

Электрофизические параметры материалов группы нитридов и анализ методов их расчета

В. А. Улькаров, Н. И. Яковлева, А. В. Никонов

В работе исследованы методы определения концентрации и подвижности носителей заряда в материалах группы нитридов p - и n -типа проводимости, предложены выражения для определения коэффициента Холла и подвижности носителей заряда в образцах нестандартной формы, а также поправочные коэффициенты, уменьшающие погрешность измерений. Определены концентрации и подвижности в образцах на основе группы нитридов p - и n -типа проводимости методом Холла и методом Ван-дер-Пау для образцов разной геометрии с контактами различной формы.

Ключевые слова: GaN, ультрафиолетовый (УФ), гетероэпитаксиальные структуры, концентрация, подвижность носителей заряда, метод Холла, метод Ван-дер-Пау.

Ссылка: Улькаров В. А., Яковлева Н. И., Никонов А. В. // Успехи прикладной физики. 2020. Т. 8. № 3. С. 199.

Reference: V. A. Ulkarov, N. I. Yakovleva, and A. V. Nikonov, Usp. Prikl. Fiz., **8** (3), 199 (2020).

Введение

Из-за высоких значений концентраций носителей заряда для полупроводников группы нитридов характерным является вырождение как в материалах p -, так и в материалах n -типа проводимости, что необходимо учитывать при проектировании приборов и расчете их параметров. Ошибки при определении концентрации и подвижности носителей заряда в данных полупроводниках связаны с дефектами и примесями донорного и акцепторного типа, образующимися в процессе роста.

В связи с данным обстоятельством в зонной структуре появляются дополнительные акцепторные и донорные уровни, аккумулирующие носители заряда, что также усложняет расчет электрофизических параметров.

Для определения подвижности и концентрации используются как традиционные методы: метод Холла и метод Ван-дер-Пау, так и методы, связанные с зонной структурой материала.

Метод Холла используется для определения концентрации и подвижности носителей заряда образцов с простой геометрией, но не подходит для сложных, нестандартных конфигураций. Популярность метода Ван-дер-Пау обусловлена тем, что не имеется ограничений в геометрических размерах образцов, за исключением толщины измеряемого слоя. Требования включают плоскостность образца, перпендикулярность направления магнитного поля по отношению к его поверхности, а также однородность, изотропность, и возможность изготовления точечных контактов, максимально приближенных к краям.

В работе исследованы методы определения концентрации и подвижности носителей

Улькаров Вадим Айратович^{1,2}, студент.
Яковлева Наталья Ивановна¹, г.н.с. НИЦ, к.т.н.
Никонов Антон Викторович², зам. зав. кафедрой
физической электроники, к.ф.-м.н.

¹АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, ул. Косинская, 9.

E-mail: orion@orion-ir.ru

²Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет).
Россия, 141701, Московская обл., г. Долгопрудный,
Институтский пер., 9.

Статья поступила в редакцию 5 июня 2020 г.

© Улькаров В. А., Яковлева Н. И., Никонов А. В., 2020

заряда в материалах группы нитридов p - и n -типа проводимости, предложены выражения для определения коэффициента Холла, а также поправочные коэффициенты, уменьшающие погрешность измерений.

Метод Холла

Метод Холла характеризуется простотой и позволяет определять концентрацию и подвижность носителей заряда для стандартных образцов с проводимостью одного типа. Указанный метод основывается на измерениях коэффициента Холла. Данные расчета зависят от конфигурации образца, используемого для измерений, который должен быть классифицирован как стандартный образец Холла с контактами по краям образца в перпендикулярных направлениях. Схема проведения измерений по методу Холла представлена на рис. 1.

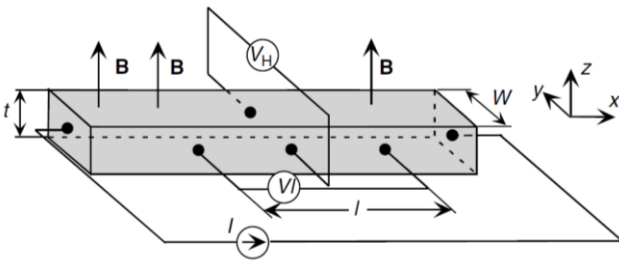


Рис. 1. Образец Холла, используемый для измерения подвижности и концентрации носителей заряда.

