ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА

УДК 537.6:538.915

АНИЗОТРОПИЯ МАГНИТНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ СИЛИЦИДА V₃Si

© 2021 г. Б. Н. Кодесс^{*a*, *}, Ф. А. Сидоренко^{*b*}

^аВсероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы, ВНИИМС-МЦНИ, Москва, 119361 Россия

^bУральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, 620002 Россия *e-mail: kodess@mail.ru Поступила в редакцию 08.07.2020 г. После доработки 12.11.2020 г. Принята к публикации 27.11.2020 г.

Для силицида ванадия V_3 Si, синтезированного из исходных материалов высокой чистоты, измерена магнитная восприимчивость в диапазоне температур 20–300 К. При комнатной температуре изучена зависимость восприимчивости от ориентации монокристалла относительно направления магнитного поля и обнаружена ее анизотропия. Аномалии различных свойств в области 65–75 К и наличие анизотропии восприимчивости сопоставляются с особенностями для чистого ванадия и отмечается генетическая связь (наследуемость) многих характеристик электронной структуры ванадия в его силициде.

Ключевые слова: аномалия магнитной восприимчивости, анизотропия, ванадий, силицид ванадия, химическое сжатие, интерметаллические соединения A3B, спинтроника **DOI:** 10.21857/S00152220210.40022

DOI: 10.31857/S0015323021040033

введение

Силицид ванадия V₃Si обладает максимальной температурой перехода в сверхпроводящее состояние Т_с среди бинарных соединений на основе ванадия. В этом соединении непосредственно вблизи T_C (16.7–17.2 К) наблюдается структурный переход при температуре T_M (20-21 K) с переходом в тетрагональную элементарную ячейку и аномалии магнитных свойств, включая максимум на температурной зависимости магнитной восприимчивости в диапазоне температуры соответствующего фазового перехода при температуре Нееля, T_N (28-30 K) [1-5]. Ранее установлена тесная корреляция температур $T_{\rm c}, T_{\rm M}, T_{\rm N}$ и степени аномального поведения характеристик электронной структуры и динамики решетки для различных соединений АЗВ и их твердых растворов, которые возникают при более высоких температурах задолго до возникновения этих фазовых переходов [2-11].

Сосуществование и/или конкуренция сверхпроводимости и магнитного упорядочения было и остается предметом многих экспериментальных и теоретических работ [12–14]. Для соединений A3B, включая V₃Si, V₃Ga, V₃Al, этот интерес возобновился в связи с возможностью их использования в устройствах спинтроники [15–18].

Кристаллическая структура силицида V_3 Si характеризуется пространственной группой Pm3n—

 O_h^3 . При этом следует отметить, что в кристаллах со структурой A15 для атомов переходного металла, которые расположены вдоль взаимно перпендикулярных цепочек по граням кубической элементарной ячейки, локальная симметрия — тетрагональная (D2d). Это позволяет высказать предположение о возможной анизотропии магнитной восприимчивости, а также других физических свойств этого соединения. Ранее анизотропия магнитной восприимчивости была установлена для некоторых других парамагнитных веществ [19–21]. В данной работе анизотропия магнитной восприимчивости обнаружена для монокристаллического образца V_3 Si с высокой температурой перехода в сверхпроводящее состояние.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Чтобы минимизировать влияние возможных примесей, исходные слитки были синтезированы из ванадия, очищенного зонной плавкой (содержание основного элемента более 99.99 мас. %) и полупроводникового кремния (более 99.999 мас. %)

методом плавки компонент во взвешенном состоянии при повышенном давлении в атмосфере очищенного гелия. Монокристалл V₃Si был вырашен бестигельной зонной плавкой с индукционным нагревом при давлении инертного газа 2 атм. [22]. Для исследуемого монокристалла отношение сопротивления при комнатной температуре к сопротивлению при 20 К составило $\rho_{300}/\rho_{20} = 12$. Температура перехода в сверхпроводящее состояние, $T_{\rm C} = 16.7$ K, определена методом магнитной индукции; ширина сверхпроводящего перехода составила 0.3 К. Эти данные свидетельствуют о высоком уровне совершенства кристаллической решетки образца. Параметр кристаллической решетки, определенный на 4-х кружном монокристальном дифрактометре, составил 0.4726 нм и также соответствует составу, близкому к стехиометрическому [9].

