

И. П. Стороженко, Ю. В. Аркуша

## ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДИОДОВ ГАННА НА ОСНОВЕ GaN, AlN И InN

*Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина*

*4, пл. Свободы, Харьков, 61077, Украина*

E-mail: [storozhenko\\_igor@mail.ru](mailto:storozhenko_igor@mail.ru)

Представлен анализ транспортных свойств, идеализированного режима с ограничением накопления объемного заряда и резонансно-пролетного режима в  $n^+n^-n^-$  и  $n^+n^+n^-n^-n^+$ -диодах Ганна на основе GaN, AlN и InN. Показаны перспективность, особенности и проблемы использования полупроводниковых нитридов в диодах Ганна. Ил. 3. Табл. 4. Библиогр.: 19 назв.

**Ключевые слова:** полупроводниковый нитрид, диод Ганна, транспортные свойства, частотный предел.

Нитриды элементов III группы привлекают внимание исследователей во многих лабораториях мира как весьма перспективные материалы для быстродействующих электронных приборов. Это обусловлено следующими причинами:

- большая дрейфовая скорость и скорость релаксации электронов;
- высокая стабильность физических и химических свойств;
- высокая степень «экологичности» по сравнению с другими материалами.

К таким материалам относятся, прежде всего, GaN, AlN и InN. Транспортные свойства этих соединений всесторонне исследованы только численными методами: GaN в работах [1–9], InN в [9–13], AlN в [9, 14]. Для этих полупроводников на зависимости дрейфовой скорости электронов от напряженности электрического поля  $V(E)$  присутствует участок с отрицательной дифференциальной проводимостью (ОДП), возникающий благодаря эффекту междолинного переноса электронов (МПЭ). Пиковые значения дрейфовой скорости электронов и соответствующие им значения напряженности электрического поля больше, чем в GaAs и InP. Это говорит о перспективности GaN, AlN и InN для приборов, работающих на эффекте МПЭ с целью повышения их предельных рабочих частот. Однако достоверных экспериментальных исследований полупроводниковых нитридов выше порогового значения электрического поля в научных публикациях нами не обнаружено. Например, оценка порогового значения поля в GaN, проведенная в работе [8], вызывает сомнение. Для импульса напряжения длительностью 80 мкс насыщение тока на вольт-амперной характеристики начинается при напряженности электрического поля  $\approx 87,5$  кВ/см, что почти в два раза меньше рассчитанных значений [1–9]. Анализ частотных возможностей этих материалов в достаточной степени не исследован даже теоретически. Например, перспективность GaN для терагерцевого диапазона показана только в [7, 15]. Следует отметить, что до настоящего

времени экспериментальной СВЧ-генерации на эффекте МПЭ с помощью приборов, созданных на основе полупроводниковых нитридов, насколько нам известно, не получено. Первостепенная проблема, не позволяющая получить СВЧ-генерацию, состоит в отводе тепла от активной области прибора. Это объясняется с тем, что пороговая напряженность электрического поля, например для GaN, предположительно, должна составлять 150 кВ/см, что в 43 раза больше, чем в GaAs. Плотность тока в GaN 1,5 раза больше, чем в GaAs, поэтому подводимая к прибору мощность в 63 раза больше, чем в GaAs-приборах. Плотность рассеиваемой мощности достигает  $1 \text{ МВт}\cdot\text{см}^{-2}$ . Термическая проводимость полупроводниковых нитридов невелика: в GaN –  $1,3 \text{ Вт}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ , в AlN –  $1 \text{ Вт}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ , InN –  $0,45 \text{ Вт}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ . Для сравнения, термическая проводимость в GaAs –  $0,4 \text{ Вт}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ , сапфире  $0,3 \text{ Вт}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$  и алмазе  $26 \text{ Вт}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ .

Таким образом, уровень изученности транспортных свойств и существование нерешенных проблем по использованию полупроводниковых нитридов в приборах с МПЭ требует тщательного изучения частотных возможностей и других особенностей работы диодов Ганна на основе GaN, AlN и InN. В нашей статье произведен анализ времен релаксации и дрейфовой скорости электронов, а также проведено исследование высокочастотного предела ОДП идеализированного режима с ограничением накопления объемного заряда (ОНОЗ) в приближении однородного электрического поля. Такое рассмотрение будет полезным для дальнейшего анализа транспортных явлений в приборах на основе полупроводниковых нитридов. Также рассмотрены отличительные черты и оценены предельные частоты генерации диодов Ганна мм и субмм диапазонов на основе полупроводниковых нитридов.

**1. Методика и параметры.** Исследования проводились с помощью двух- и трехуровневой модели МПЭ в полупроводниках [16, 17].

Полупроводники GaN, AlN и InN существуют в двух модификациях – вюрцит (Wz) и

цинковая обманка (Zb). Рассматривается только модификация вюрцит (гексагональная кристаллическая решетка). Зона проводимости таких материалов имеет несколько минимумов, близко расположенных по энергии. Электрофизические параметры соединений известны недостаточно хорошо. Если основной долиной для всех соединений является  $\Gamma_1$ -минимум, то 2-й и 3-й минимумы по существующим сведениям о зонной структуре с достаточной точностью не определены. Поэтому в публикациях нет однозначности в выборе двух или трех минимальных точек зоны проводимости, необходимых для вычислений. Для повышения точности, например в работе [9], использовалась даже четырехуровневая модель. Учитывая, что важные параметры для верхних долин известны также приблизительно, нет большой ошибки в выборе того, какая именно долина является ближайшей по энергии к абсолютному минимуму. В наших расчетах, опираясь на результаты публикаций [1–15, 18, 19], для всех соединений учитывались  $\Gamma$ ,  $A$  и  $U$  энергетические минимумы (табл. 1).  $U$ -минимум расположен между точками  $M$  и  $L$  и состоит из 6 эквивалентных долин.  $A$ -минимум соответствует кристаллографическому направлению [001] и состоит из одной эквивалентной долины.

Таблица 1  
Минимумы зоны проводимости

$E_{\min}$ , эВ	GaN	InN	AlN
$\Gamma$	3,39	2	6,2
$U$	4,74	4,5	6,9
$A$	5,49	3,68	7,2

Приборы на основе GaN, AlN и InN рассчитывались для гармонического и бигармонического режимов (учитывалось действие 2-й гармоники), что соответствует помещению прибора, в одно- и двухконтурный резонатор. Действующее напряжение задается гармоническим законом с частотой колебания основной гармоники  $f$  напряжением смещения  $U_0$ , амплитудой колебания основной гармоники  $U_1$  и 2-й гармоники  $U_2$ . Моделируется работа диода Ганна в импульсном режиме работы. Температура кристаллической решетки считается постоянной, равной 300 К.

**2. Дрейфовая скорость и времена релаксации электронов. ОНОЗ-режим.** В табл. 2 представлены экстремумы зависимости дрейфовой скорости электронов от напряженности электрического поля  $V(E)$ . Пиковое значение дрейфовой скорости  $V_t$  зависимости  $V(E)$  последовательно возрастает в ряду полупроводников AlN, GaAs, GaN и InN. Минимальное значение  $V_s$  зависимости  $V(E)$  растет в последовательности GaAs, AlN, InN и GaN. Соответствующие им значения напряженности электрического поля  $E_t$  и  $E_s$  увеличиваются в последовательности GaAs, InN, GaN, AlN. Наибольшая разность  $V_t - V_s$  принад-

лежит InN, наименьшая – AlN. Большие значения  $V_t$  и  $V_s$  должны приводить к увеличению скорости дрейфа неустойчивостей заряда в приборах, и как следствие, повышение частоты генерации. Более высокие значения пороговой напряженности  $E_t$  также свидетельствуют о росте предельной частоте генерации [16].

Таблица 2  
Экстремумы зависимости  $V(E)$  и соответствующие им напряженности электрического поля

Материал	$V_t$	$V_s$	$E_t$	$E_s$
	см·с <sup>-1</sup>		кВ·см <sup>-1</sup>	
InN	$4,18 \cdot 10^7$	$1,92 \cdot 10^7$	68	490
GaN	$3,2 \cdot 10^7$	$2,16 \cdot 10^7$	151	690
AlN	$1,67 \cdot 10^7$	$1,28 \cdot 10^7$	260	1560
GaAs	$1,99 \cdot 10^7$	$0,91 \cdot 10^7$	3,3	18

Верхний предел рабочей частоты приборов с МПЭ обусловлен различными инерционными процессами, протекающими в приборе, которые определяются временами релаксации электронов (рис. 1 и табл. 3).

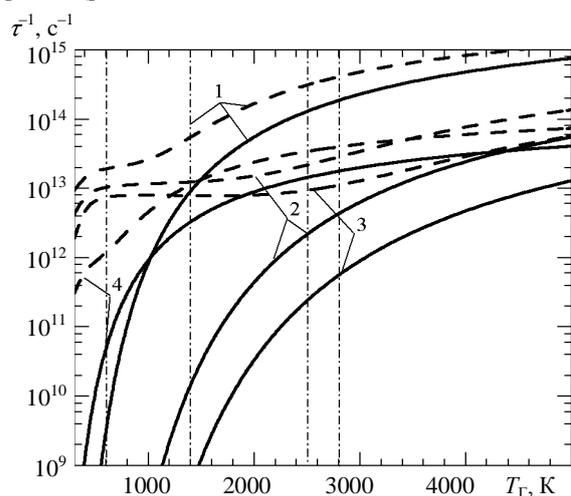


Рис. 1. Зависимость частоты релаксации концентрации (непрерывные линии) и энергии (пунктирные линии) электронов в  $\Gamma$ -долине от электронной температуры для разных полупроводников: 1 – AlN; 2 – GaN; 3 – InN; 4 – GaAs. Штрихпунктирные прямые – электронная температура, соответствующая пороговой напряженности поля

Таблица 3  
Частота релаксации электронов в ближайшей верхней долине при электронной температуре 300 К

Материал	$\tau_n^{-1}$	$\tau_k^{-1}$	$\tau_E^{-1}$
	с <sup>-1</sup>		
AlN	$3,89 \cdot 10^{13}$	$3,85 \cdot 10^{14}$	$4,47 \cdot 10^{15}$
GaN	$1,91 \cdot 10^{13}$	$1,88 \cdot 10^{14}$	$2,76 \cdot 10^{15}$
InN	$6,47 \cdot 10^{12}$	$1,21 \cdot 10^{14}$	$1,18 \cdot 10^{15}$
GaAs	$6,81 \cdot 10^{11}$	$1,48 \cdot 10^{13}$	$3,43 \cdot 10^{13}$

Разогрев электронов в верхних долинах в условиях работы приборов с МПЭ незначителен. Зависимость обратных времен релаксации элект-

ронов (частота релаксации) в верхних долинах от электронной температуры слабая, поэтому их можно считать постоянными величинами.

Из табл. 3 видно, что частота релаксации концентрации, импульса и энергии электронов в верхних долинах InN, GaN и AlN на порядок больше, чем в GaAs. Наименьшее значение частоты релаксации соответствует переходу электронов из верхних долин в Г-долину.

В Г-долине при условиях слабого разогрева электронного газа частота релаксации концентрации и энергии электронов в InN, GaN и AlN меньше, чем в GaAs (рис. 1). Однако, при электронной температуре, соответствующей пороговой напряженности электрического поля (штрихпунктирные прямые на рис. 1), частоты релаксации в InN, GaN и AlN выше, чем в GaAs. Из полупроводниковых нитридов на участке ОДП названные частоты релаксации наибольшие в AlN, а наименьшие – в InN. Следовательно, инерционность МПЭ последовательно возрастает в ряду полупроводников AlN, GaN, InN и GaAs. В приборах на основе InN, GaN и AlN следует ожидать, что высокочастотный предел будет в несколько раз больше, чем в GaAs.

Однако следует обратить внимание на низкие (по сравнению с GaAs) значения подвижности электронов в исследуемых соединениях, что увеличивает максвелловское время релаксации, а значит, повышает инерционность приборов. Максимальные значения низкополевой подвижности электронов  $\mu_+$  и отрицательной дифференциальной подвижности  $\mu_-$  в полупроводниковых нитридах, особенно в GaN и AlN, значительно меньше, чем в GaAs (табл. 4).

Таблица 4

Максимальные значения подвижности электронов по зависимости  $V(E)$  и пределы существования ОНОЗ-режима

Материал	$\mu_+$	$\mu_-$	$n^{-1} \cdot f_{\min}$	$n^{-1} \cdot f_{\max}$
	$\text{см}^2(\text{В} \cdot \text{с})^{-1}$		$\text{см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$	
InN	1316	198	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$
GaN	418	37	$2,8 \cdot 10^{-6}$	$7,8 \cdot 10^{-5}$
AlN	109	7,4	$0,7 \cdot 10^{-6}$	$2,9 \cdot 10^{-5}$
GaAs	7000	2540	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$9,7 \cdot 10^{-4}$

Оценка идеализированного ОНОЗ-режима на основе динамической зависимости  $V(E)$  показывает, что диоды на основе полупроводниковых нитридов обладают очень высокими предельными частотами генерации (рис. 2). Причиной этого являются малые значения времен релаксации электронов, по сравнению с традиционными полупроводниками  $A_3B_5$  (GaAs, InP), в том числе время переноса электронов из Г-долины в боковые долины и обратно. В соответствии со степенью инерционности эффекта МПЭ наибольшую предельную частоту генерации в ОНОЗ-режиме должен иметь AlN, затем GaN и InN (рис. 2). На-

большую же эффективность генерации следует ожидать в приборах на основе InN на частотах до 0,8 ТГц. На частотах от 1 до 2 ТГц более эффективными являются приборы на основе AlN. Оптимальное отношение  $U_1/U_0$  на низких частотах составляет  $\approx 0,84$  в InN,  $\approx 0,74$  в GaN и  $\approx 0,7$  в AlN. На высоких частотах вблизи предельной частоты для всех соединений оптимальное отношение  $U_1/U_0 \approx 0,3$ .

В бигармоническом режиме предельная частота генерации существенно не увеличивается, но возрастает эффективность генерации (рис. 2, пунктирные кривые).

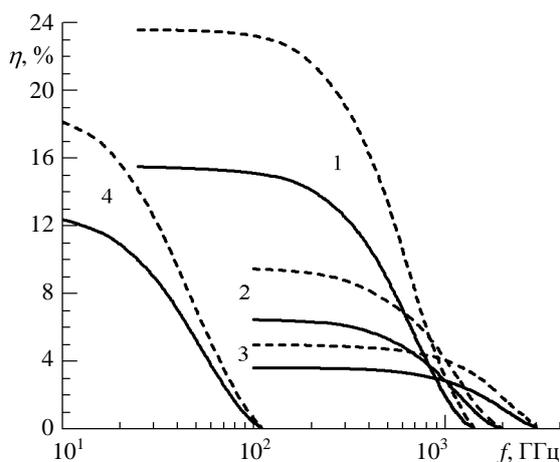


Рис. 2. Частотная зависимость эффективности генерации приборов с МПЭ при идеализированном ОНОЗ-режиме на основе разных полупроводников ( $n = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ). Непрерывная линия соответствует гармоническому режиму, пунктирная – бигармоническому режиму: 1 – InN; 2 – GaN; 3 – AlN; 4 – GaAs

Частотный интервал ОНОЗ-режима можно оценить иначе. Для установления ОНОЗ-режима необходимо, чтобы в течение времени, когда  $E < E_i$  заряд зарождающегося домена полностью исчезнуть (верхняя граница), а при  $E > E_i$  домен не должен сформироваться:

$$\frac{en\mu_-}{2 + 3\varepsilon\varepsilon_0} < f \ll \frac{en\mu_+}{\varepsilon\varepsilon_0},$$

где  $n$  – концентрация электронов;  $\mu_-$  – отрицательная дифференциальная подвижность;  $\mu_+$  – подвижность электронов при  $E < E_i$ ;  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость полупроводника;  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума;  $e$  – заряд электрона. Условия существования ОНОЗ-режима (частотные границы, нормированные на концентрацию электронов  $n^{-1}f$ ) представлены в табл. 4. В случае если концентрация электронов  $n = 10^{16} \text{ см}^{-3}$  максимальная рабочая частота приборов для ОНОЗ-режима должна быть меньше 2,5 ТГц в InN, 0,78 ТГц – в GaN и 0,29 ТГц – в AlN. Следует отметить, что здесь использованы максимальные значения  $\mu_-$  и  $\mu_+$ . Реальным же приборам

больше соответствуют значения подвижности электронов при напряженности поля вблизи  $E_t$ , которые меньше используемых значений. Поэтому высокочастотная граница  $n^{-1}f_{\max}$  ОНОЗ-режима является несколько завышенной.

Таким образом, для InN инерционность эффекта МПЭ и конечность максвелловского времени релаксации дают приблизительно одинаковое значение верхнего частотного предела ОНОЗ-режима, равного  $1 \div 2$  ТГц. Если говорить о GaN и AlN, то малые значения низкополевой подвижности электронов значительно понижают верхнюю частотную границу ОНОЗ-режима, несмотря на очень высокие частоты релаксации электронов.

Здесь следует отметить, что представленные оценки произведены без учета пространственных неоднородностей, которые являются основным фактором, ограничивающим ОНОЗ-режим по частоте. Как известно, ОНОЗ-режим из-за пространственных инерционных эффектов не является самым высокочастотным режимом работы диодов Ганна. Наибольшие частоты генерации с помощью диодов Ганна на основе GaAs и InP получены для резонансно-пролетного режима работы. Вследствие этого вторым этапом настоящего исследования явилось моделирование приборов с учетом пространственных неоднородностей.

**3. Резонансно-пролетный режим.** В исследовании используется двухуровневая модель диода Ганна на основе InN, GaN и AlN [3]. Рассмотрены диоды с  $n^+-n$  (омический) и  $n^+-n^- - n$  (с высокоомной неоднородностью) катодным контактом. Анодный контакт  $n-n^+$  – омический. Длина активной области  $l_a$  составляла 2,5 мкм и менее. Работа приборов на основе InN, GaN и AlN моделировалась в одноконтурном резонаторе для импульсного режима работы.

В пространственно-неоднородных приборах на основе InN, GaN и AlN возникают такие же режимы, что в однотипных приборах на основе других полупроводников  $A_3B_5$ , а именно доменный режим, режим с дрейфом обогащенных слоев и режим с нарастающими волнами объемного заряда.

Основная особенность работы таких диодов возникает из-за малой подвижности электронов и высокой напряженности порогового электрического поля  $E_t$ , особенно в AlN. Это приводит к большим сложностям по разогреву электронного газа возле катода, его термализации в анодном контакте и в отводе от активной области, выделившегося тепла.

В  $n^+-n-n^+$ -диодах напряженность электрического поля в активной области распределена таким образом, что значение в  $E_t$  достигается на значительном расстоянии  $d_0$  от катода. Например, при  $n = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ,  $l_a = 2,5 \text{ мкм}$  и  $E_0 = E_t$  в InN-диодах это расстояние составляет  $\approx 0,8 \text{ мкм}$ , в GaN –

$\approx 0,9 \text{ мкм}$  и AlN –  $\approx 0,7 \text{ мкм}$ . Если напряженность внешнего поля  $E_0 = 3E_t$ , то  $d_0$  в InN-, GaN- и AlN-диодах уменьшается до  $\approx 0,3 \text{ мкм}$ . Для сравнения, в GaAs  $n^+-n-n^+$ -диодах  $d_0 \approx 0,2 \text{ мкм}$  при  $E_0 = E_t$  и  $d_0 \approx 0,15 \text{ мкм}$  при  $E_0 = 3E_t$ . При увеличении концентрации для всех случаев  $d_0$  уменьшается.

Оценим длину, на которой электроны в центральной долине в однородном поле без столкновений приобретут энергию, равную энергетическому зазору между центральной и ближайшей к ней по энергии боковой долиной:  $l_0 = \Delta(eE)^{-1}$ , где  $\Delta$  – энергетический зазор между неэквивалентными долинами. Предположим, что к полупроводнику приложено электрическое поле напряженностью  $E_t$ . Тогда в InN  $l_0$  составит 0,25 мкм, в GaN – 0,09 мкм, в AlN – 0,03 мкм и в GaAs – 1,1 мкм. Следовательно, длина «мертвой» зоны  $l_0 + d_0$  в полупроводниковых нитридах несколько меньше, чем в GaAs. Поэтому  $n^+-n-n^+$ -диоды на основе полупроводниковых нитридов, в которых реализуется режим с обогащенными слоями, могут эффективно работать при меньшей длине активной зоны, чем диоды на основе GaAs. Можно ожидать, что  $n^+-n-n^+$ -диоды при  $n = 10^{16} \text{ см}^{-3}$  на основе InN смогут эффективно работать при  $l_a > 0,7 \text{ мкм}$ , на основе GaN – при  $l_a > 0,5 \text{ мкм}$  и на основе AlN – при  $l_a > 0,4 \text{ мкм}$ . Реально же  $l_0$  будет несколько больше, так как электроны будут испытывать столкновения, поскольку длина свободного пробега электронов в соединениях на порядок меньше полученных значений  $l_0$ .

Для уменьшения  $l_0$  и быстрого разогрева электронного газа в диодах на основе GaAs или InP обычно у катодного контакта создают потенциальный барьер оптимальной высоты. Наиболее изученным является катодный контакт с высокоомной неоднородностью  $n^+-n^- - n$ . В GaAs и InP  $n^+-n^- - n-n^+$ -приборах микронной длины при достаточной концентрации  $n$ , определяемого критерием Крамера, реализуется доменный режим неустойчивости. Оценим критерий Крамера в InN-, GaN- и AlN-приборах:  $nl_a \approx \varepsilon \varepsilon_0 (eE_d)^{-1}$ , где  $E_d$  – максимальная напряженность электрического поля в сформированном домене. При  $E_d = 1,5E_s$   $nl_a$  в InN составляет  $3,81 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ , в GaN –  $6,78 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ , в AlN –  $9,06 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  и в GaAs –  $1,94 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ . При  $nl_a$  больше полученных критических значений возможно распространение обогащенных слоев и доменов. В случае если  $nl_a$  меньше полученных критических значений, то домен не может полностью сформироваться, он «заполнит» активную область и колебаний тока не будет. Следовательно, значение критерия Крамера в полупроводниковых нитридах намного больше, чем в GaAs. Например, результаты моделирования  $n^+-n^- - n-n^+$ :AlN-диодов действительно показывают, что при  $nl_a < 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  электрические доме-

ны не возникают. Следует заметить, что применение  $n^+n^-n$  катодного контакта в приборах на основе полупроводниковых нитридов не столь эффективно, как в GaAs-приборах. Это связано с необходимостью создания электрического поля с напряженностью  $2\div 3E_t$ , локализованного в области длиной порядка длины свободного пробега электрона. Учитывая, что длина свободного пробега электронов составляет в InN  $\approx 0,01$  мкм, в GaN  $\approx 0,005$  мкм и в AlN  $\approx 0,002$  мкм, что более чем на порядок меньше, чем в GaAs, то реализовать такой катодный контакт изменением уровня легирования является проблематичным.

Кроме проблемы эффективного разогрева электронного газа у катода, есть проблема его эффективного охлаждения в анодном контакте; в AlN- и GaN-диодах при генерации колебаний тока максимальная напряженность электрического поля в  $n-n^+$  анодном контакте достигает значений  $10^3$  кВ·см<sup>-1</sup>. Электронный газ в анодном контакте

остаётся разогретым. Неустойчивости заряда сносятся в анод, из-за чего длина пролетной области возрастает. Поэтому оптимальная частота генерации  $f_0$  во всех приборах занижена, относительно минимальной скорости электронов зависимости  $V(E)$ .

Оценочные кривые эффективности генерации  $n^+n^-n-n^+$  и  $n^+n^-n^+$ -приборов на основе InN, GaN и AlN представлены на рис. 3, из которого видно, что рассмотренные приборы могут эффективно работать в субмм диапазоне длин волн. Наибольшие пиковые значения эффективности и соответствующие им частоты генерации должны иметь приборы на основе InN. Следует обратить внимание, что в  $n^+n^-n-n^+$ :InN-диодах возможен эффект зависимости глубины проникновения доменов в активную область от приложенного напряжения [4]. Благодаря этому эффекту микронные InN-диоды на основной гармонике должны иметь в два раза большую ширину частотного диапазона работы, чем GaN- и AlN-приборы (рис. 3).

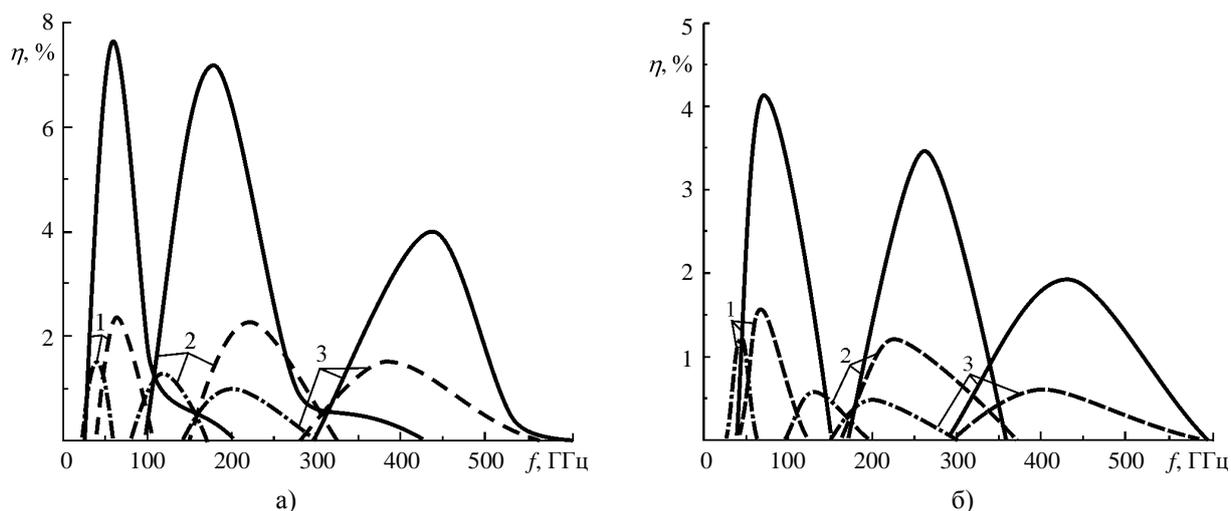


Рис. 3. Зависимость эффективности генерации от частоты  $n^+n^-n-n^+$  (а) и  $n^+n^-n^+$ -приборов (б): 1 –  $l_a = 2,5$  мкм,  $n = 3 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>; 2 –  $l_a = 0,8$  мкм,  $n = 8 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>; 3 –  $l_a = 0,4$  мкм,  $n = 10 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>. Непрерывные кривые соответствуют приборам на основе InN, пунктирные – GaN и штрихпунктирные – AlN

Так в  $n^+n^-n-n^+$ :InN-диоде при  $l_a = 2,5$  мкм оптимальная частота составляет 65 ГГц, а ширина рабочего диапазона частот 150 ГГц (от 40 до 190 ГГц). По эффективности  $n^+n^-n^+$ :InN-приборы приблизительно в два раза уступают  $n^+n^-n-n^+$ :InN-диодам при незначительно большей оптимальной частоте генерации. То, что  $n^+n^-n^+$ -приборы на основе полупроводниковых нитридов могут эффективно работать при субмикронной длине активной области, выгодно их отличает от других полупроводников  $A_3B_5$ , у которых критическая длина активной области более 1 мкм.

Оптимальная напряженность электрического поля в приборах на основе полупроводниковых нитридов, как и в GaAs, составляет  $\approx 2E_t$ .

По частотам генерации InN- и GaN-приборы близки. Однако КПД InN-диодов в несколько раз больше, чем GaN. Одной из причин этого является более высокое значение критического критерия Крамера  $nl_a$  в GaN. При большей концентрации электронов в активной области отличия по эффективности генерации InN- и GaN-приборов должны уменьшиться. Вторая важная причина заключается в том, что разность пиковых значений дрейфовой скорости электронов  $V_t - V_s$  в InN в два раза больше, чем в GaN. Это приводит к большей амплитуде колебаний тока в приборе на основе InN.

По инерционности МПЭ наилучшие показатели имеет AlN, однако малые значения дрейфо-

вой скорости и подвижности электронов, а также большая напряженность порогового поля приводят к относительно незначительной эффективности генерации. Критическое  $nl_a$  в AlN-диодах больше, чем в GaN- и InN-диодах. При используемых концентрациях электронов режим неустойчивости в  $n^+-n^-n^-n^+$ :AlN-диодах является переходным от режима с обогащенными слоями к режиму с доменами. Поэтому характеристики  $n^+-n^-n^-n^+$ - и  $n^+-n^-n^+$ -приборов на основе AlN отличаются незначительно.

Следует обратить внимание, что энергетический зазор в InN между центральной долиной и ближайшей к ней по энергии боковой при комнатной температуре составляет 1,68 эВ, что достаточно близко к ширине запрещенной зоны, равной 2 эВ. При этих условиях высока вероятность в InN-диодах перекрытия МПЭ ударной ионизацией зона-зона.

**Выводы.** InN, GaN и AlN по дрейфовой скорости и времени релаксации электронов перспективны для диодов Ганна терагерцевого диапазона. Однако существует ряд важных нерешенных проблем, которые до сих пор не дали возможности реализовать такие приборы. К первоочередным нерешенным проблемам следует отнести эффективный отвод тепла от активной области диодов, разогрев электронного газа у катода и его термализацию в аноде. Способы, которые использовались ранее в диодах Ганна на основе GaAs и InP малоэффективны. Из рассмотренных приборов с МПЭ наиболее перспективным для субмм диапазона является  $n^+-n^-n^-n^+$ :InN-диод Ганна. Однако в приборах с МПЭ на основе InN велика вероятность перекрытия МПЭ ударной ионизацией зона-зона. Поэтому более предпочтительным, по всей видимости, является  $In_xGa_{1-x}N$ .

1. Mansour N. Theoretical study of electron transport in gallium nitride / N. Mansour, K. W. Kim, M. A. Littlejohn // J. Appl. Phys. – 1995. – 77, N 6. – P. 2834–2836.
2. Electronic transport studies of bulk zincblende and wurtzite phases of GaN based on an ensemble Monte Carlo calculation including a full zone band structure / J. Kolnik, I. H. Oguzman, K. F. Brennan et al. // J. Appl. Phys. – 1995. – 78, N 2. – P. 1033–1038.
3. Bhapkar U. V. Monte Carlo calculation of velocity-field characteristics of wurtzite GaN / U. V. Bhapkar, M. S. Shur // J. Appl. Phys. – 1997. – 82, N 4. – P. 1649–1655.
4. Bandstructure effect on high-field transport in GaN and GaAlN / S. Krishnamurthy, M. Schilfgaard, A. Sher, A.-B. Chen // Appl. Phys. Lett. – 1997. – 71, N 14. – P. 1999–2001.
5. Electron transport characteristics of GaN for high temperature device modeling / J. D. Albrecht, R. P. Wang, P. P. Ruden et al. // J. Appl. Phys. – 1998. – 83, N 9. – P. 4777–4781.
6. Dhar S. Low field electron mobility in GaN / S. Dhar, S. Ghosh // J. Appl. Phys. – 1999. – 86, N 5. – P. 2668–2676.
7. Куликов К. В. Высокочастотные параметры нитрида галлия / К. В. Куликов, В. А. Москалюк // Техника и приборы СВЧ. – 2008. – № 2. – С. 48–52.
8. Fabrication and characterization of planar Gunn diodes for Monolithic Microwave Integrated Circuits [Электронный ре-

- сур]. – Режим доступа: [www/URL: http://gorgia.no-ip.com/phd/html/thesis/phd\\_html/simone-jbook.html](http://www.URL: http://gorgia.no-ip.com/phd/html/thesis/phd_html/simone-jbook.html). – Загл. с экрана.
9. Monte Carlo Simulation of Electron Transport in the III-Nitride Wurtzite Phase Materials System: Binaries and Ternaries / M. Farahmand, C. Garetto, E. Bellotti et al. // IEEE Trans. Electron Dev. – 2001. – 48, N 3. – P. 535–542.
  10. Tansley T. L. Electron mobility in indium nitride / T. L. Tansley, C. P. Foley // Electron Lett. – 1984. – 20, N 25–26. – P. 1066–1068.
  11. Ensemble Monte Carlo study of electron transport in wurtzite InN / E. Bellotti, B. K. Doshi, K. F. Brennan et al. // J. Appl. Phys. – 1999. – 85, N 2. – P. 916–923.
  12. Electron transport in wurtzite indium nitride / S. K. O'Leary, B. E. Foutz, M. S. Shur et al. // J. Appl. Phys. – 1998. – 83, N 4. – P. 826–829.
  13. Electrical transport in p-GaN, n-InN and n-InGaN / W. Geerts, J. D. Mackenzie, C. R. Abernathy et al. // Solid-State Electronics. – 1996. – 39, N 9. – P. 1289–1294.
  14. Monte Carlo simulation of electron transport in wurtzite aluminum nitride / S. K. O'Leary, B. E. Foutz, M. S. Shur et al. // Solid State Communications. – 1998. – 105, N 10. – P. 621–626.
  15. Alekseev E. Large-signal microwave performance of GaN-based NDR diode oscillators / E. Alekseev, D. Pavlidis // Solid State Electronics. – 2000. – 44, N 6. – P. 941–947.
  16. Прохоров Э. Д. Полупроводниковые материалы для приборов с междолинным переносом электронов / Э. Д. Прохоров, Н. И. Белецкий. – Х.: Вища школа, 1982. – 144 с.
  17. Стороженко И. П. Моделирование диодов Ганна на основе варизонных полупроводников / И. П. Стороженко // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2003. – 8, № 2. – С. 287–294.
  18. Давыдов С. Ю. Оценки параметров нитридов элементов третьей группы: BN, AlN, GaN и InN / С. Ю. Давыдов // Физика и техника полупроводников. – 2002. – 36, вып. 1. – С. 45–47.
  19. Electronic archive. New Semiconductor Materials. Characteristics and Properties [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM>. – Загл. с экрана.

I. P. Storozhenko, Yu. V. Arkusha

## THE RESPECTIVES FOR USING GUNN DIODE ON THE BASE OF GaN, AlN AND InN

Properties transfer, idealized limited space-charge accumulation mode and resonance transit-time mode of the GaN, AlN, InN  $n^+-n^-n^-n^+$  and  $n^+-n^-n^-n^+$  Gunn diodes were studied. Prospects, peculiarities and problems of nitride semiconductors in Gunn diodes are represented.

**Key words:** nitride semiconductor, Gunn diode, transport properties, frequency limit.

I. П. Стороженко, Ю. В. Аркуша

## ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ДІОДІВ ГАННА НА ОСНОВІ GaN, AlN ТА InN

Подано аналіз транспортних властивостей, ідеалізованого режиму з обмеженням об'ємного заряду і резонансно-прольотного режиму  $n^+-n^-n^-n^+$ - і  $n^+-n^-n^-n^+$ -діодів Ганна на основі GaN, AlN та InN. Показано перспективність, особливості і проблеми використання напівпровідникових нітридів у діодах Ганна.

**Ключові слова:** напівпровідниковий нітрид, діод Ганна, транспортні властивості, частотна границя.

Рукопись поступила 03.11.10 г.