Ток пропускается по длине образца, в направлении x , и измеряется падение напряжения в направлении y при подаче магнитного поля в поперечном направлении. Сила Лоренца, вызывающая возникновение напряжения Холла, приводит к накоплению электронов или дырок на одной или другой стороне образца (не показано). Токи в направлении координат x и y определяются выражениями:

$$J_x = qE_x n\mu_n + p\mu_p,$$

$$J_y = q\mu_n n E_y - v_{xn} B + q\mu_p p E_y - v_{xp} B,$$

где E_x – напряжённость электрического поля в направлении x ; E_y – напряжённость электрического поля в направлении y ; B – напряжённость магнитного поля в направлении z ; μ_n –

подвижность электронов; μ_p – подвижность дырок; n – концентрация электронов; p – концентрация дырок; q – заряд электрона; v_{xn} , v_{xp} – скорости электронов и дырок в направлении координаты x .

Поскольку y -составляющая тока равна нулю, можно получить формулу для напряжённости электрического поля

$$E_y = \frac{E_x B (\mu_p^2 p - \mu_n^2 n)}{\mu_n n + \mu_p p}.$$

Коэффициент Холла при наличии в образце обоих носителей заряда определяется как

$$R_H = \frac{p - b^2 n}{q (p + b^2 n)},$$

где $b = \mu_n / \mu_p$.

При $n \gg p$, коэффициент Холла приводится к отношению

$$R_H = -\frac{1}{qn}.$$

При $p \gg n$ – соответственно к отношению

$$R_H = \frac{1}{qp}.$$

Холловская подвижность определяется уравнением $\mu_H = R_H \sigma$, где σ – проводимость образца, которая является измеряемой величиной или $\mu = R_H / \rho$, где ρ – удельное сопротивление. Подвижность Холла вычисляется как

$$\mu_H = \frac{v_x}{E_x} = -\frac{j_x}{qnE_x} = \left| \frac{R_H}{\frac{E_x}{j_x}} \right| = \left| \frac{R_H}{\rho} \right| = \frac{E_y}{BE_x} = \frac{V_H}{B V_l},$$

где v_x – скорость электронов в направлении координаты x ; V_H – напряжение Холла; w – ширина образца; l – длина образца; V_l – напряжение на длине l .

Отметим, что в полупроводнике со смешанной проводимостью, если концентрации дырок и электронов не сильно отличаются

друг от друга, то для определения полярности полупроводника используется метод горячего зонда [1].

Метод Ван-дер-Пау

Геометрия Ван-дер-Пау является наиболее часто используемой для измерений электрофизических параметров для образцов произвольной формы. На рис. 2 показаны образцы, имеющие геометрию Ван-дер-Пау, как правило, они представляют собой гетероструктуры на основе группы нитридов, выращенные на подложках с высоким удельным сопротивлением.

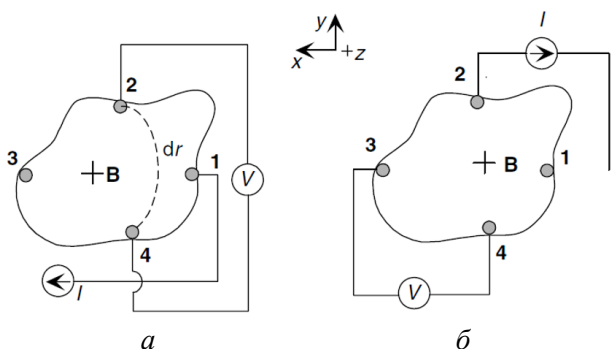


Рис. 2. Образцы, имеющие геометрию Ван-дер-Пау, в режимах измерения коэффициента Холла (слева) и проводимости или удельного сопротивления (справа).

Для измерения коэффициента Холла ток пропускается между противоположной парой контактов, а напряжение измеряется между другой парой контактов (рис. 2, а). При измерениях проводимости Холла (удельного сопротивления) ток пропускается между соседними контактами, а напряжение измеряется между противоположными соседними контактами (рис. 2, б).