На первом этапе измерена магнитная восприимчивость методом Фарадея в широком диапазоне — от температуры кипения жидкого водорода до комнатной температуры [23]. Измерения при комнатной температуре проводили дважды: до начала заливки хладоагента и после отогревания, при этом для образца силицида ванадия получены совпадающие значения (рис. 1).

Значение восприимчивости $\chi = 5.58 \times 10^{-6}$ эме/г, измеренное при 300 К, практически совпало с ранее измеренным для образца V₃Si, в котором не было явных признаков структурного перехода до 20 К, однако задолго до низкотемпературных фазовых переходов присутствовали яркие анизотропные предпереходные явления в электронной структуре и динамике решетки этого образца [2–5, 9–11]. Так же, как и в работах [6, 7] была найдена аномалия восприимчивости в диапазоне 60–75 К. Наличие аномалии и значение χ при комнатной температуре согласуется также с данными, в которых восприимчивость и ее температурная зависимость были измерены для образцов с отношением сопротивления ρ_{300}/ρ_{20} к = 13 и 25 [6].

Эти данные позволили провести сопоставление с аналогичными характеристиками температурной зависимости восприимчивости для высокочистого элементарного ванадия [24] (рис. 1). После заметного роста восприимчивости при снижении температуры до 200 К для ванадия наблюдали замедление роста с образованием затем своеобразного плато, которое имело место и для силицила ваналия при температуре ниже 30 К. Наличие аномалии восприимчивости элементарного ванадия в диапазоне 200-250 К было установлено ранее и в другой работе [25] в образце, содержащем 99.9 мас. % основного вещества, и также содержащем пренебрежимо малое количество кислорода и водорода (0.008 и 0.020 мас. % соответственно).



Рис. 1. Температурная зависимость магнитной восприимчивости для монокристалла V₃Si. На вставке – аналогичная зависимость магнитной восприимчивости чистого ванадия (в относительных единицах) по данным [24].

Далее приводятся результаты измерений зависимости магнитной восприимчивости от ориентации монокристалла относительно направления магнитного поля (11 кЭ). Использован сферический образец диаметром 5 мм; отклонение от сферичности, составляло не более 10–15 микрон. Образец подвешивали на кварцевой нити вдоль кристаллографического направления [001], вокруг которого осуществляли повороты. Точность ориентировки монокристального шарика составляла 1.5°, что было подтверждено результатами исследования на нейтронном монокристальном дифрактометре (филиал НИФХИ, г. Обнинск) [26].

При поворотах монокристаллического образца V₃Si вокруг оси [001] значения χ при углах 0°, 90° и 180°, 270° ($\chi \times 10^6 = 5.58, 5.57, 5.56$ и 5.59 эме/г соответственно) практически были одинаковы. При углах 45° и 135° наблюдается максимум и минимум на зависимости магнитной восприимчивости от угла поворота (рис. 2).

На втором этапе исследования для получения более подробной зависимости восприимчивости от ориентации относительно магнитного поля тот же образец был помещен в другую установку – анизометр конструкции Циовкина. Эти измерения позволили более детально выделить анизотропную часть восприимчивости (рис. 2).

Значение магнитной восприимчивости в исходном положении хорошо согласовалось со значением, полученным после поворота образца на 180°. Точность отсчета на шкале углов анизометра составляла 1°.

Относительная точность наших измерений составляла 0.5%, на фоне максимального наблюдаемого относительного изменения восприимчивости 1.26% при повороте образца от нуля до 90°.



Рис. 2. Зависимость относительного изменения восприимчивости при комнатной температуре от угла поворота вокруг нити подвеса. Направление нити совпадает с кристаллографическим направлением [001], в начальной точке $\chi = 5.58 \times 10^{-6}$ эме/г; квадраты – данные исходного эксперимента, кружки – результаты, полученные на анизометре.

