

Спектроскопия электрон-фононного взаимодействия в слоистом двумерном дихалькогениде $1T-VSe_2$

Г. В. Камарчук, А. В. Хоткевич, В. М. Багацкий

*Физико-технический институт низких температур им. Б. И. Веркина НАН Украины
пр. Ленина, 47, 61164, г. Харьков, Украина
E-mail: kamarchuk@ilt.kharkov.ua*

P. Molinie, A. Leblanc, and E. Faulques

Institute des Materiaux Jean Rouxel, 2 rue de la Houssiniere, BP32229, F-44322 Nantes, France

Статья поступила в редакцию 11 июля 2000 г.

Методами микроконтактной и рамановской спектроскопии исследованы колебательные спектры слоистого двумерного дихалькогенида переходного металла $1T-VSe_2$. Полученные микроконтактные спектры и спектры комбинационного рассеяния содержат особенности, совпадающие по положению и относительной интенсивности. Изучены различные режимы (баллистический, диффузионный и тепловой) протекания тока в микроконтактах $1T-VSe_2/Cu$. Зарегистрированы как прямые микроконтактные спектры, демонстрирующие эффект электрон-фононного взаимодействия в $1T-VSe_2$, так и инверсные спектры, отражающие разрушение локализации электронных состояний в околослоистой области, что приводит к росту проводимости контакта. Исследование микроконтактов в режиме малых энергетических и импульсных длин пробега электронов позволило наблюдать нелинейности, обусловленные фазовым переходом материала в состояние с волной зарядовой плотности. Восстановлена до сих пор неизвестная для данного соединения микроконтактная функция электрон-фононного взаимодействия и вычислены значения средней и среднеквадратичной частот фононов в $1T-VSe_2$. Получена оценка температуры Дебая.

За допомогою методів мікроконтактно́ї та раманівської спектроскопії досліджено коливальні спектри шаруватого двомірного дихалькогеніда перехідного металу $1T-VSe_2$. Отримані мікроконтактні спектри та спектри комбінаційного розсіювання мають особливості, які добре співпадають по розташуванню та відносній інтенсивності. Вивчено різноманітні режими (балістичний, дифузійний та тепловий) течії струму у мікроконтактах $1T-VSe_2/Cu$. Зареєстровані як прямі мікроконтактні спектри, які демонструють ефект електрон-фононної взаємодії у $1T-VSe_2$, так і інверсні спектри, які відповідають руйнуванню локалізації електронних станів у навколослоистій області, що призводить до росту провідності контакту. Дослідження мікроконтактів у режимах малих енергетичних та імпульсних довжин пробігу електронів дозволило спостерігати нелінійності, обумовлені фазовим переходом матеріалу у стан з хвилею зарядової густини. Відтворено невідому до цього часу для даної сполуки мікроконтактну функцію електрон-фононної взаємодії та розраховані значення середньої та середньоквадратичної частот фононів у $1T-VSe_2$. Отримано оцінку температури Дебая.

PACS: 71.45.Lr, 63.20.Kr, 85.30.Ni

Введение

Создание новых материалов, обладающих набором оптимальных для технических приложений свойств, в настоящее время является одним из актуальных направлений физики твердого тела. Это предопределяет необходимость подробного исследования характеристик как вновь созданных

соединений, так и веществ, используемых для их синтеза. Недавно было сообщено [1] о создании нового класса сверхпроводников и ферромагнетиков на основе металлических дихалькогенидов и сверхпроводников семейства A15. Одним из соединений этого класса является GaV_5Se_9 , полученный растворением V_3Ga в $1T-VSe_2$ и проявляющий ферромагнитные и металлические

свойства. Прежде чем приступить к изучению магнитных и спектральных свойств этого соединения, мы провели подробное спектральное исследование дихалькогенида ванадия $1T\text{-VSe}_2$ методом микроконтактной и рамановской спектроскопии, результаты которого представлены в настоящей работе.

