

Особенности электрофизических свойств твердых растворов $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$

© Т.А. Комиссарова[¶], Н.Н. Матросов, Л.И. Рябова, Д.Р. Хохлов, В.Н. Жмерик⁺, С.В. Иванов⁺

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119992 Москва, Россия

⁺ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 26 сентября 2006 г. Принята к печати 3 октября 2006 г.)

Исследованы температурные зависимости коэффициента Холла и удельного сопротивления твердых растворов $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ при $0 \leq x \leq 1$. Установлено, что при $x \leq 0.4$ температурные зависимости коэффициента Холла и удельного сопротивления имеют активационный участок. Энергия активации линейно зависит от содержания индия в твердом растворе. При $x \approx 0.5$ активационный участок исчезает. Основной механизм рассеяния зависит от температуры, от плотности дефектов в пленке, в существенной степени определяемой используемыми промежуточными слоями GaN, и от состава твердого раствора x .

PACS: 61.66.Fn, 61.82.Fk, 68.55.Ln, 68.60.-p

Нитриды элементов III группы являются одними из базовых материалов оптоэлектроники видимого спектрального диапазона. Несмотря на большой прогресс в практическом использовании GaN, а также твердых растворов $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ и квантово-размерных гетероструктур на их основе, до сих пор отсутствует полное понимание особенностей электрофизических и оптических свойств этих материалов. В ряду нитридов третьей группы наименее исследованным соединением является нитрид индия. Различные методы, использованные для синтеза InN, позволяют получить пленки лишь с высокими концентрациями свободных электронов n . В широком диапазоне температур значение n остается постоянным, что соответствует сильно вырожденному электронному газу [1,2]. В то же время в другом соединении ряда, в нитриде галлия, концентрация, а также подвижность носителей заряда зависят от температуры, что позволяет получить существенно больше информации об энергетическом спектре и механизмах рассеяния в данном материале. Изучение твердых растворов с плавно изменяющимся составом x может пролить свет на понимание электрофизических свойств нитрида индия.

В данной работе были исследованы эпитаксиальные пленки $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, выращенные методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) на сапфире $c\text{-Al}_2\text{O}_3$ с буферным слоем GaN(МПЭ). Для определения влияния промежуточного слоя на электрофизические параметры сложной структуры был исследован слой GaN, выращенный МПЭ на слое GaN толщиной 3 нм, осажденном предварительно на подложке $c\text{-Al}_2\text{O}_3$ методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (МОГФЭ). Среднее содержание индия x в пленках $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ варьировалось от 0 до 1. Толщина пленок изменялась в пределах 60–1070 нм.

Для проведения электрофизических измерений к образцам квадратной формы припаивались индиевые контакты. Температурные зависимости сопротивления и коэффициента Холла в интервале температур 300–77 К в магнитном поле 600 Э измерялись методом Ван-дер-Пау.

Обнаружено, что температурные зависимости коэффициента Холла при $x \leq 0.4$ имеют активационный участок (см. вставку на рис. 1). Энергия активации, полученная из соотношения $n \propto \exp(-E_A/kT)$, линейно зависит от содержания индия x (рис. 1). При дальнейшем увеличении концентрации индия ($x \geq 0.5$) сопротивление и коэффициент Холла перестают зависеть от температуры, что соответствует нулевой энергии активации на рис. 1.

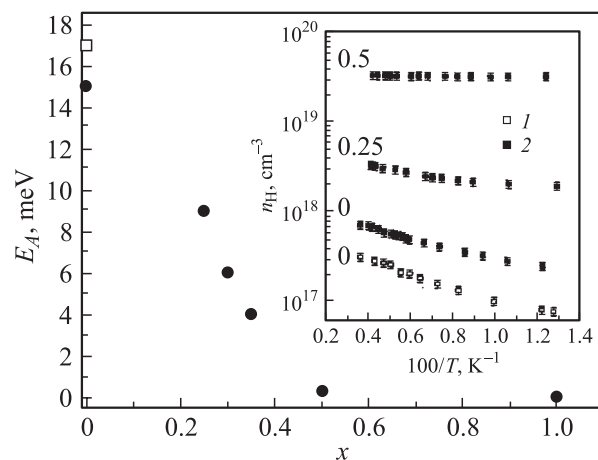


Рис. 1. Зависимость энергии активации E_A от содержания индия x в твердом растворе $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$. На вставке к рисунку представлены температурные зависимости холловской концентрации n_H . Цифрами у кривых на вставке к рисунку обозначено содержание индия в твердом растворе x . Данные 1 соответствуют структуре GaN(МПЭ)–GaN(МОГФЭ)– Al_2O_3 (0001), данные 2 — структурам $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ –GaN(МПЭ)– Al_2O_3 (0001).

