# マイクロ ARPES による粉状層状半導体 r-BS の電子状態観測

菅原克明<sup>1,2,3</sup>,相馬清吾<sup>3,4</sup>,近藤剛弘<sup>3,5</sup>,佐藤宇史<sup>1,3,4,6</sup>

<sup>1</sup> 東北大学 大学院理学研究科物理学専攻,<sup>2</sup> JST-PRESTO,<sup>3</sup> 東北大学 WPI-AIMR,<sup>4</sup> 東北大学 CSIS,<sup>5</sup> 筑波大学 数理物質系, <sup>6</sup> 東北大学 SRIS

# Observation of electronic states on a powdered crystal of layered semiconductor r-BS by micro-ARPES

Katsuaki SUGAWARA<sup>1,2,3</sup>, Seigo SOUMA<sup>3,4</sup>, Takahiro KONDO<sup>3,5</sup>, Takafumi SATO<sup>1,3,4,6</sup> <sup>1</sup>Graduate School of Science, Tohoku University, <sup>2</sup>JST-PRESTO, <sup>3</sup>WPI-AIMR, Tohoku University, <sup>4</sup>CSIS, Tohoku University, <sup>5</sup>Faculty of Pure and Applied Science, University of Tsukuba, <sup>6</sup>SRIS, Tohoku University

### Abstract

近年,ホウ素 (B)を基本とした2次元シート半導体物質が注目を集めており,その一つが菱面体構造をもつ層状半導体 r-BS である。これまで作製された r-BS 試料は粒径 30 µm 以下の粉状形態であるため,従来の角度分解光電子分光(ARPES) ではその電子状態の直接観測は困難とされてきた。本研究では,BL-28A で最近開発された,試料上のスポットサイズを 10 µm 程度まで集光する ARPES (マイクロ ARPES) エンドステーションにおけるピンポイント測定によって実現した, r-BS 微小結晶の電子状態の直接観測に関する研究結果について紹介する。

### 1. はじめに

炭素 (C) が蜂の巣状のネットワークを形成した 2 次元シ ートグラフェンにおけるディラック電子の発見 [1] を契機 として、単層化(原子層)した層状物質の新規量子物性創 発の研究が世界各地で行われている。原子層物質研究の世 界的展開が大きく進んだ理由として、グラフェンの作製手 法の確立(剥離法)の他にもう一つ重要と考えられている のが、グラフェンの物性を最大限に活かすための絶縁シー ト材料 h-BN の開発 [2] である。h-BN は、グラフェンの C をボロン (B)と窒素 (N) に置き換えた、原子レベルで平坦 な 2 次元シートを積層した構造を有する層状物質である。 h-BN はわずか数層でもトランジスタとして耐えうる高絶 縁性を示す。2 次元物質系における電界効果トランジスタ において h-BN はゲート絶縁膜として十分機能するため, グラフェンを h-BN に積層または挟むことで化学ポテンシ ャルの自在な制御が可能となる。様々な自由度(物質,積 層数,角度,位相など)で積層させた原子層物質において, h-BN がもたらす化学ポテンシャルの高い制御性がツイス トグラフェンなどにおける超伝導・モット絶縁相・異常量 子ホール相の発見に繋がっている [3-5]。この h-BN の発見 は,新たなボロン (B) 材料の開発を原子層物質研究と同様 に加速させる契機となった。

本研究で注目する r-BS もまた,新たなボロン材料の一 つとして注目を集めている。r-BS は,B と硫黄 (S)を構成 元素とし,それぞれ2個ずつ結合することで一つの単位ユ ニットとした2次元シートを形成する。3倍周期で積み重



Figure 1 (a) Schematics of the crystal structure and (b) the first Brillouin zone of r-BS. (c) Photograph of r-BS powders. (d) Schematics of ① sample mounting on an Au substrate, ② - ③ cleaving by Kapton tape in ultrahigh vacuum, and ④ micro-ARPES measurements.

