

## ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ ФОТОПРОВОДИМОСТЬ ДВУМЕРНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ

*И.М.Гродненский, К.В.Старостин, Д.В.Галченков*

Предложен и экспериментально реализован метод создания отрицательной фотопроводимости в гетероструктурах с двумерным ( $2D$ ) электронным газом, обусловленный оптическим выбросом носителей из  $2D$  канала. Эффект может быть использован для изучения свойств  $2D$  систем в таких структурах.

Идея пространственного переброса носителей заряда при разогреве током в слоистых полупроводниковых структурах, по-видимому, впервые была высказана в <sup>1</sup>. В гетероструктурах с  $2D$  электронным газом перенос электронов из высокоподвижного  $2D$  канала в узкозонном полупроводнике в широкозонный полупроводник с низкой подвижностью  $\mu$ , приводящий к отрицательной дифференциальной проводимости, впервые наблюдался в <sup>2</sup>.

В данной работе, в отличие от <sup>1, 2</sup>, предлагается обеднять  $2D$  канал светом с энергией кванта, превышающей разность между энергией максимума зоны проводимости широкозонного полупроводника вблизи границы раздела  $E_S$  и энергией Ферми  $E_F$  (вставка на рис. 1). Уменьшение при освещении концентрации  $n_{2D}$  двумерных электронов с высокой подвижностью  $\mu_{2D}$  ( $\mu_{2D} > \mu$ ) из-за переброса в слой широкозонного полупроводника должно приводить к появлению отрицательной фотопроводимости.

Эксперименты проводились на гетероструктурах GaAs – AlGaAs, аналогичных использованным в работе <sup>3</sup>. Величина  $n_{2D}$  в разных образцах составляла  $2 - 6 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ,  $\mu_{2D}$  ( $T = 4,2 \text{ К}$ )  $\approx 3 - 8 \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ . Измерительное постоянное электрическое поле направлялось вдоль гетерограницы, его величина не превышала  $10^{-2} \text{ В/см}$ . В работе использовался перестраиваемый СО-лазер с энергией кванта  $E_p$  в интервале 205 – 240 мэВ. В этом интервале по оценкам  $E_p > E_s - E_F$ , в нем также не наблюдается замороженной фотопроводимости <sup>4</sup>. Измерения, в основном, проводились при гелиевых температурах, для которых в исследуемых образцах отсутствует проводимость по слою AlGaAs.

Как и предполагалось, фотопроводимость  $\Delta\sigma$  в исследуемых образцах имеет отрицательный знак. При этом, как показывают измерения в магнитном поле  $B$ , величина и знак  $\Delta\sigma$  определяются изменением только концентрации двумерных электронов. Из рис. 1 (кривые 1 и 2) видно, что период и фаза осцилляций в эффекте Шубникова – де Гааза при освещении меняются, отражая процесс уменьшения  $n_{2D}$ . Величина изменения  $n_{2D}$  зависит от мощности излучения, достигая при плотности мощности  $J \sim 10^{-2} \text{ Вт/см}^2$  значений  $\sim 5\%$ . Как следует из измерений холловского сопротивления  $\rho_{xy}$  и оценок величины температуры Дингла изменения  $\mu_{2D}$  при освещении не происходит. На отсутствие разогревных эффектов указывают также результаты специальных экспериментов, в которых на образцы наносилось покрытие, поглощающее падающее излучение. Эксперименты также показали, что времена "включения" и "выключения" фотопроводимости существенно различны. Время установления не превышает 0,1 с (постоянная измерительной схемы), время спада  $1 \div 5 \cdot 10^2 \text{ с}$ . Такое различие позволяет предположить, что обратные оптическому перебору процессы, приводящие после выключения освещения к восстановлению начального значения  $n_{2D}$ , имеют туннельный или активационный характер.

