

CZU 530.38:546.87

CONDUCTIBILITATEA ELECTICĂ A PROBELOR DIN BISMUT SUPUSE COMPRIMĂRII UNIAXIALE

Virgil Cheptea, conf.dr.

(Universitatea de Stat "Alec Russo", Bălți, Republica Moldova)

S-a studiat influența deformațiilor anizotropice (efortul în lungul axei trigonale de pînă la $9 \cdot 10^5$ kPa) asupra conductibilității electrice a bismutului la temperatura camerei. S-a observat că variația relativă a rezistenței electrice $\Delta R/R$ în lungul axei binare este de două ori mai mare decît în cazul comprimării hidrostatice. Se discută cauzele posibile a creșterii atît de mare a rezistenței electrice.

Studierea influenței acțiunilor exterioare (cîmpuri electrice și magnetice, temperatură, dopare, comprimări uniaxiale și de volum) asupra proprietăților termice, electrice și magnetice ale solidelor prezintă interes, deoarece permit de a obține informații despre legătura dintre proprietățile fizice și structura cristalină a cristalelor studiate. Un interes deosebit îl reprezintă cercetările referitor la influența presiunii hidrostatice asupra proprietăților fizice ale cristalelor, care permit de a studia caracterul variației parametrilor de bază a spectrului energetic la variația distanței dintre atomii rețelei cristaline. De menționat însă, că pentru valoarea presiunilor hidrostatice care se obțin în practică, mărimea efectelor ce se observă, la majoritatea metalelor, este foarte mică. În legătură cu aceasta sunt actuale cercetările referitor la studierea influenței deformațiilor uniaxiale (în caz general anizotropice) asupra proprietăților fizice ale solidelor. Aceste cercetări permit de a separa efectele care se datorează variației volumului și formeii zonei Brillouin. Mai mult ca atît deformațiile anizotropice (de comprimare sau alungire) pot duce la schimbarea simetriei rețelei cristaline (de exemplu, la comprimarea unui cristal cu celulă elementară cubică în lungul uneia din axele cristalografice) și prin urmare la o modificare cantitativă a spectrului energetic. Pentru majoritatea metalelor, însă mărimea efortului uniaxial, care poate fi aplicat este limitat de mărimea mică a limitei de elasticitate. De exemplu pentru Bi modificările ce se datoresc deformațiilor uniaxiale sînt reversibile dacă efortul nu depășește 25 MPa ($250 \text{ k}\Gamma/\text{cm}^2$), pentru metalele nobile – 10 MPa [1]. La așa eforturi mărimea deformației relative a probelor masive este foarte mică, de ordinul $0,01 \div 0,05\%$. Deformații cu mult mai mari de ordinul $(2 \div 3)\%$, însă numai de alungire, pot fi obținute la cristale sub formă de fir (whisker), grosimea cărora este de $\sim 1 \mu\text{k}$. Studierea influenței deformațiilor de așa mărime asupra spectrului energetic al electronilor în Bi a fost efectuată în [2]. În ultimii ani au fost elaborate cîteva metode de obținere a deformațiilor anizotropice a monocristalelor masive mărimea relativă a cărora este $\sim 1\%$ [3-6]. În aceste metode probele monocristaline reprezintă o parte componentă a unui sistem destul de complicat (sistem probă - inel) care este supus comprimării

hidrostatice sau alungirii. În așa sisteme deformația probei nu este ideal omogenă, însă în partea centrală a ei omogenitatea deformației este suficientă pentru efectuarea cercetărilor experimentale. Scopul acestei lucrări constă în aprecierea gradului de omogenitate a deformațiilor obținute și studierea dependenței conductibilității electrice a bismutului de mărimea efortului uniaxial.