なることで菱面体構造 (r; rhombohedral) となるため, r-BS と呼ばれている [Fig. 1(a)]。r-BS は半導体であり、そのバ ンドギャップの大きさが積層数によって変化する [6-9]。 また、高い熱伝導や触媒反応性、および構造に強く依存し た物性(超伝導の発現)など興味深い理論提案がなされて いる [7,10,11]。ごく最近、グラフェンと r-BS を混合する ことで、アルカリ水電解用の酸素生成反応触媒として機能 し、その性能が商用 RuO2を凌ぎ世界トップレベルである こと[12]や、さらにニッケルフォームと混合することで 極めて高い安定性を示すこと [13] が報告されている。光 触媒としてもすぐれた機能を示すことも近年報告されてい る [14]。このように触媒材料として注目を集めている r-BS において,バルク r-BS の作製とその 2 次元シート化に関 する実験研究が報告され, Bを基本とした新たな2次元半 導体物質としても注目を集めている [8,9]。しかしながら, これまで作製された r-BS の試料は粒径が 30 µm 以下と非 常に小さい粉状であるため [Fig. 1(c)], ARPES を代表とし た分析手法による電子状態の直接観測が難しく、実験に立 脚した電子物性の理解が進んでいない状況にあった。し たがって,粉状試料について清浄試料表面を得る劈開法 と、その場所を特定しピンポイント測定する手法を確立は、 r-BS に限らずさまざまな微小試料における電子状態の解 明に必須と考えられる。

本稿では,BL-28A で最近開発された,試料上で10 µm 程度にスポットに絞った放射光を特定の場所に照射して電 子状態の直接観測を可能にしたマイクロ ARPES [15] を用 いることで,真空中で「劈開」した粉状半導体 r-BS の電 子状態に関する研究結果について示す [16]。本研究で試料 の清浄表面を得るために見出した微小試料劈開法により, 粉状微粒子でも清浄な試料表面を比較的容易に得ることが できる。放射光の微小スポットを試料基板上で走査して, 清浄な劈開表面をもつ微小 r-BS 結晶の位置を特定するこ とで,r-BS が 0.5 eV 以上のバンドギャップを有する p 型 の半導体であること,わずかながら異方的な有効質量を持 つ価電子バンドを形成していることを見出した結果につい て示す。また,本研究の実験プロトコルが,さまざまな粉 状微粒子にも適応できる有効な手法であることを,実験結 果を通じて紹介する。

# 2. 実験方法

### 2-1. 試料準備

粉状微粒子 r-BS は, 高純度の B と S を 5.5 GPa の高圧 環境下で 1873 K に加熱することで合成された。試料サイ ズは最大で 30 μm 程度である [8]。作製した試料を Au 板 上に直接振りかけた後 [Fig. 1(d) ①], ARPES 専用ホルダ ーに取り付けた。これを試料準備槽に導入して, 超高真 空中 (2.0 × 10<sup>-10</sup> Torr 以下)においてホルダーの表面にカプ トンテープを直接接着した後 [Fig. 1(d) ②], 直ちにそれを 剥がした [Fig. 1(d) ③]。テープによる剥離を 3 回程度行う ことで, Au 板上に残存した r-BS における清浄試料表面を 得た (微小試料劈開法)。試料準備槽からマイクロ ARPES 装置へ,劈開した粉状試料を載せたホルダーを真空搬送することで電子状態の測定を行った [Fig. 1(d) ④ ]。

## 2-2. マイクロ ARPES 実験

光電子分光実験は, BL-28A に建設されたマイクロ ARPES 装置を用いて行った [15]。電子状態の観測には DA-30アナライザー(Scienta-Omicron 社製)を用いた。また, Kirkpatrick-Baez ミラーを用いることで放射光源を試料上 で 10 μm (H) × 12 μm (V) に集光し, r-BS の空間分布測定 およびバンド構造のピンポイント測定を行った。測定温度 は室温に設定した。