Общий размах отклонения составил, соответственно, 2.52%. Отметим, что при этом наблюдали достаточно гладкое изменение восприимчивости для всех точек. Наблюдаемое максимальное изменение восприимчивости заметно превосходит возможную относительную погрешность, а "размах" почти вдвое выше, чем абсолютное значение погрешности в один процент, указанное авторами в работе [23]. Найденная зависимость аппроксимируется синусоидальной линией (рис. 2).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Следует отметить парадоксальные особенности структуры сверхпроводящих соединений типа A15, которые объединяют их с другими явно анизотропными химическими соединениями. Непереходные компоненты Si, Ge, Sn образуют в этих соединениях объемно-центрированную кубическую решетку с очень сильными, ярко выраженными стабилизирующими ковалентными химическими связями с атомами металлов [27–29]. Однако при образовании ими соединений с переходными металлами такими как V, Nb, Ta атомы этих металлов располагаются в виде цепочек в гранях такой решетки.

Результаты измерений восприимчивости и ее температурной зависимости соединений АЗВ свидетельствуют о том, что атомы переходных металлов в кристаллах обсуждаемых соединений обеспечивают еще более высокую плотность электронных состояний на уровне Ферми, чем в кристаллах чистых металлов, и, как показано в [27], они также образуют ковалентные химические связи между собой. При этом тетрагональная точечная симметрия окружения атомов переходного металла и их расположение в элементарной ячейке силицида, которое похоже на квазиодномерные цепочки, послужила основанием для ряда моделей сверхпроводимости и других свойств, связанных с дополнительным повышением плотности электронных состояний.

Особенности свойств изучаемого силицида можно также рассматривать с точки зрения наследуемости свойств атомов металлов пятой группы Периодической системы, которые проявляются в склонности к понижению симметрии кубической элементарной ячейки. Это отражается в появлении при низких температурах структурного перехода в элементарную ячейку с тетрагональной симметрией. которая найдена и для чистых переходных металлов, таких как V и Nb [30-33], и для сверхпроводящих соединений типа А15, таких как V₃Si, Nb₃Sn, Nb₃(Al-Ge) [2, 34, 35]. Еще одной особенностью V₃Si, которая подробнее будет описана ниже, является наличие сильного химического сжатия атомов металлов за счет ковалентных связей с атомами кремния.

Ранее анизотропию магнитной восприимчивости в парамагнитном состоянии неоднократно наблюдали в переходных металлах с гексагональной структурой, в диборидах переходных металлов, а также в ВТСП соединениях [19-21]. Для чистых парамагнитных металлов с кубической симметрией анизотропия магнитной восприимчивости детально не исследована, хотя для парамагнитных элементов четвертого периода, таких как изовалентный ниобий и молибден, найдена заметная анизотропия магнитострикции [36]. Эффекты анизотропии парамагнитной восприимчивости были предметом рассмотрения большого числа теоретических работ, однако авторы [37] отмечают, что полное объяснение возникновения анизотропии не представлено до сих пор.

При учете спин-орбитального и обменного вкладов, как показывают расчеты, можно ожидать анизотропию общей восприимчивости и для веществ с кубической симметрией элементарной ячейки. Был предложен метод разложения восприимчивости по моментам плотности состояний и показано, что для кубических кристаллов при расчете орбитального парамагнитного вклада появляется анизотропия уже в четвертом порядке теории возмущений [38]. Экспериментальные данные о парамагнитной восприимчивости χ чистых переходных металлов и различные вклады за счет существования спинового и орбитального магнитных моментов были рассмотрены в [39]. Для оценки орбитального вклада на основе данных по ядерному магнитному резонансу и парамагнитной восприимчивости, был предложен метод, который был реализован для V₃Si [40, 41]; показано, что орбитальный вклад может составлять до 56%

Отметим далее некоторые другие экспериментальные наблюдения. Они могут быть связаны с анизотропной составляющей парамагнитной восприимчивости в V_3 Si, в котором окружение атомов ванадия, обладает тетрагональной локальной симметрией. Среди них — аналогичная аномалия на температурной зависимости восприимчивости для чистого элементарного ванадия (рис. 1), наблюдаемая при атмосферном давлении.

