

АНОМАЛЬНОЕ ВЛИЯНИЕ СЛАБЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ДИАМАГНИТНЫЕ СТЕКЛООБРАЗНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКИ

С.А.Дембовский, Е.А.Чечеткина, С.А.Козюхин

Обнаружено многократное изменение вязкости стеклообразного селена в слабых переменных магнитных полях при условии определенного соотношения между частотой поля и температурой образца.

Халькогенидные стеклообразные полупроводники (ХСП) диамагнитны и, как правило, не обладают заметной (т. е. $> 10^{17}$ спин/ см^3) концентрацией неспаренных электронов, которая, однако, возникает при низкотемпературном фотовозбуждении в крае оптического поглощения. Для объяснения такого поведения ХСП Андерсон¹ выдвинул гипотезу об отрицательной корреляционной энергии спаривания электронов с противоположными спинами, и вскоре появились соответствующие модели дефектов^{2–4} – диамагнитных в своем основном состоянии и парамагнитных в возбужденном, на основе которых можно было трактовать совокупность специфических свойств ХСП: электрических, магнитных и оптических. Тем не менее, насколько нам известно, до сих пор не пытались изменить сами свойства ХСП путем воздействия магнитным полем на дефекты (в немногочисленных работах по влиянию магнитного поля на свойства ХСП эффекты были малы, и авторы уклонялись от определенной теоретической интерпретации). Причина, вероятно, заключается в "теоретической невозможности" такого эффекта, так как в поле $\sim 1 \text{ кЭ}$ при комнатной температуре полевая энергия магнитного момента $\sim \mu_B$ оказывается на три–четыре порядка меньше тепловой энергии kT , т. е. тепловое движение должно полностью нивелировать силовое воздействие поля на дефект. Однако, учитывая историю эффекта – действия слабых магнитных полей на кинетику химических реакций, нашедшего свое нетривиальное теоретическое объяснение (см., например,⁵), мы первоначально сознательно игнорировали "тепловой запрет" и поставили эксперимент по влиянию магнитного поля на вязкость стеклообразного селена, выбранного как элементарный типичный представитель класса ХСП. Исследование вязкости было обосновано предположением, что переключение ковалентных связей с одними атомами на другие в процессе вязкого течения осуществляется посредством дефектов, которые могут быть магнитоактивны. Эксперимент⁶ показал наличие эффекта действия постоянного магнитного (и электрического) поля на вязкость стеклообразного селена, причем эффект насыщался уже в очень слабых полях $H \lesssim 200 \text{ Э}$ ($E \lesssim 500 \text{ В/см}$). Изменение вязкости было достоверно, но сравнительно невелико: 20–30 % при погрешности измерения до 10%. Ниже описано резкое усиление эффекта при переходе от постоянного к переменному магнитному полю.

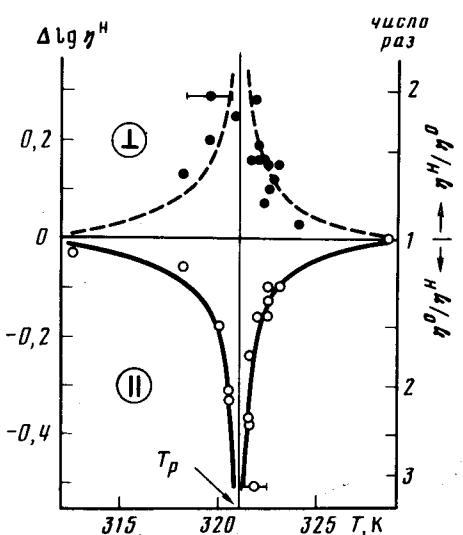
Измерения проводились на промышленном селене марки СВЧ-2 с содержанием основного вещества 99,992% по контролируемым примесям. Образцы вырезались в форме цилиндра $\phi = 20 \text{ мм}$ и высотой 10 мм. Торцы цилиндра, на которых проводились измерения, полировались. Вязкость определялась известным методом¹⁾ по скорости стационарного вдавливания цилиндрического индентора в образец, термостатированный при $T > 304 \text{ К}$ (температура стеклования или температура начала размягчения стеклообразного селена). Материал индентора – латунь, диаметр – 1 мм, глубина погружения – до 1 мм. Температура измерялась хромель-алюмелевой термопарой и в процессе опыта поддерживалась постоянной в пределах 0,1 К. Однако следует отметить, что в условиях теплообмена в системе, открытой со стороны индентора, температура в точке вдавливания могла отличаться от температуры, фик-

¹⁾ О методе измерения вязкости стекол вблизи и выше температуры стеклования по скорости вдавливания индентора см., например, обзор Немилова Физ. и хим. стекла, 1977, 3, 148.