Соединение $1T\text{-VSe}_2$ принадлежит к числу квазидвумерных слоистых структур. Его кристаллы состоят из набора плоских структурных образований-сэндвичей, уложенных друг на друга. Каждый из таких элементов образуется из трех слоев, верхний и нижний из которых формируются атомами селена, а средний представляет собой прослойку из атомов ванадия. В итоге они как бы образуют сэндвич типа Se-V-Se . Слои металла и халькогена в $1T\text{-VSe}_2$ смещены относительно друг друга таким образом, что внутри сэндвича атомы ванадия находятся в октаэдрическом окружении атомов селена [2]. Расстояние между слоями халькогена и металла почти в два раза меньше, чем расстояние между сэндвичами. Это наряду с сильными ковалентными связями внутри сэндвичей, слабыми ван-дер-ваальсовыми силами, действующими между ними, и малым перекрытием электронных волновых функций металлических слоев обуславливает квазидвумерность и анизотропию физических свойств $1T\text{-VSe}_2$.

При понижении температуры в VSe_2 , как и в других дихалькогенидах переходных металлов, возникает фазовый переход в состояние с волной зарядовой плотности (ВЗП), сопровождающийся образованием кристаллической сверхструктуры с периодом, несоизмеримым с периодом исходной решетки. Температура перехода равна 112 К [3]. Дальнейшее понижение температуры приводит к изменению периода сверхструктуры, который при 62 К становится соизмеримым с параметрами основной решетки. Кристаллы VSe_2 имеют металлический тип температурной зависимости электросопротивления и обладают парамагнитными свойствами (см., например, [4–6]).

Хотя VSe_2 относится к числу достаточно давно и интенсивно исследовавшихся соединений, информация о спектрах квазичастиц в этом соединении несколько односторонняя. В частности, к настоящему времени выполнено довольно большое число исследований по изучению электронного строения этого материала. В результате хорошо определена электронная зонная структура и поверхность Ферми (см., например, [7–11]). В то же время фононная подсистема и ее свойства исследовались недостаточно. Нам не удалось найти литературные данные по дисперсионным

кривым фононов, плотности фононных состояний, функции электрон-фононного взаимодействия (ЭФВ), температуре Дебая и т.п., которые принадлежат к числу важнейших параметров, влияющих на электрофизические свойства. Это, в принципе, неудивительно, поскольку VSe_2 относится к числу материалов весьма сложных для исследований методами, традиционно используемыми для получения указанных выше характеристик. Например, оптические измерения в данном соединении затруднены из-за низкой величины полезного сигнала ввиду высокой отражательной способности; в частности, интенсивность комбинационного рассеяния света в нем мала, по крайней мере на порядок меньше, чем в $2H\text{-TaSe}_2$ [12]. Исходя из вышесказанного, целью настоящей работы было исследование фононной подсистемы и взаимодействия квазичастичных возбуждений с носителями тока в $1T\text{-VSe}_2$.

Для решения поставленной задачи использована микроконтактная спектроскопия, принимая во внимание ее предпочтительность в тех случаях, когда аналогичные исследования другими методами затруднены. В результате нам удалось определить функцию ЭФВ и ряд других характеристик колебательного спектра VSe_2 . Наряду с микроконтактными были проведены прецизионные измерения по рамановскому рассеянию света. Полученные зависимости хорошо коррелируют друг с другом и демонстрируют воспроизводимость наблюдаемых особенностей.

Результаты и их обсуждение

Рамановские спектры возбуждались на частоте $\hbar\omega = 2,41$ эВ линии аргонового лазера и собирались в микроскоп с 50-и кратным усилением с помощью тройного монохроматора, оборудованного детектором, охлаждавшимся жидким азотом. Микроконтактные исследования были выполнены на гетероконтактах $1T\text{-VSe}_2/\text{Cu}$ на оригинальном микроконтактном спектрометре, разработанном авторами во ФТИНТ НАН Украины. Контакты создавались с использованием устройств и методики, хорошо зарекомендовавших себя при исследовании органических проводников, имеющих, так же как и VSe_2 , пластинчатую слоистую структуру [13]. Сдвиговая методика [14] получения контакта между медным электродом в виде призмы и боковой поверхностью пластинки $1T\text{-VSe}_2$ обеспечивала преимущественное создание контактов с осью, ориентированной параллельно слоям кристалла дихалькогенида. Такие контакты позволяли проводить исследование свойств кристаллов в режиме протекания тока в

плоскости сэндвичей. Это важно, поскольку электрические характеристики дихалькогенидов переходных металлов сильно анизотропны в направлениях вдоль и перпендикулярно слоям.

