

## ソース・ドレイン間に極薄SiNx膜を用いた薄膜トランジスタの低温領域における電気特性

<sup>a</sup>兵庫県立大学工学研究科,<sup>b</sup>広島大学ナノデバイス・バイオ融合科学研究所 小林孝裕<sup>a</sup>, 大村泰久<sup>a</sup>, 松尾直人<sup>a</sup>, 横山新<sup>b</sup>

### ナノネット事業で初めて可能になった成果

- 1.7nmのSiNxトンネル膜を有するTFTにより、ゲートオフ電流を約10分の1に減少させることに成功した。
- ドレイン電流の温度依存性を調査し、その伝導機構を明らかにした。
- この成果を国際会議で招待講演をした。(IEEE 9th International Workshop on Low Temperature Electronics (WOLTE9 (invited)))

### 【研究概要】

高速化高輝度化を実現するためにトンネリング誘電体膜をチャンネルの両端に設けたTFT(Tunneling Dielectric TFT以下TDTFT)を作製し、ゲート電圧および温度依存性について調べ伝導特性について議論した。通常のTFT(以下Conv. TFT)およびTDTFTを作製しそれぞれの特徴を比較し、理論的な考察を行なった。まず、20~150Kの温度範囲においてTDTFTはConv. TFTとは異なる電圧依存性を示した。 $g_m$ は一定であり、その伝導機構は直接トンネルによる電流が支配的であった。TDTFTではSiNx膜による直接トンネリングによる電流が支配的であるためと考えられる。次に、 $V_g=10V$ での温度依存性について調べた。この結果もTDTFTが直接トンネリングによる電流が支配的であることを示した。

### 【特記すべき成果の詳細】

1.7nmのSiNxトンネル膜を有するTDTFTのゲートオフ電流を1/10以下としたことは特記すべき成果である。そのメカニズムを明らかにしたことは学問的に大きな成果と言える。

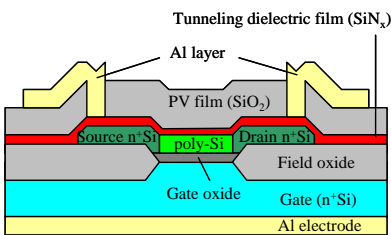


図1. TDTFTの断面構造。

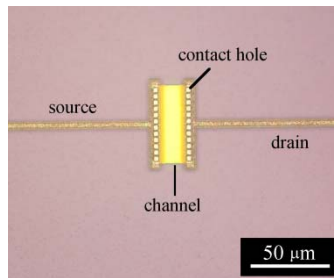


図2. 作製したTDTFTの光学顕微鏡写真。

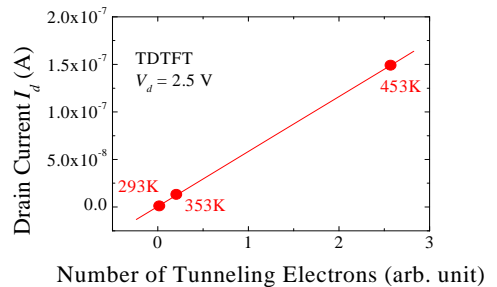


図3. TDTFの高温領域におけるドレイン電流  $I_d$  とトンネル電子数との関係。

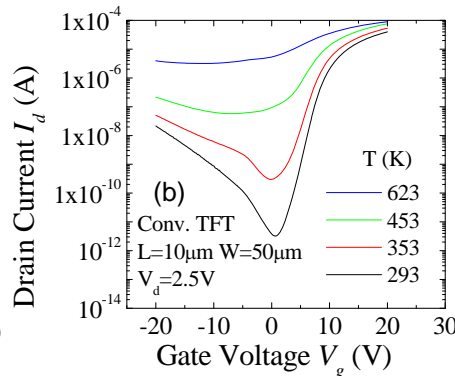
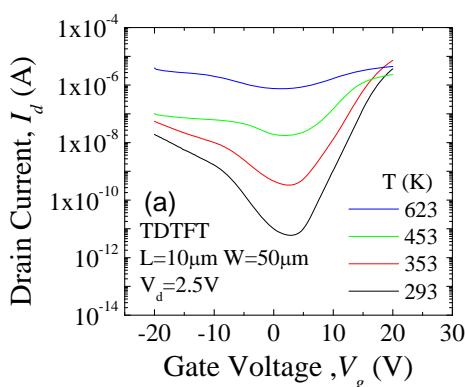


