

京都大学	博士 (工学)	氏名	佐藤 真一郎
論文題目	水素化アモルファスシリコン半導体の放射線照射効果に関する研究		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、MeV エネルギー重イオン照射による水素化アモルファスシリコン半導体の電気的特性について実験的研究を行い、その成果をまとめたものである。暗伝導度や光伝導度、ゼーベック係数等をイオン照射チャンバー内で「その場」測定する実験装置によって連続的な変化を調べ、放射線照射効果の全体像を明らかにしたものであり、全 8 章からなっている。</p> <p>第 1 章は序論であり、高エネルギー物理学や宇宙開発の進展に伴って、耐放射線性半導体デバイスの開発研究が必要とされるようになってきていることを説明している。水素化アモルファスシリコン(a-Si:H)半導体は高放射線場で機能する光デバイスや太陽電池、粒子検出器などへの応用が期待されているが、宇宙環境などでの放射線照射効果は不明な点が多いことから、放射線照射に伴う半導体特性の変化を明らかにする必要があることを述べている。</p> <p>第 2 章では、照射効果を明らかにする上で踏まえておくべき a-Si:H 半導体の性質についての説明を行い、アモルファス材料における半導体特性の発現や、結晶半導体との違いについて述べている。また、a-Si:H 半導体に特有の現象である光照射劣化やそのメカニズムについて解説し、その一方で放射線照射効果については不明な点が多く、特に系統的な知見は殆ど得られていないことを、過去の研究例を挙げることによって明らかにしている。</p> <p>第 3 章では、10 MeV 陽子線照射による非ドーパ a-Si:H の暗伝導度、光伝導度の変化について述べている。最初に試料の詳細について述べ、本実験のために構築したその場電気伝導度測定装置について解説している。非ドーパ a-Si:H の暗伝導度と光伝導度は 10 MeV 陽子線フルエンスの増加と共に急激に上昇するがその後減少するという非単調変化を示し、これは結晶半導体においてみられる一般的な照射効果の理解では説明できないことを述べている。また、この暗伝導度、光伝導度の上昇の時間減衰や温度依存性について調べ、その性質の詳細を明らかにしている。</p> <p>第 4 章では、電子線、陽子線、重イオンといったさまざまな種類の放射線による非ドーパ、n 型、p 型 a-Si:H の暗伝導度、光伝導度の変化についてまとめてある。第 3 章で明らかにした非単調変化は、非ドーパ、n 型 a-Si:H においては見られるが、p 型 a-Si:H においては現れず、また Si イオン照射では単調減少を示すことを説明している。これらのデータを用いてエネルギー付与過程を考慮した解析を行うことによって、低フルエンス領域で現れる伝導度の上昇は電子励起効果に、高フルエンス領域で現れる伝導度の減少ははじき出し損傷効果に基づいて</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	佐藤 真一郎
------	---------	----	--------

いることを明らかにしている。また、ホール測定の結果から、暗伝導度の減少はダングリングボンドの蓄積に伴うキャリア枯渇効果に起因していることがわかり、このことから照射効果と光照射劣化は全く異なる現象であることを証明している。

第5章では、高エネルギー陽子線中の非ドーパ、n型、p型 a-Si:H の放射線誘起電気伝導 (RIC) や光感度の変化について詳細に調べ、その伝導機構を明らかにしている。非ドーパ a-Si:H に 10 MeV 陽子線を照射すると、照射中の伝導度は一旦劇的に上昇するが、その後減少する。このような変化は n 型 a-Si:H においても同様に観察される一方で、p 型 a-Si:H における照射中の伝導度は暗伝導度よりもむしろ低くなることを述べている。これらは照射によってドナー型欠陥が一時的に生成することに起因しており、高エネルギー陽子線照射中の伝導度は、ドナー型欠陥による暗伝導度と一般的な RIC の和によって表されることが明らかにされている。前者は低フルエンス領域で支配的であるが、フルエンスの増大とともに徐々に減少していき、やがて後者が支配的になる。しかし、RIC はキャリア寿命に比例するため、陽子線照射によってダングリングボンド密度が増大し、キャリア寿命が減少すると RIC も減少する。したがって、高フルエンス領域では一般的な半導体で見られる RIC と同じ現象が起こっており、いくつかの高エネルギーイオンによる電子的エネルギー付与密度と RIC の相関を調べることでこの事実を明らかにしている。

