もその凹凸の変化は少ない. そのため, ポリシングを行なう前工程として, 凹凸段差を小さくすることが必要となる.

一方、レーザ照射によりレーザ微粒子集積痕をシリコンウエハ上の凹凸パターンの凹部に形成してポリシングを行うと, 当初, 集積痕頂部がポリシングされ, 次第に集積痕高さが低くなりシリコンウエハ凸部との高さがほぼ等しくなって段差が小さくなり, その後はほぼ同一面としてポリシングされることが期待できる. このプロセスではポリシング面が当初の凹部の底面に達した時点で, 凹部底面がポリシングされることなく微細パターンの凸部の除去加工が完了したことになる. この凹凸面の凹部にレーザ集積痕を形成し, ポリシングを行なって平坦面を得る方法、すなわち,

「レーザ集積痕ポリシング法」
(LAFP : Laser Aggregation, Filling-up & Polishing Method)

の適用により凸部のみ選択的ポリシングを行い, 凹部はポリシングを行わないという 2-3 示した平坦化の条件が実現可能となる.

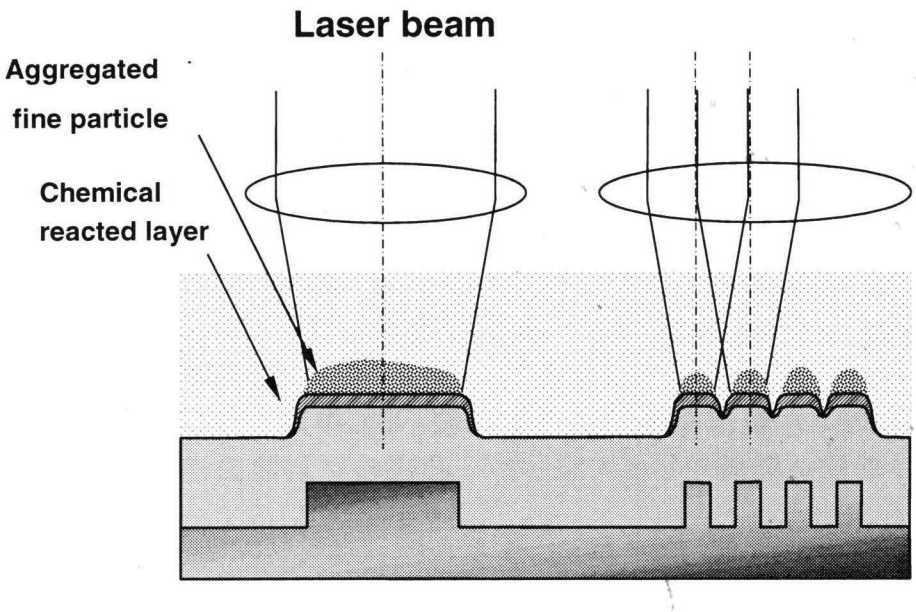


図 4-1 凸部に集積痕を形成した場合

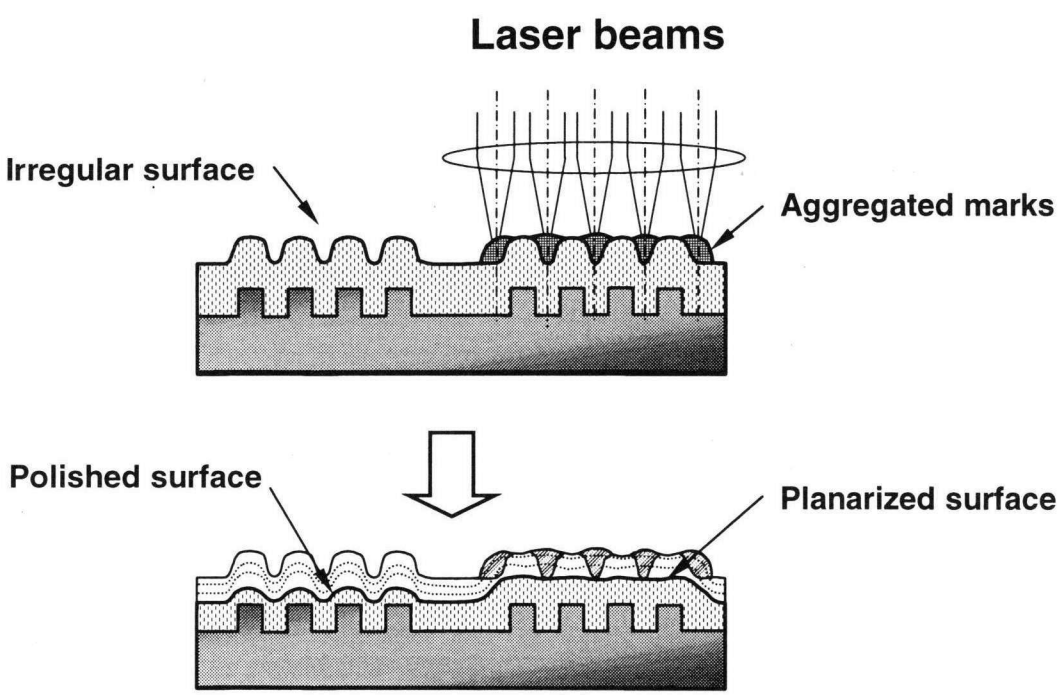


図 4-2 凹部に集積痕を形成した場合

4-5 結 言

2-3 において得た平坦化実現のプロセスにおいて,

「凸部を除去すると同時に, 凹部底面の加工の進行を止める」

という条件を実現するため, 考えられる平坦化プロセスの基本概念を検討した.

平坦化法としては, 現状のCMP法を始めとする除去加工法, 変形加工法, 付加加工法などのさまざまな方法が考えられるが, いずれもが問題を内包している.

しかし, 唯一, レーザ光照射によりレーザ微粒子集積痕を形成し,その後ポリシングを行う平坦化法が平坦化プロセスの平坦化条件に合致しており, 実現の可能性がある.

第 5 章　光放射圧制御による
レーザ微粒子集積実験

5-1 緒　言

マイクロメートルオーダの粒径を持つ粒子に対するレーザ光による光放射圧を利用した捕捉は，これまでも多く試みられているが，粒子径が光の波長よりも小さい微粒子の捕捉，凝集に関しては，清水 [35]，澤木，池野 [36] らによる報告がなされているだけである．

本研究では，レーザ光の波長の 1/10 程度の1次粒子径をもつ微粒子から成る CMP 用スラリーにレーザ光を照射した時のレーザ微粒子集積現象について実験的に検討し，さらにその集積メカニズムの推定を試みた。

5-2 レーザ微粒子集積実験装置

光放射圧を利用してスラリー中の微粒子を捕捉，集積するためのレーザ微粒子集積実験装置を構築した．図 5-1 に構成したレーザ微粒子集積実験装置の全体構成図を，図 5-2 に装置写真を示す．実験装置はレーザ光照射部，試料操作部，および試料観察部よりなる．レーザ光源には波長 λ=488nm の Ar^+レーザを用いた．Ar^+レーザから射出したレーザ光はダイクロイックミラーにより光路を曲げられ，対物レンズ(40×，NA=0.55)を通過して試料表面に焦点を結ぶ．試料表面におけるレーザ光照射時に発生する現象は観察光学系により観察される．観察光学系は照明ランプからの照明光がレーザ光と同一光軸を持って試料に照射され，その反射光は CCD カメラに撮影され，ビデオモニタにより観察，ビデオレコーダによる録画が行われる．試料からの反射光は対物レンズを通って平行光となり，第 2 対物レンズにより集光される．その後，波長選択性カラーフィルタを通すことによりレーザ光がカットされ，接眼レンズを通った後，CCD カメラに記録される．このようにして，レーザ照射時の様子はモニターによりリアルタイム観察が可能であり，また，ビデオ録画も可能である．表 5-1 に微粒子集積実験装置の構成部

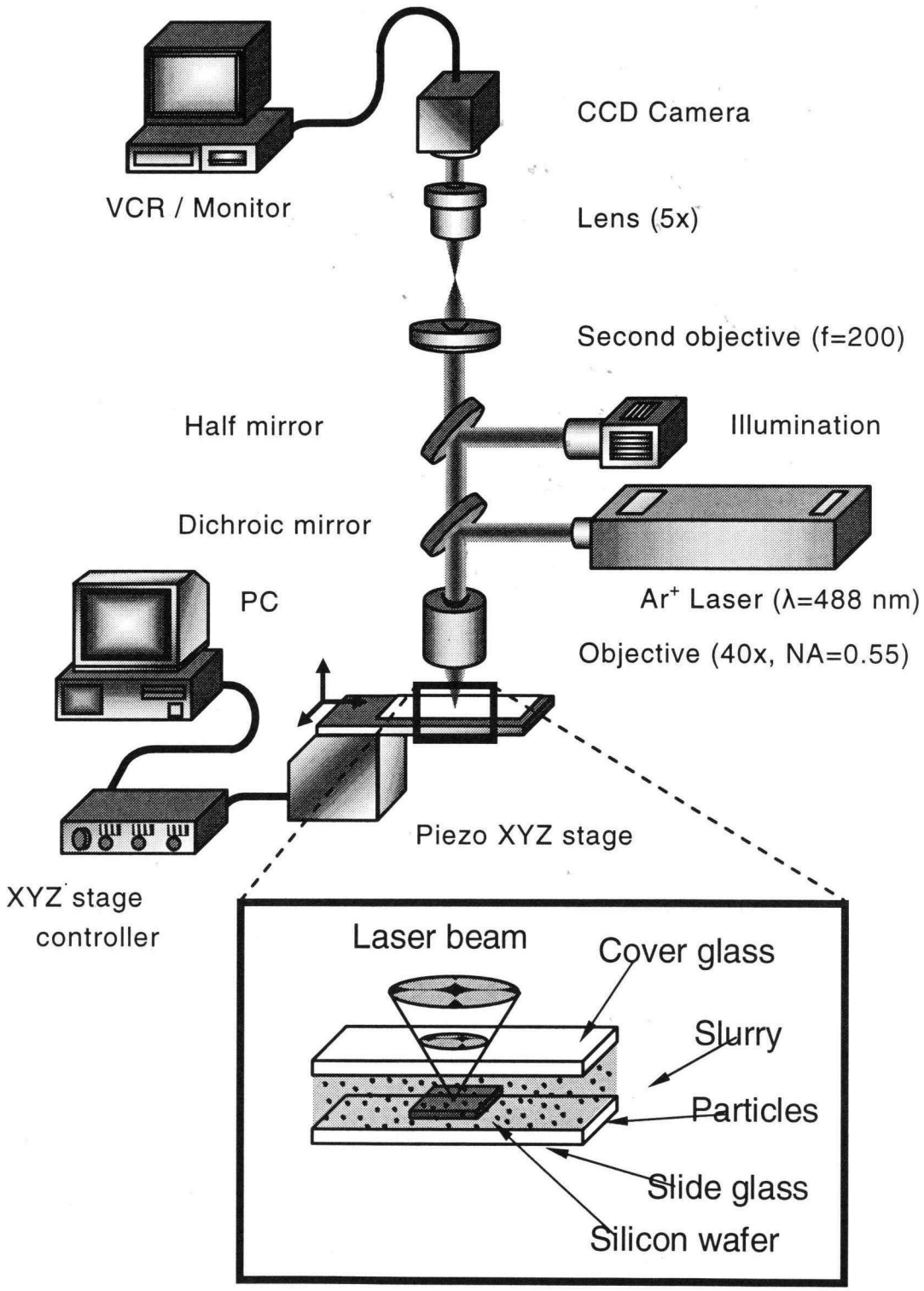


Fig. 5-1 レーザ微粒子集積実験装置の光学系

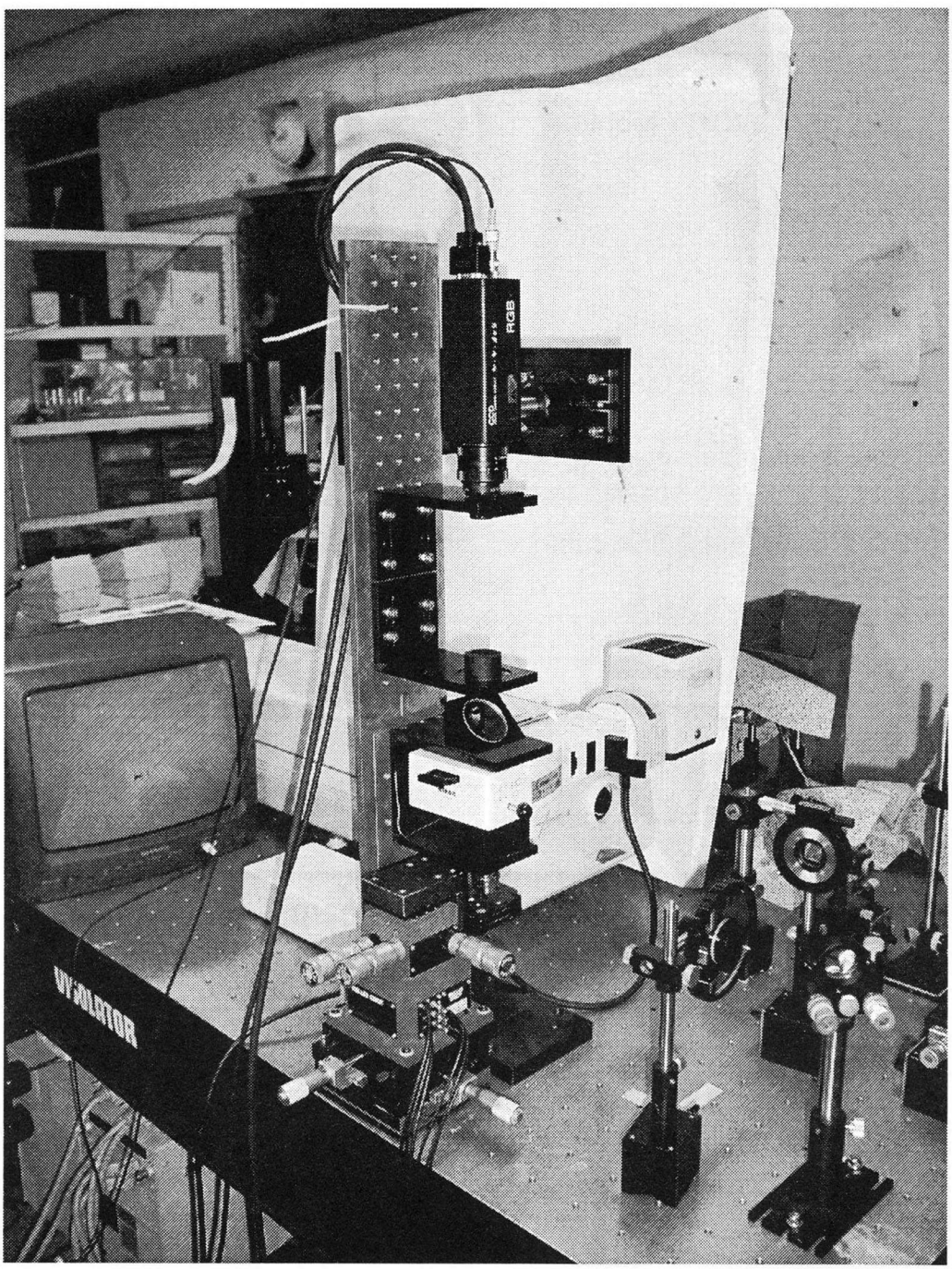


Fig. 5-2 レーザ微粒子集積実験装置写真

Tab. 5-1 レーザ微粒子集積実験装置の構成部品

Ar^+ Laser	BeamLok λ = 488 nm, 2.3 W(max), TEM_{00} mode Spectra Physics
対物レンズ	NCF Plan ELWD DL 40 × [Nikon] NA=0.55, WD=5.08～6.84 mm 補正可能ガラス厚さ : 0～0.25 mm
	LCD Plan ELWD DL 100 × [Nikon] NA=0.80, WD=1.10～1.12 mm 補正可能ガラス厚さ :0.6～1.2 mm
第2対物レンズ	f = 250 mm, d = 50 mm 無限遠補正用
接眼レンズ	15×(40 倍対物レンズ使用時) [Nikon] 5× (100 倍対物レンズ使用時) [Nikon]
CCD カメラ	XC-711 [Sony] 画素数 : 510(H)×492(V) 走査面積 : 8.8 mm(H) × 6.6 mm(V)
CCD カメラレンズ	f = 25 mm, F = 1.4 [Tokina]
照明系	コンデンサ照明系 [Nikon]
観察用フィルタ	λ = 500nm 以下をカット [シグマ光機]
ナノブロック	NDA-503FC [シグマ光機] 粗動ねじ 4mm 微動ねじ 40 μ m(分解能 0.1 μ m) ピエゾ素子 22 μ m(分解能 10 nm 以下)
その他	ミラー ND フィルタ

品の一覧を示す.

試料は図5-3に示すように, スライドガラス上に□10mmに切断したシリコンウエハを置き, シリコンウエハ上面から約 0.1～0.15mm の隙間を設定してその位置にカバーガラスを置き, その空間をスラリーで満たした. この試料は X, Y, Z 方向に微動可能なピエゾステージ上に設置され, この XY ステージの運動により焦点合わせ, レーザ光の走査を行なった.

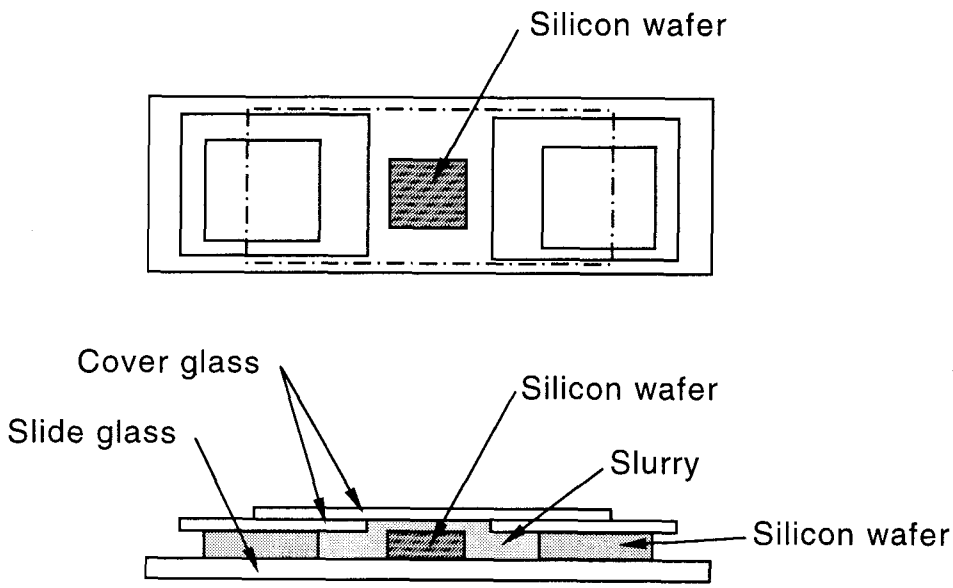


Fig. 5-3 集積実験試料の構造

5-3 光放射圧による微粒子捕捉実験

図 5-1 に示した微粒子集積実験装置を用いて，スラリー中に分散しているコロイド粒子の捕捉，集積実験を行なった．表 5-2 にレーザ照射条件を示す．

シリコンウエハ試料にレーザ光を照射すると図 5-4(a) に示すように，レーザ光周辺にスラリー中の微粒子が集中し，積乱雲が発達するようなもやもやとした状態になる．ここで，レーザ光の焦点をシリコンウエハ表面に合わせ試料表面を走査し，レーザ光の照射を止めてしばらくすると，もやもやが消滅し図 5-4(b) に示す集積痕が形成されたことが確認できる．図 5-5 に，このようにして形成された集積痕の SEM(Scanning Electron Microscope) 写真を示す．この SEM 観察により集積痕は粒径 100～200nm 程度の微粒子が集積したものであることがわかる．図 5-6 は，この集積痕の交差部分の AFM (Atomic Force Microscope) 測定結果である．集積痕は一様な高さ，幅で連続的に形成されているのではなく微粒子の集合が小塊状になって線状に並び，集積痕の高さは 390～530nm，幅は 1.9～2.1 μ m 程度である．

この集積痕はシリコンウエハ表面に強固に付着しており，集積痕形成後，純水でブラシ洗浄を行なっても剥離，流失することはなかった．

Tab. 5-2　集積痕形成レーザ照射条件

Test piece	Silicon wafer with SiO_2 film (1μm thickness)
Slurry	SiO_2 [Fumed Silica] / ILD 1200(Rodel-Nitta) Average particle diameter : 140 nm Concentration : 3 wt %
Laser	Ar + Laser /λ=488 nm Beamlock / Spectra Physics Output power : 100~240 mW Scanning speed : 10 μm/sec

