

12,13

Термоэдс наноразмерных пленок переходных металлов

© А.П. Болтаев, Ф.А. Пудонин, И.А. Шерстнев[¶], Д.А. ЕгоровФизический институт им. П.Н. Лебедева РАН,
Москва, Россия[¶] E-mail: shersntevia@lebedev.ru

Поступила в Редакцию 21 апреля 2022 г.

В окончательной редакции 21 апреля 2022 г.

Принята к публикации 25 апреля 2022 г.

Проведены исследования коэффициента термоэдс островковых металлических пленок переходных металлов в зависимости от температуры и толщины пленок. Показано, что во всех изученных пленках при величине безразмерного кондактанса $g > 1$ и при $g < 1$ величина коэффициента термоэдс определяется свойствами металлического элемента пленки и для разных металлов различна. Основным фактором различного поведения коэффициента термоэдс пленок от температуры является индивидуальные особенности поверхности Ферми каждого металла. Изменение величины коэффициента термоэдс в зависимости от толщины пленки также определяется изменением формы поверхности Ферми-металла.

Ключевые слова: островковая пленка, тонкая пленка, термоэдс, коэффициент термоэдс, проводимость.

DOI: 10.21883/FTT.2022.08.52711.356

1. Введение

Наиболее распространенным способом получения наноразмерных металлических пленок в настоящее время является метод магнетронного распыления. Пленки, полученные таким методом, с толщинами меньше $d < 3$ нм, как правило, являются островковыми. В таких пленках наблюдается туннельная проводимость и примерно при толщине $d \approx 2$ нм наблюдается переход от металлического характера проводимости ($g > 1$) к диэлектрическому характеру проводимости ($g < 1$). Здесь $g = (e^2/\hbar)^{-1}\sigma$ — безразмерный кондактанс структуры, \hbar — постоянная Планка, σ — проводимость, приведенная к единице площади [1–4]. В островковых металлических пленках были обнаружены: излучение во внешнем электрическом поле [5], фотопроводимость в видимой и инфракрасной областях спектра [6], аномальная проводимость [7,8] и др. Исследованию термоэлектрических свойств в островковых и гранулированных металлических систем было посвящено несколько работ, например [9–13]. Интерес к термоэлектрическим свойствам металлических наноостровковых структур обусловлен тем, что, с одной стороны, они могут обладать высокой электропроводностью, а с другой — низкой теплопроводностью. Эти факторы позволяют надеяться, что в металлических островковых пленках термоэлектрическая добротность может быть больше, чем в объемных материалах.

Одним из основных параметров, определяющих термоэлектрические свойства материала, является его термоэлектрический коэффициент (коэффициент Зеебека). При разработке теории термоэдс гранулированных и островковых систем учитывались, в основном, температурный фактор, прыжковый характер проводимости в структурах и размеры гранул (D) или зарядовая

энергия гранул ($E_C \approx e^2/2D$, $D \propto C$, C — емкость острова, e — заряд электрона) [10–12]. Роль химического состава гранул в указанных работах не учитывалась. В работе [13] были проведены измерения коэффициента термоэдс островковых пленок; при этом учитывались толщина металлической пленки, характер проводимости пленок (металлический $g > 1$ или диэлектрический $g < 1$) и химический состав пленки. Было показано, что во всех изученных пленках величина коэффициента термоэдс определяется свойствами металлического элемента пленки и для разных металлов различна. Влияние туннельной составляющей проводимости пленки на величину коэффициента термоэдс островковой структуры даже при кондактансе $g \ll 1$ при этом не обнаружено. Механизмы изменения величины коэффициента термоэдс с изменением толщины пленок и их химического состава ранее не обсуждались.

Целью настоящей работы является изучение процессов изменения коэффициента термоэдс островковых металлических пленок с изменением толщины пленок, изготовленных из различных металлов и сплавов.

