

Сверхпроводимость межфазной границы двухслойных гетероструктур на основе полупроводниковых монохалькогенидов

О.И. Юзефович, М.Ю. Михайлов,

Физико-технический Институт Низких Температур им.Б.И.Веркина, 61103 Харьков, Украина

Н.Я. Фогель, Ю.В. Бомзе, Е.И. Бухштаб

Институт Твёрдого Тела, Технион, 32100, Хайфа, Израиль

А.Ю. Сипатов, В. Волобуев

Национальный Технический Университет ХПИ, 61002 Харьков, Украина

Впервые обнаружена сверхпроводимость двухслойных полупроводниковых монохалькогенидных гетероструктур PbTe/PbS, PbTe/PbSe, PbTe/YbS. Температура сверхпроводящего перехода изменяется в интервале 3.2 – 6К. Единичные пленки PbTe, PbS и YbS изготовленные при тех же условиях, что и двухслойные гетероструктуры не проявляют сверхпроводимости выше 0.3 К. Из сравнения экспериментальных результатов, полученных на двухслойных гетероструктурах, с результатами на тонких единичных монохалькогенидных пленках сделан вывод, что за сверхпроводимость двухслойных гетероструктур (ДГ) отвечает граница раздела двух полупроводников. Особенности, наблюдаемые на зависимостях резистивных переходов и критических магнитных полей от температуры, а также магнетосопротивления в нормальном состоянии позволяют сделать вывод о низкоразмерности сверхпроводящего слоя в исследованных структурах.

Наиболее интересные объекты современной физики – наноструктуры. Для получения наноструктур не всегда нужно применение высокоточных технологий, например, можно получить наноструктуру, правильно подобрав параметры двух полупроводников в гетероструктуре. В частности, упругие и электронные свойства трехмерных многослойных сверхрешеток (СР), полученных при эпитаксиальном росте изоморфных монохалькогенидов Pb, Sn, и редкоземельных металлов на подложке KCl изменяются на наномасштабах [1,2]. Модуляция физических характеристик в перпендикулярном к слоям направлении обеспечивается поочередным напылением двух полупроводников. Модуляция в плоскости слоёв происходит из-за наличия регулярной сетки краевых дислокаций несоответствия на поверхности раздела между двумя слоями.

Первые результаты по обнаружению сверхпроводимости полупроводниковых СР PbTe/PbS и PbTe/SnTe появились еще в 80-х годах [3,4], но до последнего времени существовали противоположные суждения о ее причине: формирование ультратонкой пленки свинца на интерфейсе или выделения Pb из-за интердиффузии, влияние псевдоморфных условий на границе раздела двух полупроводниковых материалов; влияние сетки дислокаций

несоответствия, возникающей на границе раздела между двумя изоморфными компонентами. Последняя идея была наиболее удачной, и ее применение привело нас к открытию сверхпроводимости 5 новых сверхпроводящих СР (количество слоев менялось в интервале $n = 3 - 20$) (PbS/PbSe, PbTe/PbSe, PbS/YbS, PbTe/YbS, and PbSe/EuS) [1,2].

Тем временем попытки других групп создать двухслойные структуры, обладающие сверхпроводимостью, не были успешны [5,6], и авторы сделали вывод, что трехслойные структуры являются минимальными структурными блоками, проявляющими сверхпроводящие свойства. Это заключение противоречит нашей концепции о дислокационно наведенной сверхпроводимости, детально описанной в [2]. Поэтому мы сконцентрировали наши усилия на создании двухслойных гетероструктур и получили желаемый результат. Обнаружена сверхпроводимость ДГ и показано, что их сверхпроводящие свойства в многих аспектах отличаются от свойств СР из таких же соединений. Вполне вероятно, что эти отличия связаны с низкоразмерной природой сверхпроводящих межслойных слоев в ДГ.

Количество исследованных ДГ – 18. Толщины обоих слоев ДГ равные и изменялись в диапазоне 40 – 300nm. Метод приготовления ДГ детально описан в работах [2,5]. В качестве подложки использовался скол поверхности (001) монокристалла KCl. Такой выбор подложки гарантирует эпитаксиальный рост гетероструктуры и образование сетки краевых дислокаций несоответствия (КДН) на границе раздела двух полупроводников. Наличие сетки КДН подтверждается результатами электронно-микроскопических исследований ДГ, в которых верхний слой был сделан тоньше (30-50nm) для возможности ТЕМ измерений.

Транспортные измерения проведены в температурном интервале 0.3-300К в стандартном гелиевом криостате, снабженном сверхпроводящим соленоидом (5Т). Точность стабилизации температуры в указанном интервале температур не хуже 10^{-3} К. Сопrotивление измерялось четырехзондовым методом. Критические магнитные поля определялись по середине резистивных переходов, где сопротивление образца достигало половины сопротивления в нормальном состоянии R_n .

Для большинства ДГ мы наблюдаем температурную зависимость сопротивления, типичную

для металлов. Соотношение $r=R_{300}/R_n$ равно 1.6-8, и все эти образцы переходят в сверхпроводящее состояние (Рис.1) с температурой перехода T_c в интервале 2.6-5.6К, т.е. ниже чем для многослойных композиций из таких же материалов (5.8-6.5К). Для более тонких ДГ с $d_{1,2}=40\text{nm}$ температура сверхпроводящего перехода равна 0.4К и переход не заканчивается при 0.3К. Для таких образцов dR/dT отрицательна выше T_c . В случае СР полный переход в сверхпроводящее состояние обычно наблюдается для образцов с $d_{1,2}\geq 80\text{nm}$. Как следует из сравнения экспериментальных результатов для СР и ДГ, присутствие дополнительных интерфейсов служит стабилизирующим фактором для структуры слоев, отвечающих за сверхпроводимость.

