

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ СДВИГ ЛЭМБОВСКОГО ПРОВАЛА

В МЕТАНЕ НА $\lambda = 3,39$ мкм

С. Н. Багаев, В. П. Чеботаев

В этой работе сообщается о наблюдении температурного сдвига лэмбовского провала в молекулярном газе низкого давления. Как показано в работе [1], при низких давлениях наблюдается резкое уменьшение ударного сдвига лэмбовского провала. Это сделало возможным наблюдение температурного сдвига провала, который по величине и знаку совпадает со сдвигом, обусловленным поперечным эффектом Допплера. Поэтому выполненные эксперименты можно считать первым наблюдением влияния релятивистских эффектов на форму линии поглощения молекул¹⁾ и на воспроизводимость частоты газовых лазеров.

Вследствие релятивистского сокращения времени частота излучения или резонансная частота поглощения движущегося атома (молекулы) испытывает дополнительное красное смещение, зависящее от абсолютной скорости. Частота излучения ω , воспринимаемая неподвижным наблюдателем, дается известным выражением:

$$\omega = \omega_0 \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}{1 - \frac{v_z}{c}}$$

¹⁾ Температурный сдвиг частоты γ -квантов, связанный с поперечным эффектом Допплера, наблюдался ранее в [2, 3] с помощью эффекта Мессбауэра.

где ω_0 — частота излучения неподвижного атома; v — абсолютная скорость атома; v_z — проекция скорости на направление наблюдения; c — скорость света.

В условиях нашего эксперимента ширина лэмбовского провала много меньше доплеровской ширины. В центре линии поле стоячей волны взаимодействует с теми атомами, у которых $v_z \ll \bar{v}$, где \bar{v} — характерная тепловая скорость атомов, равная $\bar{v} = \sqrt{2kT/m}$. Здесь k — постоянная Больцмана, T — температура газа, m — масса атома. Так как средняя поперечная скорость $\bar{v}_2 \sim \bar{v}$, то центр линии излучения ансамбля атомов с фиксированной поперечной скоростью v_r и максвелловским распределением по проекциям скоростей v_z получит красное смещение

$$\Delta\omega = -\frac{1}{2}\left(\frac{v_r}{c}\right)^2\omega_0.$$

Учитывая максвелловское распределение по скоростям и усредняя вклад атомов с различными v_r , получим для сдвига лэмбовского провала

$$\Delta_T = -\frac{1}{2}\left(\frac{\bar{v}}{c}\right)^2\omega_0 = -\frac{kT}{mc^2}\omega_0. \quad (2)$$

В метане, который использовался в описываемых ниже опытах, красное смещение лэмбовского провала при изменении температуры имеет величину $0,52$ *мк/град*. Наблюдение такого сдвига требует относительной точности настройки на центр провала 10^{-13} . Сейчас это стало возможным благодаря прогрессу в области стабилизации частоты газовых лазеров.

Эксперименты проводились со стабилизированными по частоте газовыми лазерами на установке, которая использовалась в [1]. Стабилизация частоты осуществлялась с помощью внутренних метановых ячеек поглощения в He — Ne-лазерах на $\lambda = 3,39$ *мкм*. Лазеры настраивались на центр лэмбовского провала в линии поглощения по пику мощности генерации¹⁾. Статистические свойства излучения и воспроизводимость частоты генерации лазеров описаны в [1].

Температурный сдвиг центра лэмбовского провала наблюдался по смещению частоты генерации одного из лазеров при нагревании его ячейки поглощения. Были приняты меры, которые исключали влияние лазеров друг на друга. Газ в ячейки подавался одновременно, благодаря чему давление в них было практически одинаковым. Эксперименты проводились при различных давлениях метана в диапазоне $4 \cdot 10^{-4} + 10^{-3}$ *тора*. При нагревании ячейки на 200°C плотность газа в ней изменялась не более, чем на 10%. Параметры пика мощности генерации (см. рис. 1) обеспечивали необходимую точность настройки. Разность частот генерации двух лазеров измерялась электронными частотомерами при времени усреднения 1 и 10 *сек*. Результаты измерений в различных сери-

¹⁾ Ссылки на более ранние работы содержатся в [1].