2. Постановка задачи и результаты измерения

Результаты исследований островковых пленок с туннельным характером проводимости $g \ll 1$ оказались неожиданными [13]. С одной стороны, показано, что во всех изученных пленках величина коэффициента термоэдс определяется свойствами металлического элемента пленки и для разных металлов различна. С другой стороны, в пленке Co с толщиной $d = 0.8$ нм с уменьшением температуры до $T \approx 150$ К коэффициент термоэдс переходит через $S = 0$, т.е., если при $T > 150$ К

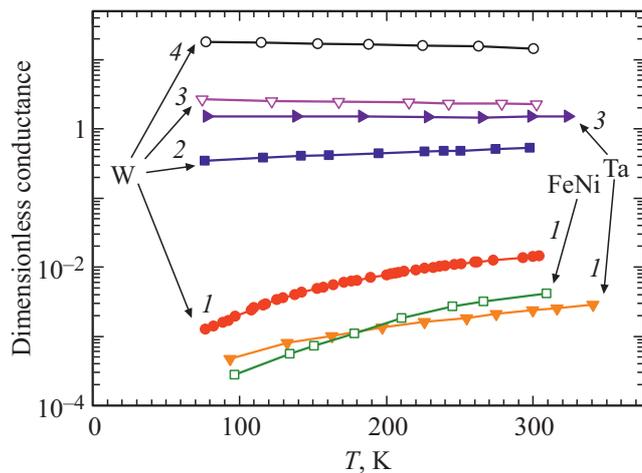


Рис. 1. Зависимость кондактанса от температуры для структур с различной толщиной металлических пленок (Вольфрам: 1 — 0.8 nm; 2 — 1.2 nm; 3 — 1.8 nm; 4 — 4 nm; Тантал: 1 — 0.8 nm; 3 — 1.8 nm; FeNi: 1 — 0.8 nm).

основная роль в определении величины и знака термоэдс принадлежала электронам, то при $T < 150$ K величина и знак термоэдс определяется дырками. Объяснить такую зависимость коэффициента термоэдс пленки кобальта от температуры с точки зрения изменения проводимости в металлических островках с изменением длины свободного пробега носителей заряда не представляется возможным. В работе [13] обращалось внимание на тот факт, что в проводимости металлов участвуют как электроны, так и дырки. Учитывая сказанное, с целью исследования процессов, ответственных за изменения величины коэффициента термоэдс с изменением толщины пленок, проведены измерения коэффициентов термоэдс островковых пленок переходных металлов Ta и W, а также сплава FeNi. Выбор металлов Ta и W обусловлен тем, что количество валентных электронов у тантала нечетное, а у вольфрама четное.

Для исследований были изготовлены островковые металлические пленки FeNi, Ta и W с эффективными толщинами для каждого металла: № 1 — $d = 0.8$ nm; № 2 — $d = 1.2$ nm; № 3 — $d = 1.8$ nm; № 4 — $d = 4$ nm. С подробным описанием процесса изготовления пленок можно ознакомиться в работах [4,13,14]. Измерение дифференциальной проводимости и термоэдс пленок осуществлялось в области температур от 77 до 400 K, метод измерения подробно описан в работе [13].

На рис. 1 представлены зависимости кондактансов пленок W, Ta и FeNi от температуры для структур с различной толщиной металлических пленок. По характеру зависимости кондактансы пленок практически не отличаются друг от друга при одинаковой толщине пленок. Как видно на рис. 1, проводимость пленок W, Ta и FeNi, изготовленных в одинаковых условиях на одинаковых диэлектрических подложках, изменяется на четыре порядка величины при изменении толщины

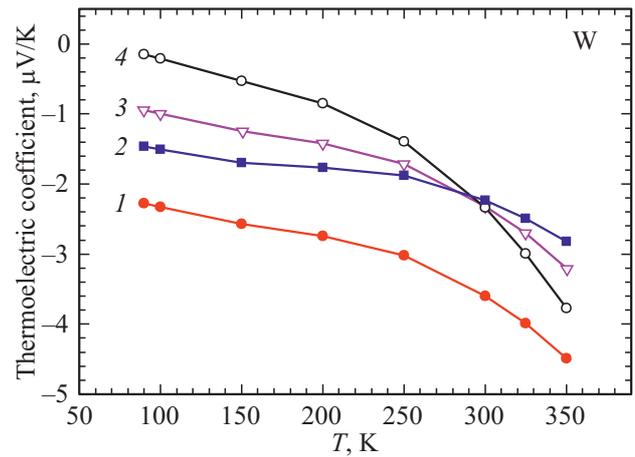


Рис. 2. Зависимость коэффициента термоэдс вольфрама от температуры для четырех структур с различной толщиной металлических пленок (1 — 0.8 nm; 2 — 1.2 nm; 3 — 1.8 nm; 4 — 4 nm).

