

Зависимость подвижности от концентрации электронов при рассеянии на полярных оптических фононах в нитридах A^{III}N

© С.И. Борисенко

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050 Томск, Россия

E-mail: sib@tpu.ru

(Получена 31 марта 2015 г. Принята к печати 21 июля 2015 г.)

Методом прогонки проведен расчет зависимости эффективного времени релаксации от концентрации электронов в нитридах A^{III}N при рассеянии на продольных полярных оптических фононах. Метод учитывает неупругость рассеяния электронов на полярных оптических фононах для нитридов в сфалеритном приближении. Расчеты показали существенное увеличение подвижности в образцах с вырожденным электронным газом при учете экранировки дальнедействующего потенциала продольных полярных оптических фононов.

Как известно, нитриды и их твердые растворы широко используются для изготовления светодиодов, а также являются перспективными материалами для создания многих других приборов электроники [1–3]. Возможности использования этих материалов существенно зависят от их электрических и оптических характеристик, предельные значения которых, как правило, опираются на определенные физические модели и методы расчета. Одной из основных характеристик является подвижность носителей заряда, значение которой наряду с параметрами энергетического спектра существенно зависит от механизмов рассеяния. Среди основных механизмов учет рассеяния на дальнедействующем потенциале продольных полярных оптических фононов (ПОФ) является наиболее сложным, так как является неупругим и в общем случае не описывается временем релаксации. К настоящему времени для алмазоподобных полупроводников A^{III}B^V [4,5] и нитридов A^{III}N в сфалеритном приближении [2] существует ряд методов, которые учитывают неупругость данного рассеяния. Однако они, как правило, не учитывают экранировки дальнедействующего потенциала продольных ПОФ, что может существенно понизить рассчитанные этими методами парциальные значения подвижности при достаточно высоких значениях концентрации электронов.

В данной работе проведен численный анализ зависимости парциальной подвижности от концентрации электронов в нитридах AlN, GaN, InN и GaAs при рассеянии на продольных ПОФ в сфалеритном приближении. Расчет подвижности проводился с учетом экранировки дальнедействующего потенциала продольных ПОФ методом, разработанным автором в работе [6]. Метод учитывает неупругость данного рассеяния и зависимость распределения электронов по состояниям в зоне проводимости от их концентрации.

Вероятность рассеяния электронов на дальнедействующем потенциале продольных ПОФ рассчитывалась по формуле

$$w_{\mathbf{k}\mathbf{k}'}^{\pm} = w(q) \left(N_{\omega} + \frac{1}{2} \pm \frac{1}{2} \right) \delta(E(\mathbf{k}') - E(\mathbf{k}) \pm \hbar\omega) \delta_{\mathbf{k},\mathbf{k}'\pm\mathbf{q}}, \quad (1)$$

где

$$w(q) = \frac{\pi e^2 \omega (\epsilon_S - \epsilon_{\infty})}{\epsilon_0 \epsilon_S \epsilon_{\infty}} \frac{q^2}{(q^2 + \alpha^2)^2}, \quad (2)$$

$N_{\omega} = (\exp(\hbar\omega/k_B T) - 1)^{-1}$ — функция распределения Бозе–Эйнштейна; \mathbf{q} — волновой вектор фонона с частотой ω ; \mathbf{k}, \mathbf{k}' — волновые вектора начального и конечного состояния электрона; $\epsilon_S, \epsilon_{\infty}$ — низкочастотное и высокочастотное значения диэлектрической проницаемости;

$$\alpha = \sqrt{\frac{e^2}{\epsilon_{\infty} \epsilon_0} \frac{\partial n}{\partial \xi}} \quad (3)$$

— коэффициент экранирования Дебая; n — концентрация электронов; ξ — приведенный уровень Ферми.

Численный расчет эффективного времени релаксации для рассматриваемых выше полупроводников проводился при значениях параметров, приведенных в табл. 1.

На рис. 1 представлены результаты расчета зависимости коэффициента экранирования Дебая от концентрации электронов в рассматриваемых полупроводниках при заданной температуре $T = 300$ К с учетом степени

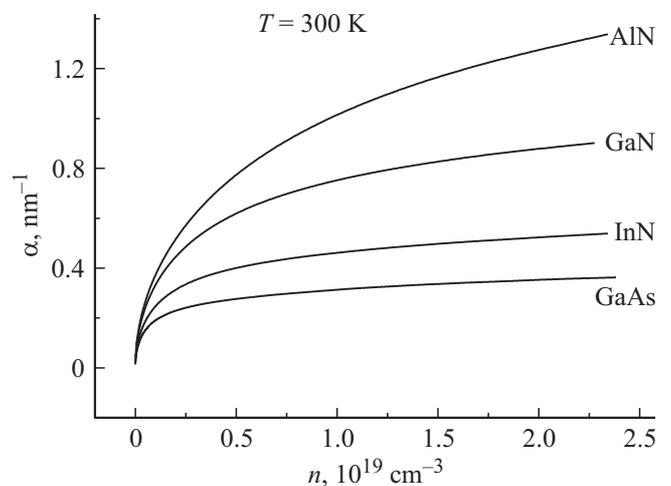


Рис. 1. Зависимость коэффициента экранирования Дебая от концентрации электронов.

