

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ GaAs ДИОДОВ ГАННА С $Al_xGa_{1-x}As$ И $GaP_xAs_{1-x}$ КАТОДАМИ

И. П. Стороженко, Ю. В. Аркуша, Э. Д. Прохоров

*Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина,  
4, пл. Свободы, Харьков, 61077, Украина  
E-mail: storozhenko\_igor@mail.ru*

С помощью двухуровневой модели междолинного переноса электронов (МПЭ) в полупроводниках исследована работа GaAs диодов Ганна с  $Al_xGa_{1-x}As$  и  $GaP_xAs_{1-x}$  катодами. Показаны основные закономерности и особенности работы приборов с МПЭ, у которых катодным контактом является изотипный, прямосмещенный гетеропереход. Вычислены энергетические и частотные характеристики. Определены предельные рабочие частоты. Ил. 5. Библиогр.: 8 назв.

**Ключевые слова:** междолинный перенос, прямосмещенный гетерокатод, дипольный домен, эффективность генерации.

Одним из способов увеличения предельных частот приборов с МПЭ (ПМПЭ) является использование изотипного гетероперехода на катодном контакте. В зависимости от свойств гетеропереходной пары полупроводников в активной области диода возможно возникновение обогащенного (прямо смещенный контакт) или обедненного электронами слоя (обратно смещенный контакт). Каждый из этих вариантов приводит к своим особенностям возникновения волн пространственного заряда в активной области прибора у катодного контакта, и как следствие, к различию в выходных характеристиках. Нами исследуется работа ПМПЭ на основе GaAs с прямосмещенным гетеропереходом на катодном контакте.

Идея использования такого гетерокатода заключается в предположении, что инжекция горячих электронов через гетеропереход приведет к сокращению области начального разогрева электронов у катодного контакта, повышению выходной мощности, коэффициента преобразования мощности источника питания в высокочастотную мощность (КПД, эффективность работы) и придельной рабочей частоты. Предполагается, что энергия инжектируемых электронов должна равняться энергетическому разрыву зоны проводимости [1, 2].

По отдельным одиночным исследованиям было определено, что применение такого гетероперехода в качестве катодного контакта в целом улучшает высокочастотные свойства ПМПЭ [2, 3]. Вместе с тем в публикациях существует неоднозначность трактовки физических явлений, лежащих в основе улучшения высокочастотных свойств ПМПЭ [2-4].

Все исследования эффекта МПЭ и ПМПЭ как теоретические, так и экспериментальные были проделаны только для одной  $Al_xGa_{1-x}As$ -GaAs гетеропереходной пары. В качестве катодного контакта использовался  $Al_xGa_{1-x}As$  с различным уров-

нем легирования. Обобщающих исследований в этом направлении не проводилось. Выбор гетеропереходной пары к GaAs основывается на том, что полупроводник в катоде должен иметь наименьший по энергии  $\Gamma$ -минимум зоны проводимости по сравнению с  $L$ - и  $X$ -минимумами. Энергетический зазор между  $\Gamma$ -минимумом и близлежащими  $L$ - и  $X$ -минимумами не должен быть меньше  $\approx 0,1$  эВ и больше ширины запрещенной зоны. Рассогласование кристаллических решеток не должно превышать 7-15%. Разрыв зоны проводимости должен быть близким к энергетическому зазору между  $\Gamma$ -минимумом и ближайшей к нему боковой долиной [2]. Анализ гетеропереходных пар полупроводников показал, что всем перечисленным условиям может удовлетворять  $Al_xGa_{1-x}As$ -GaAs и  $GaP_xAs_{1-x}$ -GaAs.

**1. Методика исследования.** Энергетическая диаграмма исследуемого диода представлена на рис. 1. Катодом  $n$ : GaAs-активной области является слой  $n$ :  $Al_xGa_{1-x}As$  или  $n$ :  $GaP_xAs_{1-x}$ . Концентрация ионизированных доноров  $n_{0K}$  и процентное содержание компонент  $x$  в катоде варьировалось. Используемые в вычислениях электрофизические параметры тройных полупроводников задавались линейной зависимостью параметров от процентного содержания компоненты GaP или AlAs ( $x$ ) в соответствующем соединении. Параметры GaAs, GaP и AlAs взяты из работы [5]. Так энергетический зазор между  $\Gamma$ -долиной и энергетически ближайшей к ней  $L$ -долиной для  $GaP_xAs_{1-x}$  задается выражением  $\Delta = 0,36(1-x) - 0,21x$  эВ, а для  $Al_xGa_{1-x}As$   $\Delta = 0,36(1-x) - 0,5x$  эВ. Энергия электронного сродства  $\chi$  в GaAs - 4,07 эВ, GaP - 3,24 эВ и AlAs - 2,97 эВ. Концентрация ионизированных доноров в активной области  $n_0$  задавалось соотношением  $n_0 l_a = 2,5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ , где  $l_a$  - длина активной области.