図4. (a) TDTFT および (b) conv. TFT のドレイン電流 ( $I_d$ ) - ゲート電圧 ( $V_g$ ) 特性。

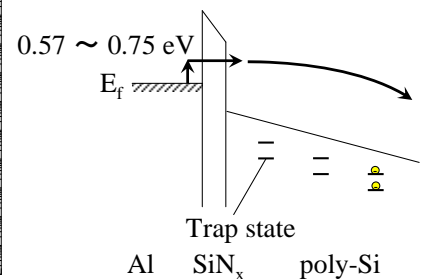


図5. TDTFTの電気伝導メカニズム(直接トンネル)。

## 1. 高品質真空用金属材料の研究

### ナノネット事業で初めて可能になった成果

本学の高度真空評価分析装置を活用し、アルミニウム合金やチタンを用いて高品質な真空環境を実現するための技術開発支援を多くの民間企業や公的研究機関に行った。高品質真空の実現に適した機械加工、溶接、表面処理技術の研究、ガス放出のメカニズムに関する研究を支援し、 $10^{-10}$  Pa以下の圧力の極高真空を安定的に達成可能にした。本成果によって、従来よりも1~2桁低い圧力の真空環境が実用化され、産業界での微細加工量産装置、研究機関での分析施設等で活用されている。

#### 【研究概要】

金属材料を真空系に用いる際に、種々の機械加工や溶接を行った部材から真空中に放出される極微量なガスの測定評価、適切な表面処理によるガス放出の抑制技術の開発、部材表面でのガス放出メカニズムの解明を進めた。その結果、高品質なアルミニウム合金/チタン材料製真空装置の実用化に結び付いた。

被支援機関： 民間-3機関、公的研究機関-2機関  
支援テーマ： 民間-11件、公的研究機関-5件

#### 【特記すべき成果の詳細】

従来よりも1~2桁低い圧力に対応した真空容器や真空コンポーネントを製造できるようになった。本支援成果は、特に高度な高品質真空環境が必要とされる微細加工量産装置 (Fig.1に例示)、分析装置、放射光施設などで実際に活用されている。

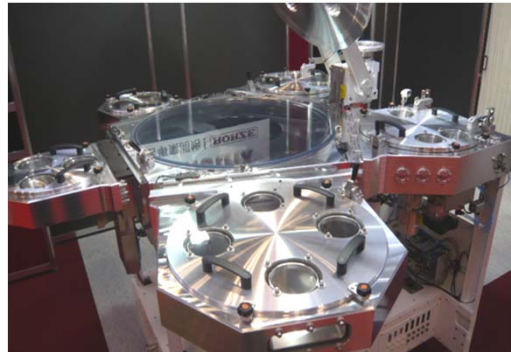


Fig. 1 Developed vacuum platform made of aluminum alloy for 18-inch wafers. (RORZE CORPORATION)

## 2. 高感度・高性能電子線レジストプロセスの開発

<sup>a</sup>グルーオンラボ, <sup>b</sup>熊本大学, <sup>c</sup>山口大学

宮川隆二<sup>a</sup>, 角田朋生<sup>b</sup>, 國武雅司<sup>b</sup>, 大谷真琴<sup>c</sup>, 浅田裕法<sup>c</sup>

### ナノネット事業で初めて可能になった成果

電子線リソグラフィは高解像性からトップダウンの作製技術として活用されている。さらなる微細化に対応するには、高解像度に加え、実用的な感度を有し、かつ、低ラインエッジラフネス(LER)である電子線レジストおよびプロセスの開発が不可欠である。ポリマー型電子線レジストの露光特性の評価支援を行った結果、ZEP520Aに比べ狭分散化したレジストにおいてLERを低減することができた。

