

УДК 621.382.2

## ВАРИЗОННЫЕ InGaP-InPAs ДИОДЫ ГАННА

И. П. Стороженко<sup>1</sup>, Ю. В. Аркуша<sup>2</sup><sup>1</sup> Національний фармацевтичний університет, ул. Пушкінська, 53, Харків, 610027, Україна<sup>2</sup> Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, пл. Свободи, 4, Харків, 61022, Україна  
prof.igor.storozhenko@gmail.com

Поступила в редакцію 30 мая 2018 г.

В статье представлены результаты числовых экспериментов по эффективной генерации электромагнитных колебаний в диапазоне от 18 до 80 ГГц с помощью варизонных  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P-InP}_y\text{As}_{1-y}$  диодов Ганна. Приводятся зависимости эффективности генерации и выходной мощности от частоты для разных распределений GaP и InAs в  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P-InP}_y\text{As}_{1-y}$ -диоде. Представлен анализ полученных результатов в сравнении с аналогичными  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As-GaAs-Ga}_{1-y}\text{In}_y\text{As}$ -диодами. Максимальная мощность  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P-InP}_y\text{As}_{1-y}$ -диола составляет  $11,3 \text{ кВт}\cdot\text{см}^{-2}$  на частоте 40 ГГц с эффективностью 10,2 % при  $x = 0,6$  и  $y = 0,6$ . Для сравнения  $\text{InP-InP}_{0,4}\text{As}_{0,6}$ -диод имеет мощность  $9 \text{ кВт}\cdot\text{см}^{-2}$  на частоте 48 ГГц с эффективностью 5 %,  $\text{In}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{P-InP}$ -диод –  $7,6 \text{ кВт}\cdot\text{см}^{-2}$  на частоте 43 ГГц с эффективностью 9 % и  $\text{InP}$ -диод –  $1,9 \text{ кВт}\cdot\text{см}^{-2}$  на частоте 69 ГГц с эффективностью 1,3 %.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** диод Ганна, междолинный перенос электронов, варизонный полупроводник, выходная мощность, домен, эффективность генерации, температурная модель, терагерцовая электроника, InGaPAs

В статті представлені результати числових експериментів по ефективній генерації електромагнітних коливань в діапазоні від 18 до 80 ГГц за допомогою варизонних  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P-InP}_y\text{As}_{1-y}$  діодів Ганна. Наводяться залежності ефективності генерації і вихідної потужності від частоти для різних розподілів GaP і InAs в  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P-InP}_y\text{As}_{1-y}$ -діоді. Представлено аналіз отриманих результатів в порівнянні з аналогічними  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As/GaAs/Ga}_{1-y}\text{In}_y\text{As}$ -діодами. Максимальна потужність  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P-InP}_y\text{As}_{1-y}$ -діода становить  $11,3 \text{ кВт}\cdot\text{см}^{-2}$  на частоті 40 ГГц з ефективністю 10,2% при  $x = 0,6$  та  $y = 0,6$ . Для порівняння  $\text{InP-InP}_{0,4}\text{As}_{0,6}$ -діод має потужність  $9 \text{ кВт}\cdot\text{см}^{-2}$  на частоті 48 ГГц з ефективністю 5%,  $\text{In}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{P-InP}$ -діод –  $7,6 \text{ кВт}\cdot\text{см}^{-2}$  на частоті 43 ГГц з ефективністю 9 % та  $\text{InP}$ -діод –  $1,9 \text{ кВт}\cdot\text{см}^{-2}$  на частоті 69 ГГц з ефективністю 1,3 %.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** діод Ганна, міждолинний перенос електронів, варизонний напівпровідник, вихідна потужність, домен, ефективність генерації, температурна модель, терагерцова електроніка, InGaPAs

The paper presents the results of the numerical experiments on efficient generation of electromagnetic waves in the range from 18 to 80 GHz using graded  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P-InP}_y\text{As}_{1-y}$  Gunn diodes. Our findings are the dependences generation efficiency and output power on frequency for different distributions of GaP and InAs in  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P-InP}_y\text{As}_{1-y}$ . We have compared obtained results with similar  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As-GaAs-Ga}_{1-y}\text{In}_y\text{As}$ -diodes. The maximal obtained power in  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P-InP}_y\text{As}_{1-y}$ -diode is  $11.3 \text{ kW}\cdot\text{cm}^{-2}$  at a frequency of 40 GHz with an efficiency of 10.2 % at  $x = 0.6$  and  $y = 0.6$ . For comparison the  $\text{InP-InP}_{0,4}\text{As}_{0,6}$  diode has  $9 \text{ kW}\cdot\text{cm}^{-2}$  output power at a frequency of of 48 GHz with an efficiency of 5 %;  $\text{In}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{P-InP}$  diode has  $7.6 \text{ kW}\cdot\text{cm}^{-2}$  output power at a frequency of 43 GHz with an efficiency of 9 % and  $\text{InP}$  diode has  $1.9 \text{ kW}\cdot\text{cm}^{-2}$  output power at a frequency of 69 GHz with an efficiency of 1.3 %.

