

И. П. Стороженко, М. В. Кайдаш

Национальный фармацевтический университет

53, ул. Пушкинская, Харьков, 610027, Украина

E-mail: storozhenko.igor@gmail.com

ВАРИЗОННЫЙ AlGaInAs-ДИОД ГАННА

Диоды Ганна – активные элементы для генерации электромагнитных волн в миллиметровом диапазоне. Повышение их выходной мощности и предельной частоты генерации является актуальной задачей. Один из способов увеличения указанных характеристик диодов Ганна – использование варизонных полупроводников. В статье представлены результаты числовых экспериментов по генерации электромагнитных колебаний с помощью диодов Ганна на основе варизонного соединения AlGaAs-GaAs-InGaAs. Исследования проведены с помощью температурной модели междолинного переноса электронов в варизонных полупроводниках. Длина активной области диода составляла 2,5 мкм с концентрацией ионизированных примесей в ней 10^{16} см^{-3} . Показано, что AlGaAs-GaAs-InGaAs-диоды могут быть использованы в качестве активных элементов для генерации электромагнитных колебаний миллиметрового диапазона. В GaAs-In_xGa_{1-x}As- и Al_{0,2}Ga_{0,8}As-GaAs-In_xGa_{1-x}As-диолах выходная мощность почти линейно растет с процентной долей InAs в интервале от 0 до 50 %. Максимальное значение выходной мощности $P = 12,2 \text{ кВт}\cdot\text{см}^{-2}$ на частоте $f = 45 \text{ ГГц}$ и с эффективностью $\eta = 10,5 \%$ имеет GaAs-Ga_{0,5}In_{0,5}As-диод. Наибольшую эффективность генерации $\eta = 11,3 \%$ при $P = 10,6 \text{ кВт}\cdot\text{см}^{-2}$ и $f = 41 \text{ ГГц}$ – Al_{0,2}Ga_{0,8}As-GaAs-In_{0,5}Ga_{0,5}As-диод. Al_{0,2}Ga_{0,8}As-GaAs-диод по выходной мощности и эффективности генерации в 2–3 раза уступает названным выше. Результаты исследования расширяют знания о физических процессах переноса носителей заряда в сложных полупроводниковых структурах и могут быть использованы для технологических разработок новых быстродействующих приборов на основе полупроводников A_3B_5 . Ил. 4. Библиогр.: 16 назв.

Ключевые слова: диод Ганна, междолинный перенос электронов, варизонный полупроводник, выходная мощность, домен, эффективность генерации, температурная модель, терагерцевая электроника.

Терагерцовый диапазон частот электромагнитных волн (ТГц-диапазон) находится между областью миллиметровых длин волн и инфракрасным диапазоном. Основные преимущества и сценарии развития применения ТГц-диапазона в различных областях хорошо изучены [1]. Например, современные тенденции показывают, что к 2020 г. потребность в скорости беспроводной передачи данных должна быть не меньшей десятков гигабит в секунду [2]. Ряд теоретических и экспериментальных работ доказывают, что диапазон от 100 до 300 ГГц является наиболее подходящим для увеличения скорости беспроводной передачи данных. На сегодняшний день в этом диапазоне частот экспериментально достигнута скорость 10...20 Гбит/с [2]. В работе [3] дано обоснование возможности увеличения данного параметра до 100 Гбит/с. В этом плане обосновано выглядят предполагаемые результаты современных научных программ, например 100G *Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA)*, по созданию беспроводных коммуникационных систем со скоростью передачи данных в 100 Гбит/с на дистанции 200 км («воздух–воздух») и до 100 км («воздух–земля») [4]. Перевод аппаратуры на новый диапазон частот позволит резко повысить пропускную способность систем связи государственного, военного и специального назначения. Но для этого необходимо иметь эффективные средства генерации, регистрации, обработки и излучения сигналов в ТГц-диапазоне. Здесь особое место занимают программы по созданию высокоскоростных малощумящих транзисторов (биполярных с гетеропереходом – *HBT*, *DHBT* и с высокой подвижностью электронов – *HEMT*) на

основе GaAs, InP (*Sub-millimeter Wave Imaging Focal Plane Technology – SWIFT, Technology for Frequency Agile Digitally Synthesized Transmitters – TFAST* и *Terahertz Electronics*), полупроводниковых нитридов (*Nitride Electronic Next-Generation Technology – NEXT*) и Si-Ge (Европейские программы *SiGe-HBT*). Твердо установленного правила определения максимальной частоты генерации транзистора, необходимой для обеспечения эффективного функционирования всей схемы, не существует. Поэтому практически ее значение выбирается в полтора-два раза выше рабочей частоты схемы. Реализация названных программ привела к созданию транзисторов с максимальной рабочей частотой 0,3...1,0 ТГц [5]. Вызывает интерес *HEMT* со значением максимальной рабочей частоты 279 ГГц [6]. Особенность разработки – изготовление транзистора с помощью процесса химического осаждения из паровой фазы, пригодного для массового производства. Сейчас *HEMT* ТГц-диапазона в основном изготавливаются с помощью молекулярно-лучевой эпитаксии, мало пригодной для крупномасштабного производства.

