

ОБ УВЕЛИЧЕНИИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОДВИЖНОСТИ ДВУМЕРНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ ПОСТОЯННОЙ ПОДСВЕТКЕ

Ф.Г.Пикус

Построена теория, объясняющая наблюдавшееся в работе ¹ увеличение низкотемпературной подвижности двумерного электронного газа (ДЭГ) в гетероструктуре GaAs/AlGaAs при постоянной подсветке.

В работе ¹ наблюдалось существенное увеличение подвижности ДЭГ при непрерывной подсветке структуры, одновременно падала концентрация ДЭГ. Подвижность при подсветке превышала темновую подвижность в 5-10 раз, при этом концентрация двумерных электронов уменьшалась в 2-3 раза. Подобная зависимость низкотемпературной подвижности ДЭГ от концентрации является весьма необычной, так как, как правило, подвижность растет с ростом концентрации ДЭГ, поскольку, с одной стороны, увеличивается скорость Ферми, а с другой, усиливается экранирование рассеивающего потенциала самими двумерными элек-

тронами. Наблюдавшееся в ¹ увеличение подвижности при уменьшении концентрации ДЭГ может происходить только если это уменьшение сопровождается значительным ослаблением рассеяния, способным перекрыть описанные выше факторы. Ясно, что, если подвижность определяется рассеянием на фонах, шероховатостях границы раздела GaAs/AlGaAs или рассеянием на неоднородностях состава твердого раствора, то при уменьшении концентрации ДЭГ действие этих рассеивателей не изменится. Если же подвижность лимитируется рассеянием на заряженных примесях, то электроны, уходящие из ДЭГ, могут перейти на эти примеси, и, если это доноры, сделать их нейтральными. Рассеяние при этом уменьшится и подвижность может увеличиться.

Подвижность двумерных электронов при рассеянии на заряженных примесях определяется следующим выражением ^{2,3} :

$$\mu^{-1} = \frac{2\pi m e^2}{\kappa^2 \hbar^2} \int_0^{2\pi} d\vartheta \int_{-\infty}^{\infty} dz \frac{e^{-2qz}}{(q + q_s)^2} N_i(z) F^2(q) (1 - \cos(\vartheta)), \quad (1)$$

где m - эффективная масса двумерных электронов, κ - диэлектрическая проницаемость, которая считается одинаковой в GaAs и AlGaAs, $N_i(z)$ - концентрация рассеивающих примесей на расстоянии z от плоскости ДЭГ, $q = 2k_F \sin(\vartheta/2)$, $k_F = \sqrt{2\pi n_s}$ - волновой вектор Ферми, q_s - обратный радиус экранирования ДЭГ

$$q_s = \frac{2me^2}{\kappa^2 \hbar^2}.$$

Форм-фактор $F(q)$ зависит от волновой функции двумерных электронов. В этой работе использовалась вариационная волновая функция Фэнга и Ховарда ⁴, соответствующее ей выражение для форм-фактора приведено в ^{2,4,5}. Из формулы (1) видно, что простого уменьшения концентрации примесей N_i недостаточно для объяснения наблюдавшегося в ¹ эффекта, так как если даже все электроны, ушедшие из ДЭГ, нейтрализуют заряженные рассеивающие примеси, концентрация последних уменьшается линейно с уменьшением концентрации ДЭГ n_s , в то время подвижность пропорциональна k_F^3 , и, следовательно, $n_s^{3/2}$. Однако рост подвижности при падении концентрации ДЭГ возможен, если электроны, уходящие из двумерного канала, заселяют ближайшие к нему доноры и среднее расстояние между ДЭГ и заряженными донорами увеличивается. Из формулы (1) видно, что подвижность экспоненциально зависит от расстояния между рассеивающими центрами и двумерными электронами, поэтому в итоге возможен ее рост при убывании концентрации ДЭГ.

Изложенные соображения позволяют сформулировать следующую модель для описания подвижности ДЭГ в гетероструктурах, изучавшихся в ¹. Подвижность электронов в двумерном канале при низкой температуре определяется рассеянием на заряженных примесях. Концентрация примесей в разных областях структуры различна: непосредственно вблизи гетероперехода, и, следовательно, ДЭГ, в GaAs расположена область обеднения с концентрацией акцепторов $N_a \propto 2 \div 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Со стороны твердого раствора AlGaAs к гетеропереходу примыкает легированный спейсерный слой, остаточная концентрация доноров N_{sp} в нем может достигать $10^{15} - 10^{16} \text{ см}^{-3}$, затем идет сильно легированная донорами область с концентрацией $N_d \propto 10^{17} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Толщина спейсерного слоя s в образцах, использовавшихся в ¹, равнялась 250 \AA . После импульса начальной засветки, в результате которого электроны с доноров в AlGaAs перебрасываются в ДЭГ, подвижность в основном определяется рассеянием на близко расположенных остаточных примесях в спейсерном слое. Затем включается подсветка, и происходит рождение электронно-дырочных пар в AlGaAs. В области вблизи гетероперехода

электроны и дырки разделяются - дырки рекомбинируют с ДЭГ, концентрация которого уменьшается, а электроны нейтрализуют заряженные доноры. Часть электронов при этом захватывается на доноры, расположенные в спейсерном слое, а остальные уходят в сильно легированную область структуры. Долю первых мы будем обозначать через P_s .