Мы обнаружили, что особенности сверхпроводящего состояния двухслойных гетероструктур радикально отличаются от обычно наблюдаемых для СР. В то время как для СР наблюдается резкий переход в сверхпроводящее состояние, для всех исследованных двухслойных гетероструктур переход сильно уширен (рис.1).

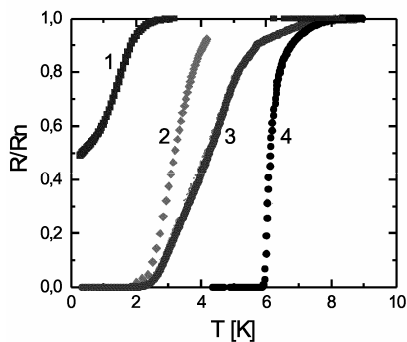


Рис.1. Нормированное сопротивление как функция температуры для 4 структур PbTe/PbS. Слева направо – три ДГ с толщинами $d_{1,2}=40\text{nm}$ (1), 80nm (2) and 80nm (3), и одна СР $d_{1,2}=120\text{nm}$ (4).

Ширина перехода для ДГ всегда больше, чем 2К, в то время как для СР переход резкий (несколько десятых К). Возможно, уширение резистивного перехода ДГ вызвано низкоразмерной природой сверхпроводящего слоя.

Результаты исследования критических магнитных полей (рис.2) также свидетельствуют о низкоразмерной природе сверхпроводящих слоев. Критические магнитные поля существенно более анизотропны, чем для сверхрешеток. В СР в окрестности T_c наблюдается 3D поведение параллельного критического поля $H_{c||}$ ($H_{c||} \sim (T_c - T)$), а при низких температурах наблюдается кроссовер к 2D поведению. В случае единичного интерфейса 2D поведение параллельного критического поля ($H_{c||} \sim (T_c - T)^{1/2}$) начинается прямо с T_c . Кроме того, как видно из рис.2, для ДГ наблюдается необычная особенность (резкая расходимость верхнего критического поля $H_{c||}(T)$ при низких температурах), что может быть следствием кроссовера 2D-1D. Такой кроссовер ха-

рактерен, согласно теории [7], для сверхпроводящих сеток. Аномальная положительная кривизна наблюдается и для перпендикулярного поля, что можно ожидать для сверхпроводящих сеток. Существует подтверждение двумерности ДГ также и из данных в нормальном состоянии. Магнетосопротивление (MP) для параллельной и перпендикулярной ориентации сильно отличаются (до в 2 раз в поле 5Т), т.е. MP сильно анизотропно, как и должно быть в двумерном случае (рис. 3).

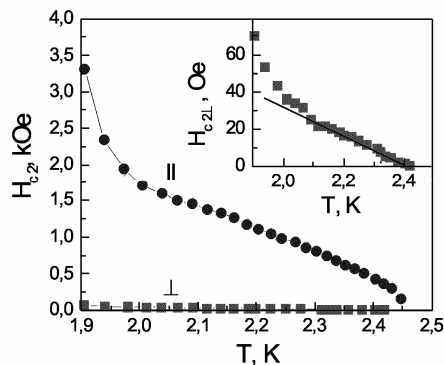


Рис.2. Верхние критические поля ДГ PbTe/YbS с толщинами слоев $d_{1,2}=100\text{nm}$.

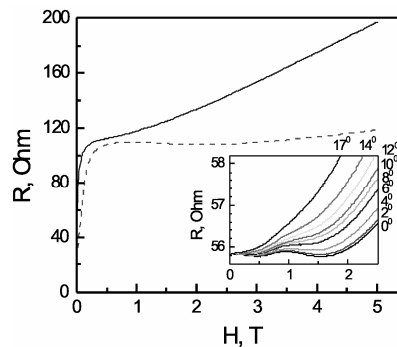


Рис.3. Магнетосопротивление при параллельной и перпендикулярной ориентации магнитного поля ДГ PbTe/PbSe с $d_{1,2}=100\text{nm}$. Вставка: MP при разных ориентациях магнитного поля.

Кроме того, в слабых магнитных полях наблюдается аномалия магнетосопротивления – немонотонная зависимость от H (Рис.3, вставка), происхождение которой может быть связано с многосвязной топологией проводящего слоя. Это требует дальнейших экспериментальных исследований.

1. N.Ya.Fogel et al, Phys.Rev.Lett. 86, 512 (2001).
2. N.Ya. Fogel et al., Phys.Rev.B66, 174513 (2002).
3. K.Murase et al., Surf. Sci. 170, 486 (1986).
4. O.A.Mironov et al., JETP Lett. 48, 106 (1988).
5. O.A.Mironov et al., JETP Lett. 50, 334, 1989.
6. A.I.Fedorenko et al., Fiz.Tverd.Tela 41, 1693 (1999).
7. L.A.Turkevich and R.A.Klemm, Phys.Rev.B19, 2520 (1979).