Есть и различия. Для элементарного ванадия появление плато наблюдается при более высоких температурах, чем в V₃Si; плато на зависимости в V₃Si для ряда образцов [35, 39] преобразуется в четко выраженный экстремум. Эти обстоятельства позволяют предположить, что в рассматриваемом соединении – силициде ванадия – проявляется наследуемая предрасположенность к неустойчивости кристаллической структуры, характерная для чистого ванадия [30-32], для которого наблюдали и метастабильные фазы, в том числе при приложении высокого давления [42]. Для ванадия, кроме уже упомянутой аномалии на температурной зависимости магнитной восприимчивости при понижении температуры, были найдены другие эффекты анизотропии и искажение кристаллической решетки [30, 31].

При повышении давления в элементарном ванадии наблюдали структурные переходы также с понижением симметрии элементарной ячейки; ранее они наблюдались и при добавлении стимулирующих это превращение атомов, внедряемых в кристаллическую решетку. Отметим, что добавление малого числа стимулирующих атомов легкого элемента (водорода или кислорода) сопровождается заметной анизотропией коэффициента теплового расширения (КТР) и заметным искажением кубической ячейки ванадия вблизи 200 К, т.е. в том же температурном интервале, где наблюдается аномалия магнитных свойств ванадия (рис. 1). Анизотропия КТР вблизи температур структурного перехода в V₃Si описана в [9]. При этом степень тетрагонального искажения элементарной ячейки чистого ванадия при температуре 200 К даже несколько выше, чем для V₃Si при температурах ниже 21 К. хотя более слабое искажение кристаллической решетки может наблюдаться для ванадия и при комнатной температуре.

Наиболее важным обстоятельством, на которое следует обратить внимание, является то, что в силициде атомы ванадия подвергаются сильному химическому сжатию. Расстояние между атомами ванадия в силициде ванадия существенно меньше, чем в чистом ванадии, и устойчивость решетки при комнатной температуре определяется также сильными ковалентными связями и между атомами ванадия. Экспериментально наличие таких ковалентных связей в V_3 Si установлено при ана-

лизе распределения зарядовой плотности в этом соединении [27-29].

Влияние химического сжатия на структурные и другие физические характеристики исходных веществ в их соединениях неоднократно рассматривали, например, в [43]. Роль химического сжатия для рассматриваемого силицида также подтверждается существенным повышением температуры сверхпроводящего перехода T_C для чистого ванадия при сильном гидростатическом давлении. Важно, что при 120 ГПа значение T_C для ванадия приближается к 17.2 K, т.е. становится таким же, как и для рассматриваемого V₃Si [44].

Следует также обратить внимание, что в работах по рассеянию поляризованных нейтронов силицидом V₃Si была обнаружена предрасположенность к слабому антиферромагнетизму с магнитным моментом на атом порядка 0.26–0.30 µ_Б [45]. Эта величина сопоставима со значением магнитного момента 0.4 µ_Б для чистого хрома, в котором наблюдается более заметный переход в антиферромагнитное состояние. Для чистого ванадия были проведены аналогичные эксперименты, однако, как отмечали в последующих работах [46], неудачный выбор отражения и очень малая амплитуда рассеяния нейтронов основным изотопом ванадия не смогли обеспечить обнаружение локальных магнитных моментов. В более поздних экспериментах заметный ферромагнетизм был обнаружен для чистого ванадия [47, 48]. Большое число теоретических работ также показали возможность появления в ванадии и антиферромагнитного, и ферромагнитного состояний [49].

В работах [50—52] также отмечается, что для ряда соединений d-металлов, включая ванадий, характерно орбитальное вырождение основного состояния. Показано, что в таких системах может возникать анизотропия намагниченности и искажение элементарной ячейки. Также отмечено, что понижение симметрии, выражающееся в деформации элементарной ячейки силицида V₃Si, может быть аналогом "антиферромагнитного" орбитального упорядочения, которое сопровождается кооперативным эффектом Яна—Теллера [52].