[¶] E-mail: komissarova@mig.phys.msu.ru

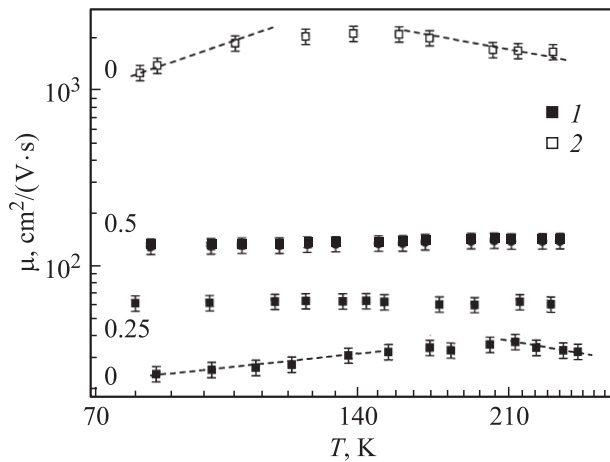


Рис. 2. Зависимости величины холловской подвижности μ от температуры. Данные 1 соответствуют структурам $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}-\text{GaN}(\text{МПЭ})-\text{Al}_2\text{O}_3(0001)$, данные 2 — структуре $\text{GaN}(\text{МОГФЭ})-\text{GaN}(\text{МОГФЭ})-\text{Al}_2\text{O}_3(0001)$. Цифрами у кривых обозначено содержание индия в твердом растворе x . Линиями показаны аппроксимации экспериментальных данных зависимостью $\mu \propto T^p$.

Полагая, что наблюдаемая энергия активации отвечает возбуждению с примесных состояний, а образец является компенсированным полупроводником, была оценена степень компенсации образцов разного состава x с использованием соотношения

$$n = \frac{N_D - N_A}{N_A} N_c e^{-\frac{E_A}{kT}},$$

где N_D , N_A и N_c — концентрации доноров, акцепторов и эффективная плотность состояний в зоне проводимости соответственно. Оценки сделаны в предположении, что энергетический спектр описывается в рамках закона дисперсии Кейна ($m_{\text{эф}}^* \propto E_g$), ширина запрещенной зоны E_g линейно зависит от содержания индия в твердом растворе $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ [3,4], значения эффективной массы при комнатной температуре составляют $m_{\text{эф}}^*(\text{GaN}) = 0.2m_0$ [5] и $m_{\text{эф}}^*(\text{InN}) = 0.07m_0$ [6,7]. В GaN степень компенсации составила ~ 0.2 . В твердых растворах увеличение x сопровождается быстрым ростом степени компенсации вплоть до $(N_D/N_A) - 1 \approx 30$ при $x = 0.5$.

Подвижность носителей заряда в пленке GaN, выращенной на подложке GaN(МОГФЭ)/ Al_2O_3 (рис. 2), существенно выше подвижности в структуре, выращенной на сапфире. Это, по всей видимости, свидетельствует об уменьшении количества дефектов в GaN при использовании в качестве подложки структуры GaN(МОГФЭ)/ Al_2O_3 .

Температурная зависимость холловской подвижности для всех исследованных образцов может быть аппроксимирована зависимостью $\mu \propto T^p$.

Для пленки GaN, выращенной на $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{GaN}$ (МОГФЭ), величина $p = 3/2$ в температурном интервале

ле $77 \lesssim T \lesssim 140$ К, что соответствует рассеянию на заряженной примеси. При температурах $140 \lesssim T \lesssim 300$ К $p = -1/2$, что свидетельствует о рассеянии на акустических и оптических поляризационных фононах. Если же в качестве подложки использовать сапфир Al_2O_3 , то при температурах $77 \lesssim T \lesssim 200$ К $p = 1/2$, что, видимо, соответствует смешанному механизму рассеяния на заряженной и нейтральной примеси, однако при высоких температурах $p = -1/2$, как и в случае подложки $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{GaN}$ (МОГФЭ).

В твердом растворе $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ при $x \geq 0.25$ подвижность носителей заряда практически не зависит от температуры, что говорит о преобладании рассеяния на нейтральной примеси во всем исследованном температурном интервале.

Таким образом, установлено, что при $x \leq 0.4$ сопротивление и коэффициент Холла $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ имеют активационные участки, причем энергия активации линейно зависит от x . При $x \approx 0.5$ сопротивление и коэффициент Холла практически перестают зависеть от температуры. Механизмы рассеяния электронов зависят от температуры, плотности дефектов, задаваемой, по-видимому, наличием или отсутствием промежуточного слоя GaN(МОГФЭ), а также от содержания индия в твердом растворе $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$.

Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ № 06-02-16531, 05-02-19875-ЯФ, 06-02-17306, Программы президиума РАН (П-28 ОФН).

Список литературы

- [1] C.H. Swartz, R.P. Tompkins, N.C. Giles. J. Cryst. Growth. **269**, 29 (2004).
- [2] S.P. Fu, Y.F. Chen. Appl. Phys. Lett., **85**(9), 1523 (2004).
- [3] S. Pereira, M.R. Correia, T. Monteiro, E. Pereira, E. Alves, A.D. Sequeira, N. Franco. Appl. Phys. Lett., **78**(15), 2137 (2001).
- [4] K.P. O'Donnell, I. Fernandez-Torrente. J. Cryst. Growth, **369**, 100 (2004).
- [5] S. Bloom, G. Harbeke, E. Meier, I.B. Ortenburger. Phys. Status Solidi, **66**, 161 (1974).
- [6] W. Walukiewicz. Physica E, **20**, 300 (2004).
- [7] I. Vurgaftman, J.R. Meyer. Appl. Phys. Rev., **94**(6), 3675 (2003).

Редактор Т.А. Полянская

Peculiarities of electrophysical properties of solid solutions $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$

T.A. Komissarova, N.N. Matrosov, L.I. Ryabova, D.R. Khokhlov, V.N. Jmerik⁺, S.V. Ivanov⁺

Moscow State University,
119992 Moscow, Russia

⁺ Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract Studied have been the temperature dependences of the Hall coefficient and the specific resistance of solid solutions of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ under $0 \leq x \leq 1$. The activation energy was shown to linearly depend on In content being a linear function of the In concentration.