1. Metoda de obținere a deformațiilor anizotropice. Probele.

Deformațiile anizotropice au fost obținute prin metoda descrisă în [3], care permite de a obține deformații elastice și omogene mărimea relativă a căroră este ~ 1 %. Ideia metodei constă în crearea unor așa condiții la suprafața probei, care pe de o parte ar permite de a obține deformații uniaxiale elastice și reversibile de o mărime cât mai mare, iar pe de altă parte ar proteja proba de distrugere. În practică această idee se realizează folosind suportul lateral al probei: proba care are forma unui disc (pastilă) se fixează într-un inel care servește ca suport lateral. Toată sistema probă – inel este supusă comprimării hidrostatice. Inelul este confecționat dintr-un material limita de elasticitate a căruia și modulul Young au valori mai mari decât cele ale probei. Variind raportul dintre valorile modulului lui Young al inelului și probei (E_i / E_p), precum și dimensiunile sistemului probă – inel (r / R) (r și R – respectiv raza interioară și exterioară a inelului), se poate de variat caracterul deformației probei în limite destul de largi: de la deformații de tipul comprimării hidrostatice pînă la deformații de comprimare practic uniaxiale [7]. La realizarea experimentală a acestei idei este foarte important ca spațiul dintre probă și inel să fie cât mai mic ~ (20 - 30) μm , iar legătura dintre probă și inel cât mai rigidă și omogenă. Respectarea acestor condiții reduce la minimum influența tensiunilor care pot apărea la suprafața laterală a probei, datorită valorilor diferite a constantelor de elasticitate a probei și suportului lateral. În calitate de compactor a spațiului dintre probă și inel este folosită reșină „Araldit”, care apoi se polimerizează în decurs de două ore la temperatura de 180°C. Stratul dielectric format asigură în același timp și izolarea electrică dintre probă și inel. Inelele utilizate în experiențe au fost confecționate din aliaj bronză cu beriliu (BRB - 2) pentru care ($E_i/E_p = 5,6$); din aliaj nemagnetic 40XHIO ($E_i/E_p = 10$) și din ceramică ($E_i/E_p > 10$). Inelele aveau dimensiunile cuprinse între $r/R = 0,45$ și $0,65$, iar grosimea lor $h = 0,8$ mm. În scopul măririi durității, inelele din BRB - 2 și 40XHIO au fost supuse unei prelucrări termice speciale. Inelele din BRB -2 au fost menținute două ore la temperatura 760°C în atmosfera heliului în stare gazoasă, urmată de răcirea rapidă în apă, apoi timp de trei ore la temperatura 340 °C cu răcirea treptată pînă la temperatura camerei. Inelele din aliajul nemagnetic 40XHIO au fost menținute la temperatura de 550°C timp de cinci ore cu răcirea ulterioară pînă la temperatura camerei.

Probele cercetate aveau forma unei pastile cu grosimea (0,7-0,75) mm și diametrul (2,5-3,5) mm. Axa trigonală (C_3) este perpendiculară planului discului și

coincide cu axa Z. Curentul de 100 mA este îndreptat în lungul axei binare (C_2) (fig. 1b). Efortul este aplicat în lungul axei trigonale (C_3) (fig. 1c). În camera de obținere a presiunilor înalte (bombă) împreună cu sistema probă – inel s-a instalat și o probă liberă (fără suport lateral) (fig. 1a) tăiată din regiunea vecină a monocristalului de bismut și are aceleași dimensiuni ca și proba cu suport lateral.