На возможность слабого антиферромагнитного перехода, предваряющего переход в сверхпроводящее состояние в V₃Si, указывает наличие максимума (или плато на различных образцах) на температурной зависимости парамагнитной восприимчивости [2, 3, 6, 7, 35, 39] в диапазоне температур 20–30 К, что не исключает влияния магнитного вклада на сверхпроводящие свойства. Особенно важно, что анализ температурной зависимости восприимчивости для соединения V₃Si, включающий результаты для высоких температур [7], также указывает на возможность определенного вклада Кюри–Вейссовского механизма в общую температурную зависимость χ в этом соединении.

Преобладающий вклад в характеристики электронной структуры естественно дают атомы переходных металлов, обеспечивающие намного более высокую плотность электронных состояний на уровне Ферми. Их локальное окружение в соединениях A15 имеет тетрагональную симметрию, что и определяет склонность к структурным фазовым переходам с понижением симметрии. В то же время наблюдаемое изменение знака анизотропии магнитной восприимчивости через каждые 90° очевидно подчиняется симметрии пространственной группы всей элементарной ячейки.

Аналогичные магнитные аномалии найдены в других сверхпроводящих соединениях A3B с близкими к V₃Si значениями $T_{\rm C}$. Среди них V₃Ga, в котором установлена такая же значительная температурная зависимость магнитной восприимчивости и низкотемпературный мартенситный переход, и V₃Al, в котором была обнаружена сверхпроводимость, но не с ожидаемым более высоким значением $T_{\rm C}$ [53]. Возможной причиной этого обстоятельства были достаточно сильные магнитные взаимодействия. Для этого состава по результатам экспериментов магнитный момент на атомах ванадия оценивается в 1.64 µ_Б с высокой температурой Нееля, $T_{\rm N} = 600$ K.

Теоретические работы последнего времени также описывают параметры антиферромагнитного состояния для V_3 Si и других A3B соединений и оценивают возможности их использования в устройствах спинтроники [15–17].

Химическое сжатие атомов переходного металла в силициде ванадия приводит к повышению плотности электронных состояний на уровне Ферми и повышению доли мягких фононных мод. Это обеспечивает одновременно значительное повышение T_C по сравнению с чистым элементом и высокое значение магнитной восприимчивости, а также склонность к магнитным и другим аномалиям характеристик электронной структуры и динамики решетки [10]. Такая корреляция сверхпроводящих и магнитных характеристик свойственна и многим другим типам химических соединений. обладающих высокими и рекордными характеристиками сверхпроводящего состояния. Дальнейшее изучение природы магнитных аномалий в этих веществах важно, таким образом, с фундаментальной и прикладной точек зрения. Обнаруженная анизотропия магнитной восприимчивости позволит глубже понять природу корреляции аномалий в магнитном поведении соединений A15 с величиной их T_C и с другими особенностям структуры этих соединений, в которых атомы находятся в химически сжатом состоянии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным новым результатом представленной работы следует считать экспериментальное обнаружение анизотропии магнитной восприимчивости силицида V₃Si, вызываемой локальной тетрагональной симметрией окружения атомов переходного металла. Генетическая связь многих характеристик электронной структуры ванадия в его силициде подтверждена также наличием аномалии на температурной зависимости магнитной восприимчивости V₃Si в диапазоне 65-75 К, появление которой аналогично появлению аномалии в чистом ванадии. Обнаруженное аномальное поведение представляется связанным с особенностями электронного строения и динамики решетки при низких температурах. Предполагается, что одним из источников аномального поведения характеристик V₃Si является сильное химическое сжатие атомов ванадия.

Работа выполнена в рамках НИР: 304-19 (ФГУП "ВНИИМС", Москва) и 19\20-2 (ICS&E, Aurora, CO).