Измерения проводятся с магнитным полем и без него, полученные данные усредняются. Сопротивления $R_{34,12}$, $R_{23,41}$, а затем удельное сопротивление ρ рассчитываются из уравнений:

$$R_{34,12} = \frac{|V_{34}|}{I_{12}} \text{ и } R_{23,41} = \frac{|V_{23}|}{I_{41}}, \quad (1)$$

$$\rho = \frac{\pi t R_{34,12} + R_{23,41} f}{2 \ln 2},$$

где V – напряжение между контактами; I – сила тока; t – толщина образца; f – коэффициент, учитывающий геометрическую форму образца и контактов, в идеале он равен 1, если образец и контакты однородны. Если образцы сложной конфигурации, то коэффициент f определяется из трансцендентного уравнения

$$\frac{P-1}{P+1} = \frac{f}{\ln 2} \operatorname{arccosh} \left\{ \frac{1}{2} \exp \left[\frac{\ln 2}{f} \right] \right\},$$

где $P = R_{34,12}/R_{23,41}$ – соотношение сопротивлений при $P < 1$, или соотношение сопротивлений $P = R_{23,41}/R_{34,12}$ при $P > 1$.

На рис. 3 представлена зависимость коэффициента f от P .

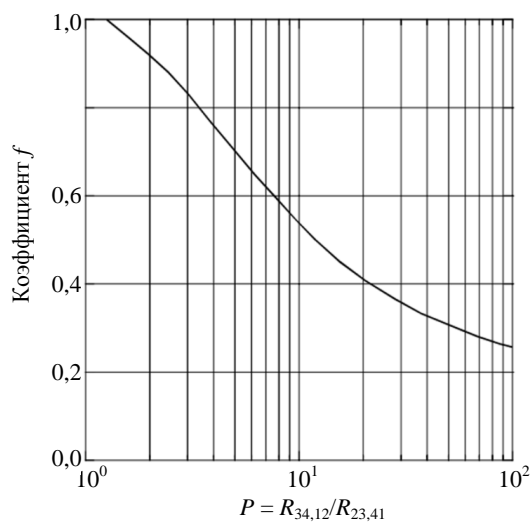


Рис. 3. Зависимость коэффициента f от отношения сопротивлений $P = R_{34,12}/R_{23,41}$ в диапазоне от 1 до 100.

В таблице представлены значения коэффициента f в зависимости от соотношения $R_{34,12}/R_{23,41}$.

Таблица

$R_{34,12}/R_{23,41}$	1	2	3	4	5	6	8	10	20	50
f	1	0,96	0,9	0,85	0,81	0,78	0,72	0,69	0,59	0,46

Приближенное решение трансцендентного уравнения для коэффициента f приведено в работе [2]. Параметр P определяется из формулы

$$P = \frac{\ln \left[\left(\frac{1}{2} \right) - \alpha \right]}{\ln \left[\left(\frac{1}{2} \right) + \alpha \right]}.$$

Коэффициент f через выше указанные параметры вычисляется как

$$f = \frac{\ln 1/4}{\ln \left[\left(\frac{1}{2} \right) - \alpha \right] + \ln \left[\left(\frac{1}{2} \right) + \alpha \right]}.$$

Значение α находится в диапазоне $-1/2 < \alpha < 1/2$, при $\alpha = 0,25$, $P = 4,8$; а $f = 0,83$.

Для повышения точности выполняются дополнительные измерения сопротивлений после перепайки контактов и смены направления тока. Уточненное значение удельного сопротивления принимает вид

$$\rho = \frac{\pi}{8 \ln 2} \left[\frac{R_{34,12} - R_{34,21} + R_{23,41} - R_{23,14} f_A +}{+ R_{12,34} - R_{12,43} + R_{41,23} - R_{41,32} f_B} \right],$$

где f_A и f_B определяются из табл. 1 и рис. 3 [3].

Коэффициенты P_A и P_B рассчитываются по формулам

$$P_A = \frac{R_{34,12} - R_{34,21}}{R_{23,41} - R_{23,14}} \text{ и } P_B = \frac{R_{12,34} - R_{12,43}}{R_{41,23} - R_{41,32}}.$$

Измеряется напряжение между контактами 2–4 (V_{24}) при подаче тока между противоположными контактами (I_{13}), где t – толщина слоя. Затем измерения повторяются со сменой контактов, чтобы избежать эффектов магниторезистивной и геометрической асимметрии, и в этом случае коэффициент Холла определяется как [4, 5]

$$R_H = \frac{1}{2} \left\{ \frac{[V_{24} \ B \ -V_{24} \ 0]t}{I_{13}B} + \frac{[V_{13} \ B \ -V_{13} \ 0]t}{I_{24}B} \right\}.$$