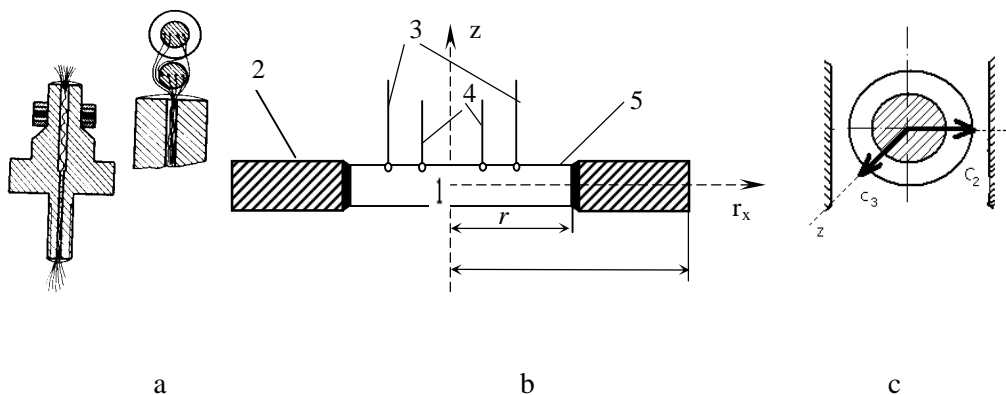


Fig. 1. a) Instalarea probei libere și a sistemii probă-inel pe opturator
 b) Schema fixării probei în inel: 1 - proba cercetată; 2 - inelul; 3, 4 - contactele electrice;
 5 - compactorul spațiului dintre probă și inel
 c) Amenajarea sistemii probă – inel în canalul bombeii

Particularitatea metodei analizate constă în faptul că deformațiile anizotropice se obțin în sistema probă – inel atunci când ea este supuse comprimării de volum. Folosirea presiunilor hidrostatice de până la $20 \cdot 10^5$ kPa (20 kbari) permite de a obține deformații a probelor monocristaline mărimea relativă a cărora este de $\sim 1\%$. Asigurarea condițiilor hidrostatice de comprimare a sistemii probă – inel are o importanță mare: deformația probei va fi cu atât mai omogenă cu cât comprimarea de volum a sistemii probă – inel va fi mai uniformă. Pentru a asigura condiții hidrostatice de comprimare, în metodele existente de obținere a presiunilor hidrostatice [8] se utilizează medii, care transmit presiunea spre probă, cu o plasticitate cât mai mare. Condiții hidrostatice ideale de comprimare există doar în cazul folosirii heliului lichid ca mediu de transmitere a presiunii spre probă, însă presiunea maximală obținută în acest caz este foarte mică. În practică ca mediu de transmitere a presiunii, de obicei, se folosește un amestec de gaz lămpat – ulei sau pentan – ulei (50 % ulei). Aceste medii însă cu mărirea presiunii, chiar la temperatura camerei, devin mai puțin plastice și ca rezultat presiunea nu se transmite uniform în toate direcțiile, fapt ce duce la apariția unor tensiuni anizotropice suplimentare și care influențează asupra caracterului deformației sistemului probă – inel. Această problemă a fost analizată în [9] unde se arată că aceste tensiuni uniaxiale suplimentare au un caracter de comprimare și ating valoarea maximală $\sigma = (65 - 70)$ MPa la o presiune în bombă de ordinul 0,4 GPa. Ele reprezintă un supliment la presiunea hidrostatică. Aceste tensiuni se datorează

procesului neuniform de solidificare a mediului care transmite presiunea spre probă, diferenței mari dintre coeficienții dilatării termice a mediului și a materialului din care este confecționată bomba, de modul de amenajare a probei în canalul bombei. Gradul de omogenitate a presiunii poate fi mărit dacă se utilizează bombe cu diametrul canalului mai mare, de exemplu 10 mm sau 12 mm. În acest caz însă se micșorează valoarea maximală a presiunii hidrostatice obținute. În experiențele noastre a fost utilizată bombă cu diametrul canalului de 4,5 mm. Presiunea în bombă se determină cu ajutorul unui captor din manganin (aliaj cupru - mangan) rezistența electrică a căruia, în intervalul de presiune $(0 \div 25) \cdot 10^5$ kPa ($(0 \div 25)$ kbari), depinde liniar de presiune [10]. Captorul are forma unei mici bobine din fir bifilar (fără inductanță) cu coeficientul baric al rezistenței electrice $2,48 \cdot 10^{-5}$ 1/MPa ($2,48 \cdot 10^{-6}$ bari⁻¹). Cu scopul de a mări stabilitatea indicațiilor captoarelor, ele se mențin în decurs de trei ore la temperatura de 400 K și se supun la câteva cicluri de comprimare hidrostatică. Rezistența electrică a captorului s-a măsurat prin metoda potențiomtrică sau cu aparate electronice cu cifre. Eroarea în determinarea presiunii a fost de $(0,2 \div 0,3)$ kbari ($(0,2 \div 0,3) \cdot 10^5$ kPa). La mărirea presiunii în bombă (comprimarea mediului care transmite presiunea spre sistemul probă - inel) se degajă energie și prin urmare temperatura ei poate să se modifice, fapt care poate influența asupra preciziei măsurării rezistenței electrice a probei și a captorului. Deaceia măsurările se efectuau nu după fiecare ciclu de comprimare, dar după stabilirea temperaturii inițiale. Temperatura s-a controlat cu ajutorul unui termocuplu cupru – constantan una din suduri a căruia este fixată pe peretele camerei de obținere a presiunilor hidrostatice la nivelul sistemului probă – inel, iar cealaltă sudură se menține la $t = 0^\circ\text{C}$. Rezistența electrică a probelor s-a măsurat prin metoda potențiomtrică. Eroarea relativă în determinarea rezistenței nu depășește 0,02 %. Toate măsurările au fost efectuate la temperatura 300 K.

