

Двумерные плазменные возбуждения в неупорядоченном массиве квантовых антиточек

© Ю.Б. Васильев

Физико-технический институт Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия
E-mail: yu.vasilyev@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 2 марта 2022 г.
В окончательной редакции 25 марта 2022 г.
Принята к публикации 25 марта 2022 г.

Экспериментально изучаются плазменные возбуждения в двумерных электронных системах в гетеропереходе AlGaAs/GaAs, содержащем слой самоорганизующихся антиточек на гетерогранице. В магнитном поле в спектрах терагерцового поглощения, полученных методами фурье-спектроскопии, наряду с циклотронным резонансом наблюдается магнитоплазменная мода. С ростом магнитного поля происходит экстремальное уменьшение ширины магнитоплазменной линии, что можно объяснить локализацией плазмонов магнитным полем в неупорядоченном массиве антиточек.

Ключевые слова: плазмон, двумерная электронная система, массив антиточек, гетеропереход, циклотронный резонанс.

DOI: 10.21883/FTP.2022.07.52748.03

1. Введение

Плазменные колебания в двумерных электронных системах изучаются длительное время [1]. Для возбуждения плазмонов с частотой ω_p требуется выполнение условия $\omega_p \tau \gg 1$, где τ — время релаксации электронов. Поэтому эксперименты по изучению плазмонов, как правило, проводятся при криогенных температурах в терагерцовом диапазоне частот. Кроме того, сложность таких исследований связана с тем, что плазменные волны не взаимодействуют со светом в свободном пространстве из-за большого рассогласования их импульсов. Существуют различные подходы для согласования импульсов, основанные на дифракции света, например, формируются низкоразмерные структуры (полоски и диски) [2,3], используется рассеяние света на дифракционных решетках и на различного рода неоднородностях [4]. В качестве альтернативы эффективная связь света с плазменными колебаниями может быть достигнута в периодически модулированных структурах, таких как массив антиточек [5]. В данной работе изучается возбуждение двумерных плазмонов в неупорядоченном массиве квантовых антиточек. Из-за отсутствия периодичности в такой решетке возбуждаются широкие плазменные моды. Приложение магнитного поля приводит к формированию очень узкой магнитоплазменной моды, что можно объяснить локализацией плазмонов магнитным полем.

2. Образцы и методика эксперимента

Образцы, используемые в эксперименте, состоят из инвертированного одиночного гетероперехода AlGaAs/GaAs с массивом самоорганизованных кванто-

вых островков AlInAs, сформированных в плоскости перехода на поверхности AlGaAs. Данные, полученные с помощью сканирующей туннельной и атомно-силовой микроскопии, показывают, что островки имеют круглую форму с диаметром от 6 до 12 нм и „высотой“ в направлении роста ~ 1 нм. Их концентрация порядка 10^{11} см^{-2} , таким образом, среднее расстояние между ними ~ 10 нм. Из-за более высокой энергии минимума зоны проводимости и ширины запрещенной зоны AlInAs по сравнению с GaAs, островки AlInAs представляют собой области, свободные от электронов, и поэтому обладают характеристиками антиточек, обеспечивая короткодействующий отталкивающий потенциал для электронов в GaAs. Далее представлены результаты исследования образца с концентрацией электронов $n_s = 0.52 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$, в котором изменение концентрации электронов осуществлялось с помощью верхнего металлического затвора.

Двумерные плазменные возбуждения в двумерном электронном газе (2DEG) гетероперехода изучались методом терагерцового поглощения при температуре $T = 2 \text{ К}$ с использованием фурье-спектрометра в магнитных полях до 12 Тл, приложенных перпендикулярно к образцу. Все спектры были нормализованы к спектру в отсутствие магнитного поля, чтобы исключить влияние подложки на измерения. Концентрация носителей 2DEG при различных напряжениях на затворе оценивалась из осцилляций Шубникова–де Гааза.