Наряду с достижениями в технологии изготовления транзисторов ТГц-диапазона по-прежнему востребованы традиционные активные элементы мм-диапазона, такие как диоды Ганна (ДГ), лавинно-пролетные диоды (ЛПД) и резонансно-туннельные диоды (РТД).

Диоды Ганна широко используются в качестве активных элементов для генерации и усиления в мм-диапазоне длин волн. Сочетание низкого уровня фазового шума и умеренной мощности с относительно небольшой стоимостью

делают их широко востребованными приборами. В основе работы ДГ лежит эффект междолинного переноса электронов (МПЭ). Но в ДГ существует ряд физических проблем, ограничивающих сверху их рабочую частоту. К таким проблемам следует отнести конечность времен переходов электронов с одной долины зоны проводимости в другую, времени «разогрева» электронов у катодного контакта до энергии, необходимой для МПЭ, конечность дрейфовой скорости электронов в полупроводнике, увеличение емкости при уменьшении длины прибора и прочие. Для устранения негативного влияния некоторых из названных причин в настоящее время, в основном, используют планарные технологии [7, 8] и варизонный катодный контакт. В работах [9–16] показано, что ДГ на основе варизонных полупроводников имеют более высокие значения эффективности генерации (КПД) и выходной мощности. Основной причиной такого повышения является локальное понижение энергетического зазора между неэквивалентными долинами в варизонном полупроводнике в области катодного контакта [12]. Оптимальная величина энергетического зазора между долинами в катодном контакте при температуре кристаллической решетки 300 К составляет 0,1...0,2 эВ. Однако в некоторых тройных варизонных соединениях, таких как InGaAs и InPAs, оптимума энергетического зазора добиться не удастся из-за нижней его границы (в GaAs – 0,36 эВ, в InP – 0,6 эВ). Вызывает интерес случай, позволяющий уменьшать энергетический зазор между долинами вплоть до тепловой энергии электронов. Такую возможность дают, например, AlGaAs, AlGaInAs и InGaPAs. Однако в ДГ на основе $Al_xGa_{1-x}As-GaAs$ при оптимальном содержании AlAs в катоде 15...25 % [9, 10, 14], возможно, не достигнуто оптимальное верхнее значение энергетического зазора между долинами, так как оно ограничено сверху значением для GaAs. С другой стороны, по целому ряду электрофизических свойств InGaAs более предпочтителен, чем GaAs [8]. Более сложные полупроводниковые соединения AlGaInAs и InGaPAs позволяют варьировать энергетическим зазором между долинами в большем интервале, чем AlGaAs, InPAs, GaPAs и InGaAs. Работа ДГ на основе AlGaInAs и InGaPAs не исследована.

Цель данной статьи – изучить особенности работы ДГ на основе варизонного AlGaInAs, найти оптимальное распределение бинарных компонент AlAs, GaAs и InAs в диоде и оценить выходные характеристики таких диодов.

1. Структура прибора. Моделируется диод с профилем легирования n^+-n-n^+ на основе $Al_{x(z)}Ga_{1-x(z)-y(z)}In_{y(z)}As$. Длина активной области равна 2,5 мкм с концентрацией ионизированных доноров в ней 10^{16} см^{-3} . Длина катода и анода –

0,75 мкм. Концентрация ионизированных доноров в них составила $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Схема зоны проводимости, распределения примесей и бинарных компонентов представлена на рис. 1.

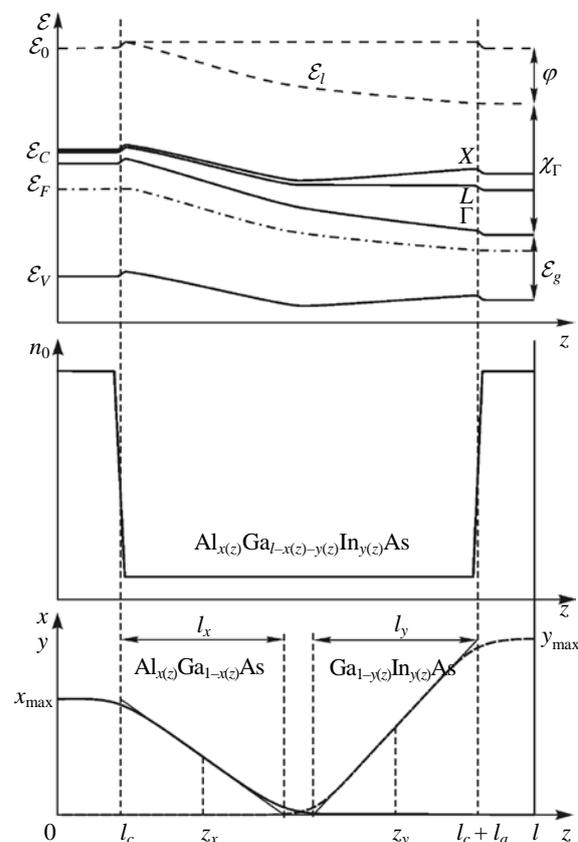


Рис. 1. Схемы зонной диаграммы, уровня легирования и распределения AlAs- и InAs-компонент исследуемого диода

