

1961

外 93-23

早稲田大学大学院理工学研究科

博 士 論 文 概 要

論 文 題 目

短時間アニールとF注入による
浅い接合形成に関する研究

申 請 者

加藤 樹理

JURI KATO

平成 5 年 7 月

Siの超LSI製造に用いられている不純物ドーピングは、熱拡散法から、プロファイル制御が容易なイオン注入法に移行している。1970年代の初頭に工業レベルで使用され始めたイオン注入と電気炉アニールFA (Furnace Anneal) 技術は、MOSFETのしきい値電圧制御を目的とした低濃度注入から次第にその適用範囲を拡大し、1980年代の初頭にはMOSFETソース・ドレインやバイポーラトランジスタのエミッタ形成における高濃度注入にも適用されるようになり、不純物ドーピング法の基幹技術の地位を占めるに至っている。超LSIの高集積化にはデバイスの微細化が要求され、電界強度を一定としたスケーリング則に従って縮小されたMOSFETソース・ドレインの深さ X_j は、デバイスのゲート長が $1/K$ に微細化される時、 $1/K$ に縮小される。例えば、ゲート長 $5\mu m$ のMOSFETでは、 X_j が $2\mu m$ であるのに対し、ゲート長 $0.5\mu m$ のMOSFETでは、 $0.20\mu m$ 以下の X_j を持つ浅い接合が必要になる。従来の技術では、必要とされた接合深さ X_j がイオン注入後のドーパント初期分布の深さより大きく、注入ドーパントがアニール時に深い方向へ再分布する、いわゆるドライブイン拡散を行っていた。 $10^{15} \sim 10^{16} cm^{-2}$ のイオン注入量を持つ高濃度イオン注入では、注入時の照射損傷が大きいのみでなく高濃度ドーパントの存在により、アニール過程で真性キャリア濃度以下の低濃度ドーパントの熱拡散に比べて大きいドーパントの再分布（増速拡散現象）が発生するため、従来の技術では接合深さを浅くするのに限界が来ていた。超LSIの製造に必要な浅い接合形成のためには、高濃度注入ドーパントの再分布を抑制し、かつ、照射損傷回復を可能にする新しいイオン注入とアニール技術が要請される。超LSIでは消費電力の少ないCMOSFETが多く用いられるため、P型とN型両方の浅い接合形成技術が必要となる。

著者は、大面積の一括照射が可能なハロゲン・ランプ炉を採用し、超LSIの短時間アニールRTA (Rapid Thermal Anneal) を行った。アニール方法と装置上の改良により、ウェーハ全面で均一な電気的特性が再現できるRTA技術を確立した。そして、B、PおよびAsドーパントの注入領域外への再分布を発生させずに、電気的活性化、照射損傷回復と欠陥の除去のみ遂行するための最適熱処理サイクルをRTA技術を用いて実用化することに成功した。更に、P及びAsの高濃度注入層において、Fイオンの追加注入を試み、PとAsドーパント再分布制御と二次欠陥の低減に有効であることを明らかにした。

本論文は、これらの研究成果についてまとめたものである。7章から構成されており、以下にその概略を記す。

第1章は「序論」であり、浅い接合形成のためのRTA及びF注入技術開発の背景について述べた後、超LSIの浅い接合に要求される特性を整理し、本研究の目的を示している。

第2章では「実験及び評価方法」を説明している。本研究で開発実用化した短

時間アニール装置（ハロゲンランプシステム）のウェーハ平面方向の温度ばらつきとウェーハ間の温度ばらつきを抑制する手法を述べた。熱処理ウェーハ自身の温度測定方法を説明し、このRTAの熱プロセスを求めている。更に、本論文で使用する評価パラメータ記号の説明とRTAを用いたpn接合とMOSFETの作成方法を簡単にまとめている。

第3章は、「超LSIの浅い接合形成が可能な短時間アニールRTA」について述べる。本研究で開発したRTAにより実際にMOSFETとLSIを試作評価し、ダイオード特性、MOSFET特性、LSIの歩留まりが従来の電気炉アニール（FA）に比べ遜色がないこと、ソース・ドレインの横拡がりを抑制できるため、RTAが超LSIの浅い接合形成に有利なことを示した。更に、Pの拡散を評価することにより、RTAでは最高温度保持の間ウェーハ内深さ方向が等温であることを示した。

第4章は、「BF₂、P、Asを注入したSiの短時間アニール（RTA）による浅い接合形成」の諸条件について述べる。高濃度BF₂、PあるいはAs注入層の等温アニール条件がドーパントの拡散と電気的活性化に及ぼす影響を評価し、各々の注入層において、本研究で開発したRTAがFAと比べ浅い接合深さで低いシート抵抗を実現できることを示した。