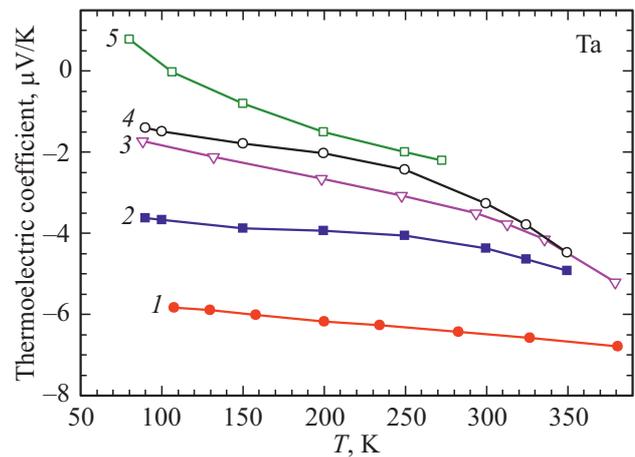


Рис. 3. Зависимость коэффициента термоэдс тантала от температуры для четырех структур с различной толщиной металлических пленок (1 — 0.8 nm; 2 — 1.2 nm; 3 — 1.8 nm; 4 — 4 nm; 5 — коэффициент термоэдс объемного тантала [5]).

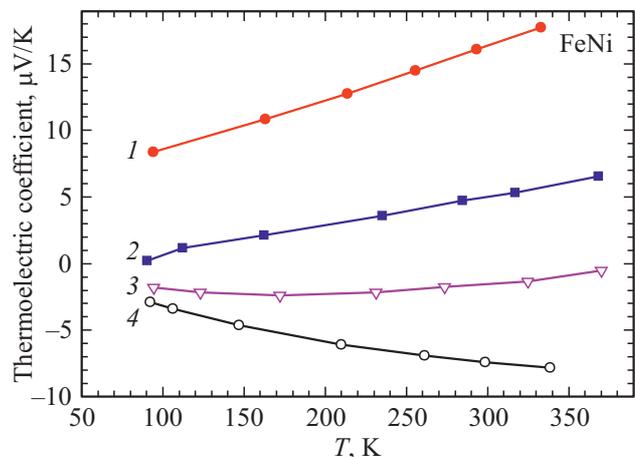


Рис. 4. Зависимость коэффициента термоэдс FeNi от температуры для четырех структур с различной толщиной металлических пленок (1 — 0.8 nm; 2 — 1.2 nm; 3 — 1.8 nm; 4 — 4 nm).

пленки примерно в два раза (от 0.8 до 1.8 nm). С увеличением температуры проводимость пленок увеличивается. При толщине металлических пленок 1.8 и 4 nm проводимость пленок мало зависит от температуры в исследованном диапазоне. В этом случае наблюдается небольшое уменьшение проводимости с ростом температуры.

Зависимости коэффициента термоэдс от температуры для пленок W, Ta и FeNi различной толщины представлены на рис. 2, 3 и 4 соответственно. На рис. 3 для сравнения представлена зависимость коэффициента термоэдс объемного тантала [15] (кривая 5).

3. Обсуждение результатов

Для всех типов пленок, изготовленных из различных металлов с толщинами от 0.8 до 4 nm, величина безразмерного кондактанса (g) изменяется от 0.001 до 30. Безразмерный кондактанс с величиной $g = 1$ имеют пленки с толщиной $d \approx 1.8$ nm. В этом случае в пленках с толщинами $d > 1.8$ nm проводимость можно рассматривать как металлическую, а в пленках с толщинами $d < 1.6$ nm должна наблюдаться туннельная проводимость. Пленки с размерами толщин $d < 1.6$ nm являются островковыми. Средние размеры наностростровов в пленке толщиной $d = 1.2$ nm примерно равны 10–20 nm. Средние размеры наностростровов в пленке с толщиной $d = 0.8$ nm составляют примерно 3–4 nm [13].