Процентное содержание InAs и AlAs в $Al_{x(z)}Ga_{1-x(z)-y(z)}In_{y(z)}As$ задаются зависимостями:

$$x(z) = x_{\max} \left[1 + \exp\left\{ \frac{4(z - z_x)}{l_x} \right\} \right]^{-1}; \quad (1)$$

$$y(z) = y_{\max} \left(1 - \left[1 + \exp\left\{ \frac{4(z - z_y)}{l_y} \right\} \right]^{-1} \right), \quad (2)$$

где x_{\max} – предельное содержание AlAs при $z \rightarrow -\infty$ (содержание AlAs в катоде); y_{\max} – предельное содержание InAs при $z \rightarrow +\infty$ (содержание InAs в аноде); l_x и l_y – характерные длины переходных (варизонных) слоев для x- и y-компонент; z_x и z_y – координаты центров переходных слоев для x- и y-компонент; z – пространственная координата. В данном исследовании $l_x = l_y = 1,25 \text{ мкм}$ – половина длины активной области диода. Параметры $z_x = 1,5 \text{ мкм}$ и $z_y = 2,67 \text{ мкм}$ подобраны таким образом, чтобы в центре активной области $x(z) \approx 0$ и $y(z) \approx 0$ (рис. 1). Температура кристаллической решетки T_0 считалась постоянной, равной 300 К.

В исследовании ставится цель с помощью численных экспериментов получить оптимизированные по напряжению питания зависимости выходной мощности и эффективности генерации от частоты для разных значений x_{\max} и y_{\max} . При этом полученные результаты сравниваются с двумя предельными случаями – GaAs-Ga_{1-y}In_yAs-диод ($x_{\max} = 0$, $l_y = 2,5$ мкм) и Al_xGa_{1-x}As-GaAs-диод ($y_{\max} = 0$, $l_x = 1,25$ и $2,5$ мкм).

2. Математическая модель прибора.

Исследования проводились с помощью трехуровневой модели МПЭ в варизонных полупроводниках, основанной на решении кинетического уравнения Больцмана для случая смещенного максвелловского распределения электронов [16]. Модель представляет собой систему уравнений, состоящую из уравнений непрерывности (3), плотности тока (4) и баланса энергии для каждой из Г, L и X неэквивалентных долин зоны проводимости полупроводника (5), а также уравнения Пуассона (6):

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} = -\frac{1}{e} \frac{\partial j_i}{\partial z} - \frac{n_i}{\tau_{n,ij}} - \frac{n_i}{\tau_{n,ik}} + \frac{n_j}{\tau'_{n,ji}} + \frac{n_k}{\tau'_{n,ki}}; \quad (3)$$

$$j_i = n_i \mu_i \left(eE + \frac{\partial \chi_i}{\partial z} \right) + k_B \mu_i \left(\frac{3n_i T_i}{2m_i} \frac{\partial m_i}{\partial z} - \frac{\partial (n_i T_i)}{\partial z} \right); \quad (4)$$

$$\frac{3}{2} k_B \frac{\partial n_i T_i}{\partial t} = j_i E + \frac{j_i}{e} \frac{\partial \chi_i}{\partial z} - \frac{5}{2} k_B \frac{1}{e} \frac{\partial (j_i T_i)}{\partial z} - \frac{3}{2} k_B \left(\frac{n_j T_j}{\tau'_{\varepsilon,ji}} + \frac{n_k T_k}{\tau'_{\varepsilon,ki}} - \frac{n_i T_i}{\tau_{\varepsilon,i}} \right); \quad (5)$$

$$\frac{\partial (\varepsilon E)}{\partial z} = 4\pi e (n_i + n_j + n_k - n_0), \quad (6)$$

где индексы i, j и k определяют три неэквивалентные долины. Уравнения (3)–(5) записаны для i -долины. Здесь $n_i, \mu_i, m_i, j_i, T_i$ – соответственно концентрация, подвижность, эффективная масса, плотность тока и температура электронов в i -долине; $\tau_{n,ij}, \tau_{\varepsilon,ij}$ – время релаксации концентрации и энергии электронов при междолинном переходе из i - в j -долину; $\tau_{\varepsilon,i}$ – время релаксации энергии электронов в i -долине; χ_i – энергия, необходимая для перевода электронов с энергетического минимума i -й долины до локального уровня вакуума; E – напряженность электрического поля; n_0 – концентрация ионизированных доноров; ε – диэлектрическая проницаемость; e – модуль заряда электрона; k_B – постоянная Больцмана; t – время; z – координата. Средняя плотность тока в диоде определяется как сумма средних в трех долинах. Система уравнений (4)–(6) решается численным методом («встречная прогонка»). Моделируется ситуация, когда к диоду прикладывается синусоидальное напряжение с постоянной составляющей, что соответствует помещению диода в одноконтурный резонатор. Выходные

характеристики оптимизировались для разных частот по напряжению смещения и амплитуде первой гармоники. Вычисления эффективности генерации диодов проводились для второго и третьего периодов колебаний.

3. Результаты исследования и их анализ.