Гальванометрические ошибки могут быть устранены путем повторения измерений с изменением полярности магнитного поля, что приводит к уравнению

$$R_H = \frac{1}{4} \left\{ \frac{[V_{24} \ B \ -V_{24} \ -B]t}{I_{13}B} + \frac{[V_{13} \ B \ -V_{13} \ -B]t}{I_{24}B} \right\}.$$

Как и в случае образца Холла, холловская подвижность определяется уравнением $\mu_H = R_H \sigma$, где σ – проводимость образца, которая является измеряемой величиной или $\mu = R_H / \rho$. Концентрация электронов или дырок рассчитывается из уравнений:

$$\text{при } n \gg p \quad R_H = -\frac{1}{en}$$

$$\text{при } p \gg n \quad R_H = \frac{1}{ep}$$

в зависимости от полярности образца.

Геометрические особенности образцов учитываются при измерениях Ван-дер-Пау с помощью дополнительных моделей [3]. В методе используется корректирующий коэффициент, учитывающий формы контактов. Геометрические эффекты минимальны при использовании образцов круглой формы, которые показаны на рис. 4, для которых относительная погрешность задается формулой

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = -\frac{1}{16 \ln 2} \frac{l_c^2}{l_s^2},$$

где l_c – диаметр контакта; l_s – диаметр образца, минимальная погрешность $\sim 1\%$.

Особенности формы контактов учитываются в формуле подвижности и коэффициента Холла с помощью выражения

$$\frac{\Delta \mu_H}{\mu_H} = \frac{\Delta R_H}{R_H} \approx \frac{2l_c}{\pi^2 l_s}.$$

Было выявлено, что размеры контактов влияют на определяемые параметры. На рис. 4 показаны образцы различной геометрии с контактами различной формы: образцы квадратной геометрии с квадратными и треугольными контактами, круглые образцы и крестообразные образцы с прямоугольными контактами.

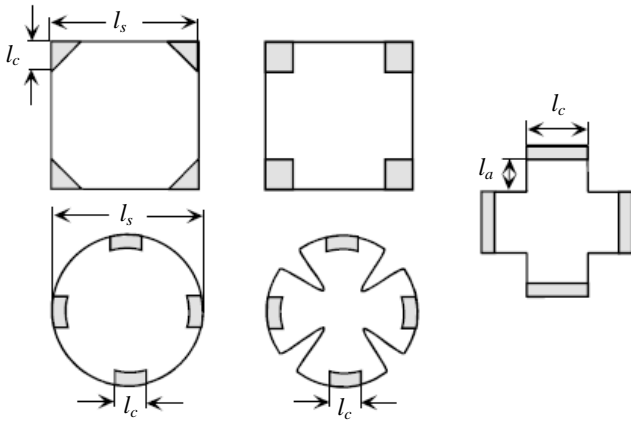


Рис. 4. Образцы Ван-дер-Пау с омическими контактами различной формы.

Минимальная погрешность влияния формы контактов наблюдается для крестообразного образца. Ошибка удельного сопротивления рассчитывается как [6]

$$1 - \frac{\rho}{\rho_m} \approx \frac{\Delta\rho}{\rho} = 0,59 \pm 0,0006 \exp\left[-6,23 \pm 0,02 \frac{l_a}{l_c}\right],$$

где ρ – задается уравнением (1); ρ_m – измеренное удельное сопротивление; $\frac{l_a}{l_c}$ –

отношение геометрических параметров образца.

Для достижения минимальной погрешности ($\sim 1\%$) при расчетах подвижности для круглого образца, необходимо выбрать соотношение размеров контактов по формуле $l_c/(l_c + 2l_a) = 1/6$, $l_c + 2l_a$, где l_s – длина образца.

В работах [7, 8] рассчитана погрешность для подвижности образца в форме креста

$$\frac{\Delta\mu_n}{\rho_m} \approx \frac{\Delta\rho}{\rho} = 1,045 \exp\left[-\frac{\pi l_a}{l_c}\right],$$

которая составляет 0,04 % при соотношении геометрических параметров $l_c/(l_c + 2l_a) = 1/6$, если $l_c = l_a$, ошибка составит 4,5 %.