сируемой термопарой, но не более чем на 1 К – см. рисунок. Последовательность операций при проведении опыта: термостабилизация системы (1 – 2 часа), измерение при данной температуре в поле и без поля (каждое измерение и промежуток между ними занимают несколько минут), изменение температуры обогревающей жидкости и выход на новый температурный режим (30 мин), измерение и т. д. Поле напряженностью $H = 240$ Э и частотой $f = 50$ Гц было направлено двумя способами: перпендикулярно (I) или параллельно (II) направлению вдавливания. Величина эффекта оценивалась по разности логарифмических величин вязкости, т. е. как

$$\Delta \lg \eta^H(T) = \lg \eta^H(T) - \lg \eta^0(T) = \lg [\eta^H / \eta^0]_T,$$

где η^0 – вязкость в отсутствии поля при данной температуре T , η^H – вязкость при наложении поля при той же температуре. Из рисунка видно, что эффект появляется и резко усиливается вблизи определенной температуры $T_p = 321$ К, причем изменение вязкости достигало 2 – 3 раз. Этим действие переменного магнитного поля отличается от постоянного, где эффект при той же напряженности поля был значительно меньше и практически не зависел от температуры⁶. Сходное явление – усиление эффекта при определенном соотношении частоты поля и температуры образца (варьировалась частота поля при постоянной температуре) мы наблюдали в переменном электрическом поле⁷, и назвали его резонансом вязкости. Интересно, что в этом случае резонансные частоты f_p сдвигались в высокочастотную область при повышении температуры. Очевидно, что выяснения электромагнитной природы явления нужны аналогичные измерения для магнитного поля с $f = var$, которые пока отсутствуют.



Эффект действия магнитного поля напряженности 240 Э и частоты 50 Гц на вязкость стеклообразного селена при варьируемой температуре образца. Пунктир наверху – зеркальное отражение нижней зависимости. Указана точность поддержания температуры, которая была ниже в установке с электромагнитным (перпендикулярное поле), чем в установке с соленоидом (параллельное поле)

Необычность полученного экспериментального результата заключается в том, что действием очень слабого магнитного поля удается не только влиять на диамагнитное вещество, но в определенных (резонансных) условиях в несколько раз изменять его макроскопическое свойство – вязкость. По нашему мнению, это говорит о том, что: 1) действие поля не силовое; 2) поле воздействует не на основное вещество, а на отклонения от основного состояния – дефекты; 3) дефекты могут определять макроскопические свойства вещества, в частности вязкость, рассматриваемую как транспорт атомов во всем объеме вещества, происходящий посредством дефектов. Поле, по-видимому, способно задавать направление про-

текания таких процессов с участием дефектов, о чем свидетельствует анизотропия эффекта (см. рисунок); вопрос состоит в выяснении конкретного механизма ориентирующего действия магнитного поля на дефекты в условиях разупорядочивающего теплового движения.

В последнее время появились работы по влиянию слабых постоянных магнитных полей на электропроводность расплава селена⁸ и аморфных пленок поликацетиlena⁹. В первой работе авторы объясняют эффект намагничиванием цепочек селена полем; однако для снятия : "теплового запрета" длина таких цепочек должна быть не меньше 10^6 атомов — такие макромолекулы не существуют в низкомолекулярном расплаве селена. Во второй работе объяснениедается на основе дефектов (солитонов) и соответствующих спиновых эффектов. Это объяснение представляется более корректным, однако оно вряд ли применимо в нашем случае, так как поведение эффекта иное, чем наблюдаемое нами на селене: величина эффекта в⁹ была на 1—2 порядка ниже, чем у нас, и эффект зависел от температуры, в то время как в постоянном магнитном поле мы не наблюдали выраженной температурной зависимости⁶. Таким образом, эффект на селене⁸ не нашел удовлетворительного теоретического объяснения, а механизм действия магнитного поля на электропроводность поликацетиlena⁹ может быть иным, чем в рассматриваемом случае вязкости стеклообразного селена. Вероятно, дело не столько в том, что исследовались разные свойства, сколько в принципиальном различии дефектов, характерных для органических полимеров, и для стеклообразующих веществ²⁻⁴.

В заключение отметим, что нами были проведены опыты по закладке расплавов другого ХСП — As₂S₃ в постоянном магнитном поле $H = 240$ Э, показавшие сильный сдвиг края поглощения в длинноволновую область за счет действия поля. Таким образом, обнаруженное нами действие магнитного (и электрического) поля на вязкость стеклообразного селена, по-видимому, является отражением более общего эффекта действия слабых магнитных и электрических полей на свойства стекол, который перспективен как с экспериментально-практической, так и с теоретической точки зрения. Для обоснования этого предположения, разумеется, нужны конкретные теоретические модели и проверочные опыты. При постановке таких опытов следует иметь в виду, что наличие и сила эффекта зависят от конкретных условий, таких как исследуемое вещество и его предыстория, в том числе примеси, изучаемое свойство, температура образца, напряженность и частота поля.

Литература

1. Anderson P.W. Phys. Rev. Lett., 1975, 34, 953.
2. Street R.A., Mott N.F. Phys. Rev. Lett., 1975, 35, 1293.
3. Kastner M., Adler D., Fritzsche H. Phys. Rev. Lett., 1976, 37, 1504.
4. Попов Н.А. Письма в ЖЭТФ, 1980, 31, 437.
5. Бучаченко А.Л., Сагдеев Р.З., Салихов К.М. Магнитные и спиновые эффекты в химических реакциях. Новосибирск: Наука, 1978.
6. Dembovsky S.A., Kozuykhin S.A., Chechetkina E.A. Mat. Res. Bull., 1982, 17, 801.
7. Dembovsky S.A., Chechetkina E.A., Kozuykhin S.A. Solid State Com., 1982, 44, 1561.
8. Блинов Л.Н., Юшка Г., Абраускус К., Гутенев М.С. Физ. и хим. стекла, 1983, 9, 748.
9. Франкевич Е.Л., Соколик И.А., Кадыров Д.И., Кобрянский А.М. Письма в ЖЭТФ, 1982, 36, 401.

Поступила в редакцию

3 августа 1984 г.

После переработки

17 декабря 1984 г.