### 3. 実験結果

まず初めに、清浄な劈開表面が得られた r-BS の領域を 特定するために, 20 µm ステップで試料表面を走査するこ とで得られた B1s 内殻準位の結合エネルギー (E<sub>B</sub> = 189 eV) 周辺の光電子強度を、エネルギー領域 185.5 ≦ E<sub>B</sub> ≦ 192.5 eV で積算してプロットした空間分布像を Fig. 2(a) に 示す。空間分布像は、光の集光点がずれないよう試料自体 を精動することで得た。また、Fig. 2(b) にその空間分布像 に対応する光学顕微鏡像を示す。一見してわかるように, Figs. 2(a, b)の比較から,光電子強度の弱い青色の領域が r-BS が存在する領域に、強度の強い赤色の領域が基板で ある Au 表面が剥き出しの領域に対応することが確認でき る。しかしながら、得られた空間分布像のあるポイント で得られた光電子スペクトルを見てみると、B1s 軌道に対 応するピーク構造は確認できない [Fig. 2(c)]。この結果は, 半導体的性質を持つ r-BS が厚みのある塊(かたまり)と なってしまい,光電子の放出時に Au 板からの電荷供給が 追いつかず、試料表面が帯電(チャージアップ)したため と考えられる。そこで、チャージアップが生じない r-BS を見出すために, B 1s 軌道 189 eV 近傍の 188.0 ≦ E<sub>B</sub> ≦ 189.5 eV の狭い範囲で光電子強度を積算し空間分布像を得 たところ [Fig. 2(d)], Au が剥き出した領域や r-BS の塊に 対応する領域とは異なるある一点で強い強度が出現してい ることを見出した。この特定の場所の光電子スペクトルを 見てみると、明確に B 1s ピークが観測されている。より 広いエネルギー範囲の光電子スペクトルを測定した結果, B 1s の他にスピン軌道相互作用によって分裂した S 2p1/2 および S 2p<sub>3/2</sub> ピークも明瞭に観測した [Fig. 2(e)]。光電子 分光実験後、このポイント周辺でレーザ顕微鏡 [Fig. 2(f)] や原子間力顕微鏡で試料の高さおよび表面構造を確認する と、高さ~5 µm 程度でかつ原子レベルで平坦な表面を形 成していることを見出した [16]。さらに、この箇所で価電 子帯における電子状態の測定を行ったところ運動量に依存 したバンド分散の観測に成功した [Fig. 2(g)]。以上の結果 から、マイクロ ARPES による光電子強度の空間分布測定 は、r-BSのような粉状微粒子でも劈開した清浄表面をも つ微粒子をピンポイント測定するのに有効な手法であると 結論できる。

マイクロ ARPES で見出した r-BS の試料位置においてピ



Figure 2 (a) Spatial mapping of photoemission intensity integrated over the  $E_{\rm B}$  range of 185.5-192.5 eV, measured with hv = 250 eV in the same spatial region as the microscopy image of (b) measured with a fine step of 20 µm. (b) Optical microscope image of powdered r-BS on a Au substrate after exfoliation by a Kapton tape. (c) Representative PES spectra around the B1s core level at three sample positions where the B1s core-level peak is clearly recognized (blue curve), the strong signal from the Au substrate dominates (green curve), and the strong charging effect is seen (on white colored r-BS clusters) (red curve). (d) Same as (a) but with a narrower  $E_{\rm B}$  window of 188.0  $\leq E_{\rm B} \leq$  189.5 eV which covers only the B1s peak as indicated by vertical dashed lines in (b). (e) PES spectrum in a wider  $E_{\rm B}$  range ( $E_{\rm B} = 0.200$  eV) measured with hv = 250 eV. Inset shows the magnified view in the B1s and S2p core-level region. (f) Enlarged laser microscope image around a blue square in (a) and (d). (g) ARPES intensity in the valence-band region as a function of  $E_{\rm B}$  and wave vector measured with hv = 100 eV at the blue square in (a) and (d). Points on the sample where the ARPES measurements were carried out are indicated as blue squares in (a) and (d).