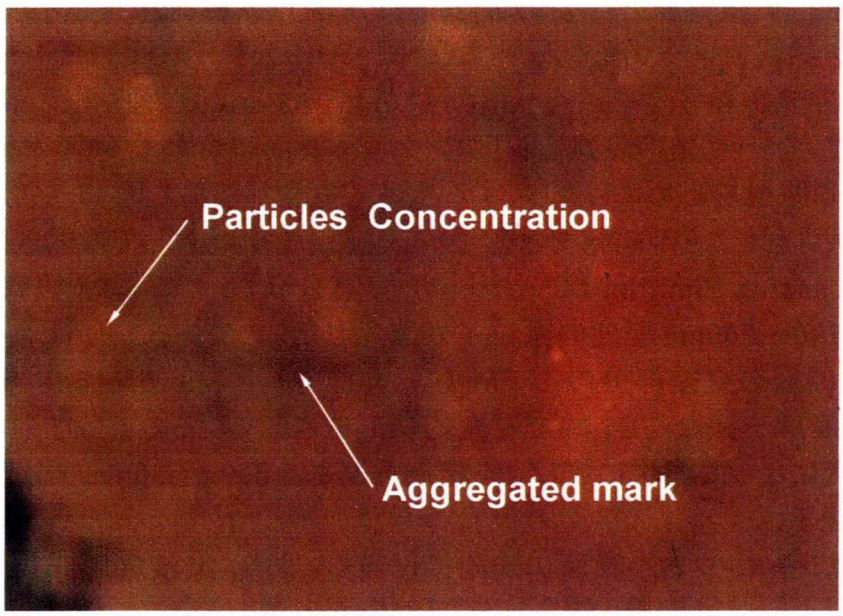


Fig. 5-4 (a) レーザ照射時の微粒子の集中

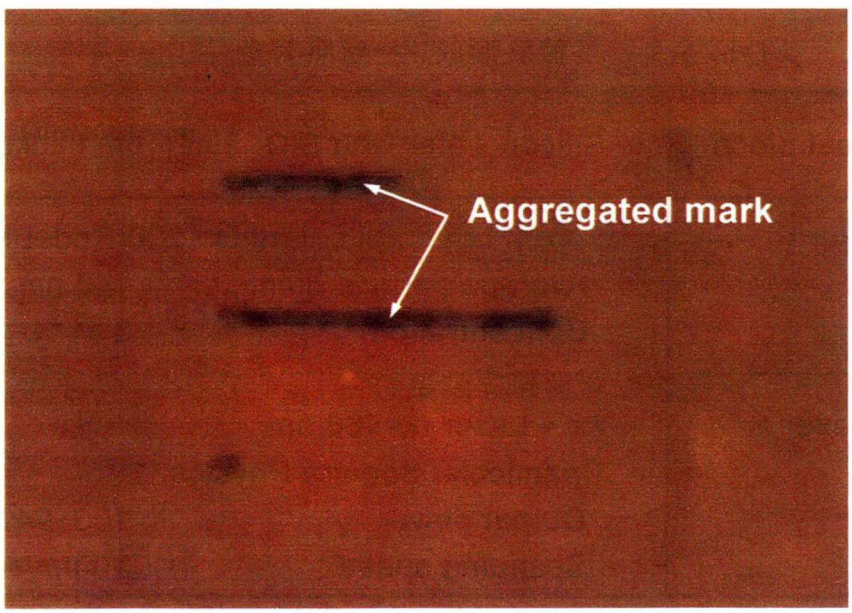
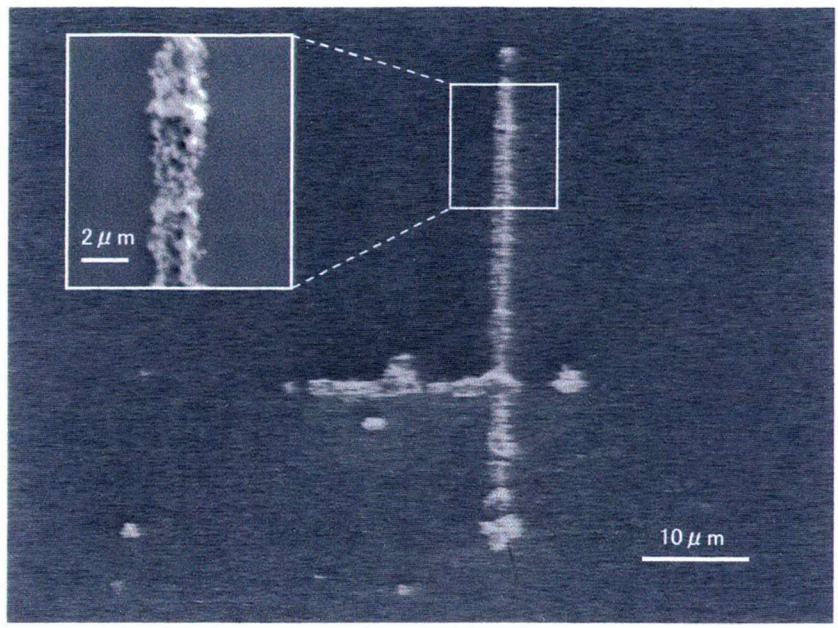
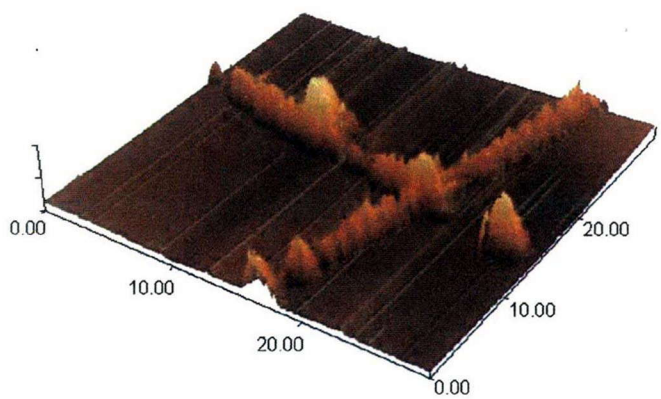


Fig. 5-4 (b) レーザ照射時の微粒子集積痕



JSM-5800A
（日本電子）

Fig. 5-5 シリコンウエハ表面に形成されたレーザ集積痕(SEM)



SPM-9500
（島津製作所）

Fig. 5-6 シリコンウエハ表面に形成されたレーザ集積痕(AFM)

5-4 レーザ微粒子集積実験結果と考察

5-4-1 レーザ微粒子集積現象

スラリー中にレーザを照射し，形成したレーザ微粒子集積痕を SEM(図 5-5), AFM(図 5-6) で観察し，次の事実を確認した.

(1) レーザ微粒子集積痕は，100～200nm の微粒子の集合体で構成されている
(2) それらは，小塊状になってレーザの走査軌跡上に整列している
(3) レーザ微粒子集積痕は，シリコンウエハ表面に強固に付着し，ブラシ洗浄を行なっても流失することはない

図 5-7 はレーザ出力を変化させたときに形成されるレーザ微粒子集積痕の高さを示したものである. [A] のデータは，φ4 inch のシリコンウエハにダイヤモンドカッタによりスクラッチを刻み，割断した試料を用いた結果であり，レーザ出力を大きくしていくと約 120mW からレーザ微粒子集積痕が形成され始め，レーザ出力とレーザ微粒子集積痕高さはほぼ直線的に増加する. [B] のデータは[A]と同一のシリコンウエハをダイシングマシンにより□10mm に切断した試料を用いて実験を行った結果であり，レーザ出力 220mW を超えるレーザ出力で高さ H=100～400nm 程度の小型のレーザ微粒子集積痕が形成される. [C] のデータは [B] の試料表面を FIB 装置によりイオンシャワー洗浄し，その後レーザ照射を行いレーザ微粒子集積痕を形成した結果である. レーザ出力の増加にともない，レーザ微粒子集積痕の形成は約 70mW から始まり，レーザ出力にほぼ直線的に増大する.

この 3 つの場合の比較により，レーザ微粒子集積痕の形成状態はシリコンウエハ表面の汚染状態に支配されていることが推定される. すなわち,ダイシングマシンで切断した試料 [B] は表面に研削液による汚染物質が付着していることが考えられるが，表面をイオンシャワーで洗浄した試料 [C] については低レーザ出力で大型のレーザ微粒子集積痕が形成されており，容易にレーザ微粒子集積痕を形成することができる. それゆえ，レーザ微粒子集積痕の形成を再現性良く行うには試料となるシリコンウエハの取り扱いに注意し，表面汚染を防止することが重要である.

次に，レーザ微粒子集積痕を構成している物質を確認するため，成分分析を行なった.

図 5-8 はオージェ電子分光法(AES : Auger Electron Spectroscopy) により，レーザ微粒子集積痕の成分分析を行った結果であり，図 5-9 はシリコンウエハ表面の SiO_2 膜の成分分析を行った結果である. どちらも，Si, O のみが検出され，集積痕ではその比は Si:O = 1 : 2.44, SiO_2 膜では Si : O = 1 : 2.8 であっ

[A]： 割断/イオンシャワー洗浄なし
[B]： ダイシング/イオンシャワー洗浄なし
[C]： ダイシング/イオンシャワー洗浄あり

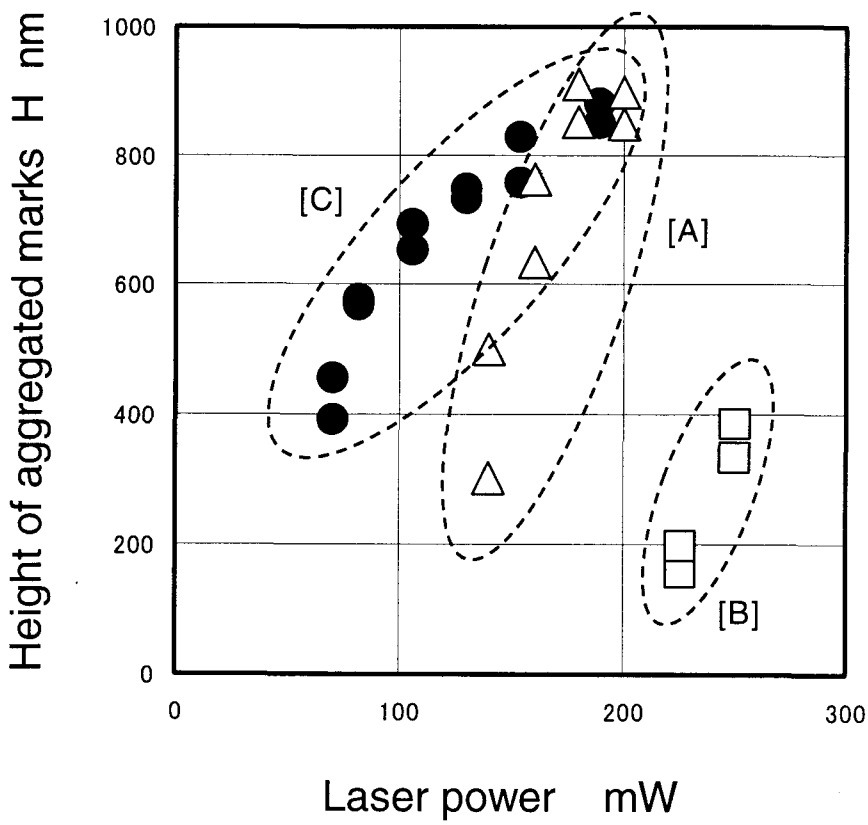
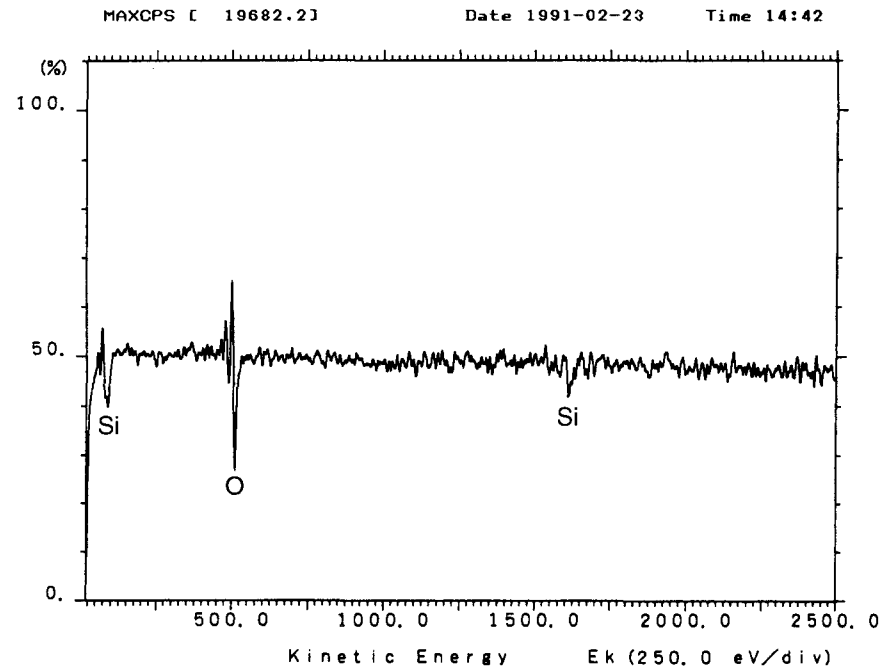


Fig. 5-7 レーザ出力と集積痕高さ




```
Mode          [  AES-dN]
Sample No.    [      14]
Sample Name   [murata san - after etch.(2min)                    ]
Scan No.      [       1]
Element       [Wide    ]

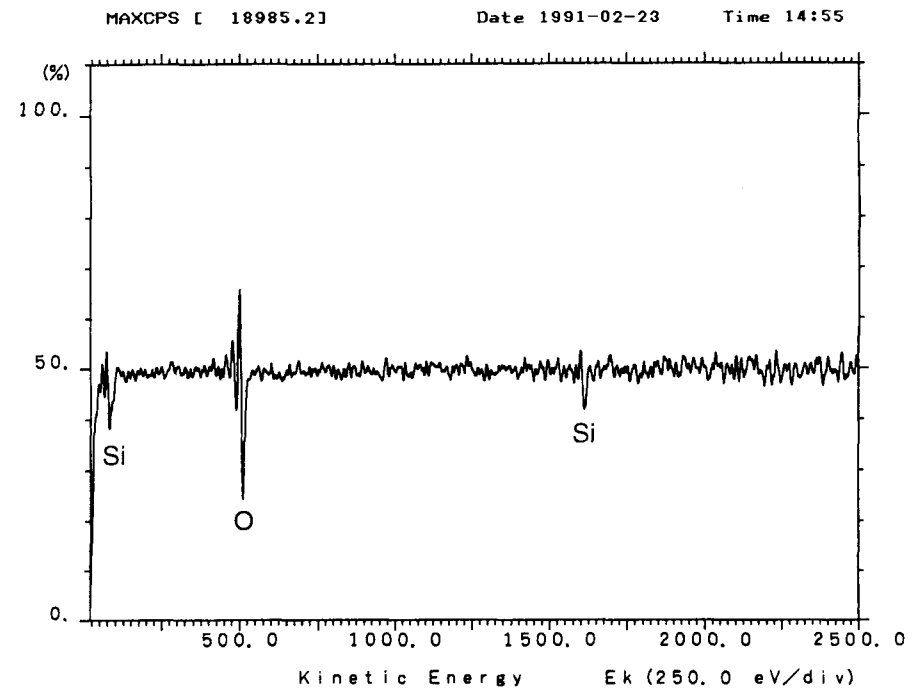
Start           :   20.00 eV        Repeat Times    :    1/  1
Stop            : 2500.00 eV        Sensitivity     :    1.00
Step            :    0.50 eV        Charge Shift    :    0.00 eV
Sampling Times  :      50 ms

Smoothing Points :    25 (1)        Differential Points :   0
BG Start        :  299.00 eV        Deconvolution Times :   0
   Stop         : 1498.50 eV                Function    :   0.00
   Mode         :       0                   H. Width    :   0.00
Satellite       :      No                   Asymmetry   :   0.00

                                      Corrected
Peak Position   :     510.50 eV       510.50 eV
     Height     :   11609.84 cps    11609.84 cps


Shift      :      0.00 eV
Base       :      0.00 cps
Fit        :      0.00
```

Fig. 5-8 オージェ電子分光法による集積痕の成分分析



Mode [AES-dN]
Sample No. [15]
Sample Name [murata san - sub. surface after etch.]
Scan No. [1]
Element [Wide]

Start	: 20.00 eV	Repeat Times	: 1/ 1
Stop	: 2500.00 eV	Sensitivity	: 1.00
Step	: 0.50 eV	Charge Shift	: 0.00 eV
Sampling Times	: 50 ms		
Smoothing Points	: 25 (1)	Differential Points	: 0
BG Start	: 298.00 eV	Deconvolution Times	: 0
Stop	: 1499.50 eV	Function	: 0.00
Mode	: 0	H. Width	: 0.00
Satellite	: No	Asymmetry	: 0.00

		Corrected
Peak Position	: 510.00 eV	510.00 eV
Height	: 11968.37 cps	11968.37 cps

Shift : 0.00 eV
Base : 0.00 cps
Fit : 0.00

Fig. 5-9 オージェ電子分光法による SiO_2 膜の成分分析

た. この結果, 集積痕は SiO_2 で構成されているがその組成がシリコンウエハ表面の SiO_2 膜とはわずかに異なることがわかった.

次に, レーザ微粒子集積痕の性質を確認するため, 硬さ測定を試みた. 硬さ測定には TriboScope を用いた.

図 5-10 にレーザ微粒子集積痕の硬さ測定結果の例を, 図 5-11 にシリコンウエハ表面の SiO_2 膜の硬さ測定結果の例を示す. 図 5-10 と図 5-11 を比較すると, ダイヤモンドインデンタに負荷を与え, その後, 除荷するときの変位速度が異なっている. レーザ微粒子集積痕では回復変位速度が小さく, 弾性回復量が小さいことを示している. この結果は, レーザ微粒子集積痕の結合力は小さく, 弱い結合をしていることを示している. 表 5-3 は各々3つの試料を測定した結果を示している. 平均値で比較すると, シリコンウエハの SiO_2 膜の硬さが 12.45 であるのに対し, レーザ微粒子集積痕の硬さは 5.16 であり, およそ 40% の値を示している. この結果, レーザ微粒子集積痕ではシリコンウエハの SiO_2 膜のような強固な化学結合組織にはなっておらず, 微粒子が緩やかな形で凝集した弱い結合をしていることを示している.

これらの検討の結果, レーザ微粒子集積痕はスラリー中の SiO_2 がレーザの光放射圧によりシリコンウエハ表面に集積したものであるが, その結合は弱いものであると考えることができる.

Tab. 5-3 レーザ微粒子集積痕と SiO_2 膜の硬さ測定結果

試　料	硬 さ	平均値
No.1 レーザ微粒子集積	5.05	
No.2	4.99	5.16
No.3	5.43	
No.4 SiO_2 膜	12.43	
No.5	12.45	12.45
No.6	12.46	

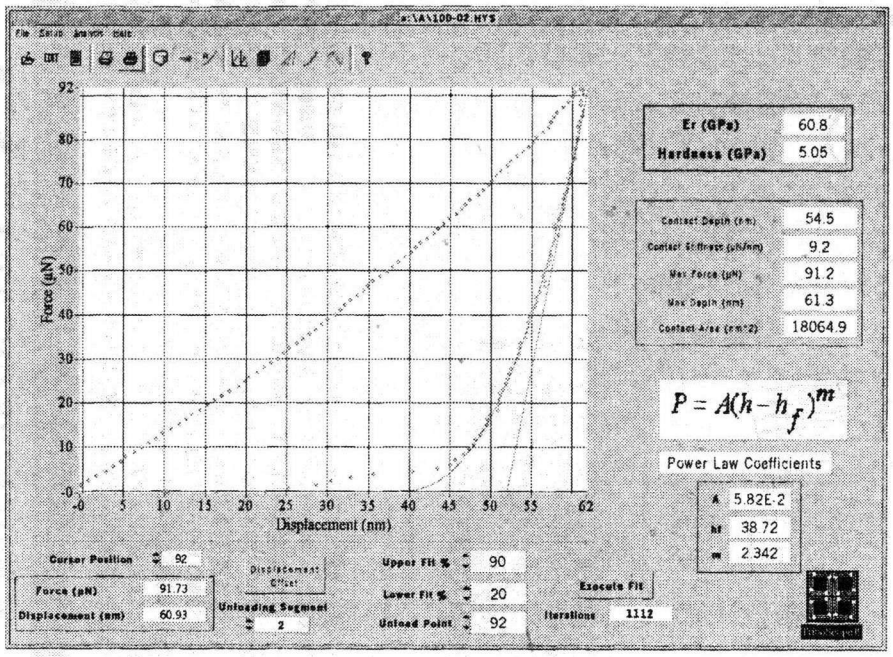


Fig. 5-10　レーザ微粒子集積痕の硬さ測定結果

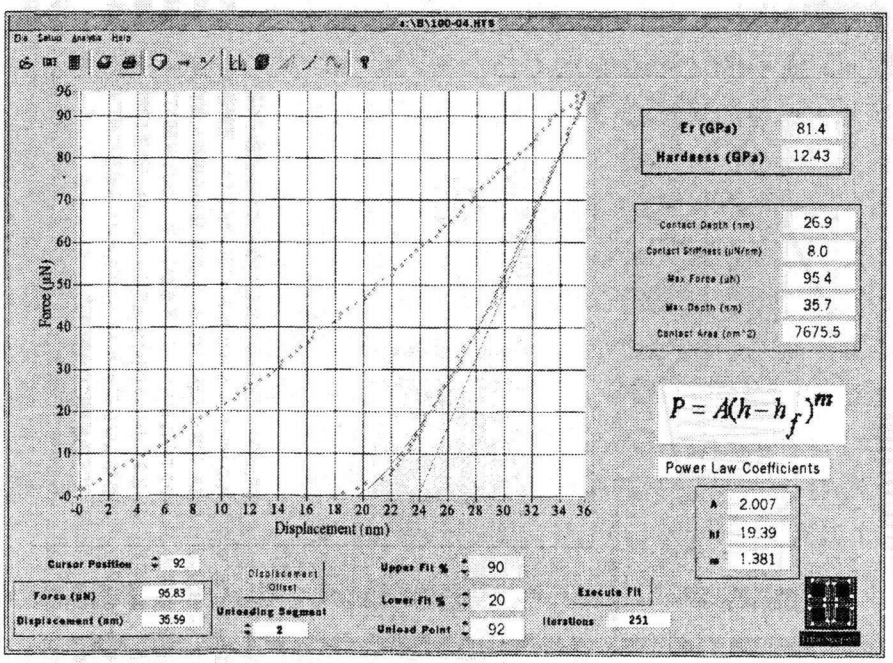


Fig. 5-11　シリコンウエハ表面 SiO_2 膜の硬さ測定結果

5-4-2 レーザ微粒子集積機構の考察

本実験でレーザ微粒子集積に用いているCMP用スラリーは，KOHによるアルカリ性電界質溶液にヒュームドリシカ(SiO_2)の微粒子を分散させたものであり，コロイド溶液の一種である．電解質溶液中のコロイド粒子の挙動は，図 5-10 [37] に示す表面電荷と対イオンによる拡散電気二重層構造を基礎に，DLVO (Derjaguim-Landau-Verwey-Overbeek)理論 [38] により説明される．

水溶液中の粒子表面は帯電しており，その周囲には表面電荷と釣合い反対符号のイオンが集まり，巨視的に電気的中性になっている．このイオンは一部は粒子表面に吸着され，一部は粒子表面付近に広がりイオン雲が形成される．この時，粒子表面のイオン吸着層は Stern 層，その周辺のイオン層を拡散電気二重層と呼ばれる．通常，この帯電した粒子に作用する力は，水圧を除けば次の二つである．

