

## ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРА ПОГЛОЩЕНИЯ ИК ИЗЛУЧЕНИЯ ОТРИЦАТЕЛЬНЫМИ ЗАРЯДАМИ В ТВЕРДОМ ГЕЛИИ

*А.И.Голов, Л.П.Межов-Деглин*

*Институт физики твердого тела РАН*

*142432, Черноголовка, Московская обл. Россия*

Поступила в редакцию 22 октября 1992 г.

Наблюдено поглощение ИК излучения отрицательными зарядами в твердом гелии. Измерена зависимость положения линии, а также ее ширины и сечения поглощения от давления. Эксперимент подтверждает существующую пузырьковую модель электрона в твердом гелии. Определены и обсуждаются различные параметры этой модели.

Свойства зарядов в твердом гелии изучают уже более 30 лет <sup>1</sup>. Начиная с первых работ Шальникова <sup>2</sup>, исследователи интересовались, в основном, их транспортными свойствами. Структуру отрицательных зарядов экспериментально не исследовали. По аналогии с жидким гелием считается <sup>1,3,4</sup>, что электрон в твердом гелии локализуется в сферической полости радиусом порядка 10Å. Атомы гелия вытеснены из полости вследствие короткодействующего отталкивания <sup>5,6</sup>. Однако до сих пор эта модель не была экспериментально проверена, тем более не изучались особенности, которые могут быть вызваны влиянием структуры кристаллической матрицы на форму полости <sup>7</sup>. Исследования свойств аналогичного дефекта – позитрония в твердом гелии показали <sup>8</sup>, что эффективный радиус пузырька вокруг позитрония изменяется от 10 до 8Å при увеличении давления затвердевания от 40 до 100 атм.

Пузырьковая модель, которая позволяла объяснить большое время жизни позитрония в жидком гелии, была предложена Феррелом 35 лет назад <sup>3</sup>. С тех пор ее применимость к описанию свойств электрона в жидкости была подтверждена различными методами <sup>4</sup>. Оказалось, что адекватной является простейшая модель со сферически-симметричной прямоугольной потенциальной ямой. Основным параметром в такой задаче является радиус ямы (пузырька), изменяющийся от 17 до 12Å при изменении давления от 0 до 25 атм. В подобной потенциальной яме у электрона есть несколько дискретных уровней. Это позволяет поставить задачу экспериментального исследования свойств отрицательных зарядов в гелии спектроскопическими методами. Расчеты оптических свойств электронов в жидком гелии приведены в статьях <sup>9,10</sup>. Недавно были проведены первые измерения поглощения ИК излучения при переходе электрона из основного  $1s$  в возбужденное состояние  $1p$  в жидком гелии <sup>11,12</sup>. Эти эксперименты подтвердили модель <sup>3</sup>.

Обнаружение линии поглощения  $1s-1p$  отрицательными зарядами в твердом гелии однозначно подтвердило бы применимость пузырьковой модели. Цель данной работы – попытка наблюдения поглощения света отрицательными зарядами в твердом гелии.

Рабочая ячейка – плоский диод (размеры электродов  $6 \times 20$  мм, зазор между радиоактивным источником зарядов и коллектором составлял  $L = 0,8$  мм) располагалась внутри металлической ампулы с сапфировыми окнами. Кристаллы твердого гелия выращивали в ампуле из сжатой жидкости при постоянном

давлении сверху вниз от медного холодопровода к капилляру системы заполнения. Рост кристалла контролировали по падению коллекторного тока  $I$  при постоянном напряжении  $U$  между источником зарядов и коллектором. Температуру ампулы измеряли угольным термометром сопротивления, установленным на наружной поверхности ампулы. В процессе роста кристалла вдоль ампулы поддерживался градиент температуры. Из-за большой теплопроводности металлических стенок, на последней стадии роста образца ампула в ряде случаев могла блокироваться. Поэтому приводимые далее значения давления затвердевания могут оказаться несколько завышенными.

Степень однородности образцов контролировали по переходным характеристикам коллекторного тока при ступенчатом включении постоянного напряжения. Для оптических исследований отбирали образцы с четко выраженным фронтом на переходной характеристике.