Известно, что ванадий весьма сложный для микроконтактных исследований материал, поскольку обладает высокой химической активностью и образует на поверхности ряд проводящих оксидов, что может приводить к шунтированию полученных контактов по оксидным проводящим пленкам [15]. Химическая очистка поверхности ванадия от таких образований затруднена. Микроконтактные исследования селена не проводились, и особенности получения микроконтактов в этом материале нам неизвестны. При работе с VSe_2 следовало учесть также тот факт, что в случае химической обработки нельзя исключить возможность избирательного травления атомов этого соединения с изменением состава поверхностного слоя обрабатываемого кристалла. Поэтому мы были вынуждены отказаться от химической обработки исследуемых кристаллов $1T-VSe_2$, а контакты получали касанием медного электрода либо с необработанной поверхностью, либо в месте свежего скола кристалла, производившегося в жидком гелии. Именно в последнем случае чаще всего удавалось создавать микроконтакты, позволяющие реализовать спектральные режимы протекания тока и регистрировать спектры максимальной интенсивности и качества. Обработка медного электрода проводилась химической полировкой в HNO_3 .

При исследовании микроконтактов основным источником спектральной информации является вольт-амперная характеристика (ВАХ), содержащая нелинейности, возникающие в результате рассеяния электронов на фононах и других квазичастичных возбуждениях при протекании тока через контакт [16,17]. При дифференцировании эти нелинейности преобразуются в максимумы на второй производной ВАХ, которые соответствуют максимумам функций плотности фоновых состояний и электрон-фононного взаимодействия в изучаемом материале. Регистрация ВАХ и вторых производных ВАХ осуществлялась при напряжениях 0–120 мВ. При более высоких смещениях наблюдалась нестабильность электрического сопротивления контактов или их разрушение, связанные, очевидно, с эффектами нагрева материала в околосконтактной области. Исследование характеристик микроконтактов проводилось при температуре 4,2 К. Были исследованы более 50 контактов. Среди них 32 соответствовали спек-

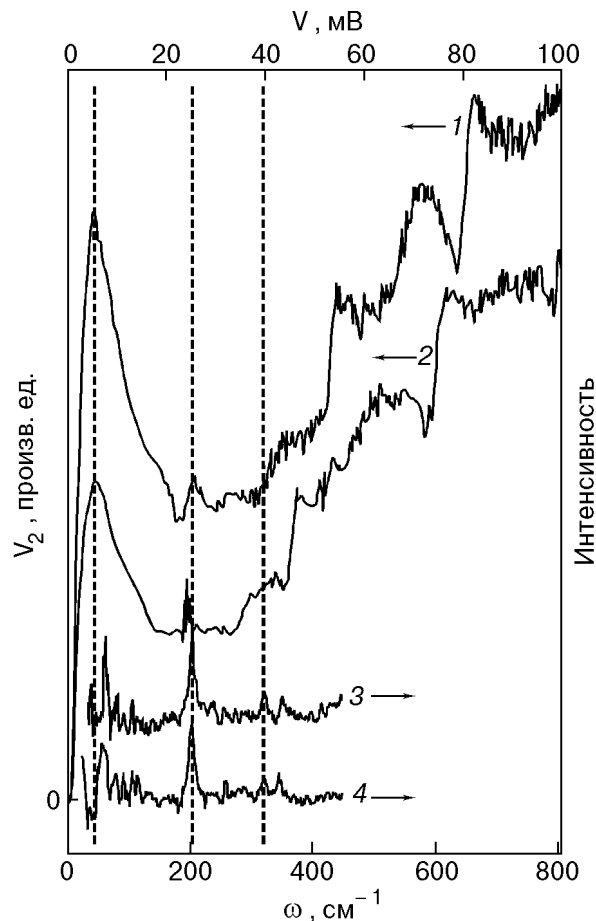


Рис. 1. Колебательные спектры соединения $1T-VSe_2$: 1, 2 – вторые производные ВАХ контактов $1T-VSe_2/Cu$, $R_0 = 84$ Ом (1), $R_0 = 78$ Ом (2), $T = 4,2$ К; 3, 4 – рамановские спектры при $T = 180$ К (3) и $T = 10$ К (4).

ральным режимам протекания тока и имели спектры хорошего качества.

