

СПЕКТРАЛЬНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПОДВИЖНОСТИ ФОТОВОЗБУЖДЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В ЧИСТОМ GaAs

В.В.Бельков, Ф.Г.Ликус

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе АН СССР
194021, Санкт-Петербург

Поступила в редакцию 6 августа 1991 г.

Исследована фотопроводимость чистого GaAs в условиях разогрева электронов в электрическом СВЧ поле. Впервые обнаружена резкая зависимость величины времени релаксации импульса от длины волны возбуждающего излучения.

Метод циклотронного резонанса (ЦР) является эффективным способом исследования транспорта свободных носителей заряда в полупроводниках. Полуширина линии ЦР ΔH связана с величиной времени релаксации импульса τ_p соотношением $\Delta H/H_c = \omega \tau_p$, где ω - частота СВЧ поля, H_c - резонансное значение магнитного поля. Исследования ЦР в микроволновом диапазоне, когда $\hbar\omega < kT$, позволили изучить механизмы рассеяния и определить величины подвижности носителей в Ge, Si и чистом GaAs¹⁻³.

В настоящей работе исследовался ЦР на неравновесных горячих электронах в чистых эпитаксиальных слоях GaAs (концентрация примесей $N_i < 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, подвижность электронов $\mu = 2 \cdot 10^6 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ при температуре 1,8 К³) в 8-миллиметровом диапазоне при $T = 1,8 \text{ К}$. Образец находился в короткозамкнутом отрезке волновода в пучности электрического поля. Изменяя уровень подаваемой в волновод СВЧ мощности P можно было варьировать температуру электронного газа T_e . Образец освещался светом He-Ne-лазера с длиной волны 6328Å или лампы накаливания. В последнем случае свет пропускался через монохроматор, что позволяло варьировать длину волны возбуждающего излучения. Регистрировалась величина СВЧ мощности Σ , поглощенной неравновесными носителями заряда. Постоянное магнитное поле направлено параллельно поверхности образца.

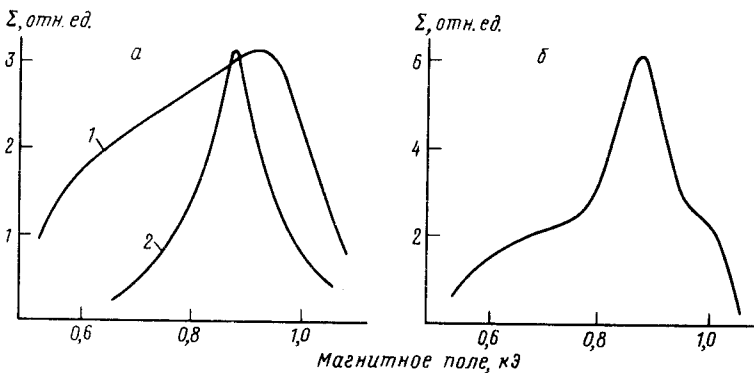


Рис. 1. Линии ЦР, полученные при междузонной подсветке (1) и возбуждении в основное экситонное состояние (2), $P = 2,5 \text{ мВт}$

На рис.1а показаны линии ЦР в условиях сильного разогрева носителей при двух различных длинах волн возбуждающего излучения: линия 1 при

возбуждении светом с $\lambda_1 = 6328\text{\AA}$, линия 2 - при возбуждении основного состояния экситона, $\lambda_2 = 8182\text{\AA}$. Во втором случае свободные носители образовывались в результате ударной ионизации экситонов. Отметим, что в условиях слабого разогрева при мощности СВЧ поля $P \gtrsim P_0$ ($P_0 \approx 0,2$ мВт - пороговое значение мощности, соответствующее началу ударной ионизации экситонов в условиях ЦР) форма линии ЦР практически не зависит от длины волны возбуждающего излучения. При увеличении величины мощности P кривые ЦР, полученные при возбуждении светом с длиной волны λ_1 и λ_2 , существенно различаются (рис.1а). В условиях разогрева форма линии ЦР при возбуждении основного экситонного состояния (или первого возбужденного состояния) изменяется мало, тогда как при междузонной засветке полуширина линии ЦР ΔH при увеличении T_e монотонно возрастает. Это означает, что в условиях разогрева величина времени релаксации импульса τ_p существенно зависит от энергии возбуждающего кванта. При одновременном возбуждении образца светом He-Ne-лазера с $\lambda = \lambda_1$ и светом с $\lambda = \lambda_2$ кривая ЦР, изображенная на рис.1б, представляла собой суперпозицию линий 1 и 2 рис.1а. Этот результат показывает, что в условиях разогрева СВЧ полем неравновесные электроны, создаваемые междузонным светом и в процессе ударной ионизации рожденных светом экситонов, пространственно разделены. В слабом СВЧ поле, когда время жизни экситона за счет ударной ионизации τ_{ex} много больше времени его свободного пробега ϑ_{ex} , причины такого разделения состоят в следующем: в условиях слабого разогрева ($P \gtrsim P_0$) созданные светом с $\lambda = \lambda_2$ вблизи поверхности экситоны диффундируют вглубь кристалла и лишь затем ионизируются горячими носителями. В результате электроны, возникающие при ударной ионизации экситонов, расположены в области толщиной порядка диффузионной длины экситона $L_{ex} \approx 1,0$ мкм⁴, в то время как при междузонной засветке электроны рождаются в тонком слое толщиной $L_e \propto 1/\alpha_e \ll L_{ex}$ (здесь α_e - коэффициент поглощения света при междузонном возбуждении). В сильном СВЧ поле ($P \gg P_0$) время жизни экситона резко уменьшается и может оказаться сравнимым с временем свободного пробега. В этом случае экситоны не будут уходить из области, в которой они рождаются. Но при таком малом времени жизни уменьшается коэффициент поглощения возбуждающего света α_{ex} и возрастает толщина слоя, в котором рождаются экситоны, и, соответственно, возникающие при их ионизации электроны. Действительно, в условиях ЦР при подаче на образец СВЧ мощности $P \propto 3$ мВт интенсивность экситонной люминесценции, а, следовательно, и величина времени жизни экситонов τ_{ex} , уменьшается более чем в 10^3 раз. При этом τ_{ex} становится порядка времени релаксации импульса $\vartheta_{ex} \propto 10^{-12}$ с⁵, что должно приводить к уменьшению коэффициента поглощения.

