

УДК 538.935
PACS 72.15.Gd, 72.15.-v

Объемная и поверхностная проводимость чистых монокристаллов вольфрама при статическом скин-эффекте

А. С. Беликов¹, П. С. Коренистов¹, В. В. Марченков^{1,2}

¹ 620002, Екатеринбург, Уральский федеральный университет
email: korenistov1995@mail.ru
email: asbelikov1@gmail.com

² 620108, Екатеринбург, Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН

В магнитных полях до 50 кЭ и при $T = 4.2$ К измерены полевые зависимости магнитосопротивления чистых монокристаллов вольфрама с отношением сопротивлений $\rho_{293K}/\rho_{4.2K}$ около 75000, находящихся в условиях статического скин-эффекта – концентрации постоянного электрического тока вблизи поверхности проводника. Изучен размерный эффект – зависимость величины магнитосопротивления от размеров и формы образца, а также направления магнитного поля относительно его поверхности. Показано, что в этих условиях удельная проводимость (сопротивление) вблизи поверхности образца на несколько порядков выше (ниже), чем в объеме проводника. Используя тривиальные формулы, удается «разделить» вклады объемной и поверхностной проводимости. Подобная методика может быть использована для оценки вкладов в объемную и поверхностную проводимость более сложных систем с неоднородным распределением электрического тока по сечению проводника.

Ключевые слова: монокристаллы вольфрама; магнитосопротивление; статический скин-эффект

Поступила в редакцию 10.04.2018; принята к опубликованию 20.05.2018

Bulk and surface conductivity of pure tungsten single crystals under static skin effect

A. S. Belikov¹, P. S. Korenistov¹, V. V. Marchenkov^{1,2}

¹ Ural Federal University, Ekaterinburg, 620002
email: korenistov1995@mail.ru
email: asbelikov1@gmail.com

² M.N. Mikheev Institute of Metal Physics, UB RAS, Ekaterinburg 620108

In magnetic fields of up to 50 kOe and at $T = 4.2$ K, the field dependences of the magnetoresistance of pure tungsten single crystals with a residual resistance ratio $\rho_{293K}/\rho_{4.2K}$ of about 75000 under the static skin effect, i.e. the concentration of direct current near the conductor surface, were measured. The size effect, i.e. the dependence of the magnetoresistance on the dimensions and shape of the sample as well as the direction of the magnetic field relative to its surface, was studied. It was shown that under these conditions the conductivity (resistivity) near the sample surface is several orders of magnitude higher (lower) than that in the conductor bulk. Using the trivial formulas, it is possible to "separate" the contributions of the bulk and surface conductivities. A similar method can be used to estimate the contributions to the bulk and surface conductivities of more complex systems with an inhomogeneous distribution of electric current across the conductor cross-section

Ключевые слова: tungsten single crystals; magnetoresistivity; static skin effect

Received 10.04.2018; accepted 20.05.2018

doi: 10.17072/1994-3598-2018-3-08-13

1. Введение

Современная электронная теория металлов [1], опирающаяся на экспериментальные работы [2–5], была в основном построена в работах Лифшица, Азбеля, Каганова, Песчанского [6–9] еще в конце 60-х – начале 70-х гг. прошлого века. Согласно этой теории электронные транспортные свойства металлов в сильных магнитных полях (когда величина ларморовского радиуса электрона r_H много меньше длины свободного пробега электронов проводимости l ; $r_H \ll l$) в основном определяются топологией поверхности Ферми конкретного металла и состоянием его концентрации (соотношением между концентрациями носителей тока электронного n_e и дырочного n_h типа), т.е. факторами, жестко фиксирующими тип электронных траекторий в металле. При этом процессы рассеяния электронов проводимости не оказывают непосредственного влияния на вид электронных орбит и асимптотику полевых зависимостей кинетических коэффициентов, а лишь изменяют величину эффективного магнитного поля $H_{эфф.}$ посредством параметра r_H/l .

Однако в последующие годы эти представления были существенно расширены. Оказалось, что вид электронных траекторий в металле, а, следовательно, и поведение его электронных свойств могут существенно изменяться при рассеянии носителей тока на поверхности кристалла, при их взаимодействии с длинноволновыми фононами, дислокациями и другими дефектами кристаллической структуры. Экспериментально и теоретически были обнаружены такие новые электронные эффекты как статический скин-эффект [10], температурный (фононный) пробой [11], дислокационный (деформационный) пробой [12] и др. В этих случаях процессы рассеяния носителей заряда непосредственно приводят к изменению вида электронных траекторий в металле и прямым образом влияют на поведение его электронных транспортных свойств в сильном внешнем магнитном поле.