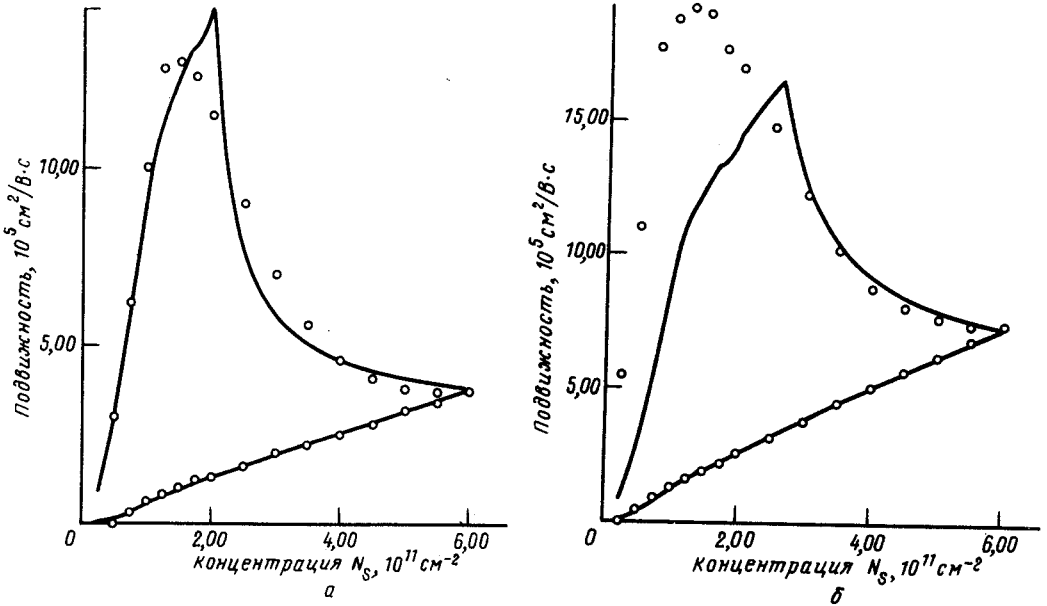


Рис. 1. Зависимость подвижности двумерных электронов от их концентрации. Нижняя ветвь - в темноте, верхняя - при подсветке. Сплошная линия - результат расчета, * - экспериментальные данные¹. Параметры образцов приведены в тексте

Расчет подвижности в описанной модели выполнялся согласно формуле (1) с концентрацией $N_i(z)$, равной в темноте

$$N_i^d(z) = \begin{cases} N_d, & -\infty < z < -s \\ N_{sp}, & -s < z < 0 \\ N_a, & 0 < z < W_{depl} \end{cases},$$

и при подсветке

$$N_i^l(z) = \begin{cases} N_d - \delta n_2, & -\infty < z < -s \\ N_{sp} - \delta n_1, & -s < z < 0 \\ N_a, & 0 < z < W_{depl} \end{cases}.$$

Здесь ось z направлена перпендикулярно гетеропереходу и начало отсчета $z = 0$ выбрано в плоскости ДЭГ, W_{depl} - толщина обедненного слоя в GaAs, связанная с плотностью объемного заряда (на единицу площади) N_{depl} соотношением

$$W_{depl} = N_{depl}/N_a,$$

δn_1 и δn_2 - изменение концентрации заряженных доноров в спейсерном слое и сильно легированном AlGaAs соответственно. Они связаны с уменьшением концентрации ДЭГ δn_s следующим образом:

$$\delta n_1 = P_s \delta n_s / s,$$

$$\delta n_2 = (1 - P_s)\delta n_s/h,$$

$$h = (n_s + N_{depl})/N_d.$$

где h - толщина слоя заряженных доноров в легированной области структуры.

Результаты расчета подвижности представлены на рисунке, на котором показана зависимость подвижности от концентрации ДЭГ в темноте (нижняя ветвь) и при подсветке (верхняя ветвь) для двух образцов, использовавшихся в ¹. При расчете использовались следующие значения параметров: $s = 250 \text{ \AA}$, $N_a = 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $N_{depl} = 3 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ ¹. Остальные параметры подбирались из условия наилучшего совпадения с экспериментом: а) $N_{sp} = 8,1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $P_s = 0,5$, б) $N_{sp} = 3,8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $P_s = 0,24$. Видно, что результаты расчета хорошо согласуются с экспериментом, расхождение в основном связано с предположением об однородном распределении электронов, нейтрализующих доноры.

В заключение автор выражает искреннюю благодарность И.В.Кукушкину за ознакомление с результатами работы ¹ до ее опубликования и полезные обсуждения.

Литература

1. *Plaut A.S., Kukushkin I.V., von Klitzing K., Ploog K.* Phys. Rev. B, 1990, 42, N 6 в печати.
2. *Ando T., Fowler A.B., Stern F.* Rev. Mod. Phys., 1982, 54, 437.
3. *Walukiewicz W., Ruda H.E., Lagowski J., Gatos H.C.* Phys. Rev. B, 1984, 30, 4571.
4. *Stern F., Howard W.E.* Phys. Rev., 1967, 163, 816.
5. *Gold A.* Appl. Phys. Lett., 1989, 54, 2100.