Рассмотрим вначале два предельных случая – GaAs-Ga_{1-y}In_yAs- и Al_xGa_{1-x}As-GaAs-диод. Для Al_xGa_{1-x}As-GaAs-диода варизонный слой располагался в окрестности катода ($l_x = 1,25$ мкм, $z_x = 1,5$ мкм) и в центре активной области ($l_x = 2,5$ мкм, $z_x = 2$ мкм). В Al_xGa_{1-x}As при изменении x от 0 до 0,3 энергетический зазор между Г- и L-долинами уменьшается от 0,36 до 0,102 эВ, а в Ga_{1-y}In_yAs при изменении y от 0 до 0,5 – растет от 0,36 до 0,755 эВ.

В каждом из названных диодов уменьшение энергетического зазора между центральной долиной и боковыми вблизи катодного контакта приводит к локальному увеличению заселенности боковых долин и понижению подвижности электронов. Результатом является более эффективное формирование в диоде неустойчивостей заряда. В Al_xGa_{1-x}As-GaAs-диодах даже при небольшом содержании AlAs (5%) реализуется доменный режим неустойчивости. Выходная мощность и эффективность генерации возрастают (рис. 2).

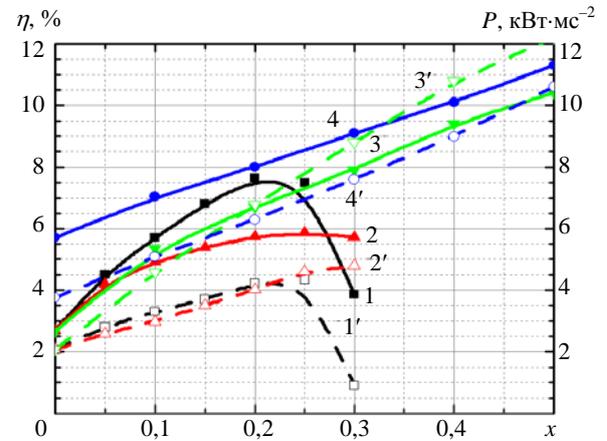


Рис. 2. Графики зависимости пиковых значений выходной мощности (пунктирные линии) и эффективности генерации (непрерывные линии) разных варизонных ДГ от процентного содержания бинарных компонент: 1, 1' – Al_xGa_{1-x}As-GaAs ($l_x = 2,5$ мкм, $z_x = 2$ мкм); 2, 2' – Al_xGa_{1-x}As-GaAs ($l_x = 1,25$ мкм, $z_x = 1,5$ мкм); 3, 3' – GaAs-Ga_{1-y}In_yAs ($l_y = 2,5$ мкм, $z_y = 2$ мкм); 4, 4' – Al_{0,2}Ga_{0,8}As-GaAs-Ga_{1-y}In_yAs ($l_x = l_y = 1,25$ мкм, $z_x = 1,5$ мкм, $z_y = 2,67$ мкм)

Оптимальная частота генерации (частота, на которой выходная мощность максимальная) при этом падает. Оптимальная частота GaAs-диодов составляет 44 ГГц (рис. 3). В диоде с Al_{0,3}Ga_{0,7}As-GaAs-слоем у катода она равна 36 ГГц, а в диоде с таким же варизонным слоем в центре активной области – 32 ГГц. Уменьшение оптимальной частоты с ростом процентной доли AlAs

связано, во-первых, с переходом от режима с аккумулирующими слоями к режиму с доменами (скорость распространения доменов меньше скорости аккумулирующих слоев) и, во-вторых, с уменьшением средней подвижности электронов. Скорость распространения доменов в варизонных диодах остается выше, чем минимальная дрейфовая скорость электронов в $Al_xGa_{1-x}As$ при предельном содержании AlAs x_{max} . Но при увеличении x_{max} влияние низкой подвижности электронов в $Al_xGa_{1-x}As$ в окрестности катода возрастает, и средняя скорость дрейфа домена в диоде падает, что влечет за собой уменьшение частоты генерации.

