

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19560330
 研究課題名（和文）シリコン半導体極浅接合形成のための超低エネルギーイオン注入技術の開発
 研究課題名（英文）Development of ultra-low energy ion implantation of silicon for ultra-shallow junction
 研究代表者 山本 和弘
 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：

シリコン半導体デバイスの高集積化に伴い2014年にはチャンネル部分のドーパント層の厚さはおよそ10nmになるとされている。従来の高エネルギーイオン注入法では極浅ドーピン部層の形成が困難であった。本研究では1 keV以下の超低エネルギーイオン注入技術を開発した。シート抵抗は最小値3k Ω /□を示し、イオンエネルギーが30eVのときの注入深さは1.2nm、500eVのときの注入深さは8nmであった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2008年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,800,000	840,000	3,640,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、電気・電子材料工学

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、ドーパント濃度

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、2012年にはドレインエクステンションの厚さはおよそ7nmになると予測されている(図1)。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。

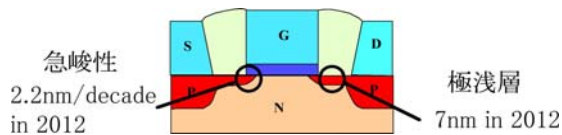


図1 2012年における極浅接合形成の課題

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(図2(a))、結晶性の回復と導入したドーパ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、熱処理が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、急峻にボロンをドーピングした極浅接合の形成は重要な課題である。

2. 研究の目的

本提案では、上記問題を解決するために、100eV 以下、特にシリコンの格子位置置換エネルギーである 20eV 近傍の超低エネルギーを有するイオンビームを用いた超低エネルギー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格子欠陥および格子間原子の形成を抑制したイオン注入技術を開発する(図2(b))。シリコンの格子位置置換エネルギー25eV に近い 100eV 以下の超低エネルギーイオン注入を行うことにより(図2(b))欠陥の形成を抑制し熱処理の不要なプロセスが可能となる。2014

年に必要とされる厚さ 8～13nm の極浅ドーピングで 2 kΩ 以下のシート抵抗を実現する。

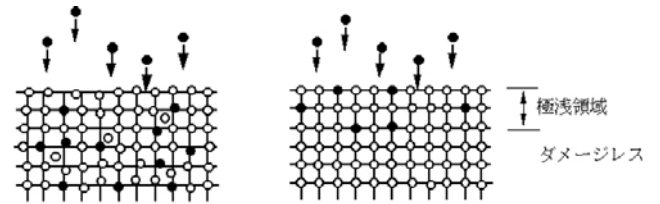


図2(a) 従来の高エネルギーイオン注入 (>1~3keV) 図2(b) 超低エネルギーイオン注入 (~50eV)

3. 研究の方法

本研究で用いた低エネルギーイオンビーム照射装置の概要を図3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むすべてのガスに対して高い排気速度を示す。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トリメチルボロンおよび3フッ化ボロンについて検討した。イオン源の動作条件およびイオン輸送系の条件の最適化を行った後に、イオン電流の安定性を検討した結果、3フッ化ボロンが適していることがわかった。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、イオン注入を行い、電気特性を測定した。イオン注入条件としてイオンエネルギー、ドーズ量、照射ターゲット温度を検討した。ま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、SIMS 測定を行った。

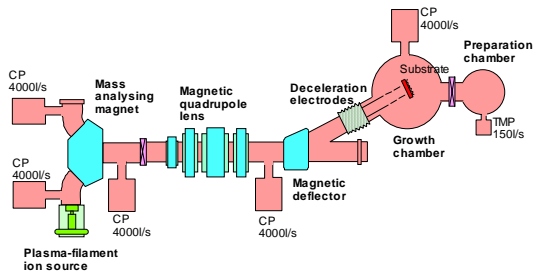


図3 超低エネルギーイオン照射装置

4. 研究成果

イオン注入条件としてイオンエネルギー、ドーズ量、照射ターゲット温度を検討した。イオンエネルギーを 30eV、ドーズ量を 4×10^{14} ions/cm² として電気特性のターゲット温度依存性を調べた。図 4 (a) にシート抵抗の温度依存性、図 4 (b) にキャリア密度と移動度の温度依存性をそれぞれ示す。温度が高い程シート抵抗が減少し、キャリア密度が増加していることがわかる。これは温度が高い程、注入されたボロンがシリコン結晶格子位置に置換し、格子ひずみが緩和されるためと考えられる。