ンポイントで励起エネルギーを走査した結果,3次元的ブ リルアンゾーンの面垂直方向(Γ-A 方向)のバンド分散の 決定に成功した [16]。ARPES スペクトルの励起エネルギ ー依存性から k<sub>z</sub> = 0 の ΓKM 面および k<sub>z</sub> = π の AHL 面に対 応する励起エネルギーを見出すことで、それぞれの対称軸 に沿って測定したバンド分散を Figs. 3(a,b) にそれぞれ示 す。この微小試料測定において、励起エネルギーを連続的 に変化した際に生じるわずかな集光位置のずれや強度の不 安定性が生じない優れた BL-28A 光学系の重要性を強調し ておきたい。ここで実験データの表示に六角形のブリルア ンゾーン (BZ) [Fig. 1(b)] を採用しているが、本来 r-BS は 菱面体構造であることに注意されたい。BS 層が A-B-C 積 層を単位胞内に3つ含む結果c軸長が20Å程度と長くな るが、今回の実験結果では、バルクと薄膜のバンド構造を 比較する利便性を考慮して, 六角形の BZ を用いた。実際, 励起光依存性の結果において, 菱面体構造を反映した周 期性とは異なり、A-A または A-B 積層のように単層 r-BS の六角形の BZ を反映した周期性が主に観測された。これ は A-B-C 層間の層に並行方向のずれに対する周期ポテン シャルが弱いためと考えられる。そこで以下ではk=0の  $\Gamma KM$  面および  $k_z = \pi$ の AHL 面のバンド分散の理論計算と 比較を行なった。Figs. 3(a,b)の結果を見てみると、励起 エネルギーに依存してバンド構造が大きく変化しており, r-BSが層状物質でありながらもわずかな面間相互作用によ って擬2次元的な電子状態を形成していることが分かる。

また,価電子帯のバンド分散の最上部はフェルミ準位(E<sub>F</sub>) から 0.5 eV 程度離れた位置に存在しており, r-BS のバン ドギャップ(E)の大きさが少なくとも 0.5 eV 以上である ことがわかる。ARPES によって得られたバンド分散は, E<sub>F</sub>をシフトさせたバンド計算 [Figs. 3(c,d)] と良い一致を示 している。以上の結果から, r-BS はホールドープにより E<sub>r</sub>が価電子帯に向かってシフトした p型の層状半導体で あると結論した。ARPES で見積もったバンドギャップ値  $(E_g > 0.5 \text{ eV})$ は、フォトルミネッセンス  $(E_g = 1.8 \sim 2.5 \text{ eV})$ や紫外拡散反射分光 (E<sub>e</sub> = 3.4 eV) で得られた E<sub>e</sub> や,理論 計算の予測 (Eg = 2.7 eV) の半分以下である [8, 9, 17]。この 点からも, r-BS がホールドープさた結果, ARPES の実験 結果において占有状態で小さなバンドギャップが得られた ことが示唆される。今後,2光子光電子分光などによって 定量的なバンドギャップ値を直接決定する必要がある。さ らに詳細な電子バンド構造の測定により、電気伝導特性に おいて重要な有効質量の決定を行った [Figs. 3(e,f)]。AHL 面における価電子帯上部のバンド分散のピーク位置をいく つかの波数点で見積もり実験的なバンド分散(紫丸)を プロットした後、放物線でフィッティングすることで有 効質量を見積もった。得られた有効質量は、A-L 方向では *m\*/m*<sub>0</sub> = -1.30 ± 0.02, A-H 方向では *m\*/m*<sub>0</sub> = -0.93 ± 0.02 と わずかに対称軸方向に依存した異方性をもつこと, また, h-BN (m\*/m0 = -0.49) [18] に比べて2倍程度大きいことを見 出した。



**Figure 3** ARPES intensity plots measured (a) along the  $\Gamma$ KM cut ( $h_z$ =0 plane) with hv=105 eV and (b) along the AHL cut ( $k_z$ = $\pi$  plane) with hv=125eV. Calculated band structure along (c) the  $\Gamma$ KM cut and (d) the AHL cut. ARPES intensity plots along (e) the AL cut and (f) the AHL cut, together with the experimental band dispersion (purple circles) and the result of numerical fittings with a parabolic function (blue curve).

## 4. まとめ

本研究では、粉状微粒子 r-BS におけるマイクロ ARPES による電子状態に関する研究結果について紹介した。PF の BL-28A で開発・整備されたマイクロ ARPES エンドス テーションを駆使することで,r-BS が p 型半導体物質で あること、有効質量にわずかな異方性があることを電子状 態の直接観測から見出した。これまで 2 次元層状物質の多 くが n 型半導体を有する物質で占められていたが、本研究 によって r-BS が数少ない p 型層状半導体であったことは、 今後、r-BS を用いた pn 接合による新たなダイオードや太 陽電池などのデバイス開発に繋がっていくと期待できる。 また、本研究で確立した粉状微粒子試料の清浄試料表面を 得た劈開プロトコルとマイクロ ARPES の融合により、広 範囲な粉状微粒子や微小へテロ構造物質などの電子状態解 析が大きく進展すると考えられる。例えば、最近世界各地 で研究が行われている人口ツイスト原子層物質の局所電子 状態の解明が加速度的に進むことで,BL-28A ビームラインのマイクロ ARPES を活用した物性物理に対する学理構築への貢献が期待できる。

