

УДК 537.9, 538.91, 538.915

ТУННЕЛЬНЫЕ ПОЛЯРОННЫЕ ЭФФЕКТЫ И ПЛОТНОСТЬ СОСТОЯНИЙ НА УРОВНЕ ФЕРМИ ДВУМЕРНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ

И. Н. Котельников^{1,2}, С. Е. Дижур¹, Н. А. Мордовец¹

¹ Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия

² International Laboratory of High Magnetic Fields and Low Temperatures, Wroclaw, Poland

Статья получена 25 декабря 2014 г.

Аннотация. Исследовались туннельные структуры Al/дельта-GaAs с сильным беспорядком в двумерной электронной системе дельта-слоя. В некоторых структурах за счет диамагнитного сдвига уровней удалось добиться изменения формы фононных линий и достижения условий близости к резонансному поляронному состоянию. Показано, что в последнем случае это может приводить к немонотонной зависимости туннельной плотности состояний на ферми-уровне от магнитного поля.

Ключевые слова: туннельная спектроскопия, двумерные электронные системы, туннельная плотность состояний.

Abstract: We investigated the tunneling structure Al/ δ -GaAs with a strong disorder in two-dimensional electron system of the δ -layer. In some structures due to the diamagnetic shift of the levels we archived changing of the shape of the phonon lines and conditions close to the resonant polaron state. It is shown that in the latter case, this can lead to a nonmonotonic dependence of the tunneling density of states at the Fermi level on the magnetic field.

Key words: tunneling spectroscopy, two-dimensional electron systems, tunneling density of states.

Введение

В двумерной электронной системе (ДЭС) высокой плотности с

беспорядком эффекты межэлектронного взаимодействия проявляются, в том числе, и как подавление плотности состояний на ферми-уровне [1]. Это приводит к появлению в туннельных спектрах ДЭС аномалии при нулевом смещении (АНС), типа провала $\Delta\sigma$ в проводимости σ , что позволяет изучать в туннельных экспериментах квантовые поправки к плотности состояний в условиях диффузии [2-4]. Согласно данным, полученным на туннельных структурах Al/ δ -GaAs [4], основной вклад в АНС (квантовая поправка для плотности состояний на поверхности Ферми ДЭС) и в её поведение температурой и напряжением смещения дает нижайшая подзона E_0 при двух заполненных двумерных подзонах в дельта-легированном слое GaAs. Однако, влияние на АНС вышележащих заполненных подзон также нельзя исключать. Именно для этих подзон в дельта-легированных слоях наблюдались поляронные эффекты, которые могут приводить к перенормировке спектра ДЭС. Это резонансные поляронные состояния, когда расстояния между уровнями ДЭС оказывается кратны энергии $\epsilon_{LO}=36.5$ мэВ оптического фона в GaAs [5,6], и поляронные линии (типа «производная пика») при смещениях $U=36.5$ мВ, которые отвечают логарифмическим особенностям в собственной энергии электронов [5,7]. Зависимость от магнитного поля для АНС может проявить наличие такого влияния в условиях изменения положения подзон за счет диамагнитного сдвига уровней ДЭС. В настоящей работе исследуется наиболее интересный случай диамагнитного сдвига подзон вблизи резонансных состояний с оптическими фононами, когда условия рассеяния при взаимодействии с фононами затрагивают состояния вблизи ферми-уровня ДЭС.

Результаты

При гелиевых температурах исследовались изготовленные молекулярно-лучевой эпитаксией структуры Al/ δ -GaAs [4], где по данным туннельной спектроскопии и холловским измерениям концентрации двумерных носителей в δ -легированном канале составляли $2-4 \cdot 10^{12}$ см⁻², при этом две подзоны (E_0 и E_1) были заполнены. Измерения проводились при гелиевых температурах в

магнитных полях B_{\parallel} вдоль δ -слоя.