Проведенные нами исследования проводимости гранулированных и островковых систем [4,14] позволили установить процессы, которые определяют перенос носителей заряда в данных структурах. Эти процессы при $g \ll 1$ с одной стороны определяют концентрацию избыточных носителей заряда в островках, с другой стороны характеризуют скорость переноса избыточных носителей заряда с одного островка на другой (подвижность). Причем эти процессы происходят независимо друг от друга [14]. Процесс, определяющий концентрацию избыточных носителей заряда в островках, преимущественно связан с тунелированием электронов с одного нейтрального островка на другой нейтральный островок и является активационным. Энергия активации в основном определяется величиной зарядовой энергии E_C . Отклонение зависимости проводимости от закона Аррениуса определяется разбросом энергии активации по величине из-за разброса размеров островков. С ростом температуры в активационном процессе будут принимать участие островки со все большей энергией активации (с меньшим значением величины D) и, следовательно, средняя величина энергии активации с ростом температуры будет увеличиваться [6]. Скорость переноса избыточных носителей заряда с одного островка на другой связана с тунелированием электронов или дырок с заряженного островка на нейтральный островок. Причем, избыточные носители заряда туннелируют на ближайший нейтральный островок практически без изменения энергии.

При туннельном характере проводимости в неоднородных структурах коэффициент термоэдс описывается формулой [12,16]:

$$S = \frac{k^2}{2e} (T_0 T)^{0.5} \frac{\partial \ln g(\epsilon_F)}{\partial E},$$

где T_0 — параметр, $T_0 \propto E_C \approx e^2/2D$, E_C — зарядовая энергия, k — постоянная Больцмана, T — температура образца, e — заряд электрона, $g(\epsilon_F)$ — плотность состояний на уровне Ферми, ϵ_F — энергия Ферми. Однако в работе [13] показано, что в островковых пленках на основе Co и W величина коэффициента термоэдс определяется свойствами металлического островка пленки и для разных металлов различна. Влияние туннельной составляющей проводимости пленки на величину коэффициента термоэдс островковой структуры даже при кондактансе $g \ll 1$ не обнаружено. Более того представленные в настоящей статье экспериментальные данные зависимости коэффициента термоэдс от температуры в переходных металлах (рис. 2, 3 и 4) подтверждают выводы, сделанные в работе [13].

Действительно, пленки переходных металлов W, Ta и FeNi, изготовленные в одинаковых условиях с одинаковыми эффективными толщинами металлических и диэлектрических слоев, имеют абсолютно различные зависимости коэффициентов термоэдс от температуры. Так в пленках W с уменьшением толщины величины термоэдс уменьшаются. Природа уменьшения величины коэффициента термоэдс с уменьшением толщины пленки в работе [13] связывают с уменьшением общей площади наностростровов на подложке. Температурную зависимость термоэдс в металлических наностростровках вольфрама (как и в объемных металлах) связывают с изменением средней энергии носителей заряда с изменением температуры.

Однако характер зависимости коэффициентов термоэдс Ta и FeNi от толщины пленки и от температуры резко отличается от зависимостей термоэдс вольфрамовых пленок (рис. 3 и 4). Так в пленках тантала с уменьшением толщины наблюдается не спад, а рост абсолютной величины коэффициента термоэдс (рис. 3). Поскольку коэффициент термоэдс отрицательный, то основная роль в определении термоэлектрических свойств тантала принадлежит электронам, независимо от толщины пленки и во всей области измеряемых температур.

В пленках FeNi зависимости коэффициента термоэдс от температуры и толщины также имеют индивидуальный характер. На рис. 4 (кривая 3 и 4) видно, что коэффициент термоэдс толстых пленок (4 и 1.8 nm) отрицательный. С уменьшением толщины пленки коэффициент термоэдс уменьшается по абсолютной величине. При дальнейшем уменьшении толщины пленки (1.2 и 0.8 nm) величина коэффициента термоэдс переходит через 0 и становится положительной. Созданные по единой технологии металлические пленки W, Ta и FeNi,

как следует из проведенных выше обсуждений, демонстрируют совершенно различные термоэлектрические свойства в зависимости от толщины пленок и элементного состава металлических наностростровов. Объяснить такое неоднозначное поведение островковых пленок в рамках модели свободных электронов и с точки зрения изменения проводимости в металлических островках с изменением длины свободного пробега носителей заряда не представляется возможным.

