



Title	Study on hydrogen-related donor centers in silicon towards precise control of doping profiles for power devices
Author(s)	Kiyoi, Akira
Citation	大阪大学, 2022, 博士論文
Version Type	
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/89613">https://hdl.handle.net/11094/89613</a>
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、<a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed">大阪大学の博士論文について</a>をご参照ください。

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

論 文 内 容 の 要 旨

氏 名 （ 清 井 明 ）	
論文題名	Study on hydrogen-related donor centers in silicon towards precise control of doping profiles for power devices (パワーデバイスのためのドーピングプロファイル精密制御に向けたシリコン中水素関連ドナーに関する研究)
論文内容の要旨	
<p>本論文はパワーデバイスの課題解決や将来的な実装を念頭に、プロトン照射で誘起される点欠陥（水素を含む浅いドナー）、ならびに点欠陥と不純物との相互作用に関する研究をまとめたもので、本文八章および謝辞からなる。</p> <p>第一章ではシリコンパワーデバイスについて概観し、欠陥エンジニアリング，ならびにシリコンウエハの沿革と現状を述べ、その問題点を指摘し、本研究を位置づけた。</p> <p>第二章ではシリコン中で観測されている水素を含むドナーに関する先行研究について概観した。</p> <p>第三章では広がり抵抗測定法を用いて、シリコン中のドナー形成に必要なプロセス条件を調べた。プロトン照射，ヘリウムイオン照射，およびヘリウムイオン照射と水素プラズマ処理を組み合わせた処理を比較し、水素と点欠陥の共存した状態において、300～500℃のアニール処理を施すことにより、ドナーが形成可能であること示した。</p> <p>第四章では広がり抵抗測定法を用いて、ドーピングプロファイルに対するウエハ中不純物の影響を調べた。プロトン照射された種々のシリコンウエハにて水素の拡散現象を調べた結果、シリコンウエハ中の酸素量に応じて、水素の拡散障壁が0.57 eVから2.2 eVに増加することを示した。この結果に基づき、照射により誘起される酸素関連欠陥が水素をトラップすると考え、このトラップ効果を抑制するアニール条件を提案した。</p> <p>第五章では広がり抵抗測定法を用いて、プロトン照射により誘起されるドナー濃度とシリコンウエハ中不純物濃度および照射ドーズの関係を調べた。その結果、発生するドナー濃度はドーズに対して線形もしくはドーズの平方根に依存するものの、不純物濃度とは相関がないことを明らかにし、プロトン照射により誘起されるドナーは水素関連ドナーと呼ばれる真性欠陥と水素の複合欠陥に関係することを見いだした。</p> <p>第六章では広がり抵抗測定法とPhotoluminescence法を用いて、ドナー濃度と光学活性点欠陥のアニール温度依存性の相互関係を調べた。その結果、熱安定性の異なる2種類のドナーが存在し、その片方の発生および消滅温度はTetra-interstitial Si (Xセンタ) と類似であることを明らかにした。また、ドナー濃度のアニール温度依存性に基づいて、デバイス応用に最適なアニール温度を提案した。</p> <p>第七章では電子スピン共鳴分光法 (EPR) を用いて、ドナーの微視的構造を調べた。その結果、前述の熱安定性の異なる2つのドナーに対応する新種のEPR信号およびその信号中に<sup>29</sup>Si超微細構造が含まれることを発見した。2つのドナーのEPR信号の対称性および<sup>29</sup>Si超微細構造のシミュレーションを行い、それらがTetra-interstitial Siと同一であることを明らかにした。第五、六、七章の結果に基づいて、プロトン照射により誘起されるドナーはTetra-interstitial Siと水素の複合欠陥であるというモデルを提案した。</p> <p>第八章では本研究で得たプロトン照射により誘起されるドナーに関する結果をまとめ、本研究の総括および今後の研究課題を示した。</p>	

