

Manifestare neașteptată concomitentă a supraconductibilității și feromagnetismului slab la interfețele bicristalelor de Bi și a izolatorilor topologici tridimensionali BiSb

F.M. Muntyanu

Institutul de Inginerie Electronică și Nanotehnologii,
Academia de Științe a Moldovei
Chișinău, Republica Moldova
muntean_teodor@yahoo.com

V. Chistol

Departamentul Fizică
Universitatea Tehnică a Moldovei
Chișinău, Republica Moldova
vitalie.chistol@fiz.utm.md

E.P. Condrea

Institutul de Inginerie Electronică și Nanotehnologii,
Academia de Științe a Moldovei
Chișinău, Republica Moldova

Rezumat— Two/one superconducting phases with the onset of transition $\leq 36\text{K}$ are observed at CIs of bicrystals, while the rhombohedral Bi and 3D topological insulator (3DTI) BiSb are diamagnetic and do not exhibit superconductivity. In large crystallite disorientation angle Bi-Sb interfaces both superconductivity and weak ferromagnetism were revealed simultaneously.

Termeni cheie—Bicristale, bismut, supraconductibilitate, feromagnetism, izolator topologic

I. INTRODUCERE

Bi și aliajele lui cu Sb se consideră unele dintre cele mai intens studiate materiale în fizica corpului solid. Recent a fost revelat [1, 2] faptul, că aliajele $\text{Bi}_{1-x}\text{-Sb}_x$ ($0,07 \leq x \leq 0,2$) sunt izolatori topologici tridimensionali (3D TI), clasă fascinantă de materiale noi, care posedă proprietăți remarcabile datorită topologiei neobișnuite a stărilor cuantice, precum și existenței particulelor Dirac spin-orbital cuplate. De fapt, 3D TI sunt izolatori în volum, dar posedă și stări de suprafață metalice, protejate topologic, cu o textură de spin neconvențională și o dinamică specifică a electronilor [3]. Remarcăm, că primul 3D TI, experimental detectat prin spin-ARPES [1, 2], a fost chiar sistemul de aliaje $\text{Bi}_{1-x}\text{-Sb}_x$ ($0,07 \leq x \leq 0,2$). În condiții normale, Bi și aliajele $\text{Bi}_{1-x}\text{-Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0,2$) sunt diamagnetice și nu posedă proprietăți supraconductibile, decât doar la temperaturi ultra joase ($\leq 30\text{ mK}$). Pe de altă parte, la presiuni înalte, în filme subțiri dezordonate sau în stare amorfă, nanofire și alte obiecte nanometrice, supraconductibilitatea se manifestă la temperaturi de până la (4 - 7) K.

Există o posibilitate vastă de a varia stările supraconductoare și magnetice la interfețele cristalite prin utilizarea efectului de proximitate și prin modificarea despicerii după spin a densității de stare, care apare sub acțiunea câmpului magnetic sau a câmpului de schimb al izolatorului

feromagnetic. În acest aspect, interfețele structurilor de tip supraconductor / feromagnetic hibride pot manifesta efecte termoelectrice excepționale, genera și propaga curent spin - polarizat, etc., deschizând astfel noi perspective în elaborarea diverselor dispozitive bazate pe interacțiunea dintre supraconductibilitate și magnetismul slab. Utilizând interfețele 3D TI $\text{Bi}_{1-x}\text{-Sb}_x$ ($0 < x < 0,2$), în dispozitive de spin-injecție, structuri hibride supraconductor / feromagnetic, dispozitive termoelectrice etc. se pot valorifica noi principii de funcționare și aspecte constructive a acestora. În lucrare se vor elucida două probleme de importanță majoră: (a) apariția și manifestarea supraconductibilității în nano interfețe cristaline (CI) ale bicristalelor din materiale nonsupraconductoare, precum ar fi Bi și aliajele Bi-Sb, (b) coexistența supraconductibilității și feromagnetismului slab la interfețele bicristaline semimetalice sau semiconductoare.

II. REZULTATELE OBTINUTE ȘI ANALIZA LOR

Proprietățile magnetice și galvanomagnetice ale bicristalelor s-au studiat în intervalul de temperatură 1,6-100 K, folosind sisteme de măsurare foarte sensibile, precum ar fi magnetometrul SQUID Quantum Design și Sistemul de măsurare a proprietăților fizice (PPMS) cu magnet de inducție supraconductibil de 140 kOe. Rezistența electrică a fost înregistrată în circuit standard cu patru sonde. Efectul Hall longitudinal (măsurat în configurație longitudinală: câmpul magnetic H paralel cu tensiunea Hall E și ambele perpendiculare curentului I ($H \parallel E \perp I$)) a fost selectat drept metodă de cercetare preferențială pentru investigarea oscilațiilor cuantice în bicristale. Oscilațiile cuantice $\rho_{ij}(H_i)$ și efectele magnetice au fost înregistrate în câmpuri staționare (de până la 180 kOe) și de impuls (până la 400 kOe) după convertirea CI în stare normală (cu câmp magnetic și / sau curent).