Для образцов в форме квадрата используются контакты квадратной или треугольной формы, как показано на рис. 4. Погрешность расчетов удельного сопротивления для квадратного образца проанализирована в работе [9]. Экспериментальные и расчетные значения корректирующего коэффициента для удельно-

го сопротивления в зависимости от отношения размера контакта к длине образца представлены на рис. 5 для треугольных и квадратных контактов.

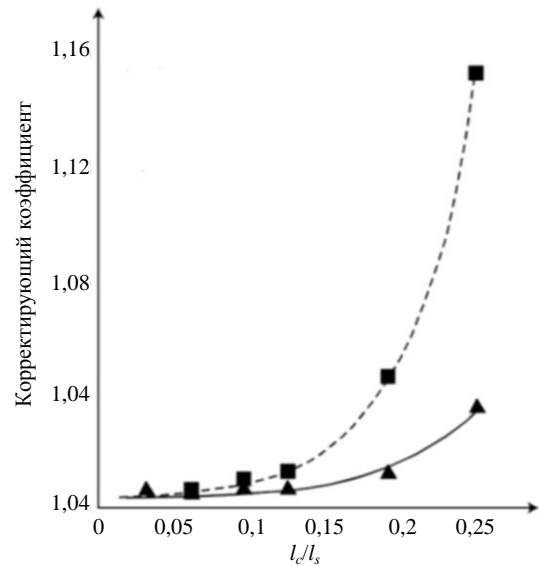


Рис. 5. Зависимость корректирующего коэффициента удельного сопротивления от отношения размера контакта к длине образца.

Квадратные маркеры соответствуют образцам с контактами квадратной формы, треугольные маркеры – образцам с контактами треугольной формы.

Экспериментальные данные и обсуждение результатов

Качество кристаллической структуры образцов группы нитридов сильно влияет на конечные результаты при определении электрофизических параметров. Выращивались тонкие и толстые гетероструктуры GaN с относительно низкой концентрацией ионизированных примесей и концентрацией дефектов. Толстые структуры утоньшались для удаления дефектных слоев материала, что позволило получить хорошее соответствие между экспериментальными и расчетными данными.

Исследована температурная зависимость подвижности электронов в эпитаксиальном образце GaN n -типа проводимости, выращенном методом газовой фазной эпитаксии (HVPE) в АО «НИИ «Полюс».

На рис. 6 представлены значения подвижности в зависимости от температуры для образца GaN, выращенного методом газовой фазной

эпитаксии (HVPE), с концентрацией доноров $N_D = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (круглые маркеры). По температурной зависимости подвижности вычислена концентрация акцепторов, которая составила $N_A = 2,4 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

На рис. 6 также показаны экспериментальные данные трех образцов на основе GaN

измеренные при температурах от 260 К до 300 К (квадратные маркеры).

Анализ полученных данных показывает, что коэффициент компенсации концентрации доноров составляет от 0,70 до 0,85 [10, 11]. Максимальная подвижность $\mu = 7500 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ достигается при $T = 48 \text{ К}$.