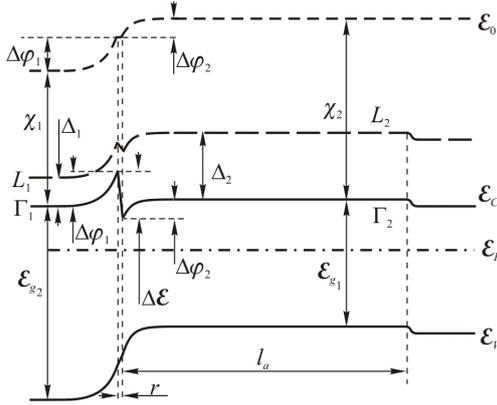


Рис. 1 Диаграмма энергетических зон диода с изотипным прямосмещенным гетерокатодом:  $E_0$  - уровень вакуума;  $E_C$  - дно зоны проводимости (энергетический минимум  $\Gamma$ -долины);  $E_F$  - энергетический уровень Ферми;  $E_V$  - потолок валентной зоны;  $E_g$  - ширина запрещенной зоны;  $\Gamma$  - энергетический минимум  $\Gamma$ -долины;  $L$  - энергетический минимум  $L$ -долины;  $\Delta$  - энергетический зазор между минимумами  $\Gamma$ - и  $L$ -долинами;  $\chi$  - энергия электронного сродства;  $\Delta\phi$  - изгиб зоны проводимости;  $\Delta E$  - энергетический барьер зоны проводимости;  $r$  - длина переходной области между слоями химически однородных полупроводников;  $l_a$  - длина активной области; 1 -  $Al_xGa_{1-x}As$  или  $GaP_xAs_{1-x}$ ; 2 - GaAs

Вычисления велись в предположении о растянутом гетеропереходе. Между слоями химически однородных полупроводников существует переходная область длиной  $r < 0,07$  мкм [2]. Зона проводимости и валентная зона искривляются аналогично химически резкому гетеропереходу, но не имеют точек разрыва. Отсутствие точек разрыва облегчает решение системы уравнений двухуровневой модели МПЭ [6], которая используется в исследовании. Модель включает в себя уравнения непрерывности (1), баланса энергии (2), плотности тока (3) для  $\Gamma$ - и  $L$ -долин зоны проводимости и уравнения Пуассона (4)

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} = -\frac{1}{e} \frac{\partial J_i}{\partial z} - \frac{n_i}{\tau_{ni}} + \frac{n_j}{\tau_{nj}}; \quad (1)$$

$$\frac{3}{2} \kappa \frac{\partial n_i T_i}{\partial t} = J_i \left( E + \frac{1}{e} \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) - \frac{5}{2} \kappa \frac{1}{e} \frac{\partial (J_i T_i)}{\partial z} - \kappa \frac{n_i T_i}{\tau_{ei}} + \kappa \frac{n_j T_j}{\tau_{ej}}; \quad (2)$$

$$J_i = en_i \mu_i E + n_i \mu_i \frac{\partial \phi}{\partial z} - \kappa \mu_i \frac{\partial (n_i T_i)}{\partial z}; \quad (3)$$

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

где  $i, j$  - индексы, определяющие тип долины зоны проводимости;  $n_i, \mu_i, J_i, T_i$  - соответственно концентрация, подвижность, плотность тока и температура электронов в  $i$ -й долине;  $1/\tau_{ni}$  и  $1/\tau_{ei}$  - обратные времена релаксации электронов, усред-

ненные соответственно по концентрации и энергии в  $i$ -й долине;  $\phi$  - электростатический потенциал в области гетероперехода в отсутствии приложенного к диоду напряжения;  $E$  - напряженность электрического поля;  $n_0$  - концентрация ионизированных доноров;  $\epsilon$  - диэлектрическая проницаемость;  $e$  - модуль заряда электрона;  $\kappa$  - постоянная Больцмана;  $t$  - время;  $z$  - координата.

Для изотипных  $n-n$ -гетеропереходов суммарная величина изгиба зоны проводимости задается разностью работ выхода электронов в полупроводниках с одинаковым уровнем легирования:

$$\Delta\phi = \Delta\phi_1 - \Delta\phi_2 = \chi_2 - \chi_1 + 1,5 \kappa T_0 \ln \left\{ \frac{m_1}{m_2} \right\}, \quad (5)$$

где  $\Delta\phi$  - величина энергетического изгиба зоны проводимости;  $\chi$  - энергия электронного сродства;  $m$  - эффективная масса электронов в  $\Gamma$ -долине; индекс указывает полупроводник (рис. 1). В случае прямо смещенного гетероперехода  $\Delta\phi_1 > 0$ ,  $\Delta\phi_2 < 0$ . При одинаковом уровне легирования катода и активной области энергетический барьер  $\Delta E = \Delta\phi$ . Если концентрация доноров в катоде превышает концентрацию доноров в активной области, то  $\Delta E$  становится меньше, чем  $\Delta\phi$ . Учет различия в уровнях легирования катода и активной области происходит при интегрировании системы уравнений (1)-(4). В данной работе пренебрегается туннельными явлениями и поверхностными состояниями на границе раздела полупроводников.