Одним из наиболее красивых и показательных из перечисленных выше электронных явлений является статический скин-эффект (ССЭ) – концентрация постоянного электрического тока вблизи поверхности проводника, возникающая в результате сильного электрон-поверхностного рассеяния (рис. 1). ССЭ был предсказан теоретически в работах Азбеля–Песчанского [10] и исследован экспериментально в работах Панченко [13], Гайдукова [14] и др. [15–18] в металлах с замкнутой поверхностью Ферми. На рис. 1 представлена схема статического скин-эффекта с двумя типами электронов проводимости: «объемными» (1) и «поверхностными» (2). В результате большей подвижности «поверхностных» носителей заряда по сравнению с «объемными», поверхностная магнитопроводимость $\sigma_{xx}^{нов}$ оказы-

вается значительно больше магнитопроводимости объема $\sigma_{xx}^{об}$ и, как следствие, постоянный электрический ток концентрируется вблизи поверхности проводника в слое толщиной порядка ларморовского радиуса r_H . Здесь d – поперечный относительно магнитного поля H и электрического поля E размер образца.

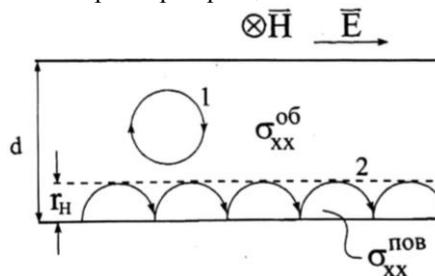


Рис. 1. Схема статического скин-эффекта

Ранее (см. работы [17, 18] и ссылки в них) было показано, что в монокристаллах вольфрама, находящихся в условиях ССЭ, может наблюдаться «размерный» эффект – зависимость проводимости (сопротивления) от размеров и формы проводника. Это обстоятельство может быть использовано для «разделения» объемной и поверхностной проводимости таких проводников.

Более того, с открытием новых материалов – топологических изоляторов [19–21], в которых также наблюдается неоднородное распределение плотности электрического тока по объему проводника, весьма актуальным становится вопрос о «разделении» и изучении вкладов в объемную и поверхностную проводимости таких систем. В этом смысле чистые монокристаллы переходных металлов, в которых наблюдается ССЭ – сильно неоднородное распределение постоянного электрического тока по сечению проводника, являются «модельными» объектами (см., напр., [13, 17, 18] и ссылки в них). Зная об особенностях проявления ССЭ в таких материалах, можно попытаться «разделить» общую проводимость на вклады от поверхности и объема с последующим использованием полученных результатов для изучения более сложных систем, в частности, топологических изоляторов.

Поскольку ССЭ был достаточно подробно изучен на примере чистых монокристаллов вольфрама, то в данной работе была поставлена цель – изучение размерного эффекта в магнитосопротивлении вольфрама в условиях ССЭ и выделение из общей проводимости (магнитосопротивления) вкладов в объемную и поверхностную проводимость (магнитосопротивление).

2. Образцы и методика эксперимента

Для исследований были выращены чистые монокристаллы вольфрама с отношением сопротивлений $\rho_{293K}/\rho_{4.2K}$ около 75 000. Измеряли поле-

вые зависимости поперечного магнитосопротивления вольфрама в магнитных полях до 50 кЭ при температуре $T=4.2$ К. Образцы были вырезаны электроэрозионным способом с последующим удалением поврежденного при резке приповерхностного слоя кристалла около 0.2-0.3 мм с помощью шлифовки, химического травления и электрополировки. Способы обработки поверхности и удаления поврежденного «дефектного» слоя описаны в работе [17], а также в имеющихся в [17] ссылках. Для исследования размерного эффекта были приготовлены образцы различной формы: в виде «тонкого» и «толстого» брусков и пластины. Основные характеристики исследованных образцов приведены в таблице.

Основные характеристики образцов

Образец	Размеры, мм	Направление тока	Боковая грань	$l_{4.2\text{К}}$, мм
W1	$1.39 \times 1.43 \times 12.0$	$\langle 100 \rangle$	(110)	3
W2	$1.38 \times 0.34 \times 12.0$	$\langle 100 \rangle$	(110)	3
W3	$0.35 \times 0.40 \times 12.0$	$\langle 100 \rangle$	(110)	3

Для измерений магнитосопротивления была использована общепринятая четырехзондовая методика на постоянном токе.