(1) 微粒子の表面電位に起因する静電反発力
(2) van der Waals 引力

図 5-11[39] に示すように，二つの粒子が接近して，互いの電気二重層が重なり合う距離にある時，粒子間のイオン濃度が周囲より高くなり，浸透圧が発生して粒子間に大きな反発力 F_R が働く．一方，一対の分子間に働く van der Waals 力 F_A は弱い短距離力ではあるが，加算性が成立するために極めて多数の分子からなるコロイド粒子間では大きな力になる．したがって，全粒子間力 F_T は F_R と F_A の和として次のように表され，F_T は粒子間距離 H の関数となる．

$$F_T = F_R + F_A \qquad (5\text{-}1)$$

F_T が正の場合は，粒子が衝突しても反発力に打ち勝つ外力が得られない限りコロイド粒子は分散するが，F_T が H の全領域にわたって負の場合，粒子は衝突すると凝集する．

ここで，このような安定状態にあるコロイド溶液にレーザ光を照射し，コロイド粒子に光放射圧による外力が作用した場合を考える．コロイド粒子に作用する光放射圧による力を F_O とすると，(5-1)式は次のようになる．

$$F_T = F_R + F_A + F_O \qquad (5\text{-}2)$$

この結果，(5-2)式において

$$F_R < F_A + F_O \qquad (5\text{-}3)$$

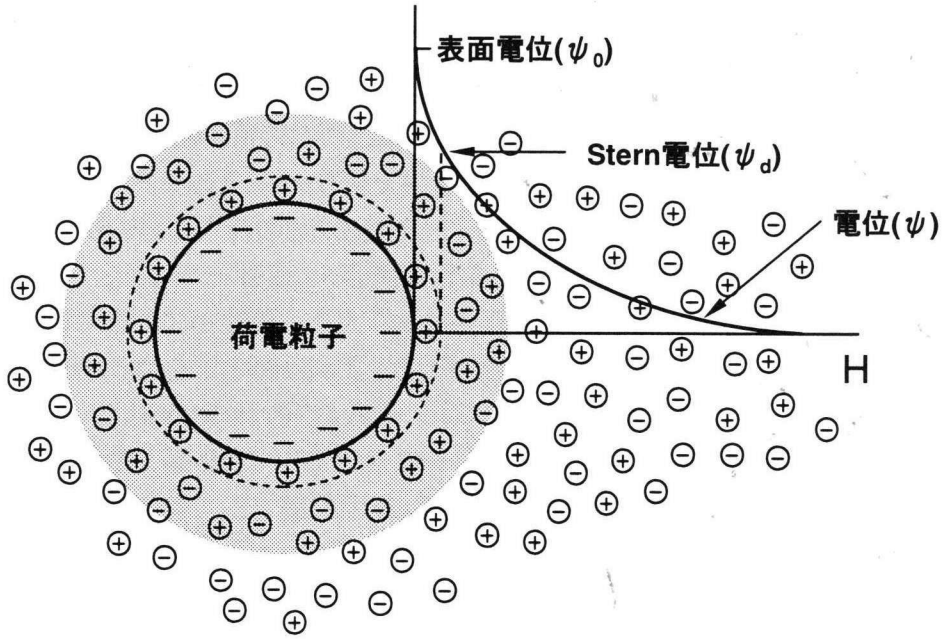


Fig. 5-10 表面電荷と対イオンによる拡散電気二重層構造

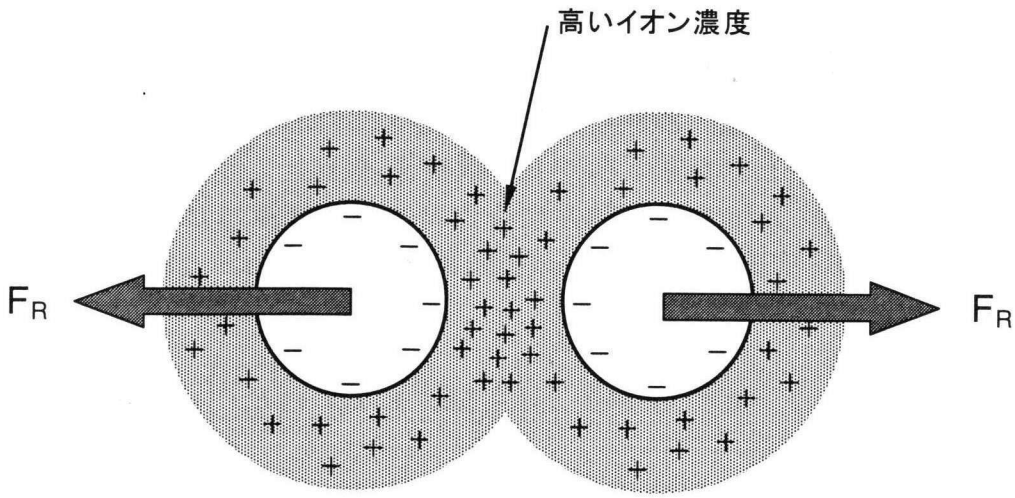


Fig. 5-11 接近した二つの粒子

が成立する場合，スラリー中の微粒子が凝集すると考えられる．

粒径が光の波長よりも大きい誘電体粒子に入射した光の挙動は，光を光線として扱い，反射・屈折の法則を用いて追跡した光路と一致する．従って，光束の運動量変化から放射圧を求める方法を用いれば，粒子に作用する放射圧を求めることができ，幾何光学的な光線追跡の手法により収束光を誘電体粒子に照射した場合に生ずる捕捉力などを計算することができる．

一方，Takaya, et al[40]が指摘したように，粒径が光の波長程度あるいはそれ以下の誘電体微粒子の場合，微粒子による光散乱は複雑な形態をとり，光を光線として考えた場合の挙動と実際の物理現象が大きく異なってくる．そのため，光放射圧の計算においては，光束の運動量変化から放射圧を求める方法は適用できない．そこで，このような微粒子に作用する放射圧は，Maxwell の応力を用いて計算する必要がある．この場合，微粒子に生じる放射圧は，微粒子に入射する光が持つ運動量と散乱後の光が持つ運動量との差として考えることができる．

簡単な入射場モデルにおける理論解析の概要について考える．微粒子の中心を座標系の原点とする図 5-12 のような極座標系において，z 軸の負の方向から正の方向に伝播し，電場の振動方向が x 軸と一致する平面波が散乱される場合について考える．このとき，微粒子表面上のある位置での電場強度を $|Er|^2$, $|E\theta|^2$, $|E\phi|^2$ とすれば，その位置で発生する放射圧は，

$$f = \frac{\left(n_2^2 + n_1^2\right)}{2}\left(\frac{n_1^2}{n_2^2}\left|E_r\right|^2 + \left|E_\theta\right|^2 + \left|E_\phi\right|^2\right)\sin\theta\, d\theta\, d\phi \qquad (5\text{-}4)$$

と表される．ここで，n_1, n_2 はそれぞれ微粒子および媒体の屈折率である．微粒子表面上での放射圧を積分するときは，微粒子表面上での放射圧が z 軸方向以外はキャンセルしあうので，z 軸方向の力のみ積分計算すればよい．以上より，平面波入射において微粒子に発生する放射圧を求めると，

$$F_z = \pi r^2 \frac{\left(n_2^2 + n_1^2\right)}{2}\int_0^\pi \left(\frac{n_1^2}{n_2^2}\left|E_r\right|^2 + \left|E_\theta\right|^2 + \left|E_\phi\right|^2\right)\sin\theta\cos\theta\, d\theta \qquad (5\text{-}5)$$

となる．

杉浦ら[41]は，サイズパラメータ ρ =14.15, および 14.45 の微粒子に対する放射圧の解析を行うため，Mie の散乱理論を用いて微粒子の電場を計算し，以上の理論解析モデルに基づいた数値解析を行なっている．ここで，サイズパラメータ $\rho\ \phi$ は，微粒子の屈折率を n_1，入射光の波長を λ とすると，以下の式で与えられ

る無次元パラメータである.

$$\rho = \frac{2\pi n_1 a}{\lambda} \tag{5-6}$$

図 5-13 にサイズパラメータと放射圧の関係を解析した結果を示す. 散乱効率はサイズパラメータに依存してリップル現象を表すため, そのピークにおいては, 微粒子表面の電場が増強され, 放射圧場として微粒子表面上に発生する圧力も非常に大きくなる. 図 5-13 の結果によると, (a)の結果では, ϕ=0° と比べて ϕ=90° の方が力は 10 倍程度大きくなっている. これは, ϕ=90° で Eϕ 成分が表面波の共鳴によって増強されているためである. また, (b)の結果では θ=90° 付近で ϕ=0° の値の方が大きくなっている. これも(a)の結果と同様に, ϕ=0° の電場の強度が表面波の共鳴によって増強されたためである. 以上のように, サイズパラメータによって決まる表面波の共鳴現象によって, 非常に大きな放射圧が発生することが知られている. この結果, 微粒子に光を入射すると, 微粒子表面に圧力の分布が生じて, 微粒子を並進運動させるような放射圧が発生すると考えられる.

さらに, エネルギー勾配を有する回折場において, 粒径 120nm の微粒子に作用する放射圧の解析が Choi[42]らによって行われている. FDTD 法を用いた数値解析によれば, 開口で回折した場にある微粒子には, エネルギーの高い開口中心へ集まるような放射圧が作用することが示されている. また, 実験的にも波長より小さい微粒子(粒径 216nm のポリスチレンラテックス)が光トラップできることが, Tischer ら[43]によって示されている.

コロイダル粒子のような波長以下のサイズを持つ粒子の場合, 共鳴現象による放射圧の増強は, 光線追跡による放射圧場の解析からは現れない非線形現象であり, 図 5-14 に示すように, 収束光の場において微粒子に作用する放射圧は, サイズパラメータすなわち粒径によって選択的に増強され, 式(5-3)の条件を満たす放射圧が作用する粒子に対して, 集合・集積現象を生ずるものと推測される.

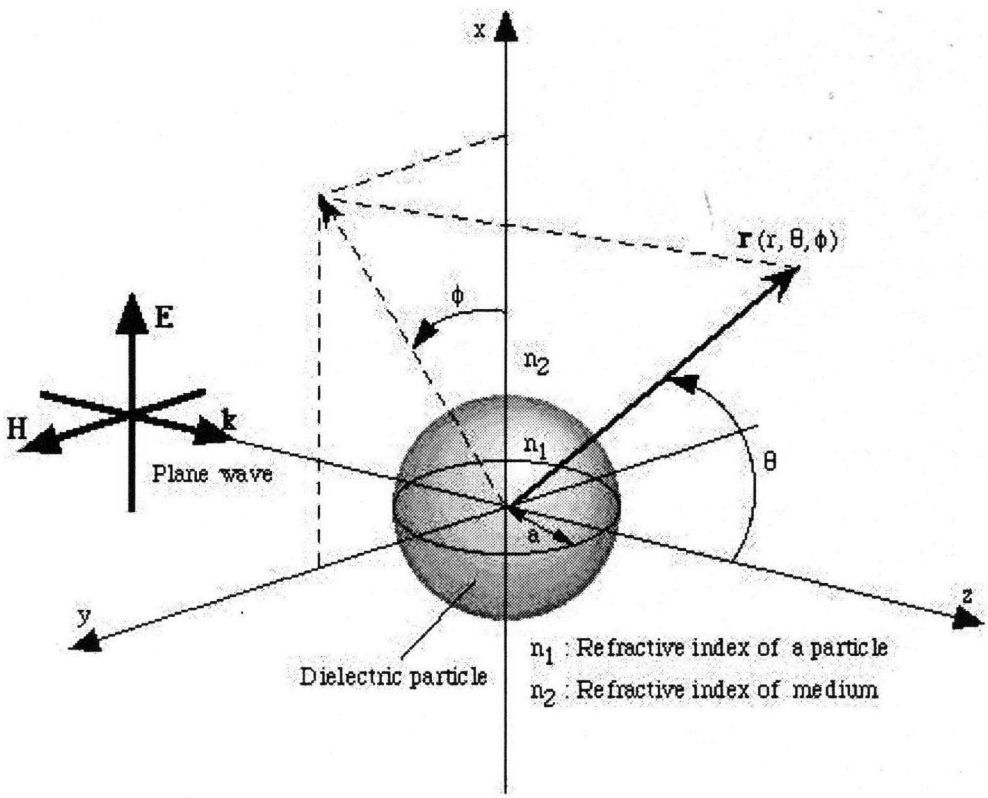
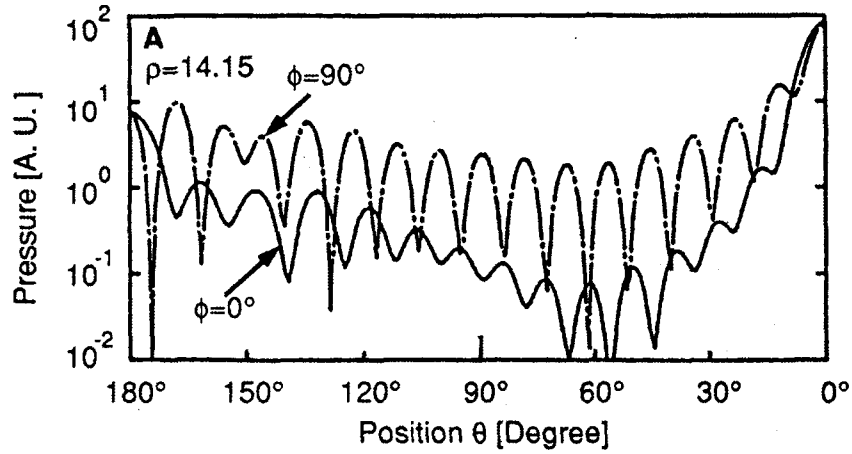
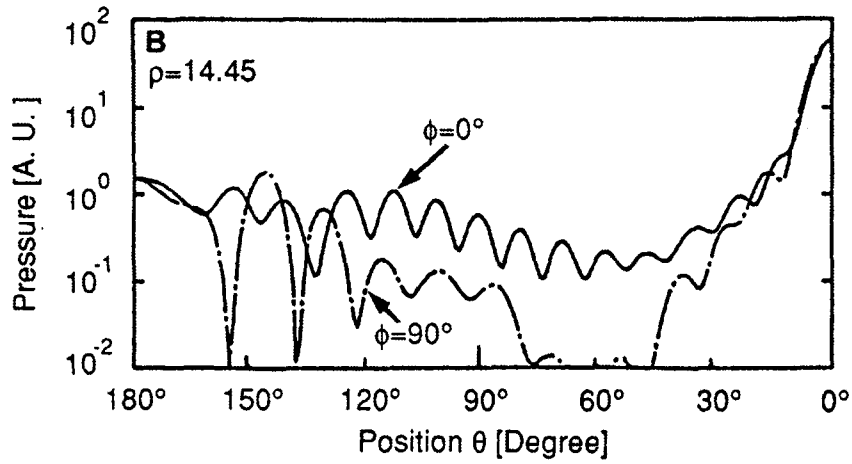


Fig. 5-12　誘電体微粒子に作用する電場における座標系



(a)



(b)

Fig. 5-13　サイズパラメータと放射圧の関係

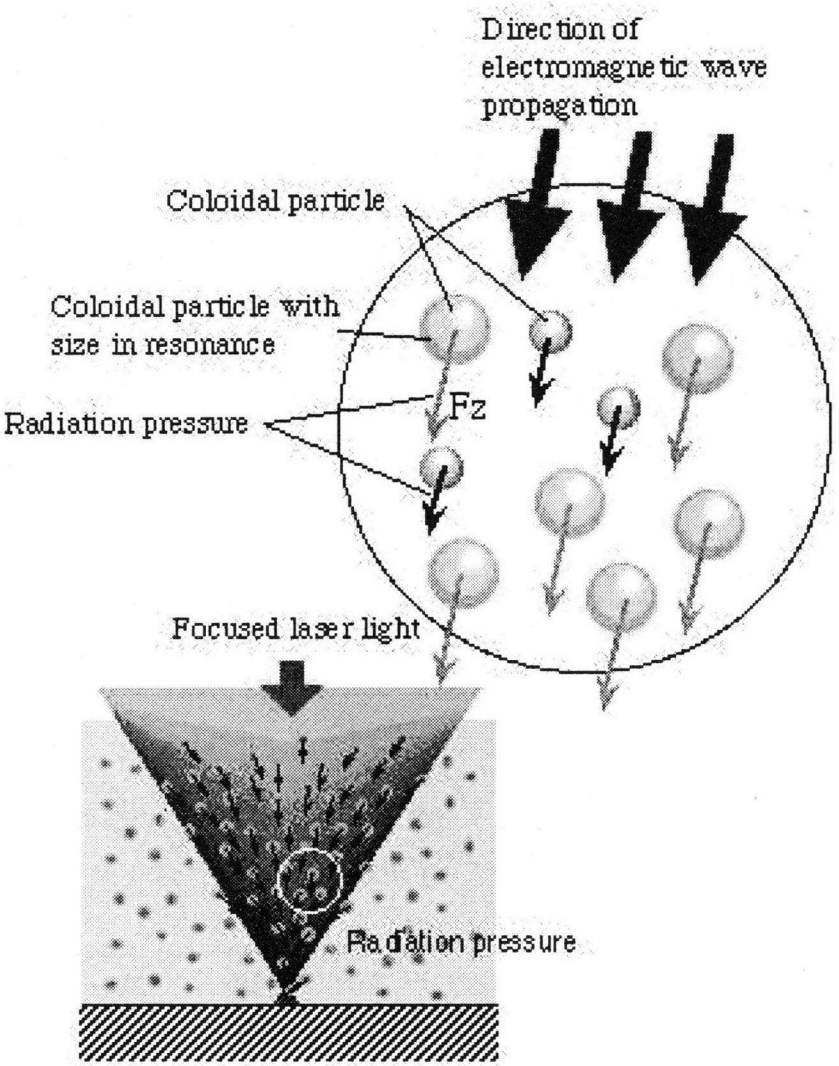


Fig. 5-14　微粒子に作用する放射圧

5-5 結 言

CMP加工に用いるスラリーに対してレーザ光を照射し，レーザ微粒子の捕捉，集積痕の形成の基礎的な実験を行った．実験には Ar+レーザ(λ = 488 nm)，スラリーには KOH 溶液に1次粒径 30～40nm，2次粒径 140nm のヒュームドシリカ(SiO_2) を分散させたものを用いた．その結果,次に示す項目を確認した．

(1) レーザ微粒子集積痕は 100～200nm の微粒子が小塊状となって，レーザの走査軌跡上に並ぶ．この集積痕はシリコンウエハ表面に強固に付着し，ブラシ洗浄を行っても流失することはない．

(2) レーザ微粒子集積痕高さはレーザ出力にほぼ比例する．この時，レーザ微粒子集積痕の形成はシリコンウエハ表面の清浄度に影響され，表面をイオンシャワーにより洗浄することにより容易にレーザ微粒子集積痕が形成できる．

(3) レーザ微粒子集積痕の成分分析を行い，レーザ微粒子集積痕はスラリー中の SiO_2 が凝集したものであることを確認した．

(4) レーザ微粒子集積痕の硬さ測定の結果，硬さはシリコンウエハ表面の SiO_2 膜の 40% 程度であった．これより，集積痕は強固な化学結合はしておらずスラリー中の微粒子が弱い結合で凝集していると考えられる．

(5) レーザ光の波長よりも小さい寸法を持つ微粒子に対する光放射圧は Maxwell の応力により計算可能であり，その大きさはサイズパラメータにより選択的に増強される．その結果,微粒子は焦点位置に向かって捕捉力が作用し，その位置に凝集する．

第 6 章　平面におけるレーザ微粒子集積痕ポリシング実験

6-1 緒　言

スラリー中のシリコンウエハの表面にレーザ照射し，レーザ微粒子集積痕を形成した試料に対しポリシング実験を行った．試料はシリコンウエハ表面に約 1 μ m 厚の SiO_2 膜を形成したものを用い，平面上に集積痕を形成した．集積痕はスラリー中の微粒子の凝集したものであり，化学的に結合しているわけではないためその強度は高くはない．そのため，ポリシングを行うと集積痕として固定された SiO_2 微粒子が再びスラリー中に遊離し，砥粒として作用することが期待される．この状態で，集積痕周辺の砥粒濃度が局所的に高くなり除去量の増大が期待される．

6-2 ポリシング実験装置

ポリシング実験には専用のポリシング実験装置を設計製作した．図 6-1 にポリシング実験装置の概要を示す．ポリシング実験装置はポリシングヘッド部とシリコンウエハ固定部により構成されている.ポリシングヘッド部はポリシングパッドが貼付されたφ20mm の小径工具を有し，モータによる回転運動，および，エアシリンダによるポリシング荷重を同時に作用させることができる．シリコンウエハ固定部では，φ4 インチのシリコンウエハ，および，そのシリコンウエハを□10mm に切断した試料をセラミックス製の真空チャックによりポリシング面を上方に向けて固定し，XYステージにより水平面内で運動する．スラリーは，ポリシング中に必要量が供給される．図 6-2 にポリシング実験装置写真を示す．

