

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26790066

研究課題名(和文)高密度イオン軌道ベクトル制御プラズマによる高速・高アスペクト比エッチングの創成

研究課題名(英文)High speed and high aspect ratio reactive ion etching by using high density and ion orbit controlled plasma

研究代表者

本村 大成 (MOTOMURA, Taisei)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・製造技術研究部門・研究員

研究者番号：00635815

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、高速プラズマエッチング(50um/min)、アスペクト比2(直径20um、深さ50um)のプロセスを最終目標とし、高密度プラズマおよびイオン軌道ベクトル制御法の両方を用いる手法を提案した。実証実験の結果、プラズマ密度1立方cmあたり10の12乗を達成し、シリコンエッチング速度6.0um/minを得た。アスペクト比2以上を得るエッチング条件を見出したが、最終目標である高速かつ高アスペクト比の両立を実現するプロセスは今後の課題である。改善策として、高い真空コンダクタンスを持つ実験器の整備、高ガス圧力運転および酸素ガスの添加が有望であると考えている。

研究成果の概要(英文)：In this study, combination of high density plasma production and ion orbit control method was suggested for the achievement of the high speed plasma etching process up to 50um/min with the aspect ratio of two (20um diameter and 50um depth). From the experimental results, high density plasma production of  $>10^{12}$  cm<sup>-3</sup> and etching speed of 6.0um/min were achieved under the experimental conditions of the SF6 gas pressure of 0.2 Pa and the RF input power of 500 W. A plasma process condition provided the high speed and high aspect ratio etching will be studied in the near future. An experimental setup having high vacuum conductance, a high gas pressure operation and an additive gas (e.g., O2) control system will be key issues for next study.

研究分野：プラズマエレクトロニクス

キーワード：プラズマ エッチング

1. 研究開始当初の背景

高速プラズマエッチングによって微細加工を実現できれば、多層化集積回路の配線に、シリコン貫通電極 (Through Silicon Via: TSV) を応用できると考えられる。TSV を用いると、従来配線に比べて配線長を短くできるため、高速通信と省エネ化が実現できる。また、集積回路を多機能化しても専有面積を最小に留めることが可能になる (図1 参照)。

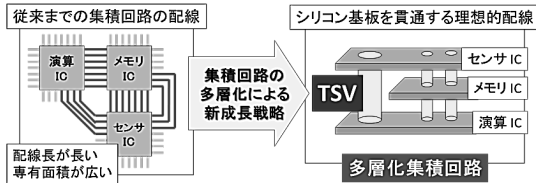


図1: TSVの適用による集積回路の多層化のイメージ

2. 研究の目的

本研究では、背景で述べたような多層化集積回路の実現に貢献できるシリコン貫通孔を短時間で作成可能なエッチングプロセスの開発を最終的な目的とした。

従来のエッチング方法では、表1にまとめた理由により、高いアスペクト比 (Aspect Ratio: AR = 孔の深さ/直径) を持つ TSV の高速製作が困難であり、当然ではあるが実現のためには多くの知識と経験が必要になってくる。表1(a) エッチング速度は速いが、AR ~ 1 となることが多い、(b) プラズマを連続照射すると、速度と AR の両立が難しいとされている、(c) 連続法と保護膜形成工程を繰り返す反復法では、高 AR は実現できるが、工程の反復に時間を要することでエッチングの全加工時間が長くなるという問題が生じている。さらに、加工原理上不可避な側壁の凹凸が、次工程のメッキ流し込みの際にメッキの接着不良を引き起こす。そこで、本研究では、高速 (50 μm/min, 連続法の 500 倍) に、AR > 2.5 (直径 20 μm) の TSV を製作するために、以下のことを行う。

表1: (a)-(c) 従来のエッチング方法 vs (d) 本手法

エッチング方法	(a) 液体法	(b) 連続法	(c) 反復法	(d) 本手法
エッチング孔の断面形状				
エッチング速度	○	△	△	○
アスペクト比	×	△	○	○

3. 研究の方法

50 μm/min の高速エッチングのために、高密度プラズマを用いる。高密度プラズマ中に大量に含まれる電子は、エッチング反応の律速となるラジカルの密度を増加させるように作用する。高密度プラズマを生成するた

	(a)ヘリコン波共振プラズマ	(b)一般的なプラズマ
プラズマ生成メカニズム		
プラズマ密度 (m <sup>-3</sup> )	10 <sup>14</sup> - 10 <sup>19</sup>	10 <sup>14</sup> - 10 <sup>16</sup>
ガス圧力 (Pa)	0.3	30
磁力線	エッチング孔の底面に向いている	なし

