

# 2次元超伝導を発現する2原子層高さインジウム超薄膜相の電子状態

平山博之,中辻寛,荻野嵩大 東京工業大学

キーワード:原子層物質,超伝導,インジウム,シリコン

# 1. 測定実施日

2020年11月10日	BL7U	(2 シフト)
2020年11月11日	BL7U	(2 シフト)
2020年11月12日	BL7U	(2 シフト)
2020年11月13日	BL7U	(2 シフト)

### 2. 概要

Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -B 基板上にインジウムを蒸着し、2原子層厚さの原子層物質 $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In 層を BL7U の超高真空チャンバー内で作成し、その表面・界面に局在した電子状態を角度分解光電子分光により計測した。この結果、 $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In 層形成前の Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -B 基板表面に存在していた B 原子は、 $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In 層形成後の In/Si 界面に残っていること、さらにこの基板上に形成した $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In 層は、超伝導発現に必要な2次元自由電子的な Fermi 面を持つことが明らかになった。

### 3. 背景と研究目的

グラフェンに代表される1~2原子層厚さを持った原子層物質は、従来の超薄膜の延長上にはなユニ ークな物性を発現する系として近年急速に研究が進められている。この中でもSi(111)7×7表面上に2 原子層厚さのIn原子により形成された $\sqrt{7}\times\sqrt{3}$ -In層は、バルクのInと同じ3K付近以下の温度におい て超伝導を示すことにより注目されている。ただし僅か2原子層厚さの $\sqrt{7}\times\sqrt{3}$ -In層がバルクと同定 とのTcを持った超伝導を発現できる原因として、 $\sqrt{7}\times\sqrt{3}$ -In層/Si(111界面の効果が示唆されているが、 その実態は明らかにされていない。

これに対し本研究は、従来 Si (111)7x7 基板上にしか形成できなかった 2 原子層高さのインジウム原子層物質 $\sqrt{7x}$ 3-In rect を、Si (111)7x7 とは異なる Si (111) $\sqrt{3x}$ 3-B 基板上に構築し、その電子状態を計測することにより、2 次元インジウム原子層物質の超伝導発現における基板界面の果たす役割を明らかにしようとするものである。

#### 4. 実験内容

Si(111)基板上への $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In 層の作成、およびその物性評価は、 参加に伴う表面構造や電子状態の劣化を防ぐため、全て超高真空中 で行う必要がある。このため、本研究では、BL7Uの超高真空試料準 備室内に、Si(111)基板の清浄化を通電加熱により行えるゴニオと In 原子蒸着用のセルをセットし、BL7Uの実験チャンバー内で、超高真 空下で Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -B 基板の清浄化と、その上への $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In 層 の形成を行った。

BL7Uの試料準備室内でSi(111)√3×√3-B 基板上に√7×√3-In 層 が形成できたことは、試料準備室に装備されている低速電子線回折



Fig.1 Si(111)√3×√3-B 基板 u 上に形成した√7×√3-In 層の LEED 像 (LEED)装置により、Fig.1 に示すような $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In 構造に対応する電子線回折パターンを観測すること によって確認した。このようにして準備した Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -B 基板上の $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In 層試料は、超高真 空で繋がれた BL7U の光電子分光計測室に搬送し、この試料のコアレベルおよび表面バンド分散を、in situ で軟 X 線領域の放射光を用いた光電子分光により計測した。

#### 5. 結果および考察

Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -B 基板上に形成した $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In 層試料のコア レベル測定において B 原子によるピークが観測された。ここで観 測された B 原子のピークは、 $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In 層形成前の Si(111) $\sqrt{3}$ x  $\sqrt{3}$ -B 基板表面の S5 サイトに居る B 原子のものと考えられる。さ らに本研究の前に行った表面界面 X 線回折の実験で得られた CTR 曲線は、In/Si 界面に B 原子h が存在する構造モデルと良い 一致を示していた。以上より、この試料は界面に B 原子が周期的 に存在していることは明らかであり、これまでの Si(111)7x7 基板 上の $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In 層とは異なる界面構造を持っていることが実証 された。



さらに、Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -B 基板上の $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In 層の角度分解光電子分光により、この系には2次元 地涌電子的な表面電子状態が存在することが。Fig.2のフェルミ面マッピングにおける炎上のフェルミ面 の観測から明らかになった。この2次元自由電子的な表面電子状態は、Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -B 基板上に形成 された $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In 層原子層物質においても、この原子層物質が超伝導を発現する可能性があることを 強く示唆している。

## 6. 今後の課題

今回の実験から、Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -B 基板上に作成した $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In 層は、従来のSi(111)7×7基板上に 作成した $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In 層とは異なる界面構造を持つこと、およびSi(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -B 基板上であっても $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In 層は超伝導発現に有利な2次元自由電子的な電子状態を持つことがあきらかになった。ただし 先にも述べたように、この系は従来のSi(111)7×7基板上に形成された $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In 層とは異なる界面構 造を持っているため。界面フォノンによるクーパー対の形成強度に変調が起こり、この結果超伝導転移 温度Tc は変化する可能性が期待される。この点を明らかにするべき、現在我々は、極低温走査トンネ ル顕微鏡(STM)を用いた超伝導ギャップの観測による研究を開始した。これにより、Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -B と Si(111)7×7基板上での $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In 層の超伝導発現やそのTc に差があることがわかれば、原子層物質 における超伝導発現に対する基板界面の果たす役割を明らかにできるものと期待される。

**謝辞**: 本研究の遂行にあたり、NTT-ATの安藤洋様、久保朋生様、松島隆明様、水野誠一郎様、あい ちシンクロトロン光センターの仲武昌史様、高倉将一様にご協力頂きました。