

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 8日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560381

研究課題名（和文） 超低エネルギーイオン注入によるシリコン半導体極浅接合形成
実用化技術の開発研究課題名（英文） Commercially adaptable technology on shallow junction of silicon
by ultra-low energy ion implantation

研究代表者

山本 和弘（YAMAMOTO KAZUHIRO）

独立行政法人産業技術総合研究所・計測フロンティア研究部門・主任研究員

研究者番号：90358292

研究成果の概要（和文）：本研究では、実用的な 10^{-5}Pa の高真空下でシリコン半導体に対して 500eV 以下の超低エネルギーイオンビームを用いたボロンイオン注入技術を開発することにより、シリコン結晶中へのなだれ現象的な多量の欠陥の形成を抑制し、結晶性回復のための熱処理による拡散を抑制した極浅接合形成プロセスを開発した。300eV 以下のボロンイオン注入により結晶性が良好で 15nm 以下のボロン注入層を形成することができた。

研究成果の概要（英文）：The ultra-low energy mass-separated boron ion implantation technique under the ion energy of 500 eV of silicon in the vacuum of 10^{-5}Pa , which is commercially adaptable, was developed in order to form the shallow doping layer. The implantation depth less than 15 nm was achieved by the ion with the energy less than 300 eV.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2010年度	974,440	292,332	1,266,772
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,974,440	892,332	3,866,772

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、電子デバイス・電子機器

キーワード：イオン注入、シリコン、ボロン、超低エネルギー、極浅接合

1. 研究開始当初の背景

シリコン半導体デバイスの高集積化に伴い将来的に解決しなければならない技術課題が検討され、国際半導体技術ロードマップ（ITRS）としてまとめられている。素子の微細化に伴うチャレンジとして、ドープメント濃度が平衡状態で許容される限界を越えた高濃度で、かつより浅いソース／ドレイン接合、さらに急峻にドーピングした極浅接合の形成が挙げられ、2014年にはドレインエクス

テンションの厚さはおよそ 10nm になると予測されている。また ITRS ではこの技術課題のために Ultra low energy (beam line) implantation のさらなる技術開発が求められている。

従来技術である数 MeV～数十 keV のイオンエネルギーを用いたイオン注入法によれば、シリコン結晶中に多量の格子欠陥および格子間原子がなだれ現象的に形成されてしまい、結晶性の回復と導入したドープメントの

活性化のために、熱処理が必要である。ドーピング層が10nm以下の極浅領域を形成するためには、たとえイオン注入エネルギーを数keV下げても、結晶性の低下を伴い熱処理を必要とするプロセスである限りドーパントの熱拡散を伴うために、低温熱処理もしくは熱処理不要のプロセスが必要である。特にp型ドーパントであるボロンはシリコン結晶格子間距離に対して原子半径が小さいためにシリコン結晶格子中を拡散しやすいために、急峻にボロンドープした極浅接合の形成は重要な課題である。

我々はこれまでに質量分離した500eV以下の超低エネルギーボロンイオンをシリコンにイオン照射する事により、25nm以下のドーピング層の形成が可能であることを報告したが、この技術は 10^{-8} Pa台の超高真空プロセスであるために、レジストを用いる通常のプロセスには適用できなかった。

2. 研究の目的

本研究では上記問題を解決するために、実用的な 10^{-5} Pa台の高真空下において500eV以下の超低エネルギーを有するボロンイオンビームを用いた注入技術を開発することにより、シリコンに15nm以下の極浅ボロンドーピング層の形成を実現する事を目的とする。本技術が実現されれば、ITRSにおいて技術開発が求められており、将来の半導体製造プロセス開発に大きく寄与するものと期待される。

3. 研究の方法

本研究で用いた超低エネルギーイオンビーム照射装置の概要を図1に示す。イオン源、特定のイオンを選別する質量分離電磁石、イオンビーム形状を整える4重極電磁石、電荷交換作用により生じた中性粒子を除去するためのデフレクタ電磁石、所定のイオンエネルギーに制御するための減速電極、照射チャンバー、試料交換室からなる。本装置は従来型の装置と異なり、四重極電磁石を用いてイオンビームを集束して効率的にイオンを基板まで輸送している。また差動排気による超高真空度化を図るために真空排気系には4000l/min.の排気速度のクライオポンプを5台用いている。クライオポンプは水素を含

