

令和 5 年 6 月 18 日現在

機関番号：14303

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2021～2022

課題番号：21K18618

研究課題名(和文) 一様エネルギーを持つ化学的活性負イオンによる正確で上質なナノプロセス方式への転換

研究課題名(英文) Development of novel nano-processing methods using chemically active negative ions with uniform energy

研究代表者

比村 治彦(Himura, Haruhiko)

京都工芸繊維大学・電気電子工学系・教授

研究者番号：30311632

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 5,000,000円

研究成果の概要(和文)：スマートフォンなどの電子機器の小型化や高性能化に伴い、それら電子機器内で使われる部品の大きさはナノメートル(髪の毛の太さの1000分の1程度)にまで微細化されている。このような微細な部品の加工は原子が10層程度重なりあうレベルの小ささのため、この加工には反応性の原子やイオンが用いられるのが現在の主流である。しかし、これら反応性粒子をプラズマから作り出すと、それらの粒子、特に反応性イオンが様々な速度をもつ。そこで、本研究では、この速度のバラツキを抑えて均一にする加工方法を探求した。研究の結果、900MHz帯の高周波を用いるプラズマ生成から均一なイオンを引き出すことができそうなことを突き止めた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

世界はテレワークやビッグデータの時代に入っている。このために、人類は21世紀で大量のメモリや電子機器を必要としている。同じスペースで大容量メモリを作り出すためには、メモリの形を2次元平面型から3次元立体型にする必要がある。ここに新しい微細立体加工技術が求められており、そのための一つが本研究テーマであった。本研究でそのような新しい微細立体加工技術を実現する端緒につくことができた。この研究をさらに進化させて、カーボンニュートラルとも併せたタイムスケジュールで実機へと展開させる目途も得た。

研究成果の概要(英文)：As electronic devices such as smartphones become smaller and more sophisticated, the size of the components used in these devices has been reduced to nanometers (about 1/1000th the thickness of a human hair). The processing of such minute parts is so tiny that atoms overlap by about ten layers, so reactive atoms and ions are currently the mainstays for this processing. However, when these reactive particles are produced from plasma, they, especially reactive ions, have various velocities. Therefore, in this study, we explored a processing method to reduce this velocity variation and make it uniform. As a result of our research, it may be possible to extract uniform ions from plasma generation using a radio frequency in the 900 MHz bands.

研究分野：プラズマ科学

キーワード：高周波プラズマ ナノプロセス装置 反応性粒子 3次元微細加工技術

### 1. 研究開始当初の背景

既存の反応性プラズマを用いたプラズマCVD/ALD方式では、図1のように、プラズマ中に含まれる反応性ラジカル、イオン、電子、中性粒子の全粒子種がターゲットと化学的に、一部は物理的にも反応する。また、プラズマ生成室内にはプラズマ生成に必要なエネルギーが投入され続けている。このため、プラズマは原理的に熱平衡状態に緩和しない。したがって、プラズマのエネルギーと数密度には、時間的かつ空間的揺らぎ(揺動)が必ず存在する。図2のように、たとえ揺動が存在しても、その揺動の特性長が、ターゲットの大きさよりも十分に短い場合、既存のプラズマCVD/ALD方式はプロセスで許容される。

しかしながら、原子層スケールの微細加工では、そのプラズマ揺動が相対的に顕在化してくる。加えて、反応性イオンやラジカルの挙動を正確に制御できていないため、原子層スケールでの均一化すら困難であるのが現状である。

### 2. 研究の目的

この限界を打ち破るための方法として、既存のプラズマCVD/ALD方式から脱却して、揺動がなく均一な数密度をもつ反応性ビームイオン方式へと方式を転換すればよいことに着想できる。

このために本研究では高周波でパルス的にプラズマを作り出すものの、エネルギーの供給を一時的に

止める。この後、生成されたプラズマ内で反応性の高い負イオン(本研究では、主として水素負イオンを試験したが、酸素負イオンも試験した。)を作り出し、この負イオンが熱緩和する前に、熱エネルギーの1000倍の加速エネルギーでプラズマソースから引き出す。その後、その負イオンだけをターゲットに向かって進ませながら、ターゲットに当たる直前で減速させる方式を実験的に試験した。

### 3. 研究の方法

図3のように、13.56 MHzの高周波を装置に取り付けられている石英窓を介して、プラズマ生成室内に投入する方法を用いた。実験では、900 MHz帯のマイクロ波も用いた。このマイクロ波の場合は、アルミナ製のセラミックス盤を介して、プラズマ生成室内にマイクロ波を投入した。それぞれの電源には、固有の整合器が取り付けられており、その整合器でプラズマ生成室内に投入される高周波効率を調整した。ガスの導入については、高速電磁バルブを用いている。また、ガスについては、アルゴンと混合された混合ガスも用いた。図4