Таблица 1. Параметры рассеяния электронов на продольных ПОФ (300 К)*

Параметр	GaAs	InN	GaN	AlN
m^*/m_0	0.066	0.115	0.22	0.48
ϵ_s	12.85	15.3	8.9	8.5
ϵ_∞	10.88	8.4	5.5	4.77
$h\nu$, мЭВ	36	89	91	99

Примечание. * — параметры взяты из работы [2].

вырождения электронного газа. С увеличением концентрации электронов и уменьшением высокочастотной диэлектрической проницаемости полупроводника коэффициент экранирования, согласно теории, увеличивается.

На рис. 2 в качестве примера представлены зависимости эффективного времени релаксации электронов от энергии для образцов с концентрацией $n = 10^{18} \text{ см}^{-3}$ при $T = 300 \text{ К}$, рассчитанные вышеуказанным методом [6].

Отличительной особенностью этих зависимостей является наличие осцилляций, период которых совпадает с энергией длинноволновых продольных ПОФ. Для образ-

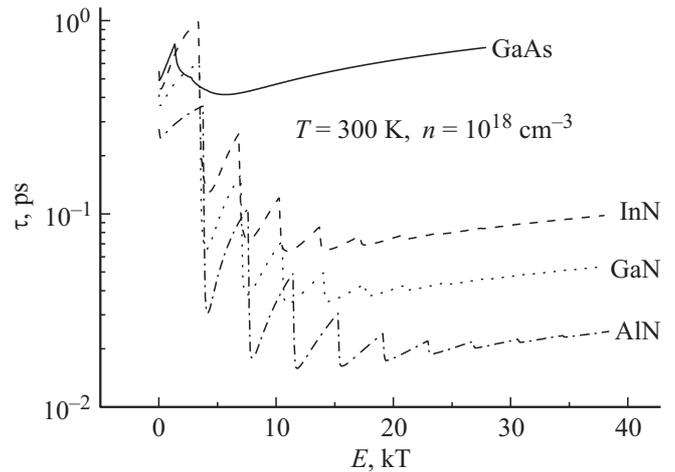


Рис. 2. Зависимость эффективного времени релаксации от энергии с учетом рассеяния на продольных ПОФ.

ца GaAs эти осцилляции выражены намного слабее из-за вырождения электронного газа при заданных значениях концентрации и температуры за счет малой эффективной массы.