**KEY WORDS:** Gunn diode, intervalley electron transfer, graded semiconductor, output power, domain, generation efficiency, the temperature model, terahertz electronics, InGaPAs.

## ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на огромные достижения в технологии изготовления транзисторов ТГц-диапазона [1] остаются востребованными традиционные активные элементы мм- и субмм- диапазонов, такие как диоды Ганна, лавинно-пролетные диоды и резонансно-туннельные диоды.

Диоды Ганна по-прежнему находят широкое применение в качестве активных элементов для генерации и усиления в мм-диапазоне длин волн. Сочетание низкого уровня фазового шума с умеренной мощностью и относительно небольшой стоимостью делают их востребованными приборами. В основе работы диода Ганна лежит эффект междолинного переноса электронов (МПЭ). Рабочая частота приборов, работающих на этом эффекте, ограничена сверху целым рядом физических проблем. К ним относят конечность времени перехода электронов из 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 [2] и варизонные полупроводники (иногда гетеропереход) в катодном контакте [3, 4]. В работах [3 – 11] показано, что диоды Ганна на основе варизонных полупроводников имеют более высокие значения эффективности генерации (КПД) и выходной мощности. Причиной такого повышения долгое время считалась инжекция горячих электронов через гетеропереход в активную область [4, 5, 9, 10]. Однако, как было показано в [7], энергия таких электронов в активной области диода быстро падает до энергии кристаллической решетки. Более правдоподобной причиной является локальное понижение энергетического зазора между

неэквивалентными долинами в области катодного контакта [11]. Оптимальная величина энергетического зазора между долинами в катодном контакте при температуре кристаллической решетки 300 К, составляет 0,1...0,3 эВ. Например, это соответствует Al<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>As-GaAs-диоду при x = 0,15 ÷ 0,3. Наиболее используемыми варизонными соединениями для диодов Ганна на сегодняшний день являются AlGaAs-GaAs [4, 5, 7, 9, 10] и GaAs-InGaAs [2, 6]. Однако они, по-видимому, не являются оптимальными по следующим причинам. В некоторых тройных варизонных соединениях, таких как GaAs-InGaAs и InP-InPAs, оптимума энергетического зазора добиться не удастся из-за нижней его границы в GaAs – 0,36 эВ и в InP – 0,6 эВ. Вызывает интерес случай, позволяющий уменьшать энергетический зазор между долинами вплоть до тепловой энергии электронов. Такую возможность дают, например AlGaAs, GaPAs и InGaP тройные полупроводники. С другой стороны, в диодах Ганна на основе Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As-GaAs при оптимальном содержании AlAs в катоде 15...25 %, возможно, не достигнуто оптимальное верхнее значение энергетического зазора между долинами, так как оно ограничено сверху значением для GaAs. К этому следует добавить, что по целому ряду электрофизических свойств InGaAs и InPAs более предпочтительны, чем GaAs. Более сложные полупроводниковые соединения AlGaAs-GaAs-InGaAs и InGaPAs позволяют преодолеть перечисленные выше ограничения. Числовые эксперименты с AlGaAs-GaAs-InGaAs диодами Ганна частично подтвердили выдвинутую гипотезу. Было показано, что Al<sub>0,2</sub>Ga<sub>0,8</sub>As-GaAs-Ga<sub>0,5</sub>In<sub>0,5</sub>As диод с длиной активной области 2,5 мкм имеет выходную мощность в три, а эффективность генерации – почти в два раза больше, чем соответствующие значения в аналогичных Al<sub>0,2</sub>Ga<sub>0,8</sub>As-GaAs и GaAs-Ga<sub>0,5</sub>In<sub>0,5</sub>As-диодах. Следует ожидать, что использование GaPAs-InGaAs и InGaP-InPAs в диодах Ганна приведет к аналогичному эффекту. Цель статьи – изучить особенности работы диодов Ганна на основе варизонного InGaP-InPAs, найти оптимальное распределение бинарных компонент и оценить выходные характеристики.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