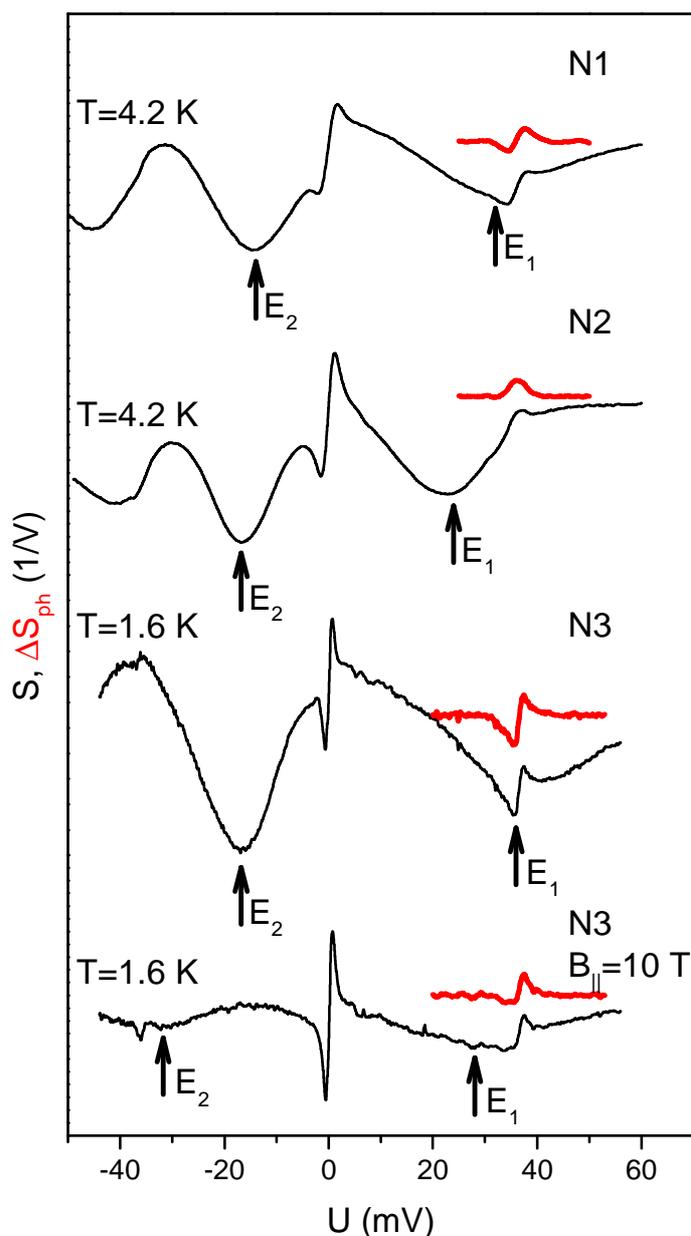


Рис.1. Туннельные спектры S для трёх образцов с разными положениями подзоны E_1 , а для образца №3 и в магнитном поле $B_{\parallel}=10$ Тл. Стрелками отмечены положения двумерных подзон в δ -легированном канале и показаны фонные линии ΔS_{ph} , выделенные из фона.

На Рис.1 показаны туннельные спектры (логарифмические производные туннельной проводимости $S=d(\ln\sigma)/dU$) трёх образцов в области малых смещений. Здесь видны широкие провалы в спектрах, отвечающие положениям

двумерных подзон: пустая E_2 и вторая заполненная E_1 . В этих образцах основная (заполненная) подзона E_0 отвечает напряжениям смещения $U > 100$ мВ и не показана на рисунке. На туннельных спектрах напряжение смещения $U = 0$ соответствует уровню Ферми ДЭС, $U > 0$ отвечает туннелированию электронов из заполненных состояний ДЭС δ -слоя в металлический электрод из, $U < 0$ – из металла в пустые состояния δ -слоя.

Видны также АНС при $U = 0$ и фоновые особенности при $U = 36.5$ мВ. Причем полярные фоновые особенности типа «производная пика» наблюдались в туннельных спектрах, когда положения подзоны $E_1 \geq 36.5$ мэВ. При $E_1 < 36.5$ мэВ наблюдались только линии неупругого туннелирования, как в нулевом магнитном поле (образец №2), так и при диамагнитном сдвиге двумерной подзоны E_1 в образце №3. По-видимому, полярная особенность, связанная с подзоной E_0 имеет слишком малую амплитуду из-за низкой подвижности в этой подзоне (см., например, [4]).

Наряду с изменением формы фоновых линий в магнитном поле положение подзон E_2 и E_1 (с учетом ширины двумерных уровней) в образце №3 оказались близки к полярному резонансу, когда разность $E_2 - E_1 \sim 2 * \epsilon_{LO}$. Это демонстрирует Рис.2, где приведены положения минимумов, соответствующие этим подзонам, в зависимости от магнитного поля. Видно, что при $B_{||} > 10$ Тл расстояния между E_2 и E_1 (с точностью до уширения уровней) становятся близки к полярному резонансу. Следовательно, в этом случае можно ожидать перенормировки спектра ДЭС, что может отразиться на поведении АНС с магнитным полем. В случае образца №2 разность $E_2 - E_1$ была далека от такого резонанса, как это следует из Рис.1. Однако, в отличие от образца №3, здесь наблюдаемая линия оптических фононов соответствует неупругому туннелированию из ДЭС.