### 謝辞

本研究成果は、日下陽貴、川上竜平、柳沢幸紀、本間飛 鳥、中山耕輔、宮川仁、谷口尚、北村未歩、堀場弘司、組 頭広志、高橋隆、折茂慎一、豊田雅之、斎藤晋の各氏との 共同研究によるものである。本研究は PF 課題 2020G669, 2021S2-001, 2022G007 のもと行われた。また本研究は、 JST-CREST (JPMJCR18T1), JST-PRESTO (JPMJPR20A8), 科学研究費助成金 [JP18H01821, JP19H01823, JP19H02551, JP20H01847, JP21H01757, JP21H04435, JP22K18964, JP22J13724, JP21H00015:B01, and JP18H05513 (ハイドロジ ェノミクス)], および MST 研究助成からの支援のもと行 われた。

#### 引用文献

- K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, M. I. Katsnelson, I. V. Grigorieva, S. V. Dubonos, and A. A. Firsov, Nature 438, 197 (2005).
- [2] K. Watanabe, T. Taniguchi, and H. Kanda, Nat. Mater., 3, 404 (2004).
- [3] Y. Cao, V. Fatemi, S. Fang, K. Watanabe, T. Taniguchi, E. Kaxiras, and P. Jarillo-Herrero, Nature 556, 43 (2018).
- [4] A. L. Sharpe, E. J. Fox, W. W. Barnard, J. Finney, K. Watanabe, T. Taniguchi, M. A. Kastner, and D. Goldhaber-Gordon, Science, 365, 605 (2019).
- [5] L. Wang, E. M. Shih, A. Ghiotto, L. Xian, D. A. Rhodes, C. Tan, M. Claassen, D. M. Kennes, Y. Bai, B. Kim, K. Watanabe, T. Taniguchi, Z. Zhu, J. Hone, A. Rubio, A. N. Pasupathy, and C. R. Dean, Nat. Mater. 19, 861 (2020).
- [6] P. Mishra, D. Singh, Y. Sonvane, and R. Ahuja, Sustain. Energy & Fuels 4, 2363 (2020).
- [7] D. Fan, S. Lu, C. Chen, M. Jiang, X. Li, and X. Hu, Appl. Phys. Lett. 117, 013103 (2020).
- [8] H. Kusaka, R. Ishibiki, M. Toyoda, T. Fujita, T. Tokunaga, A. Yamamoto, M. Miyakawa, K. Matsushita, K. Miyazaki, L. Li, S. L. Shinde, M. S. L. Lima, T. Sakurai, E. Nishibori, T. Masuda, K. Horiba, K. Watanabe, S. Saito, M. Miyauchi, T. Taniguchi, H. Hosono, and T. Kondo, J. Mater. Chem. A, 9, 24631 (2021).
- [9] Y. Zhang, M. Zhou, M. Yang, J. Yu, W. Li, X. Li, and S. Feng, ACS Appl. Mater. Int. 14, 32330 (2022).
- [10] P. Mishra, D. Singh, Y. Sonvane, and R. Ahuja, J. Appl. Phys. 127, 184305 (2020).
- [11] P. Mishra, D. Singh, Y. Sonvane, and R. Ahuja, Mater. Today Ene. 27, 101026 (2022).
- [12] L. Li, S. Hagiwara, C. Jiang, H. Kusaka, N. Watanabe, T. Fujita, F. Kuroda, A. Yamamoto, M. Miyakawa, T. Taniguchi, H. Hosono, M. Otani, T. Kondo, Chem. Eng. J.

471, 144489 (2023).