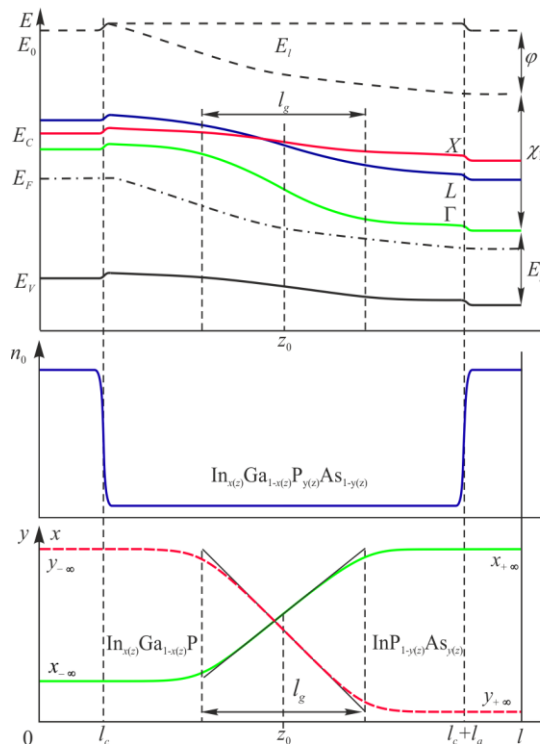


Рис. 1. Схемы зонной диаграммы, уровня легирования и распределения x и y компонент в In<sub>x(z)</sub>Ga<sub>1-x(z)</sub>P-InP<sub>y(z)</sub>As<sub>1-y(z)</sub>

Моделируется диод с профилем легирования n<sup>+</sup>-n-n<sup>+</sup> на основе In<sub>x(z)</sub>Ga<sub>1-x(z)</sub>P<sub>y(z)</sub>As<sub>1-y(z)</sub>. Длина активной области равна 2,5 мкм, концентрация ионизированных доноров в ней 10<sup>16</sup> см<sup>-3</sup>. Длина катода и анода – 0,75 мкм. Концентрация ионизированных доноров в них составила 5·10<sup>16</sup> см<sup>-3</sup>. Схема зоны проводимости, распределения примесей и бинарных компонентов представлена на рис. 1. Уровни постоянного энергетического зазора между Г-L и Г-X долинами в In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>P<sub>y</sub>As<sub>1-y</sub> представлены на рис. 2. Здесь энергетические минимумы i-долины в зависимости от x и y заданы поверхностью второго порядка:

$$E_{ixy} = E_{ix1}y + E_{ix0}(1-y) + \frac{0,3y(1-y)}{\sqrt{(E_{ix0} + E_{ix1})/2}}, \quad (1)$$

где  $E_{ix0} = E_{i10}x + E_{i00}(1-x) + \frac{0,3x(1-x)}{\sqrt{(E_{i00} + E_{i10})/2}}$  и

$$E_{ix1} = E_{i01}x + E_{i11}(1-x) + \frac{0,3x(1-x)}{\sqrt{(E_{i01} + E_{i11})/2}}.$$

Энергетический зазор между Г и X долинами –  $\Delta_{GX}(x, y) = E_X(x, y) - E_G(x, y)$  и между Г и L –  $\Delta_{GL}(x, y) = E_L(x, y) - E_G(x, y)$ .

В In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>P при x = 0 ÷ 0,38 минимальной по энергии является X-долина, то есть при x = 0,38  $\Delta_{GX} = 0$ . В этом случае МПЭ не приводит к отрицательной дифференциальной проводимости в полупроводнике. Это определяет одну из границ x = 0,39 состава полупроводника. Вторую границу задает ионизация зона-зона в InP<sub>y</sub>As<sub>1-y</sub>. Эта ионизация является отрицательным явлением для приборов с МПЭ. Она становится значительной, если ширина запрещенной зоны равна или меньше минимального энергетического зазора между долинами  $E_G = \Delta_{GL}$ . В InP<sub>y</sub>As<sub>1-y</sub> это происходит при y = 0,51. Поэтому в своих исследованиях мы ограничились областью треугольника ABC на рис 2. Здесь стрелками показаны возможные направления изменения состава

полупроводника от катода к аноду. То есть рассматриваются  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}-\text{InP}_y\text{As}_{1-y}$ -диоды. Содержание In- и P-компонент в  $\text{In}_{x(z)}\text{Ga}_{1-x(z)}\text{P}_{y(z)}\text{As}_{1-y(z)}$  задаются однопотными S-зависимостями:

$$x(z) = (x_{-\infty} - x_{+\infty}) \left[ 1 + \exp\left(\frac{4(z - z_0)}{l_g}\right) \right]^{-1} + x_{+\infty} \quad \text{и} \quad y(z) = (y_{-\infty} - y_{+\infty}) \left[ 1 + \exp\left(\frac{4(z - z_0)}{l_g}\right) \right]^{-1} + y_{+\infty}, \quad (2)$$