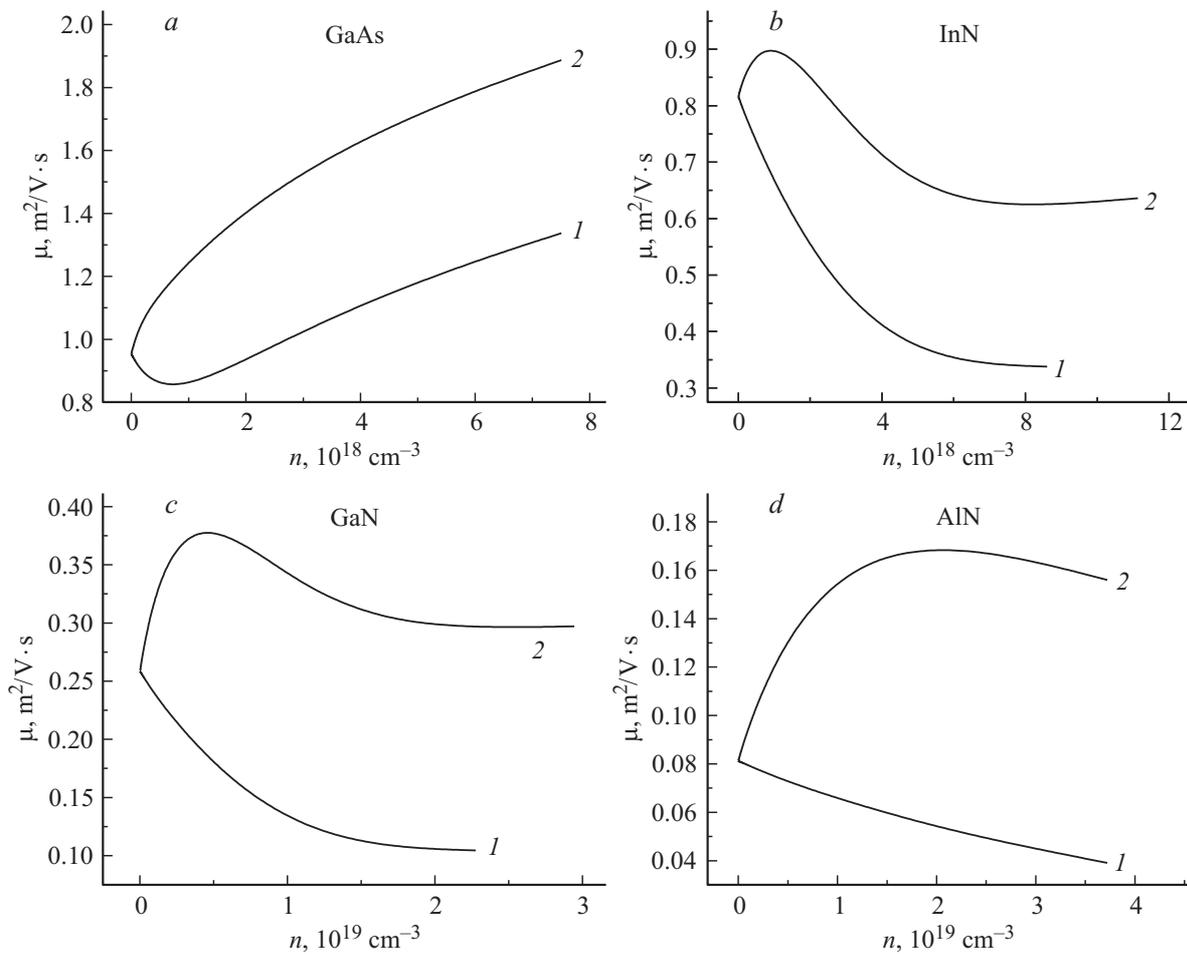


Рис. 3. Зависимость подвижности от концентрации электронов при рассеянии на продольных ПОФ для GaAs (a), InN (b), GaN (c) и AlN (d): 1 — $\alpha = 0$; 2 — $\alpha \neq 0$.

Таблица 2. Подвижность электронов, рассчитанная с учетом (μ) и без учета (μ_0) экранировки потенциала продольных ПОФ

Параметр	GaAs	InN	GaN	AlN
$n, 10^{18} \text{ см}^{-3}$	2.8	6.3	17	54
$\mu, \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	1.5	0.63	0.30	0.14
$\mu_0, \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	1.0	0.34	0.11	0.033
μ/μ_0	1.5	1.9	2.7	4.2

На рис. 3 приведены рассчитанные зависимости подвижности электронов при рассеянии на продольных ПОФ в рассматриваемых полупроводниках от концентрации электронов с учетом ($\alpha \neq 0$) и без учета ($\alpha = 0$) экранировки.

Из рисунков видно, что учет экранировки потенциала продольных ПОФ существенно увеличивает подвижность электронов в рассматриваемых полупроводниках. В табл. 2 приведены численные значения подвижности электронов, рассчитанные с учетом и без учета экранировки при $T = 300 \text{ К}$ для образцов с одинаковой степенью вырождения ($\xi = 4k_B T$).

Следует отметить, что численные значения результатов расчета эффективного времени релаксации и подвижности, полученные в данной работе, требуют уточнения. Это касается прежде всего полупроводников с большой эффективной массой (GaN, AlN), для которых при большой концентрации электронов нужно учитывать непараболичность энергетического спектра.

Список литературы

- [1] Р. Куэй. *Электроника на основе нитрида галлия* (М., Техносфера, 2011), с. 592. [Пер. с англ.: R. Quay. *Gallium Nitride Electronics*, ed. by R. Hull, R.M. Osgood, jr., J. Parisi, H. Warlimont (Springer Series in Materials Science, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008)].
- [2] Н. Моркоч. *Handbook of Nitride Semiconductors and Devices* (Wiley-VCH, 2009) с. 898.
- [3] С.С. Хлудков, И.А. Прудаев, О.П. Толбанов. *Изв. вузов. Физика*, **56** (9), 23 (2013).
- [4] A. Fortini, B. Diguët, J. Lugand. *J. Appl. Phys.*, **32**, Suppl. 2155 (1961).
- [5] H. Ehrenreich. *Phys. Rev.*, **120**, 1951 (1960).
- [6] С.И. Борисенко. *ФТП*, **35** (3), 313 (2001).

Редактор А.Н. Смирнов

Electron concentration dependence of electron mobility at scattering by polar optical phonons in nitrides A^{III}N

S.I. Borisenko

National research Tomsk Polytechnic University,
634050 Tomsk, Russia

Abstract Dependence of the effective relaxation time on the electron concentration in the nitride A^{III}N at the scattering by longitudinal polar optical phonons was calculated using sweep method. The method takes into account the inelastic scattering of electrons by polar optical phonons in nitrides within the framework of sphalerite approximation. Calculations have shown a significant increase of electron mobility in samples with degenerate electron gas with taking into account the screening of the long-range potential of longitudinal polar optical phonons.