ポリシングツールはスプライン軸に直接取り付けられ，エアシリンダからの垂直荷重とモータからの回転運動を同時に作用させることができる構造となっている．

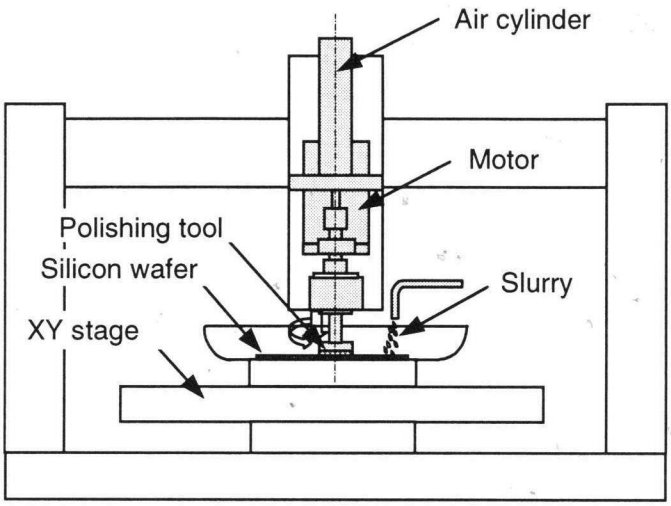


Fig. 6-1 ポリシング実験装置概要

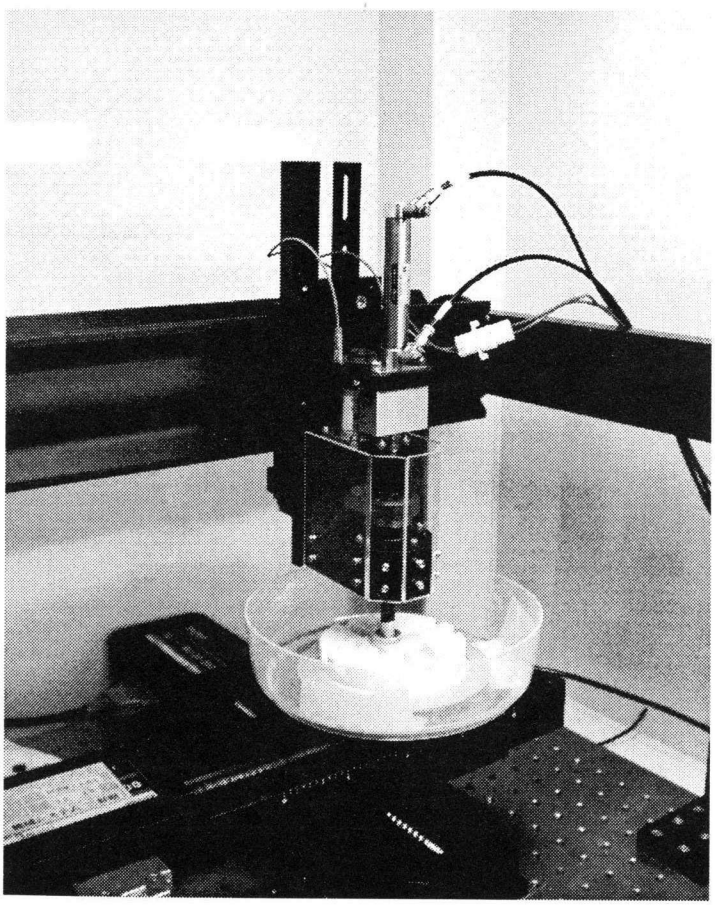


Fig. 6-2 ポリシング実験装置写真

シリコンウエハ固定部はXYステージ上に設置されている．ポリシング試料にはφ4 インチのシリコンウエハと，それを切断した□10mm の試料を用いた．図 6-3はφ4 inch シリコンウエハを固定するピンチャックタイプのセラミックス製ウエハチャックによる吸着，固定部を示した．図 6-4 はシリコンウエハを切断した□10mm試料の固定部であり，φ4 インチ用セラミックス製ウエハチャックの上にさらにセラミックス製のアダプタを載せ，それにより吸着固定している．

シリコンウエハはこのようにしてXYステージ上に固定され，ポリシング実験時にはプログラムにより図 6-5 に示すスキャニング動作を行った．

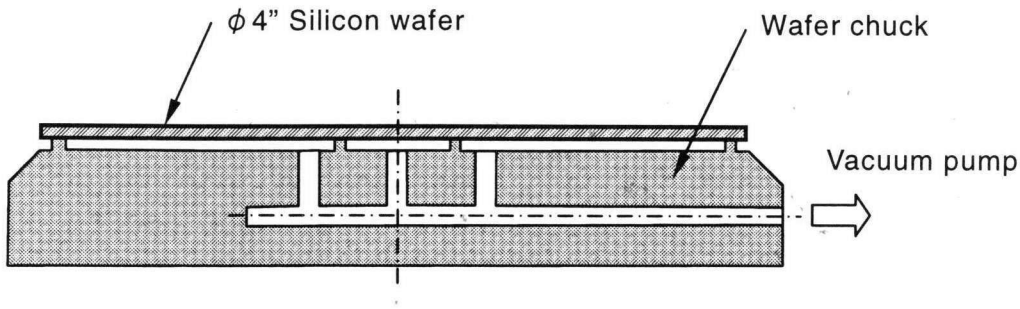


Fig. 6-3　φ4 インチシリコンウエハ固定部

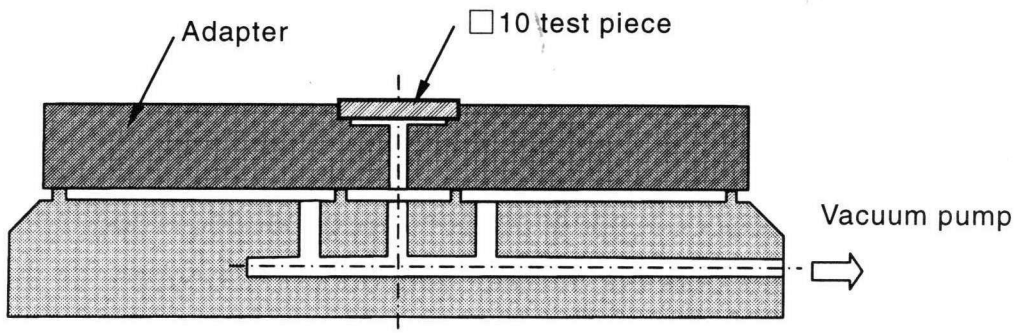


Fig. 6-4　□10mm 試料固定部

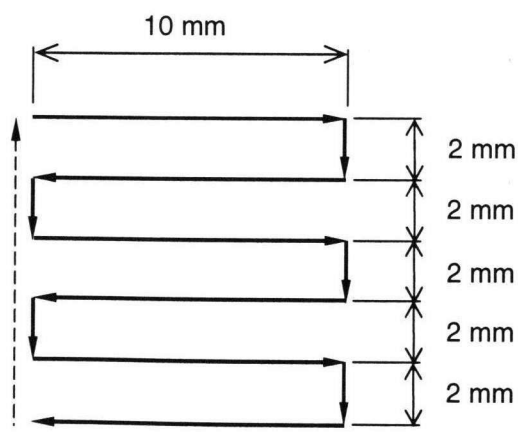


Fig. 6-5 ポリシング実験におけるスキャニング動作

6-3 レーザ微粒子集積痕ポリシング実験

表 6-1 はポリシング実験におけるポリシング条件を示している. ポリシングツールには φ20 の小型ツールを用い, その下面に硬質ポリシングパッド IC1000 を貼り付けた. ポリシングツールの回転数は 100rpm, ポリシング圧力は 0.025MPa である.

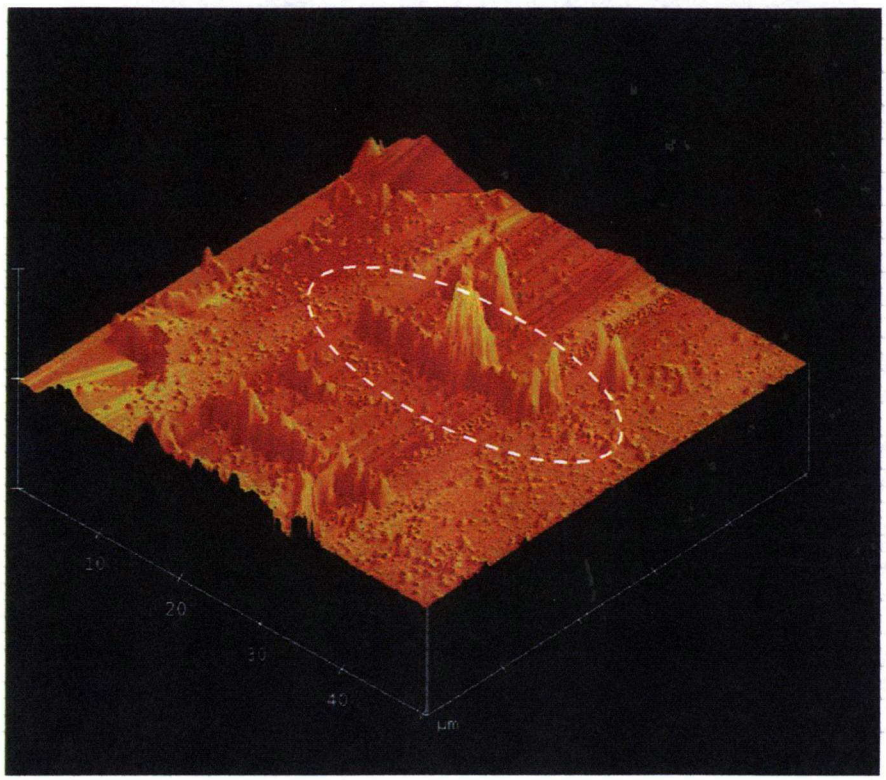
図 6-6 (a)～(f)はシリコンウエハ表面にレーザ微粒子集積痕を形成した試料をポリシングした時の時間経過によるAFM観察結果を示す. T= 0 min は, レーザ微粒子集積痕が形成された直後で, レーザ微粒子集積痕は鋭い凹凸を持っている. ポリシングが進むにしたがって, レーザ微粒子集積痕は頂上部から除去され, 滑らかな形状となる. レーザ微粒子集積痕周辺部はスクラッチ等が観察され, 大型の砥粒によるポリシング作用が発生していることを示唆している. T= 9 min になるとレーザ微粒子集積痕は消滅し, 滑らかなポリシング面が得られている.

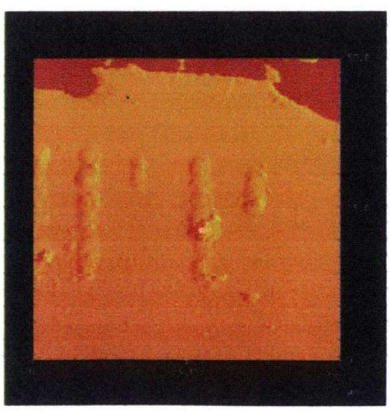
図 6-7 は図 6-6 のレーザ微粒子集積痕の断面のポリシング時間による変化を観察した結果である. T= 9 min で滑らかなポリシング面が得られているが, 特徴的な現象として, 二つのレーザ微粒子集積痕にはさまれた領域 [R] で 75nm 程度の凹形状が形成され, また図 6-6(f) のレーザ微粒子集積痕直下の破線で囲まれた部分, すなわちレーザ照射位置に微小凹部が形成されている.

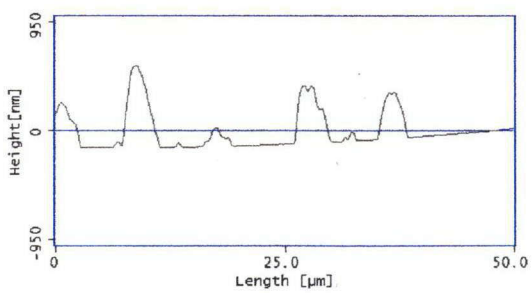
図 6-8 は図 6-6 (a)の破線で囲んだ部分のレーザ微粒子集積痕に注目し, ポリシング時間の経過とともに断面を表示した結果である. レーザ微粒子集積痕形成直後は集積痕最大高さは 527nm, 幅は 3.9 μm であったが, T= 3 min ポリシング後には, ポリシング前に最大高さであったレーザ微粒子集積痕はポリシングにより減少し, 高さ 198nm, 幅 2.0 μm となっている. 時間の経過にともないレーザ微粒子集積痕高さは減少し, 200nm より低くなると特徴的な現象として, レーザ微粒子集積痕の両側に凹部(A_1, A_2 部)が形成される現象が観察される. これは, ポリシングの進行にともないレーザ微粒子集積痕が崩壊して微粒子が再度スラリー中に流出し, レーザ微粒子集積痕周辺のみでスラリーが高集中化し, 局所的な材料除去現象が発生した結果と推察される.

表 6-1 ポリシング条件

Polishing equipment	Small tool polishing
Rotation speed	100 rpm
Polishing pressure	0.025 MPa
Polishing pad	IC1000, φ20
Velocity of XY-stage	40 mm/min

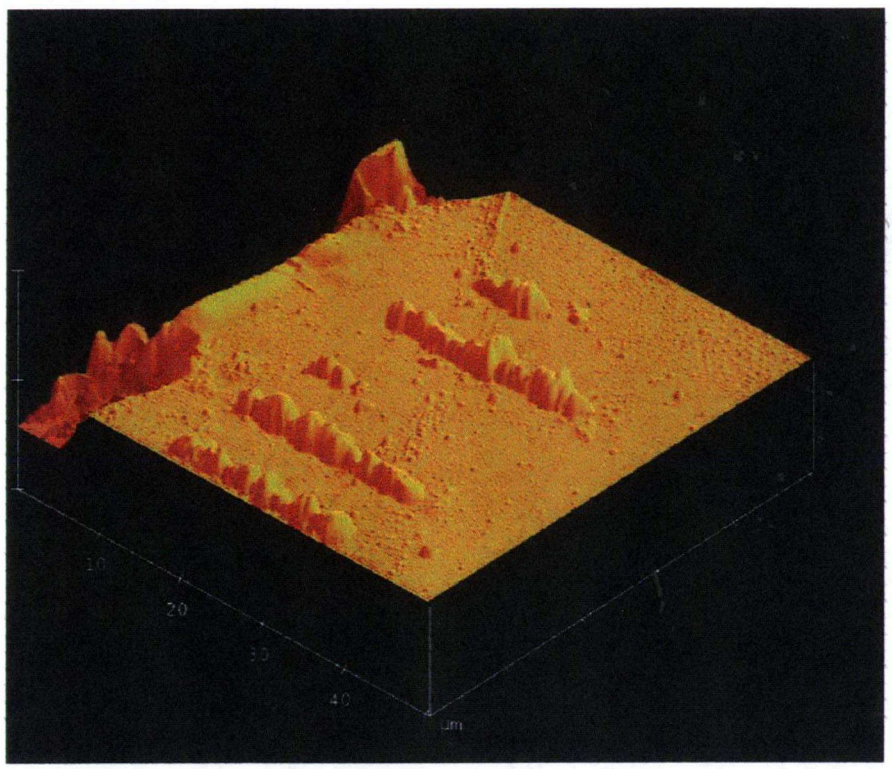


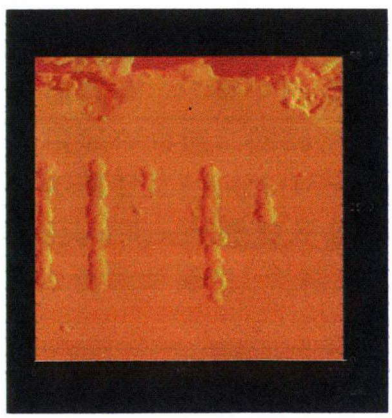


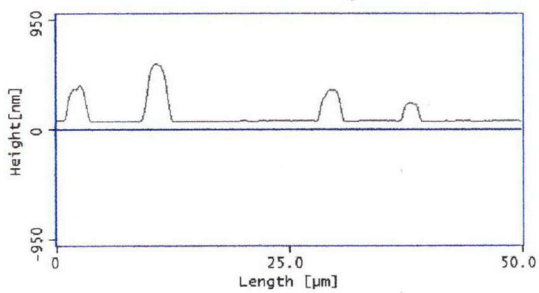


Nano Scope IIIa
Dimension 3100
(Digital Instruments)

図 6-6 (a) レーザ微粒子集積痕のポリシング実験 (T= 0 min)

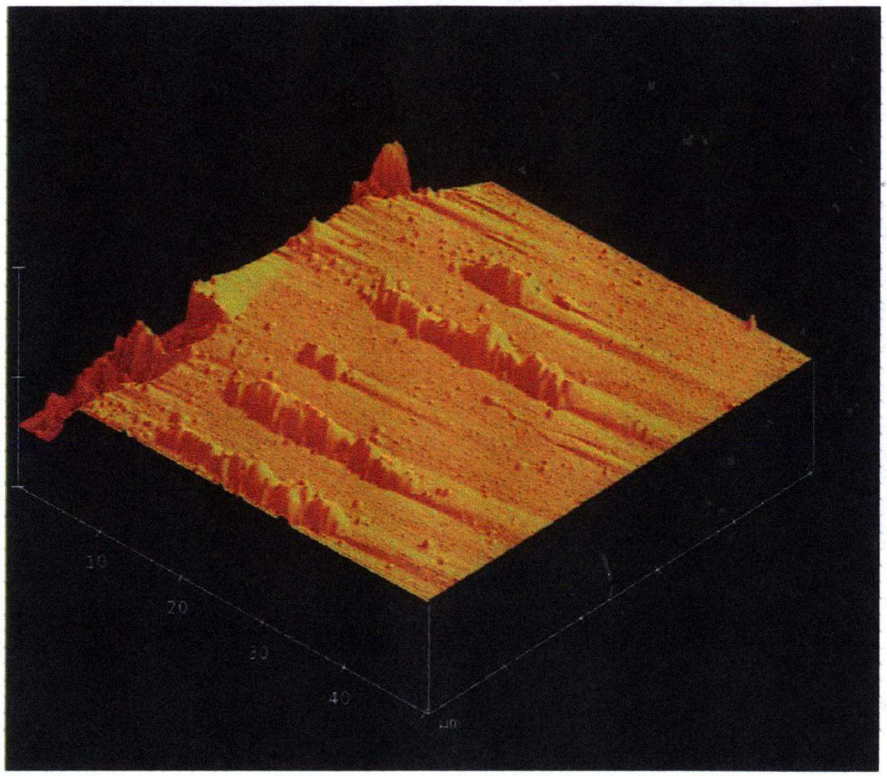


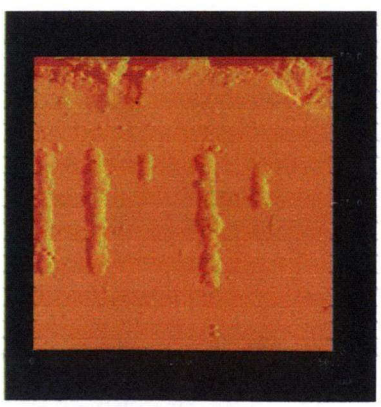


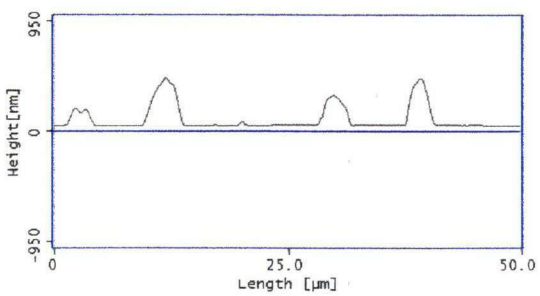


Nano Scope IIIa
Dimension 3100
(Digital Instruments)

図 6-6 (b) レーザ微粒子集積痕のポリシング実験 (T= 1 min)

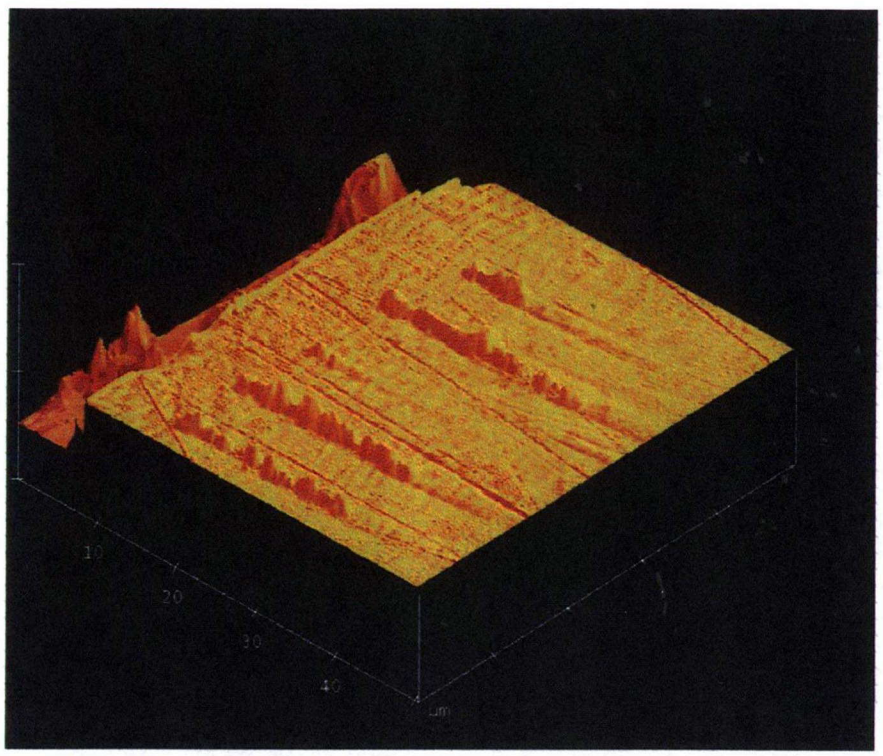


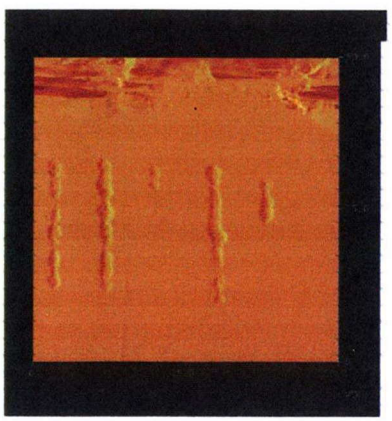


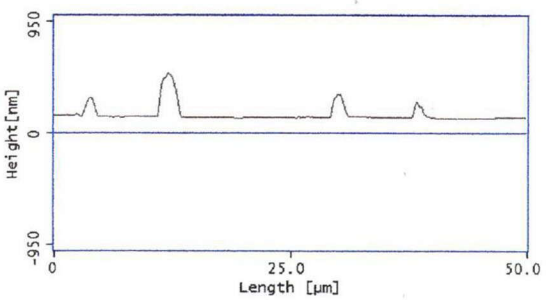


Nano Scope IIIa
Dimension 3100
(Digital Instruments)

図 6-6 (c) レーザ微粒子集積痕のポリシング実験 (T= 2 min)

