

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ НАБЛЮДЕНИЕ ФОТОРЕЗОНАНСА ЭЛЕКТРОНОВ, ЛОКАЛИЗОВАННЫХ НАД ПОВЕРХНОСТЬЮ ТВЕРДОГО ВОДОРОДА

В.В.Завьялов, И.И.Смолянинов

Наблюдались фоторезонансные переходы $1 \rightarrow 2$ и $1 \rightarrow 3$ в спектре электронов, локализованных над поверхностью твердого водорода. Обнаружена зависимость частот переходов в спектре от давления газовой фазы водорода, которую можно объяснить эффектом "квантового преломления". В пределе нулевой плотности молекул водорода в газе, частота перехода $1 \rightarrow 2$ оказалась равной $3,2 \pm 0,1$ ТГц.

Состояния электронов, локализованных над поверхностью жидкого гелия, хорошо изучены¹. В простейшей модели потенциал взаимодействия электрона с поверхностью определяется силами электростатического изображения и внешним прижимающим полем E_z :

$$U(z) = e^2(1 - \epsilon)/4z(1 + \epsilon) - eE_z z \equiv - Qe^2/z - eE_z z \text{ при } z > 0, U(z) = U_0 \text{ при } z \leq 0,$$

где ϵ — диэлектрическая проницаемость жидкого гелия, а ось z направлена по нормали от поверхности. Решение уравнения Шредингера с таким потенциалом при $U_0 \rightarrow \infty$ дает следующий энергетический спектр электронов, где последний член в формуле соответствует свободному движению электрона вдоль поверхности:

$$W_n = - Q^2 m e^4 / 2 \hbar n^2 - e E_z \langle z_n \rangle + P_{xy}^2 / 2m.$$

Здесь $\langle z_n \rangle = 3n^2 \hbar^2 / 2me^2 Q$ — среднее расстояние электрона до поверхности на n -ом энергетическом уровне.

Кроме гелия, подобные электронные состояния наблюдались и над поверхностями других диэлектриков². Однако прямого наблюдения дискретного характера электронного спектра для диэлектрика иного, чем гелий, до сих пор не было проведено. Спектр электронов над поверхностью твердого водорода особенно интересен вследствие выдвинутой Хайкиным идеи о возможности существования отрицательных ионов водорода большого радиуса³.

Нам удалось наблюдать резонансное поглощение света, соответствующее переходам $1 \rightarrow 2$ и $1 \rightarrow 3$ в спектре электронов, локализованных над поверхностью твердого водорода. Спектроскопия проводилась на длинах волн 78, 84 и 108 мкм лазера на парах воды⁴. Электронный спектр перестраивался изменением поля E_z , прижимающего электроны к поверхности.

Кристалл водорода выращивался в пространстве между двумя электродами диаметром 30 мм, расположенными горизонтально на расстоянии 2,3 мм друг от друга. Поверхность кристалла находилась приблизительно посередине между электродами. Верхний электрод был выполнен в виде сетки, прозрачной для излучения лазера. Излучение через окна оптического криостата направлялось на поверхность кристалла водорода с локализованными над ней электронами и, отразившись от поверхности, попадало на фотоприемник.

Для получения высокой относительной чувствительности ($\sim 0,01\%$) при измерении поглощения света электронами, регистрировалась величина, пропорциональная производной сигнала поглощения на частоте слабой модуляции прижимающего поля. На рис. 1 приведена экспериментальная запись одного из опытов. Одновременно с записью сигнала фоторезонанса измерялась плотность заряда поверхности водорода. Измерения потенциала нижнего электрода в резонансе при разной плотности заряда давали толщину кристалла и значение поля E_z в резонансе.

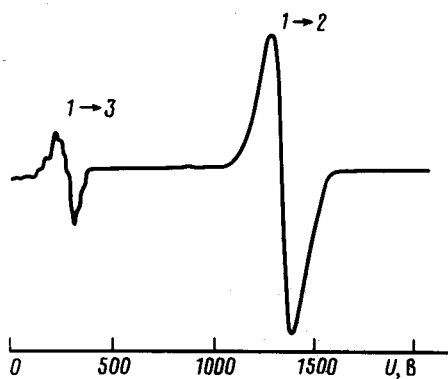


Рис. 1

Рис. 1. Запись сигнала фоторезонанса на длине волны 84 мкм при сканировании потенциала нижнего электрода. Видны резонансные переходы $1 \rightarrow 2$ и $1 \rightarrow 3$. Давление паров водорода 40 мм рт. ст. Чувствительность измерений при записи перехода $1 \rightarrow 3$ в 2,5 раза больше, чем чувствительность при записи перехода $1 \rightarrow 2$