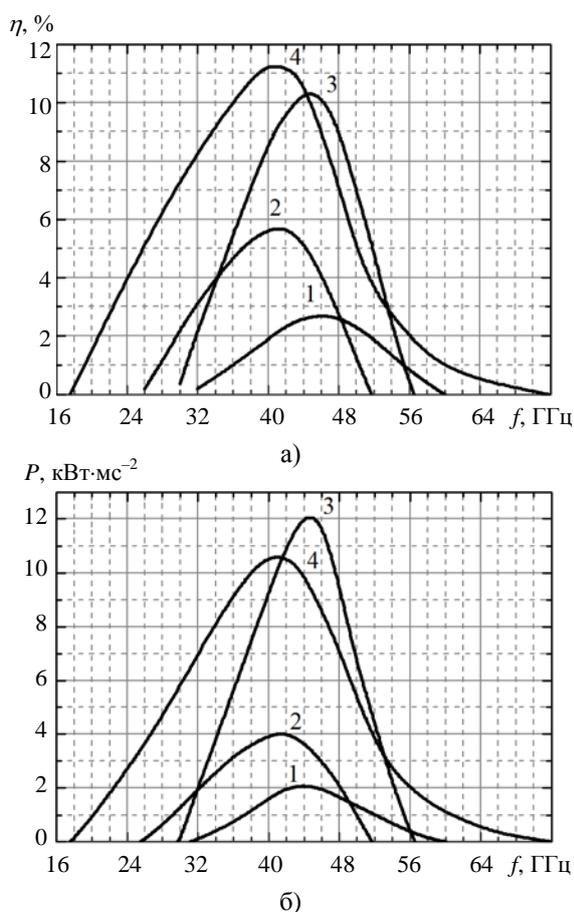


Рис. 3. Графики зависимости эффективности генерации (а) и выходной мощности (б) от частоты разных ДГ: 1 – GaAs; 2 – $Al_{0,2}Ga_{0,8}As-GaAs$ ($l_x = 1,25$ мкм, $z_x = 1,5$ мкм); 3 – $GaAs-Ga_{0,5}In_{0,5}As$ ($l_y = 2,5$ мкм, $z_y = 2$ мкм); 4 – $Al_{0,2}Ga_{0,8}As-GaAs-Ga_{0,5}In_{0,5}As$ ($l_x = l_y = 1,25$ мкм, $z_x = 1,5$ мкм, $z_y = 2,67$ мкм)

При одинаковых значениях x в $Al_xGa_{1-x}As-GaAs$ оптимальная частота генерации выше в диодах с варизонным слоем у катода. В этом случае средняя подвижность электронов вдоль активной области диода больше, чем в диоде с варизонным слоем в центре активной области.

Пиковые значения выходной мощности диода с $Al_xGa_{1-x}As-GaAs$ -слоем у катода и в центре активной области практически совпадают в

диапазоне x от 0 до 0,25 (рис. 2, кривые 1' и 2'). Максимум достигается при $x = 0,20 \dots 0,25$. В диоде с $Al_{0,25}Ga_{0,75}As-GaAs$ -слоем у катода ($l_x = 1,25$ мкм) максимум выходной мощности составил $4,6$ кВт·см $^{-2}$ с КПД = 5,9 % на частоте 38 ГГц, а в диоде с таким же слоем в центре активной области ($l_x = 2,5$ мкм) – $4,4$ кВт·см $^{-2}$ с КПД = 7,5 % на частоте 35 ГГц. При $x > 0,25$ в обоих случаях происходит спад выходной мощности и эффективности. При $x > 0,3$ диоды быстро теряют активные свойства. В таких диодах формируется статический катодный домен.

Пиковые значения выходной мощности и КПД диодов при предельном содержании AlAs, равном 0,20 и 0,25, близки. Но оптимальная частота диодов с $x_{max} = 0,20$ оказалась на 3...4 ГГц выше, чем при $x_{max} = 0,25$. Поэтому для дальнейшего исследования работы $Al_{x(z)}Ga_{1-x(z)-y(z)}In_{y(z)}As$ -диода предельное значение x взято равным 0,20.

Диод с $Al_xGa_{1-x}As-GaAs$ -слоем в центре активной области обладает интересным свойством. Нижняя граница частотного диапазона таких диодов, как и диодов с варизонным слоем у катода, слабо зависит от предельного содержания AlAs и составляет 26...28 ГГц. Но верхняя граница диодов с варизонным слоем в центре активной области при $x > 0,2$ резко возрастает с 52 до 68 ГГц благодаря тому, что активной зоной выступает только часть n -области диода. При этом длина области дрейфа домена, а значит, и частота генерации колебаний тока определяются приложенным к диоду напряжением [12]. В диоде с варизонным слоем у катода данное свойство на выходных характеристиках не выражено, хотя анализ показывает возможность управлять частотой колебания тока приложенным к диоду напряжением и в этом случае, но в меньшем интервале частот.

Рассмотрим второй предельный случай – $Ga_{1-y(z)}In_{y(z)}As$ -диод. Изменение процентного содержания InAs в диоде происходит по всей длине активной области. В отличие от $Al_xGa_{1-x}As-GaAs$ -диодов, в таких диодах минимальное значение энергетического зазора между центральной и боковой долинами ограничено снизу 0,36 эВ в GaAs. Для температуры кристаллической решетки 300 К эта величина не является достаточной для реализации доменного режима работы. Режим работы $GaAs-Ga_{1-y}In_yAs$ -диода можно характеризовать как промежуточный между доменным режимом и режимом с аккумулирующими слоями. Зависимость оптимальной частоты генерации от предельного процентного содержания InAs имеет незначительный минимум в 43 ГГц при $y_{max} = 0,4$. Для $y_{max} = 0,5$ оптимальная частота составила 45 ГГц. Слабое влияние оптимальной частоты генерации от процентного содержания InAs связано с тем, что уменьшение скорости дрейфа неустойчивости

заряда (аккумулирующие слои трансформируются в домены при увеличении y_{\max}) компенсируется ростом максимальной дрейфовой скорости электронов в $\text{Ga}_{1-y}\text{In}_y\text{As}$. Минимальная скорость дрейфа электронов в интервале y от 0 до 0,4 меняется незначительно. При $y > 0,4$ максимальная и минимальная дрейфовые скорости электронов возрастают, что отражается на частоте генерируемых колебаний тока.