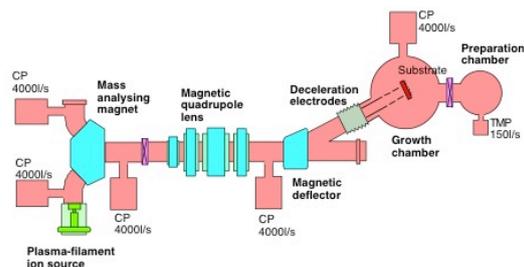


図1 超低エネルギーイオンビーム照射装置

むすべてのガスに対して高い排気速度を示す。照射チャンバーの到達真空度は 2×10^{-8} Paであるが、ゲートバルブの開閉度により 4×10^{-5} Paに真空度を制御してイオン照射を行った。イオン源にはイオンエネルギーの分散が小さいプラズマフィラメント型イオン源を採用した。ボロンイオンの原料ガスとして特殊材料ガスではない3フッ化ボロンを用いた。電極を形成したシリコン基板表面に厚さ1nmの保護酸化膜を形成した後、イオン注入を行った。イオン照射中の温度はレジストの使用を想定して室温とし、イオン照射後、真空中で800°C30分間の熱処理を行った。

イオン照射後に大気中でvan der pauw法により電気特性を測定した。Transmission electron microscope (TEM)により断面観察を行った。断面観察試料はFocus Ion Beam (FIB)により作成した。イオン注入深さの測定には表面から300eVの酸素イオンでエッチングを行いながら、Secondary ion mass spectroscopy (SIMS)により行った。

4. 研究成果

イオン注入条件として、ドーズ量を 4×10^{16} ions/cm²としてイオンエネルギー依存性を検討した。図2(a)にシート抵抗のイオンエネルギー依存性、図2(b)にキャリア密度のイオンエネルギー依存性、図2(c)に移動度のイオンエネルギー依存性をそれぞれ示す。

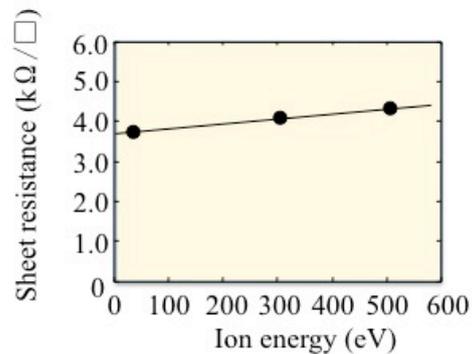


図2(a) シート抵抗のイオンエネルギー依存性

シート抵抗はイオン照射前には約100 kΩであったが、イオン照射により約4 kΩに低下した。またイオンエネルギーの低下とともに4.46 kΩから3.84 kΩに低下するが、これはシリコン中に導入される格子欠陥が低エネルギーほど少ないためと考えられる。キャリア密度はイオンエネルギー低下とともに 2.58×10^{13} cm⁻²から 1.70×10^{13} cm⁻²に低下し、移動度は54.3 cm²/Vsから95.7 cm²/Vsに増加する。これは低エネルギーほどイオンが注入される表面からの深さが浅く、ドーズ量は一定であるために、低エネルギーほど注入層

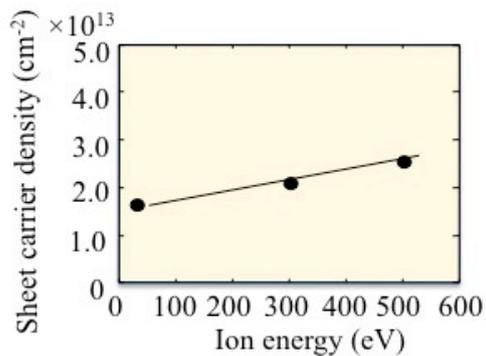


図 2 (b) キャリヤ密度のイオンエネルギー依存性

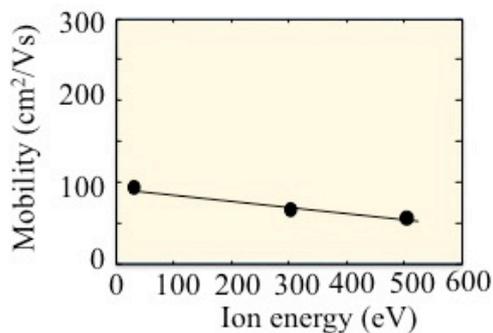


図 2 (c) 移動度のイオンエネルギー依存性

中でのボロン密度が大きくなり格子ひずみが導入されるためと推定される。

イオン注入層の結晶性を評価するために断面 TEM 観察を行った。300 eV のイオンエネルギーで 4×10^{16} ions/cm² ドーズ注入したシリコンの断面 TEM 写真を図 3 (a) に、また図 3 (a) 中において四角で示した領域の高分解能 TEM 観察写真を図 3 (b) に示す。

