

Терлецкая Л.Л., Копыт Н.Х., Калиниченко Л.Ф., Голубцов В.В.

*Одесский национальный университет имени И.И. Мечникова,
Проблемная научно-исследовательская лаборатория №1*

Динамические процессы в гетерогенных дисперсных системах в магнитных полях

Изучено влияние магнитных полей на динамические процессы в монокристаллах арсенида галлия с легкоплавкими неоднородностями элемента матрицы. Установлена интенсификация скорости электродиффузионной очистки кристаллов и параметров Холла в магнитном поле с оптимальными характеристиками. Показана возможность эффективного управления процессами переноса в реальных гетерогенных системах.

Аномально высокая подвижность легкоплавких неоднородностей в гетерогенных системах (ГС) на основе сложных соединений A^3B^5 даже при температурах, близких к комнатной, оказывает существенное влияние не только на исходные параметры систем, но и на эксплуатационную надежность приборных структур [1]. Поэтому заинтересованность физиков и материаловедов в решении проблемы возможности управления электрофизическими и другими свойствами сложных систем с неоднородностями в виде высокодисперсных частиц собственного компонента не ослабевает и в настоящее время.

В результате исследования влияния температурных и электрических полей на динамические процессы в ГС были установлены закономерности движения проводящих неоднородностей в них и созданы соответствующие физические модели, что позволило разработать некоторые рекомендации по улучшению электрофизических свойств сложных систем [2,3].

В данной работе рассмотрены особенности процессов переноса с участием неоднородностей в виде легкоплавких включений собственного компонента ГС на примере монокристаллического арсенида галлия в условиях магнитных полей. Наличие в объеме полупроводника таких сильнопроводящих некогерентных неоднородностей приводит к тому, что измеренная эффективная подвижность носителей заряда μ' не соответствует действительной подвижности μ , характерной для однородного кристалла.

Проведен расчет зависимостей μ'/μ от объемной концентрации неоднородностей P для предельных случаев слабых ($\beta \approx 1$) и сильных ($\beta \gg 1$) (β – параметр Холла) магнитных полей. Такая зависимость представлена графически на рис. 1.

Для $GaAs$ с $\mu \approx 8 \cdot 10^3$ см²/В·с ($T = 300$ К) в магнитном поле напряженностью $H = 12$ кЭ (соответствует $\beta \approx 1$) фактически получено $\mu' \approx 10^4$ см²/В·с для образцов, у которых объемная доля неоднородностей $P = 1 \div 2\%$. Измерения полевых зависимостей коэффициента Холла в образцах нелегированного $GaAs$,

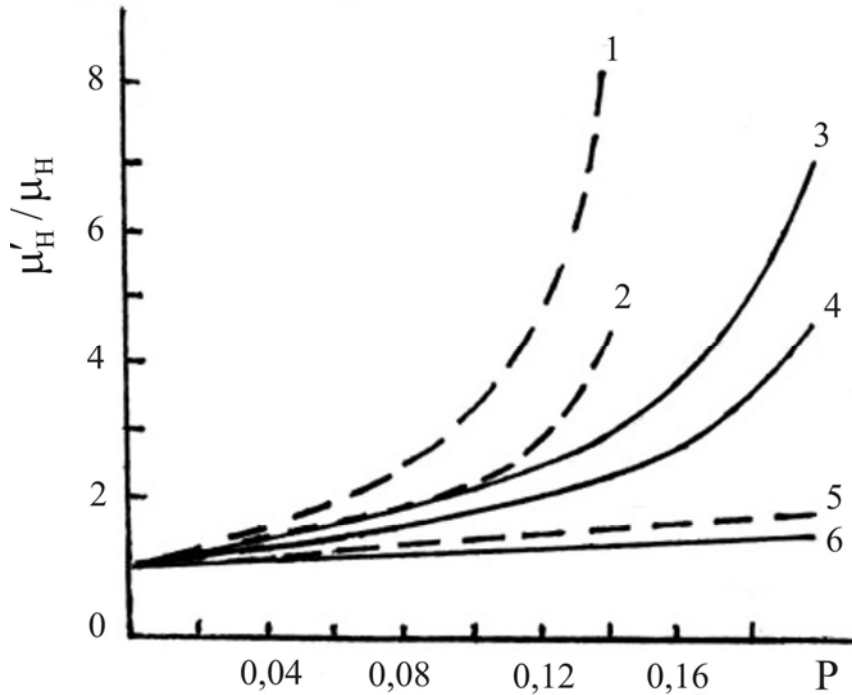


Рис. 1. Зависимость отношений μ'_H/μ_H от объемной концентрации неоднородностей. Сплошные и пунктирные линии обозначают зависимости для цилиндрических и сферических неоднородностей соответственно:

$$1, 3 - \beta_1 \ll 1; \quad 2, 4 - \beta_1 \approx 1; \quad 5, 6 - \beta_1 \gg 1$$

