

ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ С ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЕМ

*В.Амбразевичене, Р.Бразис, С.Качюлис
А.Кунигелис, Й.Паршылюнас, П.Шикторов*

На основе измерений магнитосопротивления и численных экспериментов показано, что в n -GaAs при 77 К в электрическом и магнитном полях электроны в Γ -долине, вследствие неупругого рассеяния на полярных оптических фононах, разделяются на две группы, и при этом возможна отрицательная дифференциальная проводимость.

Система свободных электронов в полупроводнике при доминирующем неупругом рассеянии на оптических фононах $\hbar\omega_0$ в скрещенных электрическом E_0 и магнитном B_0 полях может разделиться на две группы: в од-

ной электроны набирают энергию $\epsilon \geq \hbar\omega_0$, после чего за время τ^+ теряют ее на испускание фонана и повторяют этот "пролетный" цикл движения, в другой — совершают циклотронное вращение с частотой $\omega_c = eB_0/m$ в течение времени $\tau^- \gg \tau^+$, занимая в пространстве скоростей веретенообразную область с центром $v_c = E_0/B_0$, где $v_c < v_0 = \sqrt{2\hbar\omega_0/m}$. Гальваномагнитные явления в такой системе анализировались в [1] и наблюдались в AgCl и AgBr [2] в условиях $\omega_c\tau^+ \rightarrow 0$ и $\omega_c\tau^- \gg 1$. Однако, аналитическая модель [1, 2] не дает возможности решить вопрос о разделении электронов в полупроводниках типа GaAs, где константа связи электронов с полярными оптическими (ПО) фонанами, $\alpha_{\text{ПО}}$, по крайней мере на порядок меньше, чем в AgCl и AgBr, и могут выполняться лишь весьма мягкие условия $\omega_c\tau^+ \leq 1$ и $\omega_c\tau^- \gg 1$.

Интерес к этому вопросу стимулируется предсказаниями падающих участков на статических вольт-амперных характеристиках (ВАХ) [3], а также наблюдениями генерации гармоник и усиления СВЧ колебаний в *n*-GaAs при $T = 77\text{K}$ [4], в полях E_0 и B_0 , необходимых для возникновения двух групп электронов в Γ -долине.

В настоящей работе на примере *n*-GaAs при $T = 77\text{K}$ получены результаты, доказывающие разделение электронов на группы в условиях $\omega_c\tau^+ \leq 1$ и $\omega_c\tau^- \geq 1$, и указано, что, благодаря этому разделению возможна отрицательная дифференциальная проводимость (ОДП) при наличии небольшой постоянной составляющей поля $E_{0y} \parallel B_0$ ($E_{0y} \ll E_{0x}$).

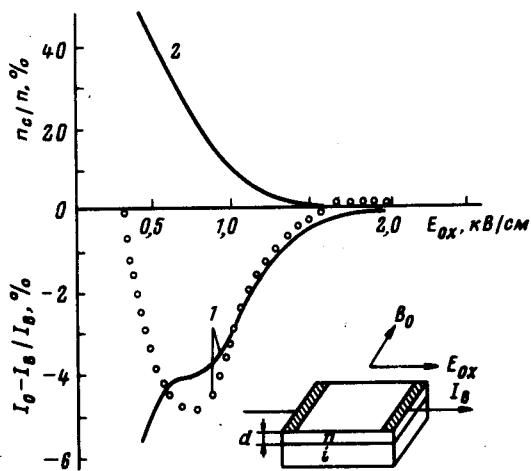


Рис. 1. Полевая зависимость поперечного магнитосопротивления (1) и отношения числа n_c электронов в "веретене" к полному числу n электронов в единице объема (2) для *n*-GaAs в конфигурации Холла (врезка). Результаты измерений — точки, численных экспериментов — сплошные линии. $n = 1 \cdot 10^{15} \text{см}^{-3}$, $B_0 = 0,5 \text{ Тл}$, $T = 77 \text{ К}$, $d = 10,3 \text{ мкм}$, i — изолирующая подложка

1. Для доказательства разделения электронов на группы в *n*-GaAs при 77 К проведены измерения полевой зависимости магнитосопротивления в конфигурации Холла (рис. 1, врезка). В такой конфигурации в условиях $v_0/2 < v_c < v_0$ интенсивное ПО-рассеяние может привести к отрицательному магнитосопротивлению (ОМС) как из-за искривления "пролетных" траекторий электронов в импульсном пространстве [1], так и из-за наличия высокоподвижных электронов в "веретене" [3, 5]. Последние создают сильное холловское поле $E_H = \omega_c\tau^- E_{0x}$ и, двигаясь

перпендикулярно к полному полю $E_t = E_H + E_{ox}$ с дрейфовой скоростью $v_c = E_t/B_0$, дают большой вклад в ток. Результаты измерений ОМС, проведенных по интегральной СВЧ методике [6] показаны на рис. 1 (точки). Там же (кривая 1) показаны результаты численного моделирования ОМС методом Монте-Карло, которое проводилось при использовании следующих параметров *n*-GaAs: $\hbar\omega_0 = 36,2$ мэВ, $\alpha_{по} = 0,067$, эффективная масса $m = 0,066m_0$, коэффициент непараболичности Γ -долины $\alpha_m = 0,62$ эВ⁻¹. Учитывалось рассеяние на ионизованных примесях с концентрацией $N_i = 1 \cdot 10^{15}$ см⁻³ и упругое рассеяние на акустических фононах. Использовалась трехдолинная модель зоны проводимости GaAs [7], что позволило убедиться в непричастности междолинных переходов к ОМС в рассматриваемой области полей. В области $E_{ox} > > 500$ В/см, где хорошо выполняется условие упругости акустического рассеяния и где веретенообразная область уже не охватывает дна зоны проводимости, наблюдается хорошее количественное согласие измерений и численного эксперимента. Абсолютные значения ОМС в сильном электрическом поле уменьшаются и, как видно на рис. 1 (кривая 2), это связано с уходом электронов из "веретена" в другую группу.