図 5 にイオンエネルギーを 30eV、ターゲット温度を 600°C および 800°C としてシート抵抗のドーズ量依存性を示す。800°C のときドーズ量が 5×10^{15} ions/cm² 以上でシート抵抗はおよそ 6kΩ/□ の一定値を示した。イオン照射後、950°C 30 分間の熱処理によりシー

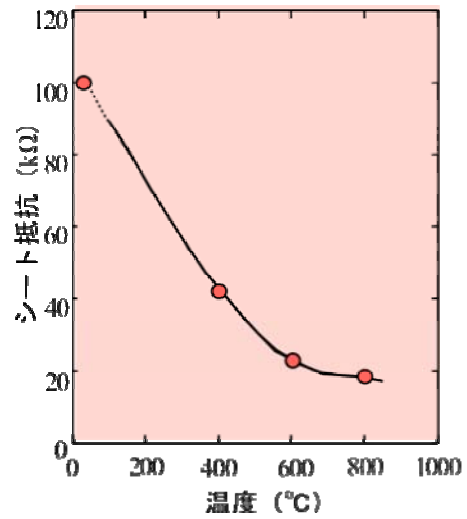


図 4 (a) シート抵抗のターゲット温度依存性

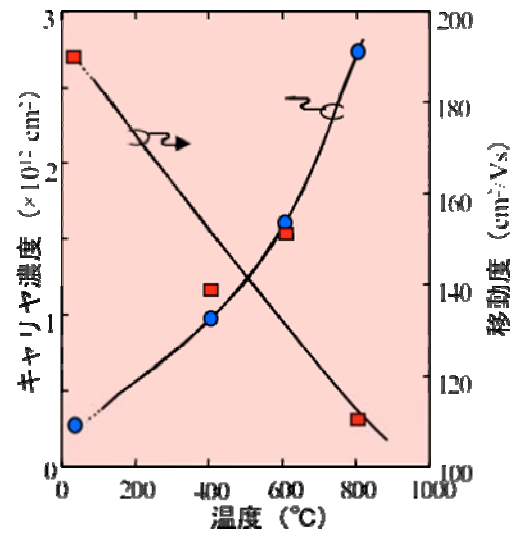


図 4 (b) キャリア濃度と移動のターゲット温度依存

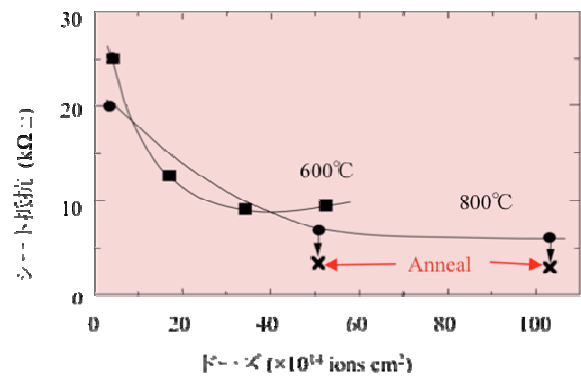


図 5 シート抵抗のイオンドーズ量依存性

ト抵抗は図中で×で示す値まで減少した。このときイオン注入されたボロン全てが活性化すると仮定すると、ドーズ量が 5×10^{15} ions/cm² および 10×10^{15} ions/cm² の時の注入ボロンの活性化率はそれぞれ 61%と 46%であった。ドーズ量が高すぎると注入ボロンが格子間原子位置に入り、活性化されにくいと考えられる。

図6にターゲット温度を 800°C、ドーズ量を 1×10^{16} ions/cm² としてシート抵抗のボロンイオンエネルギー依存性を示す。30eV~500eVまで一様のシート抵抗値 3kΩ/□を示した。また移動度は $90\text{cm}^2/\text{Vs}$ であった。ターゲット温度が 800°Cであれば、照射されたボロンの結晶格子中での位置も平衡状態になり良好な電気特性が得られると考えられる。

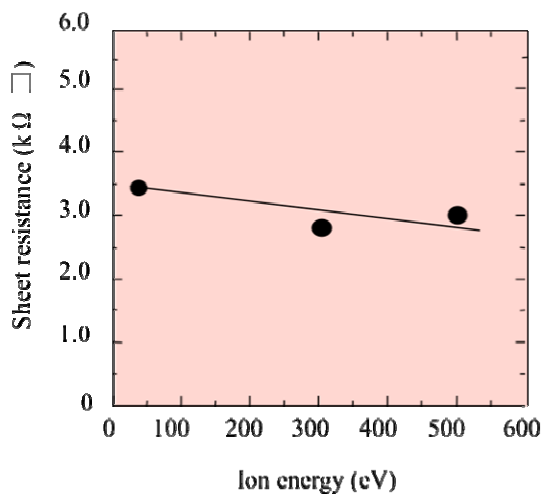


図6 シート抵抗のイオンエネルギー依存性

イオンエネルギーにより注入深さの制御が可能であるか検証するために図6におけるイオンエネルギー30eVと 500eVでイオン照射した試料について表面からSIMS測定を行った。図7(a) にイオンエネルギー30eVで照射した場合、図7(b) にイオンエネルギー500eVで照射した場合のSIMS深さ方向分析結果をそれぞれ示す。ボロンの同位体¹⁰Bは

