

シリコンの真正点欠陥研究の過去・現在・未来－赤外吸収を中心に－

Research on Intrinsic Point Defects in Silicon Crystal-History and Future (Infrared Spectroscopy)

井上直久

東京農工大学、大阪府立大学

(Naohisa Inoue: Tokyo University of Agriculture and Technology))

過去 シリコン単結晶は、無転位になった時から、点欠陥の sink が無くなって点欠陥が問題になったと言われている。円筒状結晶をウエハに輪切りにすると渦巻状の模様（スワール）が見られ、その元である微小欠陥が電子デバイスの動作不良を起こすことが分かった。1975年に D-RAM の開発研究が国策で始まり、微小欠陥対策は通産省傘下の超 LSI 研究所と、郵政省傘下の電電公社研究所での重要テーマの一つとなった。当時は微小欠陥は、透過電子顕微鏡観察で侵入型の転位ループだったため、シリコン結晶で支配的な点欠陥は格子間原子と考えられていた。当初は LSI にはるつぼを使わず高純度の FZ 結晶が検討されたが、その後、石英るつぼ中の融液から引き上げて酸素を含む CZ 結晶の方が機械的に強いことが決め手となって、現在に至っている。CZ 結晶中の微小欠陥は、過飽和の酸素の析出により、デバイス作成中の熱処理により発生する侵入型の積層欠陥が支配的だったため、酸素・炭素濃度などの赤外吸収測定は必須である。

シリコンデバイスでは p、n 導電性の付与のために III、V 族の不純物拡散が行われる。これには真正点欠陥が関与するため、その平衡濃度と拡散係数に代表される物性値の決定はプロセス技術の基本であるが、長い間混乱を続けてきた。これには、真正点欠陥が制御できなかったり、軽元素と複雑に反応したり、非平衡な拡散プロセスが複雑など色々な要因がある。一方点欠陥の研究としては、粒子線照射により発生する真正点欠陥と酸素・炭素不純物の複合体の赤外吸収法による研究が盛んであった。当初は実用的には原子炉周辺機器や人工衛星搭載部品に関係していた。

現在まで 1995 年に CZ シリコン結晶には、大きさが最大数百 nm に達するほぼ正八面体の「空洞欠陥」があるという衝撃的な発見があった。点欠陥の主役がこれまでの「格子間シリコン」から「空孔」に代ってしまったわけである。その後、これを低減するために「窒素ドープ」や「完全結晶成長技術」が活用されるようになった。これらは、真正点欠陥の制御を必然的に要求し、測れないながらも制御が指向されている。新しい方法による空孔の検出の試みが続いている。

点欠陥の平衡濃度と拡散係数は、これまで研究者により数桁の違いがあったが、その原因は実験手法や解析に用いたモデルの問題であることが次第に明らかにされ、収束に近づいている。照射点欠陥の研究は、これまで、赤外吸収が低感度であるためとして、高炭素濃度や大線量で研究されてきた。一方近年照射誘起欠陥がハイブリッドカーのキーデバイスに利用されるようになり、高品質・低線量の実用に近い条件での研究が望まれている。赤外吸収の感度は年々向上させられ、現在では複合体濃度 $1E+12/cm^3$ 台も検出可能となっている。赤外吸収では単体の点欠陥は検出できないが、V2,I3,I4 などは検出されたりその可能性がある。

将来 点欠陥の検出・評価や挙動の解明や制御の夢が近付いている。一方、シリコン結晶の点欠陥の制御を支えてきたわが国の半導体産業は衰退し始めており、大学を含めた研究者は急速に減っている。産官学を越えた連携により夢を実現したいと考えている。