В зависимости от чистоты и структурного совершенства материала, образующего контакт, и соответственно режима протекания тока в области касания электродов при приложении к ним разности потенциалов, наблюдались вторые производные ВАХ (микроконтактные спектры) различных типов. В случае реализации баллистического или диффузионного режимов протекания тока наблюдались микроконтактные спектры с четко выраженной структурой, которая хорошо воспроизводилась на вторых производных ВАХ различных контактов. На рис. 1 (кривые 1 и 2) приведены типичные вторые производные ВАХ для группы наиболее интенсивных спектров ЭФВ.

Как известно [18], микроконтактный спектр гетероконтакта представляет собой сумму парциальных вкладов спектров материалов контактирующих электродов. В случае гетероконтактов $1T-VSe_2/Cu$ вклад меди в микроконтактный

спектр никак не проявляется. Такой результат качественно согласуется с данными для контактов дихалькогенида ниобия $2H-NbSe_2/Cu$ [19] и результатами работ [20,21], полученными для гетероконтактов Nb, Ta, которые являются электронными аналогами V по подгруппе VA.

Как видно из представленных графиков вторых производных ВАХ (рис. 1), соединение $1T-VSe_2$ имеет довольно широкий спектр ЭФВ, граница которого располагается при 88–90 мэВ. Этот результат можно качественно сопоставить с данными, полученными при измерении микроконтактных спектров в чистом ванадии [15,16]. Согласно [16], наиболее высокочастотные фононы в микроконтактных спектрах ванадия соответствуют энергиям порядка 60 мэВ. Таким образом, в ряду $V-VSe_2$ происходит достаточно большое увеличение максимальной фононной частоты ω_{max} . Принимая во внимание, что в аналогичном соединении ниобия граница спектра ЭФВ сместилась в сторону высоких энергий примерно на 30 мэВ при переходе от чистого ниобия к дихалькогениду $NbSe_2$ (см., например, [16,19]), полученная величина ω_{max} для VSe_2 представляется вполне разумной.

Наиболее интенсивный максимум в микроконтактных спектрах ЭФВ расположен в низкочастотной области при энергиях 5–7 мэВ. Его положение хорошо согласуется с данными по рамановскому рассеянию света в $1T-VSe_2$ (рис. 1, кривые 3 и 4), полученными в интервале температур 10–180 К. Наблюдается также корреляция по положению особенностей при энергиях 26 и 40 мэВ, что видно при сравнении кривых на рис. 1. Как следует из данных работ [12,19], которые согласуются с нашими результатами, при понижении температуры и переходе $1T-VSe_2$ в состояние с ВЗП и сверхструктурой, соизмеримой с параметрами исходной кристаллической решетки, происходит смягчение фононного спектра рассматриваемого соединения и увеличение интенсивности низкочастотных колебательных мод. В дополнение к этому в микроконтактных спектрах происходит сдвиг «центра тяжести» и усиление низкоэнергетичных максимумов, обусловленное уменьшением относительной интенсивности высокочастотных особенностей ввиду влияния микроконтактного формфактора. Данный формфактор подчеркивает рассеяние на большие углы и возрастание роли процессов переброса при рассеянии электронов назад, что особенно наглядно проявляется в металлах со сложной поверхностью Ферми [22,23]. Поэтому особенности ЭФВ при больших энергиях в микроконтактных спектрах

$1T-VSe_2$ имеют существенно меньшую относительную интенсивность по сравнению с низкочастотными, чем это наблюдается в оптических экспериментах (сравните, например, максимумы при частотах 48 и 203 cm^{-1} на кривых 3, 4 рис. 1 и в работе [12] с соответствующими особенностями на микроконтактных кривых).