В данной работе производилась оценка удельного магнитосопротивления $\rho_{xx}^{нов}$ скин-слоя вблизи поверхности, в которой при ССЭ вытесняется постоянный электрический ток, и удельного магнитосопротивления в объеме образца $\rho_{xx}^{об}$, которое в этом случае намного превышает $\rho_{xx}^{нов}$. При этом предполагалось, что граница раздела между скин-слоем и объемом кристалла резкая, а толщина скин-слоя равна ларморовскому радиусу r_H (с учетом теории [10] и экспериментальных данных по вольфраму [17, 18]). Оценочные значения $\rho_{xx}^{нов}$ и $\rho_{xx}^{об}$ получались при решении системы двух уравнений, которые могут быть записаны для магнитосопротивления бруска $R_{xx}^{бр}$ и пластины $R_{xx}^{пл}$ (см. также рис. 2):

$$\frac{1}{R_{xx}^{бр}} = \frac{2r_H \cdot c_1}{L_1} \cdot \frac{1}{\rho_{xx}^{нов}} + \frac{(d_1 - 2r_H) \cdot c_1}{L_1} \cdot \frac{1}{\rho_{xx}^{об}}, \quad (1)$$

$$\frac{1}{R_{xx}^{пл}} = \frac{2r_H \cdot c_2}{L_2} \cdot \frac{1}{\rho_{xx}^{нов}} + \frac{(d_2 - 2r_H) \cdot c_2}{L_2} \cdot \frac{1}{\rho_{xx}^{об}}.$$

В этой системе уравнений величины $1/R_{xx}^{бр}$ и $1/R_{xx}^{пл}$ представляют собой сумму проводимостей приповерхностного слоя толщиной порядка r_H (первое слагаемое) и проводимости объема (второе слагаемое); c_1, c_2, d_1, d_2 – поперечные размеры образцов; L_1 и L_2 – расстояния между потенциальными контактами.

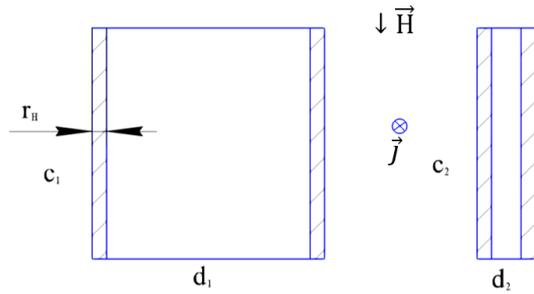


Рис. 2. Поперечные относительно электрического тока j сечения образцов в виде бруска и пластины в магнитном поле H . Заштрихована приповерхностная область повышенной плотности тока

Согласно сделанным оценкам транспортная длина свободного пробега электронов проводимости l в исследованных кристаллах при температуре жидкого гелия составляет около 3 мм (см. таблицу). В исследованной области магнитных полей от 0.5 до 50 кЭ средняя по поверхности Ферми вольфрама величина ларморовского радиуса r_H изменялась в интервале $(1.6 \div 160) \cdot 10^{-3}$ мм. Это означает, что при $T = 4.2$ К для электронов проводимости всех исследованных в работе образцов было выполнено условие сильных магнитных полей $l \gg r_H$. Кроме того, условия статического скин-эффекта [10, 17] $r_H \ll d \leq l$ выполнялись в магнитных полях свыше 0.5 кЭ при температуре $T=4.2$ К (см. таблицу).

3. Результаты и обсуждение

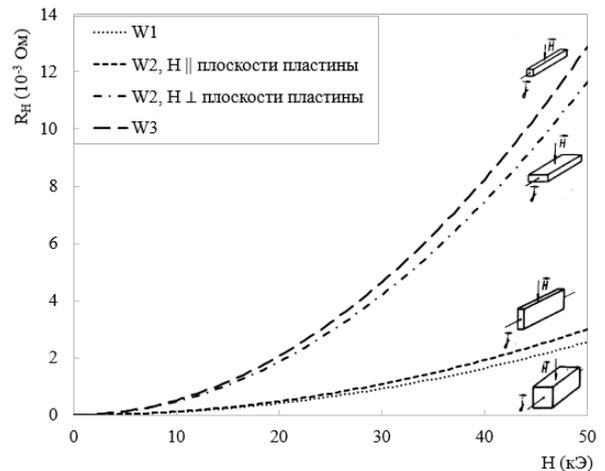


Рис. 3. Полевые зависимости магнитосопротивления монокристаллов вольфрама, находящихся в условиях ССЭ: W1, W2 и W3 – образцы, направления векторов магнитного поля по отношению к поверхностям образцов и векторам электрического тока