Абсолютная величина коэффициента термоэдс переходных металлов определяется, как правило, носителями заряда нескольких энергетических зон расположенных вблизи уровня Ферми, в каждой из которых имеются только электронные или дырочные орбиты. Конфигурации внешних электронных оболочек металлов W, Ta и FeNi, а следовательно, и поверхности Ферми указанных металлов отличаются друг от друга. Особенность поверхности Ферми для каждого металла является основным фактором различного поведения коэффициента термоэдс этих металлов.

Исследуемые пленки имеют толщины сравнимые с межатомным расстоянием решетки металлов. Можно предполагать, что изменение толщины пленки в значительной степени влияет на конфигурацию и характер поверхности Ферми металла. На изменение конфигурации поверхности Ферми с изменением толщины пленок металла могут повлиять такие факторы, как

- нарушение дальнего порядка в расположении атомов в металле в направлении роста пленки;
- влияние подложки на межатомное расстояние металлического слоя вблизи границы раздела металл-подложка.

Известно [17,18], что в металлах за счет внешних воздействий возможно изменение межатомных расстояний, при этом изменяется вся энергетическая структура металла и изменяется поверхность Ферми. Вместе с изменением поверхности Ферми изменяются электронные свойства металлов. В импульсном пространстве в каждой электронной энергетической зоне есть точки, в которых изменяется связность изоэнергетических поверхностей: либо появляется (исчезает) полость изоэнергетической поверхности, либо рвется (образуется) перемычка (рис. 5). Возможен переход системы гофрированных тороидов к эллипсоидам [17,18]. В результате таких изменений открытая поверхность Ферми превращается в закрытую поверхность, а положение отдельных энергетических зон относительно уровня Ферми может трансформироваться и преобразовать металл в дырочный или электронный. Особенно значительное изменение конфигурации поверхности Ферми может наблюдаться в переходных металлах, где присутствует гибридизация *d*- и *s*-состояний.

На начальном этапе на формирование кристаллической решетки металла в значительной степени влияет подложка. В качестве подложки нами использовалось стекло К8, созданное на основе окисла SiO₂. Расстояние

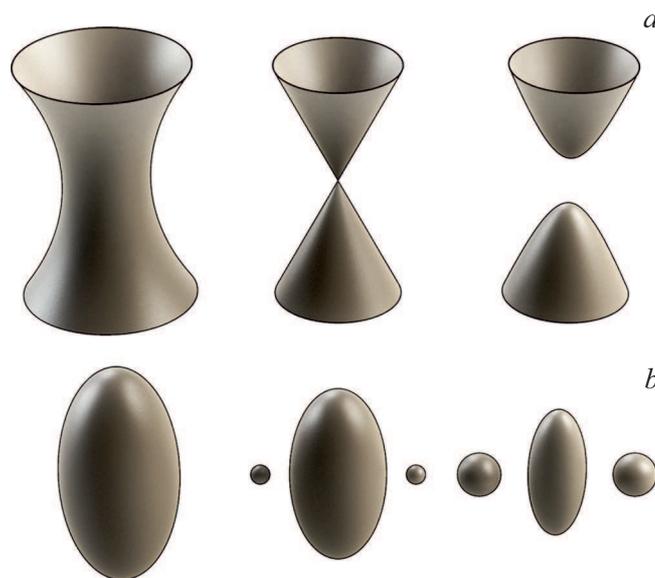


Рис. 5. Изменение связности поверхности Ферми с изменением межатомных расстояний кристаллической решетки металла. *a* — разрыв перемычек (открытая поверхность Ферми превращается в закрытую поверхность); *b* — появление новой полости Ферми [17,18].

между атомами в окисле SiO₂, в зависимости от модификации, колеблются в районе 0.5 nm, а все металлы, которые наносились на подложку (W, Ta и FeNi), имеют постоянную решетки примерно 0.3–0.35 nm. Такое несоответствие расстояний между атомами подложки и металла приводит к значительному искажению кристаллической решетки слоев металлов вблизи границы раздела металл-подложка. При дальнейшем увеличении толщины металлической пленки влияние подложки на кристаллическую решетку металла ослабевает, и кристаллическая структура пленки приближается к объемной структуре металлов.