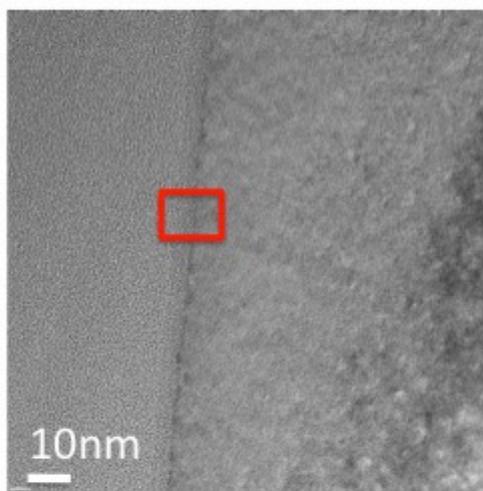


図 3 (a) 300 eV でイオン注入した試料の断面 TEM

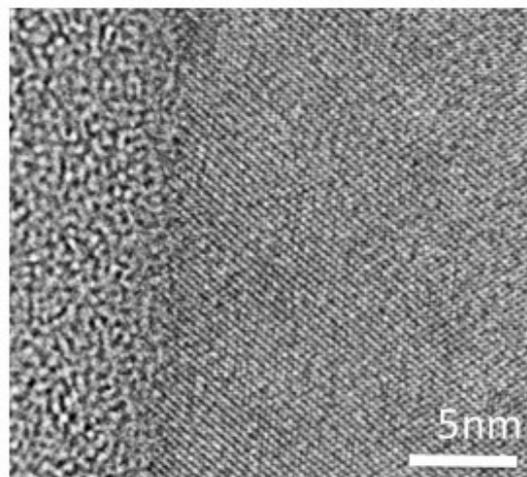


図 3 (b) 図 3 (a) の高分解能 TEM

図 3 (a) の TEM 像からイオン注入後のシリコン表面は荒れがなくイオン照射前の表面平坦性を保っていることがわかる。また表面近傍において一様なコントラストであることから、特別な層の形成は見られない。図 3 (b) の高分解能 TEM 像からシリコンの結晶格子が明瞭に観察され、良好な結晶性である事がわかる。300 eV の超低エネルギーイオン注入により雪崩現象的な欠陥の導入が抑制されていることが確認された。

この同じ断面観察試料を Energy-filtering TEM (EF-TEM) を用いて観察を行った。EF-TEM によれば試料中の密度等に依存したコントラストを得ることができる。透過電子線のエネルギー損失が 12.3 eV である電子で結像したときに表面近傍にわずかなコントラストを得る事ができた。12.3 eV のエネルギー損失像を図 4 (a) に示す。図中白いコントラスト領域がシリコン、黒い領域が FIB の保護膜層である。

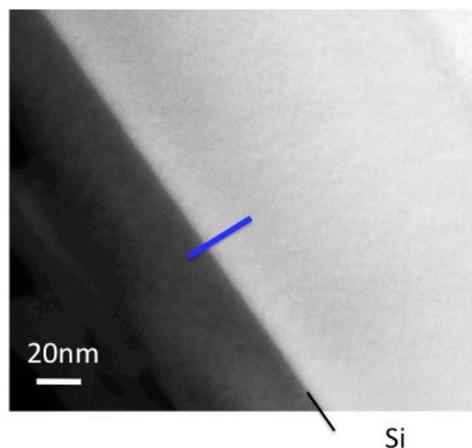


図 4 (a) エネルギー損失(12.3 eV)断面 TEM 像

また図 4 (a) 中で示した表面部のコントラスト強度のラインプロファイル像を図 4 (b) に示す。図 4 (a) ではわかりにくいですが、ラインプロファイルから最表面近傍にコントラストが高い領域が存在する事がわかる。この領域の厚さはおよそ 15 nm である。

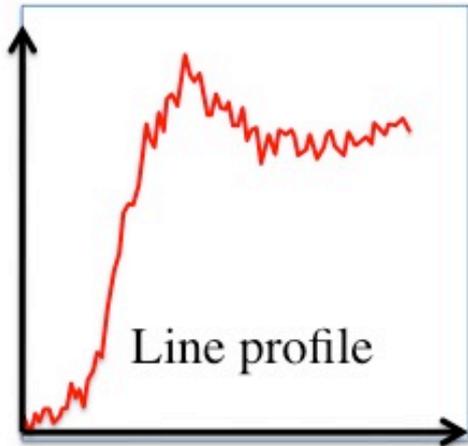


図 4 (b) 図 4 (a) 中で示した箇所のコントラストのラインプロファイル。

このコントラストが大きな表面領域はシリコンの格子位置にボロンが置換されており、そのため透過電子線との相互作用が異なりバルク中のシリコンとのコントラスト差が現れたと考えられる。すなわちこのコントラスト差はボロン注入層を可視化できたことを示唆する。

これを確認するために同一試料（イオンエネルギー300 eV、ドーズ量 4×10^{16} ions/cm²）について、SIMS を用いてボロンの深さ方向分析を行った。図 5 に結果を示す。