выращенного низкотемпературным методом, с концентрацией электронов $n = 10^{12} - 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и подвижностью $\mu > 10^5 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ ($T = 77 \text{ К}$) показала аномальную зависимость коэффициента Холла R_H от величины магнитного поля (величина R_H увеличивается с ростом значения H).

В результате расчетов, проведенных исходя из теории эффективной среды, получено выражение для отношения измеренного экспериментально коэффициента Холла R_{H_e} к коэффициенту Холла матрицы R_{H_i}

$$\frac{R_{H_e} \left(|\vec{H}| \neq 0 \right)}{R_{H_i}} = 1 - \frac{2P}{n^{(x)} (1 + \beta_1^2)} \quad (1)$$

На рис. 2 представлены зависимости R_{H_e} от H при различных концентрациях идеально проводящих сферических микровключений.

Сравнение теоретических и экспериментальных данных, как видно из рисунка, показало их достаточно хорошее совпадение.

Из формулы (1) получаем уравнение зависимости эффективного Холл-фактора r_{H_e} от напряженности магнитного поля:

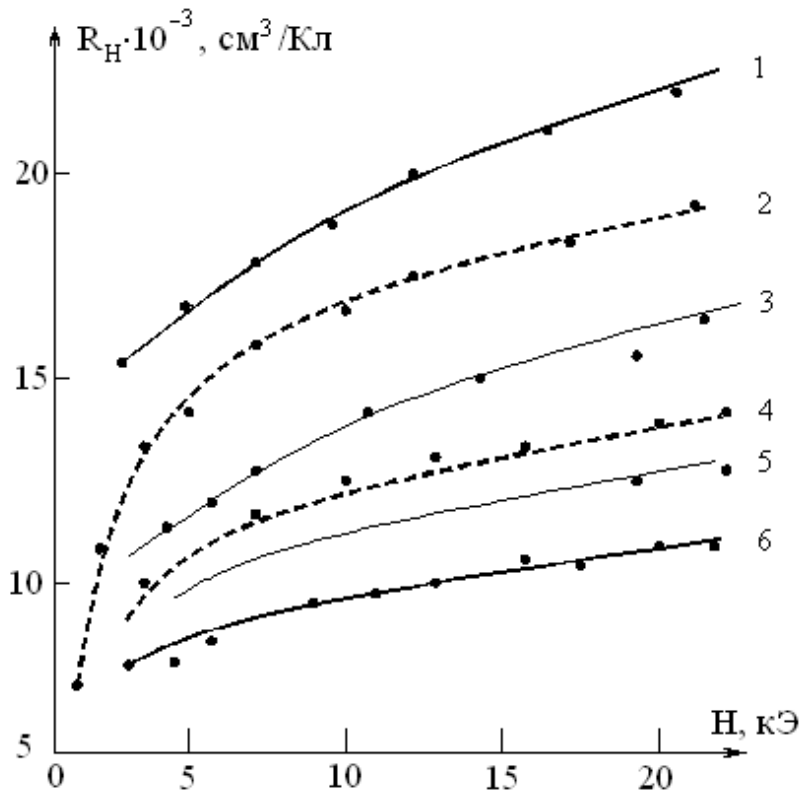


Рис. 2. Зависимость коэффициента Холла от напряженности магнитного поля в образцах с различной холловской подвижностью. Сплошные линии – 300 К; пунктирные линии – 77 К; μ ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{с}$):
 1 – $1.2 \cdot 10^4$; 2 – $1.2 \cdot 10^5$; 3 – $6.3 \cdot 10^3$; 4 – $1.2 \cdot 10^4$; 5 – $8 \cdot 10^3$; 6 – $7.1 \cdot 10^3$.

$$r_{H_e}(H) = r_{H_1} \left\{ 1 - \frac{2P}{n^{(x)}(1 + \beta_1^2)} \right\}, \quad (2)$$

где r_{H_1} и β_1 – Холл-фактор и параметр Холла основной фазы соответственно.