Изменение расстояний между атомами кристаллической решетки металлических пленок с изменением их толщины, как указывалось выше, приводит к изменению поверхности Ферми в пленках. Это утверждение подтверждают результаты измерения зависимостей коэффициентов термоэдс металлических пленок от толщины и температуры, представленные на рис. 2, 3 и 4.

Поскольку зависимости коэффициентов термоэдс от температуры и толщин пленок для различных металлов существенно отличаются между собой, целесообразно рассмотреть поведение металлических пленок W, Ta и FeNi отдельно для каждого металла.

Вольфрам — химический элемент VI группы периодической системы элементов Менделеева. Конфигурация внешних электронных оболочек $5s^2p^6d^46s^2$. Металл с кубической объемно-центрированной решеткой, параметр которой $a = 0.31647$ nm. Поверхность Ферми закрытая. В центре поверхности Ферми содержится электронный „карман“, а в ее углах расположены „карманы“,

содержащие дырки. Металл „компенсированный“. Число электронов равно числу дырок ($n = p$) [19]. На рис. 2 представлены зависимости коэффициента термоэдс вольфрама от температуры для четырех структур с различной толщиной металлических пленок.

В толстой пленке, где толщина $d = 4$ nm, кристаллическая структура близка к кристаллической структуре объемного вольфрама. В этой пленке поверхность Ферми и поверхность Ферми объемного вольфрама мало отличаются друг от друга. В пленках меньшей толщины несоответствие расстояний между атомами подложки и металла изменяет параметры кристаллической решетки тонкой пленки металла. При толщине пленки $d = 0.8$ nm влияние подложки на межатомное расстояние в металле для исследуемых структур будет максимально. Здесь следует отметить, что в пленке с $d = 0.8$ nm толщина незначительно превышает параметр решетки вольфрама ($a = 0.31647$ nm), т.е. в пленке отсутствует дальний порядок. В этом случае изменяется вся энергетическая структура металла и изменяется поверхность Ферми. У вольфрама поверхность Ферми закрытая. В этом случае могут появиться дополнительные полости изоэнергетической поверхности (рис. 5, b) [17,18]. Дополнительные полости изоэнергетической поверхности Ферми, по видимому, не влияют на закрытый характер поверхности Ферми в вольфрамовой пленке, тогда металл остается „компенсированный“ [19].

Как и в объемных металлах в металлических nanoостровках с уменьшением температуры уменьшается средняя энергия носителей заряда. В вольфраме с уменьшением средней энергии носителей заряда пропорционально уменьшается и величина коэффициента термоэдс (рис. 2). С другой стороны, наблюдается значительное влияние на величину коэффициента термоэдс толщины пленки. Так с уменьшением толщины пленки размеры nanoостровков уменьшаются [13], и будет уменьшаться общая площадь nanoостровков занимаемая на подложке. Действительно, средние размеры nanoостровков в пленке толщиной $d = 1.2$ nm примерно равны 10–20 nm. Средние размеры nanoостровков в пленке с толщиной $d = 0.8$ nm составляют примерно 3–4 nm. Как следствие, разность температур, приложенная к структуре, перераспределяется между металлическими островками и диэлектрическими барьерами в пользу барьеров с уменьшением размеров nanoостровков.

Следует подчеркнуть, что градиент температур в островке металла создается не за счет распространения тепла вдоль пленки, а за счет тепла, которое поступает через поверхность между островком и подложкой, и тепла, которое поступает в металлический nanoостровок через боковую поверхность от материала барьера. Такое распространение тепла в пленках приводят к равенству градиента температур в подложке, барьерном и металлическом слое.

Тантал — химический элемент побочной подгруппы V группы периодической системы элементов Менделеева. Электронная конфигурация внешних оболочек

$5s^2p^6d^36s^2$. Металл, с кубической объемно-центрированной решеткой, параметр которой $a = 0.330$ nm. Поверхность Ферми открытая, представляет из себя пространственную сетку гофрированных цилиндров вдоль осей (001). Число электронов не равно числу дырок ($n \neq p$) [19].