При рассмотрении литературных данных по электропроводности $1T-VSe_2$ с точки зрения микроконтактных исследований несложно предположить, что в контактах этого соединения возможна реализация токового режима с разрушением локализации электронных состояний, характерного для контактов полуметаллов. Это обусловлено близостью параметров электропроводности для данных объектов. В частности, проводимость соединения $1T-VSe_2$ при низких температурах даже меньше, чем в сурьме. При $T = 20$ К удельное сопротивление $1T-VSe_2$ $\rho \sim 10^{-4}$ Ом·см [6], что на два порядка больше, чем для сурьмы [24]. Таким образом, имеются явные предпосылки для наблюдения в контактах $1T-VSe_2$ указанного токового режима, который исследовался ранее в сурьме [25] и органических проводниках [26]. Суть явления делокализации заключается в следующем. В микроконтактах полуметаллов в случае малых импульсных длин свободного пробега электронов возникает локализация электронных состояний в области сужения [27]. В этом случае электрон-фононное взаимодействие, разрушая локализацию электронов, приводит к увеличению проводимости контакта. Вследствие этого сопротивление контакта уменьшается, в противоположность его увеличению в контактах чистых металлов при баллистическом режиме пролета электронов с большими импульсными длинами свободного пробега l_i , удовлетворяющими условию $l_i \gg d$ (d — диаметр контакта). В результате на вторых производных ВАХ таких контактов в области характерных энергий ЭФВ будут наблюдаться минимумы в противоположность максимумам, наблюдающимся при возрастании сопротивления контакта. Наглядным примером является инверсный микроконтактный спектр гетероконтакта $1T-VSe_2/Cu$, приведенный на рис. 2 (кривая 1). Видно, что эта кривая является зеркальным отображением зависимостей 1 и 2 на рис. 1. Накопление фононов в области сужения при увеличении напряжения также может приводить к уменьшению длины пробега в области контакта. При этом режим пролета электронов через контакт меняется от баллистического к диффузионному, при котором значительную роль играют эффекты слабой локализации. Это отражается на

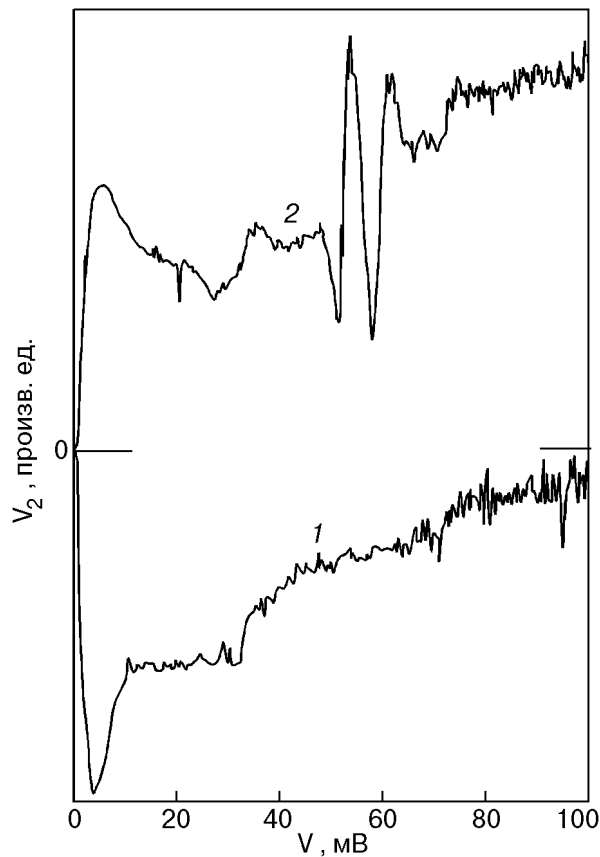


Рис. 2. Микроконтактные спектры контактов $1T\text{-VSe}_2/\text{Cu}$, соответствующие различным режимам протекания тока: инверсный спектр, $R_0 = 163 \text{ Ом}$ (1); вторая производная ВАХ, содержащая нелинейности, обусловленные структурным фазовым переходом, $R_0 = 82 \text{ Ом}$ (2).

поведении особенностей на микроконтактном спектре: появляются микроконтактные спектры промежуточного типа (с инверсными особенностями при высоких напряжениях). Примером такой характеристики служит кривая 2 на рис. 1, максимумы и минимумы которой являются зеркальным отображением соответствующих нелинейностей на кривой 1 (рис. 1) при напряжениях более 60 мВ.

На ряде микроконтактных спектров в области достаточно высоких энергий наблюдались нелинейности типа производной от максимума, которые трудно интерпретировать как результат ЭФВ. Подобные особенности обнаружены ранее в спектрах сверхпроводящих контактов [28] и контактов магнитных материалов [29,30]. В работах [28–30] появление таких резких нелинейностей связывалось с разрушением сверхпроводящего или магнитного упорядочения, а именно, с фазовым переходом материала контакта из сверхпроводящего в нормальное или из ферромагнитного (антиферромагнитного) в парамагнитное состояние при нагревании околосконтактной об-

