T2R2 東京工業大学リサーチリポジトリ
Tokyo Tech Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	共用クリーンルームの管理運営と半導体マイクロプロセス技術の開発による研究支援
Title(English)	Technical conducting for shared clean room as an open laboratory, and research cooperation by development of semiconductor microfabrication technologies
著者(和文)	松谷晃宏
Authors(English)	Akihiro Matsutani
出典 / Citation	TCカレッジ TC論文
発行日 / Pub. date	2023, 3

Powered by T2R2 (Tokyo Institute Research Repository)

共用クリーンルームの管理運営と
半導体マイクロプロセス技術の開発による研究支援

Technical conducting for shared clean room as an open laboratory,

and

research cooperation by development of semiconductor

microfabrication technologies

東京工業大学

Tokyo Institute of Technology

松谷 晃宏

Akihiro Matsutani

はじめに

我が国の国立大学が有する研究施設・設備・機器は科学技術のイノベーション活動の基盤として，科学技術を社会に貢献させる上で不可欠なインフラと考えることができる。我が国が世界的にも科学技術でリードするためには，基盤的・先端的の両面から，研究施設・設備・機器の持続的な整備と，これらを運営する要としての専門性を有する人材の持続的な確保と資質の向上が不可欠である。このような基盤的及び先端的研究施設・設備・機器の整備は国家の基幹的役割となるため，国が中長期的な計画を政策的に検討することが必要である。産学官の連携を考えれば，オールジャパン体制を構築し，長期的な展望を持って総合的に取り組むべきとされている。これらの研究インフラを共用設備化して多くの人々の研究に活用されれば，多様な科学技術が発展すると期待されている。

一方で，研究設備の維持管理に関しては，高度で専門的な知識・技術を有する国立大学の技術職員（法人化前には文部技官あるいは文部科学技官と呼ばれ，各省庁の技官と同じ採用試験を通過した者）は教員と共に課題解決を担うパートナーとして研究成果創出に必須の存在である。しかし，国立大学の技官はこれまでは十分な評価を受けていなかったことに加えて，キャリアパスも明確でなかったこと等が法人化後にも受け継がれてしまい，優秀な人材の確保が困難になりつつある状況である。持続的な人材育成・確保のためには，チーム型研究体制による研究力強化（研究基盤の運営の要たる「技術職員」の育成・活躍促進）が期待されている。近年では，広く技術に携わる人材のなかで指導的役割を果たす人材を「高度技術系専門職人材」として位置づけ，我が国として有用な人材であることを明確化するという点から，技術職員の組織を超えた国家資格のような評価基準を設定して資格認定の仕組みを設けることも有効であるとの期待とともに，東京工業大学を中心にテクニカルコンダクター（TC）という称号授与の制度が始まった。

本文中で述べるように，半導体プロセス技術やナノ・マイクロプロセス技術は，技術そのものが研究分野である。すなわち，研究支援・協力する側の高度技術系専門職人材は研究者と同様の力で研究支援するという技術分野である。本論文は，この趣旨に沿って，東京工業大学における技術部およびオープンファシリティセンターマイクロプロセス部門長としての共用クリーンルームの 15 年超の管理運営の経験と半導体マイクロプロセス技術の開発による 30 余年の研究支援の活動をまとめ，我が国の研究基盤の運営の要たる高度技術系専門職人材が基盤的及び先端的研究施設・設備・機器の整備の好循環を生んだ「研究者が研究支援を実施した」取り組みの中からその成果の一部を取り出して記述するものである。

目次

第 1 章　序論
1.1 高度技術系専門人材に関する政策 1
1.1.1 第 6 期科学技術・イノベーション基本計画 1
1.1.2 文部科学省の科学技術・学術審議会研究基盤部会における議論 1
1.1.3 日本学術会議の提言と設備共用シンポジウムでの議論 2
1.1.4 東京工業大学における取り組み 2
1.2 研究支援の定義 3
1.3 マイクロプロセスで利用される共用クリーンルーム運営の問題点 5
1.4 本論文の構成 6

第 2 章　半導体プロセス技術とクリーンルームの概要
2.1 半導体プロセス技術とクリーンルーム 8
2.1.1 クリーンルーム 8
2.1.2 リソグラフィ技術 8
2.1.3 エッチング 11
2.1.4 成膜技術 14
2.1.5 分析・評価技術 15
2.2 プラズマエッチングプロセスの概要 17

第 3 章　共用クリーンルームの運営
3.1 共用設備運営の問題点 21
3.2 共用クリーンルームにおける設備の整備について 21
3.3 共用クリーンルームの運営 23
3.4 共用クリーンルームの課金制度 24
3.5 研究目的の共有と相談機能による研究力向上への貢献 25
3.6 共用クリーンルームの学外利用について 26

第 4 章　半導体プロセス技術の開発とデバイス研究への貢献
4.1 TiO_2 のドライエッチングと光デバイスへの貢献 28
4.1.1 面発光レーザ製作への貢献 28
4.1.2 フォトニック結晶製作への貢献 31
4.1.3 大口径望遠鏡の波面制御への貢献 34
4.2 化合物半導体および新材料のドライエッチングと光デバイス研究への貢献 37
4.2.1 ECR-RIBE による GaAs, InP のエッチング技術の開発 37
4.2.2 ICP-RIE による GaAs, InP のエッチング技術の開発 41

4.2.3 光デバイス製作への貢献 46
4.2.4 新材料 $TripC_{12}$ のレジスト応用への貢献 48
4.3 XeF_2・Ar/F_2 のプラズマ処理・エッチングとデバイス製作への貢献 50
4.3.1 Ar/F_2 プラズマ処理によるグラフェンのフッ素修飾への貢献 50
4.3.2 XeF_2 エッチングによるメンブレン構造の形成とボロメータ製作への貢献 52
4.3.3 XeF_2 を用いたエッチングによるメンブレンダイアフラム構造の形成への貢献 55
4.4 半導体微細加工技術の単一細胞分離技術への展開 56

第 5 章　研究支援部門の運営と高度技術系専門職人材養成
5.1 マイクロプロセス部門の運営 60
5.1.1 マイクロプロセス部門の運営の考え方 60
5.1.2 研究支援の形態 61
5.2 高度技術系専門職人材養成 61
5.2.1 テクニカルレポート・論文紹介 61
5.2.2 成果発表の重要性 63
5.2.3 チーム型の研究協力と研究成果創出への On the Job Training の活用 65
5.3 TC カレッジ・マイクロプロセスコースへの展開 69

第 6 章　結論と展望
6.1 結論 70
6.2 展望 71

Appendix 73
成果発表一覧 74
謝辞 103

第１章　序論

この章では，広く技術に携わる人材のなかで指導的役割を果たす人材を「高度技術系専門職人材」として位置づけ，我が国として有用な人材であることを明確化するという点から，高度技術専門人材に関する政策，研究支援の定義，マイクロプロセスで利用される共用クリーンルーム運営の問題点および本論文の構成について述べる。

1.1 高度技術系専門人材に関する政策

1.1.1　第６期科学技術・イノベーション基本計画[1-1]

我が国では，科学技術基本計画の根拠となる法律,「科学技術基本法」が改正され，2021 年 4 月から「科学技術・イノベーション基本法」へと名称が変わり，人文・社会科学の振興とイノベーションの創出が法の振興対象に加えられた。令和３年３月２６日に閣議決定された第６期科学技術・イノベーション基本計画[1-1]では,「知のフロンティアを開拓し価値創造の源泉となる研究力の強化」の中の「多様で卓越した研究を生み出す環境の再構築」において「具体的な取組」では,「大学等において若手研究者が活躍できる環境の整備(p.53)」や「研究時間の確保（p.55)」として次のように記述されている。

「ＵＲＡ等のマネジメント人材，エンジニア（大学等におけるあらゆる分野の研究をサポートする技術職員を含む）といった高度な専門職人材等が一体となったチーム型研究体制を構築すべく，これらが魅力的な職となるよう，専門職としての質の担保と処遇の改善に関する取組を 2021 年度中に実施する。これにより，博士人材を含めて，専門職人材の流動性，キャリアパスの充実を実現し，あわせて育成・確保を行う。」

したがって，我が国の方針として，大学等におけるあらゆる分野の研究を支援する技術職員を含む高度な専門職人材に対して，この職業が魅力的な職となるよう，専門職としての質の担保と処遇の改善することが計画され，同時にこれらの人材は，多様で卓越した研究を生み出す環境を再構築する一員としてその活躍が期待されることとなった。

1.1.2 文部科学省の科学技術・学術審議会研究基盤部会における議論[1-2]

この閣議決定の前段階として，文部科学省の科学技術・学術審議会研究基盤部会で議論された,「研究力向上」の原動力である「研究基盤」の充実に向けて～第６期科学技術基本計画に向けた重要課題（中間とりまとめ）～（令和元年６月 25 日）の資料の中でも「研究基盤の運営の要である技術職員の活躍促進」として，以下の内容が議論されている。

・多様なキャリアパスを実現することが求められている。

・技術職員は，その専門性に応じた役割を担うべき存在として大変重要であり，組織としてのマネジメント体制を構築する必要がある。

・利用者の partner として手法の専門家の立場から，教育，得られたデータの解析・解釈を含めた研究支援をする人材等，多岐にわたる役割を担っており，特に後者の場合は，技術力と共に当該機器を使いこなす研究力が必要。このような人材は元々研究者。

・共用支援を担う人材の確保・育成・組織化・モチベーション向上が必要である。
・人材予備軍である学生にとって魅力ある，積極的なキャリア選択肢の一つとなる必要がある。学生が「なりたい職業」と認識される状況を作り出していく必要がある。
・教員，技術職員，事務職員，URA がチームとして機能し，様々な事務コストを軽減しながら取り組む必要がある。
・広く技術に携わる人材のなかで指導的役割を果たす人材を，高度技術系専門職人材として位置づけ，国として有用な人材であることを明確化することも考えられる。
　ということが記載されている。

1.1.3 日本学術会議の提言と設備共用シンポジウムでの議論[1-3]

　一方，日本学術会議でも技術職員の重要性については認識されており，提言として，「高度技術職員の拡大及び URA 制度の定着」にも触れている。これは，日本の研究衰退の原因の一つに，多くの機器の保守や運転を担当してきた技術職員数の縮小を挙げる研究者は多いことから，高度技術職員職のポストを拡充すること，そしてそのポストに適宜博士課程修了者を採用することは，日本の研究力全体の向上のためにも，博士課程修了者のキャリアパスの多様化のためにも効果的であるとするものである。その際，かつての技官職における問題として指摘されていた，急速な研究分野の展開への対応が難しかった点や，人材の流動性がほとんどなかった点などを克服する仕組みも当初より構築する必要がある。たとえば学会等で認定する資格の制定，本人の研鑽や能力向上を適切に反映する給与制度の導入，大学間での技術職員の人事交流などは効果的な方策であろう，と提言している。

1.1.4 東京工業大学における取り組み[1-4]

　東京工業大学では，文部科学省先端研究基盤共用促進事業（コアファシリティ構築支援プログラム）により，次世代の研究基盤戦略の実施拠点となることを目指して，次世代設備導入手法の推進，次世代設備活用制度の改革，次世代高度研究支援の全国人財養成ネットワークを目標として掲げ，技術職員・教員・URA の連携で産学連携による設備開発，大型研究プロジェクト連合による大型設備導入，TC 制度導入による技術職員のプロフェッショナル化と上級職設置，高度技術職員養成制度（東工大 TC カレッジ）を軸にした研究支援人財養成のロールモデルの創造に取り組んでいる。
　この中では，称号として「TC」認定制度を設け，「高い技術力・研究企画力を持つ技術職員をテクニカルコンダクター（TC）として認定する」ことを掲げており，技術職員人事制度改革として上級技術職員選考規則の制定，選考委員会の設置による上級技術職員へのキャリアパスの明確化の実現も掲げている。さらに，東工大 TC カレッジとして，高度技術支援者の育成について，TC 認定基準策定や研究機器メーカーとの共同教育プログラム開発を行うことによる多方面の点から人材を養成しようとの試みが始まっている。

このように，大学の技術職員は，我が国の研究力向上実現のために大きく期待されている人材であり，技術職員は単なる研究支援者で，研究に関与するべきではないというようなステレオタイプ的な見方は，そもそも見直されるべきであるということがわかる。

1.2 研究支援の定義

研究支援とは何を意味するのであろうか。実は，この研究支援という語句は確かな意味を定義しないままイメージ先行で使われている。では，研究あるいは支援とはどのような意味であろうか。これらもイメージ先行で使われていることが多い。我が国を代表する国語辞典である「広辞苑」と「大辞林」で，「科学」「技術」「研究」「支援」などの意味を調べてみると，以下のように記載されていることがわかる。

広辞苑では以下のように記述されている。

【科学】①世界と現象の一部を対象領域とする，経験的に論証できる系統的な合理的認識。研究の対象あるいは方法によって種々に分類される（自然科学と社会科学，自然科学と精神科学，自然科学と文化科学など）。②狭義では自然科学と同義。

【技術】①物事をたくみに行うわざ。技巧。技芸。②科学を実地に応用して自然の事物を改変・加工し，人間生活に利用するわざ。

【研究】よく調べ考えて真理をきわめること。

【支援】ささえ助けること。援助すること。

【者】①ひと。もの。②その道になれた者。くろうと。

【教員】学校に勤務して教育を行う人。

【科学】の項には，―しゃ【科学者】という語句があり，その意味は「科学（特に自然科学）を研究する人」と記載されている。【技術】の項には，―しゃ【技術者】という語句の説明があり，その意味は「技術[2]を職業とする人」と記載されている。一方，【研究】と【支援】の項には，―しゃ，の事例は記載されていない。

一方，大辞林では，以下のように記述されている。

【科学】①学問。学。世界・事象に関する知的・合理的な探求の営み。 ②特定の対象領域に関する経験的実証的学問。自然科学・精神科学・社会科学・文化科学など。狭義には自然科学のこと。

【技術】①物事を巧みにしとげるわざ。技芸。②自然に人為を加えて人間の生活に役立てるようにする手段。

【研究】物事について深く考えたり調べたりして真理を明らかにすること。

【支援】他人を支えたすけること。援助。後援。

【者】ある状態にある人。

【教員】学校職員のうち，直接教育に従事する職員の総称。

【科学】の項には，―しゃ【科学者】という語句があり，その意味は「専門に科学（特に自然科学）を研究する人」と記載されている。【技術】の項には，―しゃ【技術者】という語

句の説明があり，その意味は「技術②を役立てることを職業とする人」と記載されている。一方,【研究】の項には「―者」「―所」「―室」の事例があるが，意味は記載されていない。【支援】の項には，―しゃ，の事例は記載されていない。

これらをまとめると,「研究」とは，物事について深く考えたりよく調べたりして真理をきわめること，であるから誰にでも当てはまる姿勢や態度といえよう。

したがって,「研究支援」を定義すれば,「物事について深く考えたりよく調べたりして真理をきわめることを支え助け，援助を与えること」となる。

本論文では「研究支援」をこの意味で用いることにする。

それでは，これらに従事する人について考えてみよう。「研究者」とは，物事について深く考えたりよく調べたりして真理をきわめるひと，その状態にある人，しかもそれが玄人のレベルであるということである。「科学者」や「技術者」とは異なる概念であり，研究する状態にある人は誰でも「研究者」と呼ぶわけである。したがって，大学においても教員だけが研究者というわけではなく，技術職員も研究員も学生も物事を研究する状態にある人は誰でも「研究者」となる。したがって，国立の研究機関や民間企業に所属する研究者も存在する。一方,「支援者」とは，他人を支え助ける状態にある人の意味となるから，大学における教員も技術職員も研究員も学生も物事を支援する状態にある人は誰でも「支援者」となる。つまり,「研究支援者」とは，物事について深く考えたりよく調べたりして真理をきわめることやその状態にある人を支え助け，援助を与える人のことであり，大学における教員も技術職員も研究員も学生も，物事について深く考えたりよく調べたりして真理をきわめることやその状態にある人を支援する状態にある人は誰でも「研究支援者」となり得る。理工系の大学では科学も技術も研究の対象であり，それぞれが様々なレベルでの研究が必要である。科学の研究の進展には技術の進展が必要であり，技術の進展には科学研究の進展が必要である。すなわち，国立大学においては,「研究の進展」のためには，誰もが「研究者」と「研究支援者」の両面を併せもっていて，科学目標や技術目標の達成のために，ある時は「研究者」ある時は「研究支援者」となるわけである。したがって，大学の教員も技術職員も「研究者」であり「研究支援者」ということになる。大学では教員のみが研究者であるように勘違いされやすいが，このようなステレオタイプ的な見方は見直されるべきである。これは，技術職員を「高度な専門的な知識を有して，研究者とともに課題解決を担うパートナーとして重要な人材」とする高度技術系専門職人材に関する政策と整合するものである。

この考え方は，文部科学省の科学技術・学術審議会研究開発基盤部会での波多野睦子委員の発言「研究基盤の運営の要である技術職員の活躍促進に関して，技術職員は，研究支援から研究主体者になる機会，あるいは，研究主体者から研究支援になる機会，すなわち，多様なキャリアパスに転換できる機会を作ることが必要と思います。これにより，博士やポスドクのキャリアの多様性，ライフイベントに合わせたキャリアのフレキシブル性，シニア研究者の活用などにつながると考えます[1-2]」に通じるものである。

次に,「支援」という意味の英語について考える。研究支援の訳語として research support

や technical support がイメージとして使われることが多い。しかし，その実態は，上述の科学技術・イノベーション基本計画を踏まえれば，研究協力という方が相応しいと思われる。グランドコンサイス英和辞典では，以下のように記載されている。

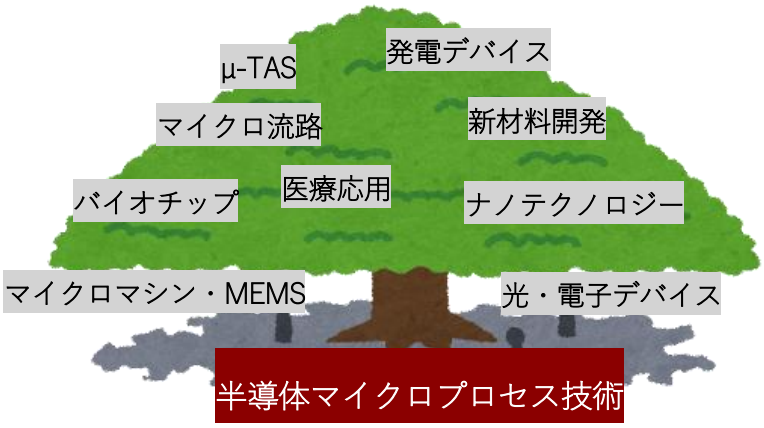
Support：（物を）支える，支持（援助，後援，応援）する，賛成する，擁護する，励ます，生命を維持する，養う，助演する，確証する，立証する，耐える

Cooperation：協力，共同，援助する

英英辞典（Longman Dictionary of Contemporary English）では，cooperation の意味は「the act of working together for shared purpose」であり，まさに高度技術系専門職人材が研究者とともに共通の目標を達成することの意味にとれる。これらから明らかなように，高度技術系専門職人材が科学や技術の研究支援をするときに使う英語は cooperation または collaboration が適切と思われる。本論文の英語の題名では「研究支援」に対応する語句を「research cooperation」として，「研究目的を共有して協力し，共同で実施して援助する」という意味を含ませている。

1.3　マイクロプロセスで利用される共用クリーンルーム運営の問題点

本論文で取り扱う半導体マイクロプロセス技術は，図 1-1 に示すように，物理学，化学，機械工学，電子工学，電気工学，材料工学，物理化学，高分子化学，流体力学，真空工学，表面科学，分析・評価技術などを基礎として，LSI やメモリの製造技術として発展してきたが，現在では，光デバイス，電子デバイスの他にも，マイクロマシン・MEMS 関連デバイス，バイオチップ，マイクロ流体デバイス，医療応用デバイス，μ-TAS デバイス，発電デバイス，新材料開発など数多くの分野に利用されている。



物理学，化学，機械工学，電子工学，電気工学，材料工学，
物理化学，高分子化学，流体力学，真空工学，表面科学，分析・評価技術など

図 1-1　半導体マイクロプロセス技術の基盤分野と応用分野

半導体デバイスやナノ・マイクロデバイス製作に用いられるプロセス技術の特徴としては，半導体プロセスで用いられるプラズマがたいへん複雑な現象を含むので，プラズマプロセス技術はそれ自身が研究分野となっているのに加え，ナノ・マイクロデバイスの研究では，プロセス技術それ自身も研究分野を形成している。このことは，例えば，応用物理学会の学術講演会予稿集を見れば，プラズマプロセスが大分類を形成していることや，デバイスや材料分野の大分類のなかにプロセス技術の中分類があることですぐにわかる。この理由は，新しいデバイスの研究や開発には新しいプロセス技術が必要であるからで，プロセス技術が「研究」の対象となることは自明である。

半導体微細加工技術はいろいろな技術分野への拡がりを見せるが，プロセス技術に関する装置は一般に非常に高価である。したがって，材料の特性からプロセス装置を共用利用できないという事情の外は，できるだけこれらの装置を共同利用することが研究効率の点からも必要となる。しかし，研究設備の維持管理に関して高度で専門的な知識や技術を有する技術職員は，研究者と共に課題解決を担うパートナーとして必ずしも認識されていなかった。つまり，研究基盤をハード（設備・施設）とソフト（人材・システム）と捉え，ハードとソフトの両面から総合的に運営するべきところを，これまではインフラの準備だけに視点がおかれていたことが，共用クリーンルーム運営の根本的な問題点である。

したがって，共用クリーンルーム運営の方向性として以下のような姿を目指すのが望ましい。

・若手や新しく着任した研究者に，研究設備・機器を速やかに利用できる環境を作ること
・設備を戦略的・計画的に導入あるいは更新して誰でもアクセス可能にすること
・チーム型研究体制による研究力強化の方策として高度技術系専門職人材としての技術職員の活躍促進をはかること

1.4 本論文の構成

この章では，上記の問題点解決と目指すべき姿への 30 余年の取り組みをまとめた。本論文は，上述した半導体デバイスやナノ・マイクロデバイス製作に用いられるプロセス技術の特徴を踏まえ，共用クリーンルームの管理運営と様々なデバイス研究に貢献するための研究支援について以下の構成としている。図 1-2 に，本論文の構成および各章間の相互の関わりと流れについて示す。

第 1 章では，高度技術系専門人材に関する最近の我が国の政策，研究支援の定義，共用クリーンルーム運営の問題点について述べる。

第 2 章では，半導体プロセス技術とクリーンルームおよびプラズマエッチングの概要を述べる。

第 3 章では，共用クリーンルームの運営について，共用クリーンルームにおける設備の整備，運営，課金制度，研究目的の共有と相談機能による研究力向上への貢献，学外利用について述べる。

第 4 章では，半導体プロセス技術の開発とデバイス研究への貢献の事例として，TiO_2 ドライエッチングと光デバイスへの貢献，化合物半導体および新材料のドライエッチングと光デバイスへの貢献，XeF_2・Ar/F_2 のプラズマ処理・エッチングとデバイス製作への貢献および半導体微細加工技術の単一細胞分離プレートへの展開について述べる。

第 5 章では，研究支援部門の運営と高度技術系専門職人材養成として，運営の考え方，研究支援の形態，高度技術系専門職人材養成,，テクニカルレポート・論文紹介，成果発表の重要性，チーム型の研究協力と研究成果創出への On the Job Training の活用，TC カレッジ・マイクロプロセスコースへの展開について述べる。

第 6 章では，議論と成果を総括して結論と展望について述べる。

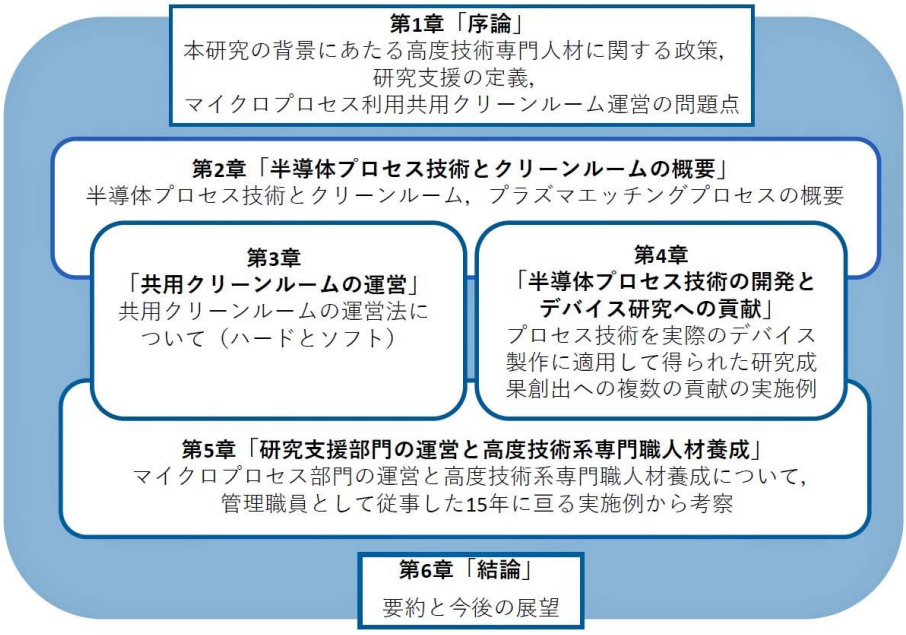


図 1-2　本論文の構成および各章間の相互の関わりと流れ

参考文献

[1-1]第 6 期科学技術・イノベーション基本計画

[1-2] 文部科学省研究開発基盤部会（第 2 回）議事録（令和元年 6 月 25 日）

[1-3]第 6 期科学技術基本計画に向けての提言，日本学術会議，p. 17

[1-4] https://www.mext.go.jp/content/20200729-mxt_kibanken01-000008419_3.pdf（2022 年 12 月 25 日現在）

第２章　半導体プロセス技術とクリーンルームの概要

この章では，半導体プロセス技術で必要とされるクリーンルーム，リソグラフィ技術，エッチング技術，成膜技術，評価・分析技術とプラズマエッチングの概要を述べる。中心とする技術内容はナノ・マイクロデバイスで用いられる半導体微細加工プロセス技術である。

2.1 半導体プロセス技術とクリーンルーム

半導体プロセス技術とクリーンルームについては，参考文献 2-1 から 2-3 に詳しく説明されている。ここでは，これらを一部引用しながら概略について述べる。

2.1.1 クリーンルーム

マイクロデバイス製作のためのプロセスは清浄な環境で行う必要がある。空気中のゴミが基板や試料あるいはフォトリソグラフィに用いるフォトマスクの表面に付着すると，製作するデバイスに欠陥が発生する。例えば短絡や断線，成膜した薄膜にピンホールの発生はデバイスの動作に大きな影響を与える。クリーンルームではゴミの数だけではなく，温度と湿度も制御しなければならない。空調設備は非常に重要である。クリーンルームの等級は 1 立方フィート中の 0.5 μm より大きな粒子の数で表わす。例えば，クラス 100 のクリーンルームは，１立方フィートあたり 0.5 μm 以上の粒子を 100 個含んでいる。1 立方メートルあたりに換算すると約 3,500 個になる。クラス 100 のクリーンルームは普通の部屋の空気に含まれるゴミよりも 4 桁低い環境となる。

2.1.2　リソグラフィ技術

リソグラフィは英語では lithography となる。石版術のことである。litho とは stone を意味する連結形である。graph は複写することを表わし，photograph の例にみられるように drawn あるいは written を意味する名詞を作る。つまり，リソグラフィとは石版で印刷すること，現代の半導体デバイスやマイクロマシンの製作には，石版の代わりにガラス上に蒸着した任意のパターンのクロム薄膜をマスクとして，光を使ってリソグラフィを行う。これをフォトリソグラフィ(photolithography)という。露光方式によって電子線リソグラフィ，ナノインプリントリソグラフィなどもある。

フォトリソグラフィは光（紫外光）を使った露光方法である。光源から出た光を光学系で平行光にした後，フォトレジストを塗布した試料にマスクを密着させて露光する方法をコンタクト露光（密着露光）という。図 2-1 に概略図を示す。日光写真の原理である。この方法は，マスクと基板の間のゴミやフォトレジストの欠片によりマスクが傷付きやすいが，最も簡単な方法である。コンタクト露光の欠点を改善するため，マスクと試料をごくわずか(10～20μm)離して露光する方法も用いられることがある。マスクと試料の間に光学系を入れて投影する方法を投影露光法という。マスクの像と基板上の像の大きさが 1：1 の等倍法と，5：1 などの縮小投影法がある。現在は，解像力や位置合わせ精度で優れた縮小投影法（ウエハの一部を step and repeat して露光することから stepper という）が主流となって

いる。MEMS などのデバイスを製作するには，何度もマスクとウエハを重ねて露光する必要がある。そのためには精密な位置合わせが重要で，位置合わせのことを align という。重ね合わせのための露光器を aligner（アライナー）という。

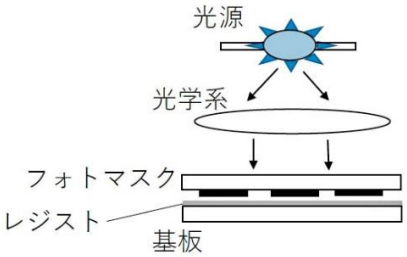


図 2-1　コンタクト露光（密着露光）の概略図

露光装置の光源には，水銀ランプやレーザなどが使われる。図 2-2 に高圧水銀ランプのスペクトルの特徴を示す。いくつかのピークのうち，g 線（波長 436nm），i 線（波長 365nm）が使われる。また，微細パターンの形成には光源の短波長化が必須であり，KrF（248nm），ArF（193nm）などのエキシマ光源も使われる。メカプロ室の装置の光源は高圧水銀ランプである。

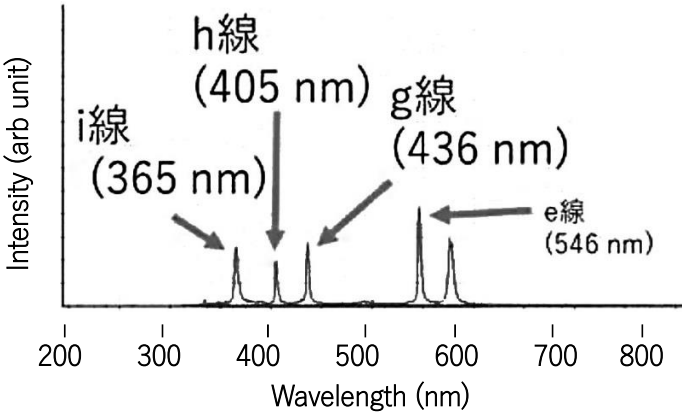


図 2-2　高圧水銀ランプのスペクトルの例

密着露光ではフォトマスクが必要となる。フォトマスクは，石英基板に Cr を蒸着したものをレジストでコーティングし，電子線リソグラフィやレーザリソグラフィでレジストパターンを形成し，Cr およびレジストを除去して製作する。最近のフォトマスクは青板ガラス製が多い。石英基板に比べてやや透過率が劣るが，一般的な用途で問題になることはほとんどない。図 2-3 にフォトマスクの例を示す。

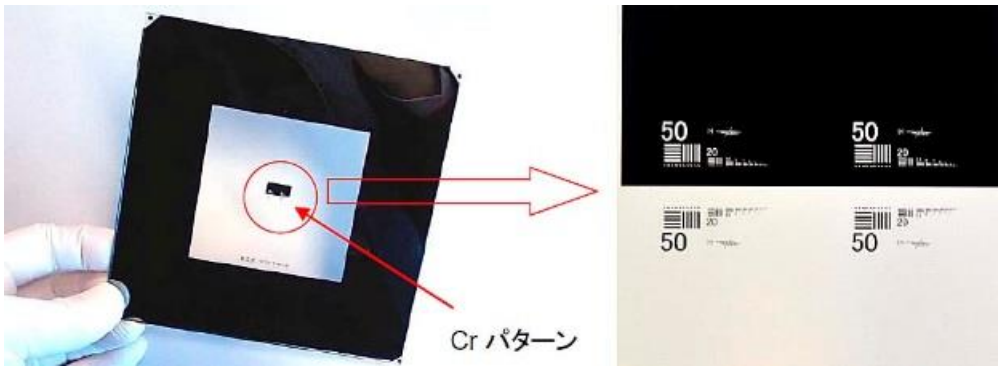


図 2-3　5 ×5 inch^2 のフォトマスクの例。拡大写真の数字の単位は μm。

フォトリソグラフィは紫外光を用いるが，その波長の数倍までのサイズが露光限界となる。具体的には，水銀ランプを光源として一般的な i 線レジストなどを使用するとそのサイズは 1 μm 程度である。それ以下のパターン製作には，光よりも波長が短い電子線リソグラフィ（電子線露光，electron beam: EB 露光)）を用いる。EB リソグラフィは，任意のパターンを CAD で設計して描画できるので便利である。フォトマスクの製作にも用いられるが，ウエハに直接描画しても良い結果が得られる。ステージの移動の精度と電子ビーム位置安定性の良い装置を使えば，重ね合わせ露光も容易である。EB リソグラフィ装置の電子銃は，W フィラメントや LaB_6 の単結晶などがカソードとして用いられる。コンデンサーレンズにより電子線を集束し，ビームを出したり切ったりするビーム遮断電極と掃引コイルをコンピュータ制御して試料上の目的とする位置に電子線を照射する。一般に掃引幅は小さいので，一度に露光できる面積は小さく，広い領域に露光するときには試料を機械的に正確に移動して露光領域をつなぎ合わせることになる。この移動にはステッピングモータを用いる場合と，レーザ干渉による精密位置決めが用いられる場合がある。電子線リソグラフィは, μm 以下の任意のパターンを製作できることが利点であるが, スループット(throughput)が低いため一般的にはフォトマスク作りに利用されることが多いが，直接描画の利点を活かせば，様々な実験を試行錯誤しながら行う研究用には大変便利な技術である。

リソグラフィで用いる感光性樹脂をレジストという。レジストは，照射光や電子線に感光する化合物であり，ポジ型(positive type)とネガ型(negative type)がある。ポジ型では現像後に光や電子線の当たった箇所が除去される。つまりフォトリソグラフィではマスク像と同じ陽画ができる。ネガ型では光や電子線を照射したところが残りマスク像を反転した陰画ができる。図 2-4 に示すように，ポジ型レジストは，感光性物質，ベース樹脂，有機溶剤の 3 成分からなっている。露光する前の感光性物質は現像液に溶けないが，感光後はポリマーが切断されて分子量が小さくなり現像液に溶けだす。ネガ型のレジストは感光性物質と結合したポリマーであり，光のエネルギーは感光性物質に吸収されポリマーに伝えられて架橋反応を引き起こし，ポリマーの分子量が大きくなり現像液に溶けにくくなる。一般的にポジ型の方が解像度がよい。

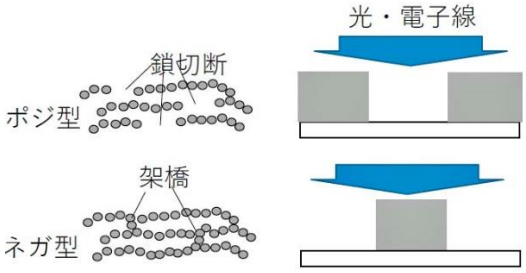


図 2-4 ポジ型およびネガ型レジストのパターン形成の原理

フォトリソグラフィでは，マスクパターンの端での回折光の影響によりフォトレジストのパターンの端はだれる。図 2-5 にマスク露光・現像後のポジ型，ネガ型フォトレジストの断面図を示す。ネガ型では露光量が少ない部分が現像液に溶出する。この場合もレジスト形状は回折の影響を受ける。

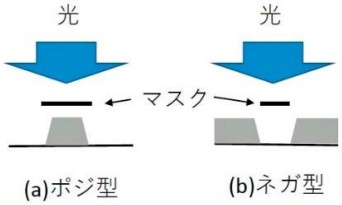


図 2-5　マスク露光・現像後のネガ型フォトレジストの断面図

ナノインプリントは，図 2-6 に示すように金型をレジストに直接押し付けることでパターンを転写するリソグラフィ技術で，1995 年に S. Chou らにより 30nm 線幅のライン＆スペースパターンの転写が実証されている。熱ナノインプリントではレジスト材料をガラス転移温度まで加熱するとともに圧力を加える。光ナノインプリントでは，圧力を加えているとともに紫外線を照射して，レジスト材料を硬化させて微細構造を形成する。