где  $x_{-\infty}$  и  $x_{+\infty}$  – содержание In-компоненты в катоде ( $z \rightarrow -\infty$ ) и в аноде ( $z \rightarrow +\infty$ );  $y_{-\infty}$  и  $y_{+\infty}$  – содержание P-компоненты, соответственно в катоде ( $z \rightarrow -\infty$ ) и аноде ( $z \rightarrow +\infty$ );  $l_g$  – длина переходного (варизонного) слоя одинаковая для x- и y-компонент;  $z_0$  – координата центра переходного слоя;  $z$  – координата. В данном исследовании  $l_g = 2,5$  мкм – совпадает с длиной активной области диода, так как при этом следует ожидать наибольшую эффективность прибора [6],  $z_0 = 2$  мкм – центр активной зоны,  $0,39 \leq x_{-\infty} \leq 1$ ,  $x_{+\infty} = 1$ ,  $y_{-\infty} = 1$ ,  $0,6 \leq y_{+\infty} \leq 1$ .

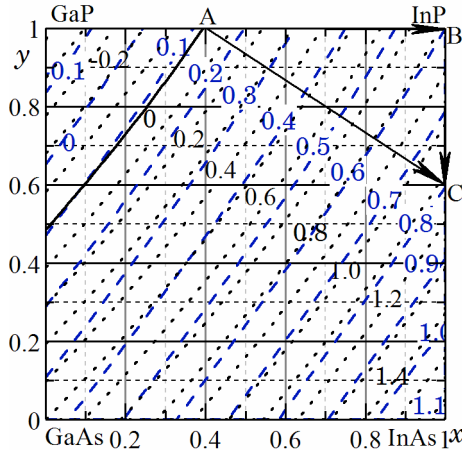


Рис. 2. Уровни постоянного энергетического зазора в  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}_y\text{As}_{1-y}$  между  $\Gamma$ - и L-долинами  $\Delta_{\Gamma L}$  (длинная пунктирная линия) и между  $\Gamma$ - и X-долинами  $\Delta_{\Gamma X}$  (короткая пунктирная линия). Непрерывной линией обозначено  $\Delta_{\Gamma X} = 0$ .

В исследовании ставится задача с помощью численных экспериментов получить оптимизированные по напряжению питания зависимости выходной мощности и эффективности генерации диодов от частоты для различных значений предельного содержания In- и P-компонент. Предельное содержание In- и P-компонент изменялось с шагом 0,1. Температура кристаллической решетки  $T_0$  считалась неизменной, равной 300 К.

#### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРИБОРА

Исследования проводились с помощью трехуровневой модели МПЭ в варизонных полупроводниках, основанной на решении кинетического уравнения Больцмана в предположении о смещенном максвелловском

распределении электронов [11]. Модель представляет собой систему уравнений, состоящую из уравнений непрерывности (3), плотности тока (4) и баланса энергии для каждой из  $\Gamma$ , L и X неэквивалентных долин зоны проводимости полупроводника (5), а также уравнения Пуассона (6):

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

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

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

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

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;  $\tau_{n,ij}$ ,  $\tau_{E,ij}$  – время релаксации концентрации и энергии электронов при междолинном переходе из  $i$ - в  $j$ -долину;  $\tau_{E,i}$  – время релаксации энергии электронов в  $i$ -долине;  $\chi_i$  – энергия, необходимая для перевода электронов с энергетического минимума  $i$ -й долины до локального уровня вакуума;  $E$  – напряженность электрического поля;  $n_0$  – концентрация ионизированных доноров;  $\varepsilon$  – 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 (3) – (6) решается численным методом («встречная прогонка»). Моделируется ситуация, когда на диод прикладывается синусоидальное напряжение с постоянной составляющей, что соответствует помещению диода в одноконтурный резонатор. Входными данными являются прикладываемое к прибору напряжение  $U_0$ , амплитуда  $U_1$  и частота  $f$  его колебаний, параметры бинарных полупроводников. Выходные данные – динамические распределения концентрации электронов, их энергии, плотности тока, напряженности электрического поля, зависимость средней плотности тока протекающего в диоде от времени, мощность и эффективность генерации электрических колебаний. Выходные характеристики оптимизировались для разных частот по напряжению смещения и амплитуде первой гармоники.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ АНАЛИЗ

Проанализируем физические процессы, протекающие в  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P-InP}_y\text{As}_{1-y}$ -диодах для трех случаев:  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P-InP}$  ( $y = 1$ ),  $\text{InP-InP}_y\text{As}_{1-y}$  ( $x = 1$ ) и  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P-InP}_{0,4}\text{As}_{0,6}$ -диод ( $y = 0,4$ ).