#### 【研究概要】

ポジ型電子線レジストZEP520Aと同様な組成をもち、分子量と分散の異なるポリマー型電子線レジストを合成し、加速電圧50 kVで電子線描画を行うことで露光特性(感度・解像度・LER)を評価した。また、バーク温度や現像液といったプロセスについても検討し特性評価を行った。

#### 【特記すべき成果の詳細】

微細化が進むにつれ、デバイス特性等に影響するLERの低減が大きな課題となっている。本支援によって各レジストの露光特性を評価した結果、Fig.2および3に示すように狭分散化したレジストにおいてLERを低減することができた。今後、さらなる高感度・高性能電子線レジストの開発が期待される。

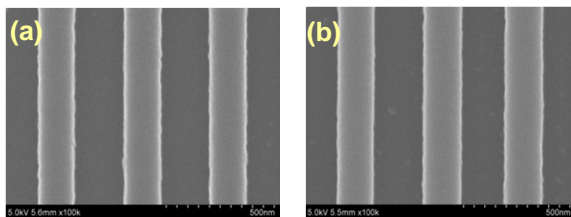


Fig.2 SEM images of 200 nm line patterns of (a) ZEP520A and (b) New Resist exposed at an acceleration voltage of 50kV.

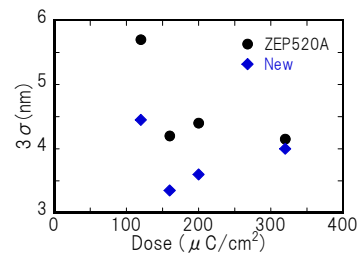


Fig.3  $3\sigma$  of line edge roughness as a function of exposure dose.

## 亜共晶改良Al-Si合金における添加Sr元素の位置と分布

<sup>a</sup> Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie, <sup>b</sup> 九州大学<sup>a</sup> N. Wanderka, <sup>a</sup> M. Timpel, <sup>a</sup> J. Banhart, <sup>b</sup> 山本知一, <sup>b</sup> 松村 晶

## ナノネット事業で初めて可能になった成果

1. 世界最高の検出効率を誇るX線検出器を搭載した収差補正走査/透過電子顕微鏡が材料工学分野にも革新的成果をもたらすことを実証した。
2. 自動車などの軽量化に貢献しているAl-Si系合金に微量添加されSrの結晶学的偏析位置と分布の様子が世界で初めて解明された。
3. 長く不明であった添加元素による凝固組織改変とそれによる力学的性質の改善の原理的機構を明らかにする大きな実験的知見であり、実用上極めてインパクトの強い成果である。

## 【研究概要】

Al-Si系合金は軽量で融液の流動性が良いので、複雑な形状をした機械部品用鑄造材料として古くから利用されている。鑄造組織を微細化して力学的強度を改善するために、Srなどの金属元素を微量に添加するが、そのメカニズムは長年謎であった。本研究ではSrを200ppm添加したAl-10%Si合金を収差補正/透過電顕と高効率X線検出器により調べ、Srの偏析位置と分布を結晶学的に明らかにし、組織微細化のメカニズム解明に成功した。

## 【特記すべき成果の詳細】

走査透過電顕観察により、Si相中の双晶交差位置に重元素Srの偏析(図1と図2の上)が示唆され、EDX元素マッピング(図2下)により、AlとSrの偏析が証明された。さらに、Al相とSi相の境界においてもAlとSrの共偏析が確認された。この様な共偏析は今回初めて明らかにされた成果であり、材料科学において極めてインパクトが大きい。

