

高品質トポロジカル $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ エピタキシャル薄膜の作製と特性評価

羽立 康浩, 鈴木 健太, 浅野 秀文, 植田 研二
(名大院工)

Fabrication and characterization of high-quality topological $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ thin films

Yasuhiro Hadate, Kenta Suzuki, Hidefumi Asano, Kenji Ueda
(Nagoya Univ.)

はじめに

トポロジカル物質はヘリカルスピン偏極した超高移動度表面伝導性を有するため、スピントロニクスデバイス材料として注目されている。中でも $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ は非常に高い移動度 ($\sim 85000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) に加えて大きなスピンホール効果が表れる等優れた物理特性を有することから盛んに研究が行われている。 $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ (BiSb) は Sb 組成により特性が変化し、 $x > \sim 0.04$ でトポロジカル相転移が生じトポロジカル半金属化し、 $x = 0.07 \sim 0.22$ でトポロジカル絶縁体となる。本研究ではトポロジカル絶縁体となる $x \sim 0.1$ を中心に高品質 BiSb トポロジカル薄膜の作製と特性評価を行ったので報告する。

実験方法

$\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($x = 0 \sim 0.45$) 薄膜は、 $\text{BaF}_2(111)$ 基板 (ミスマッチ: $\sim 3.2\%$) 上に分子線エピタキシ (MBE) 法を用いて作製した。 BiSb の固液境界線直下の $\sim 300^\circ\text{C}$ を目安に基板温度を設定し、高品質 BiSb 薄膜の作製を試みた。

結果と考察

$\text{BaF}_2(111)$ 基板上に製膜温度 (T_s) = $200 \sim 250^\circ\text{C}$ で BiSb 薄膜を作製した所、不均一に付着した多結晶膜となった。 150°C 以下の成長温度ではアモルファス膜、 280°C 以上の温度では膜付着が殆ど起こらなかった。これらは、 Bi の融点が低く (271°C)、高揮発性であることが主要因と考えられる。そこで、 $\text{BaF}_2(111)$ 基板上に低温で Bi の揮発を抑えながら BiSb を成長させた後に高温成長させる 2 段階成長法 ($T_s = \sim 150^\circ\text{C} \rightarrow \sim 250^\circ\text{C}$ の 2 段階で成長) により BiSb 薄膜を作製した所、X 線回折測定で、基板ピーク以外で BiSb の (00 l) ピークのみが観測され、 $\text{BaF}_2(111)$ 基板上で BiSb の c 軸配向成長が確認された [Fig.1(a)]。 $\text{BiSb}(003)$ ピークの半値幅は 0.75° と小さな値になり、結晶性の良好な薄膜が作製できている事が示唆された。面内 XRD 測定 (ϕ スキャン) 結果から [Fig.1(b)]、 $\text{BiSb}(012)$ と $\text{BaF}_2(-111)$ の双方で 3 回対称の鋭いピークが観測され、双方のピーク位置が一致した。これら XRD 測定結果から、 BiSb が $\text{BaF}_2(111)$ 基板上で $\text{BiSb}(001)[2-10]/\text{BaF}_2(111)[1-10]$ の配向関係でエピタキシャル成長する事が分かった。薄膜の面内、面直 XRD と逆格子マッピングより算出した BiSb 薄膜の格子定数は $a = 0.449 \text{ nm}$ 、 $c = 1.186 \text{ nm}$ となり、バルク値 ($a = 0.454 \text{ nm}$ 、 $c = 1.184 \text{ nm}$) とほぼ一致し、格子緩和した成長をしていることが分かった。これらの結果から、 BaF_2 等の格子整合性の良い基板を用いて 2 段階成長で製膜する事で、エピタキシャル BiSb 薄膜を作製できる事が分かった。次に $\text{BaF}_2(111)$ 基板上 BiSb 薄膜 (300 nm) のホール抵抗測定 (ρ_{xy}) を行った所、複数伝導層の存在を示唆する非線形挙動が観測された [Fig.1(c) 挿入図]。これは、作製した BiSb がトポロジカル表面伝導とバルク伝導の 2 種類の異なる伝導層を有する事に対応していると考えられる。ホール伝導度 σ_{xy} の 2 バンドモデル解析から、2 つの伝導層に対応したキャリア濃度、移動度がそれぞれ、伝導層 1: $1.8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、 $7450 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 、伝導層 2: $4.6 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 、 $5.5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ (@ 2 K) と算出された [Fig.1(c)]。これらの結果から、高移動度の伝導層 1 がトポロジカル表面伝導層、伝導層 2 がバルク伝導層に対応していると考えられる。膜厚の薄い BiSb 薄膜 (50 nm) において磁気伝導効果測定 (ΔG_{xx}) を行った所、弱反局在効果が現れ Hikami-Larkin-Nagaoka の式の解析では、トポロジカル表面伝導に対応する事を示す $a = -0.54$ と位相コヒーレンス長 $L_\phi = 109 \text{ nm}$ が得られた [Fig.1(d)]。

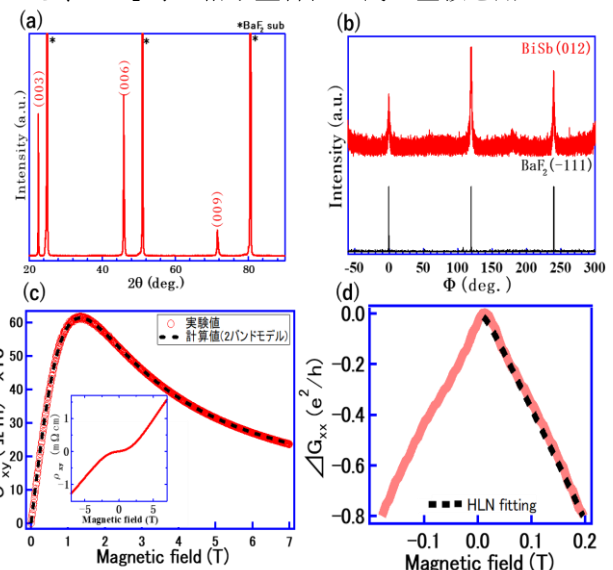


Fig.1 (a) Out of plane and (b) in-plane XRD patterns of the BiSb films, (c) Field dependence of the Hall conductivity, σ_{xy} and ρ_{xy} (inset). (d) Magnetoconductance curve ΔG_{xx} of the thinner ($\sim 50 \text{ nm}$) BiSb films.