2. Rezultatele experimentale și analiza lor.

Au fost studiate 9 probe din bismut pentru care $R_{300} / R_{4,2} = 150 - 200$. Pentru fiecare tip de inel s-a determinat dependența variației relative a rezistenței în lungul axei binare de presiune din bombă - $\frac{DR}{R}(p)$, care se compară cu dependența respectivă pentru probele de control (fără suport lateral). Rezultatele măsurărilor sînt prezentate în Fig. 2, 3, 4.

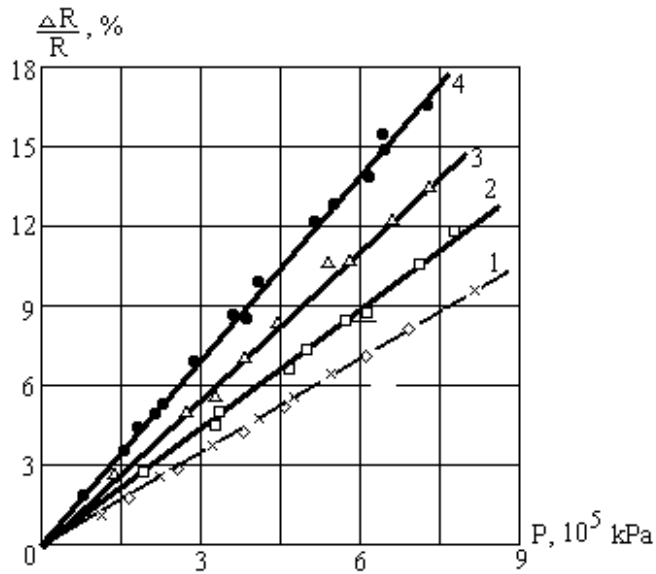


Fig. 2. Variația relativă a rezistenței electrice în lungul axei C_2 în dependență de mărirea presiunii în bombă pentru $E_i/E_p = 10$ și diferite valori a raportului r/R .

1 – probă fără suport lateral
 2 – $r/R=0,6$; 3 – $r/R=0,55$; 4 – $r/R=0,5$;

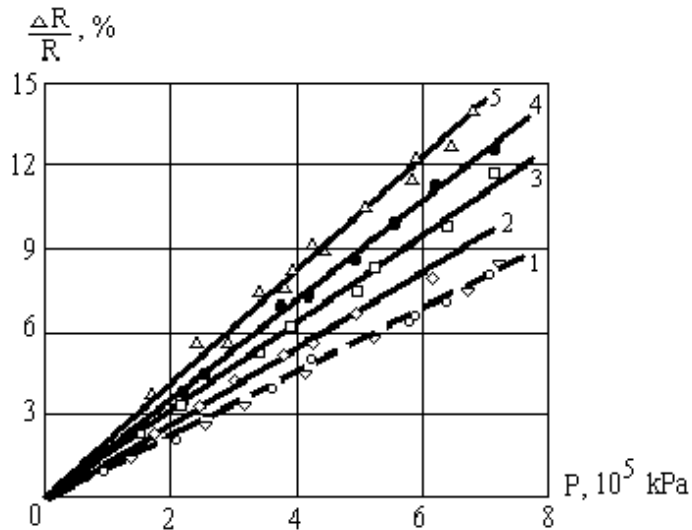


Fig. 3. Variația relativă a rezistenței electrice în lungul axei C_2 în dependență de mărirea presiunii din bombă pentru $E_i/E_p = 5,6$ și diferite valori a raportului r/R .