Излучение от кварцевой галогенной лампы разворачивалось с помощью призмного монохроматора (спектральная ширина  $\sim 0,07$  мкм) в диапазоне 3–5 мкм и фокусировалось в гелиевом кристалле между обкладками диода. На выходе из ампулы свет сразу попадал на угольный болометр, охлаждаемый до температуры 1,5 К. Излучение лампы модулировалось обтюратором на частоте 185 Гц. Модулированный сигнал с болометра, пропорциональный полной мощности прошедшего через диод излучения, усиливался наружным селективным усилителем с синхронным детектором и регистрировался.

В первых экспериментах концентрацию отрицательных зарядов в твердом гелии в зазоре между обкладками диода модулировали попеременным включением и выключением отрицательного напряжения. При малых подвижностях зарядов, когда ток мал по сравнению с током насыщения  $\beta$ -источника (20 нА в нашем диоде), коллекторный ток ограничивается объемным зарядом (ТООЗ). В области ТООЗ средняя плотность зарядов  $n$  пропорциональна приложенному напряжению. Подвижность зарядов в твердом гелии на линии плавления примерно на три порядка меньше чем в жидкости и далее экспоненциально убывает с понижением температуры. Поэтому область ТООЗ в твердом гелии простирается до полей порядка  $10^4$  В/см. Это позволило нам проводить спектроскопические измерения в твердом гелии при напряжениях в несколько кВ, то есть при плотности зарядов на 2–3 порядка выше, чем в жидкости в экспериментах <sup>11,12</sup>.

Было обнаружено, что максимальный сигнал поглощения устанавливался через 2–3 времени пролета фронтом отрицательных зарядов промежутка источник-коллектор. Поглощение света зарядами пропорционально разности показаний болометра при выключенном и включенном напряжении на источнике. В первых экспериментах эта величина определялась цифровым вычитанием установившихся значений сигнала болометра, при включении отрицательного напряжения  $U = -4,5$  кВ. Для улучшения отношения сигнал-шум процесс измерений при фиксированной длине волны повторялся от 100 до 800 раз, и разность показаний суммировалась. Регистрация одного спектра обычно занимала от трех до десяти часов. Управление экспериментом, регистрация и обработка данных осуществлялись автоматически с помощью персонального компьютера и интерфейса КАМАК.

Как показал наш опыт, включение положительного напряжения примерно той же величины позволяет резко ускорить выход отрицательных зарядов из объема после выключения отрицательного напряжения. Это позволило за-

метно уменьшить время измерений. Оптимальные параметры, при которых удалось достичь относительной величины поглощения света электронами выше 0,001, таковы: отрицательное напряжение  $U = -4,5$  кВ (электрическое поле  $5 \cdot 10^4$  В/см), положительное  $U = +4$  кВ, коллекторный ток 1,4 нА, время пролета рабочего зазора фронтом отрицательных зарядов 1,5 – 2 с, подвижность зарядов  $10^{-6}$  см<sup>2</sup>/В·с, интервал времени между переключениями электрического напряжения 5–8 с. При этом плотность отрицательных зарядов в объеме близка к  $6 \cdot 10^{11}$  см<sup>-3</sup>. Поскольку подвижность зарядов на кривой плавления в ГПУ <sup>4</sup>He порядка  $10^{-5}$  см<sup>2</sup>/В·с, для выполнения перечисленных выше условий необходимо работать при температурах на 0,3–0,7 К ниже температуры плавления. По сути дела описанная процедура определения поглощения является цифровым синхронным детектированием на частотах порядка 0,1 Гц.