Пиковые значения выходной мощности и КПД растут с увеличением предельного процентного содержания InAs почти линейно (рис. 2, кривые 3 и 3'), достигая при $y_{\max} = 0,5$ значений $12,2 \text{ кВт}\cdot\text{см}^{-2}$ и 10,5 % на частоте 45 ГГц соответственно (рис. 3 кривая 3). При $y > 0,5$ в $\text{Ga}_{1-y}\text{In}_y\text{As}$ возникает вероятность перекрытия междолинного переноса электронов ударной ионизацией «зона–зона». В экспериментальной работе [7] была показана генерация с помощью диодов на основе $\text{Ga}_{0,47}\text{In}_{0,53}\text{As}$. Однако в нашем исследовании диоды с $y_{\max} > 0,5$ не рассматривались из-за возможной ошибки.

Более высокие значения выходной мощности и КПД $\text{Ga}_{1-y(z)}\text{In}_{y(z)}\text{As}$ -диодов по сравнению с $\text{Al}_{x(z)}\text{Ga}_{1-x(z)}\text{As}$ -диодами связаны с лучшими свойствами $\text{Ga}_{1-y}\text{In}_y\text{As}$ как материала с эффектом МПЭ. В частности, в $\text{Ga}_{1-y}\text{In}_y\text{As}$ больше, чем в $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, отношение максимальной дрейфовой скорости электронов к минимальной, протяженность участка отрицательной дифференциальной проводимости (ОДП) и пороговое поле наступления ОДП. В результате в $\text{Ga}_{1-y(z)}\text{In}_{y(z)}\text{As}$ -диодах амплитуда колебаний тока и напряжения больше, чем в $\text{Al}_{x(z)}\text{Ga}_{1-x(z)}\text{As}$.

Рассмотрим $\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{-GaAs-Ga}_{1-y}\text{In}_y\text{As}$ -диоды ($l_x = l_y = 1,25 \text{ мкм}$, $z_x = 1,5 \text{ мкм}$, $z_y = 2,67 \text{ мкм}$). Минимальный энергетический зазор между Г-долиной и боковыми долинами в катоде составляет 0,188 эВ и не зависит от y . Изменяется только максимальное значение в аноде от 0,36 до 0,755 эВ. Соответственно, приращение энергетического зазора растет при увеличении y от 0,172 ($y = 0$, $\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{-GaAs}$ -диод) до 0,567 эВ ($y = 0,5$). Зависимость выходной мощности и КПД таких диодов от y очень похожа на соответствующие зависимости $\text{GaAs-Ga}_{1-y}\text{In}_y\text{As}$ -диодов. При малых значениях y по выходной мощности и КПД $\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{-GaAs-Ga}_{1-y}\text{In}_y\text{As}$ -диоды в два раза превосходят $\text{GaAs-Ga}_{1-y}\text{In}_y\text{As}$ -диоды. Но с ростом y это различие уменьшается. Выходная мощность $\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{-GaAs-Ga}_{1-y}\text{In}_y\text{As}$ -диодов с ростом y увеличивается от 3,8 до $10,6 \text{ кВт}\cdot\text{см}^{-2}$. Эффективность генерации при этом растет от 5,7 до 11,3 % и является наибольшей для рассмотренных нами диодов (рис. 2, кривые 4 и 4'). Оптимальная частота генерации 40 ГГц остается почти неизмен-

ной во всем диапазоне y . При значении $y \approx 0$ оптимальная частота составляет 42 ГГц. С ростом y она быстро уменьшается до 40 ГГц и только при $y = 0,5$ снова возрастает до 41 ГГц (рис. 3, кривая 4). В интервале y от 0 до 0,15 выходная мощность $\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{-GaAs-Ga}_{1-y}\text{In}_y\text{As}$ -диодов больше, чем $\text{GaAs-Ga}_{1-y}\text{In}_y\text{As}$ - и $\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{-GaAs}$ -диодов. В интервале y от 0,15 до 0,5 наибольшую выходную мощность имеют $\text{GaAs-Ga}_{1-y}\text{In}_y\text{As}$ -диоды. Постоянная составляющая и амплитуда основной гармоники колебаний тока в $\text{GaAs-Ga}_{1-y}\text{In}_y\text{As}$ -диодах оказались больше, чем в $\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{-GaAs-Ga}_{1-y}\text{In}_y\text{As}$ -диодах. Этим обусловлено различие в выходной мощности и КПД этих диодов. $\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{-GaAs-Ga}_{1-y}\text{In}_y\text{As}$ -диоды обладают тем же свойством, что и диоды с $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As-GaAs}$ -слоем в центре активной области при $x > 0,2$. Частота колебаний тока управляется приложенным к диоду напряжением, что позволяет увеличить верхнюю границу частотного интервала (рис. 3, кривая 4). Например, ширина частотного диапазона $\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{-GaAs-Ga}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{As}$ -диода составляет 54 ГГц (от 18 до 72 ГГц) и является наибольшей для рассмотренных нами диодов.