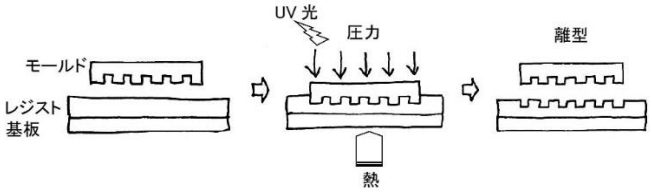


図 2-6 ナノインプリントリソグラフィの概要

2.1.3　エッチング

(a)ウエットエッチング

湿式化学エッチングともいう。化学エッチングのメカニズムは，図 2-7(a)に示すように 3 段階からなる。反応液が拡散でウエハ表面に到達し，表面で化学反応が起こり，反応生成物

は拡散で運び去られる。攪拌や液体の温度によりエッチング速度は変わる。したがって，図2-7(b)のような等方的なエッチング形状が得られる。

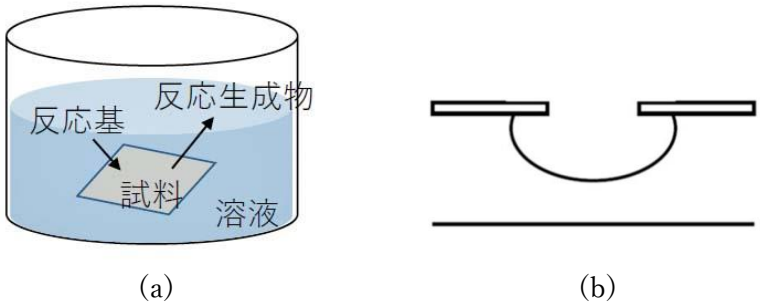


図 2-7 ウエットエッチングの(a)原理と(b)等方的エッチング形状

Si の等方性のエッチングでは，硝酸(HNO_3)とフッ酸(HF)の混合液を水か酢酸(CH_3COOH)で薄めたものが一般的に用いられる。反応式は以下の通りであり，2 段階でエッチングが進行する。

$$Si + 4HNO_3 \rightarrow SiO_2 + 2H_2O + 4NO_2$$

$$SiO_2 + 6HF \rightarrow H_2SiF_6 + 2H_2O$$

エッチング液によっては，結晶面によってエッチング速度が異なるものがある。この場合は異方性エッチングという。Si の異方性エッチングでよく用いられるエッチング液は KOH の水溶液とイソプロピルアルコールの混合液である。KOH を純水に溶かした 19 wt%の溶液は，80℃で(100)，(110)，(111)面でのエッチング速度の比は 100：16：1 となることが知られている。図 2-8 に示すように，(100)面の Si をある方向に作ったマスクの間隙を通してエッチングすると V 溝が出来上がる。溝の側面は(111)面となり，(100)面とのなす角は 54.7° となる。(110)面の場合は (111)面の垂直な側面が現われる。

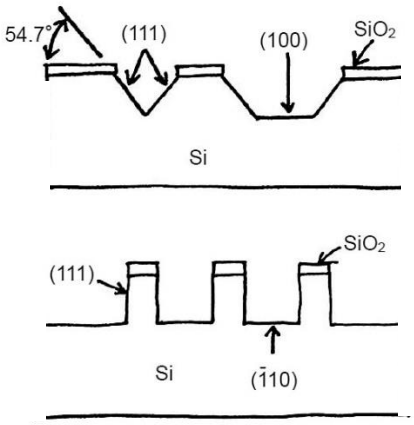


図 2-8　Si の異方性ウエットエッチングの例

SiO_2 のウエットエッチングには，HF 液あるいはそれに NH_4F を加えたものが用いられる。SiO_2 のエッチング速度は，エッチング液の組成・濃度・攪拌・温度に依存する。さらに酸化膜中の密度・多孔性・ミクロ構造・膜中の不純物の存在などでも変化する。

(b)ドライエッチング

ウエットエッチングではその原理から，高アスペクト比の構造形成では微細化に限界があるために，ドライエッチングが用いられることが多い。ドライエッチングは気相（ガス）エッチングとプラズマエッチングに大別される。気相エッチングはウエットエッチングと同様に主として化学反応のみによるエッチングとなり，そのエッチング形状は等方的となるので高アスペクト比の微細構造形成には限界がある。ただし，XeF_2 による Si のエッチングでは，被エッチング材料のエッチング速度比を利用して SiO_2 の薄膜（メンブレン）構造の製作への応用も可能となる。液体の表面張力が原理的に発生しないこの方法は微細構造形成で有効なことも多い。

一方，プラズマエッチングでは，高アスペクト比の微細構造形成が可能となる。プラズマは部分的あるいは完全にイオン化したガスで，同数の正と負の電荷をもつ粒子と中性の粒子からなる。プラズマエッチングの原理（素過程）は，図 2-9 のようなモデル，すなわち(a)励起分子・原子またはラジカルの試料表面への化学吸着，(b)基板原子との化学反応，(c)反応生成物の表面脱離，が提唱されている[2-4, 2-5]。

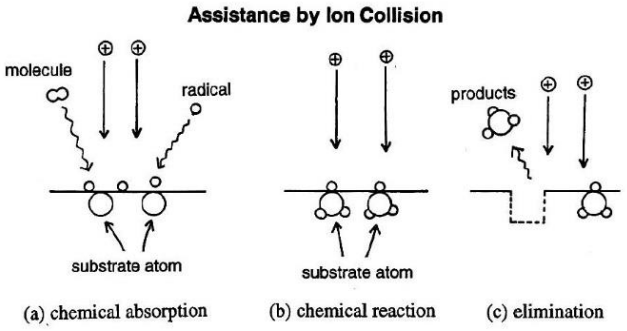


図 2-9　プラズマエッチングの原理[2-5]

半導体プロセスで使われるプラズマは弱電離プラズマで，プラズマ中にはラジカルも多く存在する。まず，ラジカル等と試料表面の原子との化学反応による反応生成物が揮発してゆくことによりエッチングが進行するが，方向性を持って試料に照射されるイオンの存在により，垂直方向にエッチングがアシストされる。この結果，垂直なエッチング形状が得られ，高アスペクト比の微細構造形成が可能になる。エッチング速度やエッチング形状は，イオン（物理的エッチング）とラジカル等の中性粒子（化学的エッチング）のバランスにより変化する。

半導体・MEMS デバイス分野でよく用いられる反応性イオンエッチング(reactive ion

etching, RIE)は反応性ガスのプラズマを利用したエッチング技術である。プラズマ源は様々な方式があるが，よく用いられるプラズマ源には，図 2-10 に示すような容量結合型(capacitively coupled plasma, CCP)である。誘導結合型(inductively coupled plasma, ICP)，電子サイクロトロン共鳴型(electron cyclotron resonance, ECR)では，より高密度のプラズマを発生させることができ，エッチング速度の高速化に有利となる。

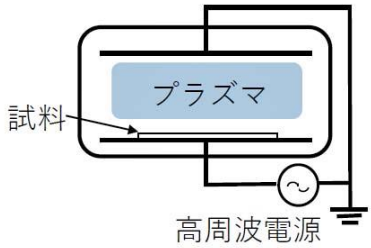


図 2-10　容量結合型プラズマエッチング装置の概略図

2.1.4　成膜技術

マイクロデバイス製作では薄膜の成膜プロセスも必須技術である。よく使われる成膜の方法は，真空蒸着法，スパッタリング，化学気相堆積法（chemical vapor deposition, CVD）である。CVD はプラズマを用いる方法も多く使われており，これをプラズマ CVD という。

真空蒸着法は，1857 年に Faraday が初めて行った方法といわれている。この方法は成膜法の中でも最も簡便であり普及している。原理は，真空中で成膜しようとする物質を加熱して蒸発させ，その蒸気をサンプルの上に付着させるということになる。蒸発の過程が熱交換過程であるということが，スパッタリング法とは異なる点である。加熱の方法として，抵抗加熱と電子衝撃法が使われる。抵抗加熱法は蒸着源材料と薄膜材料が直接接触し，蒸発源材料の方が薄膜材料より高温になるので，薄膜材料への不純物の混入，蒸発源材料と反応，蒸発源材料の融点による制約などの問題がある。これを解決するために考えられたのが，電子衝撃法であり，磁場偏向型の電子銃を用いて電子線を直径数 mm 以下に集めて薄膜材料に当てごく一部の領域を加熱する方法がよく用いられる。

スパッタリングは，放電によって発生した高エネルギーのイオンが固体表面に照射されると固体を構成する原子が飛び出し，その結果，表面が損耗する現象である。この現象は 1842 年に Grove によって発見されたといわれている。このスパッタリング現象の成膜技術（スパッタリング法）への実用化は 1930 年代以降とされる。入射イオン 1 個当たり飛び出す原子の数，すなわち，スパッタリング収量は，表面付近に付与されたエネルギーと表面結合エネルギーによって決まる。真空技術では，例えばコーティングにおいて加熱できない化合物や低蒸気圧金属を飛散させるのにこの手法が用いられる。

ある気体を（常温以下に沸点のある物質）を容器の中に入れて高温にすると気体の種類によって反応が生じ，蒸気圧の低い物質が生成されて析出する。この薄膜生成過程は気相成長法（堆積法，CVD）の原理となる。この方法は単結晶を成長させるときにはエピタキシャ

ル成長と呼ばれ，様々な薄膜の成膜に利用されている。なるべく低い温度で成膜するにはプラズマを利用する方法があり，これをプラズマ CVD 法という。熱エネルギーによる反応だけでは，低融点の基板を使うことができないことや熱応力の問題が生ずるため，電磁気的なエネルギーを加えてその分の熱エネルギーを減らそうとする考え方である。

これらの成膜法は，製作するデバイスの材料やプロセスの容易性あるいは特性を考慮して適宜最適な方法が選択される。

実際のナノ・マイクロデバイスの製作では，図 2-11 に示すような，リソグラフィ，成膜，エッチングが何度も繰り返される。各プロセスを実施の都度，観察や評価・分析を行い，その情報は次のプロセスへの重要な手掛かりとするので必須の技術となる。各プロセス技術と観察，評価・分析の関係は図 2-11 のように表され，各プロセス技術が密接に関連していることに加え，それぞれのプロセス技術が現在でも研究分野となっている総合技術の研究分野を形成している。

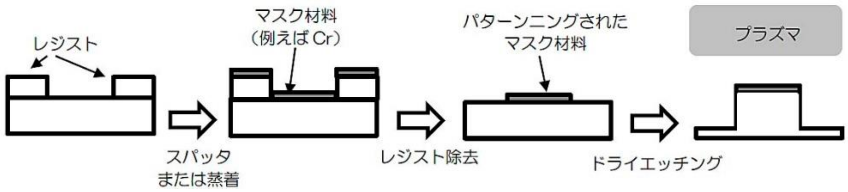


図 2-11　ナノ・マイクロデバイスの製作で使われるプロセスフローの例

2.1.5　分析・評価技術

ここでは，本論文で述べるプロセス技術や共用クリーンルームで使われる分析・評価技術について述べる。測定対象が μm から nm オーダーとなるので，まずは光学顕微鏡が必須の設備である。測定対象に応じて，落射照明および透過照明の金属顕微鏡，倒立顕微鏡，実体顕微鏡，蛍光顕微鏡を用いる。光学顕微鏡の取り扱いでは，対物レンズの NA をよく理解することが重要である。顕微鏡の総合倍率 m は，$m = m_o$(対物レンズの倍率)$\times m_e$(接眼レンズの倍率)で与えられる。光学顕微鏡の分解能 d は，おもに対物レンズの開口数(numerical aperture, NA)によって

$$d = 0.61\,\lambda / \mathrm{NA}$$

で与えられる。ここで，λ は波長である。試料側媒質の屈折率を n，対物レンズが軸上物点に対して張る角を 2θ とすれば，$NA = n\sin\theta$ である。例えば，$NA = 0.2$ の対物レンズで，波長 500 nm の光で観察する時，d は 1.5 μm となる。

光学顕微鏡を応用した設備としてレーザ顕微鏡もよく用いられる。レーザ光の z 方向の各位置の反射光を受光素子で検出し，最も反射光量の高い z 軸位置を焦点として高さ情報と反射光量を検出することにより，試料形状や高さを求める装置である。非接触で測定が可能であるが，透明試料に対してはレーザ光の侵入分を考慮する必要がある。

光学的評価手法としてはエリプソメトリ法も用いられる。これは，試料に対する入射光と

反射光の偏光状態の変化を測定する分析手法で，薄膜の厚さと屈折率を求めることができる。

光学的には観察できない微細構造については，走査型電子顕微鏡（scanning electron microscope, SEM）を用いる。SEM は，集束された電子線を試料表面上に走査して，試料の各走査点から放出される二次電子を検出器で受けて増幅し，これを試料上の走査と同期させてディスプレイ上に像を映し出すので形状観察に適している，。走査型電子顕微鏡の分解能は試料上を走査する電子線の直径によって決められ，通常は数 nm である。

エネルギー分散型 X 線分光法（energy dispersive X-ray spectroscopy, EDX）は電子線照射により発生する特性 X 線をエネルギーで分光して物質を特定する方法である。特定 X 線のエネルギーは元素に固有であることから，試料を構成する元素の同定が可能で，その強度から組成に関する情報も得られる。特性 X 線の発生の過程は以下のようになる。基底状態の原子に電子線を照射すると，内殻電子が原子外に励起され，内殻に空孔が生じる。内殻に空孔がある状態のエネルギー的不安定を解消するため，外殻電子が内殻に遷移する。その時，遷移前の状態と遷移後の状態のエネルギー差に相当する特性 X 線が放射される。特性 X 線は元素により固有のエネルギーを持ことから元素分析が可能となる。

触針式表面形状測定器は，ダイヤモンドの針で試料表面に接触しながら試料台を移動させることにより，試料表面の段差やうねり，粗さなどの表面形状を高精度に測定する。透明膜の段差の測定に便利である。

半導体マイクロプロセス技術によるデバイス製作は，図 2-12 に示すように，リソグラフィ技術，薄膜形成技術，エッチング技術のそれぞれの実施前後に，これらの分析評価技術で確認して次のプロセスへフィードバックしながら，何度も繰り返して行うものである。したがって，共用クリーンルーム運営には，リソグラフィ技術，薄膜形成技術，エッチング技術に加えて，分析評価技術の習得も必須となる。

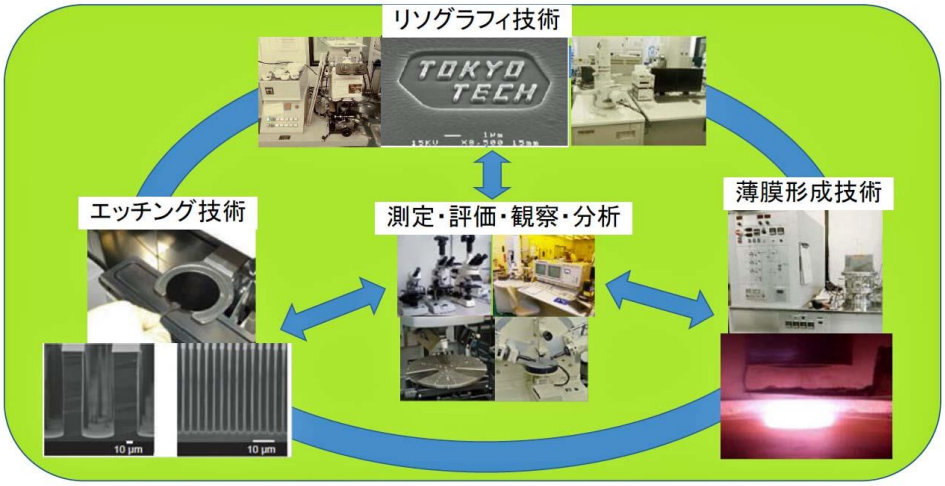


図 2-12　各プロセス技術と観察，評価・分析の関係

2.2 プラズマエッチングプロセスの概要

この章では，半導体マイクロプロセス技術の中でも微細加工技術として重要なプラズマエッチングプロセスについて簡単に記述する。

前述したように，一般にウエットエッチングプロセスでは高アスペクト比の微細加工は困難であり，プラズマエッチングがキーテクノロジーとして用いられている。以下に，関根氏の文献[2-6]を参考にして，プラズマエッチング技術の開発の経緯を述べる。ドライプロセスの開発は酸素プラズマによるフォトレジストのアッシング技術から始まり，従来の強酸を用いたウエットプロセスをドライプロセスで行うことが可能となった。次に，ハロゲンガスを用いたプラズマで Si をエッチングする技術が提案された。これは CF_4 プラズマ中の反応性の高い F 原子やラジカルと Si の反応により SiF_4 を生成することによりエッチングを可能とする技術である。異方性の加工は，高周波（RF）電源を印加したカソード電極にイオンを加速する DC バイアスが発生することが見いだされて，1970 年代の中ごろに図 2-13 に示すような平行平板電極の容量結合型プラズマ（CCP）装置で微細加工が可能であることがわかり，反応性イオンエッチング（RIE）が開発された。

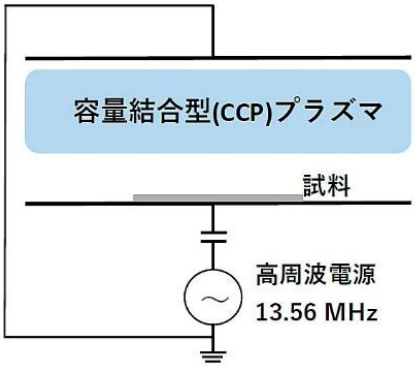


図 2-13　平行平板電極の容量結合型プラズマ（CCP）装置の概略

その後は，ウエハ直径の増加や加工寸法の微細化，エッチング速度の向上，ダメージ（誘起損傷）の低減，良好な再現性，プラズマの高密度化などの要請と共に，様々なプラズマ源が開発された。1970 年代後半からは，図 2-14 のような電子サイクロトロン共鳴（ECR）を利用した方式で，低ガス圧力で高密度プラズマを形成し，プラズマ密度とバイアス電圧を独立に制御した研究が行われた。

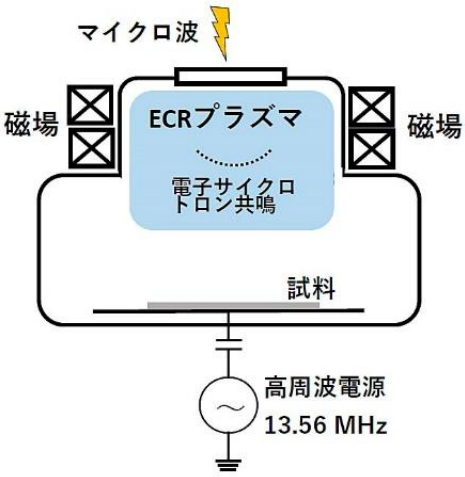


図 2-14　電子サイクロトロン共鳴（ECR）のプラズマ装置の概略

1980 年代中頃には，図 2-15 に示すようなマグネトロン RIE 装置は均一磁場を形成することが可能になり Si 系のエッチングで良好な性能を示した。

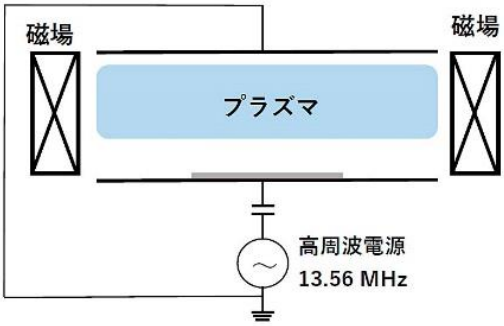


図 2-15　マグネトロン RIE 装置装置の概略図

さらに微細化や高生産性の要請に応じて，1990 年代の初めから，図 2-16 に示すようなチャンバの上部や側面の高周波コイルでプラズマを誘導加熱する方式の誘導結合型プラズマ（ICP）源が装置化された。この頃には ASET 技術研究組合超先端電子技術開発機構でプラズマプロセスの研究が実機を用いて盛んに研究され，ガス分子が廃棄されるまでにプラズマ中で受ける電子衝突の回数を制御することの重要性が見いだされ，図 2-17 に示すような二周波 CCP 型 RIE という方式が実現された。現在の主流は ICP や二周波 CCP 装置である。

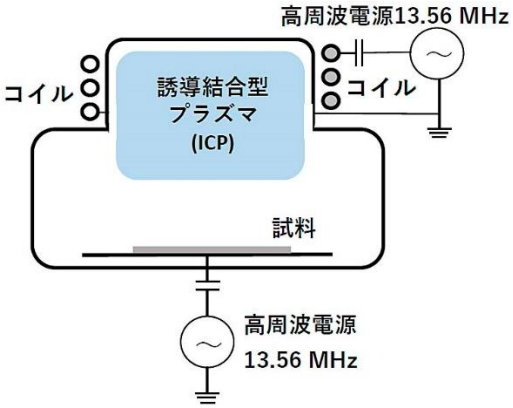


図 2-16 ICP 装置の概略図

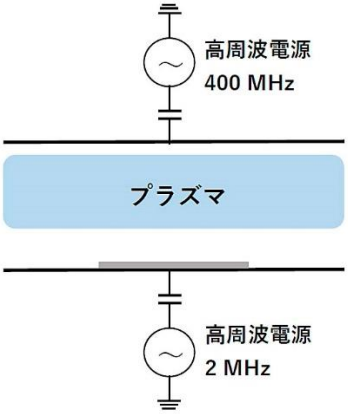


図 2-17　二周波 CCP-RIE 装置の概略図

これらの装置を使って実施するプラズマエッチング技術の特徴は，プロセスで用いられるプラズマの物理や化学は相当に複雑であり，最適条件の探索には膨大な時間と労力を必要とすることである。一般的には，トライアル＆エラーが基本となり人海戦術で取り組むことが多い。例えば，図 2-18 に示すようなトレンチのエッチングで解決すべき課題は，最適なイオン種とエネルギーの探索，多種多様なラジカルと表面反応の関係，複数種の多粒子が同時に存在するときの反応，エッチングされた孔の中での反応の理解，マスク材料の最適化，表面温度の変化とエッチング形状の関係，時間と反応の関係とその対応策，デバイスの事情による違い（パターン，材料）などである。

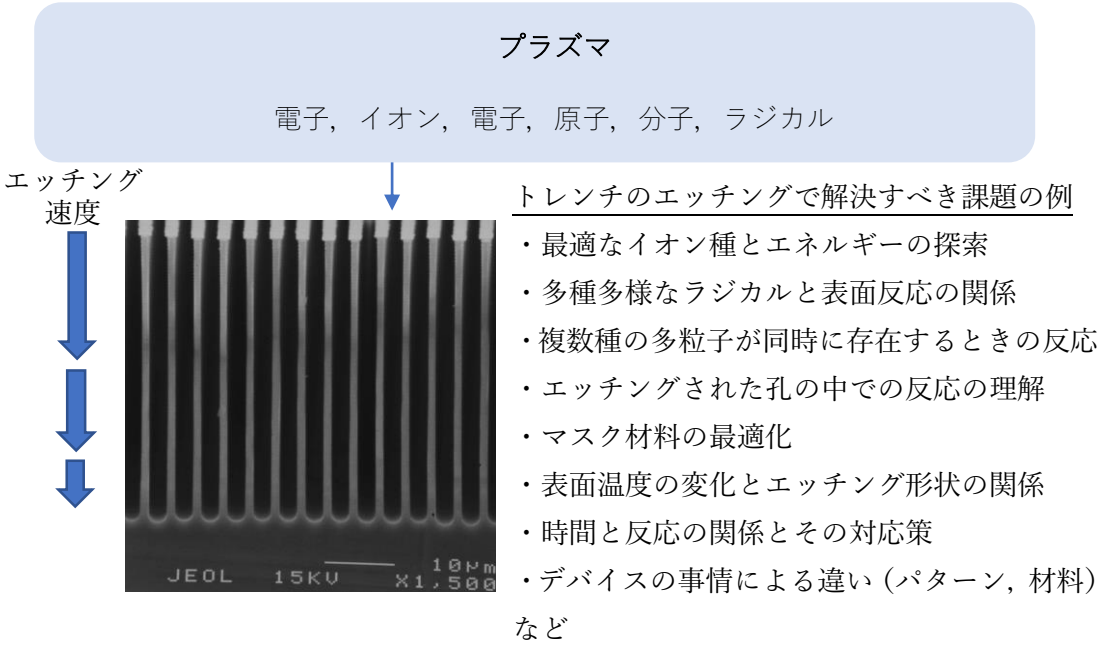


図 2-18 トレンチのエッチングで解決すべき課題

このため，実社会でのデバイス製作では，　1 条件探索に約 1,000 回の試行がなされることもある。したがって，プラズマプロセス技術を十分に使うには，経験とセンスとともに，科学者の視点が必要である。このことから，プロセス技術は一つの科学領域，研究領域であり，プロセスエンジニアという職業も存在している。これは，科学研究＋技術開発する人々のことである。プラズマプロセス技術の従来からの課題は，エッチング形状制御，エッチング速度，選択比，ダメージ低減，均一性などであるが，今後は多種多様な新材料や新デバイス構造の製作への技術開発もある。これには，プロセスのメカニズムの理解やモニター技術の開発などを含めて総合的な制御システムが重要となる。

参考文献

[2-1]S.M ジィー，“半導体デバイス（第 2 版）”，（南日康夫，川辺光央，長谷川文夫訳），産業図書(2009).

[2-2]麻蒔立男，“超微細加工の基礎―電子デバイスプロセス技術”，日刊工業新聞社（2001).

[2-3]金原 粲，“薄膜の基本技術（第 2 版）”，東京大学出版会（1987).

[2-4] J.W. Coburn and H.F. Winters, “Ion‐ and electron‐assisted gas‐surface chemistry—An important effect in plasma etching,” J. Appl. Phys. Vol. 50 (1979) 3189.

[2-5] 浅川 潔，“GaAs 及び AlGaAs のドライエッチングに関する研究”，東京大学博士論文，(1992) p. 4.

[2-6]関根 誠，“プラズマエッチング装置技術開発の経緯，課題と展望”，J. Plasma Fusion Res. Vol. 83 (2007) pp. 319-324.

第３章　共用クリーンルームの運営

東京工業大学では，文部科学省の「新たな共用システム導入支援プログラム」の支援を受けて，すずかけ台キャンパス内のクリーンルームを統合共用化し，研究機器の管理をラボから組織へ移行した。本論文で述べている共用クリーンルームは，コアファシリティとして，各種センサ，マイクロ流体制御，バイオ MEMS，新材料の研究などを行う学内外の研究室に開放され，その管理運営は技術職員と教員の教職協働で実施されている。この章では，共用クリーンルームの運営について，共用設備運営の問題点，設備，技術指導・相談，課金などの観点から述べる。

3.1 共用設備運営の問題点

半導体プロセス技術を用いた実験研究は一つのプロセス技術の装置のみで進めることは少なく，複数の装置を用いて評価・分析結果を適宜フィードバックしながら進める。一般的に取り扱うサイズが μm から nm であることから，光学顕微鏡や電子顕微鏡は分析機器というよりは虫眼鏡の延長線の装置で，表面粗さを測定する装置や原子間力顕微鏡なども同様である。このような測定評価装置は，リソグラフィ時のレジストのスピンコートを始め，薄膜生成やドライエッチングなどのプロセス装置のすぐ横において，試し実験後はすぐに測定評価して本番の実験へ臨む。新しいデバイス製作には，新しいプロセス技術が必要となるので，条件探索のトライアルとエラーを含む実験研究では上述のように複数の装置を同時に利用する。この時，複数の装置を 1 回毎または単位時間当たりの課金システムで予め全て予約することは煩雑過ぎて現実的ではない。一々見積後に予約して行うなどの方法では研究実験をスピーディに行うことは不可能である。また，1 回毎または単位時間当たりの課金システムでは料金を気にしながら実験を進めることになるので安心して失敗することもできず，特に新技術探索の研究や新人研究者にとっては不向きである。また，1 回毎の課金システムでは，実施確認や請求の件数が膨大になり課金の事務的業務で勤務時間が消費され，運営スタッフの本来の技術支援業務に与える影響も大きい。これらのことに加えて，実験装置には固有の特性があること，プロセス技術はノウハウも多く経験が財産であることから，初心者や経験の浅い利用者では，単なる設備利用では十分な成果を出せないことが多いこともこの技術分野の特徴である。つまり，プロセス技術それ自体が研究分野であることがあまり考慮されていない。また，取り扱う設備は一般的に高価（1 千万円～/台）でメンテナンス費用も高く，したがって維持費も高額になることが多い。したがって，実験装置の新規導入や更新は容易ではない。このことから，設備マスタープランに基づくロードマップの策定が必要で，いつどのくらいの予算が必要かを把握して 10 年スパンの戦略を練る必要がある。

3.2 共用クリーンルームにおける設備の整備について

東京工業大学精密工学研究所（現科学技術創成研究院未来産業技術研究所）では，1995

年度に図 3-1 に示す共同利用のクリーンルーム（メカノマイクロプロセス室，100 m^2）を稼動させ，バイオ，メカトロニクスの融合的なデバイス研究を全学的に支援する体制を構築しつつあった。国立大学法人化後は，技術職員集約化により組織された技術部半導体・MEMS 支援センター（現オープンファシリティセンターマイクロプロセス部門）が運営に関与するようになり，広範囲の研究分野の研究者に利用されるようになった。2016 年度の先端研究基盤共用事業により，新たに 100 m^2 のクリーンルーム（メカノマイクロプロセス室２）を統合運用し，コアファシリティとしての汎用的な共用設備を中心として，他機関から着任したばかりの研究者や若手研究者にもスピーディにかつ自由に研究に打ち込める環境を提供している。図 3-2 に，メカノマイクロプロセス室・メカノマイクロプロセス室 2 に設置されている研究設備群を示す。目的に応じて使い分けられるように複数の成膜装置，リソグラフィ装置，エッチング装置を中心に，評価・分析機器も整えている。装置導入は，いつどのくらいの予算が必要かを把握して 10 年スパンの戦略を練る必要がある。これには，日頃から世の中の技術動向と利用者の研究のためのニーズを watch して設備導入計画を立てておき，適宜変更を加えながら適切なタイミングで新規導入や更新が可能なように，いつも準備しておくことが必要である。また，定年退職を迎える教員や転出する教員などから設備を移管してもらうことも，設備の有効利用の観点から必要である。これについても，日ごろから関連教員（研究室）とは風通しをよくしておき，役立つ設備の導入機会にはいつでも応じられるような準備が必要である。また，民間企業で不要となった装置の寄付による導入の機会も大いに活用すべきである。これに加えて，既存の装置の改造，装置の自作も必要で，これに対する努力を怠ってはならない。

図 3-1 共同利用のクリーンルーム（メカノマイクロプロセス室，100 m^2）

図 3-2 メカノマイクロプロセス室・メカノマイクロプロセス室 2 に設置されている主な研究設備

3.3 共用クリーンルームの運営

メカノマイクロプロセス室の運営の概略は図 3-3 に示すような考え方に基づいている。研究利用や教育利用を動脈系とし，実験装置の維持管理・メンテナンスや実験装置の利用講習を心臓，ユーテリティ管理などの作業を静脈系と考えると，心臓から送り出した流れは動脈系を流れ利用者に供給され活用される。この時発生した実験廃棄物の処理などは静脈系の流れに乗って消耗品の管理や補充などと合わせて処理され，この流れはまた心臓に戻っ

て動脈系へと流れて研究や教育に活かされる，という循環となる。研究成果創出という戦略における研究利用や教育利用が存分に力を発揮するには，兵站機能を十分に備えて新鮮な血液を動脈系に送ることが重要である。この循環およびプロフェッショナルな研究教育支援を合わせた兵站としての研究支援力が加わり研究力が向上することになる。これらはどれが欠けても円滑な運営が成立せず，研究成果の創出に結びつかない。一般的には研究のための戦略はしばしば議論されるけれども実は戦術であることが多い。戦略の決定には，兵站の重要性を十分に考慮することが重要なことはここでも当てはまり，本当の研究力向上には，このような研究支援の考え方とその実践が最も必要とされる。

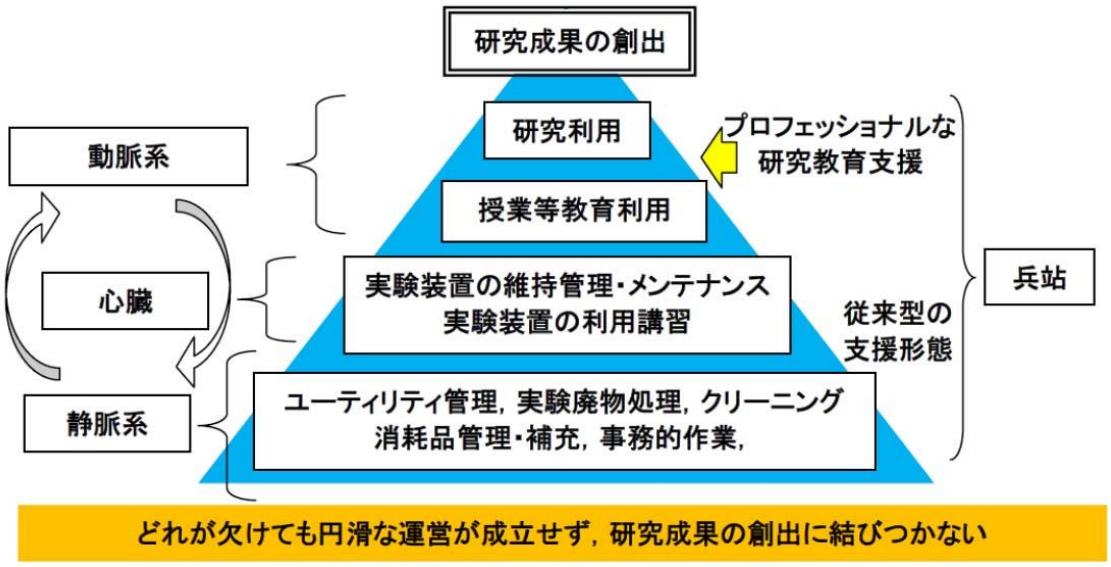


図 3-3 メカノマイクロプロセス室の運営の考え方［松谷, 2019］

3.4 共用クリーンルームの課金制度

前節で述べたように，この技術分野は常に課題解決型，研究型である。そこで，メカノマイクロプロセス室の課金システムは年会費制を採用している。この課金システムでは，原理的に 1 回毎の実施（時間）の確認やそれに伴う請求事務手続きなどが原理的に発生せず，1 利用者に対し当該年度に 1 回だけ課金の手続きをすればよいことになるから，利用者側，運営側の双方にとって happy となる。運営スタッフも本来の技術的業務に専念でき超過勤務もほとんど必要なくなる。利用者は卒業や進学，新規利用や利用中止等により毎年 3 分の 1 程度入れ替わるものの，毎年度の利用登録は 20 研究室余，利用登録者数は 100 名余が標準的な数である。装置のリプレイスを考慮しない標準的な維持管理費として 1 年間 350 万円弱で運営しているので，これを利用人数で案配し，研究室登録料と利用人数に応じた料金との合計で年会費の料金体系としている。料金の徴収は，現在のところ法人運営費の予算振替を基本としている。この考え方の基礎には「運営の安定性」がある。外部資金による利

用料支払いの場合，利用者が外部資金を獲得している場合には問題ないが，もし全利用者が外部資金獲得に失敗した時には，利用料収入が大きく減少する可能性があり，共用クリーンルームの運営の基礎が瓦解する可能性がある。これは経営的にも無計画ということであるから，運営のベースとなる安定財源の確保は最重要である。年会費制は他の研究支援分野でも有効と思われる。利用の単位が回数の場合，20 回，100 回，無制限などで一定額の料金を設定すれば効果的であろう。ちょうど，スマートフォンの通信料金のように 3 段階程度に料金設定すれば極端な不公平感もなく，料金徴収の事務作業量も格段に減らすことが可能と思われる。わずかな効果ではあるものの，年度繰り越しの仕組みや奨学寄附金の受け入れなどを可能にする制度の導入が望まれる。

3.5 研究目的の共有と相談機能による研究力向上への貢献

再三述べているように，この技術分野は常に課題解決型，研究型である。この場合，クリーンルームの運営で必要なことはインフラの整備だけでは不十分である。これまでの利用者のコメントで最も重要なメリットと思われているのは，「相談できる人がいてよかった」あるいは「最後まで共同で取り組んでくれてよかった」というものである。インフラのみの提供で装置の使用方法の講習だけでは，研究の目的とするデバイスの製作が達成できない場合が多い。これを解決するためには，共用クリーンルームの運営には，プロフェッショナルな経験豊富な専門家が利用者とコラボレーションしながら進めることが，時間も含めた効率的な研究成果の創出に最適な方法となる。言い換えれば，研究支援するスタッフ自身が研究者としての力を有しているということである。少なくとも研究目的を理解・共有して研究的に業務の遂行が可能であることが必須である。このことが可能になれば，共用クリーンルームはコアファシリティとしての汎用的な共用設備を中心として，他機関から着任したばかりの研究者や若手研究者にも，適切な助言や共同で取り組みながら，スピーディにかつ自由に研究に打ち込める環境を提供できることになる。実験装置には固有の特性があることやプロセス技術はノウハウも多く経験が財産であることを鑑みれば，インフラの整備だけでは，初心者や経験の浅い利用者では十分な成果を出せないことが多いのが特徴のこの技術分野で，親身になって相談して共同実験するスタイルを，研究支援の重要なファクターとすることが重要である。