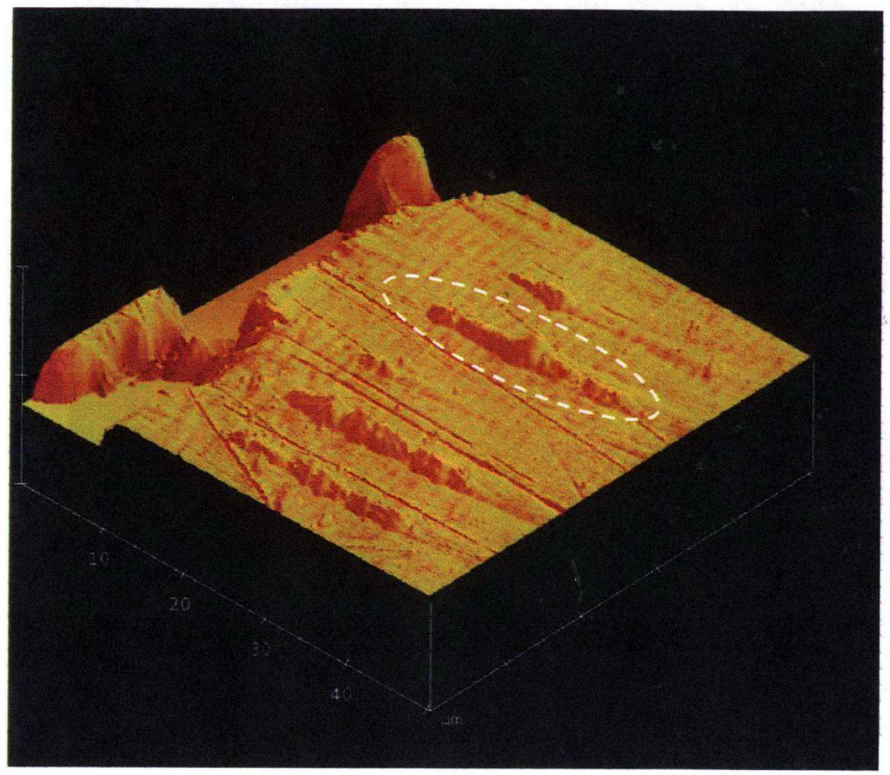


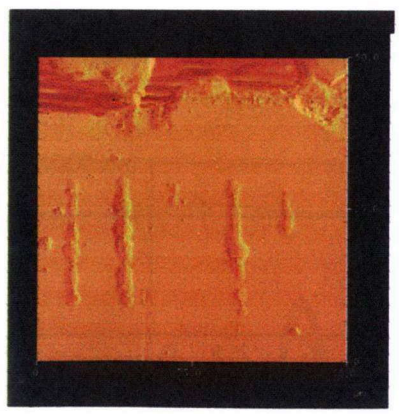


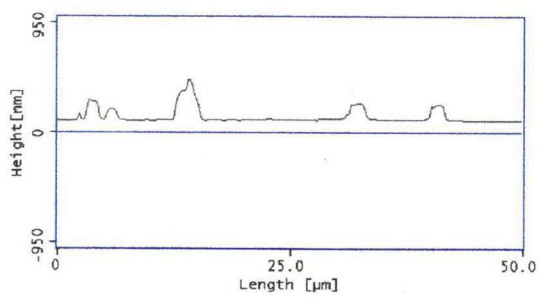


Nano Scope IIIa
Dimension 3100
(Digital Instruments)

図 6-6 (d) レーザ微粒子集積痕のポリシング実験 (T= 3 min)

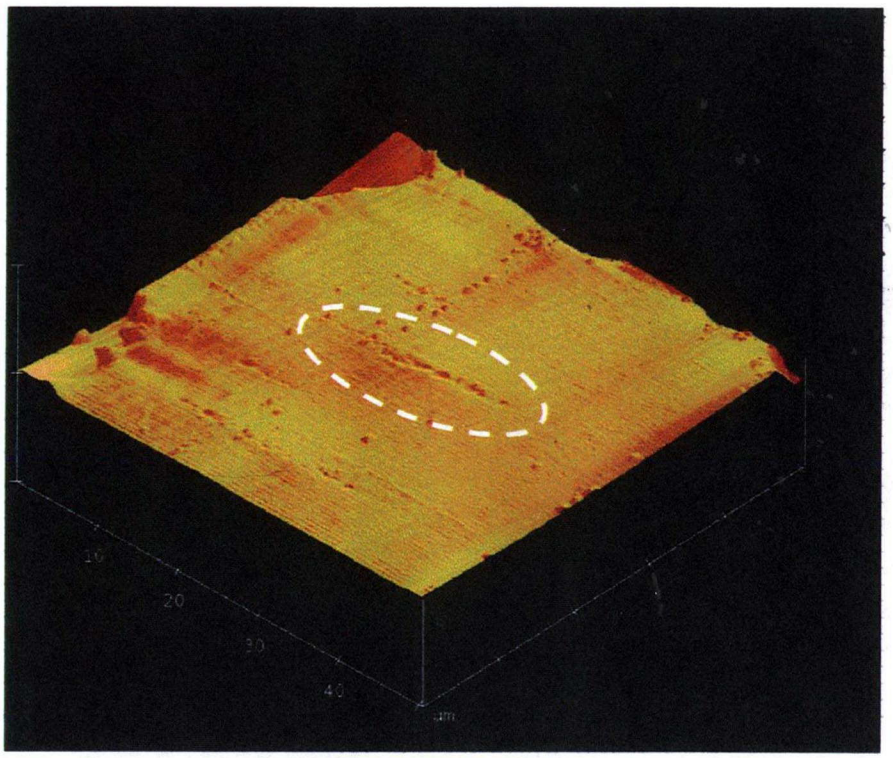


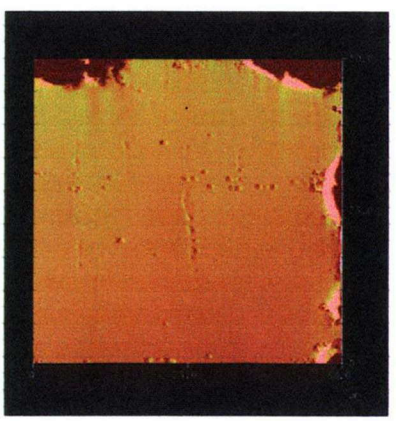


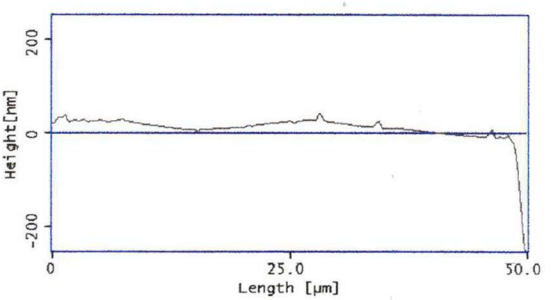


Nano Scope IIIa
Dimension 3100
(Digital Instruments)

図 6-6 (e) レーザ微粒子集積痕のポリシング実験 (T= 6 min)







Nano Scope IIIa
Dimension 3100
(Digital Instruments)

図 6-6 (f) レーザ微粒子集積痕のポリシング実験 (T= 9 min)

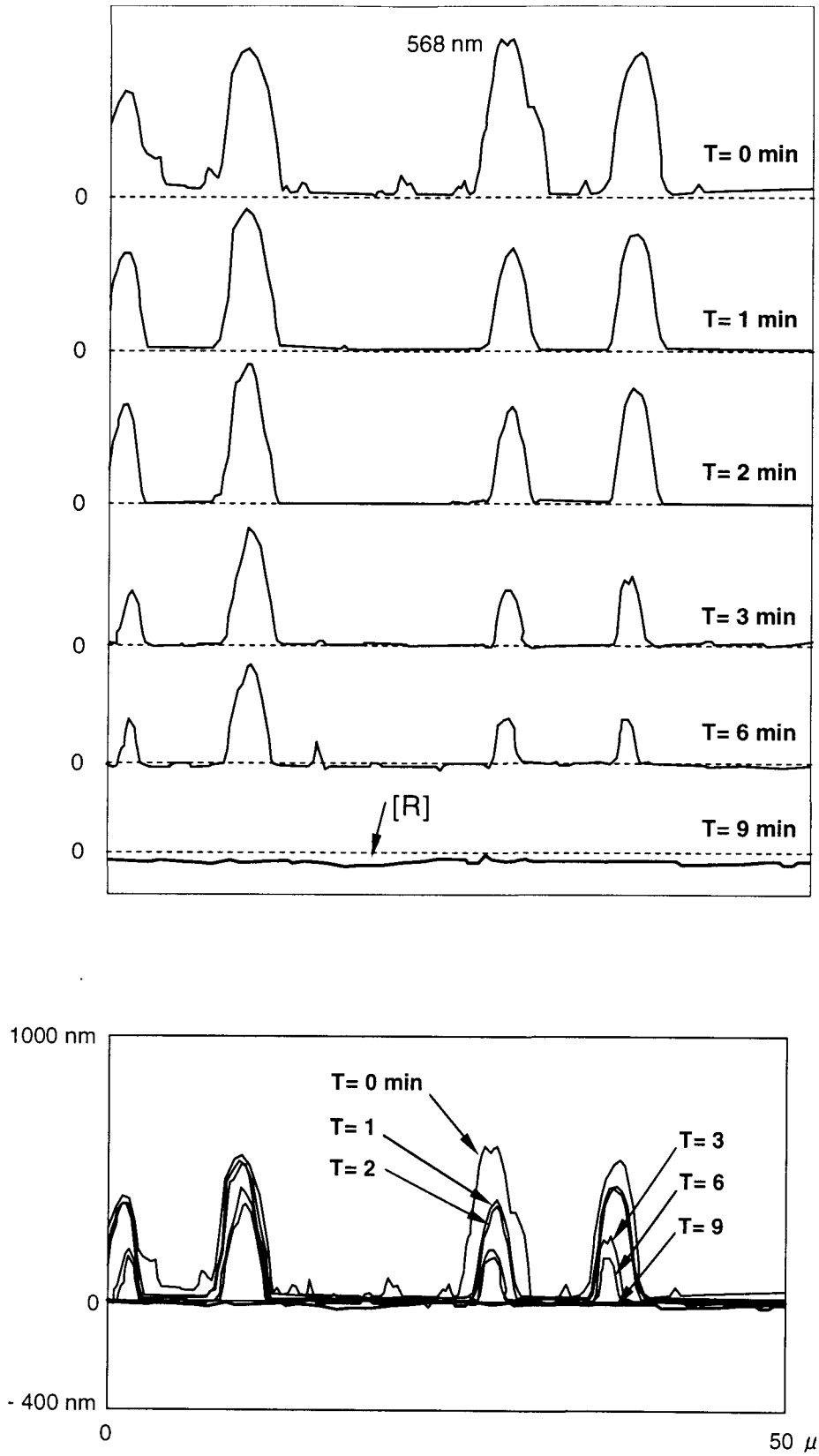


図 6-7 ポリシング時間による変化の断面観察

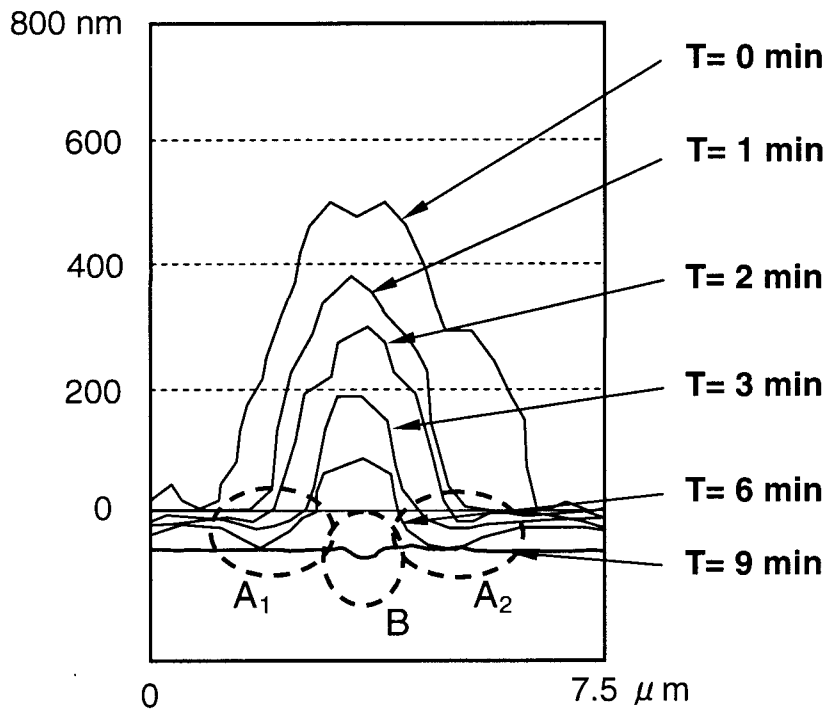


図 6-8 ポリシング時間の経過による断面

さらに，T=9min までポリシングすると集積痕は消滅してその周辺全体がなめらかな面となり，レーザ照射位置に微小凹部(B 部)が形成されていることが確認できる．これは，深さ10.3nm，幅750nm程度の微小凹部であり，レーザ照射部直下に形成されている．この形成の原因としてはレーザ照射によるシリコンウエハ表面の化学反応層の形成とそれによる除去作用の局所的活発化，およびレーザ照射によるレーザ熱加工などの影響が考えられる。

6-4 結 言

平面状のシリコンウエハ表面にレーザ照射を行いレーザ微粒子集積痕を形成し，その集積痕をポリシングしその変化を観察した．

この実験により，次のことを確認した．

(1) 形成されたレーザ微粒子集積痕をポリシングすると，ポリシングの進行にともない頂上部から除去され，全体が滑らかな形状になる．

(2) T=9 min でレーザ微粒子集積痕は消滅し，全体が滑らかな平面になった．

(3) 二つの大きなレーザ微粒子集積痕の中間部に約 75nm の凹部が形成された．

(4) レーザ微粒子集積痕のポリシングを進めると，時間の経過とともにレーザ微粒子集積痕周辺部が除去され，特にレーザ微粒子集積痕高さがH=200 nm より低くなるとレーザ微粒子集積痕近傍に凹部が形成される．

(5) T=9 min ポリシング後の平面は滑らかな面になるが，レーザ照射部には深さ 10.3 nm，幅 75 nm 程度の微小凹部が形成されている．

(6) レーザ照射により集積,固定化されたスラリー中の微粒子はポリシングにより崩壊し,再び砥粒として作用する．この結果,集積痕周辺での砥粒集中度が高くなるため，集積痕周辺が特異的に除去されると考えられる．

第 7 章　凹凸面におけるレーザ微粒子集積痕ポリシング実験

7-1 緒 言

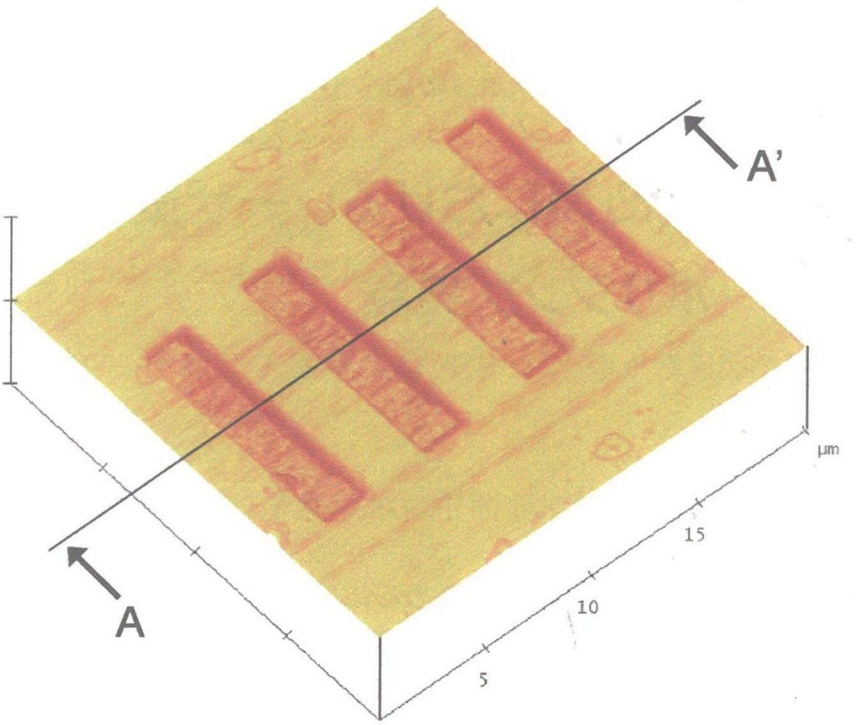
2-3 で示したように，平坦化を進めるには凸部の選択的材料除去と同時に凹部の材料除去の進行を止めることが必要である．第7章では，4-4 で示した凹凸面の凹部をレーザ微粒子集積により埋め立て，その後，シリコンウエハ表面の凹凸形状をポリシングし平坦化する，レーザ微粒子集積痕ポリシング(LAFP)の有効性を検証するためにポリシング実験を行った．実験は，シリコンウエハ試料表面にFIB(Focused Ion Beam)加工により微細溝 4 本からなるトレンチパターンを形成し，その凹凸を平坦化するポリシング実験を行った．試料は 2 個作製し，そのうちの 1 個のトレンチ溝底面にレーザ微粒子集積痕を形成したのち，同一条件でポリシングを行った．

7-2 FIB による凹凸パターンの作製

熱酸化 SiO_2 膜が形成されているシリコンウエハ表面に FIB 加工によりトレンチ溝を形成し，試料を作製した．使用した FIB 加工装置はセイコーインスツルメンツ製 SMI9200 型である．仕様等の装置概要は Appedix に示す．加工条件は，次の通りである．

プローブ電流	:	1.3 nA
ビーム径	:	92 nm
加速電圧	:	30 kV

図 7-2 は，幅約 2.5 μ m，長さ約 12 μ m，深さ約 60nm のトレンチ溝4本を形成した試料 Q_1，図 7-3 は，幅,長さは等しく，深さ約 120nm のトレンチ溝4本を形成した試料 Q_2 の AFM 観察像と断面形状を示している．トレンチの深さは 4 本とも



Nano Scope IIIa
Dimension 3100
(Digital Instruments)

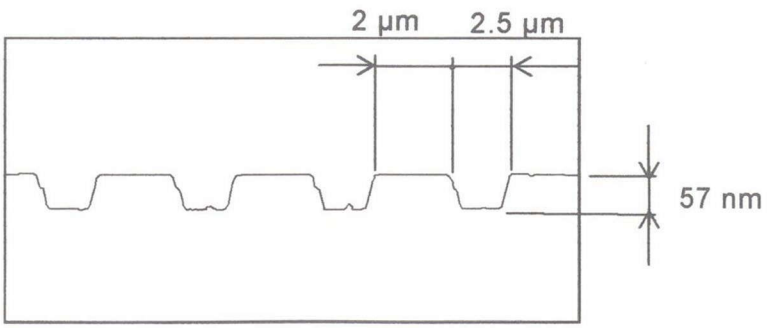
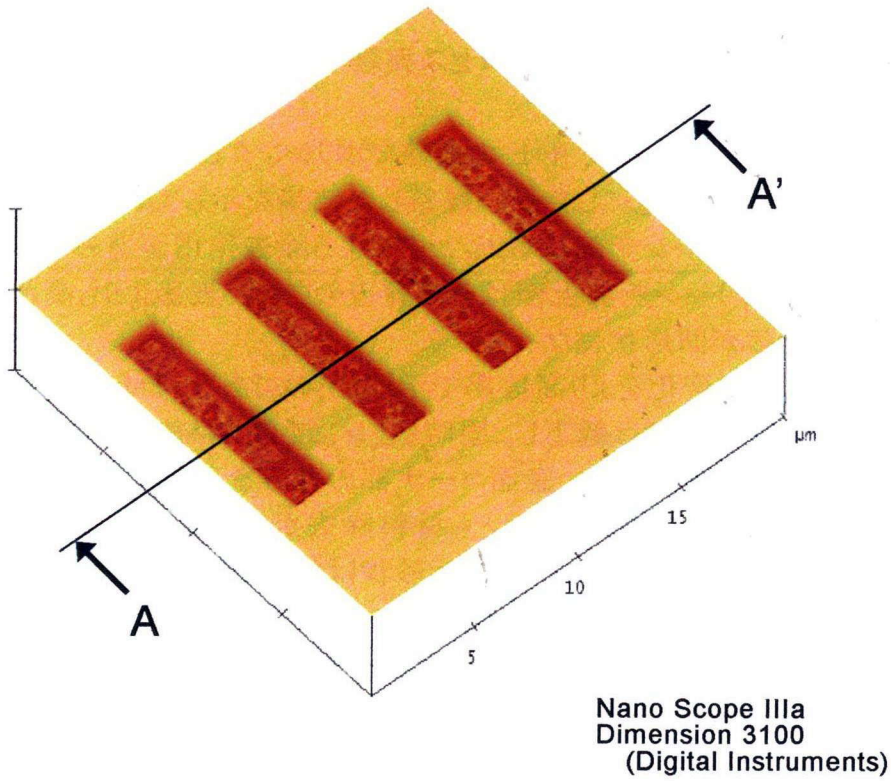


Fig. 7-2 トレンチ溝4本を形成した試料 Q_1



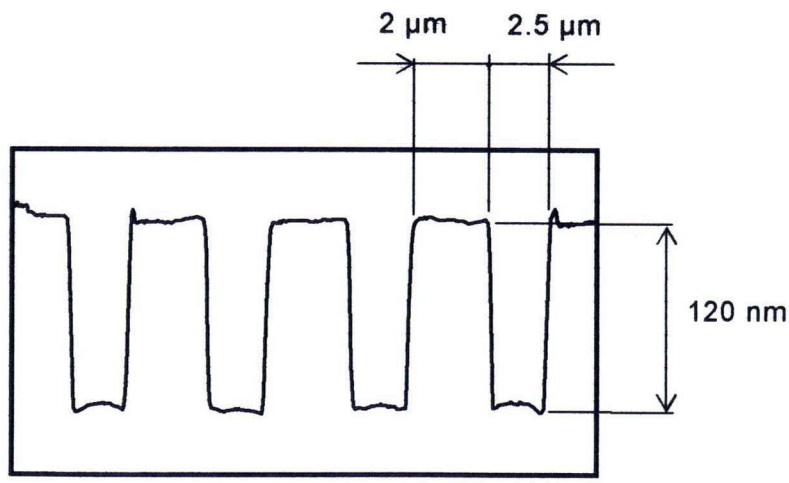


Fig. 7-3 トレンチ溝4本を形成した試料 Q_2

等しく，エッジ部，コーナ部とも丸みのない鋭い形状をしている．試料 Q_1 はそのままポリシング実験を行い，試料 Q_2 は中央部の 2 本のトレンチにレーザ照射による集積痕を形成し，その後ポリシング実験を行った．