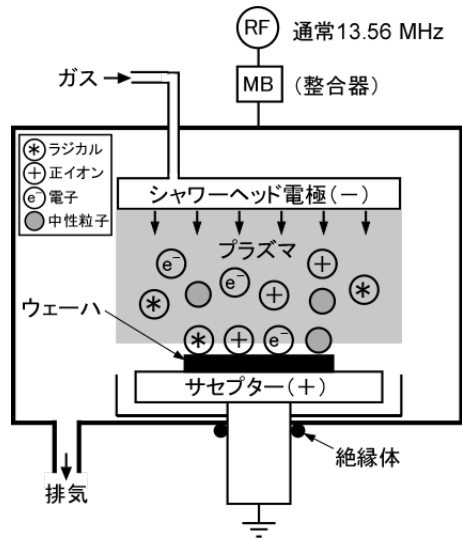


図1 CVDを例としたプラズマプロセッシングにおける典型的なダイレクトプラズマ方式. 粒子種毎のフラックス  $nv$  ( $/m^2s$ )を精密に制御することが難しい。

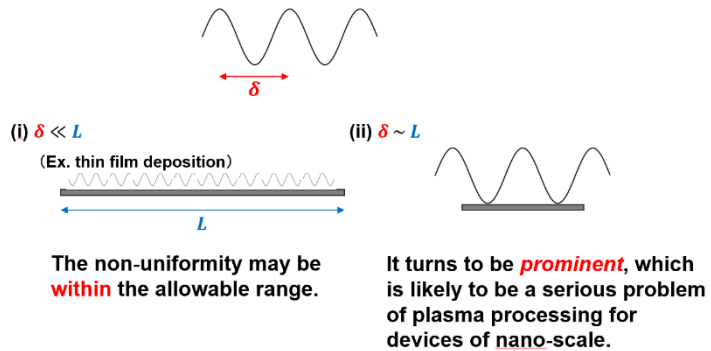


図2 ナノメートルのスケール長では、ゆらぎが相対的に顕在化する。

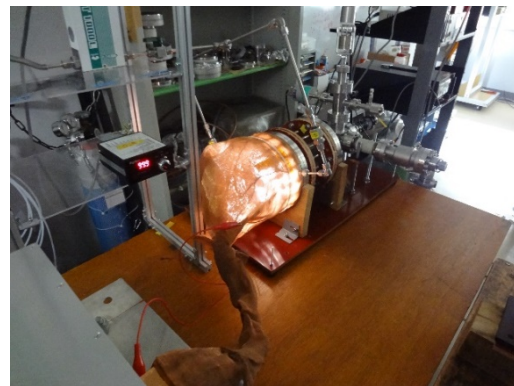


図3 13.56 MHzでのプラズマ着火の様子。同様の着火を860 MHzでも試みた。

は、プラズマソースの横断面鳥観図とオペレーションモードの一例である。

図4の左側から高周波がプラズマ生成室内に投入されることで、プラズマが着火する。そのプラズマ

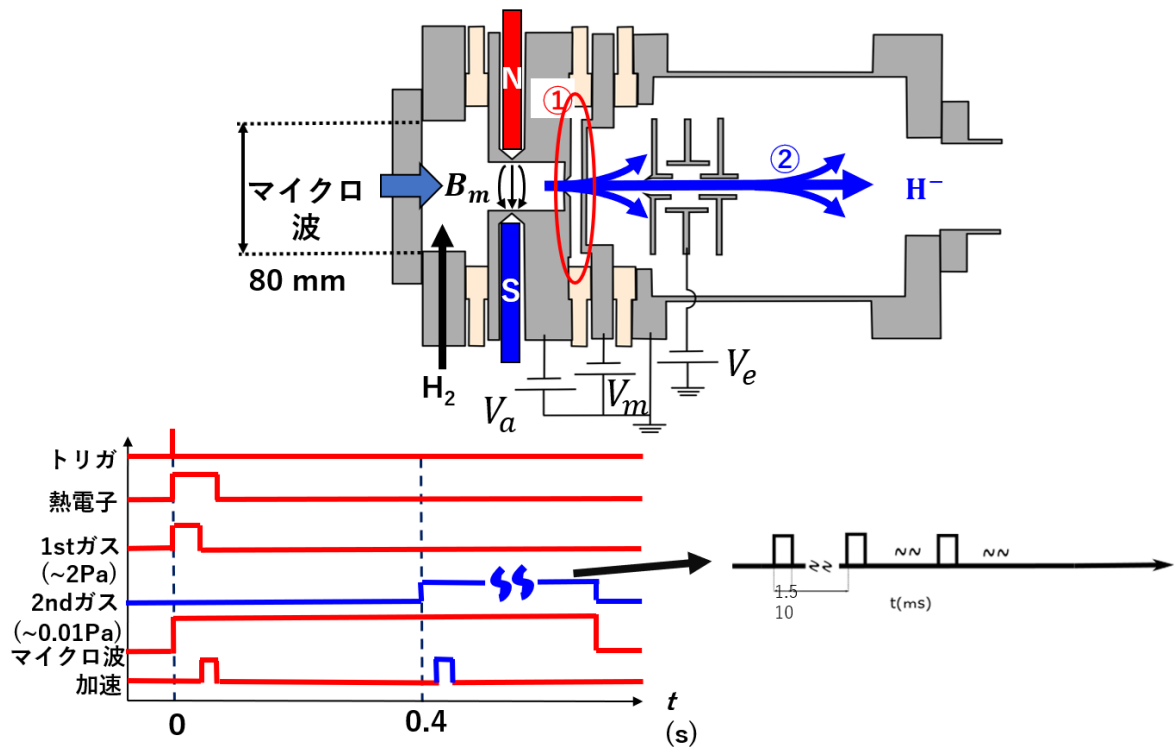


図4 プラズマソースの断面鳥観図とオペレーションモードの例.

生成室の下流に横磁場が印加されている。この横磁場によって、プラズマは原理的にプラズマ生成室内に閉じ込められる一方で、振動励起分子などの中性粒子はこの横磁場領域を通過して右側に通過する。