(I) ドーパントの再分布；BF₂注入は、B注入に比べ注入後のBの初期分布を浅くできるため浅いp⁺拡散層の形成に用いられる。BF₂注入試料は850℃以上の高温FAでは、Bの拡散が大きく浅い接合形成ができない。一方、700～800℃の低温FAでは、イオン注入の照射損傷が回復する時に発生する注入したBの分布のテール部分の拡散（初期増速拡散）が顕著になり、 X_j の低減が困難であることを示した。RTAでは、 X_j を決定する低濃度領域のBの初期増速拡散が小さく、1100℃の3秒RTAにより $0.2\mu m$ 以下の浅い接合が実現できることを見出した。更に、920℃6秒RTAまたは1000℃4秒RTAにより X_j を決定する $10^{17} cm^{-3}$ 濃度領域でのBの再分布が $0.01\mu m$ 以下に抑制でき、しかも、これらのRTAの後に続く低温FA処理では、初期増速拡散による X_j の増加が無いことを示した。P注入層では、従来から知られているPの分布のテール部分の増速拡散のため、700℃以上のFAでは浅い接合形成が困難であるが、RTAにおいては、Pの増速拡散が存在するものの、アニール時間が短い分 X_j の増加が小さく、1000℃6秒RTAにより $0.2\mu m$ 以下の浅い接合が実現できることを見出した。As注入層では、 $10^{19} cm^{-3}$ 以下のAsの分布のテール部分の再分布は小さく、RTAとFAどちらも $0.2\mu m$ 以下の浅い接合形成ができた。650℃の長時間FAによるAsの再分布の評価を行い、650℃FAの前に高温RTA処理すればAsの分布のテール部分の拡散を小さくできることを見出した。

(II) ドーパントの電気的活性化；BF₂注入層は、照射損傷によりSiの

表面がアモルファス化しており、この部分はR T Aの高温固相成長の過程ではFの掃き出しが低温F Aと比べて少なく、ドーパントの高い電気的活性化を得ることを示した。R T Aの固相成長による再結晶後のアニール処理によりシート抵抗が増大する現象（逆アニール現象と呼ぶ）を見出し、この逆アニールの温度・時間依存を評価することにより、逆アニールが活性化エネルギー（ E_a ）が3.46 eVの拡散律速であることを示した。P注入層の逆アニールには、 E_a が1.3 eVと0.73 eVの二種類の過程が存在することを示した。As注入層では、従来から知られていたAs逆アニールが、 E_a が1.5 eVの拡散律速であることを示した。BF₂、P、Asのいずれにおいても、R T Aでは、アニール時と冷却時の逆アニールを減少できるためF Aより低いシート抵抗が得られることを明らかにした。

第5章は、「F追加注入による浅いN型拡散層形成」について述べる。本研究によるFの追加注入法は、二次欠陥制御とドーパントの拡散係数低減の両方の目的から初めて試みられたイオン注入法である。Pを注入する場合、Fを追加注入することによりPの分布のテール部分の増速拡散が低減され、同じアニール条件で浅い接合が形成できることを示した。更に、P注入層のアモルファス層-単結晶界面下の欠陥（a-c欠陥）の成長を抑制することを見出した。Asを注入する場合には、高温アニールによりAsの高濃度領域の二次欠陥とa-c欠陥が存在する。As高濃度領域の二次欠陥は、低温アニールによりAsピーク濃度領域を挟んだ約 $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ のAs濃度領域に2層の欠陥層を形成することを見出した。Fの追加注入により、As高濃度領域の二次欠陥発生の回避とa-c欠陥除去の低温化（900℃15分以内）ができることを示した。Fの追加注入により、一般には、P及びAs注入層の電気的活性化が抑制されるが、FがSi表面方向に外方拡散する900℃F Aによれば電気的活性化を損なわずに、Pの浅い接合を実現し、As接合における無欠陥化が可能であることを見出した。P及びAs注入層のテール部分の増速拡散と二次欠陥の発生原因について考察し、F追加注入の効果をひとつのモデルで説明した。

第6章は、「浅い接合形成のためのイオン注入条件とアニールサイクルの設計」について述べる。本章では、実際にデバイスを作成して、接合リーク低減に必要なアニール条件を示した。更に、F追加注入により接合リーク電流の低減ができることを見出した。前章までに報告してきた電気的活性化、二次欠陥除去、ドーパント再分布のプロセスを整理し、不純物の再分布と二次欠陥を抑制し、高い電気的活性化及び接合リーク低減を可能にするイオン注入条件とアニールサイクルの設計について考察した。

第7章は「まとめ」の章であり、第1章から第6章までの内容を章ごとに簡単にまとめ、今後の展望を述べている。