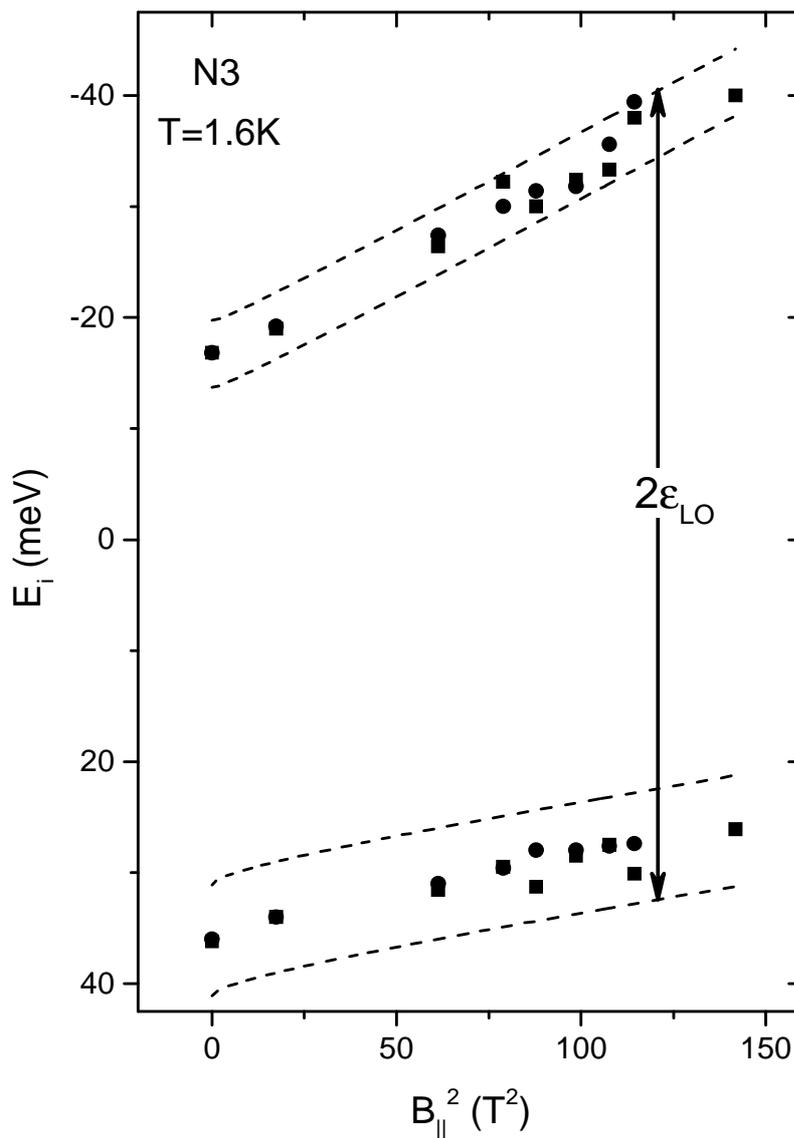


Рис.2. Положения подзон E_2 и E_1 в зависимости от квадрата магнитного поля $B_{||}$ для образца №3. Штриховыми линиями показаны ширины подзон E_2 и E_1 .

Провал в плотности состояний на уровне Ферми хорошо виден и на зависимости туннельной проводимости от смещения (см. Рис.3). После выделения этого провала $\Delta\sigma$ из сопутствующего фона можно было получить величину $\Delta\sigma/\sigma = \Delta\sigma(U=0)/\sigma_{\text{bkg}}(U=0)$ и проследить изменение этого провала с

магнитным полем. Процедура выделения АНС из фона туннельной проводимости σ показана на Рис.3.