7-3 ポリシングによる平坦化プロセス実験

図 7-4 は試料 Q_1 を表 6-1 の条件でポリシングしたときの断面形状の変化をポリシング時間の経過にしたがい観察した結果を示している．ポリシング時間の経過にともない，トレンチ部はポリシングによる除去作用が進みエッジ部が丸味を帯びるとともに，トレンチ部上面はその周辺のウエハ表面よりも高さ位置が低下しトレンチ部全体が凹形状になっていく．

図 7-5 はこの変化をより高倍率で示したものである．T=6 min では T=0 min と比べてトレンチ部上面は低下し，同時にトレンチ深さは約 16nm となっている．トレンチ上面の凹形状の形成，底面コーナ部の丸みを考慮すると,ポリシングの進行にともないトレンチの上面,底面とも材料除去が行われたことを示している．T=9 min でも同様の傾向を示し，トレンチ形状は依然として残留し完全に消滅してはいない．T=12 min ではポリシングはさらに進行し，トレンチ形状はほとんど確認できなくなり，初期トレンチ形状の影響はほぼ消滅したといえる．しかし,トレンチの形成されていた部分は全体が 8.9 nm を越える凹形状となり，トレンチの存在が平坦化に対して大きな影響を持つことを示している．トレンチを形成した凹凸面においては，ポリシングの進行にともないエッジ部からポリシングが開始され，トレンチ上面，トレンチ底面で同時にポリシングが進行するが，トレンチ底面のポリシング速度が多少小さいため長時間のポリシングにより平坦化は緩やかに進行する．しかし，最終的にはトレンチ形状が消滅してもトレンチ形成部分は周辺部よりもポリシング速度が大きく，9 nm 程度の凹面形状が残留して，平坦化には限界があることが示された．

次に，試料 Q_2 の表面に形成された4本のトレンチのうち中央部 2 箇所に表 5-2 の条件でレーザ照射を行いレーザ微粒子集積痕を形成した．図 7-6 は，集積痕を形成した試料 Q_2 の AFM による観察結果を示している．レーザ光は 4 本のトレンチのうち中央部の 2 本にのみ正確に照射され集積痕が形成された．隣接するトレンチと 2.5 μ m の間隔を持つ幅約 2 μ m の微細トレンチに精度良くレーザ光を照射し，高さ約 520nm のレーザ微粒子集積痕を形成することができた．

図 7-7 は試料 Q_2 を表 6-2 の条件でポリシングし，その材料除去の進行を AFM により観察した結果を示している．T=0 min では，レーザ微粒子集積痕は中央部の 2 本のトレンチ部に形成され，トレンチ上面から約 520nm の高さを有している．ポリシングを開始すると，まず集積痕の先端部が除去されその高さは減少していく．同時に最外側のトレンチのエッジ部が丸くなり始め，レーザ微粒子集積痕を形成しない部分においてもポリシングが進行していることを示している．この

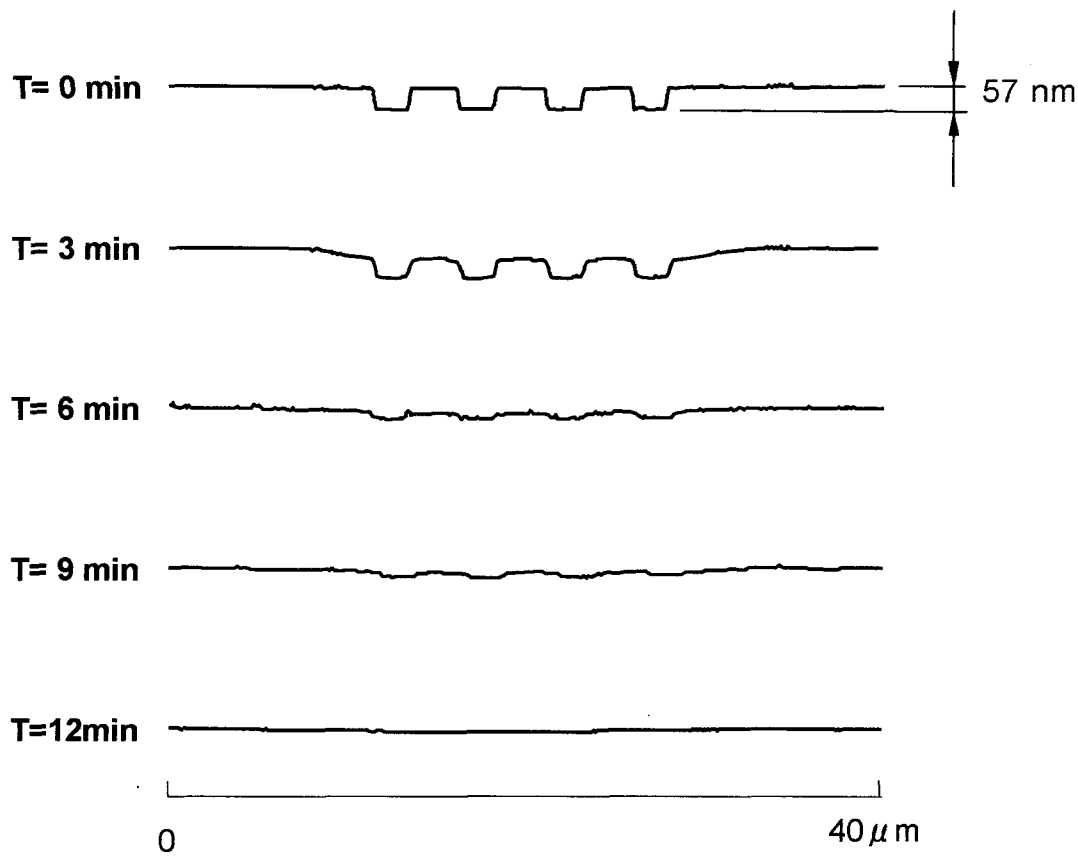


Fig. 7-4 トレンチ部のポリシングによる断面形状変化（低倍率観察）

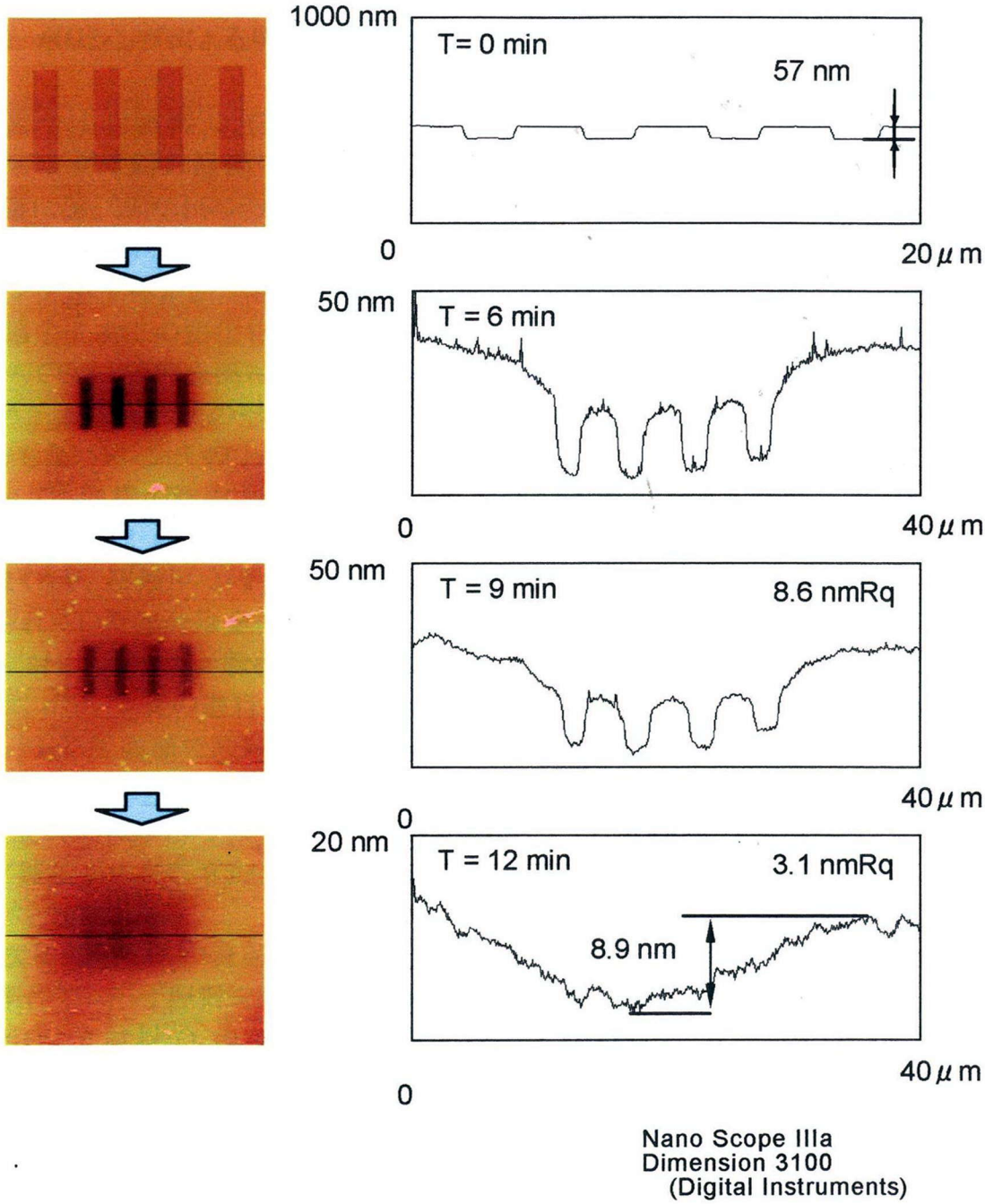


Fig. 7-5 トレンチ部のポリシングによる断面形状変化の詳細（高倍率観察）

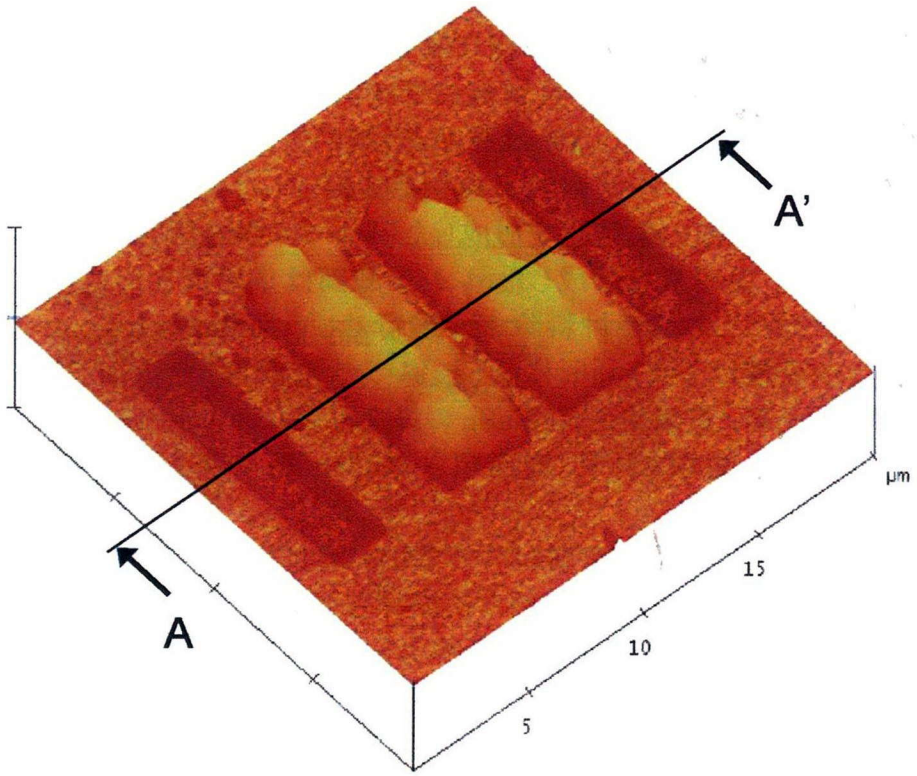
傾向はその後も継続し，レーザ微粒子集積痕と最外側トレンチ部のポリシングがさらに進行する．その後，T=12 min でレーザ微粒子集積痕の突出部はほぼ消滅し，埋め立てられたトレンチ部は周囲と同一の平面を形成して，全体がポリシングされる．

図 7-8 はこの変化を高倍率で詳細に観察した結果である．

T=12 min ではレーザ微粒子集積痕はほぼ消滅するが，二つのレーザ微粒子集積痕により挟まれたトレンチ上面は周囲より高い位置にあり，ポリシングが抑制されたことを示している．レーザ微粒子集積痕を形成しない両側のトレンチは深さ約 28 nm であり，中央部の集積痕を形成したトレンチの深さは約 18 nm である．これはレーザ微粒子集積痕を形成したトレンチ底面は集積痕を形成しなかった部分と比較してポリシングによる材料除去が進行せず，抑制されたことを示している．さらにポリシングを続け T=21 min になると，トレンチ形成部では約 7.3 nm のトレンチ痕が観察されるが，表面粗さ1.5nmRq のほぼ平坦な面になっており，T=24 min ではこのトレンチ痕も観察されず，表面粗さ 0.53nmRq の極めて良好な平坦面が形成されている．

この結果，ポリシング時間は初期トレンチ深さにほぼ比例するとともに，試料表面にトレンチのみを形成した場合は，例え初期深さが 57nm と小さくてもポリシング終了後トレンチ形成部全体が約 9nm の凹形状を示すのに対して，レーザ微粒子集積痕を形成した場合は，トレンチ深さが 120nm と大きくてもトレンチ形状の影響を受けることなく表面粗さ 0.53nmRq の平坦化ポリシングが可能であり，LAFP 法の有効性を確認することができた．

図 7-9 はレーザ集積痕ポリシングの平坦化過程を考察するために，トレンチ中央部近傍の断面形状における最低部(トレンチ底面)と最高部(集積痕頂部)の高低差 d とポリシング時間 T の関係を示したものである．初期のトレンチ深さは 120nm であるから，レーザ微粒子集積痕はその数倍以上の大きな高低差を持ち，T=6min までの初期の高低差の減少は集積痕の材料除去のみによって生じたものと考えられる．T=6min から T=9min の僅か 3 分間で約 440nm から 60nm へと高低差が大幅に減少しているのは，急激なレーザ微粒子集積痕高さの減少と同時に表面全体の材料除去が進行しているためと考えられる．その後，T=9min から T=21min とポリシングが進むに従い，高低差は徐々に減少し T=21min では約 7nm になり，集積痕は除去されトレンチ部の凹凸がわずかに残留している．さらに，T=24min では高低差が約 2nm であることから初期トレンチ形状の凹凸は除去され，表面粗さ(0.53nmRq)が支配的な平坦面になっている．このレーザ微粒子集積痕ポリシングを適用することにより，当初 120nm あった凹凸形状を数 nm の凹凸を持つ平坦面に仕上げることができた．



Nano Scope IIIa
Dimension 3100
(Digital Instruments)

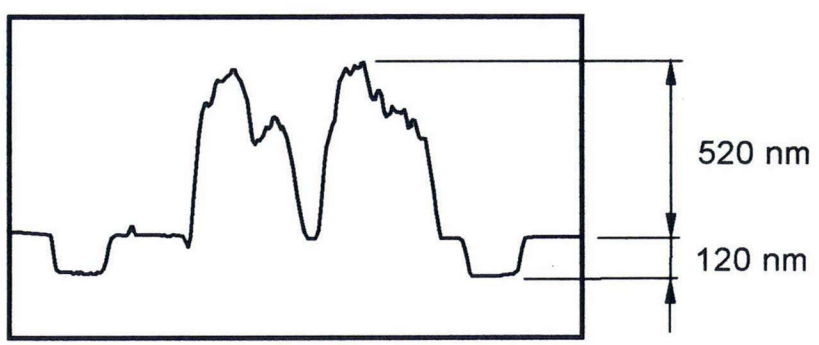


Fig. 7-6 集積痕を形成した試料

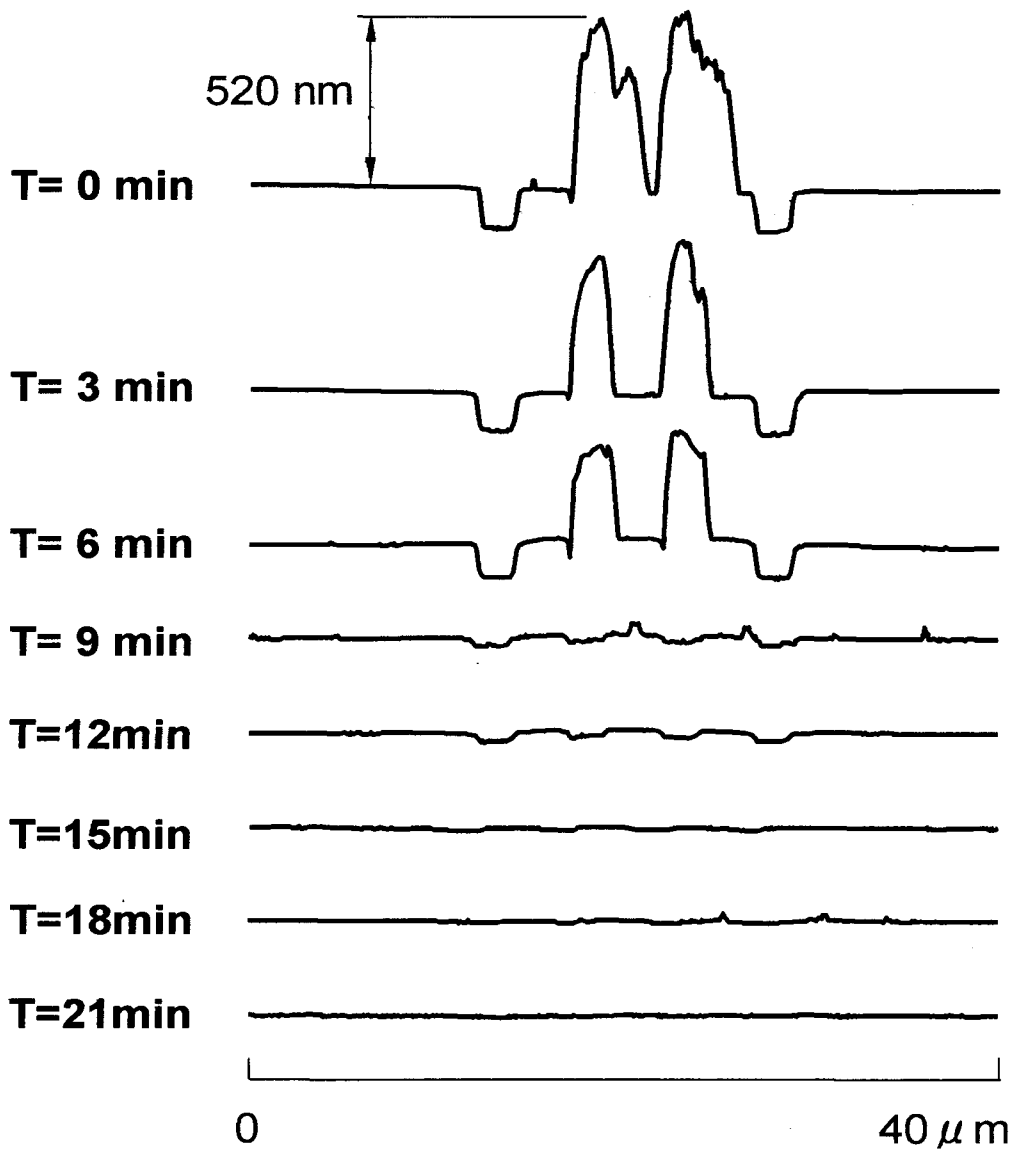


Fig. 7-7 集積痕形成試料のポリシングによる断面形状変化（低倍率観察）

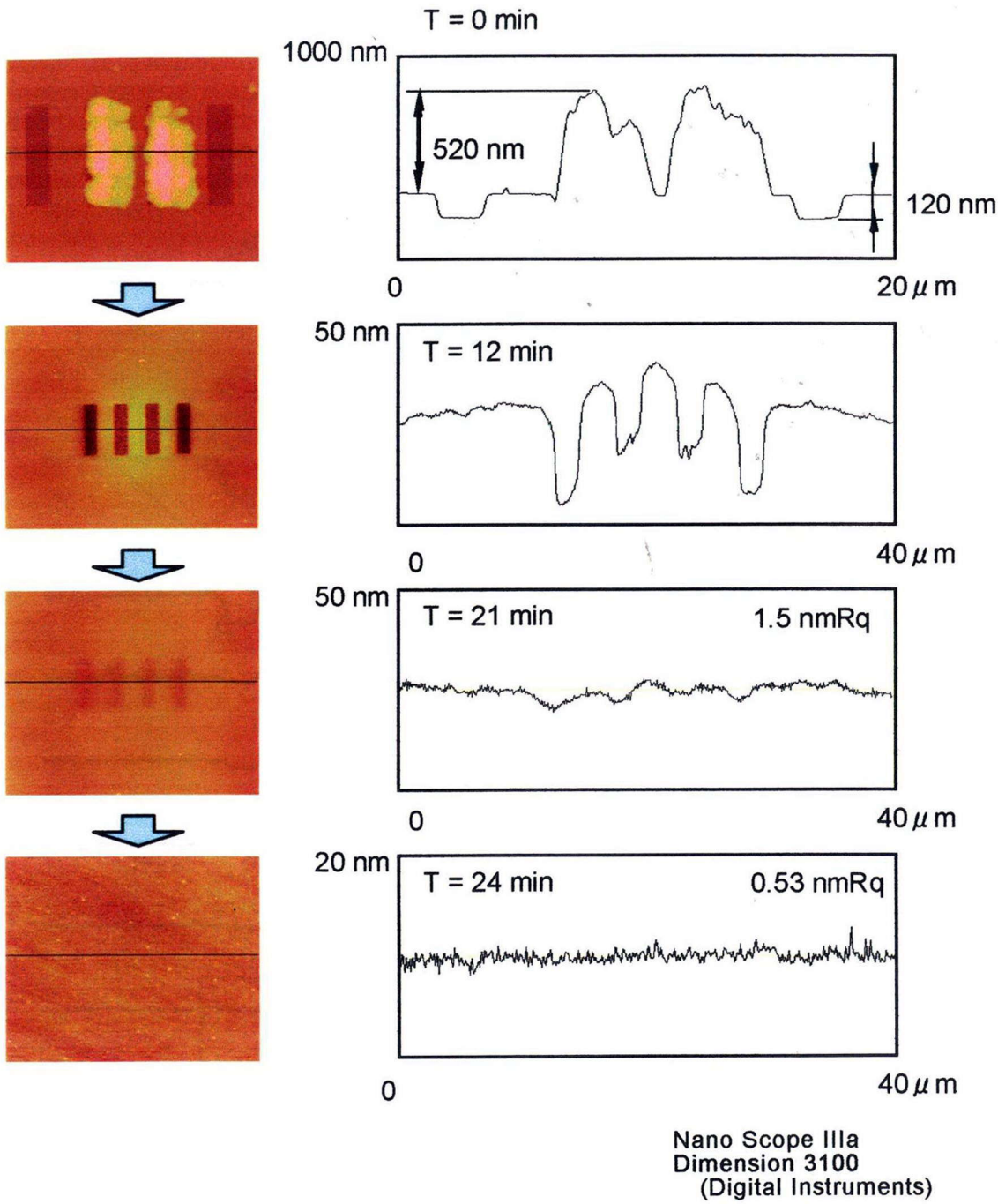


Fig. 7-8 集積痕形成試料のポリシングによる断面形状変化の詳細
(高倍率観察)