このような取り組みの結果，メカノマイクロプロセス室の利用者の研究分野は図 3-4 のように多岐にわたっている。研究支援側のスタッフも様々な分野の研究に目標を共有しながら携わることになり，モチベーションの向上に役立つほか，様々な分野の技術を結ぶ「ハブ機能」ももつことができ，結果的に共用クリーンルームを中心に，様々な分野が融合発展していくことになり，我が国の研究力向上に貢献できると考えている。

図 3-4　メカノマイクロプロセス室の利用者の研究分野

3.6 共用クリーンルームの学外利用について

応用物理学会に所属する半導体微細加工プロセスを必要とする研究者と意見交換したところ，「現在のところ，学生が大学近隣の公的共用設備・施設を使いに行っているが，条件出しなどで苦労していて研究成果の創出がなかなか大変である。専門家に依頼してプロセスを行ってもらえれば大変助かる」という要望があった。このようなデバイス研究支援では，予め研究目的や製作するデバイスの情報を共有してプロセス実験の代行を依頼したいということであり，単なる機器利用を超えたトライアルとエラーを含めての共同実験的性格を有する例となる。このような要請に応えるためには，規則を整備して技術代行料を導入するとよいと考える。技術代行料を設定する理由は主に次の 3 つになる。維持管理費への充当，技術支援員の人件費，技術スタッフのプロとしての自覚とモチベーションの向上である。さらに，学外からの技術代行料収入による装置のリプレイスまで実現可能となれば理想的である。少なくとも維持管理費，技術支援員の人件費等をベースとした計画による必要経費から算出する方法の採用が望ましい。共用化の多くの先行事例では，当該装置の利用に係る消耗品や光熱費あるいは作業者の人件費相当額を加算しているようであるが，計画根拠の導入などの工夫が必要である。

以上の取り組みの成果の一部は，以下の学会にて発表された。

松谷晃宏，佐藤美那，遠西美重，藤本美穂，平野明子，西沢望，進士忠彦，初澤毅，“東京工業大学におけるクリーンルーム統合共用化による組織的研究支援の推進”，研究・イノベーション学会第 34 回年次学術大会，1G09，pp.245-248,（2019 年 10 月 26 日，政策研究大学院大学）

松谷晃宏，“東京工業大学オープンファシリティセンターマイクロプロセス部門の最近の取り組み”，第 22 回令和 3 年度高エネルギー加速器研究機構シンポジウム （2022 年 1 月 21 日，オンライン開催）

第 4 章　半導体プロセス技術の開発とデバイス研究への貢献

この章では，マイクロプロセス技術によるデバイス研究への貢献の事例を述べる。TiO_2 ドライエッチングと光デバイスへの貢献，化合物半導体（GaAs, InP）と新材料のドライエッチングと光デバイスへの貢献，半導体微細加工技術の単一細胞分離技術への展開についてその概要を述べる。

4.1 TiO_2 のドライエッチングと光デバイスへの貢献

4.1.1 面発光レーザ製作への貢献

面発光レーザとは，半導体基板と垂直方向に共振し，基板表面からレーザ光がでるために VCSEL（Vertical Cavity Surface Emitting Laser，垂直共振器型面発光レーザ）と呼ばれている半導体レーザである。VCSEL は，半導体基板上に活性層という光を放射し，かつ増幅する層があり，その上下に反射率の高い反射鏡を設けて，垂直方向に共振させて基板表面からレーザ光を取り出す構造である。活性領域の直径は 10 μm 程度と小さく，基板上にたくさんのレーザを 2 次元的に配列させて製作できる特徴がある。これにより，大量に製作できかつ検査も容易になる。2000 年ころから面発光レーザが搭載される製品が市場に出て，現在では，光通信（LAN, 光配線など）やパソコンのマウスやレーザプリンタ・ディスプレイ，スーパーコンピュータ，自動運転，スマートフォンの顔認証機能などにも使われている。東京工業大学のスーパーコンピュータ TSUBAME 3.0 には 16,000 個の VCSEL が使われており，富岳には 64 万個の VCSEL が使われている。

半導体レーザは 1962 年に米国で発表され 10 年程の時間をかけて実用化された。その当時は横型のレーザで，端面発光型の半導体レーザ（VCSEL の垂直共振器に対してこちらは水平共振器レーザである）と呼ばれ，現在の長距離光通信，中長距離の光インターコネクト，光ディスク，レーザ加工など広範囲に応用されている。この水平方向の共振器はストライプ状の発光領域内で光が往復して共振し，その長さは 300 μm 程度である。共振器が長いので多くの高調波が発生するほか，反射鏡を基板結晶の劈開面を利用するなど，薄膜形成技術で一貫形成できない。一方，VCSEL は LSI を製作するようなプロセス技術で，単一モード発振，モノリシック製造，波長再現性を備えた半導体レーザを製作できないかと考え，東京工業大学元学長の伊賀健一栄誉教授が 1977 年に発明したレーザである[4-1]。1982 年に厚さ 10 μm 程度のエピタキシャル成長層のみを残す面発光レーザが液体窒素温度で単一モード発振したのに続き，1988 年には室温で連続動作する世界初の面発光レーザが実現した[4-2, 4-3]。図 4-1 は，そのレーザの構造である。

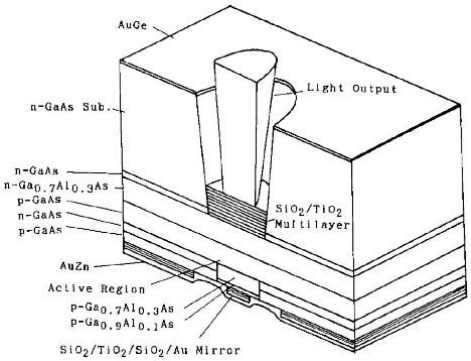


図 4-1 室温で連続動作した世界初の面発光レーザの概略図[4-2, 4-3]

この図に示す素子では, 基板の両面は SiO_2/TiO_2 からなる誘電体多層膜が使われている。更なる高性能化には，この誘電体多層膜の微小反射鏡が必要とされていた。しかしながら，当時は SiO_2/TiO_2 の多層膜の微小反射鏡を製作するドライエッチング技術が確立されていなかった。そこで，それまでに実験されていた CF_4 プラズマを用いた SiO_2 のドライエッチングによる微細加工を SiO_2/TiO_2 の多層膜の微小反射鏡を製作に応用した。まず，TiO_2 膜のエッチング特性を調べるために，図 4-2 の CCP の装置構成で実験をおこなった。

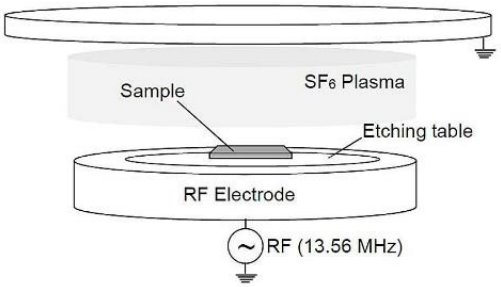


図 4-2　容量結合型(CCP)の反応性イオンエッチング（RIE）装置の概略図

ここでは，エッチングテーブル（試料台）の物質の違いに着目し，石英とテフロン（ポリテトラフルオロエチレン，PTFE）の 2 種類を用いて実験を行った。図 4-3 に Si, SiO_2, TiO_2 のエッチングレートのエッチングテーブルの物質依存性を示す。実験には，GaAs 基板の上に，電子ビーム蒸着装置で約 500 nm の厚さで成膜した Si, SiO_2, TiO_2 を用いた。RIE の条件は，CF_4 流量 25sccm，圧力 0.12 Torr，ＲＦパワー100 W とした。エッチングテーブルがテフロンの場合は酸化物（SiO_2, TiO_2）が Si よりもエッチングレートが大きく，エッチングテーブルが石英の場合は，Si の方が酸化物（SiO_2, TiO_2）よりもエッチングレートが大きくなり，対称的なふるまいを示すことが分かる。これは，テフロンが余剰のフッ素ラジカルを吸収するため，エッチングテーブルがテフロンのプラズマによるエッチングでは，ラジカルの寄与が減少するためと考えられる[4-4]。

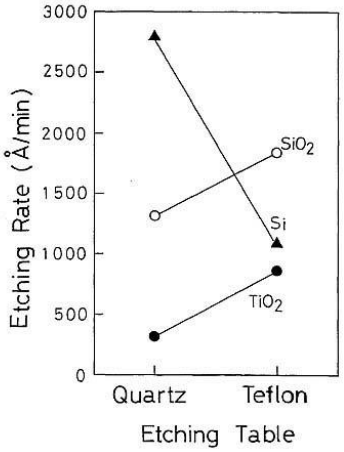


図 4-3　Si, SiO_2, TiO_2 のエッチングレートのエッチングテーブルの物質依存性［Matsutani, 1991］

図 4-4 にエッチングテーブルとしてテフロンを用いて，SiO_2/TiO_2 の 7 対の多層膜をエッチングした，直径 5 μm の誘電体多層膜反射鏡の製作例の SEM 写真を示す。エッチング側壁は基板に対してほぼ垂直で，GaAs 基板表面も平滑なことがわかる。これは，プラズマ中のラジカルの現象により，イオンの寄与が大きくなったためと考えられる。

図 4-4　GaAs 基板上の直径 5 μm SiO_2/TiO_2 の 7 ペアの誘電体多層膜反射鏡の SEM 写真［Matsutani, 1991］

このようにエッチングテーブルをテフロンとする選択により，SiO_2/TiO_2 誘電体多層膜の垂直微細加工技術を確立し，この後の VCSEL の性能向上に貢献することとなった。

本技術開発の結果は，以下の学術誌に掲載された。

Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, Kenichi Iga, “Microfabrication of Dielectric Multilayer

Reflector by Reactive Ion Etching and Characterization of Induced Wafer Damage," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 30 (1991) pp. 428-429.

参考文献

[4-1]伊賀健一，"面発光レーザが輝く，VCSEL オデッセイ"，オプトロニクス社（2018）p. 12.

[4-2] F. Koyama, S. Kihoshita, K. Iga, "Room Temperature CW Operation of GaAs Vertical Cavity Surface Emitting Laser," Transactions of IEICE, vol. 71 (1988) pp. 1089-1090.

[4-3] F. Koyama, S. Kihoshita, K. Iga, "Room-temperature continuous wave lasing characteristics of a GaAs vertical cavity surface-emitting laser," Appl. Phys. Lett. 55 (1989) 221.

[4-4] S. Matsuo and Y. Takehara, "Preferential SiO_2 Etching on Si Substrate by Plasma Reactive Sputter Etching," Jpn. J. Appl. Phys. 16 (1977) 175.

4.1.2 フォトニック結晶製作への貢献

色素増感太陽電池（DSC）の効率を改善するために，ナノ結晶 TiO_2 膜とフォトニック結晶の結合が検討された。現在，DSC のほとんどすべての高効率色素は高価な色素である。色素からの自然放出は安価な色素を使用する上で大きな問題である[4-5]。東京工業大学の松下祥子准教授は，フォトニック結晶構造によって DSC の色素からの自然放出を抑制し，さらに，シミュレーションによって求められた TiO_2 と電解質から構成される完全なフォトニックバンドギャップ構造(CPBG)を提案した[4-6, 4-7]。この構造を実現するには，(001）ルチル型 TiO_2 結晶基板の高アスペクト比の微細加工が必要である。これまでに，TiO_2 膜のドライエッチングについて多くの著者が報告している[4-8～4-10]。しかし，高アスペクト比の TiO_2 結晶基板の深い反応性イオンエッチング（RIE）はほとんど報告されていなかった。 SF_6 プラズマはそのエッチングレートの高さから Si のドライエッチングに広く用いられている。一方，TiO_2 膜を用いたドライエッチングマスクパターンの微細加工では SF_6 や CF_4 プラズマを含むドライエッチングプロセスが報告されている[4-9]が，そのエッチングプロファイルはテーパー形状であるなどの理由で CPBG 構造の微細加工のための高アスペクト垂直エッチングには適していなかった。そこで，CPBG 構造の微細加工のための SF_6 プラズマエッチングによる TiO_2 結晶基板の深い反応性イオンエッチングについてプロセス技術を確立することとした。図 4-5 に示すように 1150 cm^{-1} における CPBG では，8.7 μm 周期の少し回転した六角形アレイ構造が必要となる。

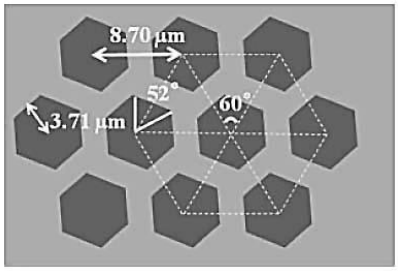


図 4-5　1150 cm^{-1} における CPBG 構造［Matsutani, 2012］

試料は(001) ルチル型 TiO_2 基板を使用し。 実験装置としては，SF_6 と CF_4 をエッチングガスとする RIE 装置を使用した。サンプルトレイ（前述のエッチングテーブルに相当）として PTFE を使用した。図 4-6 に，流量と TiO_2 のエッチング速度の関係を示す。SF_6 と CF_4 の流量が増加すると TiO_2 のエッチング速度が増加すること，SF_6 による TiO_2 のエッチング速度は，CF_4 プラズマによるエッチング速度よりも顕著に大きいことがわかる。SF_6 プラズマによるエッチング速度が大きいのは，エッチング過程に寄与するフッ素の数によるものと考えられる。断面 SEM 像から，CF_4 プラズマによるエッチング形状はテーパーであり，SF_6 プラズマによるエッチング形状はほぼ垂直であることがわかる。したがって，CPBG フォトニック結晶構造の微細加工には，CF_4 プラズマによるエッチングよりも SF_6 プラズマによるエッチングが適していると考えられる。

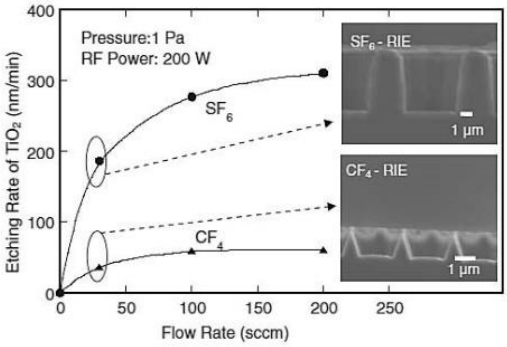


図 4-6　RF パワーと TiO_2 のエッチング速度の関係［Matsutani, 2012］

図 4-7 に，SF_6-RIE プロセスによって微細加工された TiO_2 基板の上面および断面の SEM 像を示す。エッチング条件は，SF_6 流量 200 sccm，圧力 1 Pa である。エッチングマスク材にはスパッタ法とリフトオフ法で堆積した Cr 膜を用いた。エッチングプロファイルはほぼ垂直であり，より高い RF パワーで高アスペクト比のエッチングが実現されていることがわかる。これにより，200 W の RF パワーで作製された TiO_2 フォトニック結晶構造は CPBG を備えた光デバイスとして機能できると考えられる。深い垂直エッチングプロファイルは，エッチングプロファイルの RF パワー依存性の観点から，エッチングプラズマ中のイオンとラジカルの良好なバランスのために実現したと考えられる。

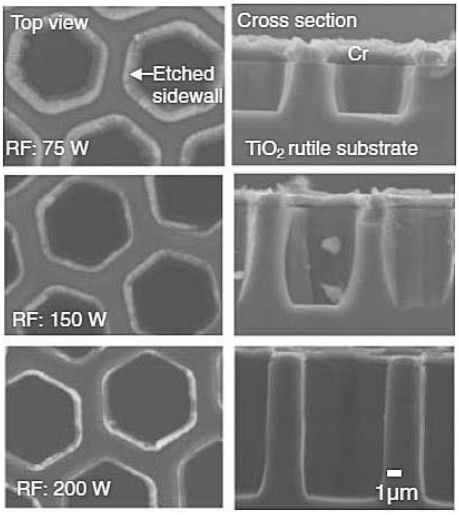


図 4-7 SF_6-RIE プロセスによって微細加工された TiO_2 基板の上面および断面の SEM 像 [Matsutani, 2012]

また，エネルギー分散 X 線（EDX）分光法によってエッチングされた表面を分析し，F，S，または C 由来のシグナルは観察されず，また，スタイラス プロファイラー（Veeco Dektak）によって測定されたエッチングされた表面の平均粗さは，光の波長よりもはるかに小さい 1 nm 未満であることも確認し，SF_6 プラズマによってエッチングされた TiO_2 表面は光学デバイス応用に対して有効な技術であることがわかった。また，エッチングプラズマの発光スペクトル分析も実施して，SF_6 プラズマでは F (703 nm)，CF_4 プラズマでは F (686 nm) が支配的なエッチング種と考えられることを見出した。以上より，SF_6 プラズマを使用した (001) TiO_2 ルチル基板のフォトニック結晶構造の作製を確立した。このプロセスは，プロセス条件を最適化することにより，CPBG を備えたフォトニック結晶や光導波路など，TiO_2 結晶基板ベースの光デバイスの微細加工に役立つと考えている。

本技術と関連技術の開発結果は，以下の Japanese Journal of Applied Physics 誌に掲載された。また，この CPBG フォトニック結晶の光学特性評価については，Journal of Materials Science 誌で報告され，共著者として貢献した。

Akihiro Matsutani, Mikiro Hayashi, Yasushi Morii, Kunio Nishioka, Toshihiro Isobe, Akira Nakajima, and Sachiko Matsushita, "SF_6-Based Deep Reactive Ion Etching of (001) Rutile TiO_2 Substrate for Photonic Crystal Structure with Wide Complete Photonic Band Gap," Jpn. J. Appl. Phys. 51 (2012) 098002.

Akihiro Matsutani, Kunio Nishioka, Mina Sato, Dai Shoji, Daito Kobayashi, Toshihiro Isobe, Akira Nakajima, Tetsu Tatsuma, Sachiko Matsushita, "Angled etching of (001) rutile Nb-TiO_2 substrate using SF_6-based capacitive coupled plasma reactive ion etching," Jpn. J. Appl. Phys. 53 (2014) p. 06JF02.

Sachiko Matsushita, Akihiro Matsutani, Yasushi Morii, Daito Kobayashi, Kunio Nishioka, Dai Shoji, Mina Sato, Tetsu Tatsuma, Takumi Sannomiya, Toshihiro Isobe, Akira Nakajima, "Calculation and Fabrication of Two-dimensional Complete Photonic Bandgap Structures composed of Rutile TiO_2 Single Crystals in Air/Liquid," J. MATER. SCI., vol. 51 (2015) pp. 1066-1073.

参考文献

[4-5] Y. Amao, Y. Yamad, K. Aoki, "Preparation and properties of dye-sensitized solar cell using chlorophyll derivative immobilized TiO_2 film electrode," J. Photochem. Photobiolo. A: Chemistry, Vol.164 (2004) pp.47-51.

[4-6] S.I. Matsushita, N. Fukuda, M. Shimomura, "Photochemically functional photonic crystals prepared by using a two-dimensional particle-array template," Colloids and Surfaces A: Physicochem. Engineer. Aspects, Vol. 257–258 (2005) pp.15-17.

[4-7] S. Matsushita, O. Suavet, H. Hashibac, "Full-photonic-bandgap structures for prospective dye-sensitized solar cells," Electrochimica Acta, Vol. 55 (2010) pp. 2398-2403.

[4-8] S. Norasetthekul, P.Y. ParkK, H. BaikK, P. Lee, J.H. Shin, B.S. Jeong, V. Shishodia, E.S. Lambers, D.P. Norton, S.J. Pearton, "Dry etch chemistries for TiO_2 thin films," Applied Surface Science, Vol.185 (2001) pp.27-33.

[4-9] J. Dekkera, K. Kolari, and R. L. Puurunen, "Inductively coupled plasma etching of amorphous Al_2O_3 and TiO_2 mask layers grown by atomic layer deposition," J. Vac. Sci. & Technol. B, Vol. 24 (2006) 2350.

[4-10] F. Fracassi and R. d'Agostino, "Chemistry of titanium dry etching in fluorinated and chlorinated gases," Pure Appl. Chem. 64 (1992) pp.703-707.

4.1.3 大口径望遠鏡の波面制御への貢献

京都大学岡山天文台の日本最大の口径 3.8 m のせいめい望遠鏡(図 4-8)に搭載を目指す，太陽系外惑星の直接撮像観測を目的とした高コントラスト撮像装置 SEICA(Second-generation Exoplanet Imager with Coronagraphic Adaptive optics）の開発には，高速，高精度な波面計測と新方式の波面センサに必要な素子が必要である。

撮像を目指す惑星は主星との離角や惑星と主星の光度比が極端に小さく，地上から観測する場合には地球大気の揺らぎの影響で主星の像が乱れ，近傍の惑星像が埋もれてしまうので，大気の乱れによる光の波面を補償光学装置で測定して迅速に補正することが必要となる。しかしながら，天体からの光は微弱なことから，従来の波面センサでは測定精度と測定頻度を両立することは難しい。そこで，京都大学では光学面検査などで用いられる点回折

干渉計(PDI) と位相シフト干渉法に着目し波面センサの開発を行っている[4-15]。図 4-9 にその概略図を示す。この方法の核となる光学素子(point difffractor) は，複屈折結晶である TiO_2 と複屈折性のない Nb_2O_5 から成り，TiO_2 基板に直径 30 μm，深さ 1 μm 程度の穴を設け，その内部に Nb_2O_5 を充填することで製作する。

図 4-8　京都大学岡山天文台のせいめい望遠鏡

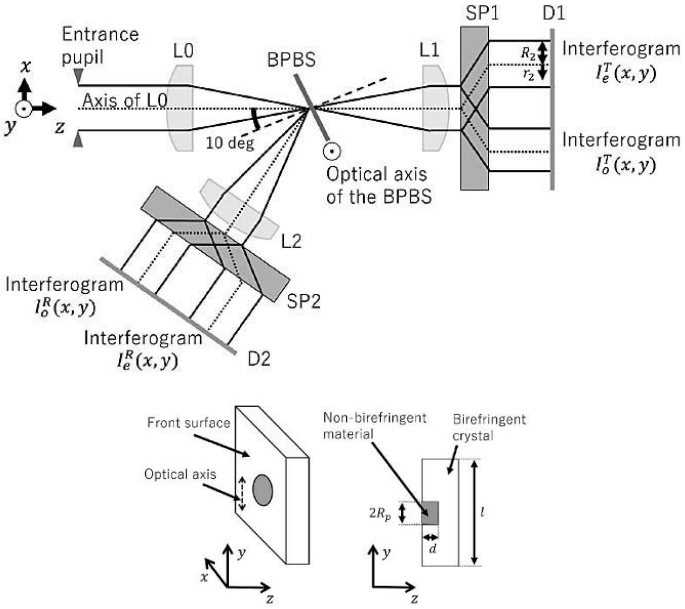


図 4-9　点回折干渉計(PDI) と位相シフト干渉法による波面センサの概略図[4-11]

この素子の開発には TiO_2 の垂直平滑ドライエッチング技術が不可欠である。上述したように, TiO_2 の垂直平滑ドライエッチングはエッチング条件を最適化すれば実現可能である。これまではエッチング形状のみに着目した技術開発を行ってきたが，ここでは光の透過も重要なことから透過光を用いた評価をしながらの技術開発となる。図 4-10 に 落射照明と透過照明によるエッチング後の TiO_2 の穴を示す。どちらの照明下でもエッチング底面は平滑で光学的な乱れはないことが分かる。

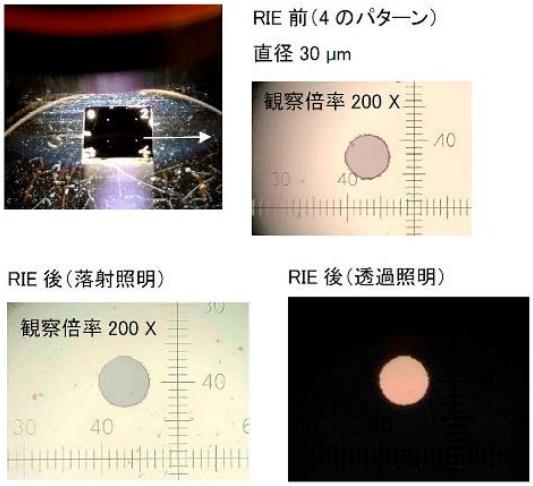


図 4-10　落射照明と透過照明によるエッチング後の TiO_2 の穴の光学顕微鏡像

図 4-11 にこの試料の SEM 像を示す。この SEM 像から，エッチング形状は垂直でエッチング底面は平滑であり，光学デバイスへの応用が可能なことがわかる。この TiO_2 の穴にスパッタ成膜による Nb_2O_5 の埋め込みにより図 4-9 の光学素子がほぼ設計値通りに製作されている。

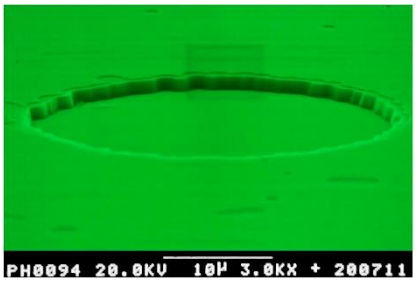


図 4-11　製作された TiO_2 の穴の SEM 像

この技術開発の成果は日本天文学会等で報告され，共著者として貢献した。また，成膜した Nb_2O_5 薄膜の屈折率などの直接評価の方法についても応用物理学会で共著者として報告した。現在，本光学素子は，せいめい望遠鏡に実装するための光学実験が行われている。

Ryo Tsukui, Masaru Kino, Kodai Yamamoto, Mina Sato, Mie Tohnishi, Akihiro Matsutani, and Mikio Kurita, “Laboratory demonstration of the birefrigent point-diffraction interferometer wavefront sensor,” Optics Continuum Vol. 2, Issue 2 (2023) pp. 382-396.

津久井遼，木野勝，山本広大，佐藤美那，遠西美重，松谷晃宏，栗田光樹夫，“点回折干渉方式を用いた補償光学用波面センサの開発 3 ”，日本天文学会 2022 年秋季年会, V229b，（2022 年 9 月 14 日，新潟大学）

津久井遼，木野勝，山本広大，栗田光樹夫，松谷晃宏．点回折干渉計方式を用いた補償光学用波

面センサの開発，日本天文学会 2021 年秋季年会, V245b，（2021 年 9 月 14 日，オンライン）

津久井 遼，木野 勝，山本 広大，栗田 光樹夫，松谷晃宏，“せいめい望遠鏡での極限補償光学に向けた波面センサの開発”，第 18 回赤外放射応用関連学会等年会, Jan. 2021.

佐藤美那，松谷晃宏，津久井遼，木野勝，山本広大，栗田光樹夫，長田哲也，“ドライエッチングにより製作したメンブレン構造の NbO 薄膜の顕微分光透過率測定と EDX 分析”，第 68 回応用物理学会学術講演会，16a-P04-5, Mar. 2021.

参考文献

[4-11] Ryo Tsukui, Masaru Kino, Kodai Yamamoto, and Mikio Kurita, “Point-diffraction interferometer wavefront sensor with birefringent crystal,” Applied Optics, Vol. 59, (2020) pp. 8370-8379.

4.2 化合物半導体および新材料のドライエッチングと光デバイス研究への貢献

東京工業大学に文部技官として着任以来多年にわたり，先端的フォトニクス研究の研究支援業務，特にマイクロナノ加工の研究設備群の保守・管理・運用，学生への技術指導などを担当するほか，文科省が 1995 年度に選定した最初の中核的研究拠点（ＣＯＥ）形成プログラムの「超並列エレクトロニクス（研究代表者：東京工業大学伊賀健一教授)」で整備された先端機器装置群の立ち上げと管理・運用に大いに貢献した。デバイス製作の上で従来からの課題となっていた化合物半導体材料の微細加工とその光デバイス研究への適用に関する研究支援業務において，特にドライエッチングの高度専門技術者として技術開発も行いながら課題を解決して，デバイス研究の発展に大いに寄与した。ここでは，ECR-reactive ion beam etching (RIBE)と ICP-RIE による化合物半導体のドライエッチング技術の開発と光デバイス研究への貢献の一部について述べる。

4.2.1 ECR-RIBE による GaAs, InP のエッチング技術の開発

半導体レーザではプラズマエッチングによる加工は従来の劈開法やウエットエッチングによる方法よりも素子の微細化や集積化という点で有利である。1990 年頃は，光デバイスの材料として用いられる化合物半導体の GaAs や InP については，GaAs では反応性イオンビームエッチングなどにより垂直平滑加工が実現されつつあったが, InP の垂直平滑加工については，反応生成物の沸点が高いという問題もあり，まだ十分な結果が得られていない状況であった。VCSEL の高性能化にはこれらの化合物半導体の微細加工が必要で，InP についても同様であった。そこで，着任した研究室において導入されて間もない ECR-RIBE を担当して化合物半導体のエッチング技術の開発に取り組むこととなった。

図 4-12 は，イオン引き出し電圧（イオンエネルギーに相当）と基板温度とエッチングレートの関係を示したものである。大まかなエッチングメカニズムとして，基板温度により，エッチングレートがイオン引き出し電圧の 5/2 乗，3/2 乗，1 乗に比例する様子がわかる。

このグラフの傾きから，基板温度が低温の場合はイオンによる効果（Ion beam etching, IBE-like），高温の場合はラジカルによる化学的なエッチング（chemical-like）による効果がエッチングの主要因となることがわかり，イオンとラジカルの適正な比率の反応性イオンエッチング（Reactive ion etching, RIE-like）が垂直平滑微細加工に必要なことが推察できる。

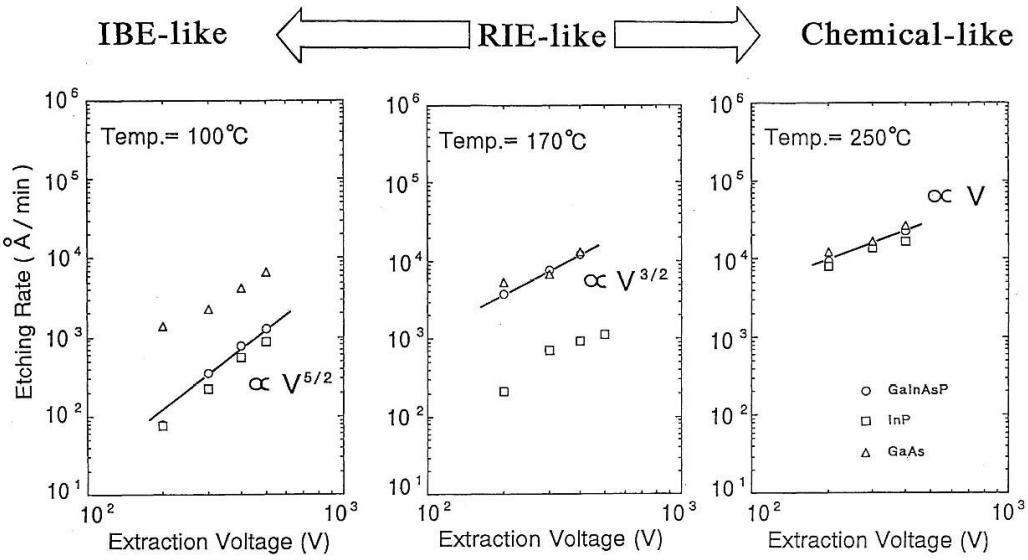


図 4-12 イオン引き出し電圧と基板温度とエッチングレートの関係［Matsutani, 1991］

図 4-13 は，イオンビームの照射時間と基板温度の関係を調べたもので，イオンエネルギーにより基板温度の上昇の程度が変わることがわかった。イオン照射により基板の表面に局在した温度上昇領域が生じ，このためにエッチング形状がくびれをもつことを明らかにし，冷却時間を入れた繰り返しエッチングによりエッチング形状の制御が可能なことを示した。

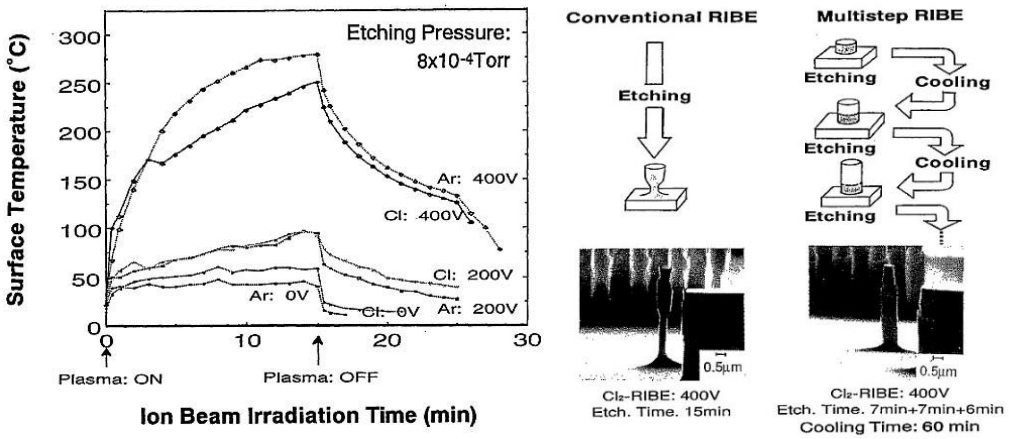


図 4-13　イオンビームの照射時間と基板温度の関係［Matsutani, 1995］

イオン照射により半導体表面には損傷領域が発生する。その程度についても当時はよくわかっていなかったので，C-V 法による電気的評価およびフォトルミネッセンスの測定による光学的評価から検討した結果を図 4-14 に示す。これらの結果から，400 eV のイオンエネルギーでは試料表面から約 100 nm の深さまで損傷が発生することが明らかになった。この損傷はエッチング条件を最適化した 2 段階エッチングで相当程度除去できることも見出した。

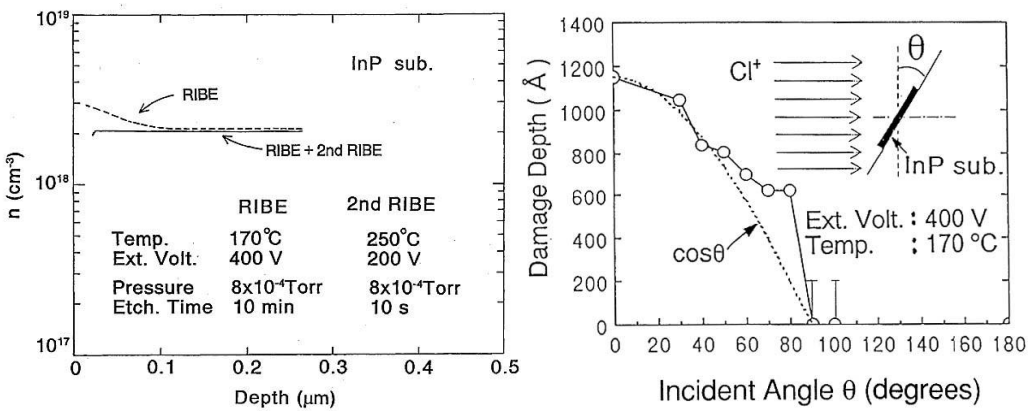


図 4-14　C-V 法（左）およびフォトルミネッセンス（右）によるイオン誘起損傷の評価 [Matsutani, 1991, 1992]

エッチング側面の粗さは特に端面発光型の半導体レーザや VCSEL でも非発光表面再結合の低減に重要であった。図 4-15 は 4 つの二次電子検出器をもつ電子顕微鏡により非接触で試料の粗さを測定できる装置での，エッチング後の側面の粗さ測定の結果である。エッチング条件を最適化することにより，エッチング側面の粗さを低減することを定量的に初めて報告した。

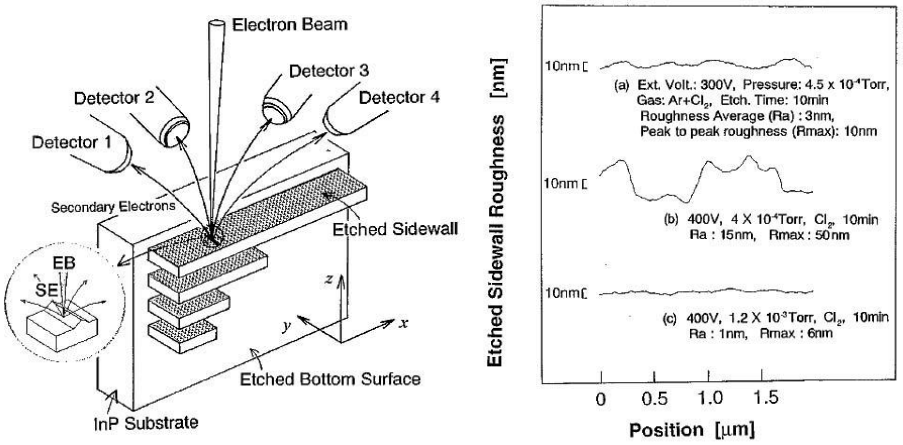


図 4-15　4 つの二次電子検出器をもつ電子顕微鏡により非接触でのエッチング後の側面の粗さ測定の結果［Matsutani, 1995］

このようなエッチング実験から良好なエッチング条件を探索して VCSEL の 2 次元アレイを製作した結果を図 4-16 に示す。GaInAsP/InP の多層膜反射鏡をもつ VCSEL の微細加工が実現されたことがわかる。

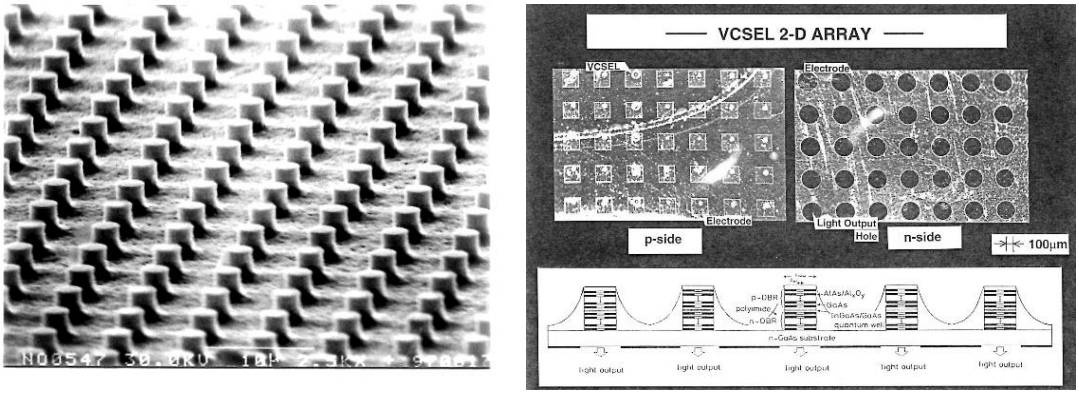


図 4-16　GaInAsP/InP の多層膜反射鏡をもつ VCSEL の 2 次元アレイ

ECR-RIBE 装置を用いて実験した結果は，以下に示すように，主に Japanese Journal of Applied Physics 誌に掲載され，光デバイス製作技術や当該研究分野への情報提供の面から大いに貢献した。

Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, Kenichi Iga, “Reactive Ion Beam Etch of GaInAsP/InP Multilayer and Removal of Damaged Layer by Two-Step Etch,” Jpn. J. Appl. Phys., vol. 30 (1991) pp. 2123-2126.

Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, Kenichi Iga, “Characterization of Sidewall Damage Induced by Reactive Ion-Beam Etching,” Jpn. J. Appl. Phys., vol. 31 (1992) pp. 1541-1544.

Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, Kenichi Iga, “Three-dimensional electron probe roughness analysis of InP sidewalls processed by reactive ion beam etching,” Applied Physics Letters, Vol. 66 (1995) pp. 64-66.

Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, Kenichi Iga, “Surface Temperature Increase in Reactive Ion Beam Etch and Improvement of Profiles by Multistep Etching,” Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 34 (1995) pp. 2053- 2054.

Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, Kenichi Iga, “Plasma Characterization in Chlorine-Based Reactive Ion Beam Etching and Chemically Assisted Ion Beam Etching,” Jpn. J. Appl. Phys., vol. 37 (1988) pp. 2747-2751.

Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, Kenichi Iga, "C_{60} Resist Mask of Electron Beam Lithography for Chlorine-Based Reactive Ion Beam Etching," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 37 (1988) pp. 4211-4212.

4.2.2 ICP-RIE による GaAs, InP のエッチング技術の開発

前節では ECR-RIBE による GaAs, InP のエッチング技術の開発を行ったが，この装置はプロセス圧力も比較的低いため高真空を必要とする装置であり，エッチングメカニズムの研究には適していたものの，1 日に実験可能な回数は 2 回であり，スループットのよい高密度プラズマエッチングの装置が必要とされていた。折よく，COE プログラムで ICP-RIE 装置を導入することができ，実験を開始した。導入に当たっては，ECR-RIBE での経験を活かし，反応容器の設計段階から関与し，様々な分析器も搭載して，GaAs, InP, SiC などの化合物半導体エッチングを，一般に用いられる $SiCl_4$,や Cl_2 プラズマに加えて，HI プラズマ，固体ソース I_2 および ICl_3 プラズマ，H_2O プラズマを新技術として開発し，この分野でリードする実験結果を世の中に提供することが出来た。ここでは，それらの中から一部を抜き出してその概要を述べる。

実験に用いた ICP-RIE 装置の概要を図 4-17 に示す。石英天板上のトルネード型 ICP コイルから RF が印加されプラズマを発生させる（後にこのコイルは平板をドーナツ状に巻いたコイルに変更した)。サンプルは下部の RF 電極上に設置し自己バイアス電圧の発生によりイオンのエネルギーを得る。装置側面のポートにはイオンエネルギーアナライザ月の四重極質量分析器（Q-mass）を設置してリアルタイムでエッチングプラズマのイオンやラジカル，中世粒子の挙動を分析できるようにした。，また，装置側面のビューポートの窓材に石英のほかサファイアや BaF_2，蛍石なども用意してリアルタイムでのプラズマの発光分光分析も可能にし，また別のポートにはレーザ光の出入り口を設けてリアルタイムでエリプソメトリ測定とエッチング深さの制御を可能にした。 CCP-RIE を用いた TiO_2 のエッチングの経験から，この装置でもエッチングの材料を変更できるようにして，Si や Al_2O_3 などのドーナツ形状の基板を用いることができるようにした。

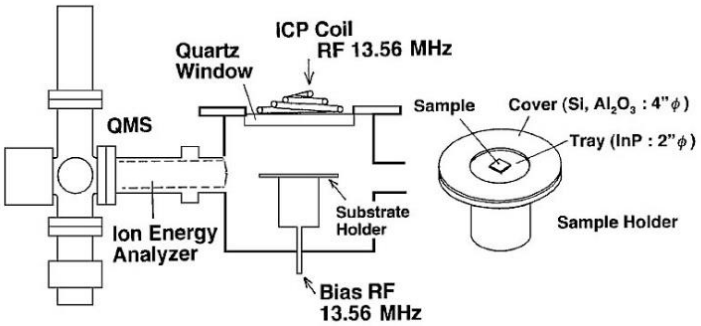


図 4-17　ICP-RIE 装置の概略図

図 4-18(a)に，InP のCl_2プラズマによるバイアスパワーとエッチングレートの関係を示す。バイアスパワーの増加によりエッチングレートも増加するがその特性とエッチング形状はプロセス圧力に依存することがよくわかる。良好なエッチング条件では図 4-18(b)のように，垂直かつ平滑なエッチング形状が得られことが分かった。これは ECR-RIBE での結果と比べても良いものであり，この結果をきっかけに光デバイスの InP の微細加工技術の業界では ICP-RIE が主流となっていった。

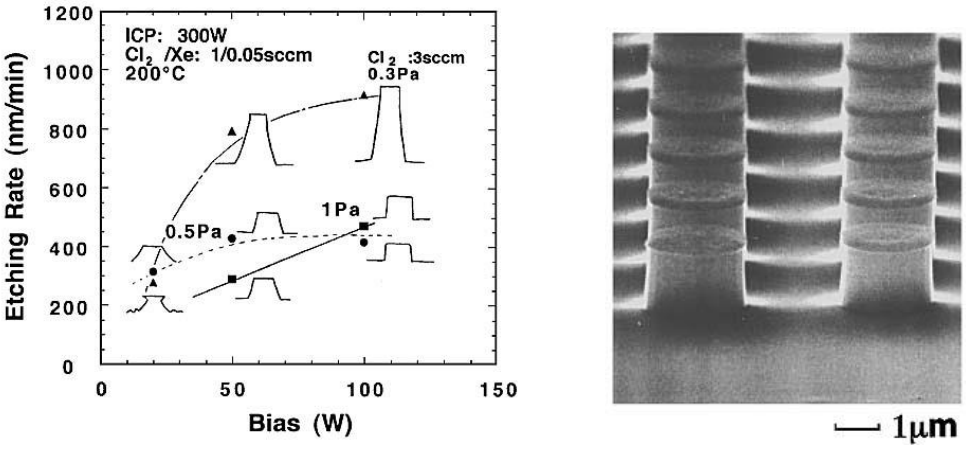
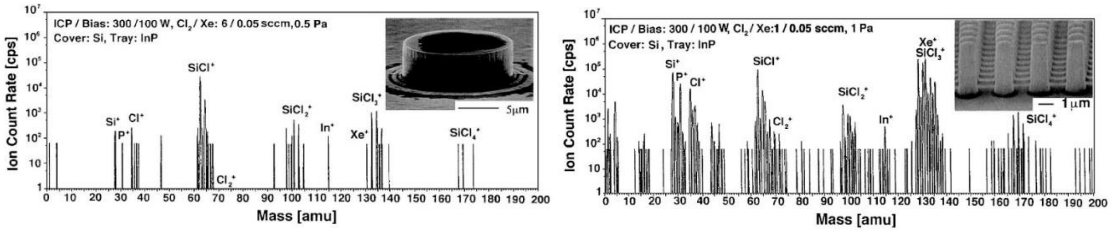


図 4-18 (a) InP のCl_2プラズマによるバイアスパワーとエッチングレートの関係, (b)InP のエッチング後の SEM 像 [Matsutani, 1999]

この時のプラズマの状態を把握するために Q-mass を用いた分析を行い，プラズマ中の粒子の挙動とエッチング形状との関係を調べた。図 4-19(a)と 4-19(b)に InP と GaAs のエッチングに最適なプラズマの Q-mass スペクトルを示す。これにより，GaAs と InP のエッチングに適するプラズマは異なること，Si 基板とCl_2プラズマとの反応生成物の寄与が重要なことなどが明らかとなった。



(a) (b)

図 4-19 GaAs(a)と InP (b)のエッチングに適するプラズマの Q-mass スペクトル [Matsutani, 2000]

また，同様に図 4-20 に示す Q-mass のスペクトルの測定から，Cl^+のエネルギーと InP のエッチング形状の圧力依存性を求め，InP のエッチング形状の制御にはプラズマ中の Cl^+が大きく関与していることを見出した。

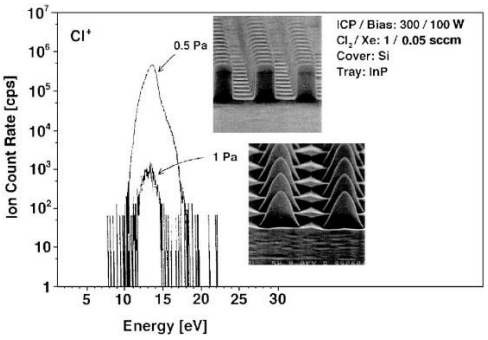
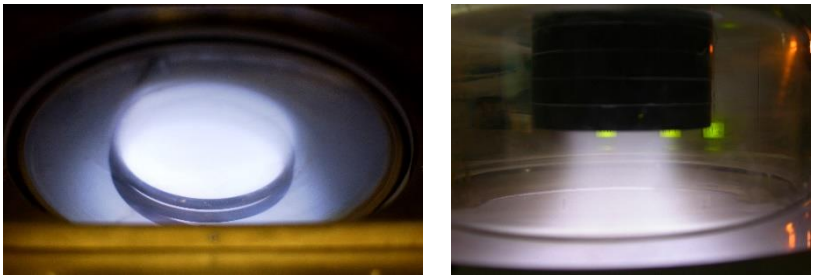


図 4-20　Cl^+のエネルギーと InP のエッチング形状の圧力依存性［Matsutani, 2000］

以上に述べ結果に加えて，プラズマに用いるガスの質量の効果，エッチング形状のリアルタイム観察，図 4-21(a)に示す内部アンテナや図 4-21(b)に示す磁場閉じ込めによるプラズマの高密度化などの実験も工夫して実施し，高密度プラズマの有効性を確認した。



(a)　　(b)

図 4-21　(a)内部アンテナと(b)磁場閉じ込めによるプラズマの高密度化の実験［Matsutani, 2003］

InP のドライエッチングでは，反応生成物は In_xCl_y となりその沸点は一般に高温である。したがって ICP-RIE でも 180～200℃の基板温度を必要とする。デバイスへのダメージや製作の自由度からはエッチングプロセスの低温化が求められていた。In_xI_y は沸点も低く，これが反応生成物となるプラズマでエッチングできればよいことに着目し， HI プラズマの導入を発案し，これも良好なエッチング結果を得ることとなり，これ以降，他機関では InP 系のフォトニック結晶の製作に用いられるようになった。しかし，HI プラズマではプロトンを含むため，デバイスへのダメージの点からはプロトンフリーのエッチングプロセスが必要である。そこで，固体 I_2 を反応容器の中にいれ，昇華する気体をプラズマのガス源とする方法を発案し，固体ソース I_2 プラズマプロセス技術を開発した。その方法を用いて基板温度 90℃で InP をエッチングした結果を図 4-22 に示す。垂直なエッチング形状と平滑なエッチング底面が得られ，非常に良好なエッチングプロセスを開発できたことがわかる。

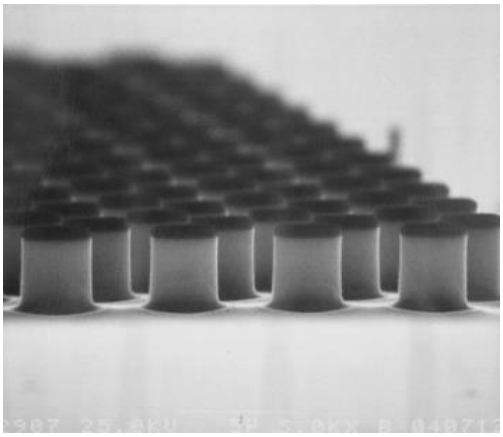


図 4-22　固体ソース I_2 プラズマにより基板温度 90℃で実現された InP の垂直平滑エッチング［Matsutani, 2005］

ICP-RIE 装置を用いて実験した結果は，以下に示すように，主に Japanese Journal of Applied Physics 誌に掲載され，光デバイス製作技術や当該研究分野への情報提供の面から大いに貢献した。

Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, Kenichi Iga, “Low Bias Voltage Dry Etching of InP by Inductively Coupled Plasma Using $SiCl_4$/Ar,” Jpn. J. Appl. Phys., vol. 37 (1988) pp. 6655-6656.

Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, Hideo Ohtsuki, Kenichi Iga, “Vertical and Smooth Etching of InP by Cl_2/Xe Inductively Coupled Plasma,” Jpn. J. Appl. Phys., vol. 38 (1999) pp. 4260-4261.

Akihiro Matsutani, Hideo Ohtsuki, Fumio Koyama, Kenichi Iga, “Plasma Diagnostics in Inductively Coupled Plasma Etching Using Cl_2/Xe,” Jpn. J. Appl. Phys., vol. 39 (2000) pp. 1435-1436.

Akihiro Matsutani, Hideo Ohtsuki, Fumio Koyama, Kenichi Iga, “Emission Spectrochemical Analysis in Dry Etching Process of InP by Cl_2 Inductively Coupled Plasma,” Jpn. J. Appl. Phys., vol. 39 (2000) pp. 6109-6110.

Akihiro Matsutani, Hideo Ohtsuki, Fumio Koyama, Kenichi Iga, “Mass Effect of Etching Gases in Vertical and Smooth Dry Etching of InP」 Jpn. J. Appl. Phys., vol. 40 (2001) pp. 1528-1529.

Akihiro Matsutani, Hideo Ohtsuki, Fumio Koyama, Kenichi Iga, “Measurement of Plasma Density for Control of Etching Profile in Inductively Coupled Plasma Etching of InP,” Jpn. J.

Appl. Phys., vol. 41 (2002) pp. 3147-3148.

Akihiro Matsutani, Hideo Ohtsuki, Fumio Koyama, "In situ Observation of Etching Profile in Inductively Coupled Plasma Etching of GaAs and InP using Long Distance Microscope," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 42 (2003) pp. 426-427.

Akihiro Matsutani, Hideo Ohtsuki, Fumio Koyama, "Cl_2-based Inductively Coupled Plasma Etching of InP Using Internal Antenna," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 42 (2003) pp. 6837- 6838.

Akihiro Matsutani, Hideo Ohtsuki, Fumio Koyama, "Low-Temperature Dry Etching of InP by Inductively Coupled Plasma Using HI/Cl_2," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 42 (2003) pp. L1414 - L1415.

Akihiro Matsutani, Hideo Ohtsuki, Ken Ohashi, Tomonori Yokoyama, Hirokazu Yamakage, Fumio Koyama, "Vertical and Smooth Microfabrication of InP Using Simple High-Density Plasma System with SmCo Ring Magnet," Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 43 (2004) pp. L960 ~ L962.

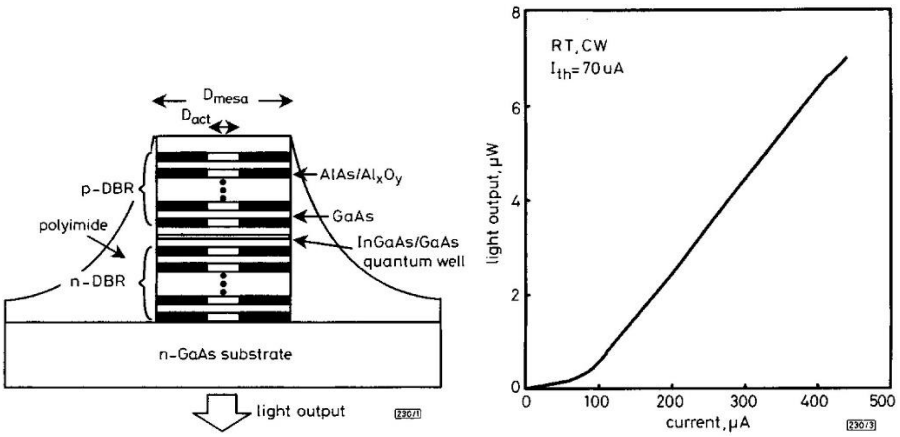
Akihiro Matsutani, Hideo Ohtsuki, Fumio Koyama, "Iodine solid source inductively coupled plasma etching of InP," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 44, (2005) pp. L576-L577.

Akihiro Matsutani, Hideo Ohtsuki, Fumio Koyama, "Solid Source Dry Etching Process for GaAs and InP," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 45 (2006) pp. 8374~ 8377.

Akihiro Matsutani, Hideo Ohtsuki, Fumio Koyama, "Characterization of H_2O-inductively coupled plasma for dry etching," Journal of Physics: Conference Series, vol. 100 (2008) p. 062022.

4.2.3 光デバイス製作への貢献

上述した化合物半導体のプラズマエッチング技術を面発光レーザの製作へ適用し，自然酸化狭窄構造と屈折率導波構造の InGaAs / GaAlAs 垂直共振器形面発光レーザの最低しきい値動作の世界記録達成に貢献した。具体的には，図 4-23(a)に示すように，光を発する活性層が厚さ 8 nm と GaInAs と 10 nm の GaAs の 3 層量子井戸から構成されているデバイスである。このデバイスの室温連続動作時のしきい値電流として，図 4-23(b)に示すように 70 μA が得られた（論文発表の 1995 年時点での面発光レーザの最低しきい値電流で通常の端面出射型の半導体レーザの 100 分の 1 以下のしきい値電流で発振した）。本件に関する研究支援としての貢献は，反応性イオンビームエッチング（RIBE）によるメサ形成や製作プロセス全般である。低損傷エッチング技術の開発と横方向からの選択酸化膜形成による電流狭窄と導波路構造を形成することにより最高性能が実現された。



(a) (b)

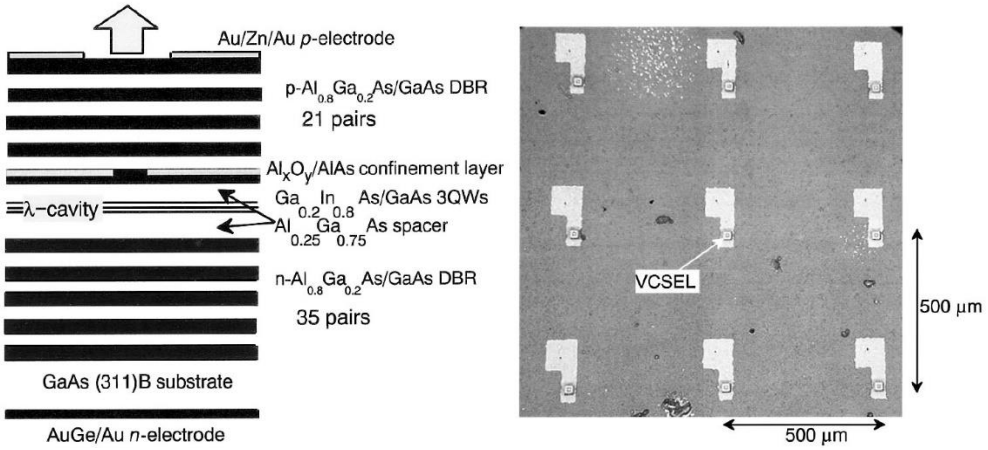
図 4-23 (a) 3 層量子井戸から構成される VCSEL の構造図と(b)電流-光出力の特性 [Hayashi, 1995]

この成果をまとめた以下の論文に共著者として貢献した。また, Google scholar によると, 本論文は 2022 年 11 月現在で 219 の被引用数があり, 2018 年以降の論文にも引用され続けている。現在の面発光レーザ製造でも採用されている手法で, 今でも改良しながら研究支援の現場で実施している。

Yukio Hayashi, Toshikazu Mukaihara, Nobuaki Hatori, Noriyuki Ohnoki, Akihiro Matsutani, F. Koyama and Kenichi Iga, “Record low-threshold index-guided InGaAs/GaAlAs vertical-cavity surface-emitting laser with a native oxide confinement structure,” Electronics Letters. vol. 31 (1995) pp. 560-562

さらに， GaAs(311)B 基板上に成長させた GaInAs/GaAs 垂直共振器面発光レーザ（VCSEL）アレイの動的安定偏光動作の実証への貢献について述べる。図 4-24(a)に GaAs (311)B 基板上に作製した VCSEL の概略構造と 4-24 (b)に光学顕微鏡写真を示す。下部の

n 型分布ブラッグ反射器（DBR）は，Se をドープした 35 対の GaAs/Al0.8Ga0.2As で構成されている。上部の p 型 DBR は，21 対の炭素ドープ GaAs/Al0.8Ga0.2As で構成されている。活性領域は，λ キャビティを形成するために Al0.25Ga0.75As スペーサー層に囲まれた 80° A-Ga0.8In0.2As/GaAs 三量子井戸からなる。活性層近くの定在波のゼロ位置に配置された上部ミラーには，酸化閉じ込めのために厚さ 300 Å の Al0.98Ga0.02As 層が導入さている。成長したサンプルは誘導結合プラズマ（ICP）エッチングによってドライエッチングされ，500 μm ピッチの 30 μm×30 μm の正方形メサを形成した。



(a) (b)

図 4-24 (a) GaAs (311)B 基板上に作製した VCSEL の概略図と(b)光学顕微鏡写真［Arai, 2001］

製作された 3×3 VCSEL アレイは，3.4 μm×3.4 μm の酸化物開口部を持つデバイスで構成され，図 4-25 に示すように，しきい値電流は 0.61 ± 0.05 mA ，しきい値電圧は 1.79 ± 0.03 V となった。すべてのデバイスは，しきい値の最大 3 倍の注入電流で単一横モード動作を示し，この VCSEL アレイは， 25 dB を超える直交偏波抑圧比で安定した偏波動作も得られた。

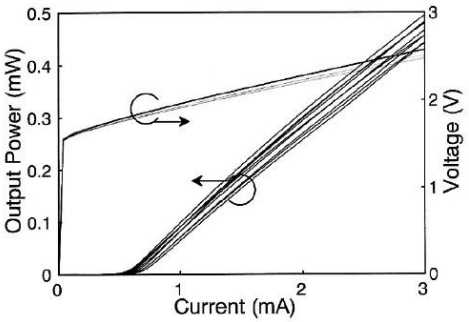


図 4-25 3×3 VCSEL アレイの電流-光出力特性［Arai, 2001］

このデバイスの実験結果は以下の IEICE の論文誌に掲載され電子情報通信学会論文賞を受賞し，これにも共著者として貢献した。

Masakazu Arai, Nobuhiko Nishiyama, Munechika Azuchi, Satoshi Shinada, Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, and Kenichi Iga, "GaInAs/GaAs Single Mode Vertical Cavity Surface Emitting Laser (VCSEL) Array on GaAs (311)B," IEICE TRANS. ELECTRON. Vol. E84–C (2001) pp. 331-338.

4.2.4 新材料 $TripC_{12}$ のレジスト応用への貢献

図 4-26 に示すヤヌス型トリプチセン($TripC_{12}$)は，東京工業大学の福島孝典教授により見出されたベンゼン環が 120 度の角度で配列した剛直分子であるトリプチセン分子内の一つの面に対して異なる機能団を導入したヤヌス型トリプチセンで，トリプチセン部位が入れ子状に充填した層と長鎖アルキル基の層からなる層状構造を形成することが可能である[4-16]。 分子自己集合体の形態を制御し高密度に集積化すると物質に機能を付与することができる。

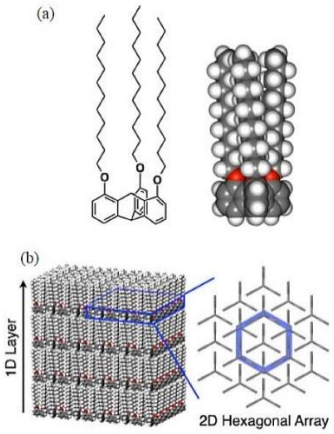


図 4-26 ヤヌス型トリプチセン($TripC_{12}$) [4-12]

このヤヌス型トリプチセンのプラズマエッチングプロセスのマスク材料としての応用を考えると，プラズマエッチング特性を評価しておくことは重要である。そこで，抵抗加熱型真空蒸着法により GaAs 基板上に成膜した $TripC_{12}$ を用いた試料を用いて塩素プラズマ耐性について実験を行った。エッチングには ICP エッチング装置を用いた。図 4-27 に，$TripC_{12}$，GaAs，Si，SiO_2，ナノインプリントレジスト mrI8300 のエッチングレートの Cl_2 流量依存性を示す。この結果から，$TripC_{12}$ には SiO_2 に近い塩素プラズマ耐性があり，GaAs および Si の塩素プラズマエッチングのマスクとして使用可能であることがわかった。

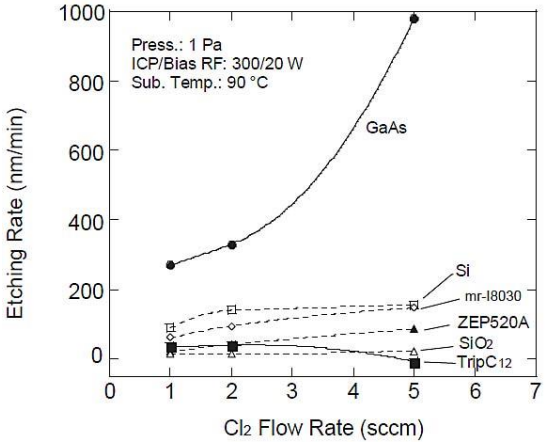


図 4-27　$TripC_{12}$，GaAs，Si，SiO_2，mrI8300 のエッチングレートの Cl_2 流量依存性 [Matsutani, 2016, 2015]

図 4-28 に，$TripC_{12}$ をマスクとして用いて Cl_2-ICP エッチングを行った GaAs 基板の SEM 写真を示す。$TripC_{12}$ の良好な塩素プラズマ耐性により GaAs のエッチングが可能であることが明らかとなった。

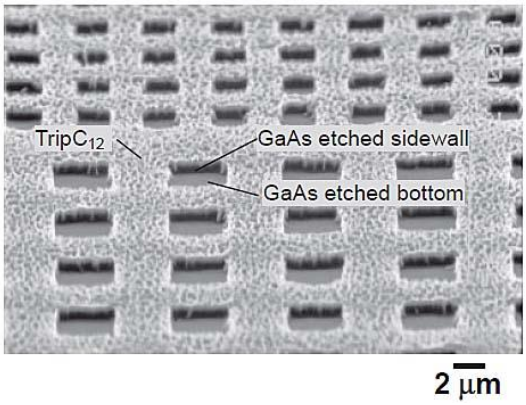


図 4-28　$TripC_{12}$ をマスクとして Cl_2-ICP エッチングした GaAs 基板の SEM 写真 [Matsutani, 2016, 2015]

これらの実験により，$TripC_{12}$ は，プロセス条件の最適化により化合物半導体の光デバイスや電子デバイスの製作に有効なレジスト材料として応用が期待され，新材料のプラズマエッチング応用技術の開発に貢献した。

本技術開発の結果は以下のように応用物理学会等で発表し，Japanese Journal of Applied Physics 誌に掲載された。

Akihiro Matsutani, Fumitaka Ishiwari, Yoshiaki Shoji, Takashi Kajitani, Takuya Uehara, Masaru Nakagawa, Takanori Fukushima, “Chlorine -based inductively coupled plasma etching of GaAs wafer using tripodal paraffinic triptycene as an etching resist mask,” Japanese Journal of Applied Physics, vol. 55 (2016) p. 06GL01.

A. Matsutani, F. Ishiwari, Y. Shoji, T. Uehara, M. Naagawa, and T. Fukushima, “Chlorine-Based Inductively Coupled Plasma Etching of GaAs Using Tripodal Paraffinic Triptycene ($TripC_{12}$) as a Nanoimprint Resist Mask,” 28th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC2015), 13P-11-70, Toyama, Japan (Nov. 13, 2015).

松谷晃宏，石割文崇，庄子良晃，上原卓也，中川勝，福島孝典，”Cl2-誘導結合型プラズマエッチングにおけるヤヌス型トリプチセンTripC12 のエッチング特性の評価”，2014年 第75回応用物理学会秋季学術講演会，19a-PA1-2（2014年9月19日，北海道大学）

参考文献

[4-12] Y. Shoji, N. Seiki, F. Ishiwari, T. Kajitani, T. Someya, and T. Fukushima, Polym. Prepr. Jpn. 62 (2013) pp. 3063–3064.

4.3 XeF_2・Ar/F_2のプラズマ処理・エッチングとデバイス製作への貢献

4.3.1 Ar/F_2プラズマ処理によるグラフェンのフッ素修飾への貢献

半金属のグラフェンの表面にフッ素を付加することで，局在状態[4-13] や，バンドギャップを持つ絶縁体[4-14] へと電子構造を変化させることができる。東京工業大学の波多野睦子教授のグラフェンの電子構造を系統的に制御してフッ化グラフェンのデバイス応用を目指した研究に，反応性イオンエッチング（RIE）装置を用いたグラフェンのフッ化処理の技術開発の観点から貢献した。フッ化グラフェンは，図 4-29 に示すように，sp^2 結合であるグラフェンにフッ素を付加することにより sp^3 結合構造に変化させる。グラフェン試料は機械的剥離法によって SiO_2/Si 基板上に作製した。

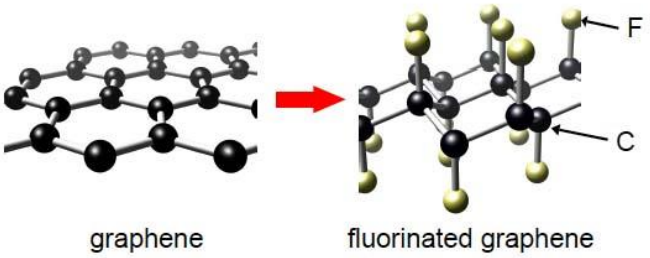


図 4-29　グラフェン（左）とフッ化グラフェン（右）[田原，2012]

フッ化処理は図 4-30 に示す RIE 装置を用いて行った。ここでの工夫は，グラフェンに直接イオンが当たらないように，スペーサーを用いて裏返しに基板を置いて，加速されたイオンの衝突ではなくラジカルによる化学反応を支配的にしてグラフェンへのダメージを抑制することにある。プラズマの放電条件は，Ar/F_2=90/10%の混合ガスを用いて RF 電力を 25 W，プロセス圧力を 0.1 Torr とした。

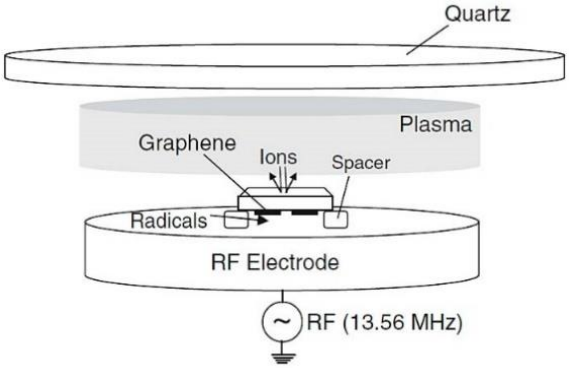


図 4-30　グラフェンのフッ化処理に用いた RIE 装置の概略図[Matsutani, 2013]

図 4-31 に，未処理および 30 秒，60 秒処理後の単層グラフェンのラマンスペクトルを示す。未処理のグラフェンでは D ピークは観測されなかった。2D ピークは G ピークの 2 倍程度の強度であった。30 秒のプラズマ処理後では，D，D’ ピークが観測され，2D ピークの強度が小さくなった。これはフッ素修飾部がグラフェン格子に対して点欠陥となるためである。また，60 秒のプラズマ処理後には各ピークの半値幅増大と，D，2D ピークの強度の減少が見られた。これは，プラズマ処理前のハニカム構造がより大きく乱れていることに対応する。言い換えれば，より多くのフッ素が付加されていることを示している。

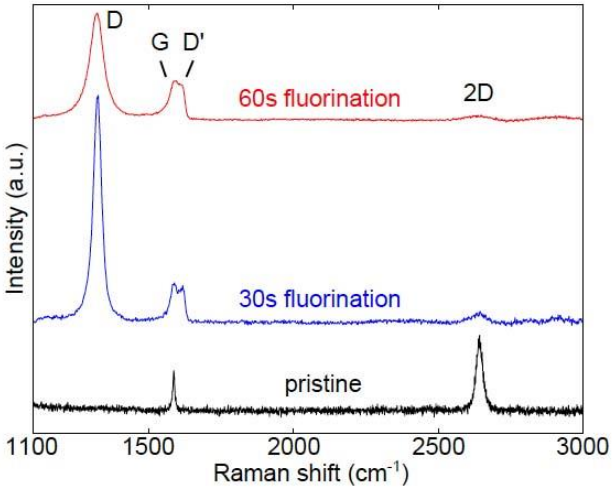


図 4-31 未処理および 30 秒，60 秒処理後の単層グラフェンのラマンスペクトル［田原，2012］

したがって，本方法は反応時間によって付加するフッ素の量を制御可能であり，グラフェンの電子構造の系統的な制御に有効であるといえる。

本技術開発の結果は，応用物理学会に共著で報告され，Applied Physics Letters 誌や Japanese Journal of Applied Physics 誌にも掲載された。

Kosuke Tahara, Takayuki Iwasaki, Satoko Furuyama, Akihiro Matsutani, and Mutsuko Hatano, "Asymmetric transport property of fluorinated graphene," APPLIED PHYSICS LETTERS, vol. 103 (2013) p. 143106 (4 pages).

Akihiro Matsutani, Kosuke Tahara, Takayuki Iwasaki, Mutsuko Hatano," Fluorination of Graphene by Reactive Ion Etching System Using Ar/F_2 Plasma," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 52 (2013) p. 06GD11.

田原康佐，岩崎孝之，松谷晃宏，波多野睦子，"Ar/F_2 プラズマによるフッ化グラフェンの作製"，2012 年春季第 59 回応用物理学関係連合講演会，17p-A3-12,（2012 年 3 月早稲田大学）

田原康佐，岩崎孝之，松谷晃宏，古山聡子，大野恭秀，松本和彦，波多野睦子，"フッ化グラフェンのキャリア輸送特性"，2012 年秋季第 73 回応用物理学会学術講演会，12p-E3-16，（2012 年 9 月愛媛大学・松山大学）

田原康佐，岩崎孝之，古山聡子，松谷晃宏，波多野睦子，"フッ化グラフェンFETの温度特性"，2013年第60回応用物理学会春季学術講演会，28a-G10-8 （2013年3月28日神奈川工科大学）

古山聡子，田原康佐，岩崎孝之，松谷晃宏，波多野睦子，"イオン液体ゲートを用いたフッ化グラフェン電界効果トランジスタ"，2013年第60回応用物理学会春季学術講演会，28a-G10-9（2013年3月28日神奈川工科大学）

田原康佐，岩崎孝之，松谷晃宏，山口智弘，石橋幸治，波多野睦子，"フッ化グラフェンの磁気抵抗効果"，2013年 第74回応用物理学会秋季学術講演会，18a-B1-3，（2013年9月18日，同志社大学）

参考文献

[4-13] Hong, X. et al., Phys. Rev. B 83, 085410 (2011).