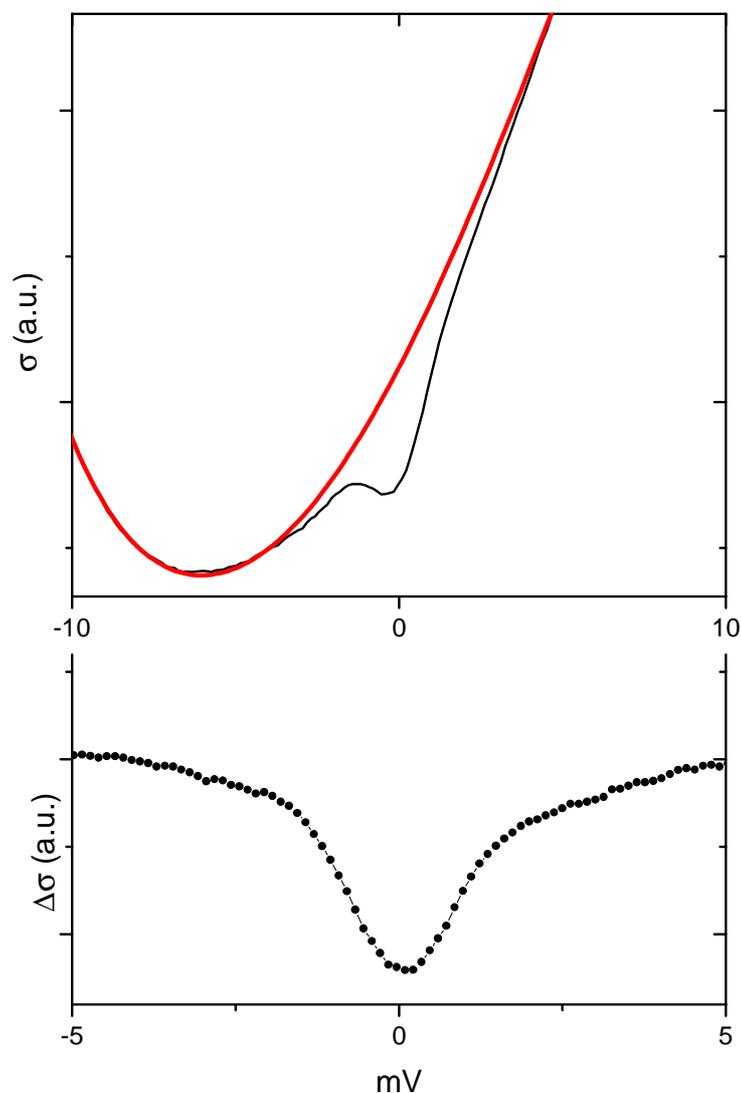


Рис.3. На верхнем рисунке показана туннельная проводимость σ (черная кривая) и фон σ_{bkg} (красная) при малых смещениях U . На нижнем рисунке – разность $\Delta\sigma = \sigma - \sigma_{\text{bkg}}$. Величина $\Delta\sigma/\sigma$, характеризующая величину провала в плотности состояний на поверхности Ферми, вычислялась как $\Delta\sigma/\sigma = \Delta\sigma(U=0)/\sigma_{\text{bkg}}(U=0)$.

Поведение АНС с магнитным полем для двух образцов показано на Рис.4, где построена величина $\Delta\sigma/\sigma$ после вычитания фона, как описано в выше. Для образца №3 наблюдается характерная немонотонная зависимость АНС от

магнитного поля. При этом кроме близости к полярному резонансу (см. Рис.2) вблизи $B_{||} \sim 10$ Тл меняется также и форма фоновой линии.