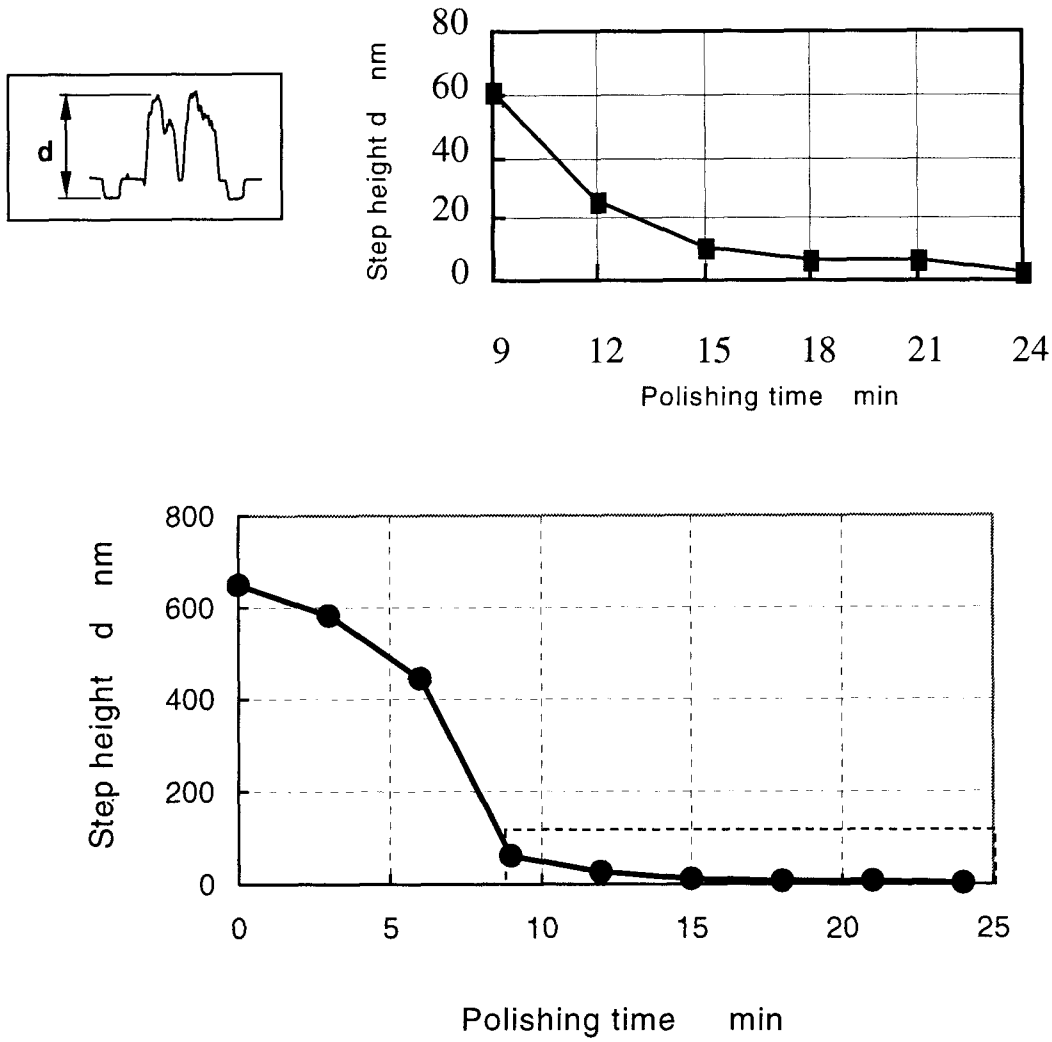


Fig. 7-9 平坦化プロセスの時間的変化

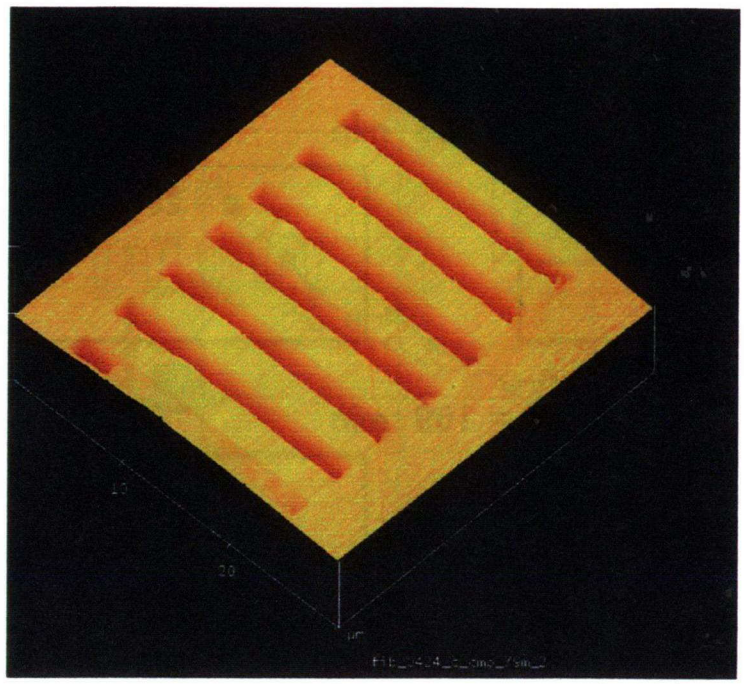
7-4 多トレンチ試料によるポリシング実験

多数の深いトレンチが並んだ試料を作製し，ポリシング実験を行った．図 7-10 にトレンチ形成試料を，図 7-11 に同一試料にレーザ微粒子集積痕を形成した試料を示す．トレンチは幅約 3μm，深さ 560nm，ピッチ間隔約 3.8μm の形状で 12 本並べて形成し，各 6 本をトレンチのまま,およびレーザ微粒子集積痕を形成して実験試料とした．

トレンチの底面を高さ方向の基準としたときのトレンチ高さ，または集積痕頂上までの高さを d，トレンチ上面から集積痕頂上までの高さを d' としたときのトレンチ断面の観察結果を図 7-12 に示す．トレンチのみをポリシングした場合は，T= 193 min までポリシングは進みトレンチは浅くなるが，トレンチ形状が残留し平坦化は進んでいない．一方，レーザ微粒子集積痕を形成した試料は T= 169 min まではトレンチを埋め立てているが，T=179 min になると埋め立てていた集積痕がなくなりトレンチの形状が明確に現れる．T=179 min 以降はトレンチのみの場合と同様にトレンチの形状を保存しながらポリシングが行われる．ポリシングが進むにしたがいトレンチ溝の深さ自体は小さくなるので，ポリシングによる材料除去は進んでいると考えられるが，凹凸はなくならないので凹部底面の材料除去も同時に進んでいると考えられる．

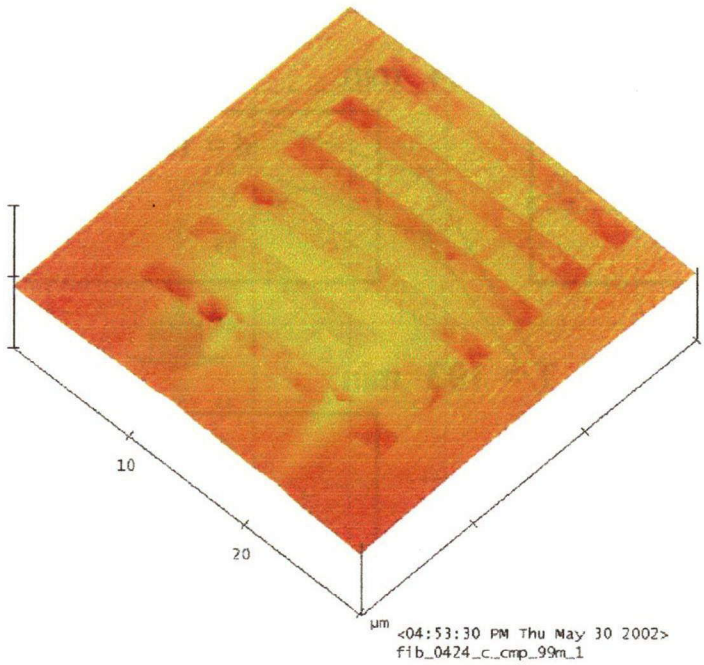
図 7-13 はポリシング時間の経過に対する d の変化を表したグラフである．当初,トレンチ溝深さ 500nm，集積痕高さ 200nm からスタートし，ポリシング時間が経過するとともに集積痕高さは急速に減少する．約 70min 後に，集積痕は消滅し，トレンチのみの場合と集積痕を形成した場合のトレンチ深さはほぼ同一になる．図 7-14 は，図 7-13 のグラフを T=160 min 以降，拡大表示したものである．

図 7-14 によると，T= 169min では集積痕を形成した場合のほうが d は小さくなり，T= 179min で両者ともほぼ同一の値となることがわかる．この結果，深いトレンチにレーザ微粒子集積痕を形成しポリシングを行うと，当初はポリシングにより集積痕が急速に減耗し，やがてトレンチ上部に突き出していた集積痕が消滅してからも埋め立て効果は残っている．しかし，全体のポリシングが進み，トレンチ深さ約 20nm になると集積痕はなくなり，その後は平坦化は進行せず，レーザ微粒子集積痕を形成しない場合と同様の挙動を取る．トレンチ深さ 20nm 程度で，集積痕がなくなるのは，ポリシングのために脱落したのか，レーザ微粒子集積形成時に底部まで形成できなかったのかは明確ではない．いずれにせよ，レーザ微粒子集積痕が存在することにより，平坦化が進行し，集積痕がなくなると平坦化の進行が抑制されることは，4-4 で示した平坦化プロセスの検討結果と一致しており興味深い．



Nano Scope IIIa
Dimension 3100
(Digital Instruments)

Fig. 7-10　6トレンチ形成試料



Nano Scope IIIa
Dimension 3100
(Digital Instruments)

Fig. 7-11　集積痕を形成した6トレンチ試料

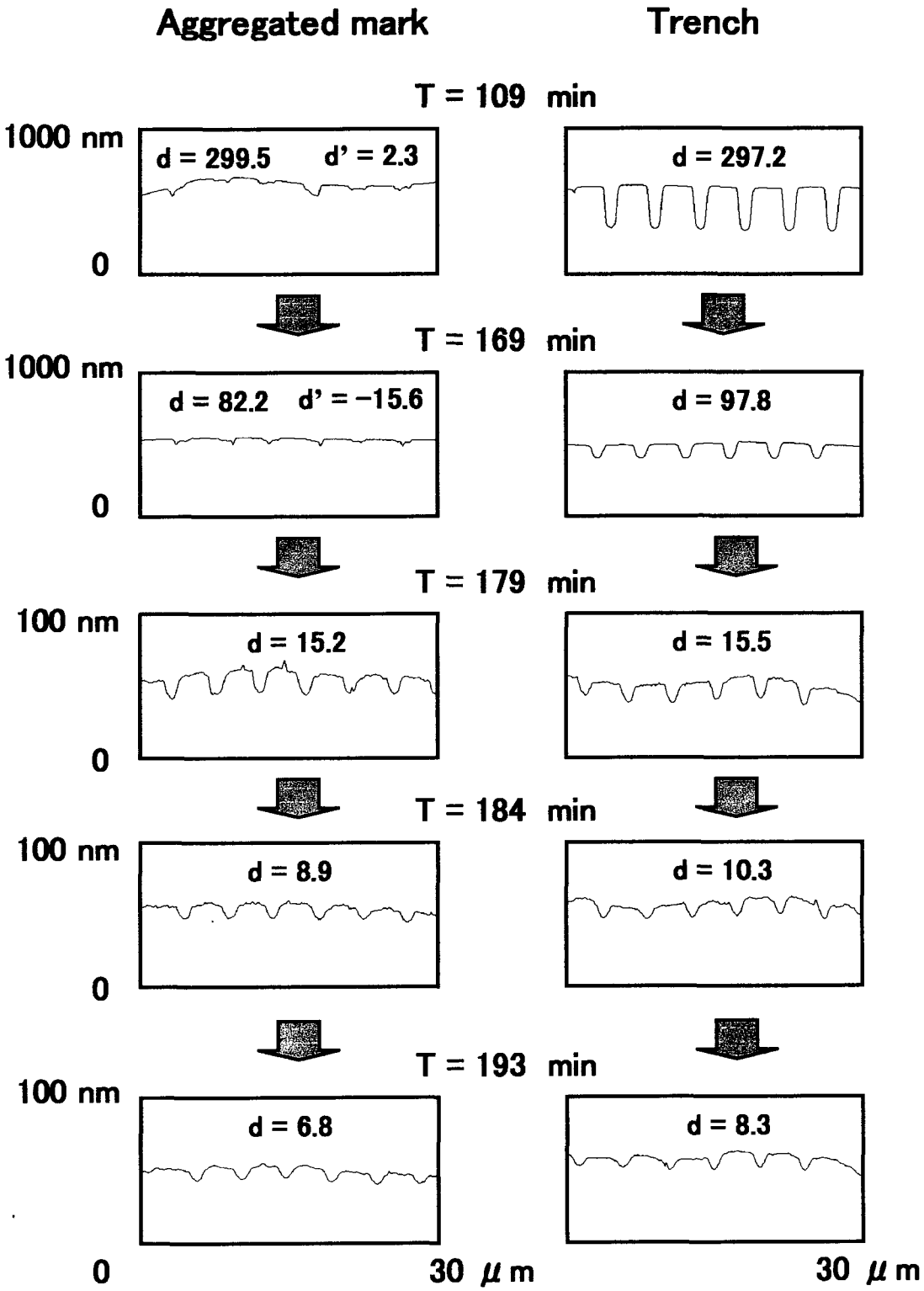


Fig. 7-12 ポリシング時の断面形状比較

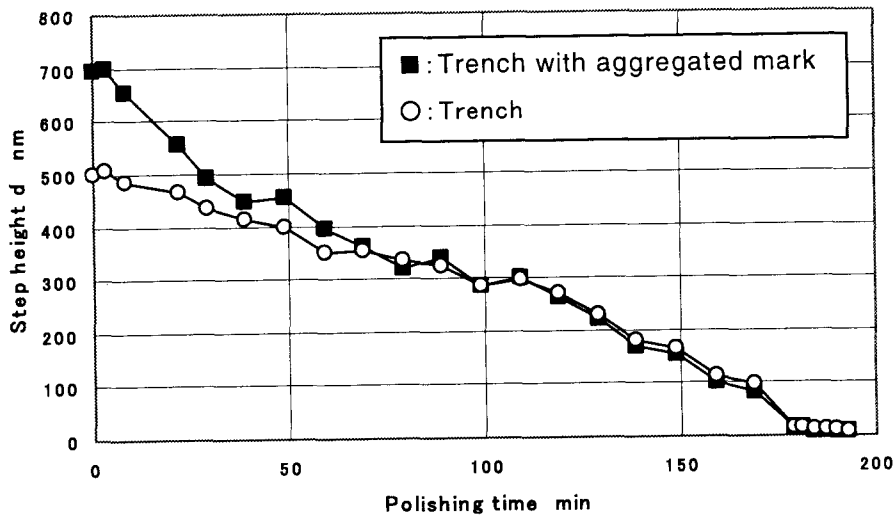


Fig. 7-13　レーザ微粒子集積痕高さの変化

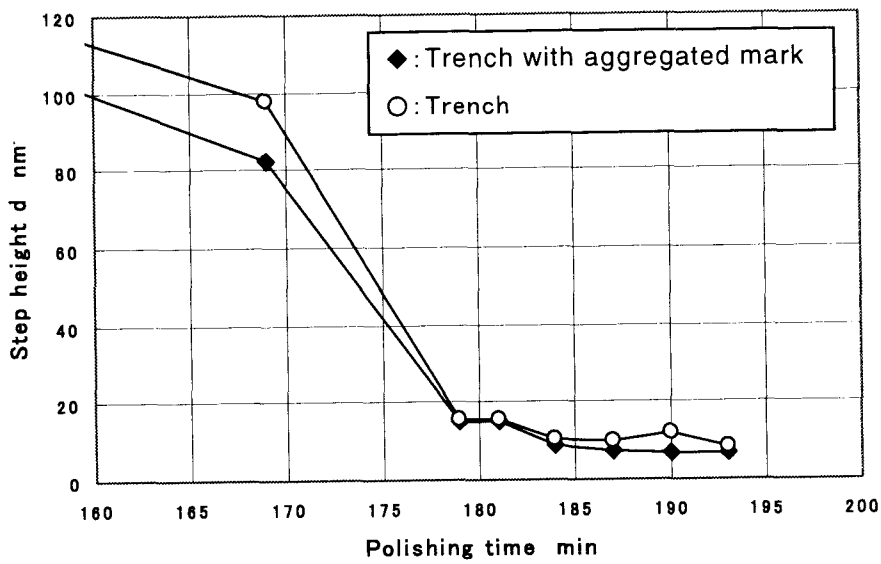


Fig. 7-14　レーザ微粒子集積痕高さの変化（詳細）

7-5 結 言

シリコンウエハ表面にFIB装置によりトレンチ加工を行い，凹凸面を形成した．その凹凸面の凹部にレーザ照射によりレーザ微粒子集積痕を形成し，ポリシングを行った．その結果，レーザ微粒子集積痕が埋め立て作用を行い，凹面とその底部が材料除去されることなく全面のポリシングが進行し，最終的に良好な平坦面を得ることができた．これは，4-4 で述べた凹凸面の凹部を埋め立てた後ポリシングを行う平坦化法が実現できたことになる．

また，多数の深いトレンチを形成しレーザ微粒子集積痕を形成したところ，当初はレーザ微粒子集積痕の埋め立て効果が現れていたが，トレンチ深さが20nm程度で集積痕がなくなると，平坦化が進まなくなった．この現象により，凹凸面の平坦化プロセスにおいてレーザ微粒子集積痕が埋め立て作用を行い，平坦化を促進するという効果が確認された．

第8章　結　論

本研究では，層間絶縁膜におけるグローバル平坦性向上を図るために，スラリー中にレーザ光を照射したときに発生するレーザ微粒子集積現象を利用して高度の平坦化を実現する新しいCMP加工技術を開発した．

層間絶縁膜の平坦化プロセスで高度の平坦化を実現するには，

「凸部の選択的除去加工と同時に凹部底面での除去作用の進行を止める」

必要がある．この底面における除去作用の進行を止めるというプロセスを実現するために，光放射圧によるレーザ微粒子集積現象を利用し，凹部を微粒子で埋め立て，その後ポリシングを行った．この新しい平坦化法を

LAFP (Laser Aggregation, Filling-up and Polishing method)

と名付け，新たなCMP技術として提案する．

各章において，次の結論が得られている．

第1章では，ますます開発が加速されている超LSIのプロセス技術におけるLSI製造プロセス技術について概観し，平坦化技術，CMP技術の重要性，必要性を確認した．また，本研究の目的，概要について述べた．今後,2003年のデザインルール100nm世代ではsite flatness：100nm, 2006年のデザインルール70nm世代ではsite flatness：70nmが要求される．しかし現状のCMP技術は経験的な要素が支配的であり，理論化，体系化が遅れており，その要求に対応することは困難である．

第2章では，平坦化技術として広く採用されているCMP技術について概観し，CMP技術の現状について述べた．さらに，その理解を深めるため，CMP加工に

おける材料除去機構を化学的，機械的観点から明確にし，さらに平坦化プロセスについて検討を行い，その問題点を明らかにした．平坦化プロセスの観点から見たとき，現状のCMP加工の問題点はポリシングパッド表面が大きな凹凸を持ち，さらにドレッシングにより繊維状の毛羽立ちを形成しているためシリコンウエハとの接触状態，接触位置を決定できないことに起因している．

第 3 章では，光放射圧制御により粒子に作用する力の発生を理解し，その力による粒子の捕捉現象を検討した．誘電体粒子にレーザ光が入射すると，光の反射，屈折による運動量変化により力が発生する．これが光放射圧による力であり，粒子を常に光軸上に位置させるような捕捉力が作用する．

第 4 章では，シリコンウエハ表面の平坦化プロセスについて検討し，さらに，光放射圧による微粒子集積を利用してどのように平坦化を行うかについてその基本概念を検討した．

一般的に凹凸面を平坦化するには，凸部の選択的除去とともに凹部底面の除去を抑制することが必要になる．ここでは，さまざまな選択的材料除去法についてその得失を検討した結果，凸部にレーザ微粒子集積痕を形成しポリシングを行う場合と，凹部をレーザ微粒子集積痕により埋め立てポリシングを行う方法が平坦化の可能性を示した．

第 5 章では，スラリーのようなコロイド溶液中にレーザ光を照射した場合のレーザ微粒子集積実験を行った．その結果，スラリー中に置いたシリコンウエハ表面をレーザ光で走査すると，そのレーザ走査軌跡上にレーザ微粒子集積痕が形成されることを確認した．この集積痕はSiO_2から成り，スラリー中のSiO_2微粒子の集積と考えられる．また，この集積痕は SiO_2 微粒子の弱い結合であり,その機械的強度は低い．

一方，スラリーのような，光の波長よりも小さいサイズの微粒子に対する光放射圧の発生は，光の運動量変化による光放射圧の発生と同様に取り扱うことはできず，Maxwell の応力として考えなければならない．この点についても考察し，微粒子集積の機構を推定した．

第 6 章では，シリコンウエハ平面上に形成したレーザ微粒子集積痕をポリシングし，その挙動を実験的に確認した．ポリシングの進行にともないレーザ微粒子集積痕は凸部頂上部から除去され，低く，小さくなっていく．その過程で，集積痕近傍の材料除去が進み，集積痕両側で微小凹部が形成される現象が発見された．また，レーザ微粒子集積痕が消滅するとレーザ照射位置に微小凹部が形成される現象も発見された．これらの特異的微小量除去現象は本ポリシング法の特徴の一つである．

第 7 章では，シリコンウエハ表面に FIB 加工によりトレンチ加工を行い，その凹部に集積痕を形成して,ポリシングを行った.