ях экспериментов приведены на рис. 2. Среднеквадратичная ошибка измерений соответствовала кратковременной стабильности частоты генерации при указанных временах усреднения. Точность фиксирования среднего значения частоты и центра провала, как и в [1], составляла несколько герц. В пределах ошибки эксперимента наблюдаемая зависимость оказывается линейной с наклоном $0,5 \pm 0,05$ $\mu\text{ц}/\text{град}$, что согласуется с расчетным наклоном $0,52$ $\mu\text{ц}/\text{град}$.

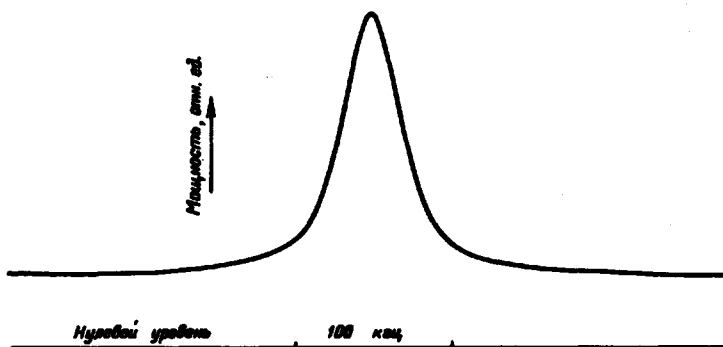


Рис. 1. Запись зависимости мощности генерации от частоты He-Ne-лазера вблизи резонанса поглощения метана. Давление метана в ячейке $\sim 8 \cdot 10^{-4}$ тора

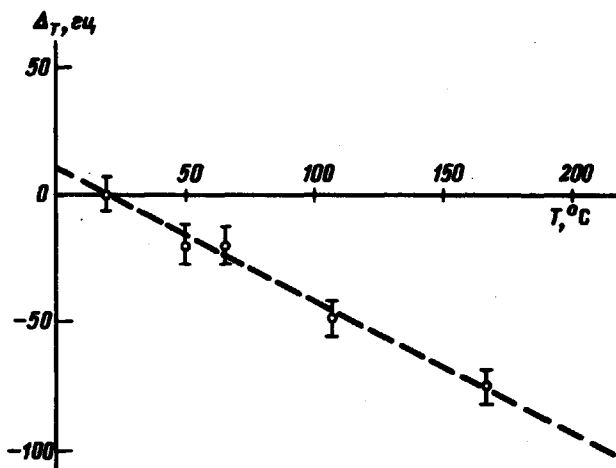


Рис. 2. Смещение частоты излучения лазера, стабилизированного по пику мощности генерации, при нагревании ячейки поглощения. Пунктирная кривая — расчетная по формуле (2)

При рабочих давлениях метана ударный сдвиг лэмбовского провала менее 10 $\mu\text{ц}$. Влияние изменения плотности газа на сдвиг, равно как и изменение сечения рассеяния с ростом скорости сталкивающихся молекул, лежит в пределах ошибки эксперимента. Это обстоятельство и хорошее согласие экспериментальных и теоретических данных показывает, что причиной сдвига является поперечный эффект Доплера.

Отметим, что точность наших опытов сравнима с точностью экспериментов в [2, 3].

Проведенные эксперименты показали, что получение воспроизводимости частоты 10^{-14} в наших условиях требует поддержания температуры с абсолютной точностью 1°C , что, конечно, не представляет больших трудностей. В пролетных системах влияние поперечного эффекта Доплера может быть более сильным.

Мы очень благодарны Г.А. Милушкину и А.К. Маслову за помощь в проведении экспериментов.

Институт физики полупроводников
Сибирское отделение
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
2 ноября 1972 г.

Литература

- [1] С.Н.Багаев, Е.В.Бакланов, В.М.Чеботасв. Письма в ЖЭТФ, 16, 344, 1972.
 - [2] R.V.Pound, G.A.Rebka Jr. Phys. Rev. Lett., 4, 274, 1960.
 - [3] A.J.F.Boyle, D.St.Bunbury, C.Edwards, H.E.Hall. Proc. Phys. Soc., 76, 165, 1960.
-