Folosind metode de înregistrare ale semnalelor prin contact și non-contact (efecte de transport, moment magnetic, susceptibilitate magnetică, căldură specifică etc.) au fost detectate două noi tranziții supraconductoare la interfețele bicristaline din Bi și BiSb [4] cu temperaturile critice $T_{c1} \sim (3,7-4,6)$ K, $T_{c2} \sim (8,3 - 21)$ K și $T_{onset} \leq 36$ K (vezi Fig.1). Două faze supraconductoare au fost observate la CI ale bicristalelor de Bi cu unghi larg de dezorientare (LDA). Pe de altă parte, în bicristalele cu unghi mic de dezorientare (SDA) se depistează doar o singură fază supraconductoare ($T_c \sim 4,3$ K), iar parametrii supraconductorii diferă de valorile obținute la bicristalele LDA. De exemplu, în bicristalul cu $\theta_1 = 5^\circ$ și $\theta_2 = 5,5^\circ$, $dH_{c2} / dT \sim 2,97$ kOe / K, câmpul critic superior $H_{c2} \sim 8,8$ kOe, lungimea de coerență $\xi(0) \sim 12$ nm, în timp ce în bicristalele LDA acești parametri au următoarele valori: $dH_{c2} / dT \sim 3$ kOe / K, $H_{c2}(0) \sim 25$ kOe, $\xi(0) \sim 19$ nm (prima fază cu $T_c \sim 8,4$ K) și $dH_{c2} / dT \sim 5,5$ kOe / K, $H_{c2}(0) \sim 16,6$ kOe, $\xi(0) \sim 14$ nm (a doua fază cu $T_c \sim 4,3$ K). Evaluarea lui $H_{c2}(0)$ a fost efectuată, utilizând bine cunoscuta formulă WHH [5]:

$$H_{c2}^{orb}(0) = -0,69 T_c (dH_{c2} / dT)_{T=T_c}. \quad (1)$$

S-a stabilit că lungimea de coerență $\xi(0)$ în fazele supraconductoare LDA și SDA este mult mai mică decât lățimea stratului central ($d_1 \sim 60$ nm); prin urmare, straturile adiacente nu îmbunătățesc condițiile pentru corelarea perechilor Cooper în stratul CI central.

Buclele de histeresis magnetic la interfețele LDA și SDA (vezi Fig. 1) denotă clar comportamentul tipic pentru supraconductorii de tip II, devenind reversibile în câmpuri mai puternice de 2,5 kOe (câmpul de ireversibilitate). Curbele de magnetizare la $T \sim 2$ K prezintă un histeresis larg, sunt aproape simetrice, momentul magnetic remanent este semnificativ în câmpul zero aplicat, iar efectul screening în planul CI este destul de slab, deoarece grosimea CI este oarecum mai mică de 2λ (λ este adâncimea de penetrare).

După cum s-a menționat anterior [6], interfața bicristalelor torsionate are o formă modificată a suprafețelor izoenergetice și densități mai mari ale purtătoarelor de sarcină, care sunt benefice pentru supraconductibilitate, deoarece favorizează cuplarea electronilor și mărește în mod substanțial temperatura de tranziție (mai mult de 10,4 K). Caracteristicile topologice ale suprafeței Fermi (FS) la CI reflectă indirect schimbările în deplasarea atomilor din pozițiile de echilibru (specifice Bi cristalin). În plus, are loc o intensificare a legăturilor electronice cu rețeaua cristalină a Bi. În baza temperaturii de tranziție $T_c \sim 10,4$ K și energiei Debye de 10 meV (pentru Bi), utilizând formula aproximativă McMillan [7], a fost extrasă constantă de cuplare de circa 0,71, ceea ce indică, că interacțiunea electron - fonon la CI a bicristalelor de Bi este suficient de puternică. Buclele de histeresis magnetic și caracteristicile tensiune - curent ale CI de Bi denotă în mod clar comportamentul tipic pentru supraconductorii de tip II rigizi, cu o valoare posibilă a zonei energetice interzise $2\Delta(0) \approx 3,3$ meV.