На рис. 3 представлены полевые зависимости магнитосопротивления $R_{xx}(H)$ образцов W-1, W-2

и W-3. Видно, что наблюдается эффект формы – зависимость магнитосопротивления от размеров и формы проводника, а для пластины и от положения плоскости пластины относительно направления магнитного поля. На рис. 4 показаны поперечные сечения этих образцов по отношению к вектору магнитного поля \mathbf{H} и указаны значения сопротивления в поле $\mathbf{H} = 50$ кЭ. Видно (рис. 4), что уменьшение приблизительно в 4 раза площади поперечного сечения проводника при неизменной площади боковых относительно вектора магнитного поля поверхностей («переход» от бруска W1 к пластине W2, когда магнитное поле параллельно плоскости пластины) практически не изменяет величины магнитосопротивления: $2.6 \rightarrow 3$ мОм. Напротив, уменьшение в 4 раза площади поперечного сечения проводника с уменьшением площади боковых относительно вектора магнитного поля поверхностей («переход» от бруска W1 к пластине W2, когда магнитное поле перпендикулярно плоскости пластины) приводит к увеличению магнитосопротивления приблизительно в 4 раза: $2.6 \rightarrow 11.7$ мОм. Таким образом, из рис. 3 и 4 видно, что магнитосопротивление R_{xx} сильно зависит от площади боковых (по отношению к вектору \mathbf{H}) поверхностей образцов, и напротив, практически не зависит от площади их поперечного сечения. Это может быть следствием существенно различной проводимости объема кристалла и его приповерхностной области.

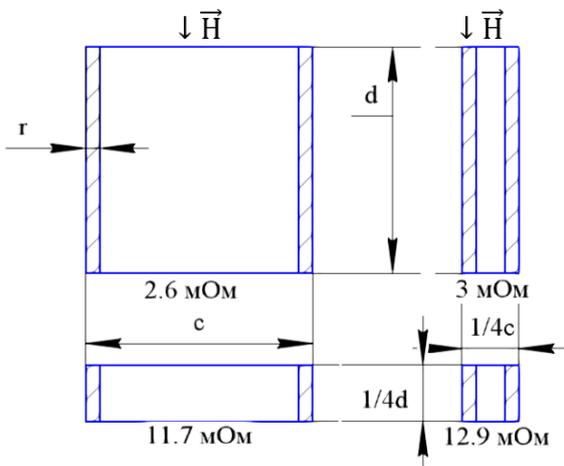


Рис. 4. Поперечные размеры образцов вольфрама W1, W2 и W3, находящихся в условиях ССЭ, при $T = 4.2$ К, $H \parallel \langle 110 \rangle$. Приведены значения величин магнитосопротивления в поле 50 кЭ при расстоянии между потенциальными контактами 1 см

Используя систему уравнений (1), были оценены величины магнитосопротивления $\rho_{xx}^{нов}$ приповерхностного слоя толщиной r_H и магнитосопротивления $\rho_{xx}^{об}$ объема кристалла, а также соответствующих плотностей поверхностного $j_{нов}$ и объемного $j_{об}$ токов. Согласно таким оценкам

для изображенного на рис. 4 случая $\rho_{xx}^{нов} = 0.32 \cdot 10^{-6}$ Ом·см, $\rho_{xx}^{об} = 140 \cdot 10^{-6}$ Ом·см, т. е. $j_{нов} / j_{об} = \rho_{xx}^{об} / \rho_{xx}^{нов} = 433$. Это означает, что в данном случае плотность электрического тока в слое r_H вблизи поверхности образца более чем в 400 раз превышает плотность тока в его объеме.

На рис. 5 представлены полевые зависимости поверхностного $\rho_{xx}^{нов}$ и объемного $\rho_{xx}^{об}$ магнитосопротивлений, оцененных по формуле (1). Видно, что величина объемного магнитосопротивления значительно больше поверхностного во всем исследованном интервале магнитных полей. Кроме того, $\rho_{xx}^{об} \sim H^2$, а $\rho_{xx}^{нов} \sim H$, что хорошо согласуется с теоретическими представлениями [10].