Рис. 2. Зависимость поля E_z в резонансе от давления паров водорода при измерениях на трех длинах волн излучения лазера. Верхнее семейство точек соответствует измерениям на длине волны 78 мкм, среднее — на 84 мкм, нижнее — на 108 мкм

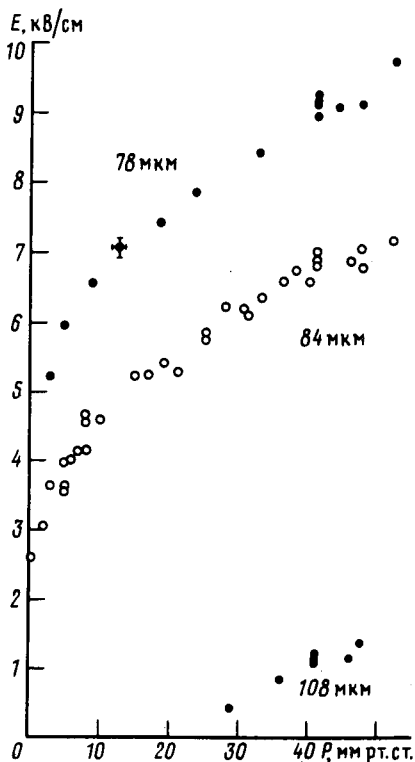


Рис. 2

Оказалось, что уровни энергии электронов существенным образом зависят от давления газовой фазы водорода. На рис. 2 представлена измеренная зависимость поля E_z в резонансе от давления паров водорода на трех длинах волн излучения лазера. Эту зависимость можно объяснить эффектом "квантового преломления" ^{5, 6}, который в подобных электронных системах ранее не наблюдался.

На рис. 3 представлена приведенная к нулевому прижимающему полю зависимость частоты перехода $1 \rightarrow 2$ от концентрации N молекул водорода в газовой фазе. Начальный линейный участок зависимости соответствует диапазону концентраций, в котором $\langle z_1 \rangle \ll N^{-1/3} \ll \langle z_2 \rangle$. Как показано в работе ⁵, частота перехода увеличивается на величину $\hbar a N/m$, где a — длина s -рассеяния электрона на молекуле водорода. По нашим данным $a = -3,1 \pm 0,4 \text{ \AA}$

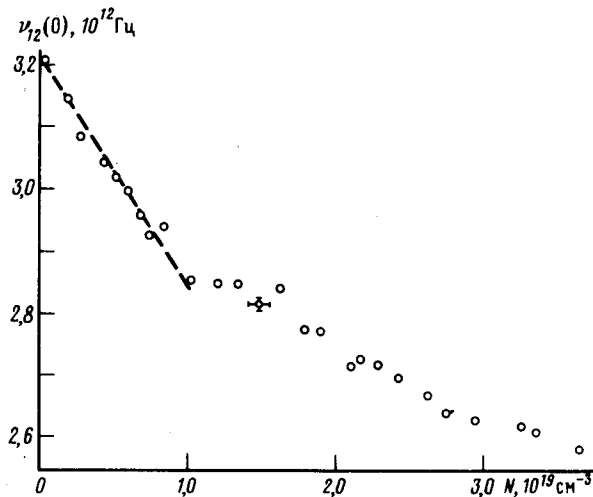


Рис. 3. Зависимость частоты перехода $1 \rightarrow 2$ в нулевом прижимающем поле от концентрации молекул водорода в газовой фазе

В пределе нулевой плотности молекул водорода в газе, частота перехода $1 \rightarrow 2$ оказалась равной $3,2 \pm 0,1 \text{ ТГц}$, что на 32% превышает значение, вычисляемое в простейшей модели при $U_0 \rightarrow \infty$.

Авторы благодарны А.С.Боровику-Романову за внимание к работе, М.С.Хайкину за постановку задачи, В.С.Эдельману и Е.П.Башкину за полезные обсуждения.

Литература

1. Эдельман В.С. УФН, 1980, 130, 675.
2. Трояновский А.М., Володин А.П., Хайкин М.С. Письма в ЖЭТФ, 1979, 29, 65 и 421.
3. Хайкин М.С. Письма в ЖЭТФ, 1978, 27, 706.
4. Завьялов В.В., Богомолов Г.Д. ПТЭ, 1982, №3, 174.
5. Fermi E. Nuovo sim., 1934, 11, 157; Ферми Э. Научные труды, т. 1, 1971, М., с. 611.
6. Башкин Е.П. ЖЭТФ, 1982, 82, 1868.