1 – probă fără suport lateral;
 2 – $r/R=0,6$; 3 – $r/R=0,55$;
 4 – $r/R=0,5$; 5 – $r/R=0,48$;
 E^k, E^0 – modulul lui Young, respectiv al inelului și probei;

Rezistența electrică a probelor cu suport lateral crește cu mărirea presiunii cu o mărime cu mult mai mare decât rezistența electrică a probelor fără suport lateral, supuse numai comprimării hidrostatice. Întrădevăr, variația relativă a rezistenței electrice a probelor cu suport lateral pentru care $E_i / E_p = 5,6$ și $r / R = 0,5$ (presiunea în bombă $6 \cdot 10^5$ kPa) este cu 55% mai mare decât a probei care este supusă numai comprimării de volum. Utilizarea inelelor din aliajul 40XHIO pentru care $E_i / E_p = 10$, variația $\Delta R / R (p)$ la aceiași valoare a raportului $r / R = 0,5$ și presiunii în bombă este de $\sim 100\%$, adică de două ori mai mare decât în cazul comprimării hidrostatice a probei. Influența raportului E_i / E_p asupra dependenței $\Delta R / R (p)$ este prezentată în Fig. 4. Se vede că deformația probei după caracterul ei mai mult se apropie de cea uniaxială atunci când suportul lateral este confecționat din ceramică. Mărirea rezistenței este cu atât mai mare cu cât suportul lateral este mai rigid (dur), adică cu cât deformația probei după caracterul ei se apropie mai mult de cea uniaxială. Mai sus s-a vorbit despre tensiunile anizotropice care pot apărea în probă și care sînt cauza apariției la periferia ei a unor deformații neomogene. Cu scopul de a aprecia influența acestor deformații asupra variației $\Delta R / R (p)$ a fost studiată această dependență pentru probe cu diferite diametre, însă același suport lateral ($E_i / E_p = 10$ și $r / R = 0,6$). Rezultatele măsurărilor sînt prezentate în Fig. 5. Se observă că pentru probele care au diametrul mai mare decât 2,5 mm tensiunile anizotropice care apar la periferia lor practic nu influențează asupra mărimii efectului de creștere a rezistenței electrice, ceea ce înseamnă că deformația părții centrale a probelor este omogenă. Majoritatea măsurărilor au fost efectuate cu probe diametrul cărora este de 2,5 mm.

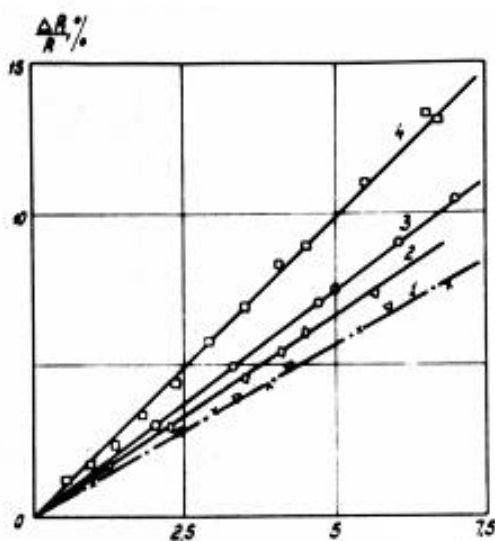


Fig. 4. Variația relativă a rezistenței electrice în lungul axei binare în dependență de mărirea presiunii hidrostatice pentru $r / R = 0,6$ și diferite valori a raportului E_i / E_p
 1 – probă fără suport lateral; 2 - $E_i / E_p = 5,6$; 3 - $E_i / E_p = 10$; 4 - $E_i / E_p > 10$ (confecționat din ceramică).

