

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	122型鉄ニクタイド超伝導体のヘテロエピタキシャル成長と電子輸送特性
Title(English)	Heteroepitaxial Growth and Electron Transport Properties of 122-type Iron-Pnictide Superconductors
著者(和文)	佐藤光
Author(English)	Hikaru Sato
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第10194号, 授与年月日:2016年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:細野 秀雄,平松 秀典,須崎 友文,阿藤 敏行,松石 聡,神谷 利夫
Citation(English)	Degree; Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第10194号, Conferred date:2016/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

(博士課程)

論文審査の要旨及び審査員

報告番号	甲第		号	学位申請者氏名	佐藤 光	
論文審査 審査員		氏 名	職 名		氏 名	職 名
	主査	細野秀雄	教授	審査員	松石 聡	准教授
	審査員	須崎友文	准教授		神谷利夫	教授
		阿藤敏行	准教授			
		平松秀典	准教授			

論文審査の要旨（2000 字程度）

本論文は“Heteroepitaxial Growth and Electron Transport Properties of 122-type Iron-Pnictide Superconductors”と題し、鉄系超伝導体のエピタキシャル薄膜成長と得られた薄膜のテープ線材への応用に向けた電子輸送特性の検討を行ったもので、全 9 章から構成されている。

Chapter 1. “General Introduction”では、鉄系超伝導体発見以後の研究の歴史、鉄系超伝導体の特徴と、他の超伝導物質との比較を概観し、本研究の背景、研究意義、および目的を述べている。Chapter 2. “Critical factor for heteroepitaxial growth of cobalt-doped BaFe_2As_2 thin films”では、Co 添加 BaFe_2As_2 の PLD 法による高品質薄膜のヘテロエピタキシャル成長を支配している要因を考察している。その結果、成長速度が高品質エピタキシャル薄膜の成長を支配している要因であることを明らかにしている。Chapter 3. “Anomalous scaling behavior in a mixed-state Hall effect of a cobalt-doped BaFe_2As_2 epitaxial film”では、超伝導－常伝導混合状態における電子輸送特性から、Co 添加 BaFe_2As_2 薄膜の磁束ピンング特性を明らかにしている。温度掃引と磁場掃引で異なる挙動を見出し、ここで観察された特異なスケーリング則は、鉄系超伝導体では磁束液体状態が他の系に比べ極めて広い範囲でみられることに起因すると結論している。Chapter 4. “Anisotropic pressure effects on superconducting properties of cobalt-doped BaFe_2As_2 epitaxial films”では、薄膜－基板界面における熱膨張係数差、圧縮率差、格子ミスマッチを利用した異方的圧力が Co 添加 BaFe_2As_2 薄膜の超伝導特性に与える影響について述べた。高熱膨張率・高圧縮率をもつフッ化物基板 (CaF_2 、 BaF_2) と低熱膨張率・低圧縮率の酸化物基板 [MgO 、 $(\text{La},\text{Sr})(\text{Ar},\text{Ta})\text{O}_3$ (LSAT)] を薄膜成長基板として選択し、異方的圧力効果を検討した結果、観測された T_c の上昇は、基板からの異方的圧力印加に起因すると説明した。また、圧力下ホール効果測定では、キャリア密度が増加することが分かったが、 T_c とキャリア密度の相関は見られなかった。Chapter 5. “Unusual pressure effects on the superconductivity of indirectly electron-doped $(\text{Ba}_{1-x}\text{La}_x)\text{Fe}_2\text{As}_2$ epitaxial films”では、薄膜のみで合成できている非平衡相、La 添加 BaFe_2As_2 に対する外部圧力効果について記している。全 La 添加濃度 ($x=0.08 - 0.21$) にわたって、 T_c の上昇および $\Delta T_c = T_{c\text{onset}} - T_{c\text{zero}}$ の減少を観察した。これらは同じ電子ドーピング型の Co 添加 BaFe_2As_2 では見られていない。全 La 添加濃度領域で圧力下におけるキャリア密度の増加が観察されたが、前章の Co 添加薄膜と同様に、 T_c とキャリア密度の直接的な相関は見られな