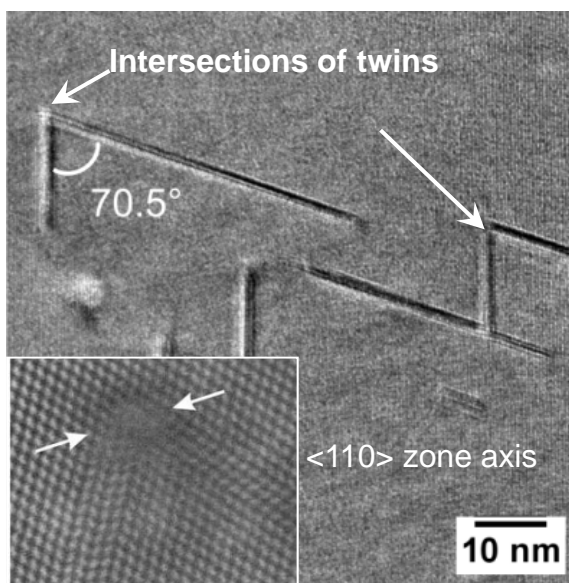


図1. Al-10%Si-200ppmSr合金のSi相の高分解能TEM像。

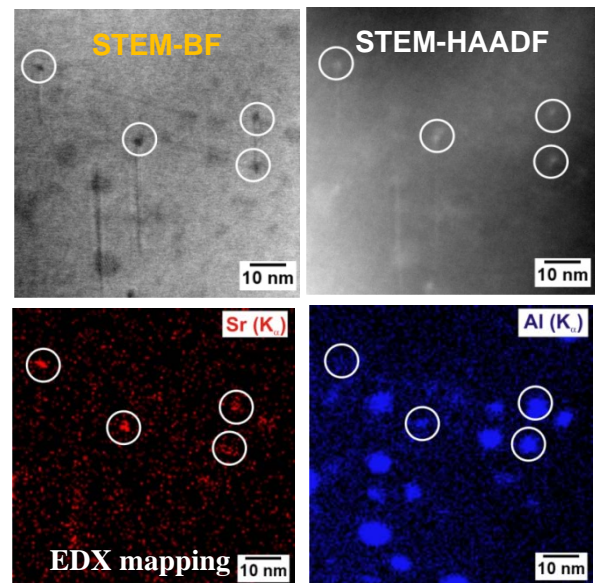


図2. 図1と同じ視野のSTEM像(上)とEDX元素マップ(下)。



鉛フリーはんだSn-Cu-Ni中の $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$ 金属間化合物の結晶構造及びNi原子状態の同定

<sup>a</sup>クイーンズランド大学, <sup>b</sup>(株)日本スペリア社  
野北和宏<sup>a</sup>, 末永将一<sup>b</sup>

## ナノネット事業で初めて可能になった成果

1. 企業では保有困難なシンクロトロン放射光設備を活用し、顧客から問合せのあった、鉛フリーはんだの微量Ni添加による亀裂抑制効果の謎を解明した。
2. はんだと基板の界面に形成される金属間化合物の構造変化を、強力な放射光を用いたX線回折法で初めて検出可能な長周期構造由来ピークを観察することにより明らかにし、亀裂抑制効果を解明した初めての事例である。
3. これにより、顧客からの問合せに対して明確な解析結果を示し、製品の信頼性向上に貢献した。なお、この結果は論文発表され、かつ(株)日本スペリア社のホームページにアップロードされている。

## 【研究概要】

欧州でのRoHS指定により全世界で鉛フリーはんだへの切換が進められている。その主成分はSnでありCu等が含まれるが、従来のSn-Pb共晶はんだと比べて経年劣化や接続信頼性の低下が懸念されている。筆者らは、微量のニッケルNi添加により、はんだ接合部の亀裂の発生が抑制されることを初めて見出した。その抑制効果については顧客からの問合せもあり、本課題ではそのメカニズムを結晶構造解析により調べることを目的とした。