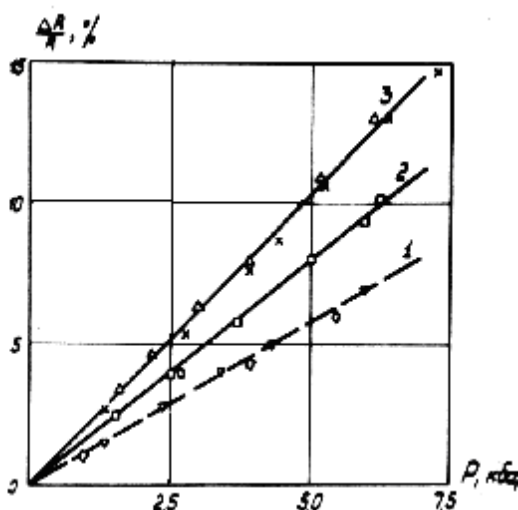


Fig. 5. Variația relativă a rezistenței în lungul axei C_2 în funcție de presiune pentru probe care au diferite diametre ($E_i / E_p = 10$ și $r / R = 0,55$):

- 1 – probă fără suport lateral; 2 – diametrul probei 2 mm;
3 – x - diametrul probei 2,5 mm; Δ - diametrul probei 3,1 mm

Reproducerea deplină a rezultatelor experimentale la repetarea măsurărilor, în intervalul de presiuni $(0 \div 10)$ kbari ($(0 \div 10) \cdot 10^5$ kPa) demonstrează faptul că deformațiile probelor sînt elastice. În tabelul 1 sînt prezentate valorile variației rezistenței electrice și a volumului celulei elementare $\Delta V / V = e_{xx} + e_{yy} + e_{zz}$ [7] pentru diferite tipuri de deformații.

Tabelul 1.

Variația rezistenței electrice și a volumului pentru diferite tipuri de deformații.

Tipul deformației		$\frac{d \ln R}{dP} \cdot 10^{-3} \text{ kbari}^{-1}$	$\frac{DV}{V}, \frac{P}{E_p} \cdot 10^{-2}$
$E_i/E_p=10$	$r/R=0,5$	23,5	78,0
	$r/R=0,6$	15	79,0
$E_i/E_p=10$	$r/R=0,5$	18	82,5
	$r/R=0,6$	13,5	83,9
Comprimare hidrostatică		11,5	102

Se observă că la comprimarea hidrostatică a probei variația volumului celulei elementare este de 1,3 ori mai mare decît în cazul comprimării anizotropice. În

același timp variația rezistenței electrice a probelor cu suport lateral este de două ori mai mare decât a probelor supuse comprimării hidrostatice. Variația $\Delta R/R$ este maximală la o variație minimală a volumului, fapt ce permite de presupus că creșterea atât de mare a rezistenței electrice ($\sim 100\%$) la comprimarea probelor din bismut în lungul axei trigonale (C_3), în comparație cu comprimarea hidrostatică, în mare măsură se datorează modificării formei celulei elementare. Totodată comprimarea uniaxială în lungul axei C_3 duce la micșorarea concentrației electronilor cu 40% la un efort de 0,24 GPa [11]. Cercetările efectuate în [12], arată că afară de concentrația purtătorilor de sarcină, se poate schimba și mobilitatea lor. Studiarea influenței deformațiilor uniaxiale asupra oscilațiilor de Haas – van Alfen la bismut [1] și oscilațiilor Șubnicov – de Haas [6] au arătat că comprimarea uniaxială în lungul axei C_3 duce la o micșorare mai mare $\sim 2,5$ ori a ariei de suprapunere a benzilor energetice de valență și conducție, decât la comprimarea hidrostatică. La comprimarea în lungul axei C_3 simetria rețelei cristaline nu se schimbă [6]. Are loc deplasarea extremelor pentru electroni și goluri în punctele L și T a zonei Brillouin, cu una și aceeași mărime.

