

超音波によるシリコンウェーハの原子空孔評価・制御 の基盤技術の構築

P63

Observation and evaluation of vacancy in silicon wafers using ultrasound method

根本 祐一 nemoto@phys.sc.niigata-u.ac.jp

新潟大学 大学院自然科学研究科

1. 研究背景

点欠陥としての原子空孔は、最も基本的な格子の欠陥であり、固体物理の教科書には熱力学的な挙動について若干の説明がある。しかし、現代の究極的に進化した ICT 系およびパワー系半導体デバイスの基盤材料であるシリコンウェーハにおいて、原子空孔がさまざまな価値をもって取り扱われていることは意外と知られていない。材料としてのシリコンウェーハの製造において我が国は世界市場の過半を占めており、半導体デバイスで凋落の現状であるのと対照的に、主要部材では依然として強みがある。

現代の半導体産業では、原子空孔が凝集したポイド欠陥や、原子空孔と酸素との析出物など原子空孔が生成因子となるナノレベルサイズの微小欠陥制御がより一層重要となっている。しかしながら、産業用ウェーハにごく僅かに存在する原子空孔を観測できる手法と基礎研究が立ち遅れており、原子空孔評価は産業界で実現していない。そのため、原子空孔を簡便に観測・評価し、結晶育成およびデバイス製造にフィードバックすることで次世代ウェーハ開発を目指す取り組みをシリコンウェーハメーカーと共同で進めている。

2. 超音波法による原子空孔の観測と電子状態の解明

シリコン結晶中の原子空孔を観測しようとする試みは 1960 年代以降 Watkins ら米国での挑戦があり、電子線照射により意図的に原子空孔濃度を 10^{14} – 10^{16} cm^{-3} 程に極端に高く加工した試料において電子スピン共鳴法での観測例が知られている。これに対し私たちは、超音波位相比較法による音速の高分解能測定によって、産業用途のシリコンウェーハ中に 10^{12} – 10^{14} cm^{-3} 程のごく僅かに存在する原子空孔を観測することに世界で初めて成功した[1]。

ICT 用ウェーハに用いられるボロン添加シリコンでは、原子空孔は周りのダングリングボンドにより形成される軌道三重項に電子が 1 個だけ収容された電荷状態 V^{\cdot} をとる。これはシリコン結晶の弾性定数 $(C_{11}-C_{12})/2$ と C_{44} の両方の横波モードが、ヘリウム温度領域から測定可能な最低温度の 20 mK まで $1/T$ に比例したキュリー型の低温ソフト化を示すことから実証された。さらに低温ソフト化が 2–3 T 程度の比較的弱い磁場印加によって徐々に減少していく磁場依存性を示すことから、スピン-軌道結合により形成される Γ_8 四重項が、ボロン添加シリコンにおける原子空孔の基底状態であることを明らかにした。ウェーハメーカーやデバイスメーカーとの共同研究により、原子空孔の電子状態について飛躍的に理解が進んだ[1–3]。

最近では、パワーデバイス用途のリン添加シリコンウェーハにおける原子空孔の観測・評価について、ウェーハメーカーとの共同研究を実施している。ICT 用ボロン添加シリコンにおける原子空孔の電子状態との類似点や相違点が次々と明らかになってきている。

3. 今後の展開

電力の高度制御の要となるパワーデバイスでは、ウェーハの表層領域で動作する ICT 用デバイスとは異なり、ウェーハ全体の高品質化が決定的に重要となる。現在、ハイスペック用途には中性子照射でリン添加を行う FZ シリコン(NTD) が用いられているが、200 mm 以上の大口径化やコスト面で限界を迎えている。そのため、昨今のパワーデバイスの爆発的な需要拡大を支えるコストメリットの高いリン添加 CZ シリコンウェーハの 300 mm 大口径化を目指した技術開発が進んでいる。CZ 法では石英坩堝からの酸素混入が不可避である。したがって、原子空孔が生成因子となる微小欠陥の評価・制御をウェーハ全体で高度化することが求められている。低温超音波法による原子空孔の基礎研究の成果を、評価・制御技術に結びつけるためウェーハメーカーとの研究開発を継続している。

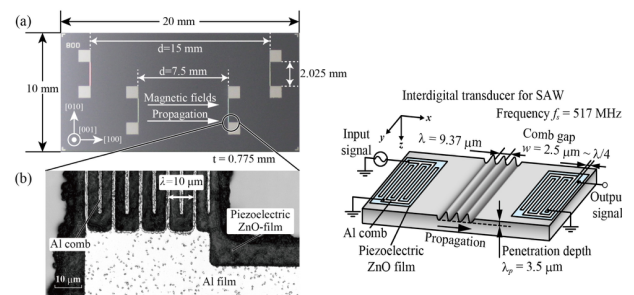


図 ICT 用シリコンウェーハの表層領域を評価するための表面弾性波(SAW)デバイス。左図(a)ウェーハ上に製造した SAW デバイスと(b)櫛状電極の拡大写真。右図 SAW 伝搬の概略図[2]。

【共著者(所属)】

赤津光洋(新潟大)・後藤輝孝(新潟大)・三本啓輔(富山県立大)

【参考文献】

- [1] T. Goto et al. J. Phys. Soc. Jpn. **75** (2006) 044602.
- [2] K. Mitsumoto et al. J. Phys. Soc. Jpn. **83** (2014) 034702. 他
- [3] 特許第 5008423 号、5204415 号、5276347 号、6291797 号他

【関連 WEB】

- [1] <https://www.sc.niigata-u.ac.jp/nemoto/index.html>