Зависимости коэффициентов термоэдс тантала от толщины пленки и от температуры резко отличается от зависимостей термоэдс вольфрамовых пленок (рис. 3). Так в пленках тантала с уменьшением толщины наблюдается не спад, а рост абсолютной величины коэффициента термоэдс. Такое поведение пленок на основе тантала возможно объяснить только с точки зрения значительного изменения поверхности Ферми тантала с уменьшением толщины пленки. Величину и знак коэффициента термоэдс в тантале определяют как электроны, так и дырки. При температуре $T = 300$ K коэффициент термоэдс отрицательный и определяется электронами. При температуре $T \approx 110$ K величина коэффициента термоэдс $S = 0$ и при дальнейшем уменьшении температуры коэффициент термоэдс становится положительной величиной и определяется дырками (рис. 3, кривая 5). В промежуточных температурах знак и величина коэффициента термоэдс тантала определяется совместным влиянием электронов и дырок.

В пленках меньшей толщины, как и для вольфрама, несоответствие расстояний между атомами подложки и металла изменяет параметры кристаллической решетки тонкой пленки металла, что приводит к изменению поверхности Ферми. В частности, пространственная сетка гофрированных цилиндров поверхности Ферми тантала может трансформироваться в эллипсоидальную поверхность Ферми, причем эллипсоидальная поверхность Ферми будет закрытая [17,18]. Положение отдельных энергетических зон относительно уровня Ферми может вызвать доминирование электронной энергетической зоны в металле. Эффект влияния электронной составляющей на величину коэффициента термоэдс виден на рис. 3, где наблюдается увеличение отрицательного коэффициента термоэдс в структуре на основе тантала с уменьшением толщины пленки.

Сплав FeNi содержит примерно 80% никеля и 20% железа, и он относится к кристаллическим сплавам [20]. Кристаллическая структура FeNi отличается от кристаллической структуры компонентов сплава, поэтому электронная структура сплавов очень сложна, а поверхность Ферми сплава отличается от поверхностей Ферми железа и никеля.

Зависимость коэффициента термоэдс FeNi от температуры для четырех структур с различной толщиной металлических пленок представлена на рис. 4. Выше отмечалась характерная особенность пленки на основе сплава FeNi, где с изменением толщины пленки наблюдался переход от отрицательного коэффициента термоэдс к положительному коэффициенту. В толстых пленках ($d = 4$ nm и $d = 1.8$ nm) основная роль в определении величины и знака термоэдс принадлежит электронам, а

в тонких пленках ($d = 1.2 \text{ nm}$ и $d = 0.8 \text{ nm}$) величина и знак термоэдс определяется дырками. Изменение типа носителей заряда в пленке может быть обусловлено, как и в тантале, особенностями модификации поверхности Ферми сплава FeNi с изменением ее толщины.

4. Заключение

Проведенные исследования электрофизических свойств металлических nanoостровковых структур, созданных на основе переходных металлов W, Ta и FeNi, позволили обнаружить ряд интересных особенностей поведения островковых пленок под действием электрического поля и под действием градиента температуры. Так в тонких пленках толщиной $d = 1.2 \text{ nm}$, с размерами металлических островков 10–20 nm, и пленках толщиной $d = 0.8 \text{ nm}$, с размерами металлических островков примерно 3–4 nm, перенос носителей заряда с одного островка на другой связан с туннелированием электронов или дырок с одного островка на другой. В качестве диэлектрика во всех изготовленных островковых металлических пленках был использован один и тот же диэлектрик (Al_2O_3). Как результат (рис. 1), кондактансы пленок W, Ta и FeNi практически не отличаются друг от друга при одинаковой толщине пленок, а величина туннельного тока определяется расстоянием между островками и высотой потенциального барьера диэлектрика, находящегося между металлическими островками.

Совершенно другая картина наблюдается при изучении зависимостей коэффициентов термоэдс от температуры пленок переходных металлов W, Ta и FeNi, изготовленных в одинаковых условиях с одинаковыми эффективными толщинами металлических и диэлектрических слоев. Коэффициенты термоэдс пленок различных металлов имеют различные температурные зависимости. Показано, что во всех изученных пленках величина коэффициента термоэдс определяется свойствами металлического элемента пленки. Влияние туннельной составляющей проводимости пленки на величину коэффициента термоэдс островковой структуры даже при кондактансе $g \ll 1$ не обнаружена. Однако следует учесть, что именно туннелирование носителей заряда в структуре осуществляет электрическую связь между металлическими островами.