Выводы. Таким образом, показана возможность генерации электромагнитных волн с помощью диодов Ганна с двумя варизонными слоями $\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{-GaAs-Ga}_{1-y}\text{In}_y\text{As}$ в активной области. В таких диодах при длине активной области 2,5 мкм реализуется доменный режим неустойчивости тока. Оптимальная частота генерации составляет ~40 ГГц. Выходная мощность и КПД почти линейно растут с увеличением процентной доли InAs в аноде. Максимальное значение выходной мощности составляет $10,6 \text{ кВт}\cdot\text{см}^{-2}$ с КПД = 11,3 % на частоте 41 ГГц при $y = 0,5$. Такой диод имеет самый широкий из рассмотренных диодов интервал частот от 18 до 72 ГГц, в котором возможна генерация электромагнитных волн на основной частоте. Наибольшее значение выходной мощности в $12,2 \text{ кВт}\cdot\text{см}^{-2}$ с КПД = 10,5 % на частоте 45 ГГц имеет диод с одним варизонным $\text{GaAs-Ga}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{As}$ -слоем в активной области. Максимумы выходной мощности и эффективности генерации диодов с $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As-GaAs}$ -слоем достигаются при содержании AlAs в катоде 0,2...0,25. В таких диодах выходная мощность оказалась в три, а эффективность генерации – почти в два раза меньше, чем соответствующие значения в $\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{-GaAs-Ga}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{As}$ - и $\text{GaAs-Ga}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{As}$ -диодах. Наша гипотеза о перспективности диодов Ганна с двумя варизонными слоями подтвердилась не полностью. Исследуемый прибор превосходит по КПД и рабочему частотному диапазону диоды с одним варизонным слоем, но немного уступает по выходной мощности диоду с $\text{GaAs-Ga}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{As}$ -слоем. Результаты исследования могут быть использованы для

технологических разработок новых быстродействующих приборов, таких как транзисторы, диоды Ганна.

Библиографический список

1. *Современные радиоэлектронные системы терагерцового диапазона* / В. М. Исаев, И. Н. Кабанов, В. В. Комаров, В. П. Мещанов // Докл. ТУСУРа. – 2014. – 34, № 4. – С. 5–21.
2. *Kürner T. Towards Future THz Communications Systems* / T. Kürner // Terahertz Science and Technology. – 2012. – 5, N 1. – P. 11–16.
3. *Terahertz wireless communications based on photonics technologies* / T. Nagatsuma, S. Horiguchi, Y. Minamikata et al. // Optics Express. – 2013. – 21, N 21. – P. 23736–23747.
4. *Woodward T. 100 Gb/s RF Backbone* / T. Woodward [Electronic resource]. – Access mode: www.darpa.mil/program/100-gb-s-rf-backbone. – Screen title.
5. *Майская В. Освоение терагерцовой щели. Полупроводниковые приборы вторгаются в субмиллиметровый диапазон* / В. Майская // Электрон. НТБ. – 2011. – № 8. – С. 74–87.
6. *Fabrication of 150-nm T-Gate Metamorphic AlInAs/GaInAs HEMTs on GaAs Substrates by MOCVD* / H. Li, Z. Feng, C. W. Tang, K. M. Lau // IEEE Electron Device Lett. – 2011. – 32, N 9. – P. 1224–1226.
7. *In_{0,55}Ga_{0,47}As planar Gunn diodes operating at a fundamental frequency of 164 GHz* / A. Khalid, C. Li, V. Papagegiou et al. // IEEE Electron Device Lett. – 2013. – 34, N 1. – P. 39–41.
8. *Experimentally estimated dead space for GaAs and InP based planar Gunn diodes*. / M. I. Maricar, A. Khalid, G. Dunn et al. // Semiconductor Science and Technol. – 2015. – 30, N 1. – P. 012001 (5 p.).
9. *The use of linearly graded composition AlGaAs injectors for intervalley transfer in GaAs: theory and experiment* / N. R. Couch, P. H. Beton, J. Kelly, M. M. Kerr // Solid State Electron. – 1988. – 31, – N 3–4. – Chap. 6. – P. 613–616.
10. *Hot electron injector Gunn diode for advanced driver assistance systems* / A. Forster, M. I. Lepsa, D. Freundt et al. // Appl. Phys. A: Materials Science & Processing. – 2007. – 87, Iss. 3. – P. 545–558.
11. *Storozhenko I. P. Simulation of transferred electron devices with linearly graded composition of 3–5 threefold semiconductor in active zone*. / I. P. Storozhenko, E. D. Prokhorov, Yu. V. Arkusha // Int. J. of Infrared and Millimeter Waves. – 2004. – 25, N 6. – P. 879–890.
12. *Стороженко И. П. Особенности возникновения и дрейфа волн объемного заряда в приборах с междолинным переносом электронов на основе варизонного GaP_{x(z)}As_{1-x(z)}* / И. П. Стороженко // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – X., 2007. – 12, № 1. – С. 243–249.
13. *Стороженко И. П. Частотные возможности диодов с междолинным переносом электронов на основе варизонного In_{x(z)}Ga_{1-x(z)}As с различными катодными контактами* / И. П. Стороженко // Радиотехника и электрон. – 2007. – 52, № 10. – С. 1253–1259.
14. *Стороженко И. П. Диоды Ганна на основе варизонного Al_{x(z)}Ga_{1-x(z)}As с различными катодными контактами* / И. П. Стороженко // Радиофизика и радиоастрономия. – 2006. – 11, № 2. – С. 186–197.
15. *Стороженко И. П. Варизонные InP_{1-x(z)}As_{x(z)} диоды Ганна с различными катодными контактами* / И. П. Стороженко // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – X., 2006. – 11, № 3. – С. 421–429.
16. *Storozhenko I. P. Graded-gap AlInN Gunn Diodes* / I. P. Storozhenko, A. N. Yaroshenko, M. V. Kaydash // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics. – 2012. – 15, N 2. – P. 176–180.