ласти транспортным током до соответствующих температур и с ориентационным фазовым переходом волны спиновой плотности [30]. В соединении $1T\text{-VSe}_2$ при $T = 62 \text{ К}$ изменяется период сверхструктуры, что проявляется в виде изменения угла наклона температурной зависимости удельного сопротивления ρ [5,6]. Поэтому нагрев области контакта $1T\text{-VSe}_2$ до 62 К также приведет к структурному переходу в околосконтактной области, что непосредственно должно проявиться в виде максимума на температурной зависимости дифференциального сопротивления контакта или нелинейности типа производной от максимума на второй производной ВАХ. По данным [3], изменение периода сверхструктуры от соизмеримого к несоизмеримому с периодом исходной решетки происходит при изменении температуры в интервале 62–112 К. Разрешение метода измерения температурной зависимости удельного сопротивления массивных образцов позволяет зарегистрировать возникающую при этом нелинейность лишь в виде плавного изменения зависимости $\rho(T)$ в данном температурном интервале [5,6]. В то же время микроконтактный метод позволяет гораздо более явно выявить самые малые изменения сопротивления материала при изменении внешних условий благодаря технике дифференцирования ВАХ в режиме тепловой модуляционной спектроскопии [29]. Нагревая область контакта транспортным током, можно тем самым изменять температуру околосконтактной области варьированием приложенного к контакту напряжения. Таким образом, если мы достигаем в контакте температуры 62 К, то при увеличении приложенного напряжения и соответственно температуры в околосконтактной области можно наблюдать сингулярности, связанные с изменениями структуры и сопротивления материала в температурном интервале 62–112 К. При более высоких напряжениях и соответственно температурах выше 112 К наблюдается плавный участок зависимости $\rho(T)$ и должно происходить монотонное изменение второй производной ВАХ контакта. Если предположить, что особенности типа производной от максимума возникают на микроконтактных спектрах контактов $1T\text{-VSe}_2/\text{Cu}$ при напряжениях, отвечающих условиям теплового предела, то в соответствии с соотношением для теплового предела, определяющим изменение температуры в контакте в зависимости от приложенного напряжения $eV = 3,63 kT$ [29], область температур 62–112 К соответствует интервалу напряжений $\cong 16 \text{ мВ}$. Именно в этом интервале должны наблюдаться резкие нелинейности второй

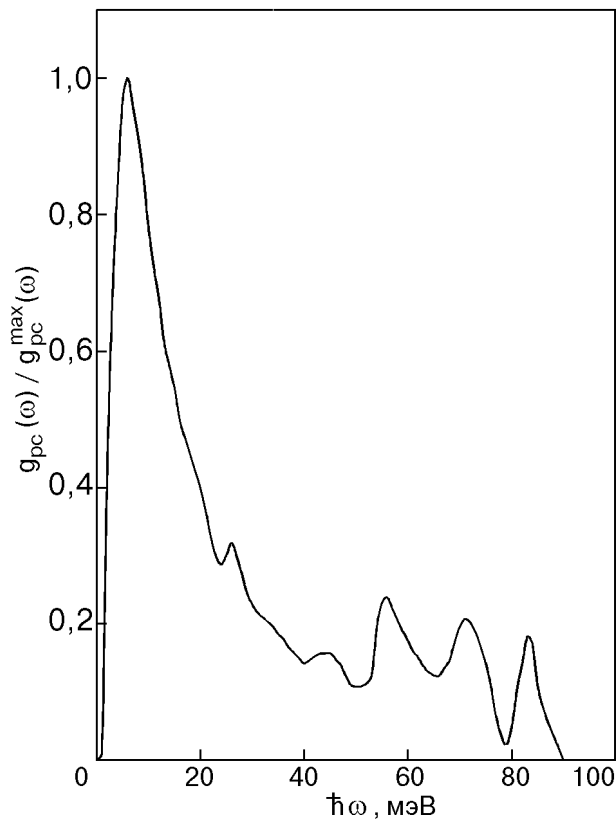


Рис. 3. Микроконтактная функция ЭФВ $g_{pc}(\omega)$, восстановленная из кривой 1 на рис. 1.

производной ВАХ контакта, что и демонстрирует кривая 2 на рис. 2: рассматриваемые особенности возникают при ≈ 50 мэВ и оканчиваются при ≈ 65 мэВ, при более высоких энергиях нелинейности на второй производной ВАХ не наблюдаются. Следует отметить, что начало появления рассматриваемых нелинейностей на микроконтактных спектрах различных контактов может варьироваться (что, естественно, ввиду различных начальных условий при $V = 0$), но интервал их существования на всех подобных кривых остается примерно одним и тем же.

