



## 伊藤 公平

慶應義塾大学理工学部 物理情報工学科

プロフィール：昭和40年8月25日生 研究領域「状態と変革」研究者 98年10月より3年間 課題名「同位体制御による半導体物性デザイン」平成6年カリフォルニア大学バークレー校材料科学専攻博士課程終了 Ph.D.現職：慶應義塾大学理工学部物理情報工学科専任講師 趣味：議論、ビール

# 同位体制御による半導体物性のデザイン

## 要旨

シリコン (Si) やゲルマニウム (Ge) などの半導体結晶中には質量や核スピン数の異なる複数の安定同位体が無秩序に分布しています。私たちは、この質量や核スピンを人為的に制御することで、物の性質（物性）が変化できることを提案しました。シリコンとゲルマニウムの同位体を自由自在に操ることで、新しい材料の性質が実現され、新しい素子が構築できるよう、過去3年間の研究を進めてきました。

同位体制御された半導体が過去に作製された例がほとんどありません。そこで、私たちは試料作製から着手しました。同位体操作は、バルク（塊）全体で行う場合と、原子レベルで同位体の積み木をする場合の2種類に分けられます。前者（バルク全体）の場合はシリコンに着目し、世界に先駆け世界最高同位体純度99.92%の $^{28}\text{Si}$ バルク単結晶の成長に成功しました。（図1）後者（原子レベルの積み木）の場合はGeに着目し、 $^{70}\text{Ge}/^{74}\text{Ge}$ 同位体超格子の作製に成功しました。（nは積み上げた同位体数で典型的な値は32原子層以下）

次に、作製された試料でどのような物性が変化するかを調べました。着目したのは質量の変化に関連した格子振動の様子です。 $^{28}\text{Si}$ バルク単結晶では伝播する格子振動に対する散乱の減少が期待され、その結果、熱伝導度の大幅な上昇が予測されます。実際に99.98%の $^{28}\text{Si}$ バルク単結晶では、通常同位体組成のシリコンと比較して、室温で60%程度も熱伝導が上昇することが報告されました。解析では非常に不思議な同位体効果が潜在する可能性が示唆されました。 $^{70}\text{Ge}/^{74}\text{Ge}$ 同位体超格子では、ラマン分光による音響フォノンの解析と、フェムト秒パルスレーザーによるポンプ・プローブ法を用いてコヒーレントに励起された光学フォノンの直接比較を行いました。始めに振動モードのピリリエンゾーン折り込みを確認し、超格子（質量の周期構造）が完成していることを示しました。次にラマンとフェムト秒パルスの波長依存性が全く異なることを示し、同じ光学フォノンとはいえ、励起光が連続である場合と超短パルスである場合のフォノン発生機構が全く異なることを提示しました。その他の同位体制御を利用した成果として、金属-絶縁体転移に関する詳細な実験がありますが本講演では時間の制限から割愛します。

核スピンを利用する例として、私たちは $^{28}\text{Si}$ のSi周期構造を利用した量子コンピュータの形態を考案しました。核スピン1/2を有する $^{28}\text{Si}$ 細線を、核スピンを持たない $^{29}\text{Si}$ 母体中に埋め込むことで量子計算を実現します。シリコンのみから構成される本提案は、いまだ実現されていない固体量子コンピュータの構築に向けた第一歩と自負しています。

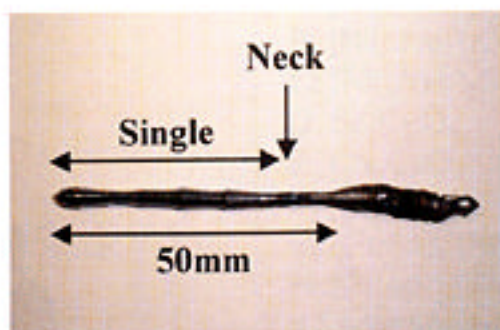


図1  $^{28}\text{Si}$ 同位体単結晶

## 発表論文

1. T. D. Ladd, J. R. Goldman, F. Yamaguchi, Y. Yamamoto, E. Abe, and K. M. Itoh, "An All Silicon Quantum Computer," Phys. Rev. Lett. 投稿中
2. M. Nakajima, H. Harima, K. Morita, K. M. Itoh, K. Mizoguchi, E. E. Haller, "Coherent Confined LO Phonons in  $^{70}\text{Ge}/^{74}\text{Ge}$  Isotope Superlattice," Phys. Rev. B **63**, 161304(R) (2001).