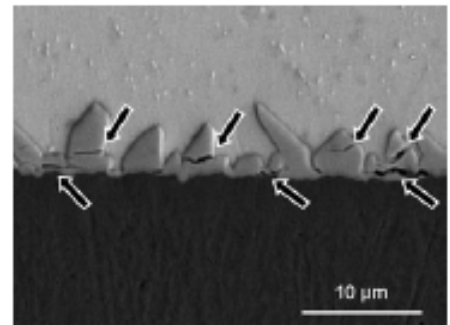


図1：はんだ接合部 $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ 金属間化合物の断面SEM写真（矢印は亀裂を示す）

## 【特記すべき成果の詳細】

はんだと銅基板の接合界面には $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ 金属間化合物が形成され接合特性を支配する。相図によれば $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ は $186^\circ\text{C}$ 以上で六方晶、以下では斜方晶に相変態し、相変態は体積変化(2.15%の膨張)を伴う。図1はNiを添加していないSn-Cuはんだ接合界面の断面SEM写真で、矢印は亀裂発生箇所を示す。一方、微量Niを含むSn-Cuはんだの接合界面ではほとんど亀裂が見られない。この亀裂がはんだ接合部劣化の原因であると考えられるため、 $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ 試料の結晶構造を放射光を用いたX線回折法により測定した。その結果を図2に示す。Niを含まない試料で現れる斜方晶に起因するピーク(矢印)はNiを含む試料では現れない。即ち、Ni添加により高温相(六方晶)のまま結晶構造が安定化し、亀裂発生が抑制できることを見出した。

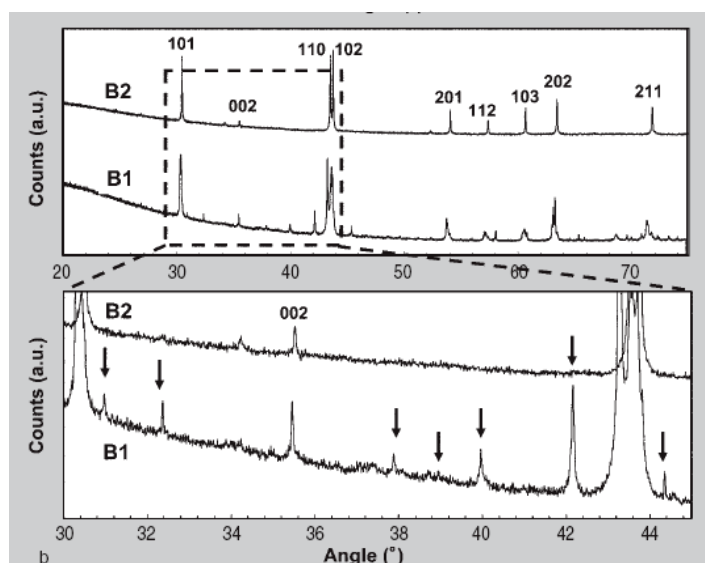


図2：X線回折測定の結果（矢印は斜方晶に起因するピーク）  
(B1)Niを含まない $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ 試料, (B2)Niを5at%含む $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$ 試料

## ウエハーレベルパッケージ可能な超小型高精度マイクロレーザー変位センサ

<sup>a</sup>九州大学, <sup>b</sup>(一財)ファジィシステム研究所澤田廉士<sup>a</sup>, 竹下俊弘<sup>a</sup>, ペンヤオ<sup>a</sup>, 森田伸友<sup>a</sup>, 安藤秀幸<sup>b</sup>

## ナノネット事業で初めて可能になった成果

1. 一研究室では所有できない、一連のプロセス装置を利用することで、超小型センサの実用化に道をつけた。
2. 従来、VDECのシャトル便、EMSでの試作の道はあったが、仕様がかたまらず、試行錯誤を繰り返すものについては時間と費用の点、対応可能性の面か実際には使えないことが多かったが、共用設備の利用によりチップレベルでの検証ができることを示した事例である。

## 【研究概要】

面発光レーザーとフォトダイオードの組合せという簡単な原理(図1)で超小型で高性能の変位センサの製作可能性が発案されたが、受光素子であるフォトダイオードを正確に配列する必要があり、ウエハ上に正確に作りこむことが要求される。また、特性の測定結果によっては、配列状態を変更することが必要で、繰り返し試作する必要があり、これまで実現が困難であった。北九州学術推進機構のプロセスは配列設計からチップの完成までを自身で実行できることから本センサの実用化の道が開けた。(図2)

