

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 Уральский федеральный университет, Екатеринбург 620002

email: korenistov1995@mail.ru

email: asbelikov1@gmail.com

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

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 75 000, 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 проводимостей. Подобная методика может быть использована для оценки вкладов в объемную и поверхностную проводимости 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 xx.xx.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 of 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 75,000 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

Поступила в редакцию 10.04.2018; принята к опубликованию xx.xx.2018

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 годов 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 компенсации (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, может существенно изменяться при рассеянии носителей тока на поверхности кристалла, при их взаимодействии с длинноволновыми фоновыми, 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.

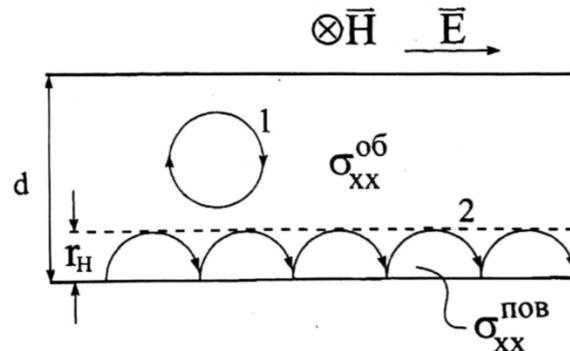


Рис. 1. Схема статического скин-эффекта с двумя типами электронов проводимости: «объемными» (1) и «поверхностными» (2). В результате большей подвижности «поверхностных» носителей заряда по сравнению с «объемными», поверхностная магнитопроводимость $\sigma_{xx}^{пов}$ оказывается много больше магнитопроводимости 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.

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 проводимость 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 $\rho_{293\text{K}}/\rho_{4.2\text{K}}$ около 75 000. Измеряли полевые 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. Для исследования размерного эффекта были приготовлены образцы различной формы: в виде «тонкого» и «толстого» брусков и пластины. Основные характеристики исследованных образцов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Основные характеристики образцов

Образцы	Размеры (мм)	Направление тока	Боковые грани	$I_{4.2\text{K}}$ (мм)
1	2	3	4	6
W1	1.39x1.43x12.0	<100>	(110)	3
W2	1.38x0.34x12.0	<100>	(110)	3
W3	0.35x0.40x12.0	<100>	(110)	3

Для измерений магнитосопротивления была использована общеринятая 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 $R_{xx}^{бп}$ и пластины $R_{xx}^{пл}$ (см. также рис. 2)

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

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

В этой системе уравнений величины $1/R_{xx}^{бп}$ 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.

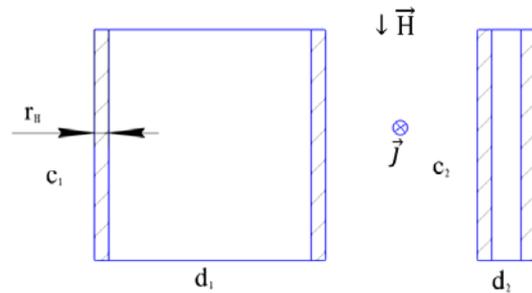


Рис. 2. Поперечные относительно электрического тока \vec{j} сечения образцов в виде бруска и пластины в магнитном поле \vec{H} . Затрихована приповерхностная область повышенной плотности тока.

Согласно сделанных оценок, транспортная длина свободного пробега электронов проводимости l в исследованных кристаллах при температуре жидкого гелия составляет около 3 мм (табл. 1). 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. табл. 1).

3. Результаты и обсуждение

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 еще и от

положения плоскости пластины относительно направления магнитного поля. На следующем рис.4 показаны поперечные сечения этих образцов по отношению к вектору магнитного поля \vec{H} и указаны значения сопротивления в поле $H = 50$ 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 \vec{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.

Используя систему уравнений (1), были сделаны оценки величины магнитосопротивления $\rho_{xx}^{нов}$ приповерхностного слоя толщиной gn 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, то есть $j_{нов} / j_{об} = \rho_{xx}^{об} / \rho_{xx}^{нов} = 433$. Это означает, что в данном случае плотность электрического тока в слое gn 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 много 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].

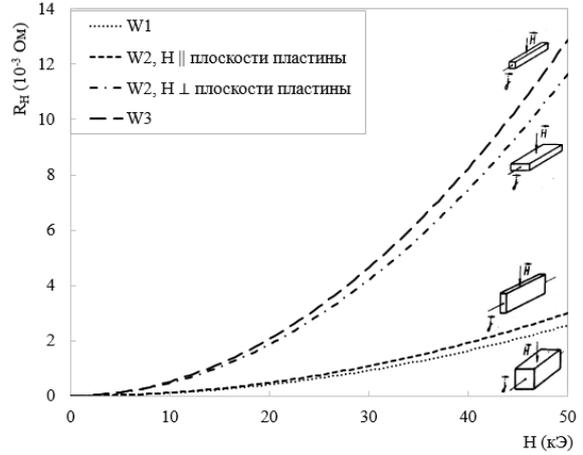


Рис. 3. Полевые зависимости магнитосопротивления монокристаллов вольфрама, находящихся в условиях ССЭ. На рисунке изображены образцы W1, W2 и W3, направления векторов магнитного поля по отношению к поверхностям образцов и векторам электрического тока.