InP-диод – классический диод Ганна с омическим  $n^+$ - $n$ -катодом. Если к нему приложить напряжение выше порогового значения, то в нем возникают колебания тока, связанные с последовательным возникновением, дрейфом и рассасыванием аккумулирующих слоев. Кинетическая энергия электронов возле катодного контакта недостаточная для их рассеивания в боковые долины зоны проводимости. Необходимая для этого кинетическая энергия накапливается электронами благодаря их дрейфу в электрическом поле при преимущественном упругом рассеивании только ближе к середине активной области. Возникающие колебания тока в диоде отличаются незначительной амплитудой и высокой частотой. Частота колебаний тока в основном определяется средней скоростью дрейфа неустойчивости заряда и длиной области, где она распространяется. Соответственно выходная мощность и эффективность генерации малы при относительно высокой частоте генерации (рис. 3, кривая 1)

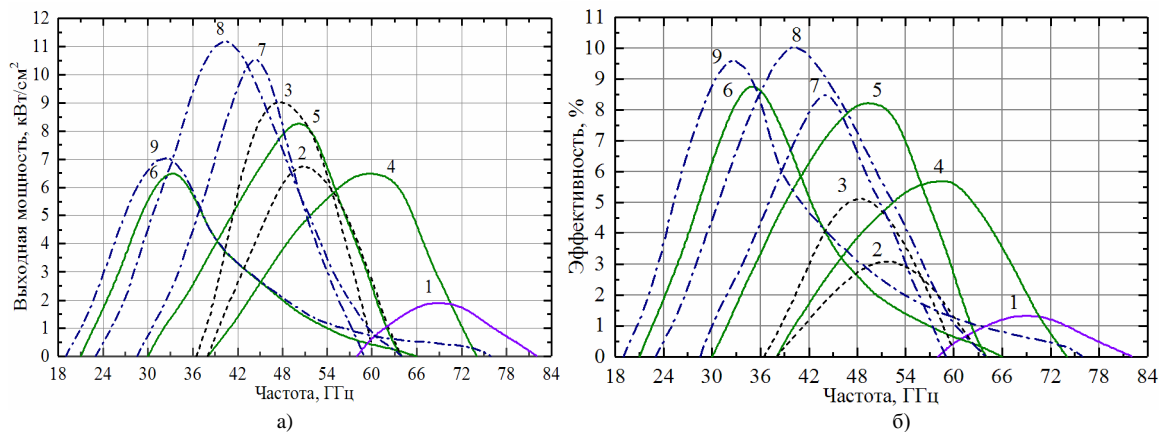


Рис. 3. Графики зависимости выходной мощности (а) и эффективности генерации (б) от частоты разных диодов: 1 – InP; 2 –  $\text{InP-InP}_{0,8}\text{As}_{0,2}$ ; 3 –  $\text{InP-InP}_{0,6}\text{As}_{0,4}$ ; 4 –  $\text{In}_{0,8}\text{Ga}_{0,2}\text{P-InP}$ ; 5 –  $\text{In}_{0,6}\text{Ga}_{0,4}\text{P-InP}$ ; 6 –  $\text{In}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{P-InP}$ ; 7 –  $\text{In}_{0,8}\text{Ga}_{0,2}\text{P-InP}_{0,6}\text{As}_{0,4}$ ; 8 –  $\text{In}_{0,6}\text{Ga}_{0,4}\text{P-InP}_{0,6}\text{As}_{0,4}$ ; 9 –  $\text{In}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{P-InP}_{0,6}\text{As}_{0,4}$

Если увеличить содержание Ga в катоде при неизменном InP в аноде, то процессы, протекающие в диоде, изменятся. Для  $x = 0,85 \dots 1,0$  в  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P-InP}$  формой неустойчивости заряда, возникающей в диоде, остается аккумулирующий слой. Характерной особенностью такой неустойчивости является то, что ее передний фронт не обеднен носителями заряда. Скорость дрейфа слоев несколько выше, чем доменов. Повышение доли Ga в катоде приводит к уменьшению вблизи катодного контакта энергетического зазора между  $\Gamma$ -долиной и боковыми  $L$  и  $X$ -долинами. Это в свою очередь является причиной локального увеличения заселенности боковых долин и понижения подвижности электронов. Область формирования неустойчивости заряда смещается от центра активной области к катоду. Длина «мертвой» зоны сокращается. Уменьшается постоянная составляющая протекающего в диоде тока, увеличивается амплитуда и падает частота колебаний тока. На выходных характеристиках это отражается на уменьшении частоты и увеличении выходной мощности и эффективности генерации (рис. 3, кривые 1, 4, 5 и рис. 4).

