

氏 名 平 山 昌 樹
授 与 学 位 博士 (工学)
学 位 授 与 年 月 日 平成9年3月25日
学 位 授 与 の 根 拠 法 規 学位規則第4条第1項
研 究 科 、 専 攻 の 名 称 東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電子工学専攻
学 位 論 文 題 目 半導体プロセス用高周波励起プラズマの精密制御に関する研究
指 導 教 官 東北大学教授 大見 忠弘
論 文 審 査 委 員 主査 東北大学教授 大見 忠弘 東北大学教授 佐藤 徳芳
東北大学教授 坪内 和夫 東北大学助教授 森田 瑞穂

論 文 内 容 要 旨

LSI の性能は、半導体プロセスの性能で決定すると言っても過言ではない。半導体プロセスの大半はプラズマプロセスである。従って、LSI の高性能化はプラズマプロセスを高性能化してはじめて可能になる。本研究は、プラズマプロセスを高性能化することを目的に行われた。

第2章では、シングルプローブを用いた高周波放電プラズマの計測技術について述べた。高周波放電プラズマではプラズマ電位が高周波で振動しているため、直流放電プラズマ用のプローブを用いて高周波放電プラズマの計測を行うと、測定値に大きな誤差が入ってしまう。高周波放電プラズマの高精度計測を行うには、プローブプラズマ間のインピーダンスを小さくし、プローブグランド間インピーダンスを十分大きくしたプローブを用いる必要がある。従来の技術では、100 MHz 程度以上の高周波で励起されたプラズマを実用に耐えうる精度で測定することは不可能であったが、本研究では $\lambda/4$ 分布定数フィルタを有するシングルプローブを開発してこれを可能にした。

プラズマ電位の高周波振動がプローブ計測に及ぼす影響は、プローブフローティング電位のシフト量で定量的に判断できる。プローブフローティング電位のシフト量を算出する際に必要となるパラメータの値を、正確に求める手法を提案した。可変リアクタンスプローブを開発してプラズマの計測を行い、実際にプローブフローティング電位のシフト量を求めた。その結果、本研究で開発した高周波放電プラズマ用シングルプローブは、高周波による擾乱をほとんど受けないことが明らかとなった。

第3章では、低エネルギーイオン照射を用いた低温シリコン薄膜形成技術について述べた。低エネルギーのイオンを照射しながら薄膜形成を行うと、350℃程度の低温でデバイスグレードの高品質エピタキシャルシリコン薄膜が形成される。イオン照射エネルギーが 25eV を越える

と、薄膜にダメージが入りイオン照射エネルギーの増加とともに結晶性が悪化する。一方、成膜表面に付着した原子に与えられるエネルギーが不足すると多結晶化し、主に移動度が低下する。エピタキシャル成長に必要なエネルギーが十分供給されている領域では、イオン照射エネルギーの増加とともに、優れた結晶性が維持されたままドーパントの活性化率が低下し、キャリア密度が減少する。このドーパント活性化率はイオン照射のみによって決まり、基板温度には無関係である。この現象を利用すると、イオン照射エネルギーによってキャリア密度を2桁近く制御することができる。この技術は、他の低温プロセスと併用することで、MOSFETの短チャネル効果を防止するためのステップ状のキャリア密度分布の形成に応用することができる。

イオン照射によって成膜表面に与えられるエネルギーは、個々のイオン照射エネルギーとイオン照射量の積に比例する。成膜表面に与えられるエネルギーが一定の条件では、イオン照射量を大きくし、イオン照射エネルギーを小さくした方がより電気的特性に優れた薄膜が形成される。

第4章では、大口径高速薄膜形成プロセスをターゲットとして開発したラジアルラインスロットアンテナを用いたプラズマ源について述べた。プラズマ CVD、プラズマ直接酸化などの薄膜形成プロセスでは、以下の事項が要求される。

- ・ 反応生成物を効率よく除去するために、プロセス空間の間隔が狭い（数 cm 以下）こと。
- ・ 原料ガス、及び反応生成ガスの分圧を面内で均一にするために、シャワーヘッドを用いてガスを供給すること。
- ・ 高速、高品質薄膜形成を可能にするために、プラズマ密度が高い（ $> 1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ ）こと。
- ・ イオン照射エネルギーの制御範囲を拡大するために、電子温度が低い（ $< 1.4 \text{ eV}$ ）こと。
- ・ プロセス装置のコストを低減させるために、装置が小型であること。
- ・ プラズマが基板面上で均一であること。