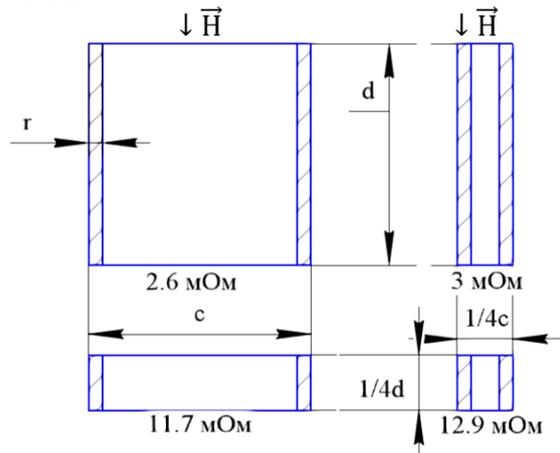


Рис. 4. Поперечные размеры образцов вольфрама W1, W2 и W3, находящихся в условии ССЭ, при $T = 4.2$ К, $H || <110>$. Приведены значения величин магнитосопротивления в поле 50 кЭ при расстоянии между потенциальными контактами 1 см.

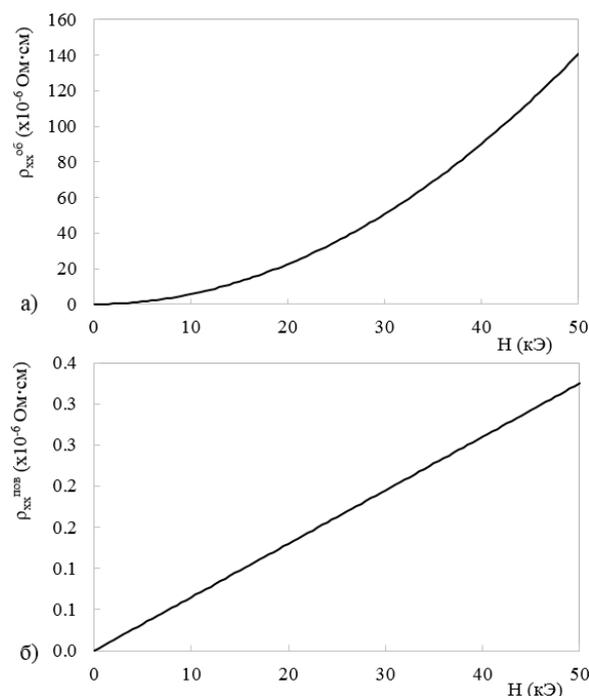


Рис. 5. Полевые зависимости объемного $\rho_{xx}^{об}$ (а) и поверхностного $\rho_{xx}^{пов}$ (б) магнитосопротивлений вольфрама при $T=4.2K$.

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 проводимости более сложных систем с неоднородным распределением электрического тока по сечению проводника.

Благодарности

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.

Сведения об авторах

1. Беликов Александр Сергеевич. Студент УрФУ.
Belikov Alexandr Sergeevich, student, UrFU, e-mail: asbelikov1@gmail.com
2. Коренистов Павел Сергеевич. Студент УрФУ.
Korenistov Pavel Sergeevich student, UrFU, e-mail: korenistov1995@mail.ru
3. Марченков Вячеслав Викторович. Профессор УрФУ, г.н.с. ИФМ УрО РАН, доктор физ.-мат. наук.

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. V. 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. 81–90.

10. *Песчанский В. Г., Азбель М. Я.* Магнетосопротивление полуметаллов // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1968. Т. 55. Вып. 5 (11). С. 1980–1996.
11. *Волкеништейн Н. В., Дякина В. П., Старцев В. Е., Черепанов А. Н., Черепанов В. И., Глиньский 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-structural materials properties microstructure and processing. 2001. V. 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. *Алексеевский Н. Е., Гайдуков Ю. П., Грибников З. С. и др.* Электроны проводимости /под ред. М.И.Каганова, В.С.Эдельмана. // М.: Наука, 1985. С. 416.
15. *Suzuki M., Tanuma S.* The static skin effect in bismuth. // Journal of the Physical Society of Japan. 1978. V. 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 Physic. 1990. V. 80. N. ¾. 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. № 82. P. 3045.
20. *Y. H. Liu, C. W. Chong, J. L. Jheng, S. Y. Huang, J. C. A. Huang, Z. Li, H. Qiu, S. M. Huang, V. V. Marchenkov.* Gate-tunable coherent transport in Se-capped Bi₂Se₃ grown on amorphous SiO₂/Si // Applied Physics Letters. 2015. V. 107. P. 12106.
21. *Y. Liu, C. Chong, W. Chen, J. A. Huang, C. Cheng, K. Tsuei, Z. Li, H. Qiu, V.V. Marchenkov.* Growth and characterization of MBE-grown (Bi_{1-x}Sb_x)₂Se₃ topological insulator // Japanese Journal of Applied Physics. 2017. V. 56. P. 70311.