3. Результаты и обсуждение

Типичный вид линий терагерцового поглощения показан на рис. 1 для образца с плотностью носителей $n_s = 0.52 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$. Спектры поглощения были полу-

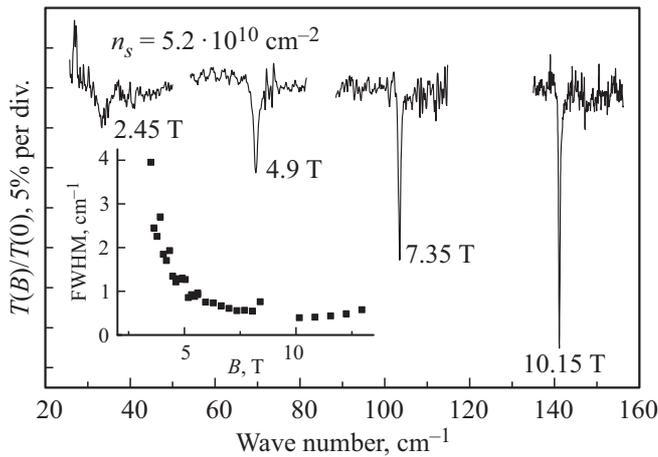


Рис. 1. Спектры поглощения при фиксированных магнитных полях и ширина линии в зависимости от магнитного поля B .

чены при фиксированных магнитных полях. Видно, что ширина линии сильно уменьшается с ростом магнитного поля и становится очень узкой при больших магнитных полях. Измеренные спектры были проанализированы путем оценки полной ширины на половине максимума (FWHM), которая отложена как функция магнитного поля на вставке к рис. 1. Величина FWHM равна 1 см^{-1} при магнитных полях $\sim 4 \text{ Тл}$ и далее плавно уменьшается до 0.4 см^{-1} для более сильных полей. Столь малая ширина линии является неожиданной для такой неупорядоченной системы. В слабых магнитных полях транспортная подвижность, определенная по измерениям Шубникова–де Гааза, $\mu_T = 9.3 \cdot 10^4 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ согласуется с ожидаемой низкой транспортной подвижностью из-за рассеяния на антиточках InAlAs. Очень узкая линия поглощения предполагает, что рассеяние электронов резко уменьшается при увеличении магнитного поля.

Измеренные линии поглощения хорошо согласуются с расчетами по формуле для модели затухающего осциллятора [6]:

$$A \propto \frac{\gamma}{\gamma^2 + (\omega - \omega_+/\omega)^2},$$

где A — коэффициент поглощения, ω_+ — частота плазмона, а $\gamma = 1/\tau$ — скорость релаксации плазмона. Пример такой подгонки представлен на рис. 2, *a*. Из расчетных кривых получаем время релаксации плазмона τ , которое линейно зависит от величины магнитного поля, как видно из рис. 2, *b*, и может достигать сотен пикосекунд.

Классическое баллистическое движение 2D-электронов, взаимодействующих с неупорядоченной решеткой антиточек в магнитном поле, было рассчитано в работе [7]. Помимо обычного перколяционного фазового перехода, связанного с геометрическими размерами, был найден порог магнитной перколяции, разделяющий неограниченное движение для большого циклотронного

радиуса R и полную локализацию электронов при малых R . Это связано с существованием локализованных траекторий в двумерной электронной системе. Первый тип траекторий — это круговые траектории, на которых отсутствуют любые столкновения. Другой вид — розеткообразные траектории, возникающие в результате возврата свободной траектории в магнитном поле к точке ее старта на антиточке. В достаточно слабом магнитном поле большинство траекторий пересекается с множеством антиточек, поэтому локализованные траектории встречаются редко. Средняя вероятность того, что электрон не столкнется с антиточками, определяется циклотронным радиусом электронов R на поверхности Ферми. Эта доля локализованных траекторий растет с ростом магнитного поля. Среди траекторий рассеяния есть как локализованные, так и делокализованные. Если магнитное поле достаточно велико, делокализованные траектории исчезают, потому что циклотронный диаметр становится меньше расстояния между поверхностями антиточек. Подобные рассуждения применимы для плазмонов, если вместо одного электрона рассмотреть коллективные воз-