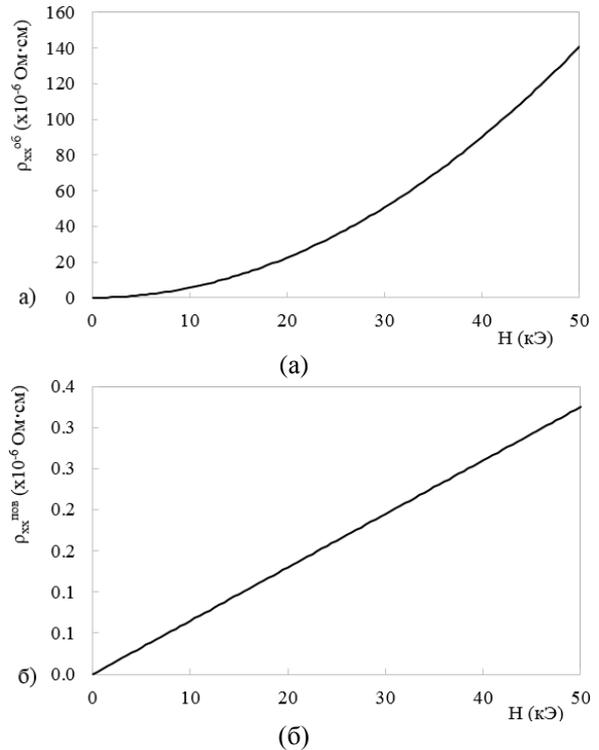


Рис. 5. Полевые зависимости объемного $\rho_{xx}^{об}$ (а) и поверхностного $\rho_{xx}^{нов}$ (б) магнитосопротивлений вольфрама при $T = 4.2$ К

4. Выводы

Таким образом, обнаружен и исследован размерный эффект в магнитосопротивлении монокристаллов вольфрама в условиях статического скин-эффекта. Показано, что, используя простую формулу, можно «разделить» вклады от поверхности и объема и оценить величины объемного и поверхностного сопротивлений и соответствующих плотностей постоянного электрического тока. По-видимому, такая методика может быть использована для оценки вкладов в объемную и поверхностную проводимость более сложных систем с неоднородным распределением электрического тока по сечению проводника.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема «Спин» № АААА-А18-118020290104-2) при частичной поддержке РФФИ (проект № 17-52-52008), программы фундаментальных научных исследований УрО РАН (проект № 18-10-2-37), Правительства Российской Федерации (постановление № 211, контракт № 02.А03.21.0006) и гранта № 14.Z50.31.0025 Министерства образования и науки РФ.