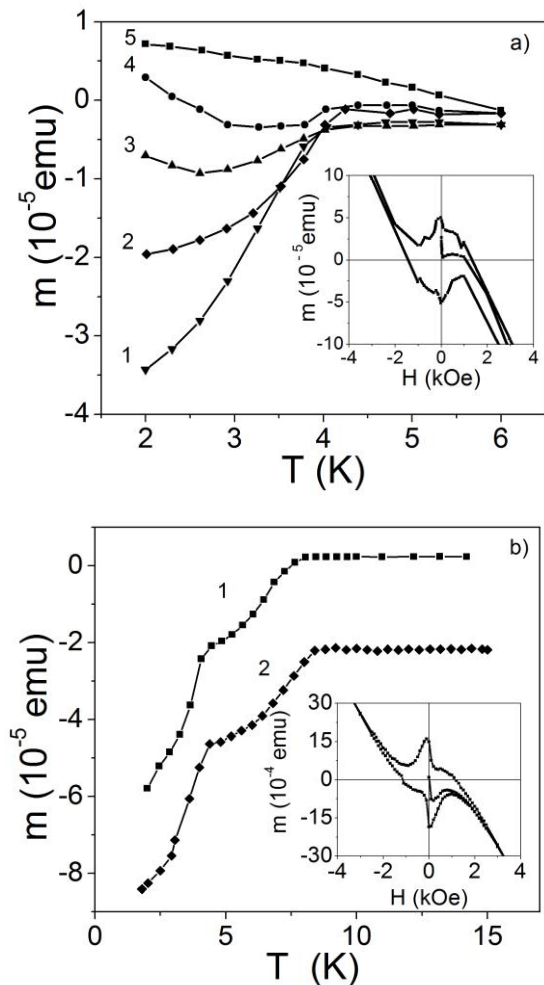


Fig. 1. (a) Dependența de temperatură a momentului magnetic și buclele de histeresis în bicristale SDA de Bi cu $\theta_1 = 5^\circ$ și $\theta_2 = 5,5^\circ$; 1-50 Oe, 2-100 Oe, 3-200 Oe, 4-300 Oe, 5-800 Oe. Insert: Bucla de histeresis magnetic la $T = 3$ K. (b) Dependența de temperatură a momentului magnetic și buclele de histeresis magnetic în bicristalele LDA de Bi. 1 - $\theta_1 = 29^\circ$, $\theta_2 = 11^\circ$; 2 - $\theta_1 = 62^\circ$, $\theta_2 = 2^\circ$; 1-10 Oe; 2 - 20 Oe. Insert: (b) Bucla de histeresis magnetic a bicristalului de Bi cu $\theta_1 = 29^\circ$ și $\theta_2 = 11^\circ$ la 2K. Câmpul magnetic este orientat de-a lungul planului CI.

În pofida faptului, că concentrația purtătorilor de sarcină în CI de înclinare este aproape cu un ordin de magnitudine mai mică decât cea a CI de torsionare, totuși cel mai mare T_c este detectat în primul caz. La temperaturi joase ($T < 30$ K) în bicristalele studiate, se observă două tipuri de dependențe $m(T)$ - diamagnetice și paramagnetice [8,9]. Estimările densității purtătorilor de sarcină $N_{para(dia)}$ din efectul Hall și oscilațiile Shubnikov-de Haas arată că N_{para} în CI paramagnetice depășește aproape de 1,5 - 2 ori pe cele N_{dia} la CI diamagnetice; prin urmare, principalul motiv al paramagnetismului în aceste materiale este concentrația sporită de purtători de sarcină.

Pentru o identificare mai detaliată a anomaliilor magnetizării, au fost analizate meticolos rezultatele măsurătorilor în condiții zero-field-cooled (ZFC) și field-cooled (FC). Fig. 2 (a) prezintă dependențele de temperatură ZFC și FC ale momentului magnetic al bicristalelor $Bi_{1-x}Sb_x$ ($x \leq 0,2$), care în câmp $H=50$ Oe, perpendicular pe CI ($H \perp$

CI), se ramifică la temperatura $T_b \sim 36$ K. Trebuie remarcat faptul că, în eşantioanele diamagnetice, mai jos de T_b , atât în măsurătorile ZFC cât și în FC, se observă o amplificare semnificativă a semnalului diamagnetic și expulzarea fluxului magnetic. Detectarea efectului Meissner, clar pronunțat, confirmă faptul, că în CI există suficient material supraconductor pentru a afecta valoarea momentului magnetic. În acest sens, supraconductibilitatea la temperaturi excepțional de ridicate la interfețele de torsiune, amplasate în masiv non-supraconductor, este desigur o manifestare uimitoare.