Concluzii

Creșterea rezistenței electrice a probelor din bismut la comprimarea uniaxială a lor în lungul axei trigonale, în comparație cu variația rezistenței electrice la comprimarea hidrostatică poate fi lămurit dacă presupunem că această creștere [6], [12] este nu numai rezultatul micșorării ariei de suprapunere a benzilor energetice, dar și a mobilității purtătorilor de curent, datorită creșterii rolului extremelor din apropierea nivelului Fermi.

Bibliografie.

1. Брандт, Н. Б., Рябенко, Г. А. «Исследование влияния одностороннего сжатия на квантовые осцилляции магнитной восприимчивости» // (Журнал экспериментальной теоретической физики) ЖЭТФ, - 1959-, т. 37, стр. 389 - 391.
2. Гайдуков, Ю. П., Данилова, Н. П. Щербина, М. Б.– Самойлова «Электронный переход $2 \frac{1}{2}$ - го рода в висмуте при простом растяжение» // ЖЭТФ, -1979-, т. 77, вып. 5 (11), с. 2125 - 2141.
3. Брандт, Н. Б. Минина, Н. Я., Кептя, В. Ф. Метод создания сильных анизотропных упругих деформаций монокристаллов”// ПТЭ (Приборы и техника эксперимента), -1972-, № 6, с. 189 - 191.
4. Брандт, Н. Б., Кептя, В.Ф., Кульбачинский, В. А., Минина Н. Я. “Устройство для сильного одноосного сжатия монокристаллических образцов при низких температурах”, //ПТЭ, -1977-, № 3, с. 205 - 207.

5. Brandt, N. B., Keptya, V. F., Kulbachinskii, V. A., Minina, N. Ya. "A device for high uniaxial compression of single crystal specimen at low temperatures" //Cryogenics, -1978-, v. 18, № 3, p. 163-165.

6. Брандт, Н. Б., Кульбачинский, В. А., Минина, Н. Я. «Влияние растяжения на поверхность Ферми у висмута» //Письма в ЖЭТФ,- 1977-, т. 26, вып. 3, с. 173 - 176.

7. Cheptea, V. "Deformarea unei probe cilindrice cu suport lateral supusă comprimării de volum" //Analele științifice ale USM, seria fizico – matematice, Chișinău, -1999-, p. 194 -196.

8. Брандт, Н. Б., Ицкевич, Е. С., Минина, Н. Я. «Влияние давления на поверхность Ферми металлов» // УФН (Успехи физических наук) – 1971-, т. 104, вып. 3, с. 459 - 488.

9. Кептя, В.Ф., Лавренюк, М.Ю., Минина, Н. Я. «Оценка негидростатичности сжатия в бомбах фиксированного давления при низких температурах» // ПТЭ – 1987-, №5, стр. 174 -176.

10. Брэдли, К. «Применение техники высоких давлений при исследовании твердого тела». М., Мир, 1972, стр. 180.

11. Cheptea, V. "Influența comprimării uniaxiale asupra spectrului energetic al Bi" //Analele științifice ale USM, seria științe fizico – matematice, Chișinău, - 2005-, p. 56-61.

12. Аверкин, А. А., Воров, Ю. Г., Иванов, Г.А., Регель А. Р. «Влияние давления на электрические свойства висмута» // ФТТ (Физика твердого тела), -1971-, том 13, № 2, стр. 378 - 380. Секоян, С. С., Лихтер, А. И. ФТТ, - 1960-, 2, стр. 1940.

CZU 530.38:546.87

ELECTRICAL CONDUCTIBILITY OF SAMPLES FROM BISMUTH SUBJECT UNIAXIAL COMPRESSION

Virgil Cheptea, Associate Professor, PhD
(State University "Alecus Russo", Bălți, Republic of Moldova)

It was studied the influence of anisotropic strains (along the load axis trigonale up to $9 \cdot 10^5$ kPa) on the electrical conductivity of the bismuth at room temperature. It was observed that the relative variation of electrical resistance $\Delta R/R$ along the binary axis is two times higher than if compression is hydrostatic. It discusses the possible causes of the so high increase of the electrical resistance.

Prezentat la redacție la 23.05.09