Авторы благодарят С.Я. Рахманова, Р.Н. Плетнева за обсуждение, Э.В. Галошину, Ю.Н. Циовкина за предоставление установок для измерения анизотропии восприимчивости, В.Ю. Ирхина за интерес к результатам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Nabialek A., Chabanenko V., Vasiliev S., Shushmakova G., Szymczak H., Kodess B. Two components of the magnetostriction of the crystalline metallic V₃Si superconductor // J. Appl. Phys. 2009. V. 105. P. 063918.
- Кодесс Б.Н. Аномальная температурная зависимость восприимчивости и структурные переходы в соединениях с высокими T_C // ФТТ. 1973. Т. 15. № 4. С.1252–1254.
- 3. *Kodess B.N.* Superconductivite et Stabilite du Reseau Cristalin // Solid State Comm. 1975. V. 16. P. 269–273.
- Третьяков Б.Н., Марченко В.А., Курицын В.Б., Кодесс Б.Н. Ядерный магнитный резонанс V51 в монокристалле V₃Si // ЖЭТФ. 1973. Т. 65. № 4. С. 1551–1556.
- Скрипов А.В., Степанов А.П., Шевченко А.Д., Бэр Г., Юриш М. Ядерный магнитный резонанс 29Si и V₃Si // ФММ. 1986. Т. 61. № 3. С. 536–542.
- Шевченко А.Д., Линник В.П. Особенности температурных зависимостей магнитной восприимчивости V₃Si и ZrV₂ в интервале температур 4.2–1400 К // ФТТ. 1984. Т. 26. № 3. С. 858–860.
- Пан М., Шевченко А.Д., Прохоров В.Г., Марченко В.А. Особенности магнитной восприимчивости V₃Si // Письма в ЖЭТФ. 1977. Т. 25. № 3. С. 141–143.
- Skripov A.V., Stepanov A.P. Electronic Structure of V₃Si and V₃Ge. Comparison of NMR Data with Band-Structure Calculations // Phys. Stat. Sol.(b). 1984. V. 126(2). P. 557–563.

375

- Кодесс Б. Н. Таблицы стандартных справочных данных. ГСССД 347–2018. Силицид ванадия // 2018. М.: ВНИИМС. 51 с.
- Kodess B.N. Rachmanov S.Ya. The Electron Debye-Waller factor for X-ray Scattering // Solid Stat. Comm. 1993. V. 87. № 7. P. 631–633.
- Кодесс Б.Н. Аномальное изменение интенсивности Брэгговских отражений V₃Si // ФТТ. 1974. Т. 16. № 4. С. 1216–1218.
- Alloul H., Wzietek, P., Mito T., Pontiroli D., Aramini M., Riccò M., Elkaim E. Mott Transition in the A15 Phase of Cs₃C₆₀: Absence of a Pseudogap and Charge Order // Phys. Rev. Letters. 2017. V. 118. № 23. P. 237601 (5 p.).
- Belozerov A.S., Katanin, A.A., Irkhin V.Y., Anisimov V.I. Magnetic fluctuations and superconducting pairing in ε-iron // Phys. Rev. B. 2020. V. 101. № 5. P. 155126 (9 p.).
- Ofer R., Bazalitsky G., Kanigel A., Keren A., Auerbach A., Lord J.S., Amato A. Magnetic analog of the isotope effect in cuprates // Phys. Rev. B. 2006. V. 74. N
 № 22. P. 220508 (5 p.).
- Derunova E., Sun Y., Felser C., Parkin S.S.P., Yan B., Ali M.N. Giant intrinsic spin Hall effect in W₃Ta and other A15 superconductors // Sci. Adv. 2019. V. 5. № 4. P. eaav8575.
- He B., Bao Z., Zhu K., Feng W., Sun H., Pang N., Tsogbadrakh N, Odkhuu D. Itinerant Semiconducting Antiferromagnetism in Metastable V₃Ga // Phys. St. Solidi, Rapid Res. Letters. (RRL) 2019. V. 13. № 12. P. 1900483 (7 p.).
- Jamer M.E., Badih A., Assaf G.E., Sterbinsky D.A., Arena L., Henderson L., Guillaume R., Don Heiman A., Andres S. Antiferromagnetic Phase of the Gapless Semiconductor V₃Al // Phys. Rev. B. 2015. T. 91. № 9. P. 094409.
- Jamer M. E., Wilfong B., Buchelnikov V. D., Sokolovskiy V. V., Miroshkina O. N., Zagrebin M. A., Baigutlin D.R., Naphy J., Assaf F., Lewis L.H., Pulkkinen A., Barbiellini B., Bansil A., Heiman D. Superconducting and Antiferromagnetic Properties of Dual-Phase V₃Ga // arXiv preprint arXiv: 2020. № 2005. P. 14348. (11 p.).
- Галошина Э.В. Магнитная восприимчивость переходных d-металлов, не обладающих магнитным порядком // УФН. 1974. Т. 113. № 5. С. 105–128.
- Федорченко А.В., Гречнев Г.Е., Панфилов А.С., Логоша А.В., Свечкарев И.В., Филиппов В.Б., Евдокимова А.В. Анизотропия магнитных свойств и электронная структура диборидов переходных металлов // ФНТ. 2009. Т. 35. С. 1106–1111.
- Розенфельд Е.В., Ирхин Ю.П., Финкельштейн Л.Д. Анизотропия парамагнитной восприимчивости и электронная структура ВТСП // Физика твердого теа. 1993. № 10. С. 2769–2776.
- Копецкий В.И., Марченко В.А. Форма фронта кристаллизации при бестигельной зонной плавке // 1971. Приборы и техника эксперимента. 1971. Т. 14. № 5. С. 1536–1540.
- Волькенштейн Н.В., Галошина Э.В., Паниковская Т.Н. Температурная зависимость анизотропии магнитной восприимчивости монокристаллов переходных металлов с гексагональной плотно упакованной структурой // ЖЭТФ. 1974. Т.67. № 4(11). С. 1468–1473.