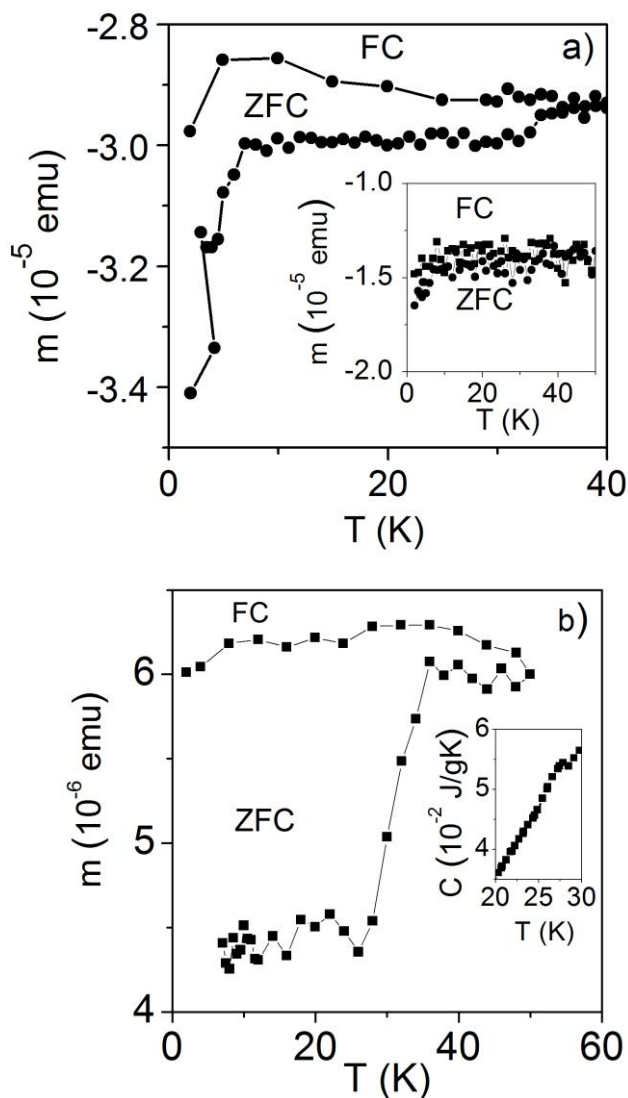


Fig. 2. Dependentele de temperatură ale curbelor ZFC și FC în bicristale de $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($x \leq 0.2$): (a) $\text{Bi}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}\text{Te}$, $\theta_1=9^\circ$, 50 Oe, ($H \perp \text{CI}$). Inset: ($H \parallel \text{CI}$); (b) $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$, $\theta_1=15^\circ$, $\theta_2=3^\circ$, 50 Oe, ($H \perp \text{CI}$). Inset: Dependentele de temperatură a căldurii specifice a bicristalului $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$, $\theta_1=15^\circ$, $\theta_2=3^\circ$.

Nu a fost detectat nici un fel de ramificare a curbelor ZFC și FC în câmp ($H = 50$ Oe) paralel cu planul CI ($H \parallel \text{CI}$) la $T > 9$ K. În plus la aceasta, sub 9 K, semnalul supraconductor este considerabil mai mic și momentul diamagnetic la $H \parallel \text{CI}$ este mai slab decât în cazul $H \perp \text{CI}$. De obicei, punctul de

ramificație al curbelor ZFC și FC în supraconductoare reflectă temperatura de tranziție T_c . Prin urmare, putem concluziona, că T_c în aceste CI poate atinge o valoare de 36 K, care este și cea mai mare temperatură critică de tranziție în stare supraconductibilă observată la semimetalele VB și aliajele lor. Exemple tipice ale curbelor FC și ZFC la bicristalele paramagnetice $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($x \leq 0.2$) în câmpuri magnetice $H \perp \text{CI}$ sunt prezentate în Fig. 2 (b). Se observa o încetinire substanțială a descreșterii momentului magnetic ZFC. Diferența dintre curbele ZFC și FC se extinde brusc în intervalul de temperatură (35-28 K) și apoi trece la saturație. În același timp, căldura specifică prezintă un salt bine evidențiat (vezi Fig. 2 (b), insert), care indică o tranziție de fază de ordinul doi cauzată de supraconductibilitate.

Fig. 3 prezintă buclele de histeresis și dependentele de temperatură ale momentului magnetic al bicristalelor de Bi și $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 < x < 0.2$). La temperaturi joase (≤ 36 K) interfețele prezintă [10] o tranziție supraconductoră (pentru diferite probe $T_c \sim 3,7-4,6$ K) sau două ($T_{c1} \sim 8,3 - 21$ K, $T_{c2} \sim 3,7-4,6$ K). În cazul unei tranziții (Fig. 3 (a)), buclele de histeresis magnetic sunt tipice pentru materialele feromagnetice slabe și se desfășoară pe un fundal paramagnetic.