Характер теоретически рассчитанной зависимости эффективного Холл-фактора от величины магнитного поля соответствует экспериментально полученной зависимости, описанной в работе [4].

Интересно отметить, что в области концентраций проводящих неоднородностей $\square 2 \div 3\%$ по объему даже при малой величине H в неоднородном слое ГС значение r_{H_e} приблизительно равно единице, что соответствует Холл-фактору однородного полупроводника [5] в условиях сильного магнитного поля.

Такая закономерность показана на рисунке 3, где представлена зависимость r_{H_e} от объемной концентрации проводящих микровключений для магнитных полей $5 \div 50$ кЭ.

Исследовались зависимости поперечного и продольного магнетосопротивлений от величины H для образцов с содержанием исследуемых неоднородностей от 0.01% до 0.1%. В случае слабого магнитного поля ($\beta \square 1$) выражение для поперечного магнетосопротивления имеет вид:

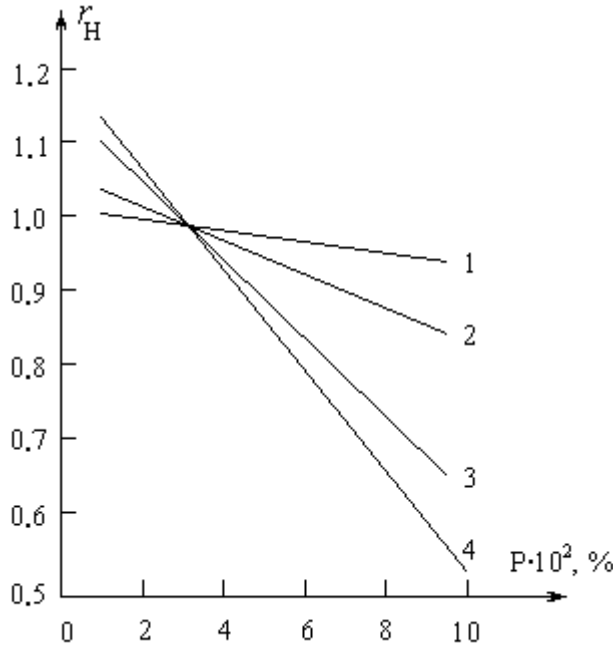


Рис. 3. Зависимость Холл-фактора от объёмной доли неоднородностей в слое для магнитных полей с различной напряжённостью: 1 – 5 кЭ; 2 – 10 кЭ; 3 – 25 кЭ; 4 – 50 кЭ.

$$\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_{\perp e} = \left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_{\perp l} - 0.6P\beta_1^2 \left[\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_{\perp l} + 1 \right], \quad (3)$$

из которого следует, что при выполнении условия

$$\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_{\perp l} < 0.6P\beta_1^2,$$

в очень слабых полях велика вероятность появления отрицательного поперечного магнетосопротивления.

Для сильного магнитного поля ($\beta_1 \gg 1$) выражение представляется в виде

$$\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_{\perp e} = \left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_{\perp l} + \frac{4}{\pi}P\beta_1^2 \left[\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_{\perp l} + 1 \right]. \quad (4)$$

Как видно из уравнения (4), в неоднородных полупроводниках эффективное поперечное магнетосопротивление линейно изменяется с изменением величины H , не выходя на насыщение, что и наблюдалось в процессе экспериментальных исследований.

Дифференцируя (4) по β_1 , получим уравнение

$$\frac{\partial \left(\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_{\perp e} \right)}{\partial \beta_1} \approx \left[1 + \partial \left(\frac{\Delta\rho}{\rho} \right)_{\perp l} \right] \frac{4P}{\pi}, \quad (5)$$

т.е. тангенс угла наклона функции $\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_{\perp e}(H)$ пропорционален объемной концентрации P .

Следует отметить, что уравнения (3) ÷ (5) связаны со строгим выполнением условий $P \ll 1$ при $\beta \ll 1$ и $\beta \ll 1$ при $\beta_1 \ll 1$. Фактически, как показал сравнительный анализ теоретических и экспериментальных данных по $R_H(H)$ для исследуемых структур, эти условия можно упростить и заменить следующими:

$$P \ll 0.2 \div 0.3 \text{ при } \beta_1 \leq 1; \quad P\beta \leq 0.2 \div 0.3 \text{ при } \beta_1 > 1.$$

Эффективное продольное магнетосопротивление имеет иной характер зависимости от H в слабомагнитном поле по сравнению с поперечным магнетосопротивлением, так как его величина всегда в этом случае положительна. В сильно магнитном поле эффективное продольное магнетосопротивление выходит на насыщение по β_1 . В промежуточной же области H ($\beta \approx 1$) зависимость этого фактора от концентрации описывается выражением $\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_{\perp e} \approx 0.7P$.

