

第9章

総括

第9章 総括

本研究では、サイクロトロン加速器の 17 MeV 陽子線ビームラインに試料冷却機と光学用分光器を結合し、照射直後または照射直下での光伝導、暗伝導、粒子線誘起伝導をその場で（強放射線のため遠隔操作で）測定した。本論文第2章で述べたように良く安定化された陽子線束と試料温度の下で測定を行った結果、以下に列挙するような新しい知見を得ることができた。

第3章で示したように結晶 Si の光伝導度は照射線量に対して二段階的劣化を示す。低線量域において光伝導は照射線量の増加とともに緩やかに減少する。これは照射により導入された欠陥が再結合中心として働き、光キャリア寿命を減少させるためである。このとき、暗キャリア数は照射線量に比例して減少している。そして、ついにほぼ全てのキャリアが欠陥に捕獲されると、急激な光伝導の減少が起こる。

この結果を耐放射線性という観点から見ると、浅い不純物添加濃度が高い試料ほど高照射線量までキャリア枯渇が起こらず、急激な光伝導減少が避けられる。これは Si 光伝導型光検出素子の耐放射線性向上の指針を与える。しかしその反面、あまりに添加量が多いと暗電流が大きくなり、光伝導の観測が困難になるトレードオフの関係が存在する。添加量 $\sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ が限界に近いと思われる。

第7章で示したように、非晶質 Si (a-Si:H) は結晶 Si に比べ、高い耐放射線性を示す。これは非晶質構造の柔軟性に起因するものと考えられる。同じ程度の耐照射性を不純物添加により持たせた結晶 Si と比べると、非晶質 Siの方が暗電流が少なく、S/N比という点では優れている。しかし a-Si:H は光劣化を示す点、また熱的安定性、すなわちダングリングボンドを末端している水素が熱により奪われた場合に劣化するなどの問題があり、どちらが一概に優れているとは言えない。

第6章で述べたように、光伝導で観測された二段階劣化と類似の現象が、宇宙用 Si 太陽電池でも観測され、特に高線量側での急激な劣化が大問題となっている。発見当初、その機構解明が太陽電池構造のみで行われ、原因は移動度の減少かキャリア枯渇かと混迷を極めた。我々のバルク試料での結果が相補的な情報を与え、原因がキャリ

ヤ枯渇であることを明らかにした。

粒子線誘起伝導 (RIC) に関する結果は、本論文の内容のうち、とりわけ独創性のあるものであると考えられる。第4章の結晶 Si の場合、光伝導との比較から粒子線による欠陥生成を除けば RIC は光伝導とほぼ同じ現象として理解できることを示した。光伝導はよく弱励起近似で議論されるが、RIC の場合は粒子線による強い電子励起を考慮して、一般的な取り扱いをしなければならない。以上の結論は、あくまでも陽子線照射による高エネルギー励起 (1 個の電子が \sim MeV まで励起) がエネルギー緩和の後に、光伝導に相当するバンド間励起 (\sim 百万個の電子が伝導帯 \sim 1 eV に励起) に繰り込んで理解可能であることを示すものである。つまり、陽子線照射下で起こる高エネルギー特有の多様な現象の可能性を否定するものではないと考える。

対照的に、第8章で議論した非晶質 Si の RIC は光伝導とまったく異なり、30 時間以上におよぶ極めて緩慢な減衰 (永続的 RIC) を示す。同じ元素で構成され、局所的な結合様式もほぼ同様であるのに、結晶と非晶質という違いでこれだけ異なる RIC 挙動が観測された点は極めて興味深い。

第7章で述べたように、a-Si:H の高い耐放射線性は、柔軟な半導体非晶質構造により、生成された欠陥が容易に緩和・再結合するためであると思われる。しかし現象論的に言えば、永続的 RIC が重要な役割をしている可能性がある。多くの場合、a-Si:H では暗伝導度が高い材料ほど、高い光伝導を示すことが知られている。永続的 RIC は a-Si:H の暗伝導度を上昇させ、結果として高い光伝導度を保持させている可能性があり得る。つまり、永続的 RIC は新現象として興味深いばかりではなく、耐放射線性という応用上からも重要な現象であるかもしれない。

第5章では、強放射線照射直下での光検出を模擬するために、陽子線・光同時照射下での光伝導測定を行った。その結果、同時照射下では光伝導が数十%に減少することが明らかにされた。これは今まで考慮されてこなかった光検出素子の耐照射性の問題であり、その重要性がこの実験により初めて明らかにされた。結晶 Si の場合、同時照射による光伝導の抑制は、伝導度増加 $\Delta \sigma$ の励起強度依存性の飽和傾向に起因する。これを避けるためには、第4、5章で議論した $G_0 \sim C n_0^2 / 4$ を大きくすればよい。そ

のためには、多数キャリア密度 n_0 を大きくする方法があるが、これは暗電流を増やすこととなる。少数キャリア寿命 τ を何らかの方法により減少させ、有効再結合係数 C を大きくする方法もあるが、光伝導の感度を減少させてしまう。どちらの方法も光伝導の測定を困難にする方向に働き、強放射線下での光検出という観点からはトレードオフの関係にある。即ち、それらのパラメーターには最適値が存在する。これらの最適化により、光伝導の抑制は軽減され、強放射線下での感度の良い光検出が可能になると思われる。

以上のように、本論文では結晶及び非晶質 Si の光伝導の耐照射性、粒子線誘起伝導、さらには同時照射試験の重要性などの数々の新しい知見が示されている。特に、結晶材料と非晶質材料、粒子線誘起伝導と光伝導といった効果的な対比を行い、Si 系材料の耐放射線性の全体像を明らかにしたと考える。

これらの知見は Si 系耐照射性光検出素子への応用に向けて、その基礎的機構を明らかにした極めて重要な情報であり、また素子設計の指針を与えるものである。さらに、Si 系に限らずとも、本論文で議論された概念のいくつかは、その他の半導体の耐放射線性を考える場合においても応用可能な、普遍的方法論をもたらすものであると考える。