3. K. M. Itoh and E. E. Haller, "Isotopically Engineered Semiconductors - New Media for the Investigation of Nuclear Spin Related Effects in Solids," *Physica E*, **10**, 463-466 (2001).
4. M. Watanabe, K. M. Itoh, Y. Ootuka, E. E. Haller, "Localization Length and Impurity Dielectric Susceptibility in the Critical Regime of the Metal-Insulator Transition in Homogeneously Doped P-Type Ge," *Phys. Rev. B*, **62**, R2255-R2258 (2000).
5. K. Morita, K. M. Itoh, J. Muto, K. Mizoguchi, N. Usami, Y. Shiraki, and E. E. Haller, "Growth and Characterization of  $^{70}\text{Ge}/^{76}\text{Ge}$  Isotope Superlattices," *Thin Solid Films*, **369**, 405-408 (2000).
6. M. Nakajima, K. Mizoguchi, K. Morita, K. M. Itoh, H. Harima, and S. Nakashima, "Comparison of Coherent and Incoherent LO Phonons In Isotopic  $^{70}\text{Ge}/^{76}\text{Ge}$  Superlattices," *J. Lumin.*, **87-89**, 942-944 (2000).
7. K. M. Itoh, "Variable Range Hopping Conduction in Neutron-Transmutation-Doped  $^{70}\text{Ge}:\text{Ga}$ ," *Phys. Stat. Sol. (b)*, **218**, 211-216 (2000).
8. K. Takyu, K. M. Itoh, K. Oka, N. Saito, and V. I. Ozhogin, "Growth and Characterization of the Isotopically Enriched  $^{28}\text{Si}$  Bulk Single Crystal," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **38**, L1493-L1495 (1999).
9. K. M. Itoh, M. Watanabe, Y. Ootuka, and E. E. Haller, "Scaling Analysis of the Low Temperature Conductivity in Neutron-Transmutation-Doped  $^{70}\text{Ge}:\text{Ga}$ ," *Ann. Phys. (Leipzig)*, **8**, 631-637 (1999).
10. M. Watanabe, K. M. Itoh, Y. Ootuka, and E. E. Haller, "Critical Exponent for Localization Length in Neutron-Transmutation-Doped  $^{70}\text{Ge}:\text{Ga}$ ," *Ann. Phys. (Leipzig)*, **8**, Spec. Issue, S1-3-S1-9, 273-276 (1999).
11. Watanabe, K. M. Itoh, Y. Ootuka, and E. E. Haller, "Metal-Insulator Transition of Isotopically Enriched Neutron-Transmutation-Doped  $^{70}\text{Ge}:\text{Ga}$  in Magnetic Fields," *Phys. Rev. B*, **60**, 15817-15823 (1999).
12. M. Watanabe, K. M. Itoh, Y. Ootuka, and E. E. Haller, "Metal-Insulator Transition of NTD  $^{70}\text{Ge}:\text{Ge}$  in Magnetic Field," *Physica B*, **284-288**, 1677-1678 (2000).
13. 大槻東巳、伊藤公平、Keith Slevin、「アンダーソン転移の理論と実験の現状」、*固体物理*、Vol. **34**, No. **5**, 301-308 (1999)
14. 伊藤公平、渡部道生、大塚洋一、「Ge:Gaにおける金属—絶縁体転移」、*日本物理学会誌*、Vol. **54**, No. **3**, 205-208 (1999).
15. 伊藤公平、「半導体同位体工学」、*固体物理*、Vol. **33**, No. **12**, 965-978 (1998).