図2: (a) ヘリコン波共振プラズマ vs (b) CCP

めに、一般的な高周波電圧によるプラズマ生成方式 (<10<sup>15</sup> m<sup>-3</sup>) (引用文献①) や、電磁波によるプラズマ生成方式 (<10<sup>17</sup> m<sup>-3</sup>) (引用文献②) に代えて、本研究では、ヘリコン波共振現象を利用したプラズマ生成方式 (<10<sup>19</sup> m<sup>-3</sup>) (引用文献③) を用いる。ここでは、ヘリカル状の電磁波 (ヘリコン波) が共振した時に生成されるプラズマを、ヘリコン波共振プラズマと呼んでいる。

本研究では、AR > 2.5 のエッチング孔製作のために、イオンの軌道ベクトルを制御することを提案する。本手法では、エッチング孔の底面にイオンを効率的に誘導することにより、孔の底面でエッチングが促進され、高 AR エッチング孔が製作可能となると考えている。イオンの軌道ベクトルを制御するには、「イオンにとっての障害物となるガス粒子を減らす」ことに加え、「イオンの軌道を制御する磁力線をエッチング孔の底面に向けて制御する」ことが重要となる。

本研究では、高密度プラズマ生成に作用するヘリコン波の共振現象 (定在波励起) をエッチングに適用することで、ヘリコン波共振プラズマによる高速エッチングを実現する。低圧ガス環境 (<0.3 Pa) を実現し、イオンの衝突確率を下げることで、ウエハ上面シース内でのイオン散乱を抑制する。こうすることで、イオンの軌道ベクトルをエッチング孔の底面に向けて制御できるようになり、高 AR エッチングを実現する新提案のイオン軌道ベクトル制御法が実現可能になる (図3 参照)。

(a)ヘリコン波共振プラズマ 中性粒子密度:低	(b)一般的なプラズマ 中性粒子密度:高
<p>I. 低圧ガス環境</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>→ イオンと中性粒子の衝突確率の減少</li> <li>→ イオン散乱が抑制される</li> <li>→ イオンが側壁に当たりにくい</li> </ul> <p>II. エッチング孔に平行な磁力線</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>→ イオンサイクロトロン運動</li> <li>→ イオン軌道が底面に向き高アスペクト比</li> </ul>	<p>I. 高圧ガス環境</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>→ イオンと中性粒子の衝突確率の増加</li> <li>→ イオンが散乱する</li> <li>→ イオンが側壁に当たりやすい</li> </ul> <p>II. 無磁場</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>→ イオンの運動方向が定まらない</li> <li>→ 側壁に当たるため低アスペクト比</li> </ul>

図3: イオン軌道ベクトル制御法の概要

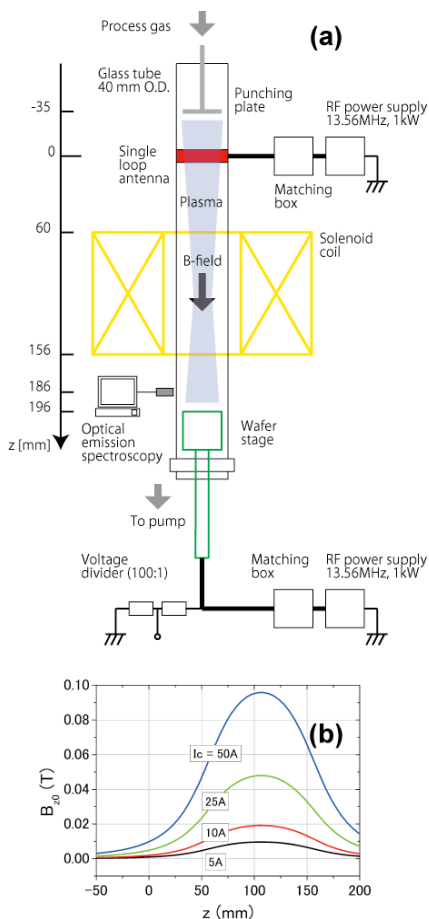


図 4 : (a) 実験システム, (b) 外部ソレノイドによって発生する装置中心軸上の磁場強度 (引用文献④より抜粋).

高密度プラズマおよびイオン軌道ベクトル制御法の両方を実現するために、図 4 のような装置を製作した。

高密度プラズマの発生のために、13.56MHz の高周波電力を投入できるパルス放電が可能なシステムを用いた。また、ヘリコン波の伝播条件を満たすために、電子サイクロトロン共鳴が生じるように高周波アンテナを巻いた。加えて外部磁場を印加できるように、ソレノイドコイルを設置した。またイオン軌道ベクトルをウエハの法線方向と平行方向に制御するために、可動式ウエハホルダ内に永久磁石を埋設させた。これらの設備により得たエッチングプラズマの密度を測定するために、径方向から静電プローブを挿入し、プローブ電圧-70V において、イオン飽和電流を測定した。真空ポンプを用いて、絶縁管内を  $10^{-4}$ Pa 以下に排気し、エッチングガス  $\text{SF}_6$  を用いて、ウエハシース内のイオンが背景ガスと無衝突となるように、0.2Pa 程度でガス圧力を制御した。またセルフバイアス電圧は、プラズマ照射中で-150V 程度になるように制御した。