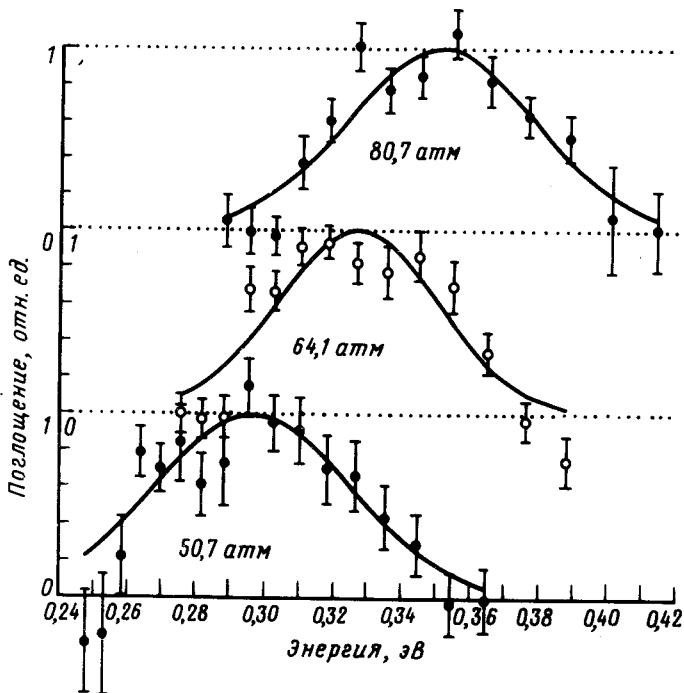


Рис.1. Спектры поглощения отрицательных зарядов в твердом <sup>4</sup>He при трех разных давлениях. Для удобства кривые поглощения смещены по оси ординат. Вертикальные отрезки указывают пределы ошибки измерений

На рис.1 показаны спектры поглощения ИК излучения в трех кристаллах ГПУ <sup>4</sup>He, выращенных при разных давлениях. Вертикальные прямые указывают пределы статистических ошибок. Каждый спектр аппроксимировался гауссовой функцией, откуда извлекали положение центра линии  $E_{1s-1p}$  (далее энергия перехода  $1s - 1p$ ) и ее ширину. В пределах точности наших экспериментов и методически доступного диапазона температур, нам не удалось обнаружить зависимости положения и ширины линии от температуры или приложенного напряжения.

На рис.2 показана зависимость энергии перехода  $1s - 1p$  от давления в жидком и твердом <sup>4</sup>He. Пунктирные вертикальные отрезки указывают ширину линии на полувысоте. Сплошная линия построена по данным измерений <sup>11</sup> в жидком гелии. Точки – наши измерения в твердом гелии.

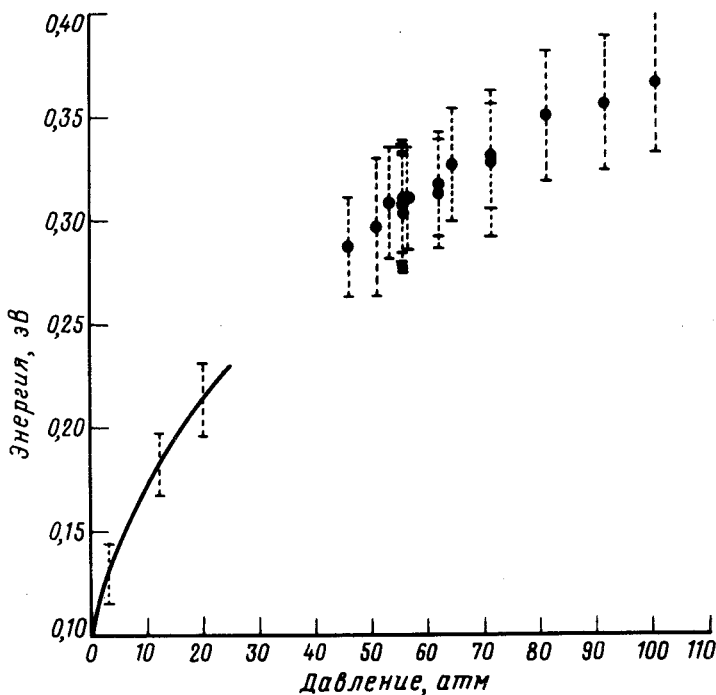


Рис.2. Зависимость энергии  $1s - 1p$ -перехода от давления в твердом  ${}^4\text{He}$ . Пунктирные прямые указывают ширину линии поглощения на полувысоте. Сплошная кривая построена по результатам аналогичных измерений  ${}^{11}$  в жидком гелии

Для определения радиуса пузырька из величин  $E_{1s-1p}$  в модели прямоугольной сферической потенциальной ямы достаточно знать ее глубину (см., например,  ${}^{13}$ ). Так же как и в  ${}^5$  мы рассчитывали ее методом Вигнера-Зейца  ${}^{14}$ , дающим хорошее согласие с экспериментально измеренной работой входа электрона в жидкий и плотный газообразный гелий  ${}^{15}$ . По нашим оценкам в диапазоне давлений 46–100 атм радиус плавно уменьшается от 10,7 до 9,4 Å.