また、プラズマ生成室内の一部の電子がこの横磁場領域をドリフトする。この電子が振動励起分子と反応することで、負イオンが生成される。その負イオンと電子が右側へと引き出されていく途中で、電子は電子除去用磁石によってその軌道が曲げられてチェンバーに損失する。結果として、負イオンだけが右側に引き出されることになる。

#### 4. 研究成果

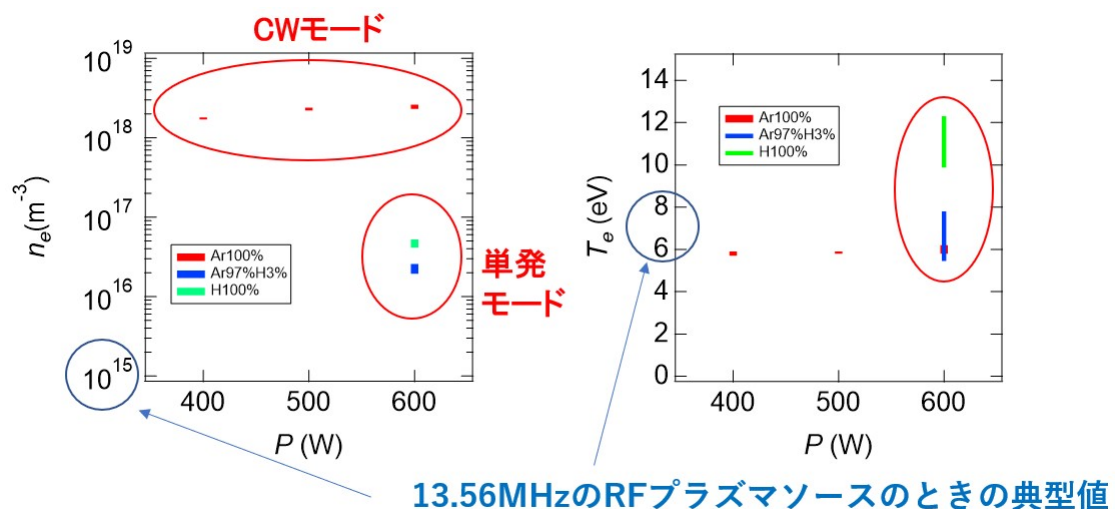


図5は、13.56 MHzと900 MHz帯の高周波を用いた場合のプラズマ生成室内での電子密度と電子温

図5 13.56 MHzと900 MHz帯のときのプラズマソースでの電子密度と電子温度の測定例.

度の高周波パワー依存性を表している。ガス種はアルゴン100%、アルゴン97%と水素3%、そして、水素100%が用いられている。CWモードと書かれているデータ点は、プラズマ生成室内に高周波を連続的に投入した場合に得られたものである。過去の知見通り、周波数が上がるにつれてプラズマ密度が上がり、プラズマ温度が低下している。また、得られている密度と温度の値も一般的なプラズマCVD/ALD方式に用いられているプラズマと同程度である。したがって、小型プラズマ源でのプラズマ生成は成功したと判断される。