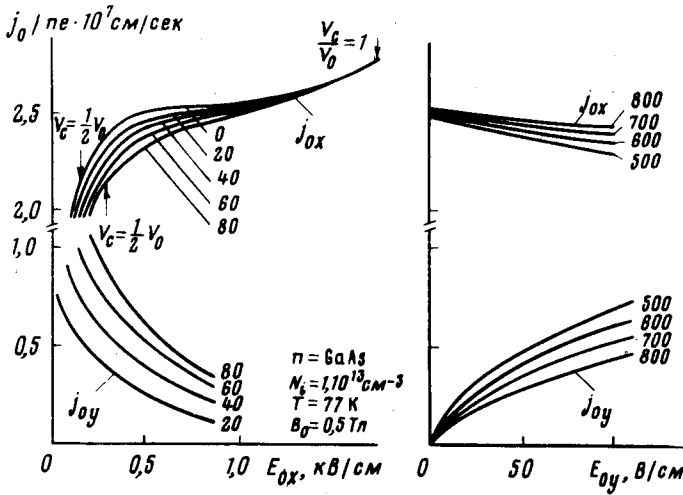


Рис. 2. Статические ВАХ плоского слоя *n*-GaAs в конфигурации Холла (см. рис. 1, врезка) при наличии составляющей поля E_{oy} в направлении B_0 , полученные методом Монте-Карло. Числа у кривых указывают значения E_{ox} и E_{oy} в В/см

2. Разделение электронов на группы приводит при наличии составляющей поля $E_{oy} \ll E_{ox}$ к появлению недиагональных компонент дифференциальной проводимости $\sigma_{xy}^d = dj_x/dE_y$ и $\sigma_{yx}^d = dj_y/dE_x$. Эти компоненты возникают благодаря изменению n_c и r_{yx} составляющими E_{ox} и E_{oy} . Тензор σ_{ij}^d можно определить по статическим ВАХ, представленным на рис. 2, откуда следует, что $|\sigma_{xy}^d| > |\sigma_{yx}^d|$, $\sigma_{xy}^d < 0$ и $\sigma_{yx}^d < 0$. Диагональные компоненты σ_{xx}^d и σ_{yy}^d положительны, так как статические ВАХ $j_{ox}(E_{ox})$ и $j_{oy}(E_{oy})$ не имеют падающих участков. Тем не менее, средняя за период мощность $\delta j \cdot \delta E$ малого переменного сигнала мо-

жет быть отрицательной. Условие ОДП $\delta j \delta E < 0$ в рассматриваемой задаче можно свести к виду

$$(\sigma_{xy}^d + \sigma_{yx}^d)^2 > 4\sigma_{xx}^d \sigma_{yy}^d.$$

Оно выполняется в области полей, где ток $j_{ox}(E_{ox})$ стремится к насыщению. Для данных рис. 2 это — область $650 < E_{ox} < 850$ В/см и $20 < E_{oy} < 70$ В/см, причем интервал углов ϕ между вектором δE и осью x , в котором существует ОДП для данных E_{ox} и E_{oy} , составляет несколько градусов. Этот интервал расширяется при увеличении напряженности магнитного поля.

Рассмотренное разделение электронов на группы и ОДП может возникать и в других полупроводниках A^3B^5 и их твердых растворах, приводя к электрическим неустойчивостям, повышенной генерации шумов и гармоник.

Авторы благодарны И.Левинсону, А.Матулису, Ю.Пожеде за полезные обсуждения, Л.Иванютину — за интерес к работе и предоставление образцов.

Институт физики полупроводников
Академии наук Литовской ССР

Поступила в редакцию
8 декабря 1980 г.
После переработки
26 марта 1981 г.

Литература

- [1] И.Восилюс, И.Левинсон. ЖЭТФ, **50**, 1660, 1966; **52**, 1013, 1967.
- [2] S.Komiyama, T.Masumi, K.Kajita. Phys. Rev., B, **20**, 5192, 1979.
- [3] A.A.Andronov, V.A.Valov, V.A.Kozlov, L.S.Mazov. Solid State Comm., **36**, 603, 1980.
- [4] В.Амбразявичене, Р.Бразис, А.Кунигелис, П.Шикторов. Плазма и неустойчивости в полупроводниках (Тезисы докладов). ИФП АН Лит. ССР, Вильнюс, 1980, стр. 19.
- [5] H.Maeda, T.Kurosawa. Proc. II Int. Conf. Phys. Semicond. PWN, Warszawa, 1972, vol. 1, p. 602.
- [6] С.Жиленис, С.Качюлис, А.Матуленис, Й.Паршылюнас, Ю.Пожеда, А.Ш.Пошкус. Лит. физ. сб., **18**, 331, 1978.
- [7] J.Požela, A.Reklaitis. Solid. State Comm., **27**, 1079, 1978.