Для  $x = 0,39 \dots 0,85$   $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P-InP}$  формой неустойчивости заряда, возникающей в диоде, является домен. Здесь следует отметить, что при уменьшении  $x$  трансформация слоев в домены происходит постепенно. Так, при  $x = 0,83 \dots 0,87$  у катода возникает обогащенный слой, но по мере продвижения к аноду он перестраивается в домен. Причем этот процесс зависит от приложенного напряжения. Поэтому, граничная  $x = 0,85$  носит условный характер как величина, при которой в движущейся неустойчивости заряда передний фронт обеднен носителями заряда при любом рабочем напряжении.

При уменьшении  $x$  концентрация электронов в боковых долинах в катоде увеличивается, что приводит к падению средней подвижности электронов. А неоднородность заполнения долин приводит к возникновению домена у катода даже без внешнего поля [11]. Скорость дрейфа домена при росте  $x$ -компоненты падает. Все это отражается на колебаниях тока в диоде. Частота и постоянная составляющая колебаний тока уменьшаются. Амплитуда колебаний тока имеет максимум при  $x = 0,5$ . Этому значению соответствует максимум мощности (рис. 4). Для  $x = 0,39 \dots 0,5$  влияние неравномерного энергетического зазора между долинами становится очень сильным. Амплитуда колебаний тока резко сокращается. Диод начинает терять активные свойства. Мощность и частота падают при относительно постоянной

эффективности генерации (рис. 3, кривая 6 и рис. 4). Однако при используемой в расчетах длине варизонного слоя, статичный домен в диоде не возникает.

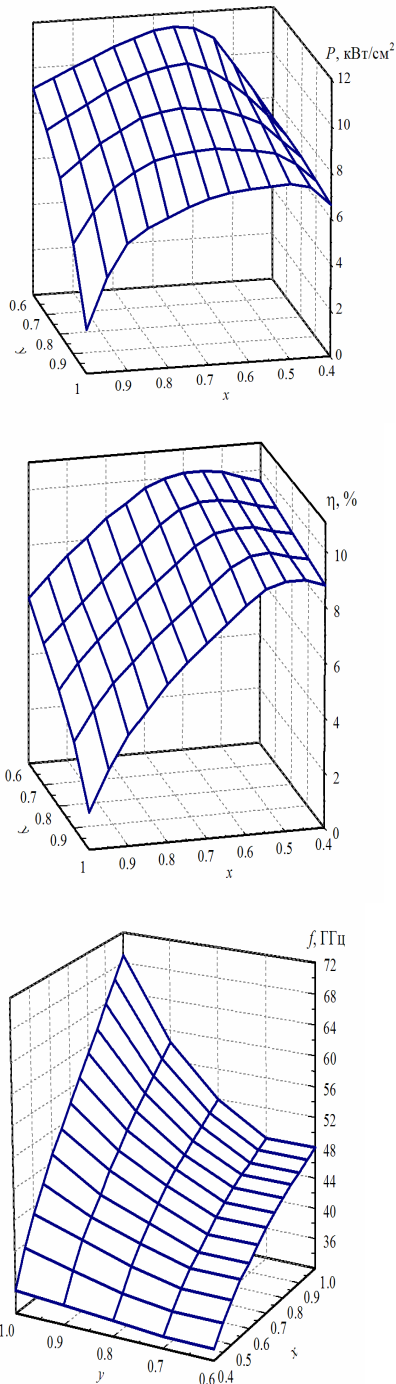


Рис. 4. Поверхности максимальных значений мощности  $P$ , эффективности  $\eta$  и оптимальной частоты  $f$  генерации  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P-InP}_y\text{As}_{1-y}$ -диодов

В  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P-InP}_y\text{As}_{1-y}$ -диодах при  $x = 0,50 \dots 0,61$  верхняя граница частотного диапазона увеличивается (рис. 3, кривые 6, 9) благодаря сокращению области дрейфа домена. Этот эффект подробно описан в [11].

Рассмотрим  $\text{InP-InP}_y\text{As}_{1-y}$ -диод (рис. 3, кривые 1 – 3). В таком диоде минимальный энергетический зазор между долинами  $\Delta_{\Gamma L}(z)$  – возрастающая функция координаты. Увеличение содержания InAs в аноде увеличивает значение градиента энергетического зазора, но не изменяет его минимальное значение в катоде. Заселенность электронами боковых долин в катоде пренебрежимо мала при любом значении  $y$ -компоненты. То есть, в катодном контакте локальное понижение подвижности носителей заряда неизменно и незначительно. Причиной колебаний тока в диоде является дрейф аккумулирующих слоев при любом содержании InAs. Вместе с тем мощность и эффективность генерации растут, а частота колебаний падает при увеличении содержания InAs в аноде.