#### 4. 研究成果

実験の結果、図 5(a)に示すように、 $I_c \sim 10$ A 以上において、ウエハ上面 1cm でイオン飽和

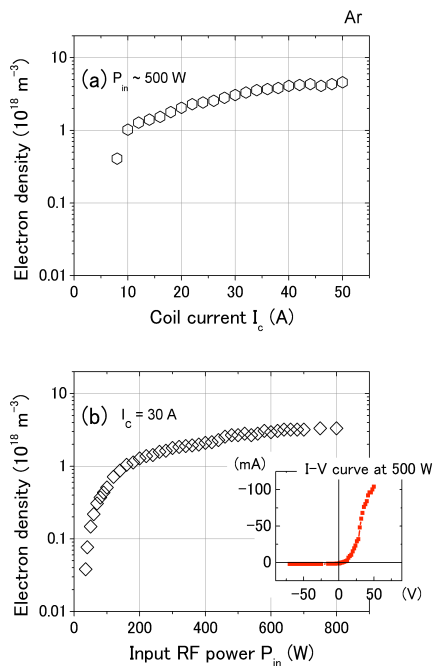


図 5 : (a) 電子密度  $n_e$  の磁場コイル電流  $I_c$  依存性,  $P_{in} \sim 500$ W, 10%パルス放電, (b) 電子密度  $n_e$  の投入 RF 電力  $P_{in}$  依存性,  $I_c = 30$ A. ウエハステージへの投入 RF 電力は 20W. Ar 放電. (引用文献④より抜粋)

電流が測定された。それ以下のジバコイル電流値では、イオン飽和電流は測定下限値以下となった。この結果は、絶縁管半径とイオンラーマー半径が同程度になる磁場コイル電流値である  $I_c \sim 10$ A において、プラズマソースからウエハまでのプラズマ輸送が効率的になることに依ると考えられる。そこでウエハまでのプラズマ損失が低減されプラズマ輸送が効率的となる  $I_c = 30$ A を典型的な実験条件として採用した。その結果、投入電力 200W 以上で、プラズマ密度  $10^{12}\text{cm}^{-3}$  を達成した (図 5(b)を参照)。参考に図 5 (b) 中に  $P_{in} = 500$ W で測定した I-V カーブを示す。この場合、電子温度はおよそ  $4.5\text{eV}$  となった。電子温度が通常よりも若干高いと考えられる理由は、絶縁管の直径が 40mm であり、プラズマ損失が大きいことに依ると考えられる。

図 5 の結果により、Ar 放電において電子密度  $10^{12}\text{cm}^{-3}$  を達成したので、同条件で放電ガスを  $\text{SF}_6$  に変更し、エッチングテストを行った。その結果を図 6 に示す。この場合のエッチング速度は  $0.3\mu\text{m}/\text{min}$  程度と目標に掲げたエッチング速度の 1/10 以下となった。

図 4 のコイル下端-ウエハ面距離 40mm を 10mm まで短くし、シリコン基板に DC バイアス-450V を印加したところ、図 7 のように、シリコンエッチング速度が 20 倍以上である  $6.0\mu\text{m}/\text{min}$  を得た。ウエハバイアスがエッチング速度の増加に大きく寄与すると同時に、

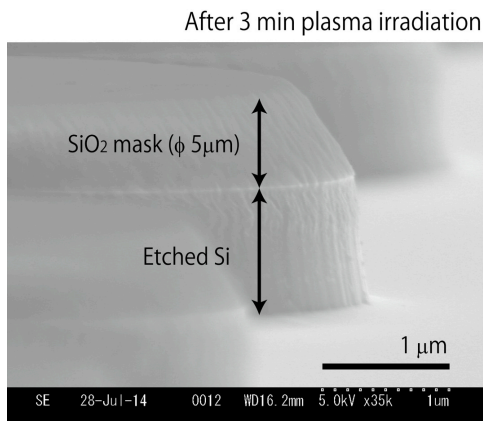


図 6 : 3min プラズマ照射後の SEM イメージ。  
 $P_{in} \sim 500W$ , 10%パルス放電,  $I_c = 30A$ , ウエハ  
 ステージへの投入 RF 電力 20W, Ar 放電. 酸化  
 膜マスク形状は直径 5 $\mu m$  のドットパターンと  
 した (引用文献④より抜粋).