[4-14] Nair, R. R. et al., Small 6, 2877 (2010).

4.3.2 XeF_2エッチングによるメンブレン構造の形成とボロメータ製作への貢献

ドライエッチングはプラズマエッチングが主流であるが，XeF_2 を用いるとプラズマ無しでも発熱反応でフッ化 Si が生成され，気相（ガス）のみで Si をエッチングすることが可能である。XeF_2 は常温で蒸気圧が約 500 Pa の固体である。図 4-32 に，自作の XeF_2 エッチング装置の概略図を示す。反応容器はステンレス製で真空ポンプはロータリーポンプのみで，N_2 の回転パージを利用して反応容器内の残留水分を除去する。専用のマスフローコントローラをメーカーに開発してもらい搭載している。

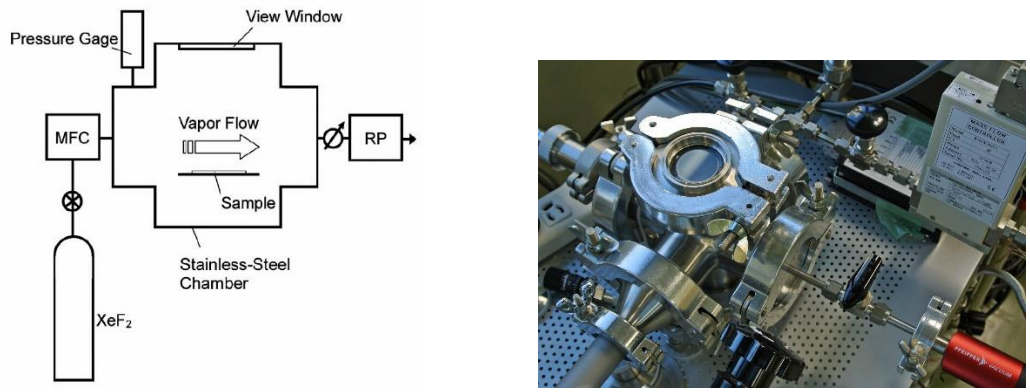


図 4-32 自作 XeF_2 エッチング装置の概略図

Si 基板にポジ型電子線レジストを塗布し，電子ビーム露光で様々な開口を設けて XeF_2 でエッチングすると，図 4-33 に示すように，開口寸法に応じたエッチング深さとなることがわかった。気相の XeF_2 のエッチングは化学反応のみで進行するので，断面 SEM 像でわかるようにエッチング形状は等方的形状となる。このエッチングを利用すると，Si 基板上に成膜された材料をメンブレン化することが可能となる。

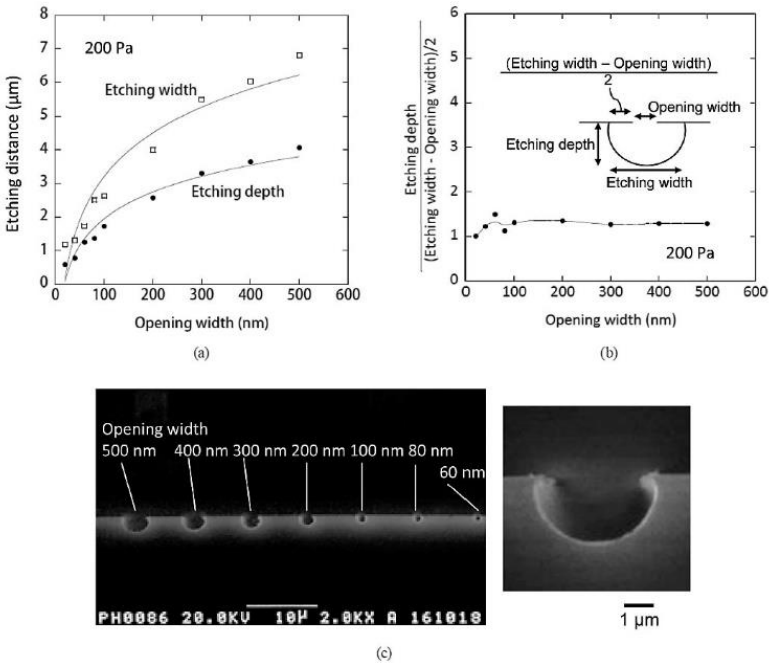


図 4-33(a)開口幅と XeF_2 エッチングの深さの関係，(b)その深さと開口幅の比および(c)断面 SEM 像［Matsutani, 2019］

防衛大学校の内田貴司教授は，THz 帯で動作する高感度な検出器として $Si_3N_4/SiO_2/Si$ メンブレン上のアンテナ結合型 VO_x マイクロボロメータ素子を有機金属分解（MOD）法

により実現することを目指していた。そこで，Deep-RIE と XeF_2 気相エッチングによる $Si_3N_4/SiO_2/Si$ メンブレンの製作方法を提案し， $Si_3N_4/SiO_2/Si$ 基板および $Si_3N_4/SiO_2/Si$ メンブレン上へ VOx マイクロボロメータの製作に貢献した。

ボロメータの検出感度は DC 感度(Sd)に比例し，Sd は，抵抗温度係数(TCR)に比例し，基板の熱コンダクタンス(Gs)に反比例する。したがって，ボロメータの検出感度を向上させるためには，高い TCR をもつ VOx 薄膜を用い，低い熱コンダクタンスを有するメンブレン構造を導入することが有効である。実験では， MOD 溶液(V-02)を用い 2 枚の $Si_3N_4/SiO_2/Si$ 基板上にプリカーサ薄膜を作製し，同薄膜を温度 580 ºC，圧力 1.0 Pa (air)，時間 15 min で本焼成することにより $Si_3N_4/SiO_2/Si$ 基板上に製作した VOx マイクロブリッジの基板裏側から Deep-RIE および XeF_2 による気相エッチングを用いて約 340 μm の Si をエッチングすることにより $Si_3N_4/SiO_2/Si$ メンブレンを製作して，図 4-34 に示すような $Si_3N_4/SiO_2/Si$ メンブレン上の VO_x マイクロボロメータの形成が実現された。

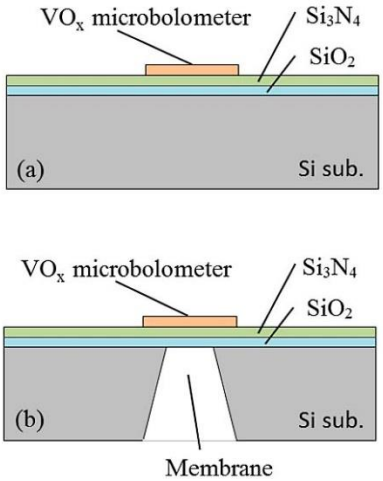
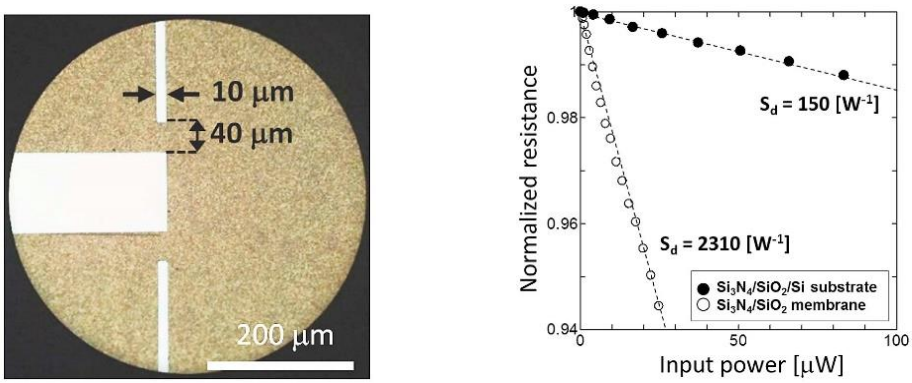


図 4-34　$Si_3N_4/SiO_2/Si$ メンブレン上の VO_x マイクロボロメータの形成 (a)従来法，(b) Deep-RIE および XeF_2 によるエッチングを用いたメンブレン構造［前田, 2018］

図 4-35(a)に製作したデバイスの光学顕微鏡写真を示す。良好なメンブレン構造が製作できたことが分かる。図 4-35(b)に製作した VO_x マイクロボロメータの抵抗とボロメータへ 0.1 ~ 5 μA の直流電流を印加した時の入力電力の関係を示す。この傾きから算出される DC 感度は，メンブレンを導入することにより約 15 倍の DC 感度の向上を得た。この $Si_3N_4/SiO_2/Si$ メンブレン上の VOx マイクロボロメータに薄膜アンテナを結合することにより高感度なアンテナ結合型 VOx ボロメータ検出素子の実現が可能となった。



(a) (b)

図 4-35 (a)製作したデバイスの光学顕微鏡写真, (b)製作した VO_x マイクロボロメータの抵抗と直流電流を印加時の入力電力の関係［前田, 2018］

本技術開発の結果は応用物理学会での発表と電気学会論文誌に掲載され，共著者として貢献した。

前田幸平, Van Nhu Hai, 西岡國生，松谷晃宏，立木隆，内田貴司，“MOD 法により Si_3N4/SiO_2 メンブレン上に製作した VO_x マイクロボロメータの特性評価”, 電気学会論文誌 A, vol. 138 (2018) pp. 471-477.

前田幸平，西岡國生，ヴァン・ニュ ハイ，松谷晃宏，立木隆，内田貴司， “Deep-RIEとXeF2気相エッチングによる$VO_x/Si_3N_4/SiO_2$メンブレンの製作”，第64回応用物理学会春季学術講演会，14p-3 （2017年3月14日，パシフィコ横浜）

前田幸平，ヴァン ニュ ハイ，西岡國生，松谷晃宏，立木隆，内田貴司，“MOD法によりSi_3N_4/SiO_2メンブレン上に製作したVO_xマイクロボロメータのDC感度測定”，第65回応用物理学会春季学術講演会，17p-P2-5 （2018年3月17日，早稲田大学）

4.3.3 XeF_2 を用いたエッチングによるメンブレンダイアフラム構造の形成への貢献

ポリジメチルシロキサン（PDMS）ダイアフラムを，マイクロポンプ，エネルギーハーベスター, 触覚ディスプレイデバイスなどに使用できるスパッタ薄膜永久磁石（TFPM）と統合できるようにする MEMS 製造プロセスが東京工業大学の進士忠彦教授より提案されている。これは，厚さ 300 nm の NdFeB と厚さ 10 nm の Ta を順次堆積させた多層膜からなる厚さ 14.8 μm の TFPM で，その磁気性能は従来のバルク NdFeB 磁石と同程度でありながら小型化できることが特徴である。しかしながら，スパッタリング成膜では PDMS 材料を損傷することなく TFPM を PDMS ダイアフラムに直接堆積させることはできなかった。そこで，まずシリコン基板上に TFPM をスパッタリングし，次にこれを PDMS によるコーティングと XeF_2 ガスを使用してシリコンをエッチングする図 4-36 に示すようなプロセスを試みることとした。前述の自作の XeF_2 によるエッチング技術で試行段階において協

力して進め，機械的および磁気的特性も保持しているメンブレンダイアフラム構造の形成に貢献した。

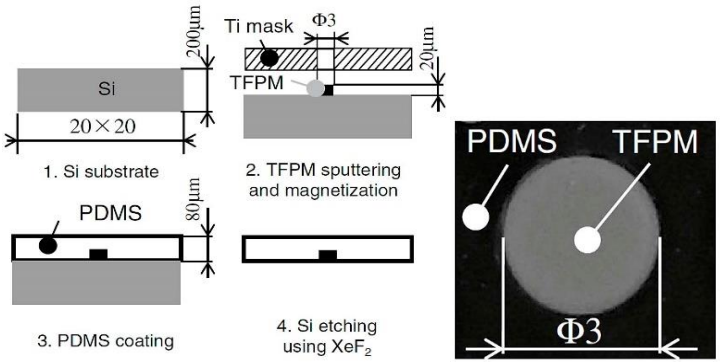


図 4-36　シリコン基板上への TFPM のスパッタリングと PDMS でコーティングと XeF_2 によるシリコンエッチングを用いたメンブレンダイアフラム構造の形成方法［Zhi, 2015］

本技術開発の結果は，以下に示すように，Microsystem Technologies 誌に掲載され，共著者として貢献した。

Chao Zhi, Tadahiko Shinshi, Minoru Uehara, Akihiro Matsutani, Isamu Yuito, Teruaki Takeuchi., “A Polydimethylsiloxane diaphragm integrated with a sputtered thin film NdFeB magnet,” MICROSYST TECHNOL, Springer, Vol. 21 (2015) pp. 675-681.

4.4 半導体微細加工技術の単一細胞分離技術への展開

細胞の研究では，同じ培養でも各細胞が大きな不均一性を示すため，単一細胞を操作する方法の需要が最近増加している。従来の生化学的手法，すなわちバルク分析では，多数の細胞から得られた平均値しか得られず，細菌細胞などの小細胞の単細胞解析には，液体の供給と循環機能を備えた簡便で優れた単細胞分離技術が必要とされている。そこで，細胞分離のチップとして一般的なウェル（井戸）構造では実現が難しい通液機構を，図 4-37 に示すようなマイクロピラーで囲う構造を製作することにより解決し，マイクロメートルサイズの微生物細胞の単一分離を可能にするバイオチップを開発した。このデバイスの特徴は，半導体プロセス技術（リソグラフィとプラズマエッチング）を用いて細胞の分析の目的に応じて最適な材料の基板上に，通液可能な開口領域を有する側壁部で包囲された囲いを作製することによって，単一細胞の分離を効率よく行うことができることにある。

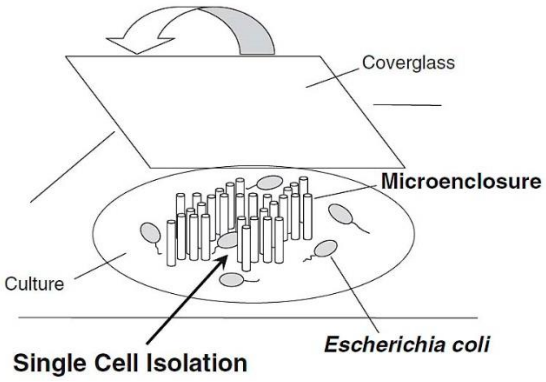
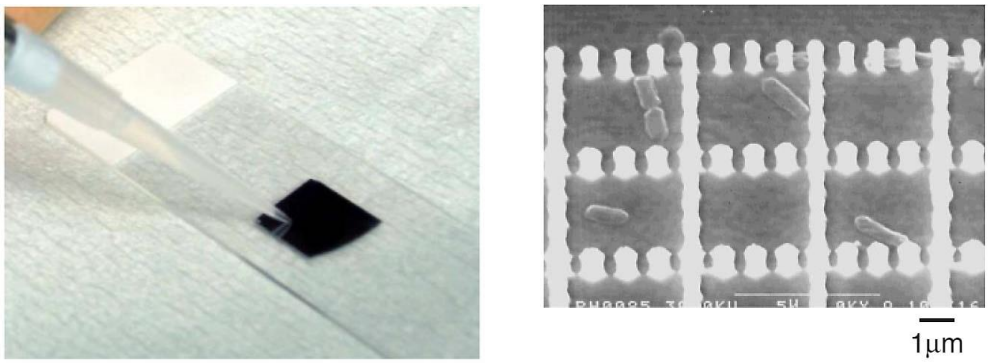


図 4-37　マイクロピラー構造による単一細胞分離用マイクロ囲いの概念図［Matsutani, 2010］

この構造をマイクロ囲い（microenclosure）と命名し，このアレイを用いた細菌の単細胞分離のための新しい技術を実証した。単一細胞を捕獲するためのマイクロピラー構造を設計し，電子ビームリソグラフィーと反応性イオンエッチングプロセスを使用して，半導体ウエハ上にマイクロ囲いアレイを作製した。図 4-38(a)に細胞懸濁液の滴下の様子を示す。図 4-38(b)に，マイクロ囲いに捕獲された大腸菌の単一細胞分離の SEM 画像を示す。単一の大腸菌が各マイクロ囲いに捕獲されたことがわかる。



(a)　　(b)

図 4-38　(a)細胞懸濁液の滴下の様子，(b)マイクロ囲いによる大腸菌の単一細胞分離の SEM 像　［Matsutani, 2010］

マイクロ囲いの大きさを変えて系統的に実験したところ，図 4-39 に示すように，最も効率的に大腸菌の単一細胞分離に成功したマイクロ囲いは 4×4 μm^2 の構造で，約 50%の確率で単一細胞分離が可能であった。

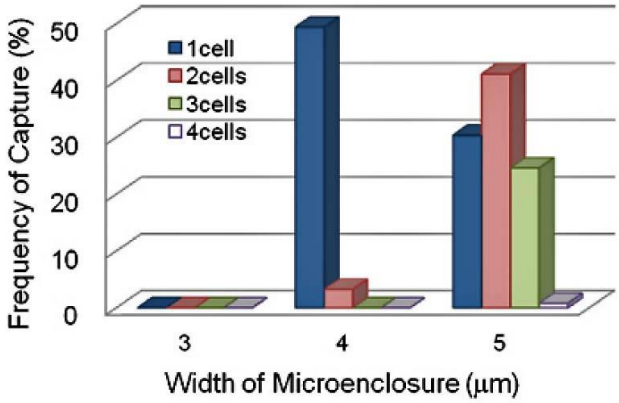
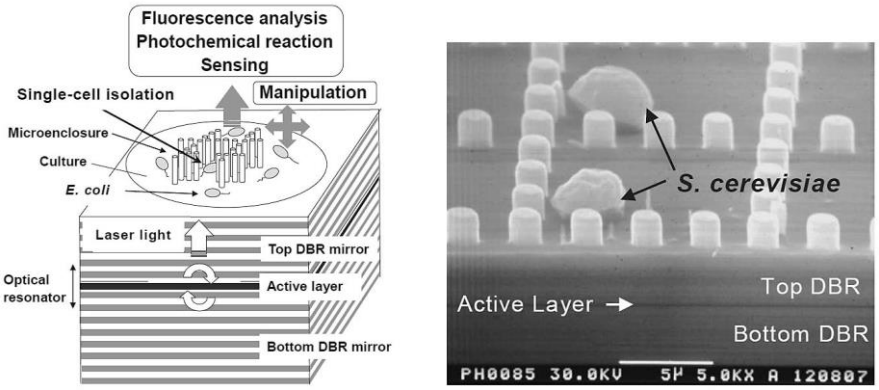


図 4-39　マイクロ囲いのサイズと大腸菌の単一分離の確率［Matsutani, 2010］

この単一細胞分離バイオチップは，微生物の検出と分析に非常に役立つと考えている。この方法を用いれば，細菌細胞のコンビナトリアル合成や分析，電気デバイスや光学デバイスの細胞半導体間のインターフェースなど，バイオチップ開発へのいくつかの種類のアプリケーションが生まれると思われる。マイクロ囲いでは培地の液体がより容易に移動するために，酵母細胞の培養にも成功している。また，O_2 プラズマ処理において，マイクロ囲いに捕捉された各菌体の大きさの変化を観察することにも成功した。また，図 4-40(a)および(b)に示すように， VCSEL 上での単一細胞分離技術も可能と考えられ，単一細胞の蛍光分析または光化学反応，センシングデバイスや細胞操作への応用も期待できる。



(a)　　(b)

図 4-40　(a)VCSEL 上での単一細胞分離技術の応用，(b)VCSEL 基板上に製作されたマイクロ囲いによる酵母の単一細胞分離の SEM 像［Matsutani, 2015］

本技術開発は新技術に相当するため，発明届を提出し東京工業大学から特許出願され，特許第 5622189 号「単一細胞分離用プレート」として 2014 年 10 月に登録された。本特許は，International Journal of Molecular Science 誌の論文"Technologies for Single-Cell Isolation"（doi:10.3390/ijms160816897）に，Patents of single-cell isolation technologies

identified in the worldwide database of the European Patent Office（欧州特許庁の世界規模のデータベースで特定された単一細胞分離技術の特許） として日本から唯一引用されているものである。また，本技術は，科研費採択（基盤研究（C）23510141，研究代表者・松谷晃宏，連携研究者・高田綾子）によるコラボレーションの成果であり，技術部（当時）の部門間での分野融合的な技術開発を技術職員のみで実現した成果としての特色も備えている。

また，ここで提案したデバイス構造は，リソグラフィのみによる方法やレプリカ法と組み合わせた製作方法も開発し，2022 年度からは，共用クリーンルームの利用研究室の大腸菌研究における分離構造や生物細胞の分析に応用されており，その成果が期待される。本技術の開発は以下の学術雑誌にも掲載されている。

Akihiro Matsutani, Ayako Takada, “High-frequency single-cell isolation of bacteria using microenclosure array,” Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 49 (2010) p. 127201.

Akihiro Matsutani, Ayako Takada, “Microfabrication of Si and GaAs by Plasma Etching Process Using Bacterial Cells as an Etching Mask Material,” Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 51 (2012) p. 087001.

Akihiro Matsutani, Ayako Takada, “Fabrication of Silicon Microchannel for Transport of Bacterial Cells by Ar/F_2 Vapor Etching Process,” Japanese Journal of Applied Physics, vol. 52 (2013) p. 047001.

Akihiro Matsutani, Ayako Takada, “Single-Cell Isolation and Size Sieving Using Microenclosure Array for Microbial Analysis,” Sensors and Materials, vol. 27 (2015) pp. 383-390.

Akihiro Matsutani, Ayako Takada, “Microchannel-free collection and single-cell isolation of yeast cells in a suspension using liquid standing wave, “Japanese Journal of Applied Physics, vol. 55 (2016) p. 118006.

Akihiro Matsutani, Ayako Takada,” Celluloid Microenclosure and Microlens Array Fabricated by Suzuki's Universal Microprinting Method and XeF2 Vapor Etching for Microbial Analysis,” Sensors and Materials, vol. 30 (2018) pp. 149-155.

A. Matsutani, “Direct observation of spherical aberration under microscope using concave micromirrors,” Eur. J. Phys., Institute of Physics, Vol. 41 (2020) 055303(8pp).

第５章　研究支援部門の運営と高度技術系専門職人材養成

この章では，オープンファシリティセンターマイクロプロセス部門の運営と高度技術系専門職人材養成，TC カレッジ・マイクロプロセスコースへの展開について述べる。

5.1 マイクロプロセス部門の運営

5.1.1 マイクロプロセス部門の運営の考え方

東京工業大学では法人化時点より技術職員は技術部に集約され，現在はオープンファシリティセンターを組織している。ここでは技術部時代と現在のオープンファシリティセンターのマイクロプロセス部門における高度技術系専門職人材育成としての技術職員養成の取組みについて述べる。マイクロプロセス部門は，2008 年度に技術部半導体ＭＥＭＳ支援センターとして発足し，「半導体プロセスによる集積システム及び MEMS 開発支援」を主な業務とする技術職員 5 名で構成される研究支援部門であり（本学規則による），プロセス技術および関連材料の分析などを行っている。核となる技術は，真空技術・プラズマプロセス技術・電子線技術である。新しいデバイス研究の進展には従来技術だけでなく，新たな技術開発による支援が必要であるため，従来技術や基盤技術からの研究支援に加えて，新技術や技術開発による研究支援を行っている。研究がすくすく成長するように肥料と水やりで支援するイメージである。このようなコンセプトのもとに，図 5-1 に示すような研究と研究支援のポジティブなループを形成することにより，大学の研究の発展及び研究力向上に寄与する考えである。

このような，組織の運営には，リーダーとフォローワーが役割分担と協力体制を構築してチームとして運営することが重要である。マイクロプロセス部門の組織の運営は，リーダーとフォローワーが，どちらが偉いという事ではなく，それぞれの役割を意識して，互いに協力して運営することが重要である。大学のような組織では専制君主型の統率は不適で，目的の共有と自発性による統率の形態が望ましい。したがって，リーダーの立場の者はビジョンを提示して目的や情報を共有し，構成員間の風通しをよくし，信頼関係を基礎にして部門を運営することが必要である。

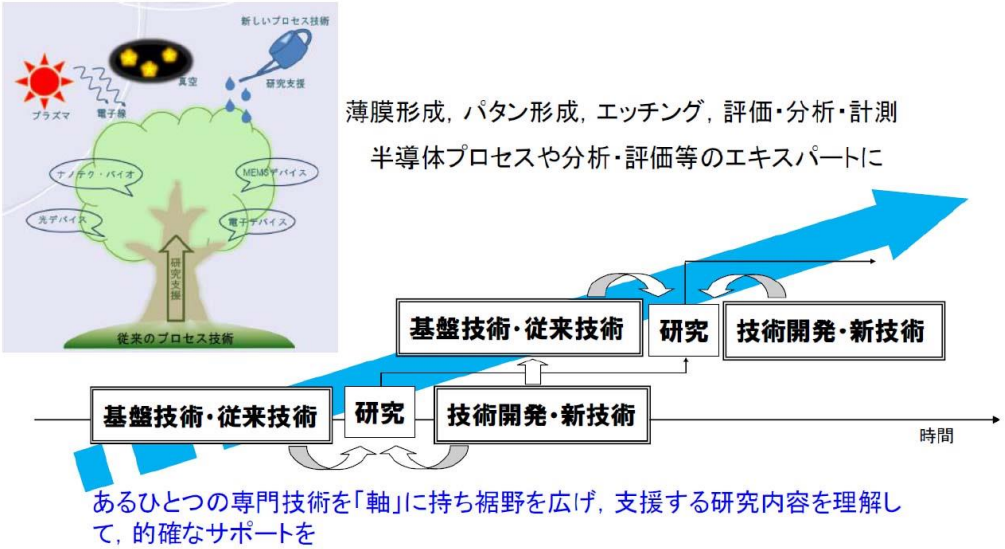


図 5-1 マイクロプロセス部門の研究と研究支援のポジティブなループ形成の概念

5.1.2 研究支援の形態

マイクロプロセス部門では，図 5-2 に示すように，「共通施設の装置の担当」と「研究室からの研究支援依頼に基づく業務」の両面から研究支援を行っている。「共通施設の装置の担当」では，系・学院・研究所などの共通施設あるいは共同で運営している実験装置，研究室に設置されている学内共同設備の実験装置を担当するという形態で研究支援を行っている。担当内容としては，当該実験装置を用いた測定，分析，試料製作，学生への指導・講習，基本特性に関する実験，メンテナンスなどを行っている。「研究室からの研究支援依頼に基づく業務」では，各研究室で取り組んでいる研究に専門技術の観点から関与し，研究実験の実施，技術開発，技術相談，実験の指導，実験装置のメンテナンス，装置の設計などを行っている。研究支援対象は全学あるいは学外の研究室である。

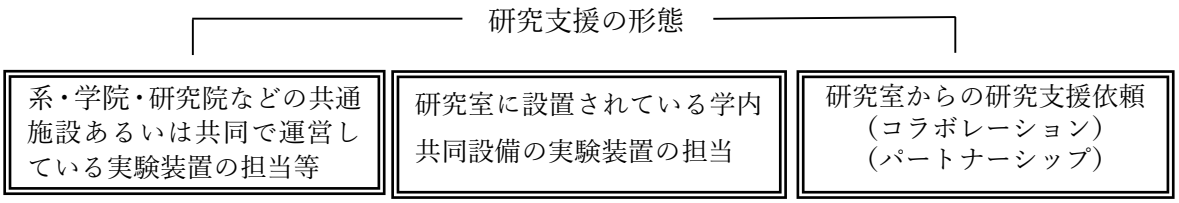


図 5-2　東京工業大学オープンファシリティセンターマイクロプロセス部門の研究支援

5.2 高度技術系専門職人材養成

5.2.1 テクニカルレポート・論文紹介

第 3 章で述べたように，既存の装置の改造，装置の自作も必要となるので，機器の単なる管理保守だけではなく，専門技術と工夫で勝負する必要がある。このためには，「技術力」

「行動力」「知識力」で研究支援することが重要である。若手職員には，図 5-3 に示すような知識力・技術力・行動力についてバランスよく成長してもらい，将来は自らが研究支援先を探す（頼りにされる）力をもつことを期待している。支援先とよい関係を築けば，お互いにプラスになるようにさらに幅が広がることになる。これらの力は一朝一夕に身に付くものではなく，10 年超のスパンの計画でシステマティックに養成することが望ましい。

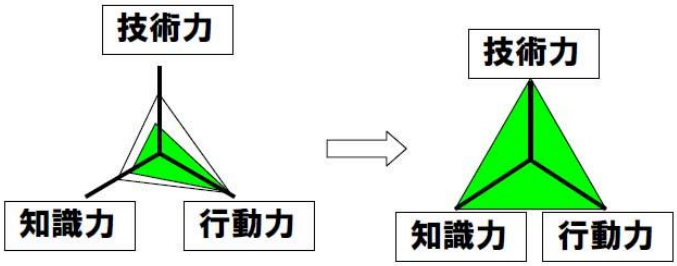


図 5-3　若手職員に期待する知識力・技術力・行動力の成長モデル

このためには，各職員を高度技術系専門職人材とするために，様々な仕組みを用意する必要がある。マイクロプロセス部門では，各自が管理運営を担当する装置群を核とする技術課題を自ら設定して取り組んでいる。マイクロプロセス部門では，標準勤務時間帯の空き時間は業務の一部として，各自の勉強や技術情報収集に充てることにしており，これにより勤務時間中の空き時間という概念はなくなる。また，月に 2 回の部門会議時に論文紹介を輪番制で担当，4 半期に一度テクニカルレポート（1 件につき A4 版 2 ～4 ページ）の報告会を開催して，プレゼンテーションして情報共有するとともに，職員間の討論・助言等で，知識力・技術力・発表力を養成している。テクニカルレポートは図 5-4 に示すように，技術報告（年報）として発行し，ノウハウの共有の目的で技術情報を利用者へフィードバックしている。テクニカルレポートは，部門発足時から 15 年を経過した現在の時点で 250 報を超えている。利用者は，これらのテクニカルレポートに掲載されたデータを参考にして自分自身の実験に最適な条件の考察などに活用している。この年報とテクニカルレポートは，マイクロプロセス部門の職員の日々の努力結晶である。

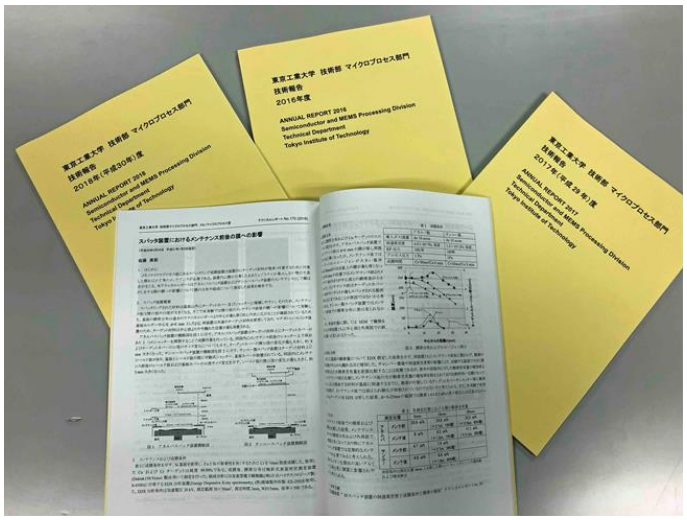


図 5-4　マイクロプロセス部門の技術報告（年報）

さらに，研修や出張についても，年度初めに行き先や人員を確定させ，新人については日本真空学会の真空夏季大学（4 日）を義務としている。学会または技術研究会での年 1 回発表も義務としている。また，応用物理学会には全員入会して講演会に参加や発表，半導体，バイオ，ナノテクの展示会にも全員参加して情報収集して会議報告，その他必要とされるセミナー・学会・研究会にも出席可としている。これらの会合に参加した後は会議報告を作成して，部門会議の機会に発表と情報共有・意見交換を行う。これらにより，最先端技術情報の取得とニーズの調査が可能である。

東京工業大学では，技術職員のうち博士の学位がある者は科学研究費（基盤研究など）に応募が可能である。博士の学位の無いものは科学研究費（奨励研究）に応募することができる。マイクロプロセス部門では，科研費への応募を義務としている。応募することで，作文の訓練，自身の仕事の整理，将来構想，実験計画の訓練，先行研究の調査などの力を養成できる。

このような人材養成の結果，作文力・プレゼンテーション力も身に付き，研究支援先の教員と　高度技術系専門職人材として円滑な会話が可能となり最先端研究への貢献も可能となる。そうすると，継続した貢献の結果は共著としても現れ，大学の研究力向上に帰することになる。これらの取り組みの結果として，部門発足当初から数えて 10 年で約 300 件余の学会・論文発表に自著共著として貢献している。また，学内の多くの教員，研究室とコラボレーションできることは，広範囲な貢献ができるということであり，モチベーション向上にも有効である。さらに，様々な研究領域の「ハブ」として機能させる部門を運営して得られた成果を利用者へ全て還元すれば，だれにとっても良いことしかないわけである。

5.2.2 成果発表の重要性

研究に貢献した技術開発の成果発表は重要である。国立大学に勤務する者は，国民の税金

で業務に従事しており，その成果は社会に還元の必要があることは自明である。国立大学の研究で用いられている実験装置は個人で購入できるものは無く，貴重な税金を原資として購入された物である。技術職員は，これらの実験装置を「専門家として」使う機会を与えられているわけである。そう考えると，何としても新しい知見を得て，世の中に還元することが必要である。研究に関与する国立大学の職員としてのその手段は，論文・学会発表，アウトリーチ活動などがあげられよう。成果をアウトプットすると，それを見た人が声をかけてくれるので，分野融合・共同実験のチャンスが生まれる。それにより，それを元に新たな研究や技術開発が始まりその成果を公開する。公開された情報を見た研究者がまた声をかけて新たな研究が発展してゆく。このプロセスを通して，技術職員側にも経験が蓄積され，新たな成果の創成への技術力が蓄えられ，成果発表すれば信頼度がアップすることになるので研究者との協働も円滑になる。つまり，図 5-5 に示すようなポジティブなループが形成されて，その結果，我が国の研究力の向上につながるわけである。最近の著者が技術職員のみの当部門の成果発表は，2020 年度で論文 2 件，学会発表 2 件，技術研究会 4 件，　2021 年度は論文 1 件，学会発表 5 件，技術研究会 2 件である。自作の装置を使った成果も発表できているのは研究支援の好事例と考えている。

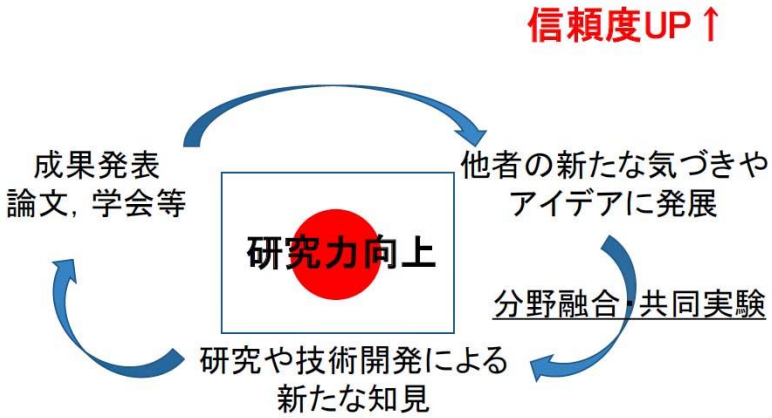


図 5-5 成果発表によるポジティブなループ形成

図 5-6 に第 3 章で述べたフッ素プラズマ処理による研究成果への貢献事例を示す。民間企業から東京工業大学に着任した教授が，「海外の文献に XeF_2 でグラフェンをフッ素修飾した事例があるので，それを実施したい。これまでに XeF_2 に関する論文を書いているようなので，そちらで実施可能か」との相談を受けた。当部門では，「経験はあるので実施したい。アイデアの提供も含むので研究倫理の観点から成果発表の際はオーサーシップに配慮して欲しい」と回答し，先方も快く了承した。実験してみると，先行研究のとおりには再現できなかったので，経験のある Ar/F_2 プラズマを用いた実験を提案し，先方の了解のもとに実施した。その結果，目的とするフッ素修飾が実現され，その技術を提供することにより，先方の研究室側ではデバイス特性の論文を学術誌に投稿して掲載に至った。プロセス技術