Основной причиной повышения мощности является градиент энергетического зазора  $\Delta_{\Gamma L}$  в активной области. Падение частоты генерации связано с уменьшением средней дрейфовой скорости электронов в  $\text{InP}_y\text{As}_{1-y}$  при увеличении содержания InAs. Показано, что в  $\text{InP}_{0,6}\text{As}_{0,4}$  диодах Ганна частота генерации колебаний тока меньше, чем в GaAs и InP-диодах. Оценки проведенные в нашем исследовании показывают, что частота собственных колебаний тока в  $\text{InP-InP}_{0,6}\text{As}_{0,4}$ -диодов при любом напряжении питания на 2...4 ГГц больше, чем в  $\text{InP}_{0,6}\text{As}_{0,4}$ -диодах.

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P-InP}_{0,4}\text{As}_{0,6}$ -диод по процессам, протекающих в нем и выходным характеристикам (рис. 3, кривые 7 – 9), мало отличаются от  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P-InP}$ -диода (рис. 3, кривые 4 – 6). В  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P-InP}_{0,4}\text{As}_{0,6}$ -диодах немного больше пиковые значения выходной мощности и эффективности, а соответствующие частоты генерации меньше, чем в  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P-InP}$ -диодах. Максимум выходной мощности  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P-InP}_{0,4}\text{As}_{0,6}$ -диодов возникает при  $x = 0,5 \dots 0,7$  (рис. 4). Этому интервалу  $x$ -компоненты соответствует минимальный энергетический зазор в катоде от 0,18 до 0,38 эВ.

В целом для  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P-InP}_y\text{As}_{1-y}$ -диодов характерно сильное влияние на выходную мощность, эффективность и частоту генерации состава соединения  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$  в катоде и относительно слабое влияние соединения в аноде  $\text{InP}_y\text{As}_{1-y}$  (рис. 4). Абсолютный максимум выходной мощности  $11,3 \text{ кВт}\cdot\text{см}^{-2}$  с КПД = 10,2 % на частоте 40 ГГц достигается в  $\text{In}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{P-InP}_{0,4}\text{As}_{0,6}$ -диоде. Это практически совпадает с характеристиками  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As-GaAs-Ga}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{As}$  диодов при  $x = 0,15 \dots 0,20$  ( $\Delta_{\Gamma L} = 0,23 \dots 0,18$  эВ).  $\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{-GaAs-Ga}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{As}$ -диод имеет на частоте  $f = 41$  ГГц выходную мощность  $P = 10,6 \text{ кВт}\cdot\text{см}^{-2}$  с эффективностью генерации  $\eta = 11,3$  %.

## ВЫВОДЫ

Наше исследование показало возможность эффективной генерации электромагнитных волн с помощью диодов Ганна на основе варизонного соединения  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}-\text{InP}_y\text{As}_{1-y}$ . Такой варизонный полупроводник ранее не исследовался как материал для приборов с МПЭ. В  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}-\text{InP}_y\text{As}_{1-y}$ -диодах при длинах активной и варизонной областей 2,5 мкм реализуется доменный режим неустойчивости тока в широком интервале значений  $x$ - и  $y$ -компонент. Наибольшее влияние на процессы, протекающие в диоде и его выходные характеристики, оказывает состав соединения в катоде  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ . Увеличение в нем доли GaP от 0 до 30 % влечет за собой интенсивное падение частоты, увеличение выходной мощности и эффективности генерации. В интервале от 30 до 60 % влияние  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ -катода ослабевает. Значение компоненты  $x = 0,5 \dots 0,7$  следует считать оптимальным по выходной мощности. Состав  $\text{InP}_y\text{As}_{1-y}$ -анода меньше влияет на выходные характеристики, чем  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ -катод. Рост доли InAs в аноде увеличивает выходную мощность, эффективность и уменьшает частоту генерации при любом значении  $x$ -компоненты. Причем влияние  $\text{InP}_y\text{As}_{1-y}$  ослабевает при росте  $x$  и для  $x = 0,4 \dots 0,7$  почти отсутствует. Абсолютный максимум выходной мощности 11,3 кВт·см<sup>-2</sup> с КПД = 10,2 % на частоте 40 ГГц достигается в  $\text{In}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{P}-\text{InP}_{0,4}\text{As}_{0,6}$ -диоде. По мощности и эффективности генерации это более чем в пять раз больше, чем в InP-диоде ( $P = 1,9$  кВт·см<sup>-2</sup>,  $f = 69$  ГГц и  $\eta = 1,3$  %). Для сравнения InP-InP<sub>0,4</sub>As<sub>0,6</sub>-диод генерирует мощность 9 кВт·см<sup>-2</sup> на частоте 48 ГГц с эффективностью 5 % и In<sub>0,5</sub>Ga<sub>0,5</sub>P-InP-диод – 7,6 кВт·см<sup>-2</sup> на частоте 43 ГГц с эффективностью 9 %.