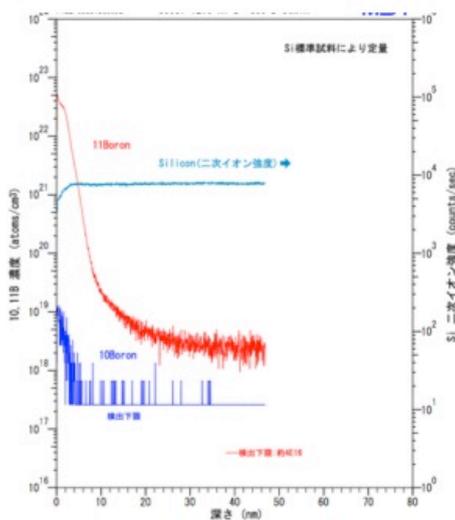


図 5 SIMS によるボロンの深さ方向分析

ボロンの同位体 ¹⁰B は大気暴露による自然汚染により検出されるものであるが、イオン照射した ¹¹B は ¹⁰B より深い位置でも検出されることから、この ¹¹B はイオン注入により導入されたものであることがわかる。また ¹¹B の深さ方向の分布は約 16 nm であり、図 4 (a) で観察された高コントラスト領域の厚さと良く一致する。従って、図 4 (a) においてボロン注入層を可視化できたと結論できる。

300 eV でイオン注入した試料の TEM 観察および SIMS 分析から、超低エネルギーイオン注入により 16 nm の極薄ドーピング層が形成できることが明らかになった。そこで極薄ドーピング層の厚さの制御性を確認するために、30、300、500 eV のエネルギーでそれぞれイオン注入した試料について SIMS によるボロンの深さ方向分析を行い、図 6 に結果を示す。

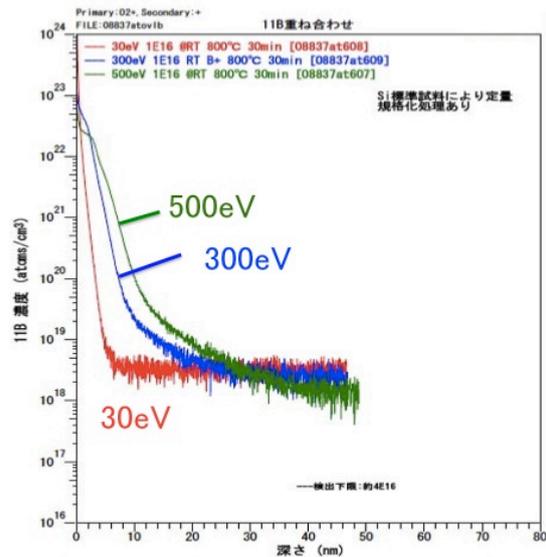


図 6 ボロンの深さ方向分布のイオンエネルギー依存性

30eV でイオン注入した場合の ¹¹B の分布は表面から 6nm、300eV の場合は表面から約 16nm、500eV の場合は表面から内部にブロードに分布しているが約 25nm である。注入イオンエネルギーが高くなると ¹¹B が表面から深い位置へ広く分布しており、エネルギーが高いために深い位置へボロンが注入されることがわかる。この結果はイオン注入エネルギーを選択することにより、ボロンの注入厚さの制御が可能であることを示す。

本研究の結論として、実用的な真空度下での超低エネルギーボロンイオン注入により極浅ドーピング層の形成が可能であることが明らかとなった。レジストプロセスの適用を想定して、室温での超低エネルギーボロンイオ

ン注入の後、800°Cでの熱処理を検討し、シート抵抗が100k Ω から約4k Ω に低下する事を確認した。さらにボロンイオン注入後の注入層は結晶性が良好であり、ボロン層の厚さはイオンエネルギーにより制御可能であり、30 eVの超低エネルギーイオン注入では6 nmのイオン注入層の形成を実現した。本技術を用いれば将来必要とされる10 nm以下の極浅注入層の形成が可能である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① K.Yamamoto, X-TEM of shallow doping layer of Si by ultra-low energy boron ion implantation, Abstracts of the Microscopy Conference 2011 in Kiel, 査読有, M2, 2011, 1-2
DOI;なし、URL;なし

[学会発表] (計2件)

- ① 山本和弘, 超低エネルギーボロンイオン注入層のTEM観察, 2011年春季 第58回 応用物理学関係連合講演会, 2011年03月25日, 神奈川工科大学
- ② 山本和弘, 低エネルギーイオン注入によるボロン極浅接合層のTEM観察, 日本顕微鏡学会第67回学術講演会, 2011年05月16日, 福岡県福岡国際会議場

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山本 和弘 (YAMAMOTO KAZUHIRO)

産業技術総合研究所・計測フロンティア研究部門・主任研究員

研究者番号：90358292

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし