

## Перспективы применения нитридов галлия, индия и алюминия для функциональных устройств на волнах пространственного заряда

С. А. Сергеев,\* А. И. Михайлов,† Б. В. Сергеева‡  
 Саратовский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского  
 Россия, 410012, Саратов, ул. Астраханская 83  
 (Статья поступила 04.09.2013; Подписана в печать 28.04.2014)

В статье проведен анализ современной литературы по нитридам галлия, индия и алюминия в сравнении с арсенидом галлия с позиций оценки перспектив их использования для создания устройств на волнах пространственного заряда.

PACS: 71.45.Lg, 72.20.Ht

УДК: 621.315.592

Ключевые слова: функциональная электроника, нитриды, волны пространственного заряда, отрицательная дифференциальная проводимость.

Перспективным классом функциональных микроэлектронных устройств СВЧ диапазона являются устройства на волнах пространственного заряда (ВПЗ) в полупроводниках с отрицательной дифференциальной проводимостью (ОДП), обусловленной междолинными электронными переходами в сильных электрических полях. Эти устройства могут выполнять в СВЧ диапазоне такие радиотехнические функции как усиление, преобразование, генерация, задержка и изменение фазы сигналов и др. Однако устройства на ВПЗ на основе n-GaAs имеют все же сравнительно низкий частотный предел работы. Одним из путей повышения граничной частоты является поиск, исследование и технологическое освоение новых полупроводниковых материалов, которые могли бы заменить традиционный в данном применении n-GaAs. В последнее время активно проводятся исследования и разработки нитридных полупроводников, структур и приборов на их основе [1–4]. В данной работе проведен анализ литературных данных, содержащих параметры и характеристики нитридов галлия, индия и алюминия, которые сравнивались с параметрами и характеристиками арсенида галлия с целью выяснения перспектив их использования в устройствах на ВПЗ. Рассмотрим подробнее некоторые характеристики исследуемых соединений.

**Арсенид галлия** — наиболее изученный материал с междолинным переносом электронов. Зонная структура исследовалась авторами многих работ теоретически и экспериментально.

Ширина запрещенной зоны  $\Delta E_g$  составляет величину порядка  $1.42 \div 1.43 \div 1.46$  эВ [5–14] (здесь и далее жирным шрифтом выделены значения параметров, которые на данный момент считаются наиболее близкими к истинным). Ширина энергетического зазора между  $\Gamma$  и L-долинами  $\Delta_{\Gamma L}$  составляет  $0.28 \div 0.32 \div 0.33$  эВ [5, 6, 8, 9, 12, 15–17], между  $\Gamma$  и X-долинами  $\Delta_{\Gamma X} = 0.33 \div 0.45 \div 0.48 \div 0.52$  эВ [5, 6,

9, 12, 15–17]. Эффективная масса электронов в центральной долине по различным данным составляет  $m_{\Gamma} = (0.063 \div 0.067 \div 0.072) \cdot m_0$  [5, 6, 9, 12, 15–20], в боковых долинах  $m_X = (0.39 \div 0.58) \cdot m_0$  [12, 15–17],  $m_L = (0.17 \div 0.35) \cdot m_0$  [12, 15–17, 19, 21], где  $m_0$  — масса свободного электрона.

Также существует некоторый разброс по таким важным параметрам, как диэлектрическая проницаемость  $\epsilon = 12.5 \div 12.8 \div 13.5$  [5, 8, 11, 12, 14, 16, 17, 19, 20, 22, 23], пороговое поле эффекта Ганна  $E_{th} = 3.2 \div 3.5$  кВ/см [8, 10, 24], коэффициент диффузии  $D = 142 \div 500$  см<sup>2</sup>/с [5, 15, 25–27]. В [24] приводится рассчитанная зависимость коэффициента диффузии от поля  $D = 200 \div 390$  см<sup>2</sup>/с при изменении поля от 0 до 20 кВ/см. Поле пробоя GaAs  $E_{br} = 4 \cdot 10^5$  В/см [10, 13, 14, 24, 28]. Максимальная величина модуля отрицательной дифференциальной подвижности электронов  $|\mu_d|_{\max} = 2400 \div 2500$  см<sup>2</sup>/В·с [8, 24], отношение  $v_{\max}/v_{\min}$  для GaAs составляет  $2 \div 2.5$  [24, 26, 29] ( $v_{\max}$  и  $v_{\min}$  — максимальное и минимальное значение дрейфовой скорости электронов). Условие электрической устойчивости для тонкопленочной полупроводниковой структуры (критерий Кремера) —  $n_0 d \leq (n_0 d)_{cr}$ . Для GaAs  $(n_0 d)_{cr} \approx 2.745 \cdot 10^{10}$  см<sup>-2</sup> [5, 30].

Известно [10, 26], что ограничение верхнего частотного предела приборов на эффекте Ганна происходит из-за конечного времени релаксации ОДП ( $\tau_{NDR}$ ), приближенно равного сумме времени релаксации энергии электронов в центральной долине ( $\tau_M$ ) и времени набора и потери электронами энергии, равной междолинному зазору  $\Gamma$ -L ( $\tau_{\Delta}$ ). Для GaAs  $\tau_M = 6 \cdot 10^{-12}$  с [10, 26],  $\tau_{\Delta} = (1.48 \div 1.5) \cdot 10^{-12}$  с [31, 32],  $\tau_{NDR} = (7.5 \div 9.4) \cdot 10^{-12}$  с [10, 24, 26].

Постоянная решетки  $a$  при 300 К равна  $5.653 \div 5.654$  А [5, 6, 11, 33], коэффициент теплопроводности  $k = 0.45 \div 0.5 \div 0.54$  Вт/(см·°C) [6, 10, 13, 14, 26], плотность  $\rho = 5.317 \div 5.37$  г/см<sup>3</sup> [5, 11, 12, 16, 17, 19, 20]. GaAs — относительно хрупкий материал, твердость по Моосу  $4 \div 5.5$  [11, 34, 35].

При проведении численных расчетов параметров волновых процессов важное значение имеет частотная

\*E-mail: ssergeev@bk.ru

†E-mail: semicond@yandex.ru

‡E-mail: bsergeeva@bk.ru

зависимость дифференциальной подвижности электронов. В работе [36] приведены частотные зависимости действительной и мнимой части дифференциальной подвижности электронов, рассчитанные методом Монте-Карло для  $E_0 = 5.5$  кВ/см. В работе [37] приведены аналогичные зависимости для  $E_0 = 6.6$  кВ/см и  $E_0 = 14.0$  кВ/см.

**Нитрид галлия** в настоящее время помимо оптоэлектронных приборов (светодиодов, лазеров, ультрафиолетовых фотоприемников) находит все более широкое применение в твердотельной электронике благодаря уникальному сочетанию физических характеристик. Приборы на GaN способны работать в более широком диапазоне частот и при более высоких температурах, а также с большей выходной мощностью по сравнению с приборами на Si, GaAs, InP или на любом другом освоенном в производстве полупроводниковом материале [13, 38]. Его зонная структура сложнее, чем у GaAs и InP. GaN кристаллизуется и в решетку цинковой обманки, и в структуру вюрцита. Параметры GaN, кристаллизованного в решетку цинковой обманки, более перспективны для использования в устройствах на ВПЗ, однако получить данный материал приемлемого качества в настоящее время технологически крайне сложно. Ниже приведены характеристики нитридов структур сфалерит и вюрцит (данные для структур вюрцита всех нитридов приведены в скобках).

Для GaN характерны следующие параметры:  $\Delta E_g \sim 3.22 \div 3.35$  эВ [2, 3, 6, 9, 13, 39, 40] (**3.39**  $\div$  3.51 эВ [4, 6, 9, 11, 13, 14, 33, 39–44]);  $\Delta_{GL} \sim 2.269 \div 2.299$  эВ [6, 9],  $\Delta_{GX} \sim 0.969 \div 1.22$  эВ [6, 9] (для структуры вюрцита существуют L–M, A и  $\Gamma_2$  долины:  $\Delta_{GLM} \sim 0.4 \div 1.9$  эВ [33, 43, 45, 46],  $\Delta_{\Gamma_2} \sim 0.4 \div 0.6$  эВ [43, 45, 47],  $\Delta_{GA} \sim 1.3 \div 2.1$  эВ [33]). Эффективная масса электронов:  $(0.13 \div 0.15) \cdot m_0$  [2, 6, 9, 33, 47, 48] ( $(0.19 \div 0.22) \cdot m_0$  [2, 4, 6, 33, 38, 40–45, 47–50]),  $m_X = (0.23 \div 0.3) \cdot m_0$  [9, 47],  $m_L = (0.34 \div 0.5) \cdot m_0$  [9, 47] ( $m_{ML} = (0.4 \div 0.6) \cdot m_0$  [41, 45, 47, 50]),  $m_{\Gamma_2} = 0.6 \cdot m_0$  [45, 49, 50]).

Диэлектрическая проницаемость  $\epsilon = 9.5 \div 9.95$  [2, 4, 6, 47, 48] (для вюрцита: вдоль  $c$   $\epsilon = 8.9 \div 9.5$ , вдоль  $a$   $\epsilon = 10.4$  [2, 4, 14, 40–45, 48–51]),  $E_{th} = 80 \div 150$  кВ/см [24, 48, 50, 52, 53] ( $150 \div 200$  кВ/см [2, 6, 24, 48, 51]),  $E_{br} = 33 \cdot 10^5$  В/см [14, 28, 54] ( $50 \cdot 10^5$  В/см [2]),  $|\mu_d|_{max} = 110 \div 220$  см<sup>2</sup>/В·с [24, 53] ( $50$  см<sup>2</sup>/В·с [24]),  $v_{max}/v_{min} = 2.1 \div 2.2$  [24, 53] ( $1.45 \div 1.5$  [24, 38]),  $(n_0d)_{cr} \approx 38.034 \cdot 10^{10}$  ( $167.356 \cdot 10^{10}$ ) см<sup>-2</sup> [5, 30],  $\tau_{NDR} = 0.25 \cdot 10^{-12}$  ( $1.4 \cdot 10^{-12}$ ) см<sup>-2</sup> [24],  $k = 1.3 \div 1.7$  Вт/(см·°C) [22, 39] ( $1.95$  Вт/(см·°C) [6]),  $\rho = 6.087 \div 6.15$  г/см<sup>3</sup> [2, 6, 42, 48] ( $6.087 \div 6.15$  г/см<sup>3</sup> [2, 11, 41, 45, 48, 49]), температура плавления  $1773 \div 2273$  К [39],  $D = 25$  см<sup>2</sup>/с [2] ( $25$  см<sup>2</sup>/с [2]).

В [53] приводится зависимость  $D$  от поля для разных температур: для 300 К  $D$  меняется от 10 до 23 см<sup>2</sup>/с при изменении поля от 0 до 300 кВ/см. Полю 200 кВ/см соответствует  $D = 22$  см<sup>2</sup>/с.

Постоянная решетки при 300 К  $a = 4.50 \div 4.52 \div 4.54$  Å [4, 33, 39, 55] (вюрцит характеризуется двумя постоянными решетками:  $a$  и  $c$ , для GaN —  $a = 3.186 \div 3.1896$  Å,  $c = 5.125 \div 5.185 \div 5.190$  Å [4, 6, 11, 33, 39, 40, 44]).

Механически прочный, твердость по Моосу 6 [35].

Частотные зависимости для реальной части дифференциальной подвижности электронов, рассчитанные методом Монте-Карло, приводятся в [56] при  $E_0 = 200$  кВ/см для  $n_0 = 10^{17}$  см<sup>-3</sup>. Показано, что дифференциальная проводимость GaN остается отрицательной примерно до 500 ГГц, что превосходит аналогичную величину для InP (330 ГГц) и намного превосходит GaAs (78 ГГц).

**Нитрид алюминия** — благодаря большой ширине запрещенной зоны ( $\Delta E_g \sim 4.9$  эВ (сфалерит),  $\Delta E_g \sim 6.1 \div 6.2 \div 6.23$  эВ (вюрцит) [11, 14, 40, 43, 44, 55, 57, 58]), высокой теплопроводности, химической и термической стабильности перспективен для производства высокоомощных полевых транзисторов и оптоэлектронных приборов, работающих в ультрафиолетовом диапазоне. Обладает хорошими пьезоэлектрическими свойствами для разработки акустических датчиков широкого диапазона частот, приборов для генерирования и регистрации поверхностных акустических волн. AlN кристаллизуется в решетку трех типов: вюрцит, сфалерит и поваренной соли, однако для последней кристаллической решетки литературные данные практически отсутствуют.

Для AlN (сфалерит) характерны следующие параметры:  $\Delta_{GX} = 1.1$  эВ [41, 59],  $\Delta_{GL} = 3.3 \div 4.4$  эВ [40, 59],  $m_{\Gamma} = (0.25 \div 0.31) \cdot m_0$  [40, 58, 60],  $m_X = 0.39 \cdot m_0$  [60],  $m_L = 0.56 \cdot m_0$  [60] (для вюрцита  $m_{\Gamma} = 0.4 \cdot m_0$  [33],  $\Delta_{GLM} \sim 0.7 \div 1.0$  эВ [33, 43] и  $m_{LM} = (0.4 \div 0.6) \cdot m_0$  [43],  $\Delta_{GK} \sim 0.7 \div 1.0$  эВ [33, 43] и  $m_{\Gamma_K} = m_0$  [43]),  $|\mu_d|_{max} = 5.4 \div 19$  см<sup>2</sup>/В·с [43, 51, 60],  $(n_0d)_{cr} \approx 187 \cdot 10^{10}$  см<sup>-2</sup> [5, 30],  $\epsilon = 8.412 \div 8.5$  [40, 43, 44, 51, 58, 60–63],  $E_{th} = 450$  кВ/см [51, 58],  $D = 3.3 \div 7$  см<sup>2</sup>/с [33, 58],  $E_{br} = (1.17 \div 1.8) \cdot 10^6$  В/см [33, 58],  $k = 2$  Вт/(см·°C) [40],  $v_{max}/v_{min} = 1.3 \div 1.8$  ( $v_{max} = 1.7 \cdot 10^7$  см/с) [43, 51, 60].

Твердость по Моосу 7  $\div$  8 [11, 35], самый твердый из соединений  $A_3B_5$  (за исключением кубического нитрида бора, у которого твердость по Моосу порядка 11).

Постоянная решетки  $a$  при 300 К равна **4.36**  $\div$  **4.38** Å [11, 13, 33, 44] ( $a = 3.11 \div 3.112$  Å,  $c = 4.979 \div 4.982$  Å [4, 6, 11, 13, 33, 40, 44]).

**Нитрид индия**, и особенно его твердые растворы с GaN, AlN, перспективны для изготовления оптоэлектронных и солнечных элементов. В ранних работах значение  $\Delta E_g$  InN было завышено:  $1.9 \div 2.2$  эВ [11, 33, 40, 43, 58, 59, 64, 65]. Однако позднее было показано, что для InN  $\Delta E_g \sim 0.64 \div 0.9$  эВ [40, 44, 57, 65, 66], что позволяет рассчитывать на возможность использования этого материала для изготовления фотоприемников ИК-диапазона.

Для InN характерны следующие параметры:  $\Delta_{\Gamma X} = 0.57 \text{ эВ}$  [40],  $\Delta_{\Gamma L} = 3.88 \text{ эВ}$  [40],  $m_{\Gamma} = (0.07 \div 0.26) \cdot m_0$  [40, 58, 60, 64],  $m_X = 0.4 \cdot m_0$  [60],  $m_L = 0.3 \cdot m_0$  [60] (для вюрцита  $m_{\Gamma} = (0.11 \div 0.12) \cdot m_0$  [33, 67],  $\Delta_{\Gamma A} \sim 0.6 \div 2.8 \text{ эВ}$  и  $m_{\Gamma A} = m_0$  [33, 43, 67],  $\Delta_{\Gamma 2} \sim 1.0 \div 2.6 \text{ эВ}$  и  $m_{\Gamma 2} = m_0$  [33, 43]),  $|\mu_d|_{\max} = 110 \div 220 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  [53],  $v_{\max}/v_{\min} = 2.28 \div 2.67$  [43, 53, 60] ( $v_{\max} = (2.7 \div 4.2) \cdot 10^7 \text{ см}/\text{с}$  [43, 51, 53, 60, 64, 68, 69]),  $(n_0 d)_{cr} \approx 19.5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$  [5, 30],  $\epsilon = 13.52 \div 15.3$  [40, 43, 51, 58, 60, 61, 64, 67],  $E_{th} = 70 \text{ кВ}/\text{см}$  [53],  $D = 25 \div 67 \text{ см}^2/\text{с}$  [53, 58],  $E_{br} < 3 \cdot 10^5 \text{ В}/\text{см}$  [33],  $k = 0.8 \text{ Вт}/(\text{см} \cdot \text{°C})$  [40].

Частотные зависимости для реальной части дифференциальной подвижности электронов, рассчитанные методом Монте-Карло, приводятся в [69] при  $E_0 = 90, 140$  и  $220 \text{ кВ}/\text{см}$  для  $n_0 = 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Показано, что дифференциальная проводимость InN может оставаться отрицательной примерно до  $800 \text{ ГГц}$  при  $E_0 = 220 \text{ кВ}/\text{см}$ , до  $600 \text{ ГГц}$  при  $E_0 = 140 \text{ кВ}/\text{см}$  и до  $300 \text{ ГГц}$  при  $E_0 = 90 \text{ кВ}/\text{см}$ , что превосходит аналогичные величины для всех рассмотренных полупроводников.

Постоянная решетки  $a = 4.89 \div 4.98 \text{ \AA}$  [4, 13, 40, 44] ( $a = 3.533 \div 3.548 \text{ \AA}$ ,  $c = 5.693 \div 5.703 \div 5.760 \text{ \AA}$  [4, 6, 11, 13, 33, 40, 44]).

Для использования конкретного материала в устройствах на ВПЗ необходим эффективный переход электронов с энергетических уровней центральной долины на энергетические уровни боковых долин. Это обеспечивают следующие условия: плотности эффективных состояний в боковых долинах больше, чем в центральной, что обычно хорошо выполняется; подвижность носителей в боковых долинах намного меньше, чем в центральной; скорость междолинных переходов достаточно высока; интервал энергий, разделяющий центральную и боковые долины меньше, чем ширина запрещенной зоны полупроводника (в этом случае не возникают дополнительно концентрационные эффекты — ударная ионизация и др.); указанный интервал должен быть больше  $0,1 \text{ эВ}$  (если он меньше, становится существенной заселенность боковых долин, что не приводит к образованию ОДП полупроводника). Как среда распространения волн материал должен быть однородным, иметь высокую подвижность носителей заряда, малую диэлектрическую проницаемость, а также обеспечивать термостабильную работу устройства.

Известно, что фазовая скорость ВПЗ  $v_{ph}$  близка к дрейфовой скорости электронов  $v_0$  [70]. Для эффективного преобразования электромагнитного сигнала в ВПЗ и обратно может быть использован элемент связи с электродинамической системой, который представляет собой частотно-избирательную встречно-штыревую систему полосковых контактов с барьером Шоттки (ВШП) [71]. Пространственный шаг топологических элементов ВШП  $l_0$  должен быть равен длине волны  $l_0 = \lambda_0 = v_{ph}/f_0$ , где  $\lambda_0$  — длина ВПЗ на рабочей частоте;  $f_0$  — рабочая частота. Чем выше рабочая частота (т. е. меньше длина волны при заданной ско-

рости), тем меньший шаг имеют элементы топологии. Поэтому верхняя граница рабочих частот определяется технологическими возможностями достижения максимального разрешения при изготовлении устройств. Таким образом, с точки зрения повышения рабочих частот предпочтительнее материалы с большими значениями скоростей. С другой стороны, линейные размеры устройств также связаны с длиной волны и на практике составляют величину порядка нескольких длин волн самой низкочастотной спектральной составляющей. С этой точки зрения целесообразно выбирать материалы с небольшой скоростью распространения. Таким образом, для каждого конкретного применения должен выбираться материал с нужным значением дрейфовой скорости электронов.

Диффузия электронов приводит к размытию ВПЗ, спаду коэффициента нарастания ВПЗ в области высоких частот и к уменьшению верхнего частотного предела усиления ВПЗ. Поэтому предпочтительны материалы с малыми значениями коэффициента диффузии. Высокое пороговое поле приводит к повышенному энергопотреблению и разогреву структуры. В связи с этим, материалы для устройств на ВПЗ должны обладать хорошей теплопроводностью. Чем выше величина модуля ОДП электронов, тем сильнее будет нарастать ВПЗ.

Остановимся подробнее на анализе вышеперечисленных характеристик соединений.

В Таблице 1 приведены наиболее значимые в свете применения в устройствах на ВПЗ характеристики соединений. В Таблице 2 проводится качественное сравнение основных электрофизических параметров AlN, InN и GaN с аналогичными параметрами GaAs с точки зрения использования их для создания СВЧ и КВЧ приборов («+++» — существенное преимущество над GaAs, «+» — преимущество, «±» — сравнимо с GaAs, «-» — хуже GaAs, «нд» — нет данных).

Величины временных констант  $\tau_{NDR}$ ,  $\tau$  и  $\tau_{\Delta}$  для GaN меньше, чем для GaAs. Это позволяет надеяться, что рабочие частоты для GaN будут выше, чем для GaAs. Для AlN и InN данные по этим величинам в литературе отсутствуют. Однако, опираясь на частотные зависимости для реальной части дифференциальной подвижности электронов InN можно предположить, что они будут одного порядка с аналогичными величинами для GaN. По таким параметрам как коэффициент диффузии, дрейфовая скорость насыщения (которая остается высокой при большой температуре) электронов и диэлектрическая проницаемость GaN и InN имеют очевидное превосходство над AlN, который в свою очередь превосходит аналогичные параметры GaAs.

Более высокое пороговое поле у нитридов — самый большой недостаток этих материалов при применении их в низкочастотных устройствах, т. к. приводит к высокому энергетическому потреблению в тонких активных слоях и к сильному разогреву полупроводника.

Теплопроводность у GaN и AlN выше, чем у осталь-

Таблица I:

	GaAs	GaN	AlN	InN
$v_0$ , см/с	$(1.5 \div 1.7) \cdot 10^7$	$(2.35 \div 2.8) \cdot 10^7$ ( $2.8 \cdot 10^7$ )	$(1.1 \div 1.45) \cdot 10^7$	$(1.6 \div 3.45) \cdot 10^7$
$D$ , см <sup>2</sup> /с	142 ÷ 500	22 ÷ 25 (25)	3.3 ÷ 7	25 ÷ 67
$E_{th}$ , кВ/см	3.2 ÷ 3.5	80 ÷ 150 (150 ÷ 200)	450	70
$\tau_{NDR}$ , с	$(7.5 \div 9.4) \cdot 10^{-12}$	$0.25 \cdot 10^{-12}$ ( $1.4 \cdot 10^{-12}$ )	нд	нд
$v_{max}/v_{min}$	2 ÷ 2.4	2.1 ÷ 2.2 (1.45 ÷ 1.5)	1.3 ÷ 1.8	2.28 ÷ 2.67
$ \mu_d _{max}$ , см <sup>2</sup> /В·с	2400 ÷ 2500	110 ÷ 220 (50)	5.4 ÷ 19	110 ÷ 220
$(n_0d)_{cr}$ , см <sup>-2</sup>	$2.745 \cdot 10^{10}$	$38.034 \cdot 10^{10}$ ( $167.356 \cdot 10^{10}$ )	$187 \cdot 10^{10}$	$19.5 \cdot 10^{10}$

Таблица II:

	$v_0$	$D$	$E_{th}$	$\tau_{NDR}$	$v_{max}/v_{min}$	$k$	$E_{br}$	$ \mu_d _{max}$	$(n_0d)_{cr}$
GaN	++	++	–	++	±	++	++	–	+
AlN	±	++	–	нд	–	++	++	–	+
InN	+	++	–	+	+	+	++	–	+

ных соединений, поле пробоя нитридов выше почти на порядок, что, несомненно, является достоинством при разработке мощных приборов. Повышенная теплопроводность GaN и AlN обеспечивает работоспособность приборов вплоть до 700 К. Большая эффективная масса электронов у GaN и AlN обеспечивает меньшую вероятность рассеяния при повышенных температурах.

Условие электрической устойчивости позволяет применять более толстые структуры соединений GaN, InN и AlN по сравнению с GaAs. Это также несомненное преимущество нитридов.

Шумы в устройствах на эффекте Ганна пропорциональны отношению  $D|\mu_d|_{max}$  [26], и по этому параметру GaAs имеет преимущество перед всеми остальными соединениями.

Известно, что КПД ганновских генераторов пропорционален отношению  $(v_{max} - v_{min})/(v_{max} + v_{min})$ , значит КПД тем выше, чем выше отношение  $v_{max}/v_{min}$ . Параметр  $v_{max}/v_{min}$  выше для InN, чем для GaAs, GaN, и гораздо выше, чем для AlN.

Также можно отметить высокую стойкость нитридов к воздействию агрессивных сред и радиационному излучению, высокие коэффициенты спонтанной и пьезоэлектрической поляризации.

Таким образом, проведенный сравнительный анализ основных свойств соединений GaN, AlN и InN показал, что они являются перспективными материалами для использования их в устройствах на ВПЗ и по некоторым параметрам имеют преимущества по отношению к GaAs.

- [1] Материалы Всероссийских совещаний и конференций «Нитриды галлия, индия и алюминия: структуры и приборы» за 1997-2011 гг: <http://nitrides-conf.ioffe.ru/history.htm>.
- [2] *Levinshtein M. E., Rumyantsev S. L., Shur M. S.* Properties of advanced semiconductor materials: GaN, AlN, InN, BN, and SiGe. (New York: John Wiley and Sons, 2001).
- [3] *Berrah S., Abid H., Boukortt A.* Semicond. Phys., Quant. El. & Optoe. **9**, N 2. P. 12. (2006).
- [4] *Takafumi Y., Soon-Ku H.* Oxide and Nitride Semiconductors. Processing, Properties, and Applications. (Berlin: Springer, 2009).
- [5] *Шур М. С.* Современные приборы на основе арсенида галлия. (М.: Мир, 1991).
- [6] *Adachi S.* Properties of Alloys: Group-IV, III-V and II-VI Semiconductors. (New York: John Wiley & Sons, 2009).
- [7] *Бабичев А. П.* Физические величины. (М.: Энергоатомиздат, 1991).
- [8] *Зу С.* Физика полупроводниковых приборов. Т. 2. (М.: Мир, 1984).
- [9] *Vurgaftman I., Meyer J. R., Ram-Mohan L. R.* J. Appl. Phys. **89**, N 11. 5815. (2001).
- [10] *Fank B., Crowley J., Wolfert P., Wandinger L., Rubin D.* Internat. J. of Infrared and Millimeter Waves. **5**, N 6. P. 859. (1984).
- [11] *Пасынков В. В., Сорокин В. С.* Материалы электронной техники. (СПб.: Лань, 2001).
- [12] *Dunn G. M., Walker A. B., Jefferson J. H., Herbert D. C.* Semicond. Sci. Technol. **9**, N 11. P. 2123. (1994).
- [13] *Takahashi K., Yoshikawa A., Sandhu A.* Wide Bandgap Semiconductors. Fundamental Properties and Modern. Photonic and Electronic Devices. (Berlin: Springer, 2007).
- [14] *Ren F.* Wide energy bandgap electronic devices.



- (Singapore: World Scientific Publishing, 2003).
- [15] Левинштейн М. Е. ФТП. **13**, № 7. С. 1249. (1979).
- [16] Brennan K., Hess K. Sol. St. Electron. **27**, N4. P. 347. (1984).
- [17] Pořhela J., Reklaitis A. Sol. St. Electron. **23**. P. 927. (1980).
- [18] Цидильковский И. М. Электроны и дырки в полупроводниках. (М.: Наука, 1972).
- [19] Maloney T.J., Frey J. J. Appl. Phys. **48**, N2. P. 781. (1977).
- [20] Kundrotas J., Dargys A., Iesna A. Semicond. Sci. Technol. **11**. P. 692. (1996).
- [21] Butcher P.N., Fawcett W. Proc. Phys. Soc. **86**, N12. P. 1205. (1965).
- [22] Барыбин А. А. Волны в тонкопленочных полупроводниковых структурах с горячими электронами. (М.: Наука, 1986).
- [23] Adachi S. Physical properties of III-V semiconductor compounds: InP, InAs, GaAs, GaP, InGaAs, and InGaAsP. (New York: John Wiley & Sons, 1992).
- [24] Alekseev E., Pavlidis D. Sol. St. Electron. **44**. P. 941. (2000).
- [25] Барейкис В. Диффузия горячих электронов. (Вильнюс: Моклас, 1981).
- [26] Wandinger L. Microwave J. **24**, N3. P. 75. (1981).
- [27] Aishima A., Yokoo K., Ono S. Jap. J. Appl. Phys. **17**. P. 959. (1978).
- [28] Данилин В., Жукова Т., Кузнецов Ю., Тараканов С., Уваров Н. Электроника: Наука, Технология, Бизнес. **4**. С. 20. (2005).
- [29] Бородовский П. А., Осадчий В. М. Междолинный перенос электронов в полупроводниках  $A_3B_5$ . (Новосибирск: СО АН СССР, 1987).
- [30] Кумабе К., Кояма Д. Дэнси цусин гаккай ромбунси. **57**, N6. С. 179. (1974).
- [31] Dean R.H., Dreeben A.B., Kaminski J.F., Triano A. Electron. Lett. **6**, N24. P. 775. (1970).
- [32] Барыбин А. А., Пригорювский В. М. Изв. ВУЗов. Физика. **24**, № 8. С. 28. (1981).
- [33] <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/>.
- [34] Goryunova N.A., Borshchevskii A.S., Tretiakov D.N. Hardness / Semiconductors and semimetals. Vol. 4. Physics of III-V Compounds. (N. Y., London: Academ. Press Inc., 1968).
- [35] Tsao J.Y. The World of Compound Semiconductors. (2004). (<http://www.sandia.gov/~jytsao/WCS.pdf>)
- [36] Rees H.D. Sol. St. Com. **7**, N2. P. 267. (1969).
- [37] Белоусов Н. П., Мартыненко Е. И., Чайка В. Е. Радиотехника и электроника. **27**, № 1. С. 186. (1982).
- [38] Ruterana P., Albrecht M., Neugebauer J. Nitride Semiconductors. Handbook on Materials and Devices. (Weinheim: WILEY-VCH, 2003).
- [39] Акчурич П. Х., Мармалюк А. А. Материаловедение. **9**. С. 41. (1999).
- [40] Тарасов С. А. Полупроводниковые оптоэлектронные приборы. (СПб.: Изд-во СПбГЭТУ, 2008).
- [41] Cao J.C., Lei X.L. Eur. Phys. J. B. **7**. P. 79. (1999).
- [42] Foutz B.E., O'Leary S.K., Shur M.S., Eastman L.F. J. Appl. Phys. **85**, N11. P. 7727. (1999).
- [43] O'Leary S.K., Foutz B.E., Shur M.S., Eastman L.F. J. Mater Sci: Mater Electron. **17**. P. 87. (2006).
- [44] Wu J. J. of Appl. Phys. **106**. P. 011101. (2009).
- [45] Bhapkar U.V., Shur M.S. J. Appl. Phys. **82**, N4. P. 1649. (1997).
- [46] Suzuki M., Uenoyama T., Yanase A. Phys. Rev. B. **52**, N11. P. 8132. (1995).
- [47] Brazis R., Raguotis R. Optical and Quantum Electronics. **38**. P. 339. (2006).
- [48] Kolnik J., Oğuzman I.H., Brennan K.F., Wang R, Ruden P.P., Wang Y. J. Appl. Phys. **78**, N2. P. 1033. (1995).
- [49] Albrecht J.D., Wang R.P., Ruden P.P., Farahmand M., Brennan K.F. J. Appl. Phys. **83**, N9. P. 4777. (1998).
- [50] Littlejohn M.A., Hauser J.R., Glisson T.H. Appl. Phys. Lett. **26**, N11. P. 625. (1975).
- [51] Farahmand M., Garetto C., Bellotti E., Brennan K.J., Goano M., Ghilino E., Ghione G., Albrecht J.D., Ruden P.P. IEEE Trans., El. Dev. **48**, N3. P. 535. (2001).
- [52] Foutz B.E., O'Leary S.K. 1st Annual Report for the ONR MURI for High Power, Linear, Broadband Solid State Amplifiers. P. 21. (1996–1997).
- [53] Starikov E., Shiktorov P., Gruhinskis V., Reggiani L., Varani L., Vaissiere J.C., Palermo C. Semicond. Sci. Technol. **20**. P. 279. (2005).
- [54] Данилин В. Н., Докучаев Ю. П., Жукова Т. А., Комаров М. А. Обзоры по электронной технике. Сер. 1. СВЧ-техника. **1**. С. 20. (2001).
- [55] Shur M.S., Tukauskas A. UV Solid-State Light Emitters and Detectors. (Dordrecht / Boston / London: Kluwer Academic Publishers, 2004).
- [56] Starikov E., Shiktorov P., Gruhinskis V., Varani L., Vaissiere J.C., Palermo C., Reggiani L. Acta Physica Polonica A. **107**, N2. P. 408. (2005).
- [57] Schleife A., Fuchs F., Rüdli C., Furthmüller J., Bechstedt F. Appl. Phys. Lett. **94**, N1. 012104. (2009).
- [58] Shur M.S., Devis R.F. GaN-based materials and devices. Selected topics in electronics and systems. Vol. 33. (Singapore/New Jersey/London/Hong Kong: World Scientific, 2004).
- [59] Bousahla Z., Abbar B., Bouhafs B., Tadjer A. Phys. Stat. Sol. (b) **241**. **4**. P. 876. (2004).
- [60] Arabshahi H., Rezaee Rokn-Abadi M., Badiyan F., Eslami Moghadam Z. Adv. Appl. Sci. Res. **1**, N1. P. 19. (2010).
- [61] Давыдов С. Ю. ФТП. **36**, № 1. С. 45. (2002).
- [62] Arabshahi H., Khalvati M.R., Rezaee Rokn-Abadi M. Brazilian J. of Phys. **38**, N3A. P. 293. (2008).
- [63] Стрельченко С. С., Лебедев В. В. Соединения  $A_3B_5$ . (М.: Металлургия, 1984).
- [64] O'Leary S.K., Foutz B.E., Shur M.S., Bhapkar U.V., Eastman L.F. J. Appl. Phys. **83**, N2. 826. (1998).
- [65] Давыдов С. Ю., Клочихин А. А. ФТП. **38**, N8. С. 897. (2004).
- [66] Хезази Х. Х., Тарасов С. А. Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». **1**, С. 9. (2004).
- [67] Масюков Н. А., Дмитриев А. В. Фундаментальная и прикладная математика. **15**, № 6. С. 77. (2009).
- [68] Hamdoune A., Bachir N. Int. J. of Comp. and El. **2**, N5. P. 1793. (2010).
- [69] Starikov E., Shiktorov P., Gruinskis V., Varani L., Vaissiere J.C., Palermo C., Reggiani L. J. Appl. Phys. **98**. 083701. (2005).
- [70] Михайлов А. И., Сергеев С. А. Вопросы прикладной физики: Межвуз. науч. сб. Вып. 16. С. 38. (Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2009).
- [71] Михайлов А. И., Сергеев С. А., Горячев А. А. Изв. ВУЗов. Радиоэлектроника. **43**, № 2. P. 16. (2000).