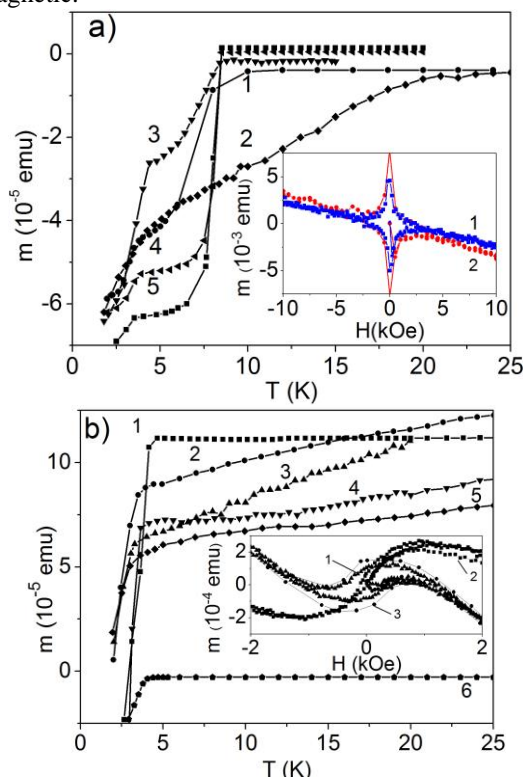


Fig.3. Dependentele de temperatură ale momentului magnetic și buclele de histeresis în bicristale cu (a) două sau (b) o tranziție supraconductoră. (a) (1) $\text{Bi}_{0.93}\text{Sb}_{0.07}\text{Sn}$, $\theta_1 = 4.6^\circ$, $\theta_2 = 1^\circ$, (2) Bi, $\theta = 5^\circ$, scale pentru $m(T)$ 1:4, (3) $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$, $\theta_1 = 4^\circ$, $\theta_2 = 1^\circ$, (4) $\text{Bi}_{0.93}\text{Sb}_{0.07}\text{Sn}$, $\theta_1 = 4^\circ$, $\theta_2 = 1^\circ$, scala pentru $m(T)$ 1:2, (5) $\text{Bi}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}\text{Te}$, $\theta_1 = 9^\circ$, $\theta_2 = 2^\circ$, scala pentru $m(T)$ 1:2; Inset: $\text{Bi}_{0.93}\text{Sb}_{0.07}\text{Sn}$, $\theta_1 = 4.6^\circ$, (1) 2 K, (2) 5 K; (b) (1) $\text{Bi}_{0.93}\text{Sb}_{0.07}\text{Sn}$, $\theta_1 = 75^\circ$, $\theta_2 = 4^\circ$, scala pentru $m(T)$ 1:4 (2) $\text{Bi}_{0.93}\text{Sb}_{0.07}\text{Sn}$, $\theta_1 = 68^\circ$, $\theta_2 = 2^\circ$, scala pentru $m(T)$ 1:10, (3) $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}\text{Te}$, $\theta_1 = 19^\circ$, $\theta_2 = 3^\circ$, scala pentru $m(T)$ 20:1, (4) $\text{Bi}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}\text{Te}$, $\theta_1 = 69^\circ$, $\theta_2 = 2^\circ$, (5) $\text{Bi}_{0.82}\text{Sb}_{0.18}\text{Sn}$, $\theta_1 = 18^\circ$, $\theta_2 = 5^\circ$, scala pentru $m(T)$ 300:1, (6) $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$, $\theta_1 = 12^\circ$, $\theta_2 = 5^\circ$; Inset: $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$, $\theta_1 = 12^\circ$, $\theta_2 = 5^\circ$, (1) 10 K, (2) 300 K, (3) 1.8 K.

În majoritatea probelor cu două tranziții supraconductoare (Fig.3 (a)) în bicristalele de $\text{Bi}_{1-x}\text{-Sb}_x$ ($0 < x < 0,2$), buclele de histererezis sunt simetrice și tipice pentru supraconductorii de tip II; totuși, există și anumite cazuri (care se manifestă mai ales în CI de tip înclinare cu conținut sporit de Sb (vezi Fig. 4 (a, b)) de manifestare a buclelor feromagnetice. Reținem, că buclele feromagnetice nu se detectă în CI ale bicristalelor de Bi. În consecință, manifestarea lor este specifică numai pentru CI ale aliajelor $\text{Bi}_{1-x}\text{-Sb}_x$ ($0 < x < 0,2$), care sunt de fapt 3D TI.

În Fig. 5 (a, c) sunt prezentate dependențele tipice de temperatură ale rezistivității $\rho(T, H)$ în bicristale SDA ale aliajelor $\text{Bi}_{1-x}\text{-Sb}_x$ ($0 < x < 0,2$) cu două tranziții supraconductoare în câmpuri magnetice perpendiculare și paralele planului interfeței. Efectul creșterii câmpului magnetic este conexas cu extinderea tranzițiilor în câmpuri mai puternice și deplasarea lor în mod similar spre temperaturi mai joase, fără o extindere semnificativă la $H \leq 2$ kOe.