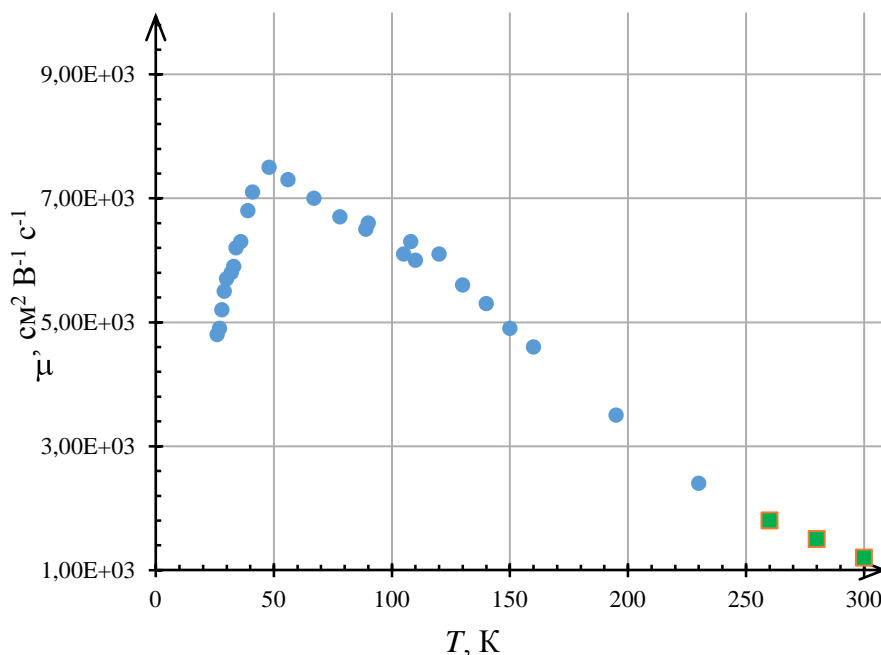


Рис. 6. Данные измерений холловской подвижности для образца GaN, выращенного методом газовой эпитаксии (HVPE) в зависимости от температуры (круглые маркеры), и экспериментальные данные трех образцов на основе GaN, измеренные при температурах от 260 К до 300 К (квадратные маркеры).

Экспериментальные данные при высоких температурах для тестовых образцов GaN получены на оборудовании НИЦ. Тестовые образцы состояли из оптически прозрачной подложки Al_2O_3 (сапфир), буферных слоев и поглощающего слоя GaN, выращенном методом газовой эпитаксии (HVPE) в АО «НИИ «Полюс». Толщина буферных слоев у исследованных образцов составила 200 \AA . Как представлено на рис. 6 у измеренных образцов с поглощающим слоем GaN *n*-типа проводимости достигнуты высокие значения подвижности электронов: $\mu = 1425 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ при $T = 273 \text{ К}$, $\mu = 1500 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ при $T = 280 \text{ К}$; $\mu = 1800 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ при $T = 260 \text{ К}$, что указывает на структурное совершенство исследованных образцов.

Одним из важных компонентов гетероструктуры являются буферные слои, выращенные на оптически прозрачной подложке, которые позволяют достигать высоких значений подвижности электронов в поглощающем слое. При использовании тонкого низкотемпературного слоя AlN толщиной $\sim 20 \text{ \AA}$ в качестве буферного слоя при стандартных температурах роста подвижность электронов увеличивается примерно в 3 раза. При увеличении толщины буферного слоя до значения $\sim 200 \text{ \AA}$ подвижность эпитаксиального слоя GaN увеличивается до значений $\sim 1000 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ при $T = 300 \text{ К}$ и до $3000 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ при $T = 70 \text{ К}$ соответственно.

На рис. 7 представлена зависимость подвижности Холла от концентрации доноров при $T = 300 \text{ К}$ в структурах с поглощающим слоем GaN *n*-типа.