本研究では、ラジアルラインスロットアンテナをチャンバ外部に設置して、2.45 GHz、及び 8.30 GHz のマイクロ波で磁場を用いずにプラズマを生成する方式を採用した。2.45 GHz、及び 8.30 GHz のマイクロ波でプラズマを生成すると、マイクロ波の電力密度が比較的大きい場合には、ほぼ同じ状態のプラズマが得られる。これは、両周波数ともプラズマ表面付近の電子密度がカットオフ密度を大幅に上回るため、マイクロ波の侵入長がほぼ等しくなるためである。プロセス空間の間隔を 20 mm まで狭くしても、均一で高密度、かつ安定したプラズマが得られる。1.27 W/cm²のマイクロ波電力を供給すると、プラズマ表面から 70 mm 以内の領域では、 $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ を越える電子密度、またはプラズマ密度が得られる。通常薄膜形成プロセスが行われる 200 mTorr 以上の圧力では、電極表面付近の電子温度は常に 1.3 eV 以下となっている。内径 400 mmφ のチャンバで、300 mmφ の電極上にほぼ完全に均一なプラズマが生成される。電極とチャンバ側壁間にはガスを流すスペースが必要であるから、チャンバ内

部に無駄なスペースは一切存在しないといえる。また、磁場を導入する必要もないため、非常に小型でシンプルなプロセス装置が実現される。

安定したプラズマを生成するには、マイクロ波の侵入長をプロセス空間の間隔よりも十分小さくする必要がある。周波数の減少とともにカットオフ密度が低下するため、2.45 GHzの方がより低圧力、低電力密度でも安定なプラズマが生成される。しかし、2.45 GHzでは、シャワーヘッドと誘電体板間のギャップ内におけるプラズマの発生が問題となり、シャワーヘッドの導入が困難である。一方、8.30 GHzでは、ギャップを0.7 mmまで狭くすると、 1.27 W/cm^2 のマイクロ波電力を供給してもギャップ内でのプラズマの発生は見られない。8 GHz程度の周波数を用いることで、ガス流量やマイクロ波電力の範囲が制限されることなく、シャワーヘッド方式のガス導入が可能になる。これよりも低い周波数ではギャップ内でのプラズマ発生の問題が発生し、また高い周波数では、低圧力、低電力領域でプロセス空間中のプラズマが不安定になるという問題が生じる。従って、薄膜形成プロセスには、8 GHz程度の周波数が最適であるといえる。

このように、ラジアルラインスロットアンテナから放射される8.30 GHzのマイクロ波を用いてプラズマ生成を行うことにより、上記要請事項を全て満足する結果が得られた。ラジアルラインスロットアンテナを用いたプラズマ源は、次世代大口径高速薄膜形成プロセス用のプラズマ源として非常に有望である。

第5章では、ダイポールリングマグネットを用いた大口径平行平板型エッチングプロセス装置について述べた。次世代の大口径、高精度エッチングプロセスには、電子温度が低く、プロセス空間の間隔が狭く、且つグランド部の面積が広いプラズマ源が要求される。これらの要求を、平行平板マグネロン型プラズマ源以外のプラズマ源で満たすことは困難である。様々な磁場の印加方法があるが、ダイポールリングマグネットを用いた磁場の印加方法がプラズマ制御性の面で最も優れている。磁場を導入すると $E \times B$ ドリフトが原因でプラズマの均一性が悪化する。E-W方向のプラズマの均一性を向上させるために、E-W方向に磁場勾配を持ったダイポールリングマグネットがエッチング装置に用いられてきた。しかし、ダイポールリングマグネットを用いた現状のエッチング装置は様々な問題を抱えている。これらの問題点を克服すべく、対称磁場を用いて最適なプラズマを得るための研究開発を行った。

ダイポールリングマグネット内の磁束密度分布は、中央部で多少弱くなっている。この磁束密度の分布が助長されて、非常に不均一なプラズマが発生する。マグネットの高さ方向の位置をパラメータとして、磁力線と電極面がなす角度を制御すると、プラズマはN-S方向にほぼ完全に均一化されることが明らかとなった。

プラズマと下部電極間のインピーダンスと、プラズマとグランド部間のインピーダンスの比を増加させるには、フォーカスリングと下部電極間のインピーダンスを増加させる必要がある。フォーカスリングを4分割にして、それぞれの効果を調べた結果、N、S、W側のフォーカスリングはプラズマの均一化に関与していないことが明らかになった。N、S、W側のフ

