20p-A17-3

FZ 法によるビスマス添加シリコンバルク単結晶の成長と FTIR 評価

FZ growth and FTIR characterization of bismuth doped silicon single crystals

慶応大理工，山田 快斗，伊藤 公平

Keio Univ., Kaito Yamada, Kohei M. Itoh

E-mail: kaito.y@z7.keio.jp

ビスマス(Bi)をシリコン(Si)中に添加し，量子ビットとして利用する研究に注目が集まっている．Bi はリン，ヒ素，アンチモンと同じV族元素であり，比較的深いドナー準位(71 meV)，V族最大の核スピン(I=9/2)，大きなゼロ磁場分裂(7GHz)を持つという特徴を，量子ビットとして活かすことが目標である[1,2]. Bi の添加はイオン注入により簡便にできる．しかしイオン注入では，添加部分は表面近傍に限られ，均一な添加が困難で，欠陥が生じやすく，そして何よりも電気的活性化が困難となっている．また, Bi は高い蒸気圧を有するため，バルク結晶成長中に添加することが困難である[3]. シリコンを溶融させると添加していた Bi が Si 融液から逃げ出し，蒸発してしまう．そこで本研究では結晶成長に用いる供給源 Si に深い穴を開け，そこに Bi を埋めることで蒸発を防ぎながらフローティングゾーン(FZ)法により融かし，そのゾーンを高速で動かす（固化させる）ことで Bi を添加させることに成功したので報告する．

FZ 装置は自作のものを用いた[4]．Fig. 1 のように供給源 Si を一度二分割し，分割面に溝を彫り，再接着後, 集光加熱により表面の隙間のみを融かし，粉状 Bi を埋め込む穴を形成した. そこに秤量した Bi 粒子を入れ単結晶を成長した．Fig. 2 にホール効果によるキャリア濃度測定結果を示す．実線は温度に依存するキャリア統計式によるフィッティングである．これより，試料は n 型で，室温におけるキャリア濃度が 5.8×10^{16} /cm^3，ドナーの一部を補償しているアクセプタ濃度は 4.2×10^{13} /cm^3 で，温度依存性から得られるドナーのイオン化エネルギーは 71 meV と Bi 準位と良い一致を示した．また，Fig. 3 に示すとおり，遠赤外領域の光電流分光測定により, 赤線で示した Bi 由来の水素的準位を明確に観測した．ここでは Bi 添加前の Si 供給源に存在したリンも観測されている．今後は Bi 添加した 28 同位体 Si バルク結晶を成長することで，Bi の量子ビットとしてのスピン物性評価を実施する．

[1] M. H. Mohammady *et al.*, Phys. Rev. Lett. **105**, 067602 (2010).

[2] N. R. Butler *et al.*, Phys. Rev. B **12**, 3200 (1975).

[3] H. Riemann *et al.*, ECS Trans. **3**, 53 (2006).

[4] K. Takyu, *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **38**, L1493 (1999).

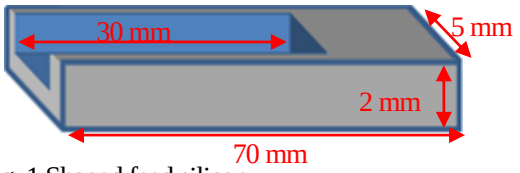

Fig. 1 Shaped feed silicon.

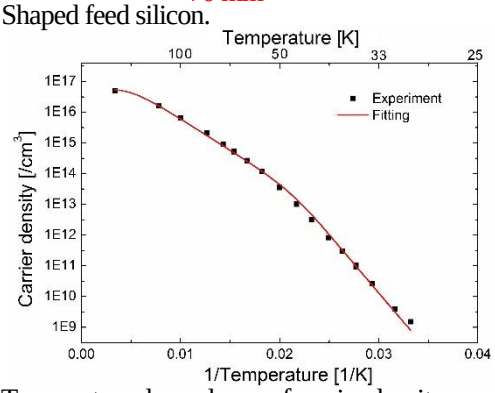

Fig. 2 Temperature dependency of carrier density.

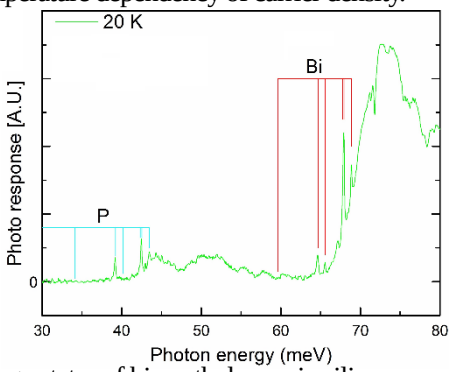

Fig. 3 Energy states of bismuth donors in silicon.

© 2014 年　応用物理学会