Об изменении коэффициента экситонного поглощения чистого GaAs в сильном СВЧ поле свидетельствует вид спектров микроволновой фотопроводимости, полученных в условиях ЦР (рис.2). Из рис.2 видно, что с ростом разогрева носителей ширина экситонных линий спектра фотопроводимости растет (видны две линии, соответствующие основному и первому возбужденному состоянию), что свидетельствует об уменьшении коэффициента поглощения.

Таким образом, электроны, возникающие в результате ударной ионизации экситонов и при междузонной засветке, пространственно разделены: в первом случае электроны рождаются в объеме полупроводника и полуширина линии ЦР для них слабо зависит от величины СВЧ поля. Во втором случае все электроны находятся в тонком слое вблизи поверхности образца. Если толщина слоя меньше ларморовского радиуса R_L (при температуре электронов $T_e = 10$ К $R_L \approx 1,5$ мкм), то электроны могут сталкиваться с поверхностью кристалла,

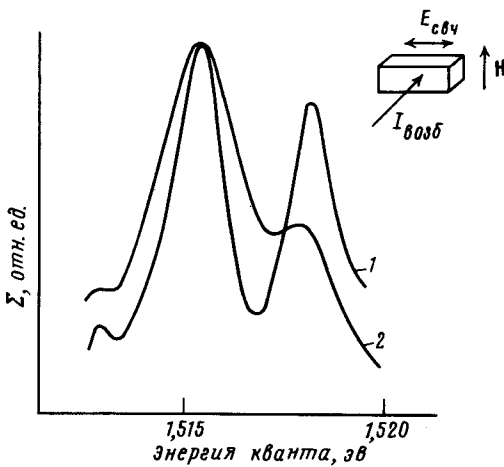


Рис. 2. Вид спектров микроволновой фотопроводимости в области экситонного резонанса в условиях слабого (1 - $P = 0,35$ мВт) и сильного (2 - $P = 2,3$ мВт) разогрева электронов. На вставке показана геометрия эксперимента

что приводит к уменьшению времени релаксации импульса. Уширение линии ЦР в этом случае сильно зависит от разогрева электронов, поскольку с увеличением напряженности поля возрастает ларморовский радиус электронов, и, соответственно, роль рассеяния на поверхности.

Все изложенное выше справедливо для случая, когда магнитное поле параллельно поверхности образца ($\vec{H} \perp \vec{n}$, где \vec{n} - вектор нормали к поверхности). В геометрии $\vec{H} \parallel \vec{n}$ наблюдалось существенно меньшее уширение линии ЦР с ростом мощности СВЧ поля, поскольку в этом случае плоскость циклотронной орбиты электронов параллельна поверхности кристалла.

Уменьшение коэффициента экситонного поглощения в постоянном электрическом поле наблюдалось ранее как в объемном GaAs⁵, так и в структурах с квантовыми ямами⁶. Однако в обоих случаях речь шла об уменьшении времени жизни экситонного состояния за счет полевой ионизации экситонов при напряженности электрического поля $E > E_0 \approx E_i/a_B = 3 \cdot 10^3$ В/см, где E_i - энергия связи экситона, а a_B - боровский радиус экситона. В этих же условиях ($E > E_0$) начиналось и гашение экситонной люминесценции. Это означает, что в используемых в⁵ образцах чрезвычайно низка подвижность электронов, поэтому в них и не наблюдались эффекты, связанные с ударной ионизацией.

Таким образом, обнаруженная в работе резкая зависимость времени релаксации импульса горячих электронов от энергии возбуждающего кванта обусловлена рассеянием носителей на поверхности кристалла и изменением коэффициента поглощения света вблизи экситонного резонанса в условиях ударной ионизации экситонов.

1. Fukai M., Kawamura H., Sekido K., Imai I. J. Phys. Soc. Jpn., 1964, 19, 30.
2. Otsuka E. J. Appl. Phys. Part. 1, 1986, 25, 3303.
3. Ашкинадзе Б.М., Бельков В.В., Красинская А.Г. ФТП, 1990, 24, 572.
4. Жилиев Ю.В., Маркарян Г.Р., Россин В.В. и др. ФТТ, 1986, 28, 2688.
5. Schultheis L., Kohler K., Nu C.W. Phys. Rev. B, 1987, 36, 6809.
6. Miller D.A.B., Chemla D.S., Damen T.C. et al. Phys. Rev. B, 1985, 32, 1043.