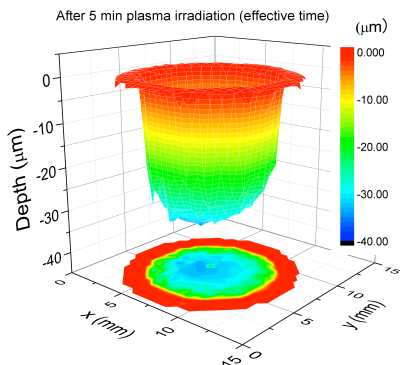


図 7 : 5min プラズマ照射後の SEM イメージ。  
 $P_{in} \sim 500W$ , 10%パルス放電,  $I_c = 30A$ , DC バ  
 イアス -450V でベアシリコンをエッチングした  
 結果を示す (引用文献⑤より抜粋).

コイル下端-ウエハ面距離も重要であるとの  
 結果を得た。これは、ウエハ近傍までプラズ  
 マを効率的に輸送するために、絶縁管のサイ  
 ズに応じたコイル下端-ウエハ面距離、すな  
 わちプラズマ損失を十分に考慮した装置設計  
 が必要であることを意味している。

まとめると、 $10^{12}cm^{-3}$  以上の高密度プラズ  
 マを用いて、プラズマソースからウエハまで  
 プラズマ損失の低減、すなわちプラズマ輸送  
 の効率化が実現できれば、本試作システムに  
 おいても、シリコンエッチング速度  
 $6.0\mu m/min$  が達成できることがわかった。ま  
 た、アスペクト比 2 以上を得るエッチング条  
 件を見出したが、高速かつ高アスペクト比の  
 両立を実現するプロセスの実現は今後の課  
 題である。その解決策として、高い真空コン  
 ダクタンスを持つ実験器の整備、高ガス圧力  
 運転および酸素ガスの添加が有望であると  
 考えている。

<引用文献>

- ① 例えば J.W. Coburn, et al., J. Appl.  
 Phys. **50**, 3189 (1979).

- ② 例えば S. Tachi, et al., Appl. Phys, Lett  
**52**, 616 (1988).  
 ③ T. Motomura, et al., Phys. Plasmas **19**,  
 043504 (2012); JAXA-RR-09-003, pp  
 58-66 (2010).  
 ④ T. Motomura, K. Takahashi, Y.  
 Kasashima, F. Uesugi and A. Ando: J.  
 Vac. Soc. Jpn., 58 (2015) 392.  
 ⑤ T. Motomura, K. Takahashi, Y.  
 Kasashima, K. Kikunaga, F. Uesugi and  
 A. Ando: J. Vac. Soc. Jpn., 59 (2016)  
 11.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Taisei Motomura, Kazunori  
 Takahashi, Yuji Kasashima, Kazuya  
 Kikunaga, Fumihiko Uesugi and  
 Akira Ando, Evaluation of SF<sub>6</sub>  
 reactive ion etching performance with a  
 permanent magnet located behind the  
 substrate based on a simple design  
 concept, Journal of the  
 Vacuum Society of Japan, 査読あり,  
 59 巻, 2016, 11-15. DOI:  
<http://doi.org/10.3131/jvsj2.59.11/>  
 ② Taisei Motomura, Kazunori  
 Takahashi, Yuji Kasashima,  
 Fumihiko Uesugi and Akira Ando,  
 Effect of external magnetic field on  
 compact inductively-coupled reactive  
 ion etching reactor, Journal of the  
 Vacuum Society of Japan, 査読あり,  
 58 巻, 2015, 392-396. DOI:  
<http://doi.org/10.3131/jvsj2.58.392/>

[学会発表] (計 2 件)

- ① Taisei Motomura, Kazunori  
 Takahashi, Yuji Kasashima,  
 Fumihiko Uesugi and Akira Ando,  
 Plasma discharge characteristics in  
 compact SF<sub>6</sub> radio-frequency plasma  
 source for plasma etching application,  
 ICRP-9/GEC-68/SPP-33, 2015.10.13,  
 Hawaii (United States)  
 ② 本村大成、高橋和貴、笠嶋悠司、安藤晃、  
 上杉文彦、クンプアンソマワ、原史朗、  
 超高速エッチングのための高密度プラ  
 ズマについて、第 2 回産総研プラズマワ  
 ークショップ、2014.04.14, 鳥栖市民文  
 化会館 (佐賀県鳥栖市)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

特にありません。

[その他]

ホームページ等

特にありません。

6. 研究組織

(1)研究代表者

本村 大成 (MOTOMURA, Taisei)  
国立研究開発法人 産業技術総合研究所  
製造技術研究部門 研究員  
研究者番号： 00635815

(2)研究分担者

(3)連携研究者

(4)研究協力者

高橋 和貴 (TAKAHASHI, Kazunori)  
安藤 晃 (ANDO, Akira)