生成された負イオン量については、データ値のみにとどめるが、 $10^{17-18}$ のフラックス量になっている。この実験ではセシウムを用いない体積生成方式を使用している。したがって、このフラックス量について定量的な大小は評価できない。今後、得られたフラックス量は、レーザー脱離法によって、クロスチェックされる。引き出しについては、現在の実験装置では、引き出し電極間の絶縁破壊問題が完全にクリアされていない。このため、これについては今後の課題として残されている。まとめると、2年間の開発期間で負イオン生成の段階までは完了した。引き出し時の問題をクリアして、実際にターゲットに照射する実験は、今後の課題である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kanki Takashi, Himura Haruhiko	4. 巻 61
2. 論文標題 Simulations of novel compact separator for extracting specific reactive ions from large plasma source	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 S11004 ~ S11004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac5a98	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ninomiya Takaya, Sanpei Akio, Niimoto Miharuru, Inagaki Shinichiro, Himura Haruhiko	4. 巻 61
2. 論文標題 Three-dimensional reconstruction of large non-uniform surface wave plasma using multi-lens array attached to a single viewing port	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac647f	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Haruhiko Himura
2. 発表標題 What's two-fluid plasma?
3. 学会等名 京大ユニットセミナー（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Kanki, H. Himura
2. 発表標題 Simulations of novel compact separator for extracting specific reactive ions from large plasma source
3. 学会等名 Dry Process Symposium (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 C. Katsuki, Y. Fujimoto, H. Himura, A. Sanpei, T. Kanki, K. Tsumori, H. Nakano
2. 発表標題 First result of extracting not only negative but also positive ion beams from RF source for investigating O- and H- applied to novel nano scale processing
3. 学会等名 Dry Process Symposium (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 W. Okauchi, T. Tanaka, H. Himura, A. Sanpei, and K. Tsumori
2. 発表標題 Dependences of magnetic filter attached to RF source on producing negative ions for exploring novel nanoscale processing
3. 学会等名 Dry Process Symposium (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中達也、比村治彦、三瓶明希夫、岡内航、藤本佑弥、香月悠良
2. 発表標題 新型ナノプロセス検証装置における負イオン密度測定
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西尾昂、岡田敏和、中島雄太郎、稲垣泰一郎、比村治彦、神吉隆司、三瓶明希夫
2. 発表標題 低温プラズマから反応性イオンのみを引き出す小型選別器の開発研究
3. 学会等名 応用物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 二宮貴哉、三瓶明希夫、新元美晴、稲垣泰一郎、比村治彦
2. 発表標題 プラズマCVD/ALD実機に取り付ける一様性診断システムの開発研究
3. 学会等名 応用物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Niimoto, T. Ninomiya, S. Inagaki, A. Sanpei, H. Himura
2. 発表標題 Experimental test of passively determining three-dimensional distributions of reactive species contained in surface wave plasmas
3. 学会等名 Dry Process Symposium (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Himura, T. Kanki, T. Tomotsu, W. Okauchi, C. Katsuki, A. Sanpei
2. 発表標題 Development of negative ion source using microwave plasma
3. 学会等名 Dry Process Symposium (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岡内航、比村治彦、三瓶明希夫、神吉隆司、香月悠良、鞆津匠人
2. 発表標題 マイクロ波を用いた小型負イオンソースの開発と磁気フィルターの最適化
3. 学会等名 2022プラズマ核融合学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 香月悠良、岡内航、鞆津匠人、比村治彦、三瓶明希夫、神吉隆司
2. 発表標題 ナノプロセスに用いるためのマイクロ波プラズマの生成・負イオン引き出し・偏向実験
3. 学会等名 2022プラズマ核融合学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鞆津匠人、比村治彦、三瓶明希夫、神吉隆司、香月悠良、岡内航
2. 発表標題 マイクロ波を用いた小型負イオンソースの開発とレーザー光脱離法による負イオン生成量の測定
3. 学会等名 2022プラズマ核融合学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 西尾昂、比村治彦、三瓶明希夫、神吉隆司、香月悠良、鞆津匠人、岡内航
2. 発表標題 小型選別器による低温プラズマからの反応性負イオンの引き出しと選別に関する実験的研究
3. 学会等名 2022プラズマ核融合学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 比村治彦
2. 発表標題 京都工繊大での高周波を用いた小型負イオン生成装置の現状
3. 学会等名 負イオン研究会
4. 発表年 2022年



〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 プラズマ処理装置	発明者 守屋剛、比村治彦	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、110139592	出願年 2021年	国内・外国の別 外国

〔取得〕 計0件

〔その他〕

京都工芸繊維大学プラズマ基礎工学研究室 <a href="http://nuclear.es.kit.ac.jp/">http://nuclear.es.kit.ac.jp/</a>
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	三瓶 明希夫  (Sanpei Akio)  (90379066)	京都工芸繊維大学・電気電子工学系・准教授   (14303)	
研究分担者	神吉 隆司  (Kanki Takashi)  (40524468)	海上保安大学校(国際海洋政策研究センター)・国際海洋政策研究センター・教授   (85406)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------