- Suzuki H., Miyahara S. Magnetic Susceptibilities of V, Zr, and Nb // J. Phys. Soc. Japan. 1965. V. 20. № 11. P. 2102–2103.
- 25. Burger J.P., Taylor M.A. Anomalies in the Manetic Susceptibility and Electrical Resistivity of Vanadium // Phys. Rev. Let. 1961. V. 6. № 4. P. 185–187.
- 26. *Кодесс Б.Н., Сарин В.А.* Нейтронный дифрактометр для определения структурных характеристик монокристаллов // Измерительная техника. 2014. № 11. С. 51–54.
- Butman L.A., Kodess B.N. Anomalous variation of thermal movement anisotropy in high T_C A15 compounds at lowering of temperature // Solid State Comm. 1993. V. 87. № 8. P. 685–687.
- Kodess B.N., Massalimov I.A. Effective charges of the valence shells on atoms of A15 chemical compounds // Solid State Comm. 1983. V. 47. № 7. P. 545–547.
- 29. Kodess B.N., Sambueva S.R., Massalimov I.A. Population of atomic orbitals in silicide vanadium // Acta Crystallograph. Ser. A. Foundation and Advances. 2008. V. A64. C. 569.
- Финкель В.А., Гламазда В.И., Ковтун Г.П. Фазовый переход в ванадии // ЖЭТФ. 1969. Т. 57. С. 1065.
- Suzuki H., Miyahara S. The Crystal Distortion of Vanadium // J. Phys. Soc. Japan. 1966. V. 21. № 12. P. 2735–2735.
- 32. *Tian Y., Jona F., Marcus P.M.* Metastable phase of vanadium // Phys. Rev. B. 1998. V. 58. № 20. P. 14051.
- 33. Ding Y., Ahuja R., Shu J., Chow P., Luo W., Mao H.K. Structural phase transition of vanadium at 69 GPa // Physical Rev. Let.. 2007. V. 98. № 8. 085502 (4 p.).
- 34. Kodess B.N., Kuritsin V.B., Tret'yakov B.N. Low-temperature Phase transformation in Nb₃(Ge–Al) alloy. // Physics Letters. 1971. V. 37A. № 5. P. 415–416. https://doi.org/10.1016/0375-9601(71)90611-6
- Кодесс Б.Н. Нестабильность кристаллической решетки и магнитная восприимчивость соединений Nb₃(Al–Ge) с высокими T_C // Укр. физ. журн. 1974. Т. 19. № 9. С. 1570–1572.
- 36. *Tam T.L., Steinitz M.O., Fawcett E.* Anisotropy of the magnetostriction of V, Mo and W // J. Physics F: Metal Physics. 1972. V. 2. № 6. P. L129–L131.
- 37. Ирхин В.Ю., Ирхин Ю.П. Электронная структура, физические свойства и корреляционные эффекты в d-и f-металлах и их соединениях // 2004. Екатеринбург: УрО РАН. 472 с.
- Ducastelle F, Cyrot-Lackmann F. Paramagnétisme orbital et anisotropie magnétique des métaux de transition // J. Phys. Colloques. 1971. V. 32. № C1. P. 536–538.
- Clogston A.M., Jaccarino V. Susceptibilities and negative Knight shifts of intermetallic compounds // Phys. Rev. 1961. V. 121. № 5. P. 1357–1362.
- 40. Осипова С.Г., Пожарская Г.И., Прядеин В.И., Штольц А.К., Степанов А.П., Прекул А.Ф., Гельд П.В. Магнитные свойства твердых растворов V₃(Si_{1-x}Ge_x) // ФММ. 1973. Т. 35. № 5. С. 968–972.
- Скрипов А.В. Степанов, А.П., Шевченко А.Д., Бэр Г., Юриш М. Ядерный магнитный резонанс 29Si в V₃Si // ФММ. 1986. Т. 61. № 3. С. 536–542.