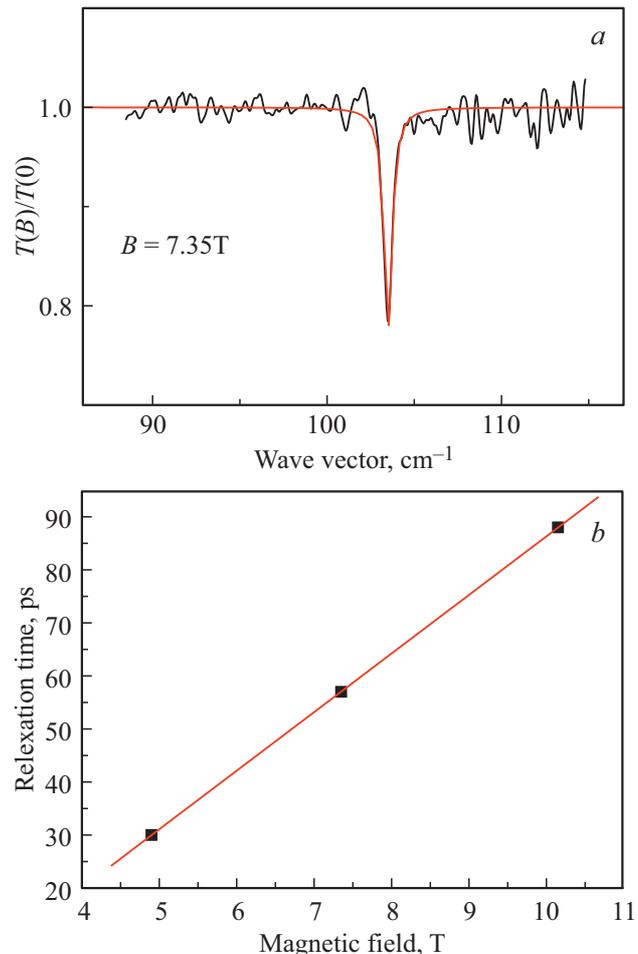


Рис. 2. *a* — подгонка линии терагерцового поглощения в магнитном поле 7.35 Тл согласно формуле для модели затухающего осциллятора; *b* — зависимость времени релаксации плазмонов от величины магнитного поля.

буждения. Плазмон можно связать с волной, распространяющейся внутри области ограниченной антидотками. Коллективное движение электронов становится локализованным в достаточно сильных магнитных полях. Формирование локализованных плазмонов сопровождается уменьшением ширины линии поглощения. Более того, экстремально узкая спектральная ширина плазменной моды указывает на коллективный эффект. Когда дифрагированная волна, возникшая при рассеянии света на антидотках, распространяется в плоскости массива, она может соединить вместе локализованные плазмонные резонансы, связанные с отдельными антидотками, что приведет к резкому сужению плазмонных резонансов.

4. Заключение

Таким образом, в работе представлены результаты экспериментального исследования сужения линии терагерцового поглощения в неупорядоченном массиве антидоток в сильных магнитных полях, которое объясняется локализацией плазмонов магнитным полем.

Благодарности

Выражаем благодарность М. Цунделю за изготовление образцов.

Конфликт интересов

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] В.М. Муравьев, И.В. Кукушкин. УФН, **190**, 1041 (2020).
- [2] В.М. Муравьев, А.А. Фортунатов, А.А. Дремин, И.В. Кукушкин. Письма ЖЭТФ, **92**, 513 (2010).
- [3] V.M. Muravev, A.M. Zarezin, P.A. Gusikhin, A.V. Shupletsov, I.V. Kukushkin. Phys. Rev. B, **100**, 205405 (R) (2019).
- [4] J. Łusakowski. Semicond. Sci. Technol., **32**, 013004 (2016).
- [5] S. Cina, D.D. Arnone, H.P. Hughes, C.L. Foden, D.M. Whittaker, M. Pepper, D.A. Ritchie. Phys. Rev. B, **60**, 7780 (1999).
- [6] S. Boubanga-Tombet, W. Knap, D. Yadav, A. Satou, D.B. But, V.V. Popov, I.V. Gorbenko, V. Kachorovskii, T. Otsuji. Phys. Rev. X, **10**, 031004 (2020).
- [7] E.M. Baskin, M.V. Entin. Physica B, **249–251**, 805 (1998).

Редактор Г.А. Оганесян

Two-dimensional plasma excitations in a random array of quantum antidots

Yu.B. Vasilyev

loffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract Plasmon excitations in two-dimensional electron systems in an AlGaAs/GaAs heterojunction containing a layer of self-organizing antidots at the heterointerface are experimentally studied. In a magnetic field, in the terahertz absorption spectra obtained by Fourier spectroscopy, along with the cyclotron resonance, a magnetoplasmon mode is observed. With an increase in the magnetic field, an extreme decrease in the width of the magnetoplasmon line occurs, which can be explained by the localization of plasmons by the magnetic field in a random array of antidots.