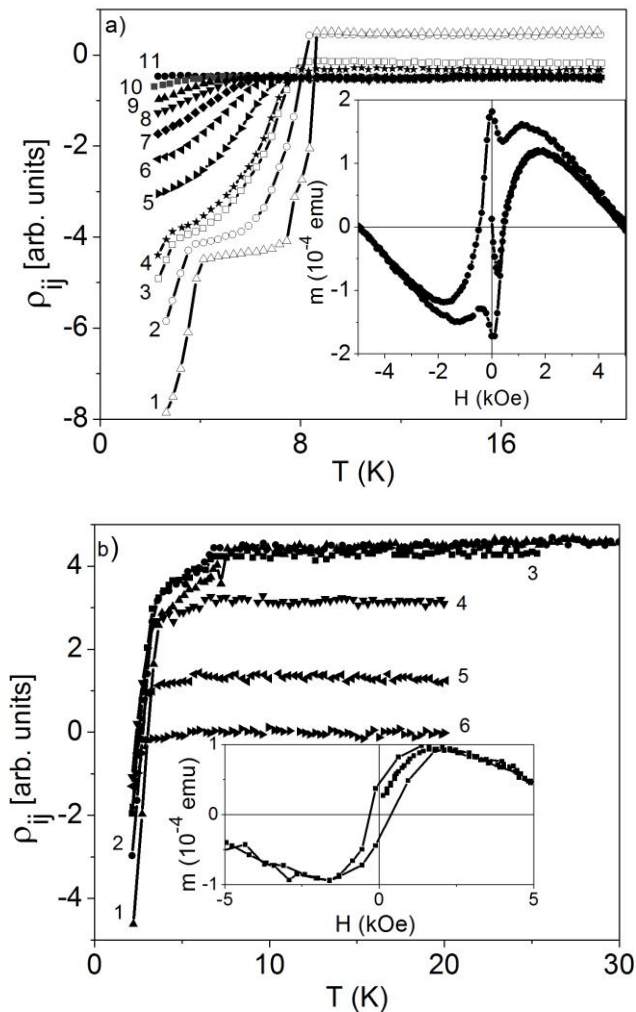


Fig. 4. Dependențele de temperatură ale momentului magnetic și buclele de histererezis în bicristale de tip înclinare. (a) $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}\text{Sn}$, $\theta = 19^\circ$; 1 – 0 kOe; 2 – 0.4 kOe; 3 – 1.5 kOe; 4 – 2 kOe; 5 – 4 kOe; 6 – 6 kOe; 7 – 8 kOe; 8 – 10 kOe; 9 – 12 kOe; 10 – 15 kOe; 11 – 20 kOe, Insert: Bucle de histererezis magnetic la 1.8 K. (b) $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}\text{Te}$, $\theta = 16^\circ$; 1 – 0; 2 – 0.1 kOe; 3 – 0.2 kOe; 4 – 0.5 kOe; 5 – 1 kOe; 6 – 1.5 kOe, Insert: Bucle de histererezis magnetic la 1.9 K.

În Fig. 5 (b, d) este prezentat câmpul critic superior paralel $H_{c2}^{\parallel}(T)$ și perpendicular $H_{c2}^{\perp}(T)$ planului CI, evaluat pentru începutul tranziției (onset) și punctul de mijloc al acesteia (midpoint). Din ceea ce se observă, $H_{c2}^{\parallel}(T)$ prezintă același comportament ca și $H_{c2}^{\perp}(T)$, cu excepția faptului că, la temperaturi joase (vezi Fig. 5 (d), insert), acesta manifestă tendință de saturare și, astfel, face posibilă estimarea lui experimentală $\approx 20,5$ kOe. Câmpul paramagnetic critic $H_{c2}^p(0)$ evaluat din relația $\mu_B H_{c2}^p(0) = 1,84 kT_c$ (μ_B este magnetonul Bohr) preia valori de 232 kOe (pentru prima fază) și 120 kOe (pentru a doua fază), cea ce depășește mult câmpul critic orbital superior. În consecință, parametrul Maki $\alpha = \sqrt{2} H_{c2}^{\text{orb}}(0) / H_{c2}^p(0)$ la CI a bicristalelor investigate este foarte mic ($\alpha \approx 0,1 - 0,14$), efectul spin-paramagnetic este neglijabil și câmpul critic superior orbital convențional la 0 K determină pe deplin valoarea lui $H_{c2}(0)$.

Anizotropia câmpului critic $\gamma = H_{c2}^{\parallel}(0) / H_{c2}^{\perp}(0)$ la CI a bicristalelor aliajelor $\text{Bi}_{1-x}\text{-Sb}_x$ ($0 < x < 0,2$) este relativ mică; scade de la $\gamma \approx 1,3-1,5$ (lângă T_c) până la $\gamma \approx 1,0-1,1$ (la $T \approx 0$ K) și deviază insuficient de la comportamentul similar al supraconductorului cu o singură bandă. Lungimea de coerență Ginzburg-Landau poate fi estimată folosind relația $\xi^2 = \phi_0 / 2\pi H_{c2}^{\perp}(0)$, unde ϕ_0 este fluxul cuantic. S-a constatat că, în prima fază supraconductoare $\xi_1 \approx 11-12$ nm, în cea de-a doua $\xi_2 \approx 14-17$ nm.

Notăm, că buclele de histererezis ale bicristalelor SDA conduc la valori ale câmpului critic inferior $H_{c1} \sim (100-130)$ Oe. Acestea sunt aproape simetrice și au comportament reversibil în câmpuri mai puternice de 2 kOe. Forma buclelor nu se modifică esențial cu temperatura; unele dintre ele nu prezintă vârf inițial diamagnetic. Din aceste considerente se poate afirma, că interacțiunea dintre fermionii Dirac în 3DTI este controlată în mod coerent de către faza supraconductoare.

Dependența de temperatură a momentului magnetic și a câmpurilor critice superioare la interfețele LDA ale bicristalelor $\text{Bi}_{1-x}\text{-Sb}_x$ ($0 < x < 0,2$) sunt prezentate în Fig. 3 și în [9, 10]. Valorile $H_{c2}(T)$ și dH_{c2} / dT sunt oarecum mai mici, decât cele de la interfețele cu două tranziții supraconductoare. De exemplu, dH_{c2} / dT , în funcție de compoziția eșantionului, preia o valoare de (0,9-1,5) kOe / K, în timp ce $H_{c2}(0) \approx 2,6-3,7$ kOe. Această corespunde unei lungimi de coerență la 0 K de $\approx 30-35$ nm și o grosime a stratului supraconductor de aproximativ 100-120 nm. Datele privind grosimea stratului supraconductor sunt în concordanță deplină cu datele SEM. Buclele de histererezis feromagnetice la interfețele bicristalelor LDA se evidențiază clar pe fundalul paramagnetic al $m(T)$, posedând un moment magnetic de saturare dependent de temperatură $m_s \approx (0,7-1,2) \cdot 10^{-5}$ emu / g la $H \leq \pm 2$ kOe. Buclele se manifestă prin proprietăți feromagnetice în întregul interval de temperatură studiat; forma lor se modifică ușor; lățimea se micșorează cu creșterea temperaturii, în pofida răspunsului diamagnetic la $T_c < 5$.