Рукопись поступила 23.05.2016.

I. P. Storozhenko, M. V. Kaydash

AlGaInAs GRADED-DAP GUNN DIODE

Gunn diodes are the active elements for generating electromagnetic waves in the millimeter range. An urgent task of today is to increase their cutoff frequency and output power. One of the ways to do it is to use graded-gap semiconductors. The paper presents the results of numerical experiments on the electromagnetic waves generation with the help of Gunn diodes based on graded-gap AlGaAs-GaAs-InGaAs compound. The numerical simulation has been conducted by means of the temperature model of intervalley transfer of electrons in the graded-gap semiconductors. The length of the diode active area was 2.5 μm with the concentration of ionized impurities therein 10¹⁶ cm⁻³. We have shown that the AlGaAs-GaAs-InGaAs-diodes can be used as active elements for generating electromagnetic oscillations in the millimeter wave range. In GaAs-In_xGa_{1-x}As- and Al_{0,2}Ga_{0,8}As-GaAs-In_xGa_{1-x}As-diodes the output power increases almost linear with InAs percentage in the range from 0 to 50 %. As it turned out GaAs-Ga_{0,5}In_{0,5}As-diode has the greatest value of the output power $P = 12,2 \text{ kW} \times \text{cm}^{-2}$ at frequency of $f = 45 \text{ GHz}$ and efficiency of $\eta = 10,5 \%$. Al_{0,2}Ga_{0,8}As-GaAs-In_{0,5}Ga_{0,5}As-diode has the greatest generation efficiency of $\eta = 11,3\%$ at $P = 10,6 \text{ kW} \times \text{cm}^{-2}$ and $f = 41 \text{ GHz}$ output power and generation efficiency of Al_{0,2}Ga_{0,8}As-GaAs-diode in 2 to 3 times lower than the parameters of mentioned above diodes. Our findings extend the knowledge of the physical processes of carrier transport in complex semiconductor structures and can be used for technological development of new high-performance devices based on A₃B₅ semiconductors.

Key words: Gunn diode, intervalley electron transfer, graded-gap semiconductor, output power, domain, generation efficiency, temperature model, terahertz electronics.

И. П. Стороженко, М. В. Кайдаш

ВАРИЗОННИЙ AlGaInAs-ДИОД ГАННА

Диоды Ганна – це активні елементи для генерації електромагнітних хвиль у міліметровому діапазоні. Підвищення їх вихідної потужності та граничної частоти є актуальним завданням. Одним із способів збільшити вказані характеристики діодів Ганна є використання варизонних напівпровідників. У статті подано результати числових експериментів з генерації електромагнітних коливань за допомогою діодів Ганна на основі варизонної сполуки AlGaAs-GaAs-InGaAs. Дослідження проведено за допомогою температурної моделі міждолинного перенесення електронів у варизонних напівпровідниках. Довжина активної області діода становила 2,5 мкм з концентрацією іонізованих домішок у ній 10¹⁶ см⁻³. Показано, що AlGaAs-GaAs-InGaAs-діоди можуть бути використані в якості активних елементів для генерації електромагнітних коливань міліметрового діапазону. У GaAs-In_xGa_{1-x}As- і Al_{0,2}Ga_{0,8}As-GaAs-In_xGa_{1-x}As-діодах вихідна потужність майже лінійно зростає з відсотковою часткою InAs в інтервалі від 0 до 50 %. Найбільше значення вихідної потужності $P = 12,2 \text{ кВт} \times \text{см}^{-2}$ на частоті $f = 45 \text{ ГГц}$ і ефективністю $\eta = 10,5 \%$ має GaAs-Ga_{0,5}In_{0,5}As-діод. Найбільшу ефективність генерації $\eta = 11,3 \%$ при $P = 10,6 \text{ кВт} \times \text{см}^{-2}$ і $f = 41 \text{ ГГц}$ має Al_{0,2}Ga_{0,8}As-GaAs-In_{0,5}Ga_{0,5}As-діод; Al_{0,2}Ga_{0,8}As-GaAs-діод за вихідною потужністю і ефективністю генерації у 2–3 рази поступається названим вище. Результати дослідження розширюють знання про фізичні процеси перенесення носіїв заряду в складних напівпровідникових структурах і можуть бути використані для технологічних розробок нових швидкодіючих приладів на основі напівпровідників A₃B₅.

Ключові слова: діод Ганна, міждолинне перенесення електронів, варизонний напівпровідник, вихідна потужність, домен, ефективність генерації, температурна модель, терагерцова електроніка.