- [13] L. Li, N. Watanabe, C. Jiang, A. Yamamoto, T. Fujita, M. Miyakawa, T. Taniguchi, H. Hosono, T. Kondo, Sci. Tech. Adv. Mater. 24, 2277681 (2023).
- K. Miyazaki, A. Yamaguchi, H. Kusaka, N. Watanabe, A. C. Wardhana, S. Ishii, A. Yamamoto, M. Miyakawa, T. Taniguchi, T. Kondo, M. Miyauchi, Sci. Rep. 13, 19540 (2023).
- [15] M. Kitamura, S. Souma, A. Honma, D. Wakabayashi, H. Tanaka, A. Toyoshima, K. Amemiya, T. Kawakami, K. Sugawara, K. Nakayama, K. Yoshimatsu, H. Kumigashira, T. Sato, and K. Horiba, Rev. Sci. Instrum. **93**, 033906 (2022).
- [16] K. Sugawara, H. Kusaka, T. Kawakami, K. Yanagizawa, A. Honma , S. Souma, K. Nakayama, M. Miyakawa, T. Taniguchi, M. Kitamura, K. Horiba, H. Kumigashira, T. Takahashi, S.-i. Orimo, M. Toyoda, S. Saito, T. Kondo, and T. Sato, Nano Lett. 23, 1673 (2023).
- [17] T. Sasaki, H. Takizawa, K. Uheda, and T. Endo, Phys. Status Solidi B 223, 29 (2001).
- [18] H. Henck, D. Pierucci, G. Fugallo, J. Avila, G. Cassabois, Y. J. Dappe, M. G. Silly, C. Chen, B. Gil, M. Gatti, F. Sottile, F. Sirotti, M. C. Asensio, and A. Ouerghi, Phys. Rev. B 95, 085410 (2017).

(原稿受付日:2023年12月12日)

### 著者紹介

### 菅原克明 Katsuaki SUGAWARA



東北大学大学院理学研究科 准教授 〒980-8578 宮城県仙台市青葉区荒巻 字青葉 6-3

e-mail: k.sugawara@arpes.phys.tohoku.ac.jp 略歷:2009年東北大学大学院理学研究 科物理学専攻博士後期課程終了,2009 年東北大学原子分子材料科学高等研究

機構助手,2010年東北大学原子分子材料科学高等研究機構助教,2017年東北大学材料科学高等研究所助教,2018年 東北大学理学研究科准教授。博士(理学)。

最近の研究:原子層物質合成と ARPES による電子物性解明。 趣味:ゴルフ,子供とミニチュアづくり。

#### 相馬清吾 Seigo SOUMA



東北大学材料科学高等研究所 准教授 〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1

e-mail: s.souma@arpes.phys.tohoku.ac.jp 略歷:2005年東北大学大学院理学研究 科物理学専攻博士後期課程終了,2005

年日本学術振興会海外特別研究員,2006年東北大学原子 大学院理学研究科助手,2007年東北大学原子分子材料科 学高等研究機構助教,2014年東北大学材料科学高等研究 機構准教授,2017年東北大学スピントロニクス学術連携 研究教育センター准教授,2022年東北大学原子分子材料 科学高等研究所准教授。博士(理学)。 最近の研究:光電子分光装置開発と電子スピン物性解明。 趣味:料理,設計,技術系youtube集め。

### 近藤剛弘 Takahiro KONDO



筑波大学数理物質系 教授 〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1

e-mail: takahiro@ims.tsukuba.ac.jp 略歷:2003 年筑波大学大学院工学研究 科物理工学専攻修了,2003 年理化学

研究所基礎科学特別研究員,2006年理化学研究所協力研 究員,2007年筑波大学大学院数理物質科学研究科助教, 2011年筑波大学数理物質系物質工学域講師,2015年筑波 大学数理物質系物質工学域准教授,2022年筑波大学数理 物質系物質工学域教授,ゼロ CO<sub>2</sub>エミッション機能性材 料開発研究センターセンター長(兼任),2023年4月東北 大学材料科学高等研究所特任教授(兼任)。博士(工学)。 最近の研究:ホウ化水素,硫化ホウ素,ホウ素含有物質。

### 佐藤宇史 Takafumi SATO



東北大学材料科学高等研究所 教授 〒 980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1

e-mail: t-sato@arpes.phys.tohoku.ac.jp 略歷:2002年東北大学大学院理学研究 科物理学専攻博士後期課程修了,2002 年日本学術振興会特別研究員(PD),

2002年東北大学大学院理学研究科助手,2007年同助教, 2010年同准教授,2017年同教授,2019年東北大学材料科 学高等研究所教授。博士(理学)。 最近の研究:トポロジカル物質の電子状態。 趣味:料理,水泳。