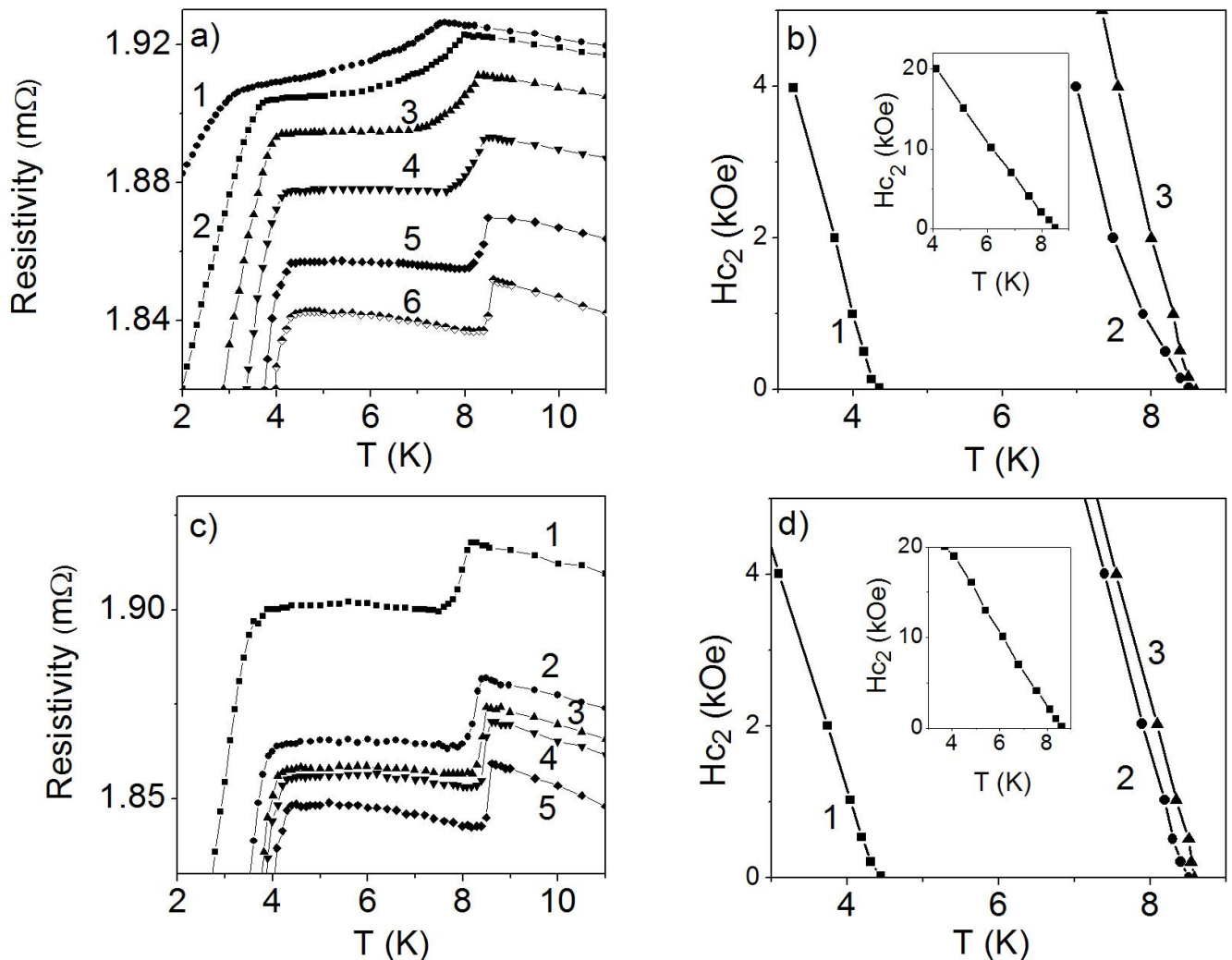


Fig.5. Dependențele de temperatură ale rezistivității și câmpul critic superior magnetic $H_{c2}(T)$ în bicristalul aliajului $\text{Bi}_{0.93}\text{Sb}_{0.07}$ cu conținut mic de Sn ($\sim 0,01$ at.%), $\theta_1 = 4.6^\circ$, $\theta_2 = 1^\circ$. (a), (b) H perpendicular; (c), (d) H paralel; (a) (1) 5 kOe, (2) 4 kOe, (3) 3 kOe, (4) 2 kOe, (5) 1 kOe, (6) 0.5 kOe; (b) (1, 3) onset, (2) midpoint; Insert: tranziția I, midpoint; (c) (1) 7 kOe, (2) 4 kOe, (3) 2 kOe, (4) 1 kOe, (5) 0,5 kOe; (1),(3) onset, (2) midpoint; Insert: tranziția I, midpoint.