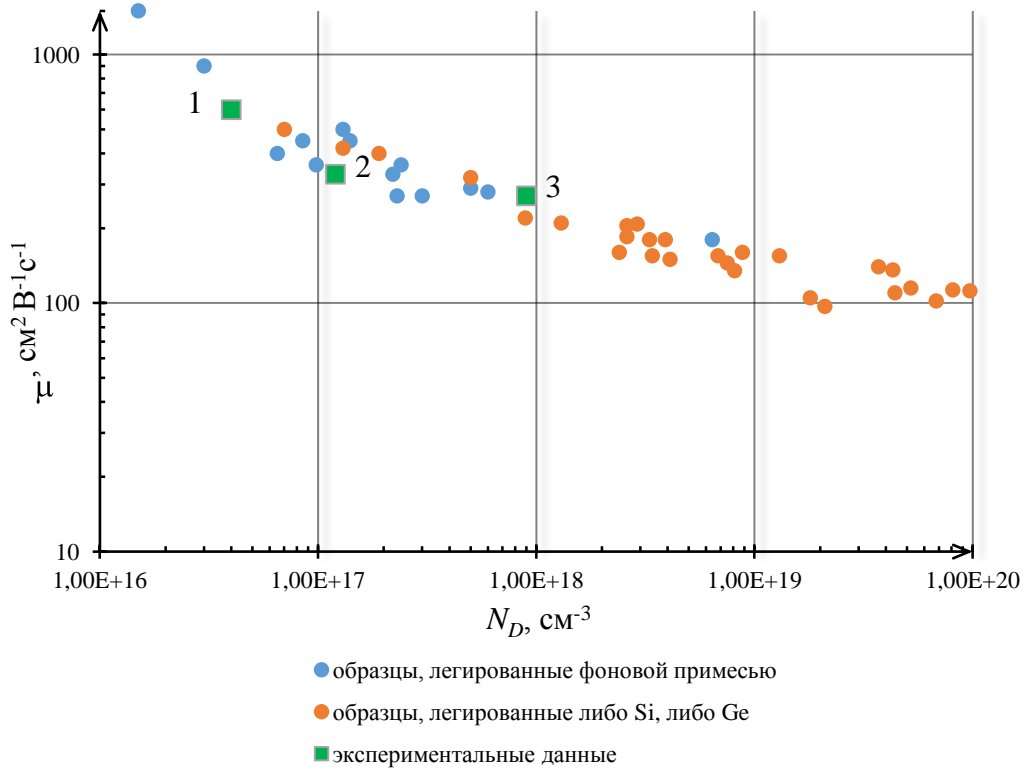


Рис. 7. Зависимость холловской подвижности от концентрации доноров при $T = 300\text{ K}$ для образцов GaN n -типа, выращенных методами металлоорганической газофазной эпитаксии (OMVPE) и молекулярно-лучевой эпитаксии (МВЕ) в ИФП СО РАН.

Круглые синие маркеры означают образцы n -типа проводимости, легированные фоновой примесью, а круглые оранжевые маркеры – образцы, легированные Si или Ge. Из рисунка видно, что с увеличением концентрации подвижность уменьшается как в легированных, так и в собственных образцах.

Проведены измерения подвижности и концентрации трех образцов с поглощающим слоем GaN n -типа проводимости методом Ван-дер-Пау. Образцы выращивались методом МЛЭ в ИФП СО РАН. Толщина буферного слоя составила 100 \AA . Зелеными маркерами представлены результаты измерений в экспериментальных образцах: образец 1 – $\mu = 600\text{ cm}^2\text{ V}^{-1}\text{ s}^{-1}$, $N_D = 4 \times 10^{16}\text{ cm}^{-3}$; образец 2 – $\mu = 330\text{ cm}^2\text{ V}^{-1}\text{ s}^{-1}$, $N_D = 1,2 \times 10^{17}\text{ cm}^{-3}$; образец 3 – $\mu = 270\text{ cm}^2\text{ V}^{-1}\text{ s}^{-1}$, $N_D = 9 \times 10^{17}\text{ cm}^{-3}$.

Экспериментальные исследования показывают необходимость улучшения кристаллической структуры образцов с поглощающим слоем GaN, выращенных молекулярно-лучевой эпитаксии (МВЕ) в ИФП СО РАН для

изготовления фотоприемных устройств с высокими характеристиками. Планируется проведение технологических работ по совершенствованию процесса выращивания буферных слоев для увеличения подвижности в рабочих поглощающих областях.

Заключение

В работе исследованы методы расчета концентрации и подвижности в образцах на основе группы нитридов p - и n -типа проводимости: метод Холла и метод Ван-дер-Пау.

Измерение параметров структур группы нитридов по методу Холла является наиболее распространенным методом измерений. Особенностью метода является выбор образца, используемого для измерений, который должен быть классифицирован как стандартный образец Холла с четырьмя контактами в его торцах. Если образец имеет произвольную форму, то применяется метод Ван-Дер-Пау. Геометрия Ван-дер-Пау является наиболее часто используемой для большинства измере-

ний электрофизических параметров. Для уточнения расчетов по методу Ван-дер-Пау введен f – коэффициент, учитывающий геометрическую форму образца и контактов, значение которого уточняется в зависимости от соотношения сопротивлений между контактами и удельным сопротивлением образца. Для образцов различной геометрии с контактами различной формы проведены расчеты погрешности подвижности и удельного сопротивления.

Для изготовления фотоприемных устройств выращивались гетероструктуры на основе GaN. Толстые структуры утоньшались для удаления дефектных слоев материала, что позволило получить хорошее соответствие между экспериментальными и теоретическими данными и привело к высокой подвижности электронов в образцах n -типа проводимости как при комнатной температуре ($\mu = 1425 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ при $T = 273 \text{ К}$), так и при более низких температурах ($\mu = 7500 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ при $T = 48 \text{ К}$).

ЛИТЕРАТУРА

1. Anderson D. A., Apsley N. // Semiconductor Science and Technology. 1986. Vol. 1. P. 187.

2. Wasscher J. D. (1979) Electrical transport phenomena in MnTe5, an antiferromagnetic semiconductor. Dissertation, Philips. Gloeilampenfabrieken, Eindhoven, Netherlands 1969, reproduced, in Laboratory Notes on Electrical and Galvanometric Measurements (ed. H. H. Wieder), Elsevier, Amsterdam.