Установлено, что одновременное воздействие электрическим и магнитным полями, векторы которых направлены по отношению к образцу по осям x и z соответственно, эффективно сказывается на электродиффузионном переносе некогерентных неоднородностей, проводимость которых близка к проводимости матрицы.

Проведены некоторые оценки, иллюстрирующие влияние магнитного поля на интенсификацию скорости электродиффузионной очистки структур арсенида галлия, холловская подвижность которых равна $7.6 \cdot 10^3 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ при $T = 300 \text{ К}$ и $10^5 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ при $T = 77 \text{ К}$. Для этих значений подвижности электронов в магнитном поле $H = 50 \text{ кЭ}$ получены следующие значения параметра Холла: $\beta_1 \approx 3.8$ при комнатной температуре и $\beta_1 \approx 50$ при $T = 77 \text{ К}$. При таких температурах скорость миграции идеально проводящих включений в направлении оси x , перпендикулярном вектору магнитного поля \vec{H} , возрастает в 5.6 раза при $T = 300 \text{ К}$ и почти 23 раза при температуре жидкого азота по сравнению со случаем нулевого магнитного поля. Для непроводящих и слабопроводящих включений скорость вдоль оси x при $T = 300 \text{ К}$ соответствует скорости миграции в нулевом магнитном поле, однако при $T = 77 \text{ К}$ скорость их движения увеличивается приблизительно в 12 раз.

Следует отметить, что при наложении полей $\vec{H} = (0, 0, H)$ и $E_1(\infty) = (E_{1x(\infty)}, 0, 0)$ непроводящие высокодисперсные включения мигрируют в направлении оси y , что вносит существенный вклад в суммарную скорость дрейфа и, соответственно, в увеличение скорости их выведения из объема гетерогенной системы на поверхность для эффективной очистки кристаллов

Литература:

1. Мильвидский М.Г., Освенский В.Б. Структурные дефекты в монокристаллах полуполупроводников. – М.: Металлургия, 1984. – 256с.
2. Терлецкая Л.Л., Копыт Н.Х., Голубцов В.В. Влияние температурных полей на поведение некогерентных неоднородностей в монокристаллах арсенида галлия // Физика аэродисперсных систем. – 2003. – № 40. – С. 293-297.
3. Терлецкая Л.Л., Копыт Н.Х., Чернова Е.А., Голубцов В.В. Влияние электрического поля на динамические процессы в гетерогенных системах с проводящими неоднородностями // Физика аэродисперсных систем. – 2006. – №. 43. – С. 137-140.
4. Ryden D.I. The effect of isolated inclusions upon the transport properties of semiconductors // J. Phys. C.: Sol. State Phys. – 1974. – V.45, № 10. – P.4370-4372.
5. Wolf C.M., Stilman C.E., Hill D.E. Anomalously high mobility in GaAs // J. Appl. Phys. – 1973. – V. 44, №2. – P.732-734.

Терлецка Л.Л., Копит М.Х., Калініченко Л.Ф., Голубцов В.В.

Динамічні процеси в гетерогенних дисперсних системах в магнітних полях

АНОТАЦІЯ

Вивчено вплив магнітних полів на динамічні процеси в монокристалах GaAs з легкоплавкими неоднорідностями елемента матриці. Встановлено інтенсифікацію швидкості електродифузійного очищення кристалів та параметрів Холла в магнітному полі з оптимальними параметрами. Показано можливість ефективного керування процесами переносу в реальних гетерогенних системах.

Terletskaaya L.L., Kopyt N.Kh., Kalinichenko L.F., Golubtsov V.V.

Dynamical processes in heterogeneous systems in the magnetic fields

SUMMARY

The influence of magnetic field on dynamical processes in monocrystals GaAs with fusible inhomogeneities of the matrix element was investigated. Crystal electrodiffusion cleaning intensification and Hall-parameters in magnetic field with optimal characteristics was established. The possibility of effective controlling the process of the transfer in the real heterogeneous systems is shown.