

Л.Л. Терлецкая, Н.Х. Копыт, Е.А. Чернова, В.В. Голубцов

Одесский национальный университет им. И.И. Мечникова

Влияние электрического поля на динамические процессы в гетерогенных системах с проводящими неоднородностями

Изучено и описано движение неоднородностей в виде высокодисперсных включений галлия в монокристаллах арсенида галлия под действием электрических полей. Проведен анализ скоростей электротермомиграции дефектов в кристаллах для случаев проводящих и диэлектрических неоднородностей. Показана возможность управления динамическими процессами в гетерогенных системах с проводящими неоднородностями в электрических полях с оптимальными характеристиками.

Нестабильность электрофизических характеристик приборных структур на основе соединений A^3B^5 и их ускоренная деградация в значительной степени обусловлены наличием и миграцией в кристаллах неоднородностей в виде высокодисперсных включений собственного компонента A^3 [1]. Изучение динамики проводящих микровключений в монокристаллах представляет научный и практический интерес.

Ранее нами была показана возможность управления движением таких неоднородностей в монокристаллах арсенида галлия при условии действия на них температурных полей с предварительно рассчитанными оптимальными параметрами [2, 3].

В данной работе описано движение неоднородностей в виде включений галлия в монокристаллах арсенида галлия, рассматриваемых как гетерогенные системы из-за содержащихся в них нескольких гомогенных фаз, под действием электрического поля.

В соответствии с результатами [1] электродиффузионные потоки тяжелых носителей заряда на границе включения Q_Γ в неоднородной среде и потоки тех же носителей заряда по контуру включения при однородном распределении поля $Q_{\Gamma\infty}$ определяются:

$$Q_\Gamma = \frac{DqZ_{\text{eff}}}{fkT} \vec{E}_{1\Gamma} \vec{n}, \quad (1)$$

$$Q_{\Gamma\infty} = \frac{DqZ_{\text{eff}}}{fkT} \vec{E}_1(\infty) \vec{n}, \quad (2)$$

где D – коэффициент самодиффузии; qZ_{eff} – эффективный заряд ионов с учетом эффекта увлечения их электронным потоком; f – корреляционный фактор, учитывающий взаимодействие ионов при перескоках; k – постоянная Больцмана.

Согласно [1], вычитая (2) из (1), получаем выражение для вектора скорости электродиффузионной миграции неоднородностей (в общем случае эллипсоидальной формы)

$$\vec{v}_e = \frac{DqZ_{\text{eff}}}{fkT} \chi_e \vec{E}_1(\infty), \quad \hat{\chi}_e = \begin{pmatrix} \chi_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \chi_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \chi_{33} \end{pmatrix},$$

$$\chi_{11} = \frac{(1-n^{(x)})(1-k_{11})}{n^{(x)}}, \quad \chi_{22} = \frac{(1-n^{(y)})(1-k_{22})}{n^{(y)}}, \quad \chi_{33} = \frac{(1-n^{(z)})(1-k_{33})}{n^{(z)}} \quad (3)$$

где $n^{(x)}$, $n^{(y)}$, $n^{(z)}$ – коэффициенты деполяризации; k_{11} , k_{22} , k_{33} – компоненты диагонального тензора $\hat{k}$, связывающего напряженность электрического поля в области включений с напряженностью внешнего однородного поля $\vec{E}_1(\infty)$, которые определялись согласно результатам работы [4].

В результате получаем зависимости для компонент скорости электродиффузионного дрейфа макронеоднородностей эллиптической формы:

$$\begin{aligned} v_x &= \frac{DqZ_{\text{eff}}}{fkT} E_{1x}(\infty) \frac{(1-n^{(x)})(\sigma_2/\sigma_1 - 1)}{1+n^{(x)}(\sigma_2/\sigma_1 - 1)}; \\ v_y &= \frac{DqZ_{\text{eff}}}{fkT} E_{1y}(\infty) \frac{(1-n^{(yx)})(\sigma_2/\sigma_1 - 1)}{1+n^{(y)}(\sigma_2/\sigma_1 - 1)} \\ v_z &= \frac{DqZ_{\text{eff}}}{fkT} E_{1z}(\infty) \frac{(1-n^{(z)})(\sigma_2/\sigma_1 - 1)}{1+n^{(z)}(\sigma_2/\sigma_1 - 1)}; \end{aligned} \quad (4)$$

где σ_1 , σ_2 – электрическая проводимость неоднородности и матрицы соответственно.

Анализируя поведение составляющей скорости электродиффузионного дрейфа, например, вдоль оси z при изменении относительной величины проводимости σ_2/σ_1 , из (4) получим, что для слабопроводящих ($\sigma_2/\sigma_1 \ll 1$) неоднородностей:

$$v_z = -v_z^*, \quad v_z^* = \frac{dqZ_{\text{eff}}}{fkT} E_{1z}(\infty) \quad (5)$$

В другом предельном случае сильно проводящих неоднородностей ($\sigma_2/\sigma_1 \gg 1$) выражение для скорости их электродиффузионной миграции принимает вид:

$$v_z = (1-n^{(z)}) \frac{v_z^*}{n^{(z)}} \quad (6)$$

Отсюда следует, что неоднородности такого типа перемещаются вдоль внешнего поля. Таким образом, движение дефектов заметно проявляется только в случае сильнопроводящих неоднородностей.