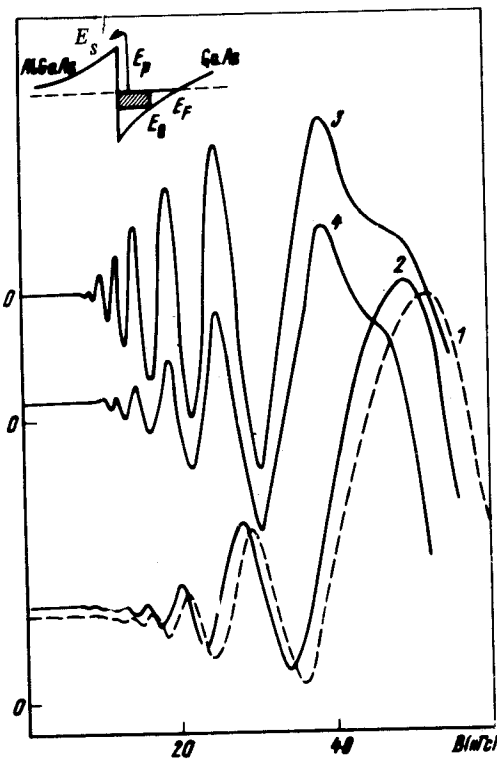


Рис. 1. Зависимости от магнитного поля величины продольного сопротивления  $\rho_{xx}$  в темноте (1, пунктир), при освещении (2), и величин  $\partial\rho_{xx}/\partial B$  (3) и  $\partial\rho_{xx}/\partial J$  (4). На вставке изображена зона проводимости полупроводниковой гетероструктуры с 2D электронным газом на границе раздела

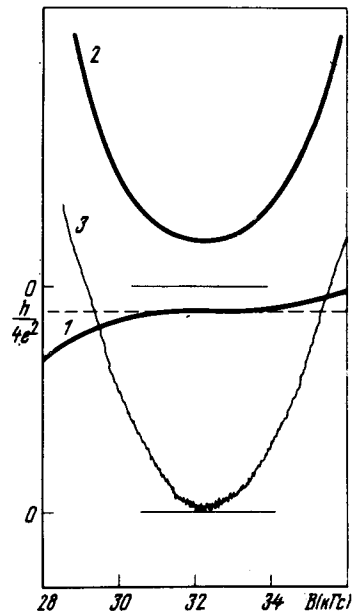


Рис. 2. Зависимость от магнитного поля величин  $\rho_{xy}$  (1),  $\rho_{xx}$  (2) и  $\partial\rho_{xy}/\partial n_{2D}$  (3) в области холловского плато с  $\nu = 4$

Результаты измерения зависимостей величин производных  $\partial\rho_{ij}/\partial J$  от магнитного поля на частотах модуляции света до  $\sim 10^3$  Гц также указывают на изменение  $n_{2D}$  при освещении. Так как в равновесии  $\partial\rho_{ij}/\partial n_{2D} = -(\partial\rho_{ij}/\partial B)(B/n_{2D})$ , то изменение  $n_{2D}$  должно приводить к соответствующему совпадению зависимостей  $(\partial\rho_{ij}/\partial B)(B)$  и  $(\partial\rho_{ij}/\partial J)(B)$ , что и наблюдается в эксперименте (кривые 3 и 4 на рис. 1).

Аналогичные результаты для  $\partial\rho_{ij}/\partial J$  были получены также с излучением, для которого  $E_P$  существенно превышает разность  $E_S - E_F$ . В то же время для излучения с  $E_P < E_S - E_F$  ( $E_P \approx 117$  мэВ) даже при большой мощности фотопроводимость в исследуемых образцах не наблюдалась.

Обнаруженный эффект оптического обеднения  $2D$  канала может быть использован для эффективного изучения свойств  $2D$  систем в полупроводниковых гетероструктурах. Укажем на два направления ведущихся исследований. Одно связано с изучением соотношения между величинами  $d\rho_{xy}$  ( $d\rho_{xy} = (h/e^2\nu) - \rho_{xy}$ ,  $\nu$  — фактор заполнения) и  $\rho_{xx}$  в области холловского плато. В отличие от кремниевых инверсионных слоев соответствующие эксперименты на полупроводниковых гетероструктурах осложнены трудностями в изменении величины  $n_{2D}$ . Из рис. 2 видно, что описываемый эффект достаточно чувствителен для нахождения связи между  $d\rho_{xy}$  и  $\rho_{xx}$  в разных точках плато.

Другое направление имеет целью спектроскопию  $2D$  системы — нахождение формы  $2D$  потенциальной ямы, величины разрыва зоны проводимости на границе рездела и т. п.

Авторы благодарны Волкову В.А., Пинскер Т.Н. и Сандомирскому В.Б. за обсуждение полученных результатов, Масычеву В.И. за помощь при наладке СО-лазера, Елинсону М.И. за поддержку работы.

#### Литература

1. Гривников З.С. Физика и техника полупроводников, 1972, 6, 1380.
2. Hess K., Morkoç H., Streetman B., Shichijo H. Appl. Phys. Lett., 1979, 35, 469.
3. Галченков Д.В., Гродненский И.М., Матов О.Р., Пинскер Т.Н., Старостин К.В. Письма в ЖЭТФ, 1985, 40, 4, 10.
4. Волков В.А., Галченков Д.В., Гродненский И.М., Старостин К.В. Письма в ЖЭТФ, 1982, 36, 371.