フォーカスリングをフローティング状態として、E側のフォーカスリングと下部電極間のインピーダンスを制御することにより、プラズマと下部電極間のインピーダンスの減少を最小限に抑えながらフォーカスリング本来のプラズマ均一化の効果を最大限発揮させることが可能となった。この技術により、基板の大口径化に伴う重金属汚染の増大、チャンバ壁やシャワーヘッドの短寿命化、電力効率の悪化などの問題を最小限に抑えることが可能になる。

上部リング状電極に高周波を印加すると、プラズマ中にループ状の電子の流れが形成される。下部電極上、及び上部リング状電極上の $E \times B$ ドリフトのバランスをとると、E-W方向にもプラズマがほぼ完全に均一化されることが明らかとなった。上部リング状電極への100 MHzの高周波の印加により、広範囲な圧力、下部高周波電力、及び電極間隔のもとでプラズマがほぼ完全に均一化されることが確認された。また、上部リング状電極に高周波を印加することにより、フォーカスリングを全く用いなくてもある程度均一なプラズマが得られることが明らかとなった。少なくとも、フォーカスリングの幅を縮小させることは十分可能である。

これらの技術により、基板の大口径化、装置の小型化、汎用化が可能になる。平行平板型プラズマ源の優れた特長を生かしながらこれらの新技術を導入することによって、次世代大口径、高精度エッチングプロセスが実現される。

本研究を通して得られた知見、及び成果は、将来のプラズマプロセスの高性能化、ひいてはLSIの発展のために大いに役立つと考える。

審査結果の要旨

LSI素子の微細化及びウェーハの大口径化に伴い、プラズマ薄膜形成プロセス及びエッチングプロセスにおける大口径ウェーハ対応高密度プラズマの精密制御が非常に重要となっている。著者は、高周波放電プラズマを高精度で計測するシングルプローブを開発し、高品質のエピタキシャルシリコン薄膜を300℃程度の低温スパッタリングで形成するためのイオン照射エネルギーの精密制御方法を明らかにしている。さらに、大口径ウェーハ対応高性能薄膜形成プロセスのためのラジアルラインスロットアンテナを用いた均一高密度低エネルギープラズマ生成技術と、高速高性能エッチングプロセスのための均一水平磁界を導入した大口径ウェーハ対応平行平板型高密度プラズマプロセス装置を開発した。本論文は、これらの研究成果をとりまとめたもので、全文6章よりなる。

第1章は、序論である。

第2章では、高周波放電プラズマの高精度計測を行うための4分の1波長分布定数フィルタとLCフィルタを併用したシングルプローブを開発し、高周波励起プラズマの高精度計測が可能であることを初めて実証した結果について述べている。

第3章では、スパッタリングによるエピタキシャルシリコン薄膜低温形成プロセスにおいて、イオン照射量を大きくし、イオン照射エネルギーを小さくすることにより300℃程度の低温で高品質薄膜の形成が可能であることを実証した結果について述べている。

第4章では、大口径ウェーハ上の高速薄膜形成プロセスを実現するためにはシャワーヘッドによる原料ガス供給が不可欠であることを指摘し、ラジアルラインスロットアンテナを用いた大口径ウェーハ対応低エネルギー高密度プラズマ生成技術を開発し、8GHz程度の周波数を用いると、シャワーヘッドによるガスの導入が可能になることを明らかにした結果について述べている。これは、実用上重要な成果である。

第5章では、大口径ウェーハ高速高性能エッチングプロセスのための均一水平磁界を用いた平行平板型高密度プラズマプロセス装置において、ウェーハ表面において直流磁界を下方向に凸の分布に制御すること、及び上部リング状電極への高周波印加により、均一水平磁界を用いて大口径プラズマの密度及びセルフバイアスの均一化が可能であることを明らかにした結果について述べている。これは、新しい発見であり、実用的にも極めて重要な知見である。

第6章は、結論である。

以上要するに本論文は、半導体プラズマプロセスの精密制御に不可欠な高精度計測用シングルプローブを開発し、プラズマパラメータの精密制御により高品質シリコン薄膜が低温で形成可能であることを実証するとともに、ラジアルラインスロットアンテナプラズマ生成技術により大口径ウェーハ上に高速薄膜形成プロセスが実現可能であることや、均一水平磁界を用いた平行平板型プラズマプロセス装置により大口径ウェーハの均一かつ高速なエッチングが可能であることを明らかにしたもので、半導体電子工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。