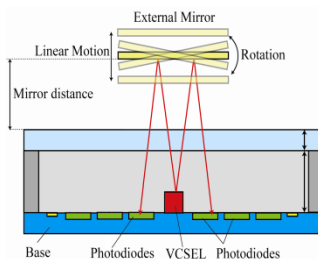


図1：測定原理

中央の面発光レーザーから射出されるガウシアンビームは外部のミラーで反射され、センサ部に戻る。ミラーが線形移動すると、検出面上のビームスポットの大きさと強度が変化。ミラーが傾くと大きさと強度の変化に偏りを生じる。

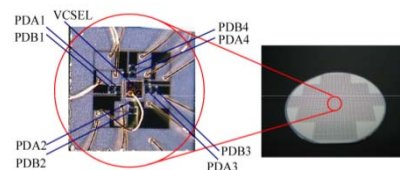


図2：製作したウエハとセンサ  
右側のウエハからフォトダイオードアレーチップを切り出し、面発光レーザーを搭載し、それぞれの素子にワイヤボンダーを用いて配線を接続する。

## 【特記すべき成果の詳細】

直線的な変位の観測状態(図3)と回転変位の観測状態(図4)の結果からセンサとして利用できることが分かった。受光用のフォトダイオードアレーの一組にダイオード2個を使用しているが、より正確な値を求めるためには、受光信号の変化をより精密に測定することが必要になる。

ダイオードアレーの一組の数を増すことで実現できることから、現在一組3個で実験を開始、良好なデータが得られている。自由に使える装置があって始めて実現できるものである。

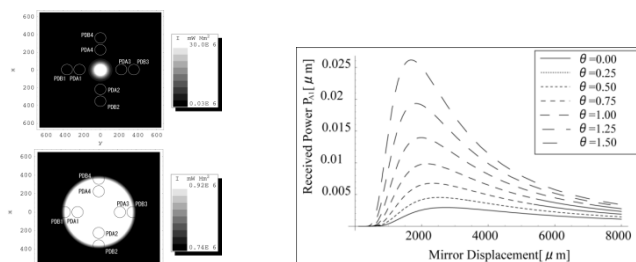


図3：直線変位でのスポット変化と信号

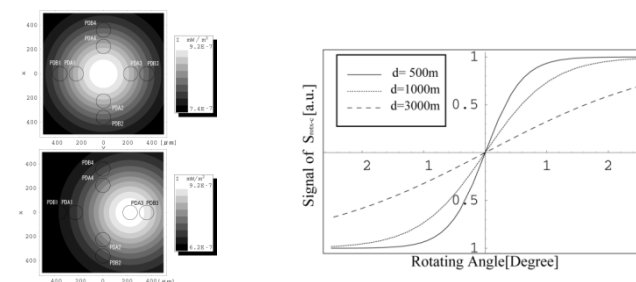


図4：回転変位でのスポット変化と信号

層状半導体 $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ 単結晶ナノ表面の電子構造研究山形大学, 佐賀大学<sup>1</sup>氏名 佐々木 実, 大西 彰正, 北浦 守, Heon-Jung Kim, 小川 浩二<sup>1</sup>

## ナノネット事業で初めて可能になった成果

1. 放射光によるナノ表面の計測分析は、放射光発生加速器と表面分析用の最先端機器を有した施設を利用してしか行うことができない。また、計測分析に習熟した支援員の協力なしにはデータを得られない。
2. 従来は輸送現象を測定していたユーザーがナノテク支援の機会を知り、施設の支援員との信頼関係を構築して、共同研究を行うことで初めて実現した。