Микроконтактные спектры гетероконтактов $1T-VSe_2$ были использованы для расчета микроконтактной функции ЭФВ $g_{pc}(\omega)$. На рис. 3 приведен график $g_{pc}(\omega)$, полученный из зависимости 1 на рис. 1. Расчет проводился с помощью пакета программ [31] с использованием линейной функции микроконтактного фона [16]. Значение параметра ЭФВ λ_{pc} для кривой 1 равно 0,27. Поскольку нельзя безошибочно утверждать, что токовый режим в исследованных гетероконтактах является с определенностью баллистическим, это значение λ_{pc} следует рассматривать как оценку снизу для параметра ЭФВ в VSe_2 . Величины средней $\langle \omega \rangle$ и среднеквадратичной $\langle \omega^2 \rangle^{1/2}$ частот фононов составляют 10,14 и 15,99 мэВ. Воспользовавшись

полученными данными, можно определить Дебаевскую частоту фононов и температуру Дебая θ_D в соединении $1T-VSe_2$ из соотношения, предложенного в [32]:

$$\theta_D = \frac{\hbar}{k} \left(\frac{3\langle \omega^2 \rangle}{2} \right)^{1/2}$$

Температура Дебая, рассчитанная с использованием данных для микроконтактных спектров 1, 2 на рис. 1 и 1 на рис. 2, составляет 215 К, 228 К и 220 К соответственно. Усредненное по 5 спектрам значение равно (220 ± 5) К. Следует отметить, что значения θ_D , полученные из микроконтактных спектров различных металлов, как правило, несколько меньше данных, полученных из температурных измерений электронной теплоемкости [33]. Это обусловлено уменьшением относительной интенсивности особенностей высокочастотной области микроконтактной функции ЭФВ $g_{pc}(\omega)$ по сравнению с функцией плотности фононных состояний ввиду влияния микроконтактного формфактора.

Таким образом, полученные результаты содержат новую информацию об электрофизических свойствах дихалькогенида $1T-VSe_2$, что позволило определить ряд параметров ЭФВ и температуру Дебая, неизвестные ранее.

Авторы выражают благодарность А. В. Еременко и А. Р. Казачкову за сотрудничество и полезные дискуссии, Ю. А. Колесниченко за обсуждение результатов и В. В. Хоткевичу за помощь в расчетах функции ЭФВ.

Работа поддержана грантом NATO CRG-CRGP 972846.

1. P. Molinie, A. Leblanc, E. Faulques, Z. Ouili, J.-C. Jumas, and C. Ayache, in: *Spectroscopy of Superconducting Materials*, E. Faulques (ed.) ACS Symp. Ser. 730, ch. 2, p. 21, American Chemical Society, Oxford University Press, Washington, D.C. (1999).
2. Л. Н. Булаевский, *УФН* **116**, 449 (1975).
3. R. H. Friend, D. Jerome, D. M. Schleich, and P. Molinie, *Solid State Commun.* **27**, 169 (1978).
4. C. F. van Bruggen, C. Haas, and G. A. Wieggers, *J. Sol. State Chem.* **27**, 9 (1979).
5. A. H. Thompson and B. G. Silbernagel, *Phys. Rev.* **B19**, 3420 (1979).
6. H. Mutka and P. Molinie, *J. Phys.* **C15**, 6305 (1982).
7. J. A. Wilson and A. D. Yoffe, *Adv. Phys.* **18**, 193 (1969).
8. A. Zunger and A. J. Freeman, *Phys. Rev.* **B19**, 6001 (1979).
9. H. P. Hughes, C. Webb, and P. M. Williams, *J. Phys.* **C13**, 1125 (1980).
10. R. Claessen, I. Schafer, and M. Skibovski, *J. Phys Condens. Matt.* **2**, 10045 (1990).
11. H. E. Brauer, H. I. Starnberg, L. J. Holleboom, V. N. Stokov, and H. P. Hughes, *Phys. Rev.* **B58**, 10031 (1998).

12. S. Sugai, K. Murase, S. Uchida, and S. Tanaka, *J. Phys. (Paris)* **42**, C6–740 (1981).
13. G. V. Kamarchuk, A. V. Khotkevich, V. M. Bagatsky, and A. V. Kravchenko, in: *Spectroscopy of Superconducting Materials*, E. Faulques (ed.), ACS Symp. Ser. 730, ch. 14, p. 196, American Chemical Society, Oxford University Press, Washington, D.C. (1999).
14. П. Н. Чубов, И. К. Янсон, А. И. Акименко, *ФНТ* **8**, 64 (1982).
15. Л. Ф. Рыбальченко, И. К. Янсон, В. В. Фисун, *ФТТ* **22**, 2028 (1980).
16. A. V. Khotkevich and I. K. Yanson, *Atlas of Point Contact Spectra of Electron-Phonon Interaction in Metals*, Kluwer Academic Publishers, Boston–Dordrecht–London (1995).
17. Ю. А. Колесниченко, И. Г. Тулузов, А. В. Хоткевич, *ФНТ* **19**, 402 (1993).
18. Р. И. Шехтер, И. О. Кулик, *ФНТ* **9**, 46 (1983).
19. Р. Л. Бобров, Л. Ф. Рыбальченко, М. А. Оболенский, В. В. Фисун, *ФНТ* **11**, 925 (1985).
20. И. К. Янсон, Р. Л. Бобров, Л. Ф. Рыбальченко, В. В. Фисун, *ФНТ* **9**, 1155 (1983).
21. Р. Л. Бобров, Л. Ф. Рыбальченко, В. В. Фисун, И. К. Янсон, *ФНТ* **13**, 611 (1987).
22. И. О. Кулик, А. Н. Омелянчук, Р. И. Шехтер, *ФНТ* **3**, 1543 (1977).
23. И. К. Янсон, *ФНТ* **9**, 676 (1983).
24. *Справочник по физико-техническим основам криогеники*, М. П. Малков (ред.), Энергия, Москва (1973).
25. И. К. Янсон, Н. Н. Грибов, О. И. Шкляревский, *Письма в ЖЭТФ* **42**, 159 (1985).
26. Г. В. Камарчук, А. В. Хоткевич, В. М. Багацкий, А. В. Кравченко, *ФНТ* **24**, 53 (1998).
27. И. Ф. Ицкович, И. О. Кулик, Р. И. Шехтер, *ФНТ* **13**, 1166 (1987).
28. Г. В. Камарчук, А. В. Хоткевич, *ФНТ* **12**, 1275 (1987).
29. Б. И. Веркин, И. К. Янсон, И. О. Кулик, О. И. Шкляревский, А. А. Лысых, Ю. Г. Найдюк, *Изв. АН СССР. Сер. физ.* **44**, 1330 (1980).
30. А. В. Хоткевич, С. Н. Крайнюков, *ФНТ* **17**, 335 (1991).
31. В. В. Хоткевич, А. В. Хоткевич, *Восстановление функции электрон-фононного взаимодействия по экспериментальным данным в методе микроконтактной спектроскопии* Деп. в ВИНТИИ 07.01.86, № 164–В86.
32. F. J. Pinski, P. V. Allen, and W. H. Butler, *Phys. Rev.* **B23**, 5080 (1981).
33. А. В. Хоткевич, Автореф. дисс. докт. физ.-мат. наук, Харьков, (1990).

Spectroscopy of electron-phonon interactions in lamellar two-dimensional dichalcogenide $1T\text{-VSe}_2$

G. V. Kamarchuk, A. V. Khotkevich,
V. M. Bagatsky, P. Molinie, A. Leblanc,
and E. Faulques

The vibrational spectra of lamellar two-dimensional transition metal dichalcogenide $1T\text{-VSe}_2$ were investigated by point-contact and Raman spectroscopies. The point-contact and Raman spectra contain peculiarities in good agreement in position and intensity. Different regimes (ballistic, diffusive and thermal) of current flowing in the $1T\text{-VSe}_2/\text{Cu}$ point contacts were studied. The measurements displayed both direct point-contact spectra demonstrating the electron-phonon interaction effect in $1T\text{-VSe}_2$ and inverse spectra reflecting the disruption of electron states localization in the area round the contact, resulting in increase of the contact conductivity. The research of the point contacts in the current regimes with small elastic and inelastic mean free paths of electrons permitted us to observe nonlinearities connected with the charge density wave phase transition. The point-contact function of electron-phonon interaction yet unknown for the above compound was restored and the values of mean and root-mean-square frequencies of phonons were calculated. The Debye temperature was evaluated.