かった。Chapter 6. “Heteroepitaxial growth of phosphorus-doped BaFe_2As_2 thin films” では Co 添加 BaFe_2As_2 よりも T_c が 10 K ほど高い P 添加 BaFe_2As_2 の薄膜化について記している。P 添加 BaFe_2As_2 は Co 添加 BaFe_2As_2 薄膜よりも 200°C ほど高い成長温度 (1050°C) でエピタキシャル成長することを見いだした。MgO 基板上に得られた薄膜表面には広範囲にわたってピンホールやドロップレットが認められず、高い結晶性 (XRD ロッキングカーブ半値幅 $\Delta\omega, \Delta\phi \sim 0.6^\circ$) を有することがわかった。LSAT 基板上に製膜した薄膜は、MgO 基板上の膜に比べて悪い結晶性 ($\Delta\omega = 1.1^\circ, \Delta\phi = 1.5^\circ$) を示した。走査型透過電子顕微鏡 (STEM) による観察から、この起源は、LSAT-膜界面における反応層の形成によって生じる多数のドメイン境界によるものと結論付けている。Chapter 7. “High critical-current density with less anisotropy in phosphorus-doped BaFe_2As_2 epitaxial thin films” では、基板の種類や成長速度が P 添加 BaFe_2As_2 薄膜の臨界電流密度 (J_c) 特性に及ぼす影響について記している。MgO 基板上の薄膜 ($\text{BaFe}_2\text{As}_2\text{:P} / \text{MgO}$) と LSAT 基板上の薄膜 ($\text{BaFe}_2\text{As}_2\text{:P} / \text{LSAT}$) の J_c を比較したところ、前者は後者よりも高い自己磁場中 J_c ($J_{c,\text{self}}$) を示した。後者は低い $J_{c,\text{self}}$ に起因して、全磁場領域で前者よりも低い J_c を示したが、磁場の増加に強い種類の磁束ピンニングセンターをもつことがわかった。これらの結果は、 $J_{c,\text{self}}$ と磁場に強い磁束ピンニングセンターの導入がトレードオフの関係にあることを示している。さらに、成長速度を 2.2 Å/s まで落とすことによって、 $\text{BaFe}_2\text{As}_2\text{:P} / \text{MgO}$ は $J_{c,\text{self}} = 7 \text{ MA/cm}^2$ 、 $J_c(9\text{T}) = 1.1 \text{ MA/cm}^2$ とこれまで報告された鉄系超伝導体の薄膜で最高の値を達成した。また、磁場印加角度に対して等方的な J_c を示した。STEM 観察により、成長速度の低下によって生成する欠陥の種類が縦方向の転位になることがその起源であることを明らかにしている。Chapter 8. “Isotropic J_c properties of phosphorus-doped BaFe_2As_2 films on practical tape-substrates: Toward future applications to coated conductors” では、単結晶基板上で得られた P 添加 BaFe_2As_2 薄膜の作製条件を用いて、実用超伝導線材用テープ基板上に P 添加 BaFe_2As_2 薄膜の作製を行った結果について述べている。4 K における J_c の値は、自己磁場中で 1 MA/cm²、9 T で 0.1 MA/cm² で、 $\text{BaFe}_2\text{As}_2\text{:P} / \text{MgO}$ 薄膜より約 1 桁低い値であった。印加磁場に対する J_c の角度依存性の測定から、MgO 単結晶基板上の薄膜と同程度の等方的な特性を示し、現在までの鉄系超伝導薄膜線材の中で最も小さい異方性をもつ。さらに、面内配向度の悪い ($\Delta\phi_{\text{MgO}} = 8$ 度) 基板上の膜は、 $\Delta\phi_{\text{MgO}} = 4$ 度のものよりも、高い J_c (9 T において約 1.9 倍) を示した。これは面内配向度の劣化によって生じるドメイン境界が、 J_c を劣化させることなくピンニングセンターとして働いているためと考えられる。Chapter 9. “General Conclusion” では本研究における結果を総括している。

以上を要するに、 T_c が 20~31 K で大気中で安定な BaFe_2As_2 を母相とし、Fe サイトを Co もしくは Ba サイトを La で置換した電子ドープ系、および As サイトを P で置換した等価イオン置換系を対象としたエピタキシャル薄膜を合成し、磁束ピンニング特性、外部圧力効果を調べることで、超伝導特性を明らかにしている。また、P 置換膜では、薄膜成長速度の制御で、磁束ピンニングに最適なサイズの欠陥が c 軸方向に成長することを見だし、外部磁場に対して等方的、かつ鉄系超伝導体薄膜では最高性能の磁場中 J_c (9 T において 1 MA/cm² 以上) を達成した。さらに、実用の際に利用される薄膜線材テープ基板上でも、鉄系超伝導体薄膜では最も等方的な臨界電流特性 (12 K、3 T において $J_{c,\text{min}}/J_{c,\text{max}} = 0.82$) を示す薄膜の作製に成功している。これらの知見は、テープ線材への応用が期待されている鉄系超伝導体の薄膜の成長に関して新規で且つ重要である。よって、博士 (工学) に値すると判断される。