についても新規性があったため部門側で論文化して学術誌へ掲載され，研究成果の創出に貢献することができた。この事例では，実際に手を動かして実験したのは学生と部門の技術職員で共同作業であった。成果発表が発端となって，研究室サイドと共同で取り組むことにより研究成果創出への貢献を果たした。

図 5-6 フッ素プラズマ処理による研究成果への貢献事例

5.2.3 チーム型の研究協力と研究成果創出への On the Job Training の活用

OJT とは On the Job Training の略である。実際の仕事を通して指導して，知識や技術などを身に付けさせる教育方法のことを指す。OJT は第一次世界大戦中にアメリカで，造船所での大幅に人員増の必要性から，大量の人材を早く教育する方法として 4 段階職業指導法が職場における実地訓練が考案された。これは「やってみせる（Show）」「説明する（Tell）」「やらせてみる（Do）」「確認，追加指導（Check）」からなるものである。高度成長期に日本に輸入されて現在の OJT へと発展した。「やってみせ，言って聞かせて，させてみせ，ほめてやらねば，人は動かじ。 話し合い，耳を傾け，承認し，任せてやらねば，人は育たず。やっている，姿を感謝で見守って，信頼せねば，人は実らず。」とのよく知られた言も同様の内容である。

図 5-7 に，OJT を活用して TiO_2 のドライエッチングの光デバイスへの研究成果への貢献

事例を示す。他大学から東京工業大学に着任した准教授が，「TiO_2基板の微細加工によりフォトニック結晶を製作したい。アスペクトの比大きい構造になるが実施可能か」との相談を受けた。当部門では，「世の中にその技術はまだないのでぜひ挑戦したい。アイデアの提供も含むので研究倫理の観点から成果発表の際はオーサーシップに配慮して欲しい」と回答し，先方も快く了承した。TiO_2 のドライエッチングについては経験があるので，その応用例として実験してみると，目的とする構造が得られるプロセス技術を実現できた。このプロセス技術は新規性があったため部門側で論文化して学術誌へ投稿し 2012 年に掲載された。その技術を提供することにより，先方の研究室側ではデバイス特性の論文を学会発表した。その結果を受けて研究室側より「実は斜めの構造も製作したい」との相談があり，これも経験のある技術の応用例だったので，まずは部門で技術を開発した。実験してみると，目的とする構造が得られるプロセス技術を実現できた。このプロセス技術は新規性があったため部門側で論文化して学術誌へ投稿し 2014 年に掲載された。その技術を提供することにより，先方の研究室側ではデバイス特性の論文を学術誌へ投稿し 2016 年に掲載され研究成果の創出に貢献することができた。この事例でも，実際に手を動かして実験したのは部門の技術職員である。経験のある職員が部門職員の OJT として共同で取り組むことにより，これらの研究成果への貢献を果たした。

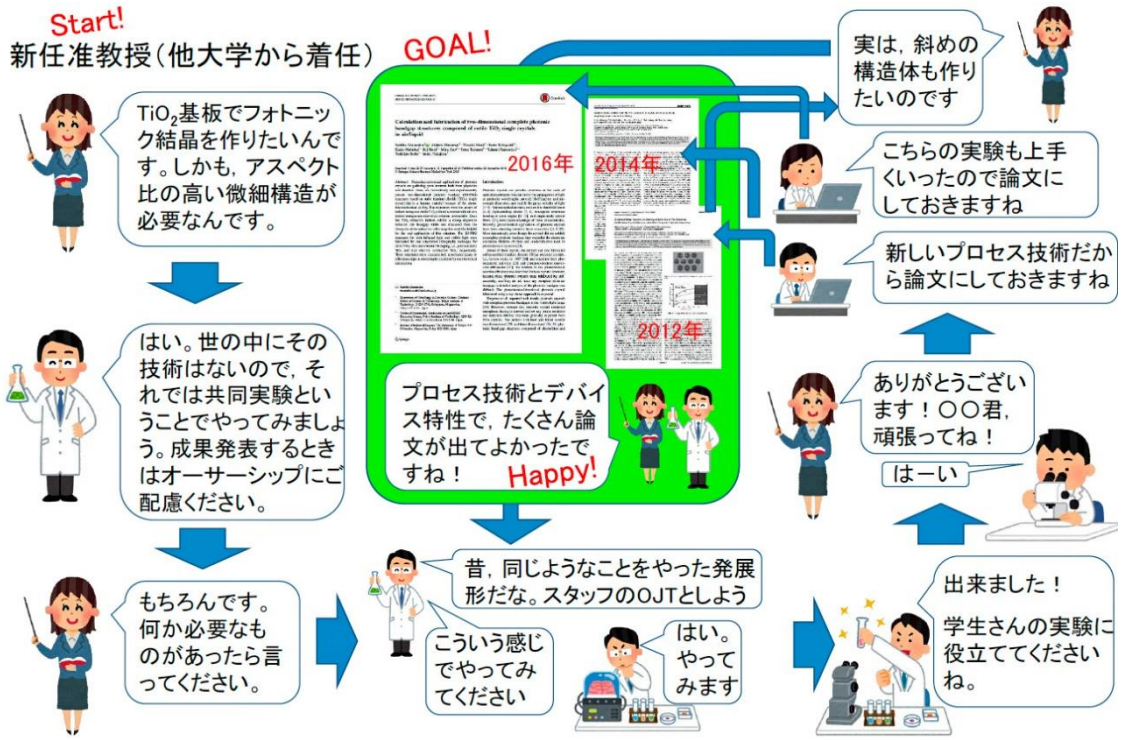


図 5-7　TiO_2 のドライエッチングの光デバイスへの研究成果への貢献事例

図 5-8 に図 5-7 の TiO_2 のドライエッチングの光学素子研究への発展事例を示す。前述した図 5-7 の事例で成果発表した論文を見た他大学の大学院生が「2012 年の論文をみた。日

本国内で一番大きな望遠鏡の光学素子として TiO2 基板の微細加工が必要だが，可能か」との相談を 2019 年に受けた。先方の大学では文部科学省の「ナノテクノロジープラットフォーム」事業が運営されていたため，それらの設備を紹介したところ，経験がないので実施できないとの返事であり，先方の研究室の教員も見学しにきていただき，結果的に科研費の研究分担者として関与することになった。この技術開発には Nb_2O_5 の成膜技術も含まれていたため，当部門職員の成膜担当者とエッチング担当者の OJT として取り組むこととした。実験の結果，光学素子製作の技術を開発でき，先方の学生と共同で実験しながら先方と当部門の双方で成果発表することができ，研究成果の創出に貢献することができた。成果発表が発端となって，研究室サイドと共同で取り組み，OJT として取り組んだ職員も先方の研究成果に共著で載ることとなっている。

このように，OJT を活用して高度専門技術人材を養成すれば，研究成果の創出に貢献しやすいばかりか新たな研究成果創出の機会も芽生え，目的を共有して取り組んだ人材は高度技術系専門職人材としての自信も持てるようになり，技術職員が我が国の研究力向上へ貢献する好循環の要となることが可能となる。

図 5-8　図 5-7 の TiO_2 のドライエッチングの光学素子研究への発展事例

このような研究への貢献は，チーム型の研究あるいは研究支援の好事例となるだろう。上記のプロセス技術開発では，研究室サイドの科学目標達成のために，当部門のチームが一丸となって開発し，新しく開発されたプロセス技術で研究室サイドはデバイス製作を行

い，当部門と研究室のチームで成果発表するということの成功事例である。実は，第 4 章で述べた事例は全て，研究室サイドの研究の目標を共有して技術研究と開発を行った例であり，それらは自然にチーム型研究となっていたわけである。 単一細胞分離のマイクロ囲い構造の開発はシーズ型であるが，現在，これに注目した研究室と共同で新たな細胞観察用チップの製作が始まり，これも目標を共有したチーム型研究の一翼を担うこととなっており，当部門の全ての活動が研究成果の創出に貢献していることになる。マイクロプロセス部門では，チーム型研究を行う際に研究支援側の貢献をスムースにするために，図 5-9 に示す研究教育支援依頼書を用意している。共用クリーンルームの単なる設備の利用を超えて，研究室側と共同で研究目標を達成する場合にはこのような文書で研究倫理に基づくオーサーシップについて確認しておくことは，双方が気持ちよく協働するために必要なことである。研究・研究支援開始時点で明確にしておくことで無用なトラブルを回避することもできる。

年　月　日

オープンファシリティセンター　マイクロプロセス部門長　殿

研究教育支援依頼書

依頼者
所属　：
職・氏名　　㊞

下記の通り研究教育支援業務を依頼します。

業務内容:

依頼期間:　　年　月　日～　　年　月　日

業務担当者: 部門長及び各装置担当者

備考:
　包括的に依頼しますが，各依頼は大学院生等から適宜行います。
　特に変更がない場合は来年度も継続します。

※オープンファシリティセンター　マイクロプロセス部門よりお願い
　論文や学会発表等で研究成果をご発表の際にはオーサーシップにご配慮いただくようお願い申し上げます。

※部門記入欄
承認日　　年　　月　　日
オープンファシリティセンター
マイクロプロセス部門
部門長 松 谷 晃 宏

図 5-9 マイクロプロセス部門の研究教育支援依頼書

5.3 TC カレッジ・マイクロプロセスコースへの展開

以上のようなマイクロプロセス部門で取り組んでいた高度技術系専門人材の養成システムの「論文紹介」と「テクニカルレポート」は，2022 年度より開校された東京工業大学 TC カレッジのカリキュラム（「マイクロプロセス講究」と「テクニカルレポート」）として実施することとなった。マイクロプロセス部門の技術領域は，TC カレッジではマイクロプロセスコースに対応する。マイクロプロセスコースの目指すべき TC 像は，「真空技術，電子線技術とプラズマ応用技術を核とした成膜技術，パターン形成，エッチングなどの微細加工プロセスおよび評価・計測により，マイクロ・ナノサイズのデバイス研究にコミットする。MEMS，光デバイス，電子デバイス，バイオ関連分野といった広範囲かつ最先端の研究に対する支援を可能にする高度な知識と技術力を有する。異分野連携研究にも参画し，専門分野であるプロセス技術においては研究の中心的な役割を果たす。これまで培った知識・経験・技術をもとに高度技術系専門職人材を養成するとともに，組織運営にも積極的に取り組む。」こととしている。

テクニカルマスター（TM）の 認定基準は，共著論文（筆頭著者含む），外部資金（科研費等）獲得・技術研究会等発表（自らの発表），論文貢献（謝辞），外部資金（科研費等）応募・受賞・表彰，授業支援，特許・学会等の委員，仕様策定委員または技術審査員，マネジメント経験・資格，真空夏季大学受講（要 4 日），真空ウォーキング受講（要 3 日），プラズマエレクトロニクス講習会受講， MEMS 集中講義受講，学外のプロセス技術実習の受講から必要な単位数の取得による。

マイクロプロセス部門で実施していた高度技術系専門人材の養成システムは，TC カレッジのマイクロプロセスコースのカリキュラムとしても体系化され，我が国の研究力向上の要となる他大学の技術職員を含めて高度技術系専門人材養成に役立つと期待される。

以上の取り組みの成果の一部は，以下の学会にて発表された。

松谷晃宏，佐藤美那，遠西美重，藤本美穂，平野明子，西沢望，進士忠彦，初澤毅，“東京工業大学におけるクリーンルーム統合共用化による組織的研究支援の推進”，研究・イノベーション学会第 34 回年次学術大会，1G09，pp.245-248,（2019 年 10 月 26 日，政策研究大学院大学）

松谷晃宏，“東京工業大学オープンファシリティセンターマイクロプロセス部門の最近の取り組み”，第 22 回令和 3 年度高エネルギー加速器研究機構シンポジウム （2022 年 1 月 21 日，オンライン開催）

第６章　結論と展望

この章では, 本論文の内容, その成果による社会的効果･実施効果, 展望について述べる。

6.1 結論

東京工業大学精密工学研究所の文部技官・技術専門員（1989.11～2007.3）として反応性イオンエッチング（RIE）装置や誘導結合型プラズマ（ICP）を用いたドライエッチング装置，および電子ビーム露光装置などの微細パターン形成装置を中心とした半導体プロセス装置群の維持管理・運用，半導体微細パターンのプロセス支援，大学院学生への技術指導など，高機能な集積フォトニクスデバイスのための研究支援業務を高度技術系専門職人材の技術者として実施した。また，技術部マイクロプロセス部門発足時より（2007.4～現在），管理職員（センター長および部門長）として，コアファシリティとしての設備共用化の先進的な取り組みで好事例ともなったメカノマイクロプロセス室（共用クリーンルーム）の運営・研究支援の中心的な役割を担当した。

東京工業大学に文部技官として着任以来多年にわたり，先端的フォトニクス研究の研究支援業務，特にマイクロナノ加工の研究設備群の保守・管理・運用，学生への技術指導などを担当するほか，文科省が 1995 年度に選定した最初の中核的研究拠点（ＣＯＥ）形成プログラムの「超並列エレクトロニクス」で整備された先端機器装置群の立ち上げと管理・運用に大いに貢献した。具体的には，デバイス製作の上で従来からの課題となっていた化合物半導体材料の微細加工とその光デバイス研究への適用に関する研究支援業務において，特にドライエッチングの高度技術系専門職人材の技術者として技術開発も行いながら課題を解決して，デバイス研究の発展に大いに寄与した。

東京工業大学に技術部が設置された後は，半導体・MEMS 支援センター長（現オープンファシリティセンターマイクロプロセス部門長）として，年会費制で年間約 100 名登録のコアファシリティとしての共用クリーンルームを管理運営している。人材育成の観点からも部門の技術職員の養成に貢献した。部門職員には，基盤的従来技術による研究支援のほかに技術課題の深化に取り組みつつ，研究会や展示会での最新の技術情報で研鑽を積める仕組みを作り，半導体プロセス･評価分析技術の専門家集団の組織として東京工業大学のデバイス研究の発展に大きく寄与している。技術職員の育成の結果は，市中のクリーンルームに比べ格段に安く，かつ「信頼される共用クリーンルーム」の構築，運用に活かされている。また，研究室と部門とのコラボレーションも 40 研究室余におよび，学生の卒業論文・修士論文・博士論文への貢献が大きいほか，これらの研究室の論文・学会発表等のアウトプットにも直接的に貢献している。

面発光レーザなどのフォトニクスデバイス研究支援，特に半導体の微細加工技術の開発，およびデバイス製作への研究支援の結果は，フォトニクス分野に限っても 200 編以上の学術雑誌論文･国際会議論文の共著者として貢献した。これらは当該技術分野の国内外の論文にも多数引用され，日本発の研究開発の成果創出への技術的貢献は大である。面発光レーザを中心とした日本発の独創技術は様々な情報機器に活用され，2000 億円の市場規模に成長

している。

共用クリーンルームを中心とした東京工業大学等の研究室とのコラボレーションについては，グラフェンのフッ素修飾，TiO_2 フォトニック結晶製作プロセス技術の開発，新材料 $TripC_{12}$ のナノインプリント応用，バイオチップ応用などの最先端研究に貢献し，研究開発の成果創出への技術的に大きく貢献した。

以上の成果に対して，令和 2 年度の文部科学大臣表彰研究支援賞を受賞した。また，令和 2 年度の文部科学大臣表彰科学技術賞（研究部門）の福島孝典教授，若手科学者賞の石田忠准教授，令和 3 年度の文部科学大臣表彰若手科学者賞の土方亘准教授，令和 4 年度の文部科学大臣表彰科学技術賞（開発部門）の西迫貴志准教授は，論文発表での共著や共用クリーンルーム（メカノマイクロプロセス室）の利用者であり，マイクロプロセス部門の取り組みや共用クリーンルーム運営による研究支援が我が国の研究力向上に貢献している。

本論文に記述された内容をひと言でまとめると，「研究力向上のための研究支援には研究者としての心構えで臨むことが重要」ということになろう。

6.2 展望

本論文で述べたように，研究者が共用設備の利用者を研究支援するというスタイルが望まれる分野もある。この考え方は，すでに都道府県に置かれている産業技術センターなどでは研究員が利用者を技術支援するという仕組みで四半世紀以上前から実施されており，順調に運営されている。分析会社などでも技術者は同様なスタイルで，技術者本人の資質向上あるいはニーズの把握のために学会発表・活動が奨励されている。大学等でもこの仕組みや運営方法を取り入れれば苦も無く共用設備を運営できるはずであるが，なかなか実現されない。その原因は，教員は研究者，技術職員は研究支援者というステレオタイプ的な見方があるためである。第 1 章で述べたように，研究者と研究支援者は表裏一体であり，研究の場面に応じてどちらの性格も併せ持つものである。そこには，研究目標を達成するという目的のために，プロフェッショナルな誰もが対等な関係で取り組む必要がある。そこには激論が展開されるかもしれないが，それでこそ研究力が向上するというものであろう。

音楽の中で最も高度な体系の一つとされる弦楽四重奏は，図 6-1 に示すように，第 1 ヴァイオリン，第 2 ヴァイオリン，ヴィオラ，チェロの 4 名から構成されるプロフェッショナルな演奏者が対等な関係で演奏される。合奏では内声と呼ばれる第 2 ヴァイオリンやヴィオラが特に重要であることはよく知られている。これと同様に，国立大学での高度な研究では，教員，ＵＲＡ，技術職員，事務職員がそれぞれプロフェッショナルで対等な立場で研究という曲の演奏に臨めば，その美しい調べに自然の女神はきっと振り向いてくれるに違いない。このような調和こそ，我が国の研究力向上に最も必要なことであると考える。

弦楽四重奏をオーケストラに発展させて考えれば，さらにたくさんの楽器ごとにプロフェッショナルな演奏者がチームとなって演奏することになる。オーケストラの指揮者は英

語で conductor という。テクニカルコンダクターも研究を技術開発や共用設備の運営から指揮して，我が国の研究力向上の要としての役割が期待されることになろう。

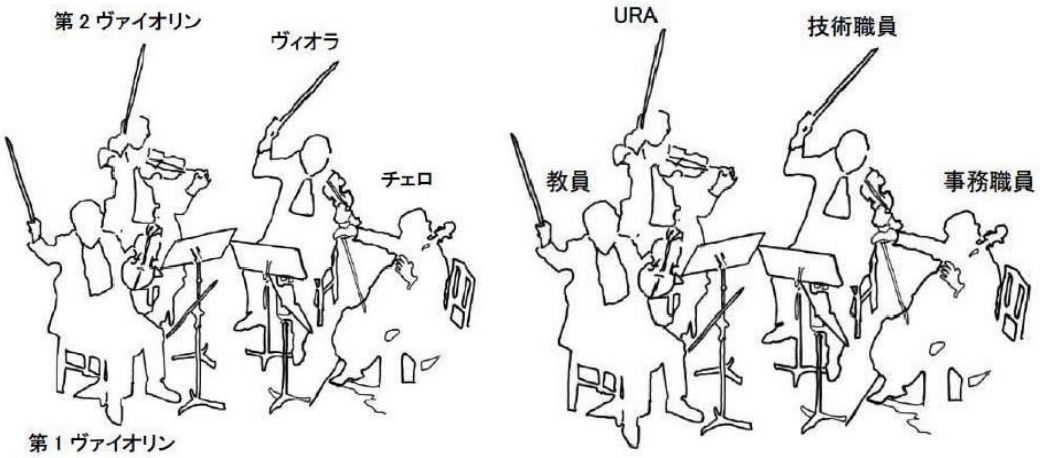


図 6-1　弦楽四重奏団と大学におけるチーム型研究集団の比較

このように，研究者と高度技術系専門職人材でチーム型研究と研究支援が進めば，共用設備の学外者の利用に対しても高度な研究協力が可能となり，その質が担保されれば，研究開発の進展や新領域への対応，あるいは研究環境のスマート化に向けた機器の高度化・基盤技術の開発もスムースに行える。学外者との共同研究や共同事業へ発展して事業収入も増え，研究設備の維持管理や更新にも役立つことが期待される。また，民間企業と研究機器開発の初期段階から製品化段階までのバランスのよい支援も可能となり，新規材料開発等の生産性向上につながる基盤技術の開発にも貢献できると思われる。本論文で述べた内容は，我が国の強みを増強させて研究力向上という目的を達成するためにも，文化として根付かせる必要があるだろう。

Appendix

社会貢献について

専門的知識と経験から，裁判所の専門委員（Technical advisor）として最高裁判所から任命され，知的財産高等裁判所や東京地方裁判所などにおいて，知的財産訴訟の技術アドバイザーの役割で非常勤国家公務員として 2006 年から関与している。また，応用物理学会の論文賞委員，講演会企画運営委員，プログラム委員，日本音響学会査読委員の他，中小企業向けセミナー講師も務めた経験もあり，社会的にも技術的観点から数多く貢献している。Institute of Physics から 2020 年に Trusted Reviewer，2022 年には 10,000 Trusted Reviewers の一人としても認められている。

成果発表一覧

学術論文への貢献（本文中で取り上げた論文の再掲を含む）127 報

M. Tohnishi, Mina Sato, A. Matsutani, T. Ubukata, and S. Matsita," Surface Treatment of Polyimide using Solid-source H_2O Plasma for Fabrication of Ge Electrode," Sensors and Materials, Vol. 35 (2023) in press.

Ryo Tsukui, Masaru Kino, Kodai Yamamoto, Mina Sato, Mie Tohnishi, Akihiro Matsutani, and Mikio Kurita, "Laboratory demonstration of the birefrigent point-diffraction interferometer wavefront sensor," Optics Continuum Vol. 2, Issue 2 (2023) pp. 382-396.

M. Sato, M. Tohnishi, and A. Matsutani," Microfabrication of Si by KOH Etchant Using Etching Mask Amorphized by Ar Ion Beam," Sensors and Materials, Vol. 34, No. 1 (2022) pp. 37-45.

M. Tohnishi and A. Matsutani, "Surface Treatment of Polydimethylsiloxane and Glass Using Solid-source H_2O Plasma for Fabrication of Microfluidic Devices," Sensors and Materials, Vol. 33, No. 2 (2021) pp. 569-574.

A. Matsutani, "Direct observation of spherical aberration under microscope using concave micromirrors," Eur. J. Phys., Institute of Physics, Vol. 41 (2020) 055303(8pp).

S. Hu, M. Takanohashi, X. Gu, A. Matsutani, F. Koyama, "Lateral Integration of VCSEL and Amplifier with Resonant Wavelength Detuning Design," IEICE Electronics Express, vol. 17, Issue 2, (2020) 20190688.

T. Takeshima, A. Matsutani, M. Sato, K. Hasebe, T. Isobe, A. Nakajima, S. Matsushita, "In-situ Temperature Measurement of Local Photothermal Conversion," Chem. Lett., Vol.49, No.5 (2020) pp. 469-472.

Akihiro Matsutani, Mina Sato, Koichi Hasebe, Ayako Takada, "Microfabrication of Concave Micromirror for Microbial Cell Trapping Using Kohler Illumination by XeF_2 Vapor Etching," Sensors and Materials. vol. 31 (2019) pp. 1325-1334.

Hiroaki Takeda, Kyohei Akimoto, Takuto Oshima, Kenta Takizawa, Jun Kondoh, Akihiro Matsutani, Takuya Hoshina and Takaaki Tsurumi, "Electro-acoustical constants and Rayleigh surface acoustic wave propagation characteristics of calcium aluminate silicate $Ca_2Al_2SiO_7$ single crystals," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 57 (2018) p. 11UD01.

前田幸平, Van Nhu Hai, 西岡國生, 松谷晃宏, 立木隆, 内田貴司, "MOD 法により Si_3N_4/SiO_2 メンブレン上に製作した VO_x マイクロボロメータの特性評価", 電気学会論文誌 A, vol. 138 (2018) pp. 471-477.

Shunya Inoue, Shun Nishimura, Masanori Nakahama, Akihiro Matsutani, Takahiro

Sakaguchi, Fumio Koyama, “High-speed wavelength switching of tunable MEMS vertical cavity surface emitting laser by ringing suppression,” Japanese Journal of Applied Physics, vol. 57 (2018) p. 040308.

Akihiro Matsutani, Ayako Takada,” Celluloid Microenclosure and Microlens Array Fabricated by Suzuki's Universal Microprinting Method and XeF_2 Vapor Etching for Microbial Analysis,” Sensors and Materials, vol. 30 (2018) pp. 149-155.

Tsuyoshi Takahashi, Akihiro Matsutani, Dai Shoji, Kunio Nishioka, Mina Sato, Takayuki Okamoto, Tomotarou Ezaki, Toshihiro Isobe, Akira Nakajima, Sachiko Matsushita, “Optical performance of Au hemispheric sub-microstructure on polystyrene quadrumer, Colloids,” Surf. A., Vol. 513 (2017).

Sachiko Matsushita, Akihiro Matsutani, Yasushi Morii, Daito Kobayashi, Kunio Nishioka, Dai Shoji, Mina Sato, Tetsu Tatsuma, Takumi Sannomiya, Toshihiro Isobe, Akira Nakajima, “Calculation and Fabrication of Two-dimensional Complete Photonic Bandgap Structures composed of Rutile TiO_2 Single Crystals in Air/Liquid,” J. MATER. SCI., vol. 51 (2016) pp. 1066-1073.

Akihiro Matsutani, Kunio Nishioka, Mina Sato, “Energy dispersive X-ray spectroscopy analysis of Si sidewall surface etched by deep-reactive ion etching,” Japanese Journal of Applied Physics, vol. 55 (2016) p. 06GH05.

Akihiro Matsutani, Ayako Takada, “Microchannel-free collection and single-cell isolation of yeast cells in a suspension using liquid standing wave, “Japanese Journal of Applied Physics, vol. 55 (2016) p. 118006.

Akihiro Matsutani, Fumitaka Ishiwari, Yoshiaki Shoji, Takashi Kajitani, Takuya Uehara, Masaru Nakagawa, Takanori Fukushima, “Chlorine -based inductively coupled plasma etching of GaAs wafer using tripodal paraffinic triptycene as an etching resist mask,” Japanese Journal of Applied Physics, vol. 55 (2016) p. 06GL01.

Tomotarou Ezaki, Akihiro Matsutani, Kunio Nishioka, Dai Shoji, Mina Sato, Takayuki Okamoto, Toshihiro Isobe, Akira Nakajima, Sachiko Matsushita, “Surface potential on gold nanodisc arrays fabricated on silicon under light irradiation,” Surface Science, vol. 672 ~ 673 (2016) pp. 62-67.

Masanori Nakahama, Xiaodong Gu, Takahiro Sakaguchi, Akihiro Matsutani, Moustafa Ahmed, Ahmed Bakry, Fumio Koyama, “Sub-gigahertz beam switching of vertical-cavity surface-emitting laser with transverse coupled cavity,” Applied Physics Letters, vol. 107 (2015) p. 071105.

中濵 正統，坂口 孝浩，松谷 晃宏，小山二三夫，“マイクロマシン構造を用いた面発光レー

ザーの波長制御と波長温度無依存化”, レーザー研究 vol. 43（2015）pp. 458-462.

Xiaodong Gu, Masanori Nakahama, Akihiro Matsutani, Moustafa Ahmed, Ahmed Bakry, Fumio Koyama,”850nm transverse-coupled-cavity vertical-cavity surface-emitting laser with direct modulation bandwidth of over 30GHz」Applied Physics Express, vol. 8 (2015) p. 82702.

Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, “Dry etching of SiC using Ar/F_2 plasma and XeF_2 plasma,” Japanese Journal of Applied Physics, vol. 54 (2015) p. 06GB01.

Akihiro Matsutani, Ayako Takada, “Single-Cell Isolation and Size Sieving Using Microenclosure Array for Microbial Analysis,” Sensors and Materials, vol. 27 (2015) pp. 383-390.

Xiaodong Gu, Kenya Suzuki, Yuichiro Ikuma, Kazunori Seno, Hiromasa Tanobe, Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, “Compact Wavelength Selective Switch Using a Bragg Reflector Waveguide Array with Ultra-Large Number (>100) of Output-Ports,” Journal of Lightwave Technology, vol. 33, no. 7 (2015) pp. 1358-1364.

Chao Zhi, Tadahiko Shinshi, Minoru Uehara, Akihiro Matsutani, Isamu Yuito, Teruaki Takeuchi., “A Polydimethylsiloxane diaphragm integrated with a sputtered thin film NdFeB magnet,” MICROSYST TECHNOL, Springer, Vol. 21 (2015) pp. 675-681.

Tsuyashi Takahashi, Akihiro Matsutani, Dai Shoji, Kunio Nishioka, Mina Sato, Toshihiro Isobe, Akira Nakajima, Sachiko Matsushita, “Microfabrication for a polystyrene quadrupole by template-assisted self-assembly,” Colloid. Surf.A, Vol. 484 (2015) pp. 75-80.

Shoya Sano, Kunio Nishioka, Akihiro Matsutani, Toshihiro Isobe, Akira Nakajima, Sachiko Matsushita, “Simple fabrication of micro-polygons and micro-honeycombs utilizing thermal deformation of monolayer colloidal crystals during reactive ion etching,” Colloid. Surf. A, Vol. 486 (2015) pp. 1-5.

Satoko Furuyama, Kosuke Tahara, Takauki Iwasaki, A. Matsutani, Mutsuko Hatano, “Fluorinated Graphene FETs Controlled by Ionic Liquid Gate,” IEEE J. Display Technolog, vol. 10 (2014) pp. 962-96.

Xiaodong Gu, Ayako Suzuki, Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, “20 μm long slow-light Bragg reflector waveguide modulator with over 20GHz modulation bandwidth,” Applied Physics Express(APEX), vol. 7 (2014) p. 114101.

Masanori Nakahama, Takahiro Sakaguchi, Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, Athermalization and on-chip multi-wavelength integration of VCSELs employing thermally actuated micromachined mirrors,” Applied Physics Letters, vol. 105 82014) p. 091110.

Masanori Nakahama, Takahiro Sakaguchi, Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, "Athermal and widely tunable VCSEL with bimorph micromachined mirror," Optics Express, vol. 22 (2014) pp. 21471-21479.

Shunya Inoue, Junichi Kashino, Akihiro Matsutani, Hideo Ohtsuki, Takahiro Miyashita, Fumio Koyama, "Highly angular dependent high-contrast grating mirror and its application for transverse-mode control of VCSELs," Japanese Journal of Applied Physics, vol. 53 (2014) p. 090306.

Akihiro Matsutani, Kunio Nishioka, Mina Sato, Dai Shoji, Daito Kobayashi, Toshihiro Isobe, Akira Nakajima, Tetsu Tatsuma, Sachiko Matsushita, "Angled etching of (001) rutile Nb-TiO_2 substrate using SF_6-based capacitive coupled plasma reactive ion etching," Japanese Journal of Applied Physics, vol. 53 (2014) p. 06JF02.

Toshikazu Shimada, Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, "Lateral Integration of Vertical Cavity Surface Emitting Laser and Slow Light Bragg Reflector Waveguide Devices," Applied Optics, vol. 53 (2014) pp. 1766-1774.

Hamed Dalir, Akihiro Matsutani, Moustafa Ahmed, Ahmed Bakry, Fumio Koyama, "High Frequency Modulation of Transverse-Coupled-Cavity VCSELs for Radio over Fiber Applications," IEEE Photonics Technology Letter, IEEE Photonics Technology Letters, vol. 26 (2013) pp. 281-284.

Shota Mochizuki, Xiaodong Gu, Kenji Tanabe, Akihiro Matsutani, Moustafa Ahmed, Ahmed Bakry, Fumio Koyama," Generation of vortex beam using Bragg reflector waveguide," Applied Physics Express, vol. 7 (2014) p. 022502.

Kensuke Nakamura, Akihiro Matsutani, Moustafa Ahmed, Ahmed Bakry, Fumio Koyama, "Slow-light Bragg reflector waveguide array for two-dimensional beam steering," Japanese Journal of Applied Physics, vol. 53 (2014) p. 038001.

Masanori Nakahama, Hayato Sano, Shunya Inoue, Takahiro Sakaguchi, Akihiro Matsutani, Moustafa Ahmed, Ahmed Bakry, Fumio Koyama, "Wavelength tuning and controlled temperature dependence in vertical-cavity surface-emitting lasers with a thermally and electrostatically actuated cantilever structure," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 53 (2013) p. 01030.

Ayumi Fuchida, Akihiro Matsutani, Moustafa Ahmed, Ahmed Bakry, Fumio Koyama, "Low-polarization dependent thermo-optic phase-shift in slow light Bragg reflector waveguide for beam steering and optical switching," Jpn. J. Appl. Phys. vol. 53 (2013) p. 010306.

Toshikazu Shimada, Akihiro Matsutani, Fumio Koyama," Compact Slow-Light Electro-Absorption Modulator Laterally Integrated with 980nm Vertical-Cavity Surface-Emitting

Laser," Applied Physics Express, APEX, no. 6 (2013) p. 122102.

Tomohiro Akutsu, Takuya Usio, Akihiro Matsutani, Tomoyuki Miyamoto, "Fabrication and characterization of VCSELs applying quantum well intermixing using spin-on-glass," Physica Status Solidi, vol. 10(c) 82013) pp. 1452-1546.

Toshikazu Shimada, Akihiro Matsutani, Fumio Koyama," Compact beam deflector based on slow-light Bragg reflector waveguide monolithically integrated with VCSEL," IEICE Electronics Express, vol. 10 (2013) pp. 1-7.

Xiaodong Gu, Toshikazu Shimada, Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, "Low polarization dependent beam deflector based on Bragg reflector waveguide for C-band wavelength demultiplexing," Appl. Phys. Lett. vol. 114 (2013) p. 163106.

Xiaodong Gu, Toshikazu Shimada, Akihiro Matsutani, Fumio Koyama,"35-μm Bragg Reflector Waveguide Modulator for High-Speed and Energy-Saving Operation," IEEE Photonics Technology Letters, vol. 25 (2013) pp. 1766-1769.

Masanori Nakahama, Hayato Sano, Shunya Inoue, Takahiro Sakaguchi, Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, "Tuning Characteristics of Monolithic MEMS VCSELs with Oxide Antireflection Layer," IEEE Photonics Technology letters, vol. 25 (2013) pp. 1747-1750.

Kosuke Tahara, Takayuki Iwasaki, Satoko Furuyama, Akihiro Matsutani, and Mutsuko Hatano, "Asymmetric transport property of fluorinated graphene," APPLIED PHYSICS LETTERS, vol. 103 (2013) p. 143106 (4 pages).

Akihiro Matsutani, Kosuke Tahara, Takayuki Iwasaki, Mutsuko Hatano," Fluorination of Graphene by Reactive Ion Etching System Using Ar/F2 Plasma," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 52 (2013) p. 06GD11.

Akihiro Matsutani, Ayako Takada, "Fabrication of Silicon Microchannel for Transport of Bacterial Cells by Ar/F2 Vapor Etching Process," Japanese Journal of Applied Physics, vol. 52 (2013) p. 047001.

Xiaodong Gu, Syouki Shimizu, Toshikazu Shimada, Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, "Low-voltage electro-absorption optical modulator based on slow-light Bragg reflector waveguide," Appl. Phys. Lett., vol. 102 (2013) p. 031118.

Xiaodong Gu, Toshikazu Shimada, Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, "Ultra-high channel-count wavelength demultiplexer based on a Bragg reflector waveguide with large angular dispersion," OPTICS EXPRESS, vol. 20 (2012) pp. 331-338.

Xiaodong Gu, Toshikazu Shimada, Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, "Miniature Non-

mechanical Beam Deflector Based on Bragg Reflector Waveguide with a Number of Resolution-points Larger than 1,000," IEEE Photon. J, vol. 4 (2012) pp. 1712-1719.

Hayato Sano, Norihiko Nakata, Masanori Nakahama, Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, "Athermal and tunable operations of 850nm vertical cavity surface emitting lasers with thermally actuated T-shape membrane structure," Appl. Phys. Lett., vol. 101 (2012) p. 121115.

Akihiro Matsutani, Mikiro Hayashi, Yasushi Morii, Kunio Nishioka, Toshihiro Isobe, Akira Nakajima, Sachiko Matsushita, "SF_6-Based Deep Reactive Ion Etching of (001) Rutile TiO_2 Substrate for Photonic Crystal Structure with Wide Complete Photonic Band Gap," Japanese Journal of Applied Physics, vol. 51 (2012) p. 098002.

Akihiro Matsutani, Ayako Takada, "Microfabrication of Si and GaAs by Plasma Etching Process Using Bacterial Cells as an Etching Mask Material," Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 51 (2012) p. 087001.

Akihiro Matsutani, Yuuki Hashidume, Hideo Ohtsuki, Fumio Koyama, "Microfabrication of Si-Based High-Index-Contrast-Grating Structure by Thermal Nanoimprint Lithography and Cl_2/Xe-Inductively Coupled Plasma Etching," Jpn. J. Appl. Phys. vol. 51 (2012) p. 06FF05.