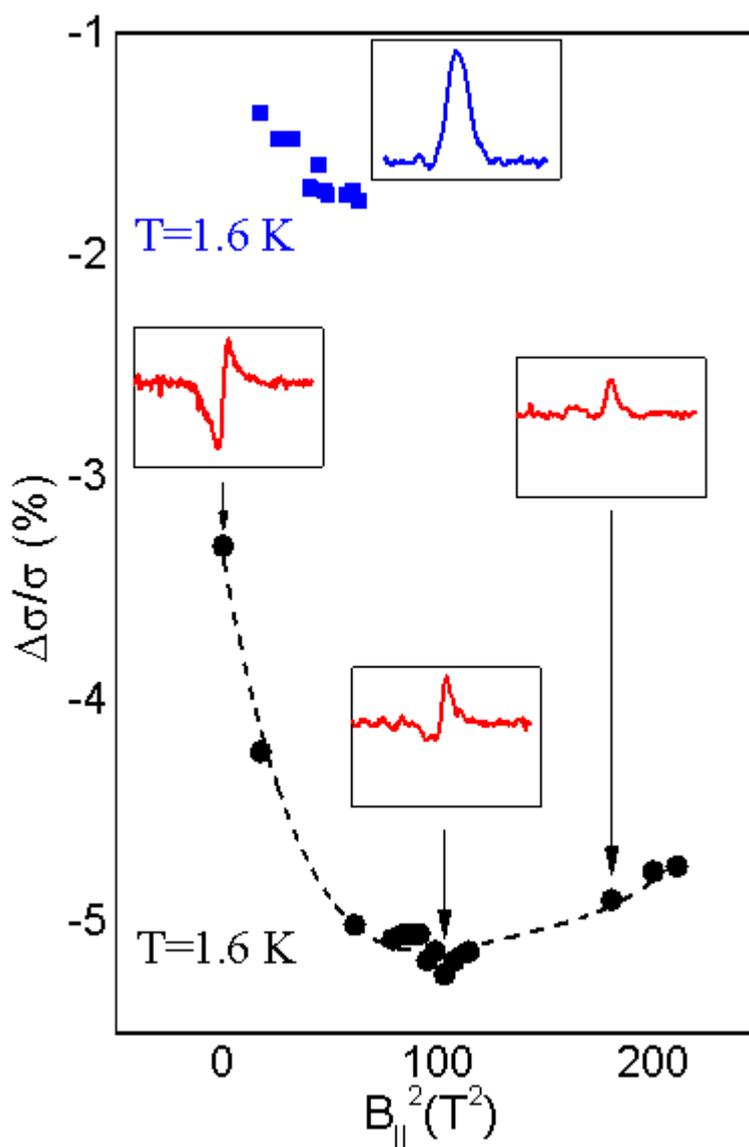


Рис.4. Зависимость АНС, провала в туннельной плотности состояний $\Delta\sigma/\sigma$, от квадрата магнитного поля для образцов №2 (верхние квадраты) и №3 (нижние кружки). На вставках показаны формы фоновых линий.

Чтобы определить, какая из этих двух причин влияет на поведение $\Delta\sigma/\sigma$, мы измерили зависимость $\Delta\sigma/\sigma(B_{||})$ для образца №2, в котором уже при $B_{||}=0$ наблюдалась линия неупругого туннелирования с участием оптических фононов (верхняя кривая и вставка на Рис.4). Видно, что в этом случае

сохраняется такое же поведения АНС с магнитным полем, как и на начальном участке кривой $\Delta\sigma/\sigma(B_{||})$ (при $B_{||} < 10$ Тл). Таким образом именно достижение близости к поляронному резонансу приводит к изменению характера поведения провала в плотности состояний на уровне Ферми с магнитным полем. Это может быть связано с ростом эффективной массы двумерных электронов [8] в условиях поляронного резонанса, и как следствие, уменьшения глубины провала в плотности состояний [4].

Заключение

Таким образом показано, что поляронное взаимодействие во второй заполненной (E_1) подзоне ДЭС может изменить величину провала в туннельной плотности состояний. При этом именно перенормировка квазичастичного спектра в подзоне E_1 ДЭС δ -слоя за счет поляронного резонанса, а не смена механизмов рассеяния с участием оптических фононов, влияет на зависимость от магнитного поля плотности состояний (АНС) на уровне Ферми ДЭС.

Настоящая работа поддерживается РФФИ (грант № 13-02-01114).

Литература

1. B.I. Altshuler, A.G. Aronov, in "Electron-electron interaction in disordered systems", edited by A.L. Efros and M. Pollak, Elsevier, Amsterdam (1985), Ch. 1.
2. E.V. Sukhorukov, A.V. Khaetskii, Anisotropy of zero-bias diffusive anomalies for different orientations of an external magnetic field. // Phys.Rev.B, 1997, V.56, N.3, P.1456-1460.
3. G.M. Minkov, A.V. Germanenko, S.A. Negachev et al, Magnetic-field-dependent zero-bias diffusive anomaly in Pb oxide–n-InAs structures: Coexistence of two- and three-dimensional states, //Phys.Rev.B, 1999, V.59, N.20, P.13139-13146.
4. И.Н. Котельников, С.Е. Дижур, Е.Н. Морозова и др., Туннельная аномалия при нулевом смещении в двумерной электронной системе с беспорядком //ПЖЭТФ, 2012, Т.96, №9, С. 646-650.

5. И.Н. Котельников В.А. Кокин, Ю.В. Федоров и др., Межподзонные резонансные поляроны в туннельных переходах Al/delta-GaAs // ПЖЭТФ, 2000, Т. 71, № 9, С. 564-569.
6. С.Е. Дижур, И.Н. Котельников, Е.М. Дижур, Отражение электронов при туннелировании и межподзонный резонансный полярон в двумерной электронной системе дельта-слоя в GaAs // Радиотехника и электроника, 2006, Т. 51, №5, С. 625-632.
7. G. D. Mahan, Many-particle physics (New York: Kluwer) Ch.7, Sec.7.3, 2000.
8. A.S. Alexandrov and J.T. Devreese, Advance in Polaron Physics, //Springer Series in Solid-State Sciences, Vol.159 (Springer-Verlag, Heidelberg, 2010).