## 【研究目的】

$\text{Bi}_2\text{Te}_3$ は近年トポロジカル絶縁体として注目され、主にその表面近傍に局在化した表面電子状態(SSB)が精力的に研究されている[1]。一方、表面近傍においてはバルク電子状態が表面の出現によって固体深部に比べ大きく変化していると期待され、表面近傍の電子状態を全て明らかにするにはバルク電子状態も併せて評価する事が不可欠である。本研究では表面感度の高い光子エネルギー( $h\nu$ )で放射光励起角度分解光電子分光(SR-ARUPS)測定を行い、表面近傍のバルク電子状態が二次元性の高い電子状態であることを決定した。

## 【成 果】

$\text{Bi}_2\text{Te}_3$ 単結晶は山形大学にて作製した。SR-ARUPS測定は九州シンクロトロン光研究センターに建設した佐賀大学専用ビームラインBL13で行った[2]。室温で真空劈開した試料を10 Kまで冷却後測定を行った。用いた $h\nu$ は47.8~66.9 eVで、Seahらの非弾性平均自由行程[3]から光電子の検出深さは約0.5 nmである。この $h\nu$ 範囲でエネルギー分解能 $\leq 17$  meVを達成している。

右図は $n\text{-Bi}_2\text{Te}_3$ において $h\nu = 47.8$  eVで測定した $\bar{G}-\bar{M}$ 方位の光電子スペクトル強度プロットである。フェルミ準位直下に特徴的なSSBが、その他にバルク電子状態が明瞭に見出された。バルク電子状態は $\bar{G}$ で11本のピークに分解でき、1本は伝導帯(BCB), 9本は価電子帯(BVB), 残る1本は $n$ 型試料のみで見られる不純物バンドであった。

$E_F$ から1.2 eVより下にあるバンドの表面平行( $k_{\parallel}$ )方向の分散は左右対称的で、結晶の3回対称性に反して6回対称的である。また $h\nu$ を変化させて表面垂直( $k_{\perp}$ )方向の分散を決定したが、ほとんど分散を示さなかった。これらの結果から表面近傍のバルク電子状態は表面状態のように二次元性の強い状態であると結論した[4]。

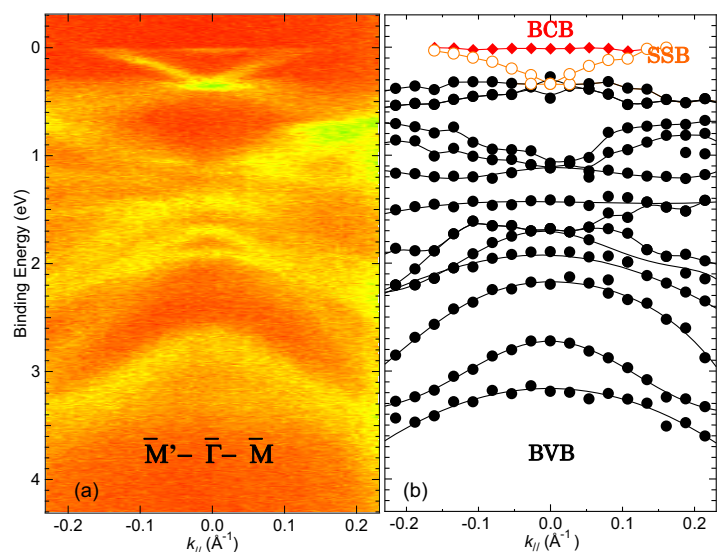


図.  $h\nu = 47.8$  eV で測定した  $n\text{-Bi}_2\text{Te}_3$  真空劈開面の光電子強度プロット。

- [1] H.-J. Noh, *et al.*, Europhys. Lett. **81**, 57006 (2008); Y.L. Chen, *et al.*, Science **325**, 178 (2009); S.R. Park, *et al.*, New J. Phys. **13**, 013008 (2011).  
 [2] K. Takahashi, *et al.*, J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. **144**, 1093 (2005).  
 [3] M.P. Seah & W.A. Dench, Surf. Interf. Ana. **1**, 2 (1979).  
 [4] K. Ogawa *et al.*, Phys. Rev. B, in press (2012).