Установлено, что вблизи значений ($\sigma_2/\sigma_1 \approx 1$) электродиффузионная очистка кристаллов от легкоплавких включений галлия неэффективна.

Характер зависимости v_z от параметра σ_2/σ_1 в промежуточной области значений относительной проводимости неоднородностей представлен на рисунке.

Аналогично решается задача электродиффузионного дрейфа неоднородности сферической формы в электрическом поле

$$\vec{E}_1(\infty) = \{E_{1x(\infty)}, E_{1y(\infty)}, E_{1z(\infty)}\} = \text{const}.$$

На основании аналитического решения задач о распределении поля, тока и температуры в области расплавленных металлических неоднородностей можно сделать вывод о том, что при наличии переходных слоёв с малой относительно матрицы проводимостью величина градиента температуры в области расплавленной фазы резко уменьшается. Это приводит к значительному уменьшению скорости электромиграции расплавленных неоднородностей.

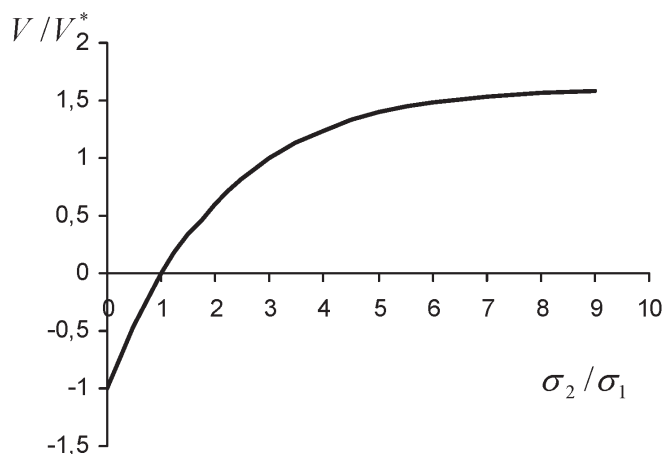


Рис. Зависимость безразмерной скорости v/v^* от соотношения проводимостей σ_2/σ_1

Если обозначить скорость перемещения включений без переходных слоёв через v_1 , а с переходными слоями через v_2 , то

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \frac{h_o}{(R_H - h_o)}, \quad (7)$$

где h – толщина окисного слоя.

Так, например, в арсениде галлия, выращенном из раствора-расплава в кварцевом тигле, возможно образование слоёв окиси кремния вокруг включений галлия вследствие взаимодействия кремния и кислорода. Поскольку средние размеры галлиевых неоднородностей составляют $R_H \approx 0,1$ мкм, расчет по формуле (7) показал, что наличие переходного слоя из окиси кремния толщиной $h \approx 0,1$ мкм вокруг микровключений уменьшает скорость их электротермомиграции в 10 и более раз.

Установлено, что эффект замедления скорости электротермомиграции расплавленных микровключений имеет размерный характер, что является характерным для объемных неоднородностей.

Таким образом, активное поведение неоднородностей под действием силовых полей является не только одним из факторов, существенно влияющих на качество гетерогенных систем на основе сложных соединений, но и может быть

принято за основу при разработке способов управления их электрофизическими свойствами.

Литература

1. Гегузин Я.Е., Кривоглаз М.А. Движение макроскопических неоднородностей в твердых телах.- М.:Металлургия.- 1971-344 с.
2. Терлецкая Л.Л., Копыт М.Х., Голубцов В.В. Влияние температурных полей на поведение некогерентных неоднородностей в монокристаллах и эпитаксиальных структурах арсенида галлия // Физика аэродисперсных систем.- 2003.- Вып. 40.- С. 293-297.
3. Терлецкая Л.Л., Копыт М.Х., Голубцов В.В. Особенности получения подложек арсенида галлия с улучшенными электрофизическими параметрами для сенсоров // Международная научно-техническая конф. “Сенсорная электроника и микросистемные технологии” (1-5 июля, 2004, г.Одесса): Тез. докл.- Одесса, 2004.- С.314.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред.- М.: Наука, 1982.- 413 с.

Л.Л. Терлецька, М.Х. Копит , О.О. Чернова, В.В.Голубцов

Вплив електричного поля на динамічні процеси в гетерогенних системах з провідними неоднорідностями

АНОТАЦІЯ

Вивчено та описано рух неоднорідностей у вигляді високодисперсних включень галію в монокристалах арсеніда галію за умов дії електричних полів. Проведено аналіз швидкостей електротермоміграції дефектів у кристалах для випадків провідних та діелектричних неоднорідностей. Показано можливість керування динамічними процесами в гетерогенних системах з провідними неоднорідностями в електричних полях з визначеними оптимальними характеристиками.

L.L. Terletska, N.Kh. Kopyt, E.A. Chernova, V.V. Golubtsov

Effect of the electric field on dynamical processes in heterogeneous systems with conductive inhomogeneity

SUMMARY

The electric-field induced drift of inhomogeneities formed by highly dispersed inclusions of Ga in GaAs single crystals is studied and described. Rates of electrothermomigration of defects in crystals have been analyzed for cases of conductive and dielectric inhomogeneities. The possibility of controlling the dynamical processes in heterogeneous systems with conductive inhomogeneities in electric fields with optimal characteristics is shown.