К сожалению, нам неизвестны теоретические расчеты ширины линии и сечения поглощения  $1s - 1p$  в твердом гелии. Для случая жидкого гелия это сделано в  ${}^9, {}^{10}$ . Измерения поглощения в жидкости показали  ${}^{11, 12}$ , что ширина линии примерно в два раза превышает оценки  ${}^9, {}^{10}$ , оставаясь примерно в шесть раз меньше энергии перехода  $E_{1s-1p}$ . Более поздние расчеты свойств электрона в жидком гелии методом Монте-Карло  ${}^{16}$  подтвердили применимость простой модели  ${}^3$  для нахождения радиуса пузырька, но дали существенно более широкую линию поглощения света при  $1s - 1p$ -перехода. В наших измерениях ширина линии в твердом гелии также в 5–6 раз меньше энергии перехода.

Цифровой способ определения абсолютной величины полного поглощения позволил нам оценить сечение поглощения. Плотность отрицательных зарядов в объеме определялась независимо по известным значениям коллекторного тока и скорости движения (времени пролета). Во всем диапазоне давлений это сечение составило  $12 \pm 3 \text{ Å}^2$ . Заметим, что найденное сечение близко к расчетному значению в  $21 \text{ Å}^2$  для электрона в жидком гелии при давлении 0–20 атм  ${}^{10}$ , полученному в предположении, что ширина линии равна 0,1 эВ.

Мы благодарны А.В.Лохову, Е.Н.Соловьеву и Я.Е.Волокитину за помощь в изготовлении оборудования и проведении экспериментов, а также С.В.Переверзеву за полезные дискуссии.

- 
1. A.J.Dahm, in *Progress in Low Temp. Physics*, Ed. D.F.Brewer Amsterdam: North-Holland, 10, 73 (1986).
  2. А.И.Шальников, *ЖЭТФ*, **47**, 1727 (1964).
  3. R.A.Ferrell, *Phys. Rev.* **108**, 167 (1957).
  4. K.W.Schwarz, in *Advances in Chemical Phys.* XXXIII. Eds. L.Prigogine and S.A.Rice. New York: Wiley, 1975 p.1.
  5. M.H.Cohen and J.Jortner. *Phys. Rev.* **180**, 238 (1969).
  6. В.Б.Шикин, *ЖЭТФ* **61**, 2053 (1971).
  7. А.И.Голов, *Письма в ЖЭТФ* **49**, 346 (1989).
  8. J.V.Smith, Jr., J.D.McGervey, and A.J.Dahm. *Phys. Rev. B* **15**, 1378 (1977).
  9. И.А.Фомин, *Письма в ЖЭТФ* **6** 715 (1967).
  10. T.Miyakawa and D.L.Dexter. *Phys. Rev. A* **1**, 513 (1970).
  11. C.C.Grimes and G.Adams, *Phys. Rev. B* **45**, 2305 (1992).
  12. А.Я.Паршин, С.В.Переверзев, *ЖЭТФ* **101**, 126 (1992).
  13. L.F.Schiff. *Quantum Mechanics*. New York: McGraw-Hill, 1955.
  14. Jortner, N.R.Kestner, S.A.Rice, and M.H.Cohen, *J.Chem. Phys.* **43**, 2614 (1965).
  15. J.R.Broomall, W.D.Johnson, and D.G.Onn, *Phys. Rev. B* **14**, 2819 (1976); U.Asaf, I.T.Steinberg. *Chem. Phys. Lett.* **128**, 91 (1986).
  16. D.F.Coker and B.J.Berne, *J.Chem. Phys.* **89**, 2128 (1988).