Список литературы

1. Лифшиц И. М., Азбель М. Я., Каганов М. И. Электронная теория металлов. М.: Наука, 1971. 415 с.
2. Шубников Л. В., де Гааз В. Дж. Увеличение сопротивления монокристаллов висмута под действием магнитного поля при низких температурах // Успехи физических наук. 1967. Т. 93. Вып. 2. С. 340–342.
3. Лазарев Б. Г., Нахимович Н. М., Парфенова Е. А. Влияние магнитного поля на электрическое сопротивление монокристаллов цинка и кадмия. Поперечный эффект // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1939. Т. 9. Вып. 10. С. 1169–1181.
4. Боровик Е. С. Изменение сопротивления металлов в магнитном поле при низких температурах // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1952. Т. 23. Вып. 1 (7). С. 91–100.
5. Fawcett E. High-field galvanomagnetic properties of metals // *Advances in Physics*. 1964. Vol. 13. N. 50. P. 139–191.
6. Лифшиц И. М., Азбель М. Я., Каганов М. И. К теории гальваномагнитных явлений в металлах // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1956. Т. 31. Вып. 1 (7). С. 63–79.
7. Лифшиц И. М., Песчанский В. Г. Гальваномагнитные характеристики металлов с открытыми поверхностями Ферми I // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1958. Т. 35. Вып. 5 (11). С. 1251–1264.
8. Лифшиц И. М., Песчанский В. Г. Гальваномагнитные характеристики металлов с открытыми поверхностями Ферми II // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1960. Т. 38. Вып. 1. С. 188–193.
9. Лифшиц И. М., Косевич А. М. К теории эффекта Шубникова–де Гааза // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1957. Т. 33. Вып. 1. С. 88–100.
10. Песчанский В. Г., Азбель М. Я. Магнетосопротивление полуметаллов // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1968. Т. 55. Вып. 5 (11). С. 1980–1996.
11. Волкентейн Н. В., Дякина В. П., Старцев В. Е., Черепанов А. Н., Черепанов В. И., Глинский М. Роль локальных особенностей поверхности Ферми в гальваномагнитных свойствах вольфрама при низких температурах // Физика низких температур. 1986. Т. 12. № 10. С. 1033–1044.
12. Marchenkov V. V., Gornostyrev Yu. N., Hall D. W., Brooks J. S., Weber H. W. Effect of dislocation distribution on the high-field magnetoresistivity of pure metal single crystals // *Materials science and engineering A*. 2001. Vol. 309. P. 64–68.
13. Панченко О. А., Луцишин П. П. Статический скин-эффект в вольфраме // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1969. Т. 57. Вып. 5 (11). С. 1555–1560.
14. Каганов М. И., Эдельман В. С. (Ред.). Электроны проводимости. М.: Наука, 1985. 416 с.
15. Suzuki M., Tanuma S. The static skin effect in bismuth // *Journal of the Physical Society of Japan*. 1978. Vol. 44. N. 5. P. 1539–1546.
16. Богод Ю. А., Гицу Д. В., Грозав А. Д. Статический скин-эффект и акустоэлектрическая неустойчивость в нитевидных монокристаллах висмута // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1986. Т. 90. Вып. 3. С. 1010–1021.
17. Cherepanov A. N., Marchenkov V. V., Startsev V. E., Volkenshtein N. V., Glin'skii M. High-field galvanomagnetic properties of compensated metals under electron-surface and intersheet electron-phonon scattering (tungsten) // *Journal of Low Temperature Physics*. 1990. Vol. 80. N. 3/4. P. 135–151.
18. Марченков В. В. Квадратичная температурная зависимость магнетосопротивления чистых монокристаллов вольфрама в условиях статического скин-эффекта // Физика низких температур. 2011. Т. 37. Вып. 9-10. С. 1068–1072.
19. Hasan M. Z., Kane C. L. Topological Insulators // *Reviews of Modern Physics*. 2010. Vol. 82. 3045.
20. Liu Y. H., Chong C. W., Jheng J. L., Huang S. Y., Huang J. C. A., Li Z., Qiu H., Huang S. M., Marchenkov V. V. Gate-tunable coherent transport in Se-capped Bi₂Se₃ grown on amorphous SiO₂/Si // *Applied Physics Letters*. 2015. Vol. 107, 12106.
21. Liu Y., Chong C., Chen W., Huang J. A., Cheng C., Tsuei K., Li Z., Qiu H., Marchenkov V. V. Growth and characterization of MBE-grown (Bi_{1-x}Sb_x)₂Se₃ topological insulator // *Japanese Journal of Applied Physics*. 2017. Vol. 56, 70311

References

1. Lifshitz I. V., Azbel M. Y., Kaganov M. I. *Elektronnaia teoriia metallov* (Electron theory of metals). Moscow: Nauka, 1971, 415 p. (In Russian)
2. Schubnikow L. V., de Haas W. J. Magnetische Widerstandsvergrößerung in Einkristallen von Wismut bei tiefen Temperaturen. *Proceedings of the Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences*, 1930, vol. 33, no. 2, pp. 130–133.