第6章では、その場熱起電力測定装置を構築し、陽子線照射による非ドーパ、n型 a-Si:H のゼーベック係数変化について調べた結果について述べている。暗伝導度、光伝導度の上昇が起こる低フルエンス領域で非ドーパ a-Si:H は負のゼーベック効果を示し、n型に変化していることを明らかにしている。これは、暗伝導度や光伝導度の上昇がドナー型欠陥の生成に起因することを意味しているが、暗伝導度と光伝導度が共に減少する高フルエンス領域ではドナー型欠陥が消失することも明らかにしている。

第7章では、極めて広いフルエンスの範囲での暗伝導度、光伝導度の変化について述べており、a-Si:H の照射効果の全体像を明らかにしている。第3章と第4章で調べたフルエンス領域よりもさらに高フルエンス領域まで照射を続けると、暗伝導度のみが増加し、光伝導は消失する。これは、ダングリングボンドの蓄積によりフェルミ準位付近の状態密度が過剰に増加した結果、バンド伝導が失われ、その代わりにフェルミ準位付近の局在準位を介したホッピング伝導が支配的になったからであるという解釈を与え、そのような高フルエンス領域では初期キャリア濃度に関わらず同じ照射効果を示すことを明らかにしている。また、本研究で得られた一連の知見から、他の研究グループによるいくつかの類似した研究報告を再検討し、一見異なる見解を示しているようなこれらの研究結果を矛盾なく繋ぎ合わせることに成功している。

第8章は本論文の総括であり、得られた主要な研究成果について要約している。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、高エネルギー物理学実験や宇宙開発研究の要となる耐放射線性に優れた半導体素子の創製に向けて、有力候補である水素化アモルファスシリコン(a-Si:H)半導体の放射線照射効果に関する系統的な実験的研究を行い、その成果をまとめたものである。特に、これまで研究例の少ない放射線照射中その場同時測定法を用いることで、放射線による a-Si:H の暗伝導度、光伝導度、放射線誘起電気伝導度およびキャリア濃度等の変化に対して新しい知見を得ており、その主な成果は以下のとおりである。

1) 暗伝導度・光伝導度に対する放射線照射効果

その場電気伝導度測定装置を構築し、各種放射線(電子線、陽子線、重イオン)のエネルギー、フルエンス等の照射条件毎に暗伝導度、光伝導度を測定し、また温度特性と照射後の準安定現象を調べることにより伝導度変化の全体像を明らかにした。イオン照射によるドナー型欠陥の一時的生成には電子的励起が関与していること、 10^{-4} dpa を超えるフルエンス領域では水素終端による欠陥密度低減効果は失われ、水素を含まない a-Si と同じ照射効果を示すことなどを明らかにした。また、光照射劣化に関わる可逆的な欠陥とは異なる欠陥が生じることを新たに見だし、照射効果と光照射劣化は全く異なるものであることを明らかにした。

2) 高エネルギー陽子線照射による放射線誘起電気伝導

放射線誘起電気伝導度(RIC)測定装置を構築し、10 MeV 陽子線中の非ドープ、n 型、p 型 a-Si:H の RIC の変化や光感度変化の測定により伝導機構を明らかにした。特に、非平衡キャリアの再結合過程は欠陥準位を介した間接再結合が支配的であることを明らかにした。

3) 高エネルギー陽子線照射によるゼーベック係数変化

その場熱起電力測定装置を構築し、高エネルギー陽子線照射による a-Si:H のゼーベック係数変化を調べた。暗伝導度、光伝導度の上昇が起こる低フルエンス領域では負のゼーベック効果を示すことから、ドナー型欠陥の生成によって n 型に変化していること、暗伝導度と光伝導度が減少に転じる高フルエンス領域ではドナー型欠陥が消失することを明らかにした。

以上のように本論文は、放射線照射による水素化アモルファスシリコンの半導体特性変化を実験的に明らかにしたもので、その成果は耐放射線性半導体素子の創製に向けて学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また平成 24 年 2 月 17 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。