Основными факторами различного поведения коэффициента термоэдс пленок от температуры являются индивидуальные особенности поверхности Ферми каждого металла. Изменение величины коэффициента термоэдс в зависимости от толщины пленки также определяется изменением формы поверхности Ферми металла независимо от того, является поверхность Ферми металла исследуемой пленки открытой или закрытой. Модификация формы поверхности Ферми связана с изменением расстояний между атомами металлических островков. На начальном этапе роста пленки на формирование

кристаллической решетки металла в значительной степени влияет подложка. Из-за несоответствия расстояний между атомами подложки и металла, наблюдается значительное искажение кристаллической решетки слоев металлов вблизи границы раздела металл–подложка. Вблизи границы раздела металл–подложка формируется поверхность Ферми металла, где искаженная решетка определяет ее форму. С ростом толщины пленки при толщинах пленки $d = 4 \text{ nm}$ кристаллическая структура в островке металла приближается к объемной структуре. В этом случае поверхность Ферми пленки приближается по форме к поверхности Ферми объемного материала. Данное утверждение подтверждается, например, незначительным отклонением температурной зависимости коэффициента термоэдс в пленке тантала с толщиной $d = 4 \text{ nm}$ и в объемном металле (рис. 3, кривые 4 и 5).

Проведенные исследования металлических nanoостровковых структур благодаря их разнообразным свойствам и возможностью влиять на форму поверхности Ферми различных металлов открывают перспективы конструирования термоэлектрических приборов с улучшенными характеристиками.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-22-00412, <https://rscf.ru/project/22-22-00412/>

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] B. Abeles, Ping Sheng, M.D. Coutts, Y. Arie. *Adv. Phys.* **24**, 407 (1975).
- [2] Б.А. Аронзон, А.Е. Варфоломеев, Д.Ю. Ковалев, А.А. Ликальтер, В.В. Рыльков, М.А. Седова. *ФТТ* **6**, 944 (1999).
- [3] Е.З. Мейлихов. *ЖЭТФ* **115**, 1484 (1999).
- [4] А.П. Болтаев, Н.А. Пенин, А.О. Погосов, Ф.А. Пудонин. *ЖЭТФ* **99**, 827 (2004).
- [5] R.D. Fedorovich, A.G. Naumovets, P.M. Tomchuk. *J. Phys. Condens. Matter* **11**, 9955 (1999).
- [6] А.П. Болтаев, Н.А. Пенин, А.О. Погосов, Ф.А. Пудонин. *ЖЭТФ* **96**, 940 (2003).
- [7] А.П. Болтаев, Ф.А. Пудонин. *ЖЭТФ* **103**, 436 (2006).
- [8] А.Р. Boltaev, F.A. Pudonin, I.E. Protsenko, A.V. Uskov, I.A. Sherstnev. *J. Russ. Laser Res.* **34**, 537 (2013).
- [9] T.C. Harman, P.J. Taylor, M.P. Walsh, B.E. LaForge. *Science* **297**, 2229 (2002).
- [10] A. Glatz, I.S. Beloborodov. *EPL* **87**, 57009 (2009).
- [11] А. Грановский, X. Сато, Ю. Айюки, А. Юрасов. *ФТТ* **44**, 2001 (2002).
- [12] В.А. Белоусов, А.Б. Грановский, Ю.Е. Калинин, А.В. Ситников. *ФТТ* **49**, 1762 (2007).
- [13] А.Р. Boltaev, F.A. Pudonin, I.A. Sherstnev, D.A. Egorov. *Phys. Lett. A* **24**, 2943 (2019).

- [14] A.P. Boltaev, F.A. Pudonin, I.A. Sherstnev. Solid State Commun. **180**, 39 (2014).
- [15] R. Carter, A. Davidson, P.A. Schroeder. J. Phys. Chem. Solids **31**, 2374 (1970).
- [16] N.F. Mott, E.A. Davis. Electronic Processes in Non-Crystalline Materials. OUP Oxford (2012).
- [17] I.M. Lifshitz. ЖЭТФ **11**, 1130 (1960).
- [18] М.И. Каганов, И.М. Лифшиц. УФН **129**, 487 (1979).
- [19] Ю.П. Гайдуков. УФН **13**, 194 (1970).
- [20] Г.А. Петраковский. УФН **134**, 305 (1981).

Редактор К.В. Емцев