$\text{In}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{P}-\text{InP}_{0,4}\text{As}_{0,6}$ -диод по физическим процессам, протекающим в нем и выходным характеристикам, почти совпадает с аналогичным  $\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}-\text{GaAs}-\text{Ga}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{As}$  диодом. Для обоих диодов характерно близкое значение минимального энергетического зазора между неэквивалентными долинами зоны проводимости в катоде (0,2...0,3 эВ для  $T_0 = 300$  К). При повышении температуры кристаллической решетки  $T_0$  следует ожидать рост оптимального значения энергетического зазора.

К недостаткам исследованного  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}-\text{InP}_y\text{As}_{1-y}$ -диола следует отнести уменьшение частоты генерации по сравнению с InP-диодами из-за низкой подвижности электронов в  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ . Этот недостаток можно частично преодолеть, если сместить варизонную область к катоду и уменьшить ее длину. Другим способом увеличения частоты является генерация гармоник. Проверка данных предположений требует дополнительных исследований.

Наша гипотеза о перспективности  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}-\text{InP}_y\text{As}_{1-y}$ -диодов Ганна подтвердилась. Варьируя состав полупроводника в катоде и аноде можно получить большое разнообразие диодов Ганна, отличающихся по выходным характеристикам, в том числе и диод с максимальной мощностью.

Результаты исследования могут быть использованы для технологических разработок новых СВЧ-приборов, таких как транзисторы, диоды Ганна, умножители частоты и генераторы шума.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стороженко И. П., Майборода И. М., Бабенко В. П., Кайдаш М. В. Огляд досягнень в терагерцових комунікаційних системах // Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України. – 2016, № 1. – С. 45 – 48.
2. Khalid A., Li C., Papageorgiou V. et al. In<sub>0,53</sub>Ga<sub>0,47</sub>As planar Gunn diodes operating at a fundamental frequency of 164 GHz // IEEE Electron Device Letters, –2013. – 34, № 1. – P. 39 – 41.
3. Maricar M. I. Experimentally estimated dead space for GaAs and InP based planar Gunn diodes. / M. I. Maricar, A. Khalid et al // Semiconductor Science and Technology. – 2015. – 30, № 1. 012001.
4. Couch N. R. 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, – № 3 – 4. – Chapter 6. – P. 613 – 616.
5. Forster A. Hot electron injector Gunn diode for advanced driver assistance systems / A. Forster , M. I. Lepsa, D. Freundt, J. Stock S. Montanari // Applied Physics A: Materials Science & Processing. – 2007. – 87. – P. 545-558.
6. Storozhenko I. P. Frequency Characteristics of diodes with intervalley electron transfer that based on variband  $\text{In}_{x(z)}\text{Ga}_{1-x(z)}\text{As}$  with various cathode contacts // Journal of Communications Technology and Electronics. - 2007. - V. 52, №. 10. - P. 1253 – 1259.
7. Стороженко И.П., Аркуша Ю.В., Прохоров Э.Д. Энергетические и частотные характеристики GaAs диодов Ганна с  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  и  $\text{GaP}_x\text{As}_{1-x}$  катодами // Радиофизика и электроника. - 2007. – Т. 12, № 3. –С. 579 – 583.
8. Стороженко И. П., Ярошенко А. Н., Аркуша Ю. В. Диоды Ганна на основе варизонных InBN и GaBN // Радиофизика и электроника. – 2014. – Т. 5 (19), № 2 . – С. 77 – 81.
9. Harry M. A., Kelly M. J., Dunn G. M. et al. Carr The free-space oscillation of heterojunctions GaAs/AlGaAs Gunn diodes as a design guide // Semicond. Sci. Technol. – 1999. – Vol. 14. – P. 19-20.

10. Sporer H. Couch N. R. Advances in hot electron injector Gunn diodes // GEC Journal of Reseach. – 1989. – Vol. 7, № 1. – P. 34–35.
11. Стороженко И.П. Особенности возникновения и дрейфа волн объёмного заряда в приборах с междолинным переносом электронов на основе варизонного  $\text{GaP}_{x(z)}\text{As}_{1-x(z)}$  // Радиофизика и электроника. – 2007. – Т. 12, № 1. – С. 243 – 249.