ФИЗИКА МЕТАЛЛОВ И МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ том 122 № 4 2021

- 42. *Qiu S.L., Marcus P.M.* Phases of vanadium under pressure investigated from first principles // J. Physics: Condensed Matter. 2008. V. 20. № 27. P. 275218 (6 p.).
- 43. Engelkemier J., Fredrickson D.C. Chemical Pressure Schemes for the Prediction of Soft Phonon Modes: A Chemist's Guide to the Vibrations of Solid State Materials // Chem. Mater. 2016. V. 28. № 9. P. 3171–3183.
- 44. Ishizuka M., Iketani M., Endo S. Pressure effect on superconductivity of vanadium at megabar pressures // Phys. Rev. B. 2000. V. 61. № 6. P. R3823–3825.
- 45. Koehler W.C., Wollan E.O. Search for Antiferromagnetism in the Silicides V₃Si, Cr₃Si, and Mo₃Si // Phys. Rev. 1954. V. 95. № 1. P. 280–281.
- 46. Brown P.J., Forsyth J.B. A polarised neutron diffraction study of the field-induced magnetisation density in vanadium metal // J. Physics F: Metal Physics. 1984. V. 14. № 7. P. 1715.
- 47. Akoh H., Tasaki A. Appearance of magnetic moments in hyperfine particles of vanadium metal // J. Phys. Soc. Japan. 1977. V. 42. № 3. P. 791–795.

- Rau C., Liu C., Schmalzbauer, A., Xing G. Ferromagnetic order at (100) p (1 × 1) surfaces of bulk paramagnetic vanadium // Phys. Rev. Let. 1986. V. 57. № 18. P. 2311–2313.
- 49. *Hamad B.A.* Magnetic ordering of V/Mo (001) systems: Ab-initio calculations // Surface Science. 2007. V. 601. № 21. P. 4944–4952.
- 50. Brown P.J., Neumann K.U., Ziebeck K.R. A polarized neutron investigation of the martensitic phase transition in V₃Si: evidence for a band Jahn-Teller mechanism // J. Phys: Cond. Mat. 2001. V. 13 № 5. P. 1111–1118.
- Huang X., Lu S.J., Liang X., Su Y., Sai L., Zhang Z.G., Zheng W. Structures and Electronic Properties of V₃Si n - (n = 3-14) Clusters: A Combined Ab Initio and Experimental Study // J. Physical Chemistry. C. 2015. V. 119. № 20. P. 10987–10994.
- Kataoka M. Band Jahn–Teller effect in A15 compounds // J. Magn. Magn. Materials. 1983. V. 31. P. 503–504.
- Kodess B.N. Superconductivity of Some New beta-W Compounds. (A15 Compounds) // Phys. Stat. Solidi(a) 1971. V. 4. P. 109–112.