## 論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 ( 清 井 明 )			
	(職)	氏 名	
論文審査担当者	主 査	教 授	藤原 康文
	副 査	教 授	中谷 亮一
	副 査	教 授	山下 弘巳
	副 査	准教授	舘林 潤

## 論文審査の結果の要旨

電力の有効活用が社会課題となっており、その解決の一端を担うパワーデバイスが注目されている。シリコンを用いたパワーデバイスは当面の間、パワーデバイス市場の大部分をしめると予想されており、EV/HEV、FA、太陽光・風力発電等の分野での需要が増加している。シリコンパワーデバイスにはシリコン中に人為的に点欠陥を導入して、デバイスの電力損失を低減したりや発振を抑制したりするという、他のデバイスにない特殊な製造プロセスがある。しかしながら、近年のシリコンウエハ大口径化と相まって、デバイス特性がシリコンウエハの不純物濃度に依存するという新たな問題が発生している。シリコンの点欠陥に関する基礎研究の歴史は長く、多くの知見が蓄積されているが、点欠陥の導入条件や不純物濃度の検討範囲において、基礎研究と実デバイス作製に関する応用研究には大きな乖離がある。

本論文はパワーデバイスの課題解決や将来的な実装を念頭に、プロトン照射で誘起される点欠陥（水素を含む浅いドナー）、ならびに不純物との相互作用についてまとめたものであり、以下の知見を得ている。

- (1) シリコン中のドナー形成に必要なプロセス条件としてプロトン照射、およびヘリウムイオン照射、およびヘリウムイオン照射と水素プラズマ処理と組み合わせた処理を比較し、水素と点欠陥の共存した状態で 300～500℃のアニール処理を施すことで、ドナーが形成されることを明らかにしている。
- (2) ドーピングプロファイルに対するウエハ中不純物の影響を調べている。プロトン照射された種々のシリコンウエハにて、水素の外方拡散現象を調べた結果、シリコンウエハ中の酸素量に応じて、水素の拡散障壁が 0.57 eV から 2.2 eV に増加することを明らかにしている。この結果に基づき、照射により誘起される酸素関連欠陥が水素をトラップすると考え、このトラップ効果を抑制するアニール条件を提案している。
- (3) プロトン照射で誘起されるドナー濃度と、ウエハ中不純物濃度、および照射ドーズの関係を調べた結果、ドナー濃度はドーズに対して線形もしくはドーズの平方根に依存するものの、不純物濃度とは相関がないことを明らかにし、ドナーは水素関連ドナーと呼ばれる真性欠陥と水素の複合欠陥に関係することを見いだしている。
- (4) ドナー濃度と光学活性点欠陥のアニール温度依存性の相互関係を調べた結果、熱安定性の異なる 2 種類のドナーが存在し、その片方の発生・消滅温度は Tetra-interstitial Si (X センタ) と類似であることを明らかにしている。また、ドナー濃度のアニール温度依存性から、デバイス応用に最適なアニール温度を提案している。
- (5) 電子スピン共鳴分光法 (EPR) を用いて、ドナーの微視的構造を調べた結果、前述の熱安定性の異なる 2 つのドナーに対応する新種の EPR 信号、およびその信号中に  $^{29}\text{Si}$  超微細構造が含まれることを発見している。2 つのドナーの EPR 信号の対称性及び  $^{29}\text{Si}$  超微細構造のシミュレーションを行い、それらが Tetra-interstitial Si と同一であることを明らかにしている。プロトン照射で誘起される水素を含むドナーは Tetra-interstitial Si と水素の複合欠陥であるというモデルを提案している。

以上のように、本論文はシリコンにおいてプロトン照射で誘起される点欠陥の理解と制御を目的に、その挙動を明らかにするとともに、微視的構造を同定している。本研究成果は点欠陥物理の解明に留まらず、今後のパワーデバイス作製において不可欠な、この点欠陥を用いてデバイス深部にドーピングするプロセス技術（プロトン照射ドーピング）の構築に指針を与える等、波及効果が甚大であり、材料工学分野に寄与するところが大きい。

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。