淵田 歩, 松谷 晃宏, 小山 二三夫, "スローライトを利用した全反射型光スイッチ", 電子情報通信学会論文誌 C, vol. J95-C (2012) pp. 75-83.

Masanori Nakahama, Hayato Sano, Norihiko Nakata, Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, "Electro-Thermal Tuning of MEMS VCSEL with Giant Wavelength-temperature dependence, "IEICE Electronics Express, vol. 9 (2012) pp. 416-421.

Xiaodong Gu, Toshikazu Shimada, Ayumi Fuchida, Akihiro Matsutani, Akihiro Imamura, Fumio Koyama, "Ultra-compact beam-steering device based on Bragg reflector waveguide amplifier with number of resolution points over 100," Electron. Lett., vol. 48 (2012) pp. 336-337.

Ayumi Fuchida, Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, "Fabrication and Characterization of Bragg Reflector Slow Light Waveguide with Oxide Lateral Confinement," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 51 (2012) p. 050203.

Masanori Nakahama, Hayato Sano, Norihiko Nakata, Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, "Giant wavelength-temperature dependence of a micro-machined VCSEL with a thermally actuated cantilever structure," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 51(2012) 040209.

Hayato Sano, Norihiko Nakata, Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, "Wavelength Trimming of Micro-Machined VCSELs," IEICE Trans. Electron., vol. E95-C, no. 2 (2012) pp. 237-

242.

Xiaodong Gu, Toshikazu Shimada, Ayumi Fuchida, Akihiro Matsutani, Akihiro Imamura, Fumio Koyama, "Electro-Thermal Beam Steering Using Bragg Reflector Waveguide Amplifier," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 51 (2012) p. 20206.

Xiaodong Gu, Toshikazu Shimada, Ayumi Fuchida, Akihiro Matsutani, Akihiro Imamura, Fumio Koyama, "Beam steering in GalnAs/GaAs slow-light Bragg reflector waveguide amplifier," Appl. Phys. Lett., vol. 99, no. 21 (2011) p. 211107.

Ayumi Fuchida, Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, "Slow-light total-internal-reflection switch with bending angle of 30 deg," Optics Letters, vol. 36, no. 14 (2011) pp. 2644-2646.

Akihiro Imamura, Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, "Multiplexing of Multi-Wavelength 1060 nm Band GaInAs/GaAs Vertical Cavity Surface Emitting Laser Array Using Tapered Hollow Waveguide," Appl. Phys. Exp., vol. 4 (2011) p. 082106.

Akihiro Matsutani, Hideo Ohtsuki, Fumio Koyama, "Inductively Coupled Plasma Etching of Silicon Using Solid Iodine as an Etching Gas Source," Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 50 (2011) p. 06GG07.

Akihiro Matsutani, Ayako Takada, "High-frequency single-cell isolation of bacteria using microenclosure array," Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 49 (2010) p. 127201.

Akihiro Matsutani, Hideo Ohtsuki, Fumio Koyama, "Reactive Ion Etching of Si Using Ar/F_2 Plasma," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 49 (2010) p. 06GH05.

Padullaparthi Babu Dayal, Takahiro Sakaguchi, Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, "Multiple-Wavelength Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers by Grading a Spacer Layer for Short-Reach Wavelength Division Multiplexing Applications," Appl. Phys. Exp., vol. 2 (2009) p. 2501.

Hayato Sano, Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, "Athermal 850nm Vertical Cavity Surface Emitting Lasers with Thermally Actuated Cantilever Structure," Appl. Phys. Exp, vol. 2, no. 7 (2009) p. 072101.

Akihiro Matsutani, Hideo Ohtsuki, Fumio Koyama, "Smooth and Vertical Profile Dry Etching of Si Using XeF_2 Plasma," Japanese Journal of Applied Physics, vol. 48 (2009) p. 06FE09.

Akihiro Matsutani, Hideo Ohtsuki, Fumio Koyama, "Generation of Solid-Source H_2O Plasma and Its Application to Dry Etching of CaF_2," Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 47 (2008) pp. 5113-5115.

Akihiro Matsutani, Hideo Ohtsuki, Fumio Koyama, "Characterization of H2O-inductively coupled plasma for dry etching," Journal of Physics: Conference Series, vol. 100 (2008) p. 062022.

Tomoyuki Kato, Akihiro Matsutani, Takahiro Sakaguchi, Kohroh Kobayashi, "Sub-harmonic mode-locking of VCSEL with a concave external mirror," IEICE Electronics Express, vol. 5 (2008) pp. 152-156.

Wiganes Janto, Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, "Wavelength Tuning of Double-Cavity Micromachined Filter with Electrical and Thermal Actuations," OPTICAL REVIEW, vol. 14 (2007) pp. 86-90.

Akihiro Matsutani, Hideo Ohtsuki, Fumio Koyama, "Solid Source Dry Etching Process for GaAs and InP," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 45 (2006) pp. 8374~ 8377.

Wiganes Janto, Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, "Design, Fabrication, and Characterization of Tunable Micromachined Filter with Double-Cavity Structure," Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 45 (2006) pp. 7732-7736.

Kazutaka Takeda, Tomoyuki Miyamoto, Takashi Kondo, Yasuhiro Uchiyama, Naoto Kitabayashi, Takeshi Uchida, Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, "Wavelength extension effect on lasing characteristics of highly-strained GaInAs/GaAs vertical-cavity surface-emitting lasers with cavity detuning," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 45, no. 8B (2006) p. 6691-6696.

Yasuki Sakurai, Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, "Tunable stop-band hollow waveguide Bragg reflector with tapered air-core for adaptive dispersion-compensation," Appl. Phys. Lett., Vol. 88 (2006) p. 121103.

Yasuki Sakurai, Akihiro Matsutani, Takahiro Sakaguchi, Fumio Koyama, "Tunable Planar Air-Core Resonator Based on Tunable Hollow Waveguide," Jpn. J. Appl. Phys, Vol. 45 (2006) pp. L326-L328.

Akihiro Matsutani, Hideo Ohtsuki, Fumio Koyama, "Iodine solid source inductively coupled plasma etching of InP," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 44, (2005) pp. L576-L577.

Yasuki Sakurai, Yasushi Yokota, Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, "Tunable hollow waveguide Bragg grating with low temperature dependence," Appl. Phys. Lett., vol. 86 (2005) pp. 71111-71113.

Yasuhiro Uchiyama, Takashi Kondo, Kuzutaka Takeda, Akihiro Matsutani, Takeshi Uchida, Tomoyuki Miyamoto, Fumio Koyama, "1.2μm band GaInAs/GaAs high-density multiple-

wavelength vertical cavity surface emitting laser array," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 44 (2005) pp. L214-L215.

Yasuhiro Uchiyama, Takashi Kondo, Kazutaka Takeda, Akihiro Matsutani, Takeshi Uchida, Tomoyuki Miyamoto, Fumio Koyama, "Thermal cross-talk evaluation of densely integrated vertical cavity surface emitting laser array," IEICE Electronics Express, vol. 1 (2004) pp. 545-550.

Akihiro Matsutani, Hideo Ohtsuki, Ken Ohashi, Tomonori Yokoyama, Hirokazu Yamakage, Fumio Koyama, "Vertical and Smooth Microfabrication of InP Using Simple High-Density Plasma System with SmCo Ring Magnet," Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 43 (2004) pp. L960 ~ L962.

Takashi Kondo, Masakazu Arai, Akihiro Matsutani, Tomoyuki Miyamoto, Fumio Koyama, "Isolator-free 10 Gb/s single-mode fiber data transmission using 1.1 μm GaInAs/GaAs vertical cavity surface emitting laser," Electron. Lett., vol. 40 (2004) pp. 65-66.

Akihiro Matsutani, Hideo Ohtsuki, Fumio Koyama, "Low-Temperature Dry Etching of InP by Inductively Coupled Plasma Using HI/Cl_2," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 42 (2003) pp. L1414 ~ L1415.

Akihiro Matsutani, Hideo Ohtsuki, Fumio Koyama, "Cl_2-based Inductively Coupled Plasma Etching of InP Using Internal Antenna," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 42 (2003) pp. 6837- 6838.

Masakazu Arai, Takashi Kondo, Akihiro Onomura, Akihiro Matsutani, Tomoyuki Miyamoto, Fumio Koyama, "Multiple-wavelength GaInAs/GaAs vertical cavity surface emitting laser array with extended wavelength span," IEEE J. Select. Top. Quantum Electron., vol. 9 (2003) pp. 1367-1373.

Akihiro Onomura, Masakazu Arai, Takashi Kondo, Akihiro Matsutani, Tomoyuki Miyamoto, Fumio Koyama, "Densely integrated multiple-wavelength vertical-cavity surface-emitting laser array," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 42 (2003) pp. L529-L531.

Akihiro Matsutani, Hideo Ohtsuki, Fumio Koyama, "In situ Observation of Etching Profile in Inductively Coupled Plasma Etching of GaAs and InP using Long Distance Microscope," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 42 (2003) pp. 426-427.

Masakazu Arai, Takashi Kondo, Akihiro Matsutani, Tomoyuki Miyamoto, Fumio Koyama, "Growth of highly strained GaInAs-GaAs quantum wells on patterned substrate and its application for multiple-wavelength vertical-cavity surface-emitting laser array," IEEE J. Select. Top. Quantum Electron., vol. 8 (2002) pp. 811-816.

Akihiro Matsutani, Hideo Ohtsuki, Fumio Koyama, Kenichi Iga, "Measurement of Plasma

Density for Control of Etching Profile in Inductively Coupled Plasma Etching of InP," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 41 (2002) pp. 3147-3148.

Takashi Kondo, Masakazu Arai, Munechika Azuchi, Takeshi Uchida, Akihiro Matsutani, Tomoyuki Miyamoto, FUMIO KOYAMA, "Low threshold current density operation of 1.16 μm highly strained GaInAs/GaAs vertical cavity surface emitting lasers on (100) GaAs substrate," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 41 (2002) pp. L562-L564.

Toru Miura, Fumio Koyama, Yasuhiko Aoki, Akihiro Matsutani, Kenichi Iga, "Hollow optical waveguide for temperature-insensitive photonic integrated circuits," Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 40 (2001) pp. L688-L690.

Masakazu Arai, Nobuhiko Nishiyama, Munechika Azuchi, Satoshi Shinada, Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, and Kenichi Iga, "GaInAs/GaAs Single Mode Vertical Cavity Surface Emitting Laser (VCSEL) Array on GaAs (311)B," IEICE TRANS. ELECTRON. Vol. E84–C (2001) pp. 331-338.

Masakazu Arai, Nobuhiko Nishiyama, Munechika Azuchi, Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, Kenichi Iga, "Monolithic formation of metal organic chemical vapor deposition grown multi-wavelength vertical cavities with highly strained GaInAs/GaAs quantum wells on GaAs (311)B," Jpn. J. Appl. Phys, Vol. 40 (2000) pp. 4056-4057.

Nobuhiko Nishiyama, Masakazu Arai, Satoshi Shinada, Munechika Azuchi, Akihiro Matsutani, Tomoyuki Miyamoto, Fumio Koyama, Kenichi Iga, "1.12 μm polarization controlled highly strained GaInAs vertical-cavity surface-emitting lasers on GaAs (311)B by metal organic chemical vapor deposition," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 40 (2001) pp. L437-L439

Akihiro Matsutani, "Hideo Ohtsuki, Fumio Koyama, Kenichi Iga, "Mass Effect of Etching Gases in Vertical and Smooth Dry Etching of InP," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 40 (2001) pp. 1528-1529.

Shunichi Sato, Nobuhiko Nishiyama, Tomoyuki Miyamoto, Takashi Takahashi, Naoto Jikutani, Masakazu Arai, Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, Kenichi Iga, "Continuous wave operation of 1.26 μm GaInNAs/GaAs vertical-cavity surface-emitting lasers grown by metalorganic chemical vapour deposition," Electron. Lett., vol. 36 (2000) pp. 2018-2019.

Akihiro Matsutani, Hideo Ohtsuki, Fumio Koyama, Kenichi Iga, "Emission Spectrochemical Analysis in Dry Etching Process of InP by Cl_2 Inductively Coupled Plasma," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 39 (2000) pp. 6109-6110.

竹内健一郎，松谷晃宏，小山二三夫，伊賀健一，"GaAs/GaAlAs 系面発光レーザにおける AlAs 酸化プロセスの改良と単一モード発振特性"，電子情報通信学会論文誌，vol. J83-C (2000) pp. 904-907.

Masakazu Arai, Nobuhiko Nishiyama, Satoshi Shinada, Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, Kenichi Iga, "Highly stable single polarization operation of GaInAs/GaAs vertical-cavity surface-emitting laser on GaAs (311)B substrate under high-speed modulation," Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 39 (2000) pp. L858-L860.

Makiko Ariga, Yushi Sekido, Atsushi Sakai, Toshihiko BabA, Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, and Kenichi Iga, "Low threshold GaInAsP lasers with semiconductor/air distributed Bragg reflector fabricated by inductively coupled plasma etching," Japanese Journal of Applied Physics, vol. 39 (2000) pp. 3406 ~3409.

Masakazu Arai, Nobuhiko Nishiyama, Satoshi Shinada, Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, Kenichi Iga, "Vertical-cavity surface-emitting laser array on GaAs (311)B substrate exhibiting single-transverse mode and stable-polarization operation," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 39 (2000) pp. L588-L590.

Akihiro Matsutani, Hideo Ohtsuki, Fumio Koyama, Kenichi Iga, "Plasma Diagnostics in Inductively Coupled Plasma Etching Using Cl_2/Xe," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 39 (2000) pp. 1435-1436.

Fumio Koyama, Dietmar Schlenker, Tomoyuki Miyamoto, Zhibiao Chen, Akihiro Matsutani, Takahiro Sakaguchi, Kenichi Iga, "Data transmission over single-mode fiber by using 1.2 μm uncooled GaInAs-GaAs laser for Gbit/s local area network," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 12 (2000) pp. 125-127.

Takeru Amano, Fumio Koyama, Noriyoshi Furukawa, Nobuhiko Nishiyama, Akihiro Matsutani, Kenichi Iga, "Micromachined AlGaAs/GaAs vertical cavity filter with adjustable temperature dependence and wavelength trimming ability," Electron. Lett., vol. 36 (2000) pp. 74-76.

Toshihiko Baba, Kyoji Inoshita, Hiroko Tanaka, Jun Yonekura, Maiko Ariga, Akihiro Matsutani, Tomoyuki Miyamoto, Fumio Koyama, Kenichi Iga, "Strong enhancement of light extraction efficiency in GaInAsP 2-D-arranged microcolumns," IEEE J. Lightwave Tech., vol. 17 (1999) pp. 2113-2120.

Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, Hideo Ohtsuki, Kenichi Iga, "Vertical and Smooth Etching of InP by Cl_2/Xe Inductively Coupled Plasma," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 38 (1999) pp. 4260-4261.

Fumio Koyama, Dietmar Schlenker, Tomoyuki Miyamoto, Zhibiao Chen, Akihiro Matsutani, Takahiro Sakaguchi, Kenichi Iga, "1.2 μm highly strained GaInAs/GaAs quantum well lasers for singlemode fibre datalink," Electron. Lett., vol. 35 (1999) pp. 1079-1081.

Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, Kenichi Iga, "Low Bias Voltage Dry Etching of InP by Inductively Coupled Plasma Using $SiCl_4$/Ar," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 37 (1988) pp. 6655-6656.

Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, Kenichi Iga, "C_{60} Resist Mask of Electron Beam Lithography for Chlorine-Based Reactive Ion Beam Etching," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 37 (1988) pp. 4211-4212.

Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, Kenichi Iga, "Plasma Characterization in Chlorine-Based Reactive Ion Beam Etching and Chemically Assisted Ion Beam Etching," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 37 (1988) pp. 2747-2751.

羽鳥伸明，向原智一,大軒紀之，水谷章成，阿部誠，松谷晃宏，小山二三夫，伊賀健一，"AlAs 選択酸化を利用する極微構造 InGaAs/GaAs 面発光レーザに関する基礎的検討"，電子情報　通信学会論文誌 C-1, vol. J80-C-1　(1997) pp. 407-413.

Toshikazu Mukaihara, Nobuaki hatori, Noriyuki Ohnoki, Akinari Mizutani, Makoto Abe, Akihiro Matsutani, Fumio Koyama and Kenichi Iga, " Fabrication processes for low threshold InGaAs vertical-cavity surface-emitting lasers," Physica B, no. 227 (1996) pp. 400-403.

Koichi Suzuki, Fumio Koyama, Akihiro Matsutani, Jun Kato, Toshikazu Mukaihara and Kenichi Iga, "Miniature semiconductor optical power splitters with submicron wide aperture," Electronics Letters, vol. 32 (1996) pp. 654-655.

Yukio Hayashi, Toshikazu Mukaihara, Nobuaki Hatori, Noriyuki Ohnoki, Akihiro Matsutani, Fumio Koyama and Kenichi Iga, "Lasing Characteristics of Low-threshold oxide confinement InGaAs-GaAs vertical-cavity surface-emitting lasers," IEEE Photon. Technol. Lett. Vol. 7 (1995) pp. 1234-1236.

Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, Kenichi Iga, "Surface Temperature Increase in Reactive Ion Beam Etch and Improvement of Profiles by Multistep Etching," Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 34 (1995) pp. 2053- 2054.

Yukio Hayashi, Toshikazu Mukaihara, Nobuaki Hatori, Noriyuki Ohnoki, Akihiro Matsutani, F. Koyama and Kenichi Iga, "Record low-threshold index-guided InGaAs/GaAlAs vertical-cavity surface-emitting laser with a native oxide confinement structure," Electronics Letters. vol. 31 (1995) pp. 560-562

Toshikazu Mukaihara, Yukio Hayashi, Nobuaki Hatori, Noriyuki Ohnoki, Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, and Kenichi Iga, "Low-threshold mesa etched vertical-cavity InGaAs/GaAs surface emitting lasers grown by MOCVD," Electron. Lett. Vol. 31 (1995)

pp. 647-648.

Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, Kenichi Iga, "Three-dimensional electron probe roughness analysis of InP sidewalls processed by reactive ion beam etching," Applied Physics Letters, Vol. 66 (1995) pp. 64-66.

Satoshi Mitsugi, Jun Kato, Fumio Koyama, Akihiro Matsutani, Toshikazu Mukaihara, and K. Iga, "Design and Lasing Operation of Micro-Arc Ring Lasers," Jpn. J. Appl. Phys. vol. 11B (1994) pp. 6201-6202.

Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, Kenichi Iga, "Measurement of Sidewall Roughness of InP Etched by Reactive Ion Beam Etching," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 33 (1994) pp. 6737-6738.

Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, Kenichi Iga, "Characterization of Sidewall Damage Induced by Reactive Ion-Beam Etching," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 31 (1992) pp. 1541-1544.

Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, Kenichi Iga, "Reactive Ion Beam Etch of GaInAsP/InP Multilayer and Removal of Damaged Layer by Two-Step Etch," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 30 (1991) pp. 2123-2126.

Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, Kenichi Iga, "Microfabrication of Dielectric Multilayer Reflector by Reactive Ion Etching and Characterization of Induced Wafer Damage," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 30 (1991) pp. 428-429.

書籍への貢献

伊賀健一，小山二三夫編「面発光レーザの基礎と応用」
第 4 章「極微構造の形成とデバイス製作技術」(分担)，共立出版，(1999)

「化合物半導体の最新技術大全集」
第 7 章「化合物半導体のプラズマエッチング技術」(分担)，技術情報協会，(2007)

J.J.Pouch & S.A. Alterovitz 編 「Plasma Properties, Deposition and Etching」
「Reactive Ion Beam Etching for Microcavity Surface Emitting Laser Fabrication: Technology and Damage Characterization」(分担)， Trans Tech Pabrications Ltd, switerland, (1993),

学会発表等への貢献（抜粋，技術部半導体 MEMS 支援センター発足（2008 年度）からオープンファシリティセンターマイクロプロセス部門での 2022 年 11 月末まで）

松谷晃宏，遠西美重，藤本美穂，松下祥子，“ポジ型電子線レジスト SML1000 をマスクとして用いた SF_6-RIE による Ge のドライエッチング”，2022 年第 83 回応用物理学会秋季学術講演会, 20a-P01-5，（2022 年 9 月 20 日，東北大学）.

津久井遼，木野勝，山本広大，佐藤美那，遠西美重，松谷晃宏，栗田光樹夫，“点回折干渉方式を用いた補償光学用波面センサの開発 3 ”，日本天文学会 2022 年秋季年会, V229b，（2022 年 9 月 14 日，新潟大学）

藤本美穂，松谷晃宏，“酸素プラズマ照射によるポジ型電子線レジスト SML の増感効果”，2022 年第 69 回応用物理学会春季学術講演会，22a-P01-10，（2022 年 3 月 22 日，青山学院大学）

遠西美重，佐藤美那，松下祥子，松谷晃宏，“ポリイミドシート上へスパッタ成膜した Cr/Ge 電極の固体ソース H_2O プラズマを用いた前処理による低抵抗化”，22a-P01-9，（2022 年 3 月 22 日，青山学院大学）

佐藤美那，遠西美重，松谷晃宏，“Ar^+ビーム照射による Si アモルファスマスクを利用した KOH エッチングによる単一細胞分離プレートとマイクロ流路の作製”，22a-P01-8，（2022 年 3 月 22 日，青山学院大学）

大勝賢樹，賀 智凱，松谷晃宏，真島 豊，“ナノポア DNA シーケンサに向けた無電解金めっきナノポアの作製”，24p-E104-7，（2022 年 3 月 24 日，青山学院大学）

立花 綾，佐藤美那，松谷晃宏，望月泰英，磯部敏宏，中島 章，松下祥子，“2 層コロイド結晶を用いた Metal-Insulator-Metal ナノディスク構造の作製”，24p-D316-3，（2022 年 3 月 24 日，青山学院大学）

松谷晃宏，“科学技術分野の文部科学大臣表彰研究支援賞を受賞して”，2022 実験実習技術研究会特別講演 2，（2022 年 3 月 3 日，オンライン開催）

松谷晃宏，“東京工業大学オープンファシリティセンターマイクロプロセス部門の最近の取り組み”，第 22 回令和 3 年度高エネルギー加速器研究機構シンポジウム （2022 年 1 月 21 日，オンライン開催）

持田匠，土方亘，松谷晃宏，“電気刺激による骨格筋の不完全強縮を利用した体内エナジーハーベスティングデバイスの開発”，2021 年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2021 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, Sept. 2021.

遠西美重，佐藤美那，松下祥子，松谷晃宏. 固体ソース H_2O プラズマを用いて表面処理したポリイミドテープ上の Cr/Cu 電極の折り曲げ耐久性，第 82 回応用物理学会秋季学術講演会，21a-P03-5 （2021 年 9 月 21 日，オンライン開催）

佐藤美那，遠西美重，松谷晃宏. エッチングマスクとして Ar+イオンビームを照射した 微細マスクパターンを用いた KOH エッチングによる Si の微細加工，第 82 回 応用物理学会秋季学術講演会，21a-P03-7 （2021 年 9 月 21 日，オンライン開催）

津久井遼，木野勝，山本広大，栗田光樹夫，松谷晃宏. 点回折干渉計方式を用いた補償光学用波面センサの開発，日本天文学会 2021 年秋季年会, V245b，（2021 年 9 月 14 日，オンライン）

佐藤美那，松谷晃宏，津久井遼，木野勝，山本広大，栗田光樹夫，長田哲也，“ドライエッチン

グにより製作したメンブレン構造の NbO 薄膜の顕微分光透過率測定と EDX 分析”，第 68 回応用物理学会学術講演会，16a-P04-5, Mar. 2021.

遠西美重，松谷晃宏，“固体ソース H_2O プラズマ処理したポジ型フォトレジストの表面粗さの観察”，第 68 回応用物理学会学術講演会，16a-P04-6, Mar. 2021.

津久井 遼，木野 勝，山本 広大，栗田 光樹夫，松谷晃宏，“せいめい望遠鏡での極限補償光学に向けた波面センサの開発”，第 18 回赤外放射応用関連学会等年会, Jan. 2021.

松谷晃宏. 共用クリーンルームにおける研究支援と微細加工プロセス技術の開発，第 9 回 可視赤外線観測装置技術ワークショップ 2020, Dec. 2020.

新井 真俊，松谷 晃宏，吉田 和弘，金 俊完. 深掘り反応性イオンエッチング（DRIE）における開口パターンの高アスペクト比形状への影響，山梨講演会，山梨講演会 講演論文集, No. 200-3, D44, Nov. 2020.

遠西美重，松谷晃宏，”固体ソース H_2O プラズマによるガラスとポリジメチルシロキサン（PDMS）の接合表面処理”，2020 年機器・分析技術研究会，P-31，Sep. 2020.

全　聖河，宮田啓夢，榛葉健太，宮本義孝，松谷晃宏，八木　透，”凸凹形状の底面を有したマイクロチャネルによる神経突起の伸長制御”，電気学会　マグネティックス，医用・生体工学合同研究会，MAG-20-043，MBE-20-028，(2020 年 3 月 19 日，東海大学)

松谷晃宏，柳田保子，“眼瞼圧推定のための渦電流式変位センサを用いた測定方法の提案”，第 67 回応用物理学会春季学術講演会, 13a-PA1-16, (2020 年 3 月 13 日，上智大学)

松谷晃宏，“スンプ法によるセルロイドマイクロ時計皿アレイ細胞集積チップの製作”，第 67 回応用物理学会春季学術講演会, 13a-PA1-17，(2020 年 3 月 13 日，上智大学)

許 在旭，志村 京亮，顧 暁冬，松谷 晃宏，小山 二三夫，“多点接触構造を有する長尺 VCSEL 増幅器”，第 67 回応用物理学会春季学術講演会, 15a-B415-3，(2020 年 3 月 15 日，上智大学)

松谷晃宏，佐藤美那，遠西美重，藤本美穂，平野明子，西沢望，進士忠彦，初澤毅，“東京工業大学におけるクリーンルーム統合共用化による組織的研究支援の推進”，研究・イノベーション学会第 34 回年次学術大会，1G09，pp.245-248, (2019 年 10 月 26 日，政策研究大学院大学)

A. Matsutani, A. Takada, “Optical Characterization of Concave Micromirror Array for Microbial Cell Trapping Fabricated by Laser Lithography and SUMP Method,” MNC2019, 30P-7-19 (Oct. 2019)

J. Sungha，宮田啓夢，椎葉健太，宮本義孝，松谷晃宏，八木透，“神経ネットワークの構成における神経突起の伸長制御のためのマイクロチャネルの開発”，2019 年度電気学会　電子・情報システム部門大会，(2019 年 9 月)

松谷晃宏，髙田綾子，“スンプ法とレーザー描画により製作したマイクロ凹面鏡の集光特性”，第 80 回応用物理学会秋季学術講演会, 18a-PA2-7　(2019 年 9 月 18 日，北海道大学)

M. Morinaga, X. Gu, K. Shimura, A. Matsutani, F. Koyama, “Compact Dot Projector based on Folded Path VCSEL Amplifier for Structured Light Sensing,” Conference on Lasers and Electro-Optics 2019, SM4N.4 (May. 2019).

K. Kondo, X. Gu, Z. Ho, A. Matsutani, F. Koyama, “Two-Dimensional Beam Steering Device Based on VCSEL Slow-Light Waveguide Array with Amplifier Function,” Optical Fiber

Communication Conference and Exhibition 2019, M4E.4 (Mar. 2019).

松谷晃宏，佐藤美那，長谷部浩一，髙田 綾子，“Siマイクロ凹面鏡とケーラー照明光による酵母細胞の捕獲”，第66回応用物理学会春季学術講演会，11p-PA2-10 （2019年3月11日，東京工業大学）

阿川裕晃，松谷晃宏，長谷部浩一，磯部敏宏，中島章，松下祥子，“熱プラズモニックマランゴニ効果を用いたマイクロ混合流の形成”，第 66 回応用物理学会春季学術講演会，9a-W621-10 （2019 年 3 月 11 日，東京工業大学）

竹島利彦，松谷晃宏，佐藤美那，長谷部浩一，磯部敏宏，中島章，松下祥子，“局所光熱変換部の in-situ 温度測定の試み”，第 66 回応用物理学会春季学術講演会，9a-W621-11 （2019 年 3 月 11 日，東京工業大学）

長谷部浩一，佐藤美那，松谷晃宏，竹島利彦，磯部敏宏，中島章，松下祥子，“カソード加熱型 RIE 装置により窒素プラズマ処理した Ti 薄膜およびバルク TiO_2 の透過率測定”，第 66 回応用物理学会春季学術講演会，11p-PA2-9 （2019 年 3 月 11 日，東京工業大学）

許在旭，志村京亮，顧暁冬，松谷晃宏，小山二三夫，“高出力面発光レーザ増幅器のビーム品質改善の検討”，第 66 回応用物理学会春季学術講演会，12p-W611-3 （2019 年 3 月 12 日，東京工業大学）

冨樫良介，顧暁冬，松谷晃宏，坂口孝浩，小山二三夫，“C バンドにおける損失補償特性を持つ InP 系 VCSEL 分波器”，第 66 回応用物理学会春季学術講演会，12p-W611-8 （2019 年 3 月 12 日，東京工業大学）

森長瑞，顧暁冬，志村京亮，松谷晃宏，小山二三夫，“3D センシングのための VCSEL 増幅器によるドットパターン生成”，第 66 回応用物理学会春季学術講演会，12p-W611-4 （2019 年 3 月 12 日，東京工業大学）

鷹箸雅司，志村京亮，顧暁冬，中濱正統，松谷晃宏，坂口孝浩，小山二三夫，“カットオフ構造を用いた VCSEL と VCSEL 増幅器の横方向集積”，第 66 回応用物理学会春季学術講演，12p-W611-2 （2019 年 3 月 12 日，東京工業大学）

志村京亮，許在旭，顧暁冬，中濵正統，坂口孝浩，松谷晃宏，小山二三夫，“カットオフ波長離調構造によるビームスキャナ集積単一モード面発光レーザ”，
第 66 回応用物理学会春季学術講演会，12p-W611-5 （2019 年 3 月 12 日，東京工業大学）

A. Matsutani, M. Sato, K. Hasebe, A. Takada, “Microfabrication of Si-based Concave Micromirror Array for Microbial Cell Trapping by XeF_2 Vapor Etching,” MNC 2018, 31st International Microprocesses and Nanotechnology Conference, 16P-11-43 (Sapporo, Nov. 2018).

M. Morinaga, X. Gu, K. Shimura, M. Nakahama, A. Matsutani, F. Koyama, “VCSEL Amplifier Dot Projector with Folded-Path Slow-light Waveguide for 3D Depth Sensing,” 2018 International Semiconductor Laser Conference, TuC4, pp. 95-96 (Sep. 2018).

S. Inoue, S. Nishimura, M. Nakahama, A. Matsutani, F. Koyama, “High Speed Wavelength Tuning of MEMS VCSEL with Advanced Voltage Drive Technique,” 2018 International Semiconductor Laser Conference, TuP49, pp. 211-212 (Sep. 2018).

Z.Ho, J. Hayakawa, K. Shimura, K. Kondo, X. Gu, A. Matsutani, A. Murakami, F. Koyama, “High Power and High Beam Quality VCSEL Amplifier,” 2018 International Semiconductor Laser Conference, WC3, pp. 229-230 (Sep. 2018).

K. Shimura, M. Takanohashi, Z. Ho, X. Gu, M. Nakahama, A. Matsutani, F. Koyama, “Non-Mechanical Beam Scanner Integrated with Wavelength Detuned VCSEL for LiDAR Applications,” International Nano-Optoelectronics Workshop 2018, iNOW2018, pp. 140-141 (Jul. 2018).

K. Kondo, X. Gu, Z. Ho, A. Matsutani, F. Koyama, “Two-Dimensional Beam Steering Using Slow-Light Waveguide Deflector Array with Optical Gain,” Conference on Lasers and Electro-Optics 2018, SM31.4 (May. 2018).

T. Oshima, K. Akimoto, T. Hoshina, T. Tsurumi, J. Kohndoh, A. Matsutani, H. Takeda. Electro-Acoustical Constants and Rayleigh SAW Propagation Characteristics of Ca2Al2SiO7 Single Crystal, 2018 ISAF-FMA-AMF-AMEC-PEM Joint Conference (IFAAP2018) (May. 2018).

冨樫良介, Xiaodong Gu, 松谷晃宏, 坂口孝浩, 清水 淳一, 小山二三夫. InP系ブラッグ反射鏡導波路を用いた1.5 μm帯スローライト分波器, 2018年電子情報通信学会ソサイエティ大会（Sep. 2018).

松谷晃宏, 佐藤美那, 長谷部浩一, 高田綾子, “XeF_2気相エッチングにより製作した微生物細胞捕獲用Siマイクロ凹面鏡の集光実験”, 第79回応用物理学会秋季学術講演会, 19p-PA2-6（2018年9月19日, 名古屋国際会議場）.

鷹箸雅司, 志村京亮, 顧暁冬, 中濱正統, 松谷晃宏, 坂口孝浩, 小山二三夫, “面発光レーザとスローライト光増幅器の横方向高効率結合集積化”, 第79回応用物理学会秋季学術講演会, 19a-225B-5 （2018年9月19日, 名古屋国際会議場）.

志村京亮, 鷹箸雅司, 許在旭, 顧暁冬, 中濵正統, 坂口孝浩, 松谷晃宏, 小山二三夫, “カットオフ波長離調構造によるビームスキャナ集積面発光レーザ”, 第79回応用物理学会秋季学術講演会, 19a-225B-4 （2018年9月19日, 名古屋国際会議場）.

武田博明, 秋本恭平, 大島拓人, 近藤淳, 松谷晃宏, 保科拓也, 鶴見敬章. ゲーレナイト$Ca_2Al_2SiO_7$結晶の材料定数評価と弾性波特性, 日本セラミックス協会第31回秋季シンポジウム,（Sep. 2018. 名古屋工業大学）

秋本恭平, 保科拓也, 近藤淳, 松谷晃宏, 鶴見敬章, 武田博明, “SAWセンサ応用へ向けたゲーレナイト結晶の特性評価”, 第65回応用物理学会春季学術講演会, 20p-F104-10 （2018年3月20日, 早稲田大学）

二ツ森皓史, 塩田忠, 西岡國生, 松谷晃宏, 多田大, 西山昭雄, 篠崎和夫, “Si微細加工によるPt-Pd/(Y_2O_3添加ZrO_2単結晶薄膜)/Pt-Pd構造の作製とその抵抗スイッチング特性”, 第65回応用物理学会春季学術講演会, 19p-P5-19 （2018年3月19日, 早稲田大学）

三田真衣, 松谷晃宏, 西岡國生, 佐藤美那, 磯部敏宏, 中島章, 松下祥子, “金属コーティングシリカ球ピラミッドアレイの作製とその光学特性”, 第65回応用物理学会春季学術講演会, 18p-P9-27 （2018年3月18日, 早稲田大学）

江崎智太郎, 松谷晃宏, 西岡國生, 佐藤美那, 岡本隆之, 磯部敏宏, 中島章, 松下祥子, “ケルビンプローブ顕微鏡によるホットエレクトロン可視化の検討”, 第65回応用物理学会春季学術講演会, 18p-P9-29 （2018年3月18日, 早稲田大学）

井上俊也, 旭利紘, 西村駿, 中濵正統, 松谷晃宏, 坂口孝浩, 小山 二三夫, “MEMS VCSEL集積スローライト導波路ビームスキャナの作製”, 第65回応用物理学会春季学術講演会, 18a-B203-7 （2018年3月18日, 早稲田大学）

旭利紘，顧暁冬，松谷晃宏，小山二三夫，“3Dセンシングのための解像点数100点を超えるアクティブビームスキャナ”，第65回応用物理学会春季学術講演会，18a-B203-8 （2018年3月18日，早稲田大学）

許在旭，志村京亮，顧暁冬，中濵正統，松谷晃宏，小山二三夫，“長尺面発光レーザ増幅器による高出力・高ビーム品質動作”，第65回応用物理学会春季学術講演会，18a-B203-10 （2018年3月18日，早稲田大学）

松谷晃宏，西岡國生，佐藤美那，“XeF_2気相エッチングによるSiマイクロ凹面鏡構造の製作”，第65回応用物理学会春季学術講演会，17p-P2-10 （2018年3月17日，早稲田大学）

前田幸平，ヴァン ニュ ハイ，西岡國生，松谷晃宏，立木隆，内田貴司，“MOD法によりSi_3N_4/SiO_2メンブレン上に製作したVO_xマイクロボロメータのDC感度測定”，第65回応用物理学会春季学術講演会，17p-P2-5 （2018年3月17日，早稲田大学）

松谷晃宏，“エッチングによるゾーンプレート製作の可能性”，第 19 回分子科学研究所技術研究会（2018 年 2 月 9 日，分子科学研究所）

A. Matsutani, A. Takada, “Profile Control in Si Etching by Two-step Etching Process Using XeF_2 Vapor for Fabrication of Concave Micromirror,” 39th International Symposium on Dry Process (DPS2017), Proceedings of 39th International Symposium on Dry Process, pp. 61-62, (Tokyo Tech, Nov. 2017).