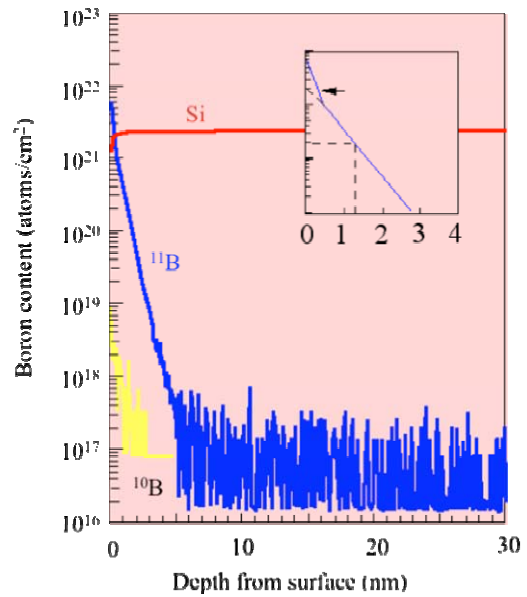


図7(a) 30eV でイオン注入した試料の SIMS 深さ方向分析

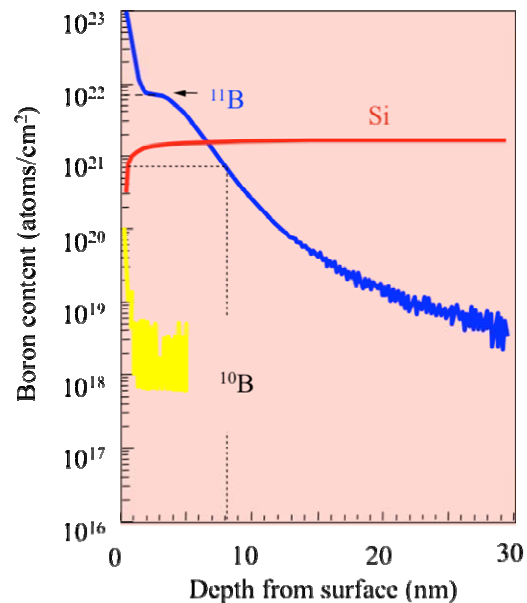


図7(b) 500eV でイオン注入した試料の SIMS 深さ方向分析

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。表面付近の測定結果の拡大を挿入図に示すが、再表面の¹¹Bの 10%濃度位置をイ

オン注入深さと定義すると、30eVでイオン注入した場合の注入深さは1.2nmとなる。一方、イオンエネルギー500eVで注入した試料では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より深い位置へボロンが注入されることがわかる。500eVでイオン注入した場合の注入深さは8nmとなり、イオンエネルギーを選択することによりボロンの注入深さを制御可能であることがわかった。本研究の結論として、超低エネルギー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。

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2件)

1) Kazuhiro Yamamoto and Hiroshi Itoh, Ultralow-Energy Boron-Ion Implantation of silicon, Japanese Journal of Applied Physics, 査読;有, 47 (2008) 23-25.

2) Kazuhiro Yamamoto, Ultra-low-energy ion implantation to decrease the resistance of silicon, AIST today international, 査読;無, 25 (2007) 22.

[学会発表] (計2件)

1) Kazuhiro Yamamoto and Hiroshi Itoh, Ultra-low-energy boron ion implantation of silicon, 17th International Vacuum Congress and 13th International Conference on Surface Science, 2007年7月3日, Stockholm.

2) 山本和弘, 井藤浩志, 超低エネルギーイオン注入によるシリコン極浅ドーピング層の形成, 2009年春季第56回応用物理学関係連合講演会, 2009年3月31日, 筑波大学.

[産業財産権]

○取得状況 (計1件)

1) ダイヤモンドへの異種元素導入方法, 山本和弘, 吉田博昭, 産業技術総合研究所, 特許4280818, 2009年3月27日,

国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山本 和弘, 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, 90358292

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし