

ТУННЕЛЬНАЯ МИКРОСКОПИЯ ПОВЕРХНОСТИ КРИСТАЛЛОВ WSe_2

*Л. Н. Болотов, Б. Е. Деркач, Л. Ф. Иванцов, И. В. Макаренко,
П. Б. Плеханов, В. И. Сафаров*

Дихалькогениды переходных металлов, к которым относится и WSe_2 , образуют интересный класс слоистых кристаллов, демонстрирующих большое разнообразие свойств. В этой группе кристаллов есть изоляторы, полупроводники, полуметаллы и металлы, в том числе сверхпроводники.

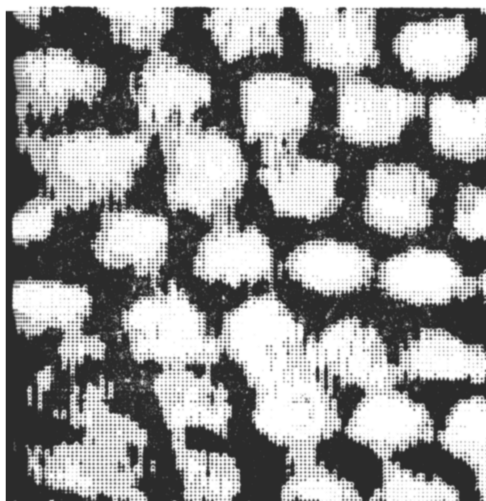


Рис. 1. Изображение участка поверхности $2H-WSe_2$ размером $20 \times 20 \text{ \AA}$ в туннельном микроскопе (вид сверху).

Величина туннельного тока 8 нА, туннельного напряжения 1.1 В.

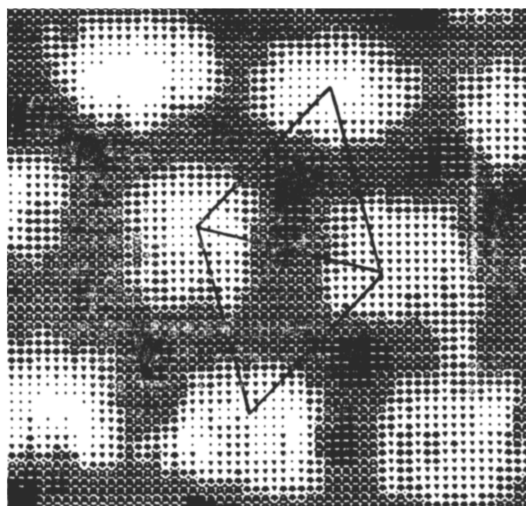


Рис. 2. Изображение участка поверхности $2H-WSe_2$ размером $8 \times 8 \text{ \AA}$ (вид сверху).

Градации тона разделяет 0.2 \AA по высоте, темным тонам соответствуют низкие участки рельефа. Выделена элементарная ячейка.

Обладая сильной анизотропией решетки, эти слоистые кристаллы легко скалываются по межслойным границам, образуя большие участки атомно-гладкой поверхности, пассивной к окислению и хемисорбции посторонних молекул. Последние свойства делают их чрезвычайно удобными объектами туннельной микроскопии. Имеющиеся к настоящему времени исследования выполнены на металлах $TaSe_2$ и $NbSe_2$ и посвящены главным образом изучению особенностей сверхструктуры, связанной с образованием волн зарядовой плотности [1]. В настоящей работе приводятся результаты наблюдения атомной структуры полупроводникового соединения WSe_2 сканирующим туннельным микроскопом (СТМ).

В работе использовался СТМ с механическим подводом образца к острию на расстояние туннельного зазора. Плавность перемещения обеспечивалась пластинчатой упругой пружиной, вблизи закрепленного конца которой располагался изучаемый образец. Развертка по координатам осуществлялась трубчатым пьезокерамическим элементом [2] (перемещение $53 \text{ \AA}/\text{В}$ в плоскости образца и $10 \text{ \AA}/\text{В}$ перпендикулярно плоскости). Острие, изготовленное из вольфрамовой проволоки диаметром 0.1 мкм методом электролитического перетравливания, закреплялось на оси пьезокерамической трубки, а не сбоку, как в [2], что обеспечивало существенно меньшее искажение формы растра при сканировании. СТМ помещался

в звуко- и теплоизолирующий корпус из пенопласта и для защиты от вибраций подвешивался на эластичных резиновых элементах.

Управление работой прибора, а также сбор и обработку информации осуществляла ЭВМ ДВК-3М. Топографии поверхности регистрировали в режиме постоянного туннельного тока, величина которого выбиралась в пределах 1—10 нА. Скорость сканирования была выбрана 2787 Гц, что позволяло записывать изображения за 20—40 с.

Перед проведением измерений образец приклеивался к держателю и скалывался верхний слой. Отрицательное смещение 0.8—1.5 В подавалось на острие. Все опыты проводились на воздухе.

Исследованный политип $2H-WSe_2$ относится к классу квазидвумерных слоистых кристаллов. В этом материале отдельный слой образуется сильно связанными между собой атомными плоскостями Se—W—Se [3]. Кристалл представляет собой стопу таких слоев — «сэндвичей». Слои слабо связаны между собой силами типа Ван-дер-Ваальса, и скалывание происходит как раз по этим межслойным границам. При этом верхняя нереконструированная поверхность образуется атомами Se и представляет собой треугольную решетку. Межатомные расстояния Se—Se в этой плоскости составляют 3.29 Å. Вторая атомная плоскость также с треугольной решеткой образуется атомами вольфрама. Расстояние между плоскостями Se и W в «сэндвиче»

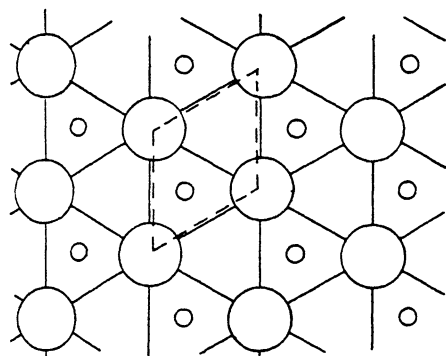


Рис. 3. Схема расположения атомов на поверхности кристалла.

составляет около 1.6 Å [4]. Кристалл обладает полупроводниковыми свойствами, край оптического поглощения расположен в области 1.6 эВ. Исследовались образцы *p*-типа с концентрацией носителей около 10^{17} см³.

Нами было получено больше десятка изображений поверхности $2H-WSe_2$ с атомным разрешением. Рис. 1 представляет типичное изображение участка поверхности размером 20×20 Å. Градации тона на рисунке отражают высоту рельефа: светлым областям соответствуют более высокие участки топограммы, темным — более низкие. Измеренная величина межатомных расстояний в плоскости хорошо согласуется с данными рентгеноструктурного анализа. Наряду с атомно-гладкими участками поверхности с хорошей атомной структурой, которые чаще наблюдаются на свежесколотых поверхностях, встречаются и области с нарушенной атомной структурой. Одна такая область видна в левой части рис. 1.

В наших экспериментах перепад высот при записи атомного рельефа поверхности изменялся в различных опытах от 1 до 5 Å. Отметим, что последнее значение в несколько раз превышает расстояние между первой и второй атомными плоскостями. Такое поведение наблюдается для графита и других слоистых материалов [5] и связывается с особенностями электронного строения поверхности [6] либо с упругими силами взаимодействия между атомами острия и поверхности [7]. Кроме того, наличие на поверхности адсорбированного диэлектрического слоя между острием и образцом приводит к аномальному большому перепаду высот в 24—70 Å [8]. Наблюдаемые нами перепады высот свидетельствуют об отсутствии подобных слоев в наших экспериментах.

Чтобы лучше проанализировать отдельные детали атомного строения поверхности в пределах элементарной ячейки, на рис. 2 представлено изображение в туннельном микроскопе малого участка поверхности

$8 \times 8 \text{ \AA}$. Для сравнения на рис. 3 приведена схема атомного строения поверхности кристалла $2H\text{-WSe}_2$: атомы Se верхней атомной плоскости (большие кружки) образуют треугольную решетку, малыми кружками помечены положения атомов W из второй от поверхности атомной плоскости. С учетом этой плоскости два соседних треугольника Se не являются эквивалентными: под одним из них в центре не располагаются атомы из других плоскостей, а под вторым в центре располагается атом W из второй атомной плоскости. Такая неэквивалентность треугольников атомной структуры поверхности отчетливо наблюдается и на изображении, полученном в туннельном микроскопе (рис. 2). Градации тона здесь разделяет расстояние в 0.2 \AA . Положения темных пятен, которые показывают наиболее глубокие провалы, выделяют неэквивалентные треугольники атомной структуры поверхности.

Таким образом, для исследованных слоистых кристаллов $2H\text{-WSe}_2$ изображения, получаемые в туннельном микроскопе, отражают атомную структуру не только первой, но и второй атомной плоскости.

Список литературы

- [1] Coleman R. V., Drake B., Giambattista B., Johnson A., Hansma P. K., McNairy W. W., Slough G. // *Physica Scripta*. 1988. V. 38. N 2. P. 235—243.
- [2] Бинниг и Смит // *Приборы для научн. исслед.* 1986. № 8. С. 152—158.
- [3] Булаевский Л. Н. // *УФН*. 1976. Т. 120. № 2. С. 259—271.
- [4] Wilson J. A., Yoffe A. D. // *Adv. Phys.* 1969. V. 18. N 73. P. 193—335.
- [5] Dahm D. C., Watanabe M. O., Blackford B. L., Jericho M. N. // *J. Appl. Phys.* 1988. V. 63. N 2. P. 315—318.
- [6] Tersoff J. // *Phys. Rev. Lett.* 1986. V. 57. N 4. P. 440—443.
- [7] Soler J. M., Baro A. M., Garcia N., Rohrer H. // *Phys. Rev. Lett.* 1986. V. 57. N 4. P. 444—447.
- [8] Morita S., Tsukada S., Mikoshiba N. // *Jpn. J. Appl. Phys. Lett.* 2. 1987. V. 26. N 4. P. L306—L308.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе АН СССР
Ленинград

Поступило в Редакцию
26 октября 1989 г.

УДК 537.226.4: 538.956

© Физика твердого тела, том, 32, № 5, 1990
Solid State Physics, vol. 32, N 5, 1990

ПЕРЕПОЛЯРИЗАЦИЯ КРИСТАЛЛОВ $\text{Li}_2\text{Ge}_7\text{O}_{15}$

М. Д. Волнянский, А. Ю. Кудзин

После обнаружения в кристаллах $\text{Li}_2\text{Ge}_7\text{O}_{15}$ (ЛГО) фазового перехода (ФП) [1], который оказался сегнетоэлектрическим (СЭ) [2], проводится интенсивное исследование электрофизических свойств этого материала. Вместе с тем сегнетоэлектрические свойства ЛГО (процессы переключения спонтанной поляризации P_s , доменная структура) изучены недостаточно. Определена только температурная зависимость P_s и коэрцитивного поля E_c по петлям диэлектрического гистерезиса в диапазоне температур $250\text{—}283 \text{ K}$ [3]. Отмечается, что P_s при приближении к температуре ФП плавно уменьшается до нуля, что указывает на СЭ ФП второго рода в кристаллах $\text{Li}_2\text{Ge}_7\text{O}_{15}$. Нет информации ни прямой, ни косвенной о доменной структуре и ее поведении в электрическом поле. Не исследовалась импульсная переполаризация кристаллов ЛГО, которая может дать сведения о переключении доменной структуры. Такие данные представляются важными для понимания сегнетоэлектрических свойств ЛГО.

Исходя из результатов пирозлектрических измерений, в [4] приведены данные об аномальном поведении $P_s(T)$ кристаллов $\text{Li}_2\text{Ge}_7\text{O}_{15}$. Спонтанная