3. Look D. C. Electrical Characterization of GaAs Materials and Devices, John Wiley & Sons, Ltd., 1989.

4. Yu P. Y., Cardona M. Fundamentals of Semiconductors. – Berlin: Springer, 1995.

5. Seeger K. (1991) Semiconductor Physics, Springer Solid State Series, 5th edn, vol. 40, Springer, Berlin.

6. David J. M., Buehler M. G. // Solid-State Electronics. 1977. Vol. 20. P. 539.

7. DeMay G. // Archiv Electron Uebertragungstech. 1973. Vol. 27. P. 309.

8. DeMey G. Potential calculations in Hall plates, in Advances in Electronics and Electron Physics, vol. 61 (eds L. Marton and C. Marton), Academic Press, New York, pp. 1–61.

9. Chwang R., Smith B. J., Crowel C. R. // Solid-State Electronics. 1974. Vol. 17. P. 1217.

10. Yun F., Reshchikov M. A., Jones K. M., Visconti P., Morkoz H., Park S. S., Lee K. Y. // Solid-State Electronics. 2000. Vol. 44. P. 2225.

11. Huang D., Yun F., Visconti P., Reshchikov M. A., Jones K. M., Wang D., Morko H., Rode D. L., Farina L. A., Kurdak Z., Tsen K. T., Park S. S., Lee K. Y. // Solid-State Electronics. 2001. Vol. 45. № 5. P. 711.

PACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz, 07.57.Kp, 85.60.Dw

Electrophysical parameters of nitride group materials and experimental methods of their calculation

V. A. Ulkarov^{1,2}, N. I. Yakovleva¹, and A. V. Nikonov²

¹ Orion R&P Association, JSC

9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia

² Moscow Institute of Physics and Technology

9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia

Received June 6, 2020

Electrophysical parameters methods for calculations of concentration and charge carrier mobility in p- and n-type materials on the basis of nitrides have been investigated. Expressions for Hall coefficient calculation and the other charge carriers parameters in nonstandard shape samples have been proposed, including correction coefficients to reduce the measure errors. Concentrations and motilities in p- and n-type samples based on nitrides were determined by Hall method and van der Pau method for different geometry samples with contacts of different shapes.

Keywords: GaN, ultraviolet (UV), heteroepitaxial structures, concentration, mobility of charge carriers, Hall method, van der Pau method.

REFERENCES

1. D. A. Anderson and N. Apsley, *Semiconductor Science and Technology* **1**, 187 (1986).
2. J. D. Wasscher, (1979) Electrical transport phenomena in MnTe₅, an antiferromagnetic semiconductor. Dissertation, Philips. Gloeilampenfabrieken, Eindhoven, Netherlands 1969, reproduced, in *Laboratory Notes on Electrical and Galvanometric Measurements* (ed. H. H. Wieder), Elsevier, Amsterdam.
3. D. C. Look, *Electrical Characterization of GaAs Materials and Devices*, John Wiley & Sons, Ltd., 1989.
4. P. Y. Yu and M. Cardona, *Fundamentals of Semiconductors* (Springer, Berlin, 1995).
5. K. Seeger, *Semiconductor Physics, Springer Solid State Series, 5th edn, vol. 40* (Springer, Berlin, 1991).
6. J. M. David and M. G. Buehler, *Solid-State Electronics* **20**, 539 (1977).
7. G. DeMay, (1973) *Archiv Electron Uebertragungstech* **27**, 309 (1973).
8. G. DeMey, *Potential calculations in Hall plates, in Advances in Electronics and Electron Physics, vol. 61* (eds L. Marton and C. Marton), (Academic Press, New York), pp. 1–61.
9. R. Chwang, B. J. Smith, and C. R. Crowel, *Solid-State Electronics* **17**, 1217 (1974).
10. F. Yun, M. A. Reshchikov, K. M. Jones, P. Visconti, H. Morkoz, S. S. Park, and K. Y. Lee, *Solid-State Electronics* **44**, 2225 (2000).
11. D. Huang, F. Yun, P. Visconti, M. A. Reshchikov, K. M. Jones, D. Wang, H. Morko, D. L. Rode, L. A. Farina, 3. Kurdak, K. T. Tsen, S. S. Park, and K. Y. Lee, *Solid-State Electronics* **45** (5), 711 (2001).