3. Lazarev B. G., Nakhimovich N. M., Parfenova E. A. Vliyanie magnitnogo polia na elektricheskoe soprotivlenie monokristallov tsinka i kadmiia. Poperechnyi éffekt. (Magnetic field influence of electric resistance of zinc and cadmium monocrystals. Transversal effect) *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1939, vol. 9, no. 10, pp. 1169–1181 (In Russian)
4. Borovik E. S. Izmenenie soprotivleniia metallov v magnitnom pole pri nizkikh temperaturakh (Change of metal resistance in magnetic field at low temperatures). *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1952, vol. 23, no. 1 (7), pp. 91–100 (In Russian).
5. Fawcett E. High-field galvanomagnetic properties of metals. *Advances in Physics*, 1964, vol. 13, no. 50, pp. 139–191.
6. Lifshitz I. V., Azbel M. Y., Kaganov M. I. K teorii gal'vanomagnitnykh iavlenii v metallakh (On the theory of galvanomagnetic effects in metals). *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1956, vol. 31, no. 1 (7), pp. 63–79.
7. Lifshitz I. M., Peschanskii V. G. Galvanomagnetic characteristics of metals with open Fermi surfaces I. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1959, vol. 8, no. 5, pp. 875–883.
8. Lifshitz I. M., Peschanskii V. G. Galvanomagnetic characteristics of metals with open Fermi surfaces II. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1960, vol. 11, no. 1, pp. 131–141.
9. Lifshitz I. M., Kosevich A. M. On the theory of the Shubnikov–de Haas effect. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1958, vol. 6, no. 1, pp. 67–77.
10. Peschanskii V. G., Azbel M. Y., Magnetoresistance of semimetals. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1969, vol. 28, no. 5, pp. 1045–1053.
11. Volkenshtein N. V., Diakina V. P., Startsev V. E., Cherepanov A. Ia., Cherepanov V. Ia., Glin'skii M. Rol' lokal'nykh osobennostei poverkhnosti Fermi v gal'vanomagnitnykh svoistvakh vol'frama pri nizkikh temperaturakh (Role of local features of the Fermi surface in the galvanomagnetic properties of tungsten at low temperatures). *Low Temperature Physics*, 1986, vol. 12, no. 10, pp. 1033–1044 (In Russian).
12. Marchenkov V. V., Gornostyrev Yu. N., Hall D. W., Brooks J. S., Weber H. W. Effect of dislocation distribution on the high-field magnetoresistivity of pure metal single crystals. *Materials science and engineering A*, 2001, vol. 309, pp. 64–68.
13. Panchenko O. A., Lutsishin P. P. Static skin effect in tungsten. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1969, vol. 30, no. 5, pp. 841–844.
14. Kaganov M. I., Edelman V. S. (Eds.) *Elektrony provodimosti* (Conduction electrons) Moscow: Nauka, 1985, 416 p. (In Russian)
15. Suzuki M., Tanuma S. The static skin effect in bismuth. *Journal of the Physical Society of Japan*, 1978, vol. 44, no. 5, pp. 1539–1546.
16. Bogod Yu. A., Gitsu D. V., Grozav A. D. Static skin effect and acoustoelectric instability in filamentous bismuth single crystals. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1986, vol. 63, no. 3, pp. 589–595.
17. Cherepanov A. N., Marchenkov V. V., Startsev V. E., Volkenshtein N. V., Glin'skii M. High-field galvanomagnetic properties of compensated metals under electron-surface and inter-sheet electron-phonon scattering (tungsten). *Journal of Low Temperature Physics*, 1990, vol. 80, no. 3/4, pp. 135–151.
18. Marchenkov V. V. Quadratic temperature dependence of magnetoresistivity of pure tungsten single crystals under static skin effect. *Low Temperature Physics*, 2011, vol. 37, no. 10, pp. 852–855.
19. Hasan M. Z., Kane C. L. Topological Insulators. *Reviews of Modern Physics*, 2010, vol. 82, 3045.
20. Liu Y. H., Chong C. W., Jheng J. L., Huang S. Y., Huang J. C. A., Li Z., Qiu H., Huang S. M., Marchenkov V. V. Gate-tunable coherent transport in Se-capped Bi₂Se₃ grown on amorphous SiO₂/Si. *Applied Physics Letters*, 2015, vol. 107, 12106.
21. Liu Y., Chong C., Chen W., Huang J. A., Cheng C., Tsuei K., Li Z., Qiu H., Marchenkov V. V. Growth and characterization of MBE-grown (Bi_{1-x}Sb_x)₂Se₃ topological insulator. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2017, vol. 56, 70311

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Беликов А. С., Коренистов П. С., Марченков В. В. Объёмная и поверхностная проводимость чистых монокристаллов вольфрама при статическом скин-эффекте // Вестник Пермского университета. Физика. 2018. № 3 (41). С. 8–13. doi: 10.17072/1994-3598-2018-3-08-13

Please cite this article in English as:

Belikov A. S., Korenistov P. S., Marchenkov V. V. Bulk and surface conductivity of pure tungsten single crystals under static skin effect. Bulletin of Perm University. Physics, 2018, no. 3 (41), pp. 8–13. doi: 10.17072/1994-3598-2018-3-08-13