松谷晃宏，髙田綾子，“ XeF_2 気相エッチングとスンプ法により製作したセルロイドマイクロレンズによる酵母細胞の捕獲実験”，第78回応用物理学会秋季学術講演会, 5p-PB5-8 （2017年9月5日，福岡国際会議場）

松谷晃宏，髙田綾子，“XeF_2気相エッチングとスンプ法によるセルロイドマイクロレンズアレイの製作”，第64回応用物理学会春季学術講演会，15a-P2-8 （2017年3月15日，パシフィコ横浜）

伴野将大，松谷晃宏，朴鍾淏，柳田保子，初澤毅，“ガラス基板上のSiN薄膜によるフォトニック結晶構造の光学特性”，第64回応用物理学会春季学術講演会，15a-P2-7 （2017年3月15日，パシフィコ横浜）

許在旭，志村京亮，顧暁冬，中濵正統，松谷晃宏，小山二三夫，“面発光レーザ高出力化のための長尺半導体光増幅器”，第64回応用物理学会春季学術講演会，15p-422-3 （2017年3月15日，パシフィコ横浜）

中濵正統,井上俊也，松谷晃宏，坂口孝浩，小山二三夫， “機械的共振を用いた MEMS 波長可変 VCSEL の広帯域掃引・低駆動電圧動作”，第64回応用物理学会春季学術講演会，15p-422-5（2017年3月15日，パシフィコ横浜）

西村駿，顧暁冬，中濵正統，坂口孝浩，松谷晃宏，小山二三夫，“熱光学効果による1060nm帯面発光レーザの高速波長掃引特性”，第64回応用物理学会春季学術講演会，15p-422-6 （2017年3月15日，パシフィコ横浜）

前田幸平，西岡國生，ヴァン・ニュ ハイ，松谷晃宏，立木隆，内田貴司， “Deep-RIEとXeF2気相エッチングによる$VO_x/Si_3N_4/SiO_2$メンブレンの製作”，第64回応用物理学会春季学術講演会，14p-3 （2017年3月14日，パシフィコ横浜）

佐藤美那，“一つのステンシルマスクを用いて多サイズパターン作製を行うプロキシミティスパ

ッタ成膜法の開発”，2017 年度機器・分析技術研究会 in 長岡，P-27 (2017 年 8 月 29 日，アオーレ長岡)

T. Takahashi, A. Matsutani, D. Shoji, K. Nishioka, T. Isobe, A. Nakajima, S. Matsushita, “Microfabrication of polystyrene quadrupole combined with top-down and bottom-up approach,” Pacifichem 2015 (Dec. 2016).

A. Matsutani, A. Takada, “Single-cell Isolation of S. Cerevisiae Using Celluloid Microenclosure Array Formed by the SUMP Method,” 29th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC2016), 10P-7-33 (Nov. 2016).

M. Shimizu, K. Nishioka, A. Matsutani, K. Yoshida, J. W. Kim, “Study on Fabrication of High Aspect Ratio TPSE by using DRIE,” 20th International Conference on Mechatronics Technology（ICMT2016）, pp. 32-33 (Oct. 2016).

清水美咲，西岡國生，松谷晃宏，吉田和弘，金俊完，“DRIEによる高アスペクト比三角柱－スリット形電極対(TPSE)の製作に関する研究”，　山梨講演会2016，山梨講演会講演論文集, No. 160-3, p. 161-162. (Oct. 2016)

土子政貴，青木才子，松谷晃宏，西岡國生，“脂肪酸を添加した溶液中におけるマイクロパターン表面の摩擦特性”，トライボロジー会議2016秋新潟. (Oct. 2016)

M. Nakahama, X. Gu, A. Matsutani, T. Sakaguchi, F. Koyama, “VCSEL-Based High Resolution Wavelength Demultiplexer with Large Optical Gain,” 25th International Semiconductor Laser Conference, ISLC 2016, TuD5 (Sep. 2016).

井上俊也，中濵正統，松谷晃宏，坂口孝浩，小山二三夫，“HCG MEMS VCSELの製作と温度無依存化に向けた特性評価”, 2016年電子情報通信ソサイエティ大会, C-4-23. (Sep. 2016)

松谷晃宏，高田綾子，　“スンプ法により形成したセルロイド製単一細胞分離用プレートによる酵母細胞の分離“，第77回応用物理学会秋季学術講演会, 14a-D63-10. (Sep. 2016)

顧 暁冬，許 在旭，中濵 正統，松谷 晃宏，小山 二三夫，“面発光レーザと集積したブラッグ反射鏡導波路増幅器の高シングルモード出力動作”，第77回応用物理学会秋季学術講演会, 14p-P2-2. (Sep. 2016)

S. Inoue, M. Nakahama, A. Matsutani, T. Sakaguchi, F. Koyama, “Fabrication of HCG MEMS VCSELs using nanoimprint lithography and consideration of athermal operation,” 21st. Optoelectronics and Communications Conference (OECC/PS2016), MD2-3. (Jul. 2016)

S. Inoue, M. Nakahama, A. Matsutani, T. Sakaguchi, F. Koyama, “Consideration and Fabrication of athermal HCG MEMS VCSEL, International Nano-Optolectronics Workshop,” iNOW2016, Poster Session-7. (Jul. 2016)

X. Gu, M. Nakahama, A. Matsutani, F. Koyama, “VCSEL-Integrated Bragg Reflector Waveguide Amplifier with Single-mode Output Power over 10 mW,” 21st. Optoelectronics and Communications Conference (OECC/PS2016), MD2-4. (Jul. 2016)

M. Nakahama, X. Gu, A. Matsutan, T. Sakaguchi, F. Koyama, “Slow Light VCSEL Amplifier for High-resolution Beam Steering and High-power Operations,” Conference on Lasers and Electro-Optics 2016 (CLEO2016), SF1L.5. (Jun. 2016)

西岡國生，佐藤美那，松谷晃宏，“Deep-RIEにより形成されたトレンチ側面の化学組成に関するプラズマ発光分光分析からの考察”，第63回応用物理学会春季学術講演会，21a-P3-11

（2016年3月21日，東京工業大学）

松谷晃宏，髙田綾子，“液体定在波を利用した微生物細胞の流路レス凝集法におけるマイクロ囲いアレイを用いた大きさによる篩い分けと単一分離”，第63回応用物理学会春季学術講演会，21a-P3-12 （2016年3月21日，東京工業大学）

江崎智太郎，松谷晃宏，西岡國生，庄司大，佐藤美那，岡本隆之，磯部敏宏，中島章，松下祥子，“Si上に形成した金ナノ円盤が示す表面電位差の光照射依存”，第63回応用物理学会春季学術講演会，21-p-P1-4 （2016年3月21日，東京工業大学）

森裕之，顧暁冬，松谷晃宏，小山 二三夫，“スローライト導波路アレイを用いた二次元ビーム掃引”，第63回応用物理学会春季学術講演会，21a-S321-11 （2016年3月21日，東京工業大学）

中濱正統，顧暁冬，坂口孝浩，松谷晃宏，小山二三夫，“面発光レーザの単一モード出力増大に向けたスローライトSOAの増幅特性”，第63回応用物理学会春季学術講演会，20a-S321-7 （2016年3月20日，東京工業大学）

井上俊也，中濵正統，松谷晃宏，坂口孝浩，小山 二三夫，“サブ波長格子を用いたアサーマル波長可変面発光レーザの製作”，第63回応用物理学会春季学術講演会，20a-S321-9 （2016年3月20日，東京工業大学）

大竹真理子，岸哲生，矢野哲司，松谷晃宏，西岡國生，“一方向性光結合を示すテルライトガラス回折格子の作製”， The 26th Meeting on Glasses for Photonics, 5 (2016年1月29日，日本セラミックス協会).

古野慶太，松谷晃宏，宮本義孝，八木透，“メッシュフィルタへの人工細胞膜形成に関する研究メッシュフィルタへの人工細胞膜形成に関する研究”，日本機会学会第28回バイオエンジニアリング講演会，1C23（2016年1月9日，東京工業大学）

松谷晃宏，髙田綾子，“タッピングによる酵母細胞の流路レス凝集パターン形成と単一細胞分離”，第7回集積化ＭＥＭＳシンポジウム， 29pm-PM-3，（2015年10月29日，朱鷺メッセ）.

松谷晃宏，“単一細胞分離用プレートの開発”，微細加工に関する技術サロン会（2015年11月24日，分子科学研究所）

A. Matsutani, F. Ishiwari, Y. Shoji, T. Uehara, M. Naagawa, and T. Fukushima, “Chlorine-Based Inductively Coupled Plasma Etching of GaAs Using Tripodal Paraffinic Triptycene ($TripC_{12}$) as a Nanoimprint Resist Mask,” 28th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC2015), 13P-11-70, Toyama, Japan (Nov. 13, 2015).

A. Matsutani, M. Sato, K. Nishioka, D. Shoji, “EDX analysis of Si sidewall surface etched by deep-RIE process,” 28th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC2015), 12P-7-42, Toyama, Japan (Nov. 12, 2015).

X. Gu, M. Nakahama, A. Matsutani, F. Koyama, “First Demonstration of 850 nm Transverse Coupled Cavity Vertical Cavity Surface-Emitting Laser,” The 76th JSAP Autumn Meeting 2015, 16a-2E-9, （2015年9月16日，名古屋国際会議場）.

中濱正統，顧暁冬，坂口孝浩，松谷晃宏，小山二三夫，“横方向複合共振器面発光レーザによる高速ビームスイッチング動作”，応用物理学会2015年秋季学術講演会, 16a-2E-8, （2015年9月16日，名古屋国際会議場）.

松谷晃宏，髙田綾子，“液体定在波を利用した酵母細胞の流路レス凝集パターン形成における励振波形の効果”，応用物理学会2015年秋季学術講演会, 15p-PA3-1, （2015年9月15日，名古屋

国際会議場）.

松谷晃宏，髙田綾子，“液体定在波を利用した酵母細胞の流路レス凝集パターンの振動周波数による制御”，2015年 第62回応用物理学会春季学術講演会，12p-P2-6 （2015年3月12日，東海大学）

中濱正統，小林拓貴，丸山彰，坂口孝浩，松谷晃宏，小山二三夫，“横方向複合共振器面発光レーザのVernier効果による横モード制御”，2015年 第62回応用物理学会春季学術講演会，12a-A17-12 （2015年3月12日，東海大学）

角田健，松谷晃宏，宮本 智之，“励起準位を用いたVCSELの動作温度範囲拡大”，2015年 第62回応用物理学会春季学術講演会，12a-A17-13 （2015年3月12日，東海大学）

岩崎大和，西林一彦，松谷晃宏，佐藤美那，久我淳，宗片比呂夫，“光導波路とエバネッセント結合したGdFe薄膜の磁気光学応答”，2015年 第62回応用物理学会春季学術講演会，11a-A13-5（2015年3月11日，東海大学）

高橋毅，松谷晃宏，庄司大，西岡國生，佐藤美那，磯部敏宏，中島章，松下祥子，”トップダウン・ボトムアップ統合アプローチによるポリスチレン四重極子の作製”，2015年 第62回応用物理学会春季学術講演会，11p-D13-6 （2015年3月11日，東海大学）

田原康佐，岩崎孝之，松谷晃宏，波多野睦子，“フッ化グラフェン中のスピン緩和”，第28回ダイヤモンドシンポジウム， Nov. 2014.

A, Matsutani, and F. Koyama, “Microfabrication of 4H-SiC by Reactive Ion Etching Using XeF_2 plasma,” 2014 International Symposium on Dry Process (DPS2014) P-15, Yokohama, Japan (November 6, 2014).

A, Matsutani, and F. Koyama, “Dry Etching of 4H-SiC using Ar/F_2 Plasma,” 27th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC2013) 6P-7-34, Fukuoka, Japan (November 6, 2014).

松谷晃宏，髙田綾子，“低周波鉛直加振による液体定在波を利用した酵母細胞の流路レス凝集”，第31回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム，21pm3-PS112，（2014年10月21日，くにびきメッセ）

松谷晃宏，石割文崇，庄子良晃，上原卓也，中川勝，福島孝典，”Cl2-誘導結合型プラズマエッチングにおけるヤヌス型トリプチセンTripC12 のエッチング特性の評価”，2014年 第75回応用物理学会秋季学術講演会，19a-PA1-2（2014年9月19日，北海道大学）

田辺賢司，顧暁冬，松谷晃宏，小山二三夫，”多重リングBragg反射鏡導波路からのVortexビームの生成”，2014年 第75回応用物理学会秋季学術講演会，19a-C7-8（2014年9月19日，北海道大学）

角田健，松谷晃宏，宮本智之，”励起準位を用いた高利得化VCSELに関する基礎検討”，2014年第75回応用物理学会秋季学術講演会，18p-C6-6（2014年9月18日，北海道大学）

橋詰竜慈，宮本義，松谷晃宏，八木　透，“軸索方向制御を目的としたマイクロチャネルの提案とその効果検証”，医用・生体工学研究会，MBE-14-027 （2014年3月21日，東京工業大学）

成木航，田原康佐，岩崎孝之，古山聡子，松谷晃宏，波多野睦子，“横型フッ化グラフェン－グラフェンヘテロ構造の作製”，2014年 第61回応用物理学会春季学術講演会，20a-E2-10 （2014年3月20日，青山学院大学）

顧暁冬，松谷晃宏，小山二三夫，“Bragg Reflector Waveguide Modulator toward High-Speed Operations and Low Power Consumption”，2014年 第61回応用物理学会春季学術講演会，20a-F8-1 （2014年3月20日，青山学院大学）

田辺賢司，顧暁冬，松谷晃宏，小山二三夫，“Bragg反射鏡導波路からのVortexビームの光ファイバ結合の基礎検討”，2014年 第61回応用物理学会春季学術講演会，20a-F8-2 （2014年3月20日，青山学院大学）

高橋雄太，DalirHamed，島田敏和，松谷晃宏，小山二三夫，“くびれ酸化狭窄構造を用いた面発光レーザ・変調器集積デバイス”， 2014年 第61回応用物理学会春季学術講演会，20a-F8-8，（2014年3月20日，青山学院大学）

佐藤美那，松谷晃宏，曽根正人，“多層膜構造を用いたEDX分析におけるCu中のX線発生領域の測定”，2014年 第61回応用物理学会春季学術講演会，19p-PA2-4 （2014年3月19日，青山学院大学）

松下祥子，小林大斗，松谷晃宏，西岡國生，庄司大，佐藤美那，磯部敏宏，中島章，立間徹，“傾斜ドライエッチングを用いた酸化チタンフォトニック結晶の作製と評価 ”，2014年 第61回応用物理学会春季学術講演会，19p-PA2-6 （2014年3月19日，青山学院大学）

松谷晃宏，渡邊雅彦，小俣有紀子，“ポジ形電子線レジストgL2000の化合物半導体エッチング用Cl_2プラズマ耐性”，2014年 第61回応用物理学会春季学術講演会，19p-PA2-9 （2014年3月19日，青山学院大学）

松谷晃宏，“半導体MEMSプロセス技術センターにおける最近の技術開発の状況について”，微細加工に関する技術サロン会（2013年11月21日，分子科学研究所）

A, Matsutani, K. Nishioka, D. Shoji, M. Sato, D. Kobayashi, T. Isobe, A. Nakajima, T. Tatsuma, and S. Matsushita, “Angled Dry Etching Process of Nb-TiO2 Substrate by SF6 Plasma,” MNC2013 26th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC2013) 7P-7-55, Royton Sapporo, Hokkaido, Japan (November 7, 2013)

佐藤美那，“EDXによるCu分析のための多層膜を用いた電子侵入深さの測定 ”，平成２５年度機器・分析技術研究会，P-17，（2013年9月12日，鳥取大学）

田原康佐，岩崎孝之，松谷晃宏，山口智弘，石橋幸治，波多野睦子，“フッ化グラフェンの磁気抵抗効果”，2013年 第74回応用物理学会秋季学術講演会，18a-B1-3，（2013年9月18日，同志社大学）

顧暁冬，松谷晃宏，小山二三夫，“1550nm-band Low Polarization Dependence Wavelength Demultiplexing Using Bragg Reflector Waveguide”，2013年 第74回応用物理学会秋季学術講演会，19a-P2-11，（2013年9月19日，同志社大学）

田辺賢司，望月翔太，顧暁冬，松谷晃宏，小山二三夫 ，“Bragg反射鏡導波路からのVortexビームの生成とその特性”，2013年 第74回応用物理学会秋季学術講演会，19p-A8-15，（2013年9月19日，同志社大学）

松谷晃宏，髙田綾子，“マイクロ牧場アレイを用いた出芽酵母の培養”，2013年 第74回応用物理学会秋季学術講演会，16p-A2-4，（2013年9月16日，同志社大学）

松谷晃宏，西岡國生，庄司大，佐藤美那，小林大斗，磯部敏宏，中島章，立間徹，松下祥子，“SF_6プラズマによるNb-TiO_2結晶基板のドライエッチング ”，2013年 第74回応用物理学会秋季学術講演会，16p-A2-8，（2013年9月16日，同志社大学）

中濱正統，佐野勇人，坂口孝浩，松谷晃宏，小山二三夫，“熱駆動のマイクロマシンを用いたアサーマル面発光レーザの波長掃引特性II”，2013年 第74回応用物理学会秋季学術講演会，16p-A8-7，（2013年9月16日，同志社大学）

松谷晃宏，髙田綾子，“Ar/F_2気相エッチングにより製作したSiマイクロ流路を用いた大腸菌細胞の輸送”，第4回集積化ＭＥＭＳ技術研究ワークショップ，P1，（2013年7月27日，大阪府立大学）

松谷晃宏，髙田綾子，”マイクロピラー構造を用いた大腸菌と酵母の単一細胞分離とサイズ分離”，2013年第60回応用物理学会春季学術講演会，27p-B6-10 （2013年3月27日，神奈川工科大学）

阿久津友宏，牛尾拓也，松谷晃宏，宮本智之，”液体ガラスを用いた量子構造混晶化の面発光レーザへの適用性に関する研究”，2013年第60回応用物理学会春季学術講演会，29a-B4-8 （2013年3月29日神奈川工科大学）

田原康佐，岩崎孝之，古山聡子，松谷晃宏，波多野睦子，“フッ化グラフェンFETの温度特性”，2013年第60回応用物理学会春季学術講演会，28a-G10-8 （2013年3月28日神奈川工科大学）

古山聡子，田原康佐，岩崎孝之，松谷晃宏，波多野睦子，”イオン液体ゲートを用いたフッ化グラフェン電界効果トランジスタ”，2013年第60回応用物理学会春季学術講演会，28a-G10-9 （2013年3月28日神奈川工科大学）

A. Matsutani, H. Ohtsuki and F. Koyama, “Microfabrication of Silicon by Reactive Ion Etching Using CO_2 Plasma,” DPS2012, P-15, Tokyo, Japan (2012年11月東京大学)

松谷晃宏，“東京工業大学技術部半導体MEMSプロセス技術センターにおける新技術の開発”，微細加工に関する技術サロン会，(2012年11月分子科学研究所)

A. Matsutani, K. Tahara, T. Iwasaki, M. Hatano, “Fluorination Process of Graphene Using Ar/F_2 Plasma,” MNC2012, 1P-7-33, Kobe, Japan (2012年11月神戸メリケンパークオリエンタルホテル)

A. Matsutani and A. Takada, “Single-Cell Isolation and Sizing of Microorganisms by Microenclosure Array with Multipillar Structure,” MNC2012, 1P-7-83, Kobe Japan (2012年11月神戸メリケンパークオリエンタルホテル)

A. Matsutani and A. Takada, “Microfabrication of Single-Cell Isolation Structure on Vertical Cavity Surface Emitting Laser Wafer,” 第 29 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム，SPLN-10, (2012 年 10 月北九州国際会議場)

A. Matsutani, M. Hayashi, Y. Morii, K. Nishioka, T. Isobe, A. Nakajima, S. Matsushita, “Vertical Microfabrication of (001) Rutile TiO_2 Crystal by SF_6-RIE,” APCPST, 2-P115, Kyoto, Japan (2012年10月京都大学)

A. Matsutani, H. Ohtsuki and A. Takada, “Microfabrication of Si based Microchannel for Transport of Bacterial Cells by Ar/F_2 Vapor Etching and Cl_2 Inductively Coupled Plasma Etching,” 11th APCPST, 2-P83, Kyoto, Japan (2012年10月京都大学)

松谷晃宏，大槻秀夫，小山二三夫，”CO_2 プラズマによる Si のドライエッチング”，2012 年秋季第 73 回応用物理学会学術講演会，11a-C11-11，（2012 年 9 月愛媛大学・松山大学）

松谷晃宏，高田綾子，”半導体プロセスを用いた細胞サイズ分離用マイクロピラー構造の製

作”，2012 年秋季第 73 回応用物理学会学術講演会，12p-PB3-3，（2012 年 9 月愛媛大学・松山大学）

島田敏和，松谷晃宏，小山二三夫，”VCSEL とスローライト導波路の横方向集積によるオンチップビーム偏向”，2012 年秋季第 73 回応用物理学会学術講演会，12a-C6-4，（2012 年 9 月愛媛大学・松山大学）

田原康佐，岩崎孝之，松谷晃宏，古山聡子，大野恭秀，松本和彦，波多野睦子，”フッ化グラフェンのキャリア輸送特性”，2012 年秋季第 73 回応用物理学会学術講演会，12p-E3-16，（2012 年 9 月愛媛大学・松山大学）

中濱正統，佐野勇人，坂口孝浩，松谷晃宏，小山二三夫，”スティッキング抑制手法によるマイクロマシン面発光レーザの製作”，2012 年秋季第 73 回応用物理学会学術講演会，12a-PA5-3，（2012 年 9 月愛媛大学・松山大学）

A. Matsutani and A. Takada, “Single-Cell Isolation of Bacteria Using Microenclosure and Its Applications,” RSC Tokyo Conference, A001, Makuhari, Japan (2012年9月幕張メッセ)

林未来郎，守井泰士，磯部敏宏，松下祥子，中島章，松谷晃宏，西岡國生，“ドライエッチングによる(001) TiO_2単結晶のマイクロ規則構造の作製“，日本セラミックス協会2012年年会，3K27，（2012年3月京都大学）

田原康佐，岩崎孝之，松谷晃宏，波多野睦子，“Ar/F_2 プラズマによるフッ化グラフェンの作製・，2012 年春季第 59 回応用物理学関係連合講演会，17p-A3-12,（2012 年 3 月早稲田大学）

淵田　歩，松谷晃宏，小山二三夫，“スローライト導波路における挿入損失評価”，2012 年電子情報通信学会総合大会，C-3-76（2012 年 3 月岡山大学）

宮毛泰光，松谷晃宏，小山二三夫，“角度依存性を有するサブ波長回折格子ミラーの設計と製作”，2012 年電子情報通信学会総合大会，C-3-102（2012 年 3 月岡山大学）

松谷晃宏，髙田綾子，“Ar/F_2 気相エッチングによる細菌細胞輸送用 Si マイクロ流路の形成”，2012 年春季第 59 回応用物理学関係連合講演会，18a-GP1-2，（2012 年 3 月早稲田大学）

Y. Hashizume, Y. Miyake, A. Matsutani, H. Ohtsuki, F. Koyama, “Fabrication and characterization of Si/SiO_2 high contrast grating using nanoimprint lithography”, Photonics West 2012, Paper 8270-7 (2012 年 2 月 San Francisco, California, USA)

松谷晃宏，髙田綾子，“低圧プラズマプロセスによる細菌細胞の分解と細菌細胞を用いた半導体のドライエッチング”，電気学会プラズマ／パルスパワー合同研究会，PST-11-72, PPT-11-73 (2011) pp. 5-8（2011 年 12 月東京工業大学）

A. Matsutani and A. Takada, “Dry Etching of *Escherichia coli* by O_2-, Ar-, Air-, and H_2O-Plasma,” Plasma Conference 2011 (PLASMA2011), 23P004-O,　(2011年11月石川県立音楽堂)

A. Matsutani and A. Takada, “Fabrication of Si based Microchannel by Ar/F_2 Vapor Etching and Plasma Etching,” Plasma Conference 2011 (PLASMA2011), 23P005-O,　(2011年11月石川県立音楽堂)

松谷晃宏，髙田綾子，“Ar/F_2気相エッチングによる極微小径 Si マイクロ流路の形成”，第 24 回化学とマイクロ・ナノシステム研究会，2P12，（2011 年 11 月大阪府立大学）

Akihiro Matsutani, Yuji Hashidume, Hideo Ohtsuki and Fumio Koyama, “Si based High-index-

contrast-grating Structure fabricated by High Temperature Cl_2 Inductively Coupled Plasma Etching using Thermal Nanoimprint Resist Mask," 24th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC2011), 26P-7-59, Kyoto, Japan（2011年10月京都全日空ホテル）

松谷晃宏，橋爪佑樹，大槻秀夫，小山二三夫，"ナノインプリントプロセスと Cl_2-ICP エッチングによる Si-HCG 構造の製作と光学特性の評価"， 2011 年秋季第 72 回応用物理学会学術講演会，2a-ZJ-6，（2011 年 8 月山形大学）

松谷晃宏，髙田綾子，"O_2 および Cl_2 を用いた大腸菌のプラズマエッチング"， 2011 年秋季第 72 回応用物理学会学術講演会，2a-ZJ-7，（2011 年 8 月山形大学）

林未来郎・松谷晃宏・磯部敏宏・松下祥子・中島章，"酸化チタン一電解液系によるワイドフルフォトニックバンドギャップ構造体のシミュレーションによる模索"，日本化学会 4G5-10，（2011 年 3 月神奈川大学）

高梨　裕・加藤智行・松谷晃宏・坂口孝浩・小林功郎・植之原裕行，"凹面鏡を用いた二往復共振器受動モード同期 VCSEL の動作特性"，2011 年電子情報通信学会総合大会，C-4-12（2011 年 3 月東京都市大学）

松谷晃宏，橋爪佑樹，大槻秀夫，小山二三夫，"ナノインプリントレジストをマスクに用いた Cl_2-ICP エッチングによる Si-HCG 構造の形成"，2011 年春季第 58 回応用物理学関係連合講演会，26p-KN-9 (2011)（2011 年 3 月神奈川工科大学）

松谷晃宏，"固体ヨウ素をガスソースに用いた Si の誘導結合型プラズマエッチング" 2010 年度東京工業大学技術部 技術発表会，10，（2011 年 3 月東京工業大学）

松谷晃宏，大槻秀夫，小山二三夫，"固体ソースドライエッチング"，電気学会プラズマ／パルスパワー合同研究会，PST-10-69, pp. 17-22　（2010 年 12 月東京工業大学）

Akihiro Matsutani, Hideo Ohtsuki and Fumio Koyama, "Dry Etching of Si by Solid Source I_2 Inductively Coupled Plasma," 23rd International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC2010), 11D-8-54 (2010) Kokura, Japan

Akihiro Matsutani and Ayako Takada, "High Frequency Single Cell Isolation by 2-D Microenclosure Array Using Multipillar Structure," 23rd International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC2010), 11D-8-106 (2010) Kokura, Japan

松谷晃宏，大槻秀夫，小山二三夫，"I_2-ICP による Si の反応性イオンエッチング"，第 71 回応用物理学会学術講演会，14p-ZG-4，（2010 年 9 月長崎大学）

松谷晃宏，"F_2 系プラズマを用いた Si のドライエッチング"，2010 年度機器・分析技術研究会，P-35 （2010）

松谷晃宏，髙田綾子，"2 次元マイクロ囲いアレイによる大腸菌単一細胞の分離"，第 57 回応用物理学会関係連合講演会，18a-S-8，（2010 年 9 月東京工業大学）

松谷晃宏，大槻秀夫，小山二三夫，"Ar/F_2 プラズマを用いた Si の反応性イオンエッチングにおけるプラズマの特性"，第 57 回応用物理学会関係連合講演会，18a-S-7，（2010 年 3 月東海大学）

A. Matsutani, H. Ohtsuki and F. Koyama, "Dry Etching of Si Using Ar/F_2 Plasma," 2008 International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC2009) 18D-7-50, Sapporo (2009)

松谷晃宏，大槻秀夫，小山二三夫，“Ar/F_2プラズマによる Si のドライエッチング”，第 70 回応用物理学会学術講演会，9a-ZB-4 （2009）

松谷晃宏，大槻秀夫，小山二三夫，“XeF_2プラズマによる Si のドライエッチング”，第 1 回集積化 MEMS 技術研究会ワークショップ，P12 （2009）

松谷晃宏，大槻秀夫，小山二三夫，“XeF_2プラズマによる Si のドライエッチングにおける発光分光観測”， 第 56 回応用物理学会関係連合講演会，1a-N-3 （2009）

A. Matsutani, H. Ohtsuki and F. Koyama, “Vertical and Smooth Dry Etching of Si by XeF_2 Plasma,” International Congress on Plasma Physics (ICPP2008) ESAP3-161, Fukuoka (2008)

A. Matsutani, H. Ohtsuki and F. Koyama, “Dry Etching of Si by XeF_2 Plasma and Investigation of Emission Intensities from Xe and F in XeF_2 Plasma,” 2008 International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC2008) 29D-9-58, Fukuoka (2008)

松谷晃宏，大槻秀夫，小山二三夫，“XeF_2プラズマによる Si の垂直平滑ドライエッチング”，第 69 回応用物理学会学術講演会，2a-A-6 （2008）

科学研究費採択課題への貢献

研究課題/領域番号：21H02041

研究題目：増感型熱利用発電における使用熱量測定と効率の定義

研究種目：基盤研究(B)

研究機関：東京工業大学

研究代表者：松下 祥子（東京工業大学准教授）

研究分担者：松谷 晃宏

研究期間（年度）2021-04-01 – 2025-03-31

研究課題/領域番号：18H03719

研究題目：分割主鏡望遠鏡での直接撮像による木星類似型太陽系外惑星の特性観測

研究種目：基盤研究(A)

研究機関：京都大学

研究代表者：長田 哲也（京都大学教授）

研究分担者：松谷 晃宏，入部 正継（大阪電気通信大学教授），山本 広大（京都大学研究員）

研究期間（年度）2018-04-01 – 2023-03-31

研究課題/領域番号：17K05020

研究題目：2 次元マイクロ凹面鏡アレイとケーラー照明による単一細胞 2 次元アレイ操作技術の開発

研究種目：基盤研究(C)
研究機関：東京工業大学
研究代表者：松谷 晃宏
研究期間（年度）2017-04-01 – 2020-03-31

研究課題/領域番号：26390037
研究題目：半導体微細加工プロセスとクラドニ図形の融合による細胞の輸送と単一分離技術の開発
研究種目：基盤研究(C)
研究機関：東京工業大学
研究代表者：松谷 晃宏,
連携研究者：髙田 綾子（東京工業大学技術専門員）
研究期間（年度）2014-04-01 – 2017-03-31

研究課題/領域番号：26630125
研究題目：新規２次元ダイヤモンドシート膜による超低消費電力デバイスの創製
研究種目：挑戦的萌芽研究
研究機関：東京工業大学
研究代表者：波多野 睦子（東京工業大学教授）
連携研究者：岩崎 孝之（東京工業大学助教），松谷 晃宏
研究期間（年度）2014-04-01 – 2016-03-31

研究課題/領域番号：25420707
研究題目：発光抑制する電気化学フォトニック結晶の作製
研究種目：基盤研究(C)
研究機関：東京工業大学
研究代表者：松下 祥子（東京工業大学准教授）
研究分担者：松谷 晃宏
研究期間（年度）2013-04-01 – 2017-03-31

研究課題/領域番号：23510141
研究題目：半導体プロセスによる極狭スリット細胞分離マイクロ流路形成と単一細胞分離構造の融合
研究種目：基盤研究(C)
研究機関：東京工業大学
研究代表者：松谷 晃宏

連携研究者：髙田 綾子（東京工業大学技術専門員）
研究期間（年度）2011 – 2013

研究課題/領域番号：22226008
研究題目：超低消費電力光配線のための集積フォトニクスの進化
研究種目：基盤研究(S)
研究機関：東京工業大学
研究代表者：小山 二三夫（東京工業大学教授）
研究分担者：坂口 孝浩（東京工業大学助教），松谷 晃宏
研究期間（年度）2010-04-01 – 2015-03-31

研究課題/領域番号：22246047
研究題目：面発光レーザ集積アレイの波長エンジニアリング
研究種目：基盤研究(A)
研究機関：東京工業大学
研究代表者：小山 二三夫（東京工業大学教授）
研究分担者：坂口 孝浩（東京工業大学助教），松谷 晃宏
研究期間（年度）2010

研究課題/領域番号：20360167
研究題目：超高速光信号誤り訂正技術に関する研究
研究種目：基盤研究(B)
研究機関：東京工業大学
研究代表者：植之原 裕行（東京工業大学教授）
連携研究者：松谷 晃宏，小西 毅（大阪大学准教授），和田 尚也（情報通信研究機構）
研究期間（年度）2008 – 2010

研究課題/領域番号：19206012
研究題目：面発光レーザフォトニクスの新展開
研究種目：基盤研究(A)
研究機関：東京工業大学
研究代表者：小山 二三夫（東京工業大学教授）
研究分担者：坂口 孝浩（東京工業大学助教），松谷 晃宏
研究期間（年度）2007 – 2009

研究課題/領域番号：18510108

研究題目：水蒸気プラズマと固体ソースプラズマを用いた蛍石のドライエッチング技術の基礎研究
研究種目：基盤研究(C)
研究機関：東京工業大学
研究代表者：松谷 晃宏
研究期間（年度）2006 – 2007

研究課題/領域番号：17068006
研究題目：中空光導波路における巨大可変特性発現とその光ネットワークデバイスへの展開
研究種目：特定領域研究
研究機関：東京工業大学
研究代表者：小山 二三夫（東京工業大学教授）
研究分担者：坂口 孝浩（東京工業大学助教），松谷 晃宏
研究期間（年度）2005 – 2008

研究課題/領域番号：17360176
研究題目：光データ処理による超高速光信号誤り検出に関する研究
研究種目：基盤研究(B)
研究機関：東京工業大学
研究代表者：植之原 裕行（東京工業大学准教授）
研究分担者：松谷 晃宏，小西 毅（大阪大学准教授），和田 尚也（情報通信研究機構）
研究期間（年度）2005 – 2007

課題番号：04919059
研究題目：反応性イオンビームエッチによる面発光レーザ用極微共振器の低損傷加工に関する研究
研究種目：奨励研究(B)
研究機関：東京工業大学
研究代表者：松谷 晃宏
研究期間（年度） 1992

課題番号：02918036
研究題目：面発光レーザ用極微誘電体多層膜反射鏡に関する研究
研究種目：奨励研究(B)
研究機関：東京工業大学

研究代表者：松谷 晃宏
研究期間（年度） 1990

謝辞

本論文をまとめるにあたり，ご指導いただきました主査の進士忠彦教授，副査の初澤毅教授，西迫貴志准教授に深く感謝申し上げます。研究室所属時代にご指導いただきました伊賀健一東京工業大学元学長・栄誉教授，小山二三夫教授，植之原裕行教授，宮本智之准教授に深く感謝申し上げます。また，共用クリーンルームであるメカノマイクロプロセス室をご利用いただいた皆様，特に本論文で取り上げた研究でお世話になりました東京工業大学の波多野睦子教授，福島孝典教授，松下祥子准教授，京都大学の長田哲也教授，栗田光樹夫准教授，木野勝助教，防衛大学校の内田貴司教授に深く感謝申し上げます。

また，日常から部門やクリーンルーム運営への建設的な提案なども含め積極的に協力していただいたオープンファシリティセンターマイクロプロセス部門の佐藤美那技術職員，遠西美重技術職員，藤本美穂技術職員，星野弥生技術支援員，平野明子技術職員，過去の部門の職員および西沢望助教（現北里大学講師）に深く感謝申し上げます。また，高田綾子オープンファシリティセンターバイオ部門長には科学研究費の連携研究者としてお世話になりましたことに深く感謝申し上げます。

副査の初澤毅教授にはクリーンルームの管理運営にあたりメカノマイクロプロセス室運営委員長としてたいへんお世話になりましたこと，深く感謝申し上げます。また，東京工業大学精密工学研究所，科学技術創成研究院未来産業技術研究所の歴代の所長および事務係の皆様には多大な援助をいただきました。深く感謝申し上げます。部門の運営に多大なるご理解と援助をいただきました歴代の技術部長と渡辺治オープンファシリティセンター長，中村吉男オープンファシリティセンター副センター長，オープンファシリティセンター研究基盤戦略室の皆様に深く感謝申し上げます。