## The perspectives of gallium, indium and aluminium nitrides application for functional devices on space charge waves

S. A. Sergeev<sup>a</sup>, A. I. Mikhailov<sup>b</sup>, B. V. Sergeeva<sup>c</sup>

*Saratov N. G. Chernyshevskiy State University  
Astrakhanskaya Street, 83, 410012, Saratov, Russia  
E-mail: <sup>a</sup>s sergeev@bk.ru, <sup>b</sup>semicond@yandex.ru, <sup>c</sup>bsergeeva@bk.ru*

The analysis of modern reference data for AlN, InN, GaN parameters and characteristics in comparison with GaAs ones for investigation of realization perspectives of devices on space charge waves was carried out in the work.

PACS:71.45.Lr, 72.20.Ht

Keywords: functional electronics, nitrides, negative differential conductivity, space-charge waves.

Received 04.09.2013.

### Сведения об авторах

1. Сергеев Сергей Алексеевич — кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики полупроводников факультета нано- и биомедицинских технологий ФГБОУ ВПО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского»; тел.: (8452) 51-11-81, e-mail: ssergeev@bk.ru.
2. Михайлов Александр Иванович — заведующий кафедрой физики полупроводников факультета нано- и биомедицинских технологий ФГБОУ ВПО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского», доктор физико-математических наук, профессор; тел.: (8452) 51-11-81, e-mail: semicond@yandex.ru.
3. Сергеева Бэла Владимировна — ведущий инженер кафедры физики полупроводников факультета нано- и биомедицинских технологий ФГБОУ ВПО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского»; тел.: (8452) 51-11-81, e-mail: bsergeeva@bk.ru.