4-4 で示した通り，凹凸面の凹部をレーザ微粒子集積痕で埋め立てた後ポリシングを行うことにより，ポリシング時の凹部底面の材料除去が抑制され，凸面と埋め立て部は同一面となって良好にポリシングされる. その結果，凸部がすべて除去され，凹部底面と等しい高さになったときに，極めて良好な平坦面が形成された.

本研究では，シリコンウエハ表面の凹凸を平坦化するため，

a) 平坦化プロセスの概念の検討
b) レーザ微粒子集積実験
c) 凹部への埋め立て後のポリシング実験（LAFP 法）

について検討を行い，良好な平坦面を得ることができた.

この結果，本平坦化法が新しい平坦化法として大きな可能性を持っていることが確認できた.

今後の課題としては，より実際に即した条件で試験を積み重ねること，本技術に基づく装置の開発が必要である. さらに，層間絶縁膜のみならず Cu 配線層の CMP 加工，Low-k 材料の CMP 加工に適用することも重要である.

■ 関連論文 および 口頭発表

1 関連論文

(1) K. Kimura, T. Miyoshi, Y. Takaya, S. Takahashi : Laser Assisted Chemical Mechanical Polishing for Planarization, Proceedings of American Society for Precision Engineering 2001 Annual Meeting, (2001) 537

(2) Y. Takaya, K. Kimura, S. Takahashi, T. Miyoshi : Study on Laser Microstructure Fabrication Using Colloidal Particles Controlled by Radiation Pressure, Proceedings of JUSFA(2002 Japan-USA Symposium on Flexible Automation), (2002)

(3) 木村景一, 三好隆志, 高谷裕浩, 高橋哲:光放射圧制御 CMP 加工に関する基礎的研究, 精密工学会誌 投稿中

(4) K. Kimura, T. Miyoshi, Y. Takaya, S. Takahashi : Corrective Planarization Method Using Chemical Mechanical Polishing Assisted by Laser Particle Trapping, American Society for Precision Engineering 2002 Annual Meeting, 掲載決定 (2002.10)

2　口頭発表

(1) 木村景一：硬質ポリシングホイールを用いた CMP 技術，日本工業技術振興協会 超精密技術部会 第 115 回定例研究会 (2000,2)

(2) 木村景一：省エネ・コストパフォーマンス型 CMP 装置とその特性，日本学術振興会 将来加工技術第 136 委員会 第 10 回研究会 (2000.7)

(3) 木村景一，三好隆志，高谷裕浩，高橋哲：レーザアシステッド CMP 加工の研究－第1報 基本概念の提案，2000年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集(2000.10) 19

(4) 木村景一，三好隆志，高谷裕浩，高橋哲，園山拓朗：レーザアシステッド CMP 加工の研究－第 2 報 レーザ照射現象，2001 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集(2001.3) 497

(5) 木村景一：超精密加工を目指すCMP加工技術，精密工学会 総合生産システム専門委員会 2001 年度第 1 回講演会 (2001.7)

(6) 木村景一，三好隆志，高谷裕浩，高橋哲：レーザアシステッド CMP 加工の研究－第 3 報 材料除去現象の解析，2001 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集(2001.9) 414

(7) 木村景一：CMP における終点検出技術，第 16 回半導体製造における CMP のトータルソリューションセミナー (2001.10)

(8) 木村景一：超精密加工技術としての CMP 技術，砥粒加工学会 第 6 回オープンセミナー (2001.12)

(9) 木村景一：超精密加工技術としての CMP 技術，日本工業技術振興協会 第 129 回例会 (2002.2)

(10) 木村景一，三好隆志，高谷裕浩，高橋哲，小松直幸：レーザアシステッド CMP 加工の研究－第 4 報 微小凸部の除去研磨特性，2002 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集(2002.3) 516

(11) 木村景一, 三好隆志:光放射圧制御によるレーザアシステッド CMP 加工, 砥粒加工学会 超精密固定砥粒加工ミレニアム研究会 第1回シンポジウム(2002.5)

(12) 木村景一:固定砥粒による CMP 加工の試み, 砥粒加工学会 超精密固定砥粒加工ミレニアム研究会 第 5 回 3(2002.5)

(13) Keiichi Kimura:New Chemical Mechanical Polishing Method Assisted by Laser Particle Trapping, 7th International Symposium on Chemical-Mechanical Polishing (2002) 講演決定 (2002.8)

3 技術雑誌

(1) 木村景一, 三好隆志:光放射圧制御によるレーザアシステッド CMP 加工, 機械と工具, 46, 5 (2002) 55

■ 参考文献

1) F. Seitz, N. G. Einspruch, "ELECTRONIC GENIE : The Tangled History of Silicon", University of Illinois Press, (1998)
シリコンの物語, 堂山昌男, 北田正弘 訳, 内田老鶴圃(2000)

2) J. S. Kilby : "Invention of the Integrated Circuit", IEEE Trans. Electron. Devices, ED-23,(1976) 648

3) R. N. Noyce : "Microelectronics", Sci.Am.,237(1977) 63

4) 星野 力:誰がどうやってコンピュータを創ったか？, 共立出版(1995) 83

5) G. E. Moore : IEDM Technocal Digest, 11(1975)

6) T. Tucker:CMP-Markets, Innovation and Disruptive Technologies, CMP User's Group Annual Symposium Proceedings (2000) 1

7) 麻蒔立男:超微細加工の基礎, 日刊工業新聞社(1993) 13

8) 前田和夫:はじめての半導体プロセス, 工業調査会(2000) 171

9) Planarization;CMP & Its Applications Vol.2, 精密工学会 プラナリゼーション/CMP 応用技術専門委員会(1999)

10) F. A. Jenkins, H. E. White : "Fundamentals of Optics" Third Edition, McGraw-Hill(1957) 306

11) ITRS Roadmap, Front End Process 2001 Edition (2002)

12) 井上道夫:300mm, サブ 0.18 μm 時代の CMP プロセスと装置, 第 53 回プレスジャーナル VLSI フォーラム (1999) 13

13) B. Davari et al : "A new planarization technique, using a combination of RIE and Chemical Mechanical Polishing(CMP)", IEDM89 (1989) 61

14) R. P. Uttecht et al : " A four-level-metal fully planarized interconnect technology", Proc. VMIC Conf.,(1991) 20

15) C. W. Kaanta et al : " Dual-Damascene : A ULSI wiring technology", Proc. VMIC Conf.,(1991) 144

16) 特許公報 H5-46983 「多層配線配線構造の形成方法」, IBM

17) 特許公報 H3-10091 「半導体表面の突起を除去する方法」, IBM

18) 特許公報 S55-33902 「半導体装置の製造方法」, 富士通

19) 特許公報 H5-33502 「半導体装置の製造方法」, 日本電気

20) 土肥俊郎編:詳説 半導体 CMP 技術, 工業調査会 (2001) 87

21) 土肥俊郎編:詳説 半導体 CMP 技術, 工業調査会 (2001) 105

22) F. W. Preston : The theory and design of plate glass polishing machines, J. Society of Glass Tech. 11,(1927) 214

23) 泉谷徹郎:光学材料・部品の加工技術, 第3節 光学ガラスの加工と洗浄, 総合技術センター

24) T. Izumitani in : Treatise on Material Science & Technology, vol.17, eds. M. TOmozawa & R. Doremus, Academic Press, New York (1979) 115

25) L. M. Cook : "Chemical Processes in Glass Polishing", J. Non-Crystalline Solids 120 (1990) 152

26) A. Ashkin : Acceleration and trapping of particles by radiation pressure, Physical Review Letter, 24 (1970) 156

27) A. Ashkin, J. M. Dziedzic, J. E. Bjorkholm, S. Chu : Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles, OPTICS LETTERS, 11 (1986) 288

28) T. N. Buican, M. J. Smyth, H. A. Crisssman, G. C. Saltzman, C. C. Stewart, J. C. Martin : Automated single-cell manipulation and sorting by light trapping, Applied Optics, 26 (1987)24

29) 浮田宏生:マイクロ光ピンセット, 精密工学会誌 65,5(1999)647

30) 高谷裕浩 他:ナノCMMレーザトラッピングプローブに関する研究(第1報), 精密工学会誌 66, 7 (2000)1081

31) 杉浦忠男:微粒子に対する光圧力発生とその応用に関する研究, 大阪大学博士論文 (1993)

32) 清水浩貴:光放射圧を利用した微粒子操作によるマイクロ加工に関する研究, 大阪大学博士論文 (1999)

33) 宮下政和:ぜい性材料の延性モード研削加工技術ーナノ研削加工技術への道, 精密工学会誌 56,5 (1990) 782

34) K. Machida et al : Spin coating film, Transfer and hot-Pressing, J. Vac. Sci. Tech. B16, (1998) 1093

35) 清水浩貴, 三好隆志 他:光放射圧を利用した微粒子操作によるマイクロ加工に関する基礎的研究, 精密工学会誌 66,6 (2000) 901

36) 澤木大輔, 池野順一 他:レーザ光線による微粒子の操作とその応用に関する研究(第6報)～超微粒子の操作, 1996年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集(1996) 481

37) 東谷 公:粒子間力と表面ミクロ構造のキャラクタリゼーション, 高分子, 44,5 (1995) 298

38) R. J. Hunter : Foundations of Colloid Science, Clarendon Press, Oxford (1987)

39) (社)日本化学会:現代界面コロイド化学の基礎－講義と測定マニュアル, 丸善, (1997)

40) Y. Takaya, K. Kimura et al : Study on Laser Microstructure Fabrication Using Colloidal Particles Controlled by Radiation Pressure, Proc. JUSFA(2002)

41) 杉浦忠男, 微粒子に対する光圧力発生とその応用に関する研究, 大阪大学応用物理工学科・博士論文, 1993

42) Wan Hae Choi et al, Analysis of Optical Force and Optical Potential Well for Trapping Particles near a Light-Illuminated Slit Using a Finite-Difference Time-Domain Method, Jpn. J. Appl. Phys., 39(2000) 3961

43) Christi Tischer et al, Three-dimensional thermal noise imaging, Applied Physics Letter, 79, 23 (2001) 3878

■ Appendix

本研究において使用した測定器，加工機の主なものをまとめる．

1. 走査電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope)

(1) 形式 : JSM-5800A

(2) 製造 : 日本電子データム株式会社

(3) 主な仕様

a) 二次電子像分解能 : 3.5 nm (WD8mm,加速電圧 30kV)
b) 倍率 : ×18(WD48mm)～300,000(136 ステップ)
c) 像の種類 : 二次電子像，反射電子像
d) 加速電圧 : 0.3～3 kV : 0.1 kV ステップ可変
3～30 kV : 1 kV ステップ可変
e) コンデンサレンズ : 電磁 2 段ズームコンデンサレンズ
f) 対物レンズ : コニカルミニレンズ
g) フォーカス合わせ : 手動
h) 試料ステージ : ユーセントリック式
X 軸 : 125 mm
Y 軸 : 100 mm
Z 軸 : 43mm(WD 5-48 mm 連続可変)
傾斜 : T= -10～+90°
回転 : R= 360°
i) 最大試料サイズ : 8 inch (ϕ 203.2 mm 装着可能)
7 inch (ϕ 177.8 mm 全面観察可能)

2. 原子間力顕微鏡 (Atomic Force Microscope)

(1) 形式 : SPM-9500

(2) 製造 : 株式会社 島津製作所

(3) 主な仕様

a) 最大走査範囲(X,Y)	: 30 μm × 30 μm
b) 最大測定範囲(Z)	: 5 μm
c) 変位検出系	: LD/光てこ/4分割 PSD
d) 最大試料寸法	: ϕ 18 mm × 8 mm
e) 制御方式	: DSP デジタル方式
f) ホストコンピュータ	: AT 互換機, Pentium 90MHz 以上
g) OS	: Windows 3.1
h) 画像	: 画像処理, 画像解析, 画像表示, 複数画面表示 機能

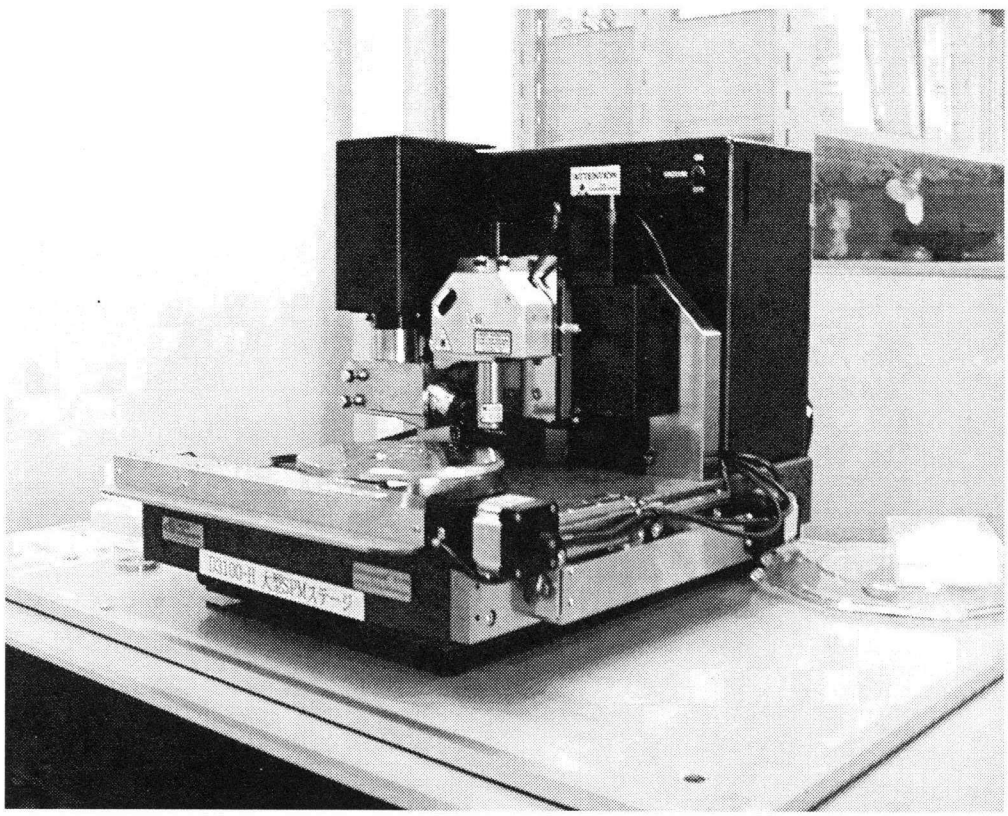
3. 原子間力顕微鏡 (Atomic Force Microscope)

(1) 形式 : Nano Scope IIIa Dimension 3100

(2) 製造 : Veeco / Digital Instruments

(3) 主な仕様

a) 最大走査範囲(X,Y) : 90 μm × 90 μm
b) 最大測定範囲(Z) : 6 μm
c) XY-stage : X 軸 : 133 mm
Y 軸 : 102 mm
d) 最大試料寸法 : φ200 mm × 12 mm (DSC 200)
e) 光学顕微鏡 : 410～1845 倍
f) プローブ : シリコン/シリコンナイトライド
g) 測定モード : コンタクトモード/タッピングモード



AFM : Nano Scope IIIa Dimension 3100

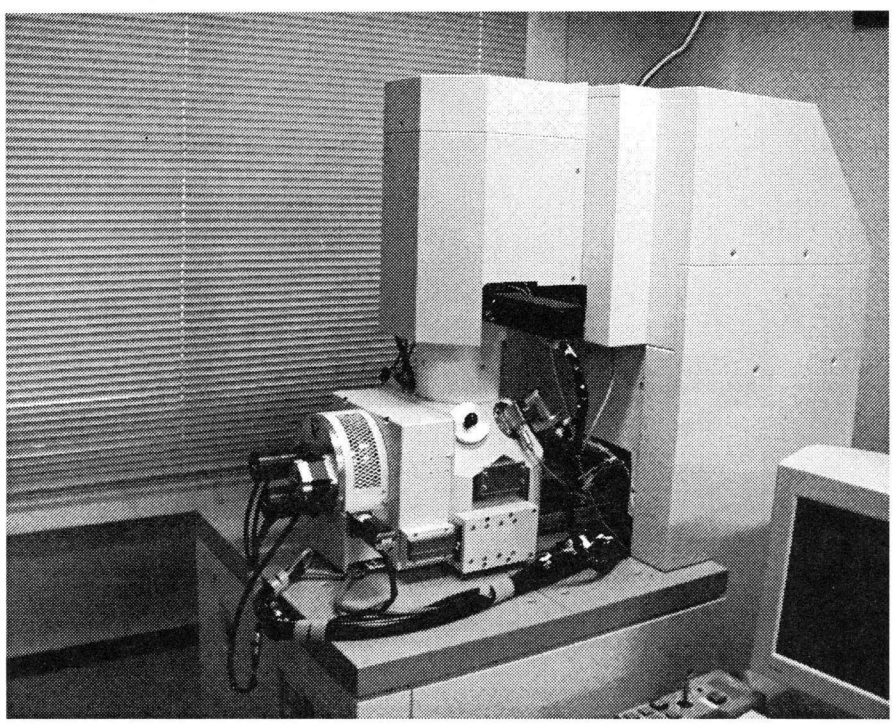
4. FIB 加工装置 (Focused Ion Beam Machine)

(1) 形式 : SMI 9200

(2) 製造 : セイコーインスツルメンツ株式会社

(3) 主な仕様

a) イオン源 : Ga 液体金属イオン源
b) 加速電圧 : 15～30 kV(常用 30 kV)
c) レンズ : 2 段静電式
d) 倍率 : 75～300,000 倍相当
e) 最大走査範囲 : Max. 2.4×2.4 mm
f) ビーム径 : 92 nm
g) プローブ電流 : 1.3 nA
h) 試料移動装置 : 5 軸モータ駆動
i) ステージ移動範囲 : X : 0 – 50 mm
Y : 0 – 55 mm
Z : 0 – 10 mm
θ : 0 – 360 °
T : 0 – 60 °



Focused Ion Beam / SMI 9200

■ 謝 辞

1974 年に 北海道大学 工学部 精密工学科 を卒業し，日本光学工業株式会社 へ入社した．その後，1992 年に ソニー株式会社 へ移籍したが，一貫して切削，研削，ポリシングをはじめとする精密加工，超精密加工技術の研究・開発に携わってきた．今回，大阪大学 大学院 工学研究科 への入学，さらには本研究に取り組むきっかけを与えてくださったのは，これらの研究開発活動を通じて学生時代からご指導いただいている 大阪大学 大学院 工学研究科 機械システム工学専攻 教授 三好隆志 博士であり，三好教授とのご交誼は私にとってかけがえのないものである．ここに，これまでのご指導，ならびに本研究進行過程での励ましに，謹んで感謝する次第である．

ご多忙の中，本論文の副査をご担当いただき貴重な助言を賜った 大阪大学 大学院 工学研究科 機械システム工学専攻 教授 花崎伸作 博士，電子制御機械工学専攻 教授 竹内芳美 博士，機械システム工学専攻 助教授 高谷裕浩 博士には心から御礼申し上げます．

三好研究室では，研究の進展に応じて，実験，ディスカッションとさまざまな機会に高橋 哲 助手にご支援いただいた．また，大阪大学 大学院 工学研究科 精密科学専攻 島田尚一 助教授にも，さまざまな議論と助言をいただいた．ここに記して感謝の意を表明する．

また，三好研究室で，本研究の難しい実験を担当していただいた，園山拓朗君(現 ソニー株式会社)，小松直幸君，辻尾良輔君(現 大学院 修士課程1年)，および三好研究室の学生諸君にも感謝する．

DLVO 理論などに関する化学的アプローチにおいては，ソニーイーエムシーエス株式会社 マイクロデバイスセンター 実装ソリューション部 宮井清一氏に多くの示唆をいただいた．ここに記して感謝する．

実験装置の設計製作に当たっては，新日本製鐵株式会社 新素材事業部 ファインセラミックス部 マネージャ 阿部耕三氏にご助力をいただいた．ここに記して感謝する．

さらに，大阪大学入学時に，激励とともに推薦をしてくださった有田恒一郎氏(現ソニーセミコンダクター九州)，および，3年間にわたる二足の草鞋状態を見守ってくださった片岡安弘 部長(ソニーイーエムシーエス株式会社 マイクロデバイスセンタ 実装ソリューション部)，さまざまな機会にサポートしていただいたマイクロデバイスセンタ 実装ソリューション部 の皆様にも感謝します．

最後に，ほぼ 2 週間に1回は大阪大学へ通うという余裕のない生活を受け入れ,サポートしてくれた 妻 厚子，長女 ねい麻，二女 玲仁 に感謝します．