Prin urmare, interfețele LDA ale 3D TI $\text{Bi}_{1-x} - \text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0,2$) prezintă simultan buclele de histererez feromagnetic și caracteristici specifice supraconductorilor cu grosimea comparabilă cu cea a CI, cu toate că oscilațiile cuantice indică în mod clar prezența mai multor straturi omogene. Coexistența stărilor magnetice și supraconductive la diferite interfețe în sisteme 3D și 2D a fost raportată recent în [11]. De obicei, această este asociată cu contribuția diferită a purtătorilor de sarcină în fenomenele produse la interfață [12]; adițional, magnetismul se datorează unor electroni din vecinătate, în timp ce supraconductibilitatea este cauzată de electronii perechi [13]. Prin urmare, se conchide [10] că manifestarea magnetismului la interfețele Bi-Sb se atribuie efectului distorsionării structurale pronunțate (dislocații, distorsiuni locale, vacanțe etc.). Sporirea dezordinii structurale conduce la ruperea perechilor de electroni în diferite zone ale CI și la formarea unei structuri electronice feromagnetice, care se află în competiție constantă sau în cuplare cu electronii Cooper.

III. CONCLUZII

- La interfețele bicristalilor de Bi și 3D TI $\text{Bi}_{1-x} - \text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0,2$), au fost depistate două noi tranziții supraconductive, în timp ce monocristalele romboedrice masive ale acestor materiale nu sunt supraconductibile.
- Interfețele $\text{Bi}_{1-x} - \text{Sb}_x$ ($0,07 \leq x \leq 0,2$) prezintă simultan feromagnetism slab și supraconductibilitate. Din contra, CI ale bicristalelor de Bi remarcă doar supraconductibilitate, adică nu satisfac în totalitate condițiile de manifestare a 3D TI.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Teo J C Y, Fu L, and Kane C L. Surface states and topological invariants in three-dimensional topological insulators: Application to $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$. *Physical Review B*. 2008; **78**: 045426.
- [2] Hsieh D, Qian D, Wray L, Xia Y, Hor Y, Cava R J, and Hasan M Z. A topological insulator in a quantum Hall phase. *Nature (London)*. 2008; **452**: 970.
- [3] Roushan P, Seo J, Parker C V, Hor Y S, Hsieh D, Qian D, Richardella A, Hasan M Z, Cava R J, and Yazdani A. Topological surface states protected from backscattering by chiral spin texture. *Nature*. 2009; **460**: 1106.
- [4] Muntyanu F M, Gilewski A, Nenkov K, Warchulski J, and Zaleski A. Experimental magnetization evidence for two superconducting phases in Bi bicrystals with large crystallite disorientation angles. *Physical Review B*. 2006; **73**: 132507.
- [5] Werthamer N R, Helfand E, and Hohenberg P C. Temperature and Purity Dependence of the Superconducting Critical Field, H_{c2} . III. Electron Spin and Spin-Orbit Effects. *Physical Review*. 1966; **147**: 295.
- [6] Muntyanu F M, Gilewski A, Nenkov K, Zaleski A, and Chistol V. Fermi-surface rearrangements in Bi bicrystals with twisting superconducting crystallite interfaces. *Physical Review B*. 2007; **76**: 014532.
- [7] Grimvall G. *The Electron-Phonon Interaction in Metals, Selected Topics in Solid State Physics Vol. XVI*, edited by E. Wohlfarth (North-Holland, New York, 1981).
- [8] Muntyanu F M, Gilewski A, Nenkov K, Zaleski A J, and Chistol V. Magnetic properties and superconductivity of nano-width crystallite interfaces of bicrystals and tricrystals of $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($x \leq 0.2$) alloys. *Physica Status Solidi B*. 2011; **248**: 2903.
- [9] Muntyanu F M, Gilewski A, Nenkov K, Zaleski A, and Chistol V. Superconducting crystallite interfaces with T_c up to 21 K in Bi and Bi-Sb bicrystals of inclination type. *Solid State Communications*. 2008; **147**: 183.
- [10] Muntyanu F M, Gilewski A, Zaleski A J, Chistol V and Rogacki K. Coexistence of superconductivity and weak ferromagnetism at the interface of twisting bicrystals of 3D topological insulator $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0.07 < x < 0.2$). *Physics Letters A*. 2017; **381**: 2040.
- [11] Li L, Richter C, Mannhart J, and Ashoori R C. Coexistence of magnetic order and two-dimensional superconductivity at $\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$ interfaces. *Nature Physics*. 2011; **7**: 762.
- [12] Pavlenko N, Kopp T, Tsymbal E Y, Sawatzky G A, and Mannhart J. Magnetism and superconductivity at LAO/STO-interfaces: the role of Ti 3d interface electrons. *Physical Review B*. 2012; **85**: 020407.
- [13] Blamire M G and Robinson J W A. The interface between superconductivity and magnetism: understanding and device prospects. *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2014; **26**: 453201.