Электростатический потенциал в области гетероперехода в отсутствии приложенного к диоду напряжения  $\phi$  находился из совместного численного решения уравнения Пуассона (6) и уравнения (5).

$$\frac{d^2 \phi}{dz^2} = \frac{4\pi e^2}{\epsilon} n_0 \left( 1 - \exp \left\{ -\frac{\phi}{\kappa T_0} \right\} \right). \quad (6)$$

Напряжение на диоде задавалось выражением  $U = U_0 + U_1 \sin(2\pi ft)$ , где  $U_0$  - напряжение смещения;  $U_1$  - амплитуда колебания напряжения;  $f$  - частота. В целях исключения переходных процессов КПД диодов вычислялось для второго и третьего периодов колебаний. Температура кристаллической решетки  $T_0 = 300$  К.

**2. Выходные характеристики.** В гетерокатоде часть электронов переходит из катода в активную область. В катоде возникает обедненный электронами слой, а в активной области обогащенный. В области пространственного заряда гетероперехода электрическое поле направлено противоположно внешнему полю.

Рассмотрим процессы в диоде при одинаковом уровне легирования активной области и

катода. В диоде с гетерокатодом в области пространственного заряда гетероперехода происходит всплеск температуры электронного газа  $T_{\Gamma}$ . Максимальное значение  $T_{\Gamma}$  слабо зависит от  $x$  в области  $x = 0,2 \div 0,3$  и составляет  $\approx 480$  К (0,062 эВ) для  $\text{GaP}_x\text{As}_{1-x}\text{-GaAs}$  и  $\approx 510$  К (0,066 эВ) для  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As-GaAs}$  гетероперехода. При любом  $x$  максимальная энергия инжектируемых электронов меньше, чем  $\Delta\phi$ . По-видимому, это связано со значительным рассеянием электронов на полярных оптических фононах [1] при малых  $x$  и на неэквивалентных междолинных фононах при больших  $x$ . В обогащенной электронами области  $T_{\Gamma}$  падает до температуры кристаллической решетки. В диодах возникает неустойчивость заряда, напоминающая обогащенный слой (в переднем фронте неустойчивости заряда отсутствует обедненный электронами слой). КПД и выходная мощность при росте  $x$ , а значит, и  $\Delta\phi$  незначительно возрастают в диодах с  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  (рис. 2, кривая 1) и с  $\text{GaP}_x\text{As}_{1-x}$  катодом (рис. 3, кривая 1).

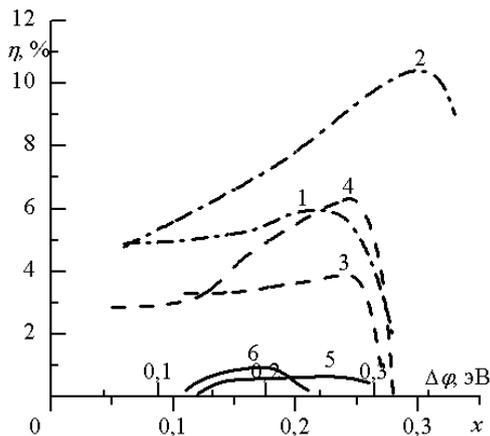


Рис. 2. Зависимость КПД от состава  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -катода и изгиба зоны проводимости  $\Delta\phi$  GaAs-диодов с разной длиной активной области  $l_a$  и концентрации доноров в катоде  $n_{0K}$ : 1-2,5 мкм,  $10^{16}$  см $^{-3}$ ; 2-2,5 мкм,  $8 \cdot 10^{16}$  см $^{-3}$ ; 3-1,5 мкм,  $1,7 \cdot 10^{16}$  см $^{-3}$ ; 4-1,5 мкм,  $9 \cdot 10^{16}$  см $^{-3}$ ; 5-0,8 мкм,  $3,1 \cdot 10^{16}$  см $^{-3}$ ; 6-0,8 мкм,  $9 \cdot 10^{16}$  см $^{-3}$ . Сплошные кривые - диоды с длиной активной области 0,8 мкм; пунктирные - диоды с длиной активной области 1,5 мкм; штрихпунктирные - диоды с длиной активной области 2,5 мкм

По-видимому, кроме  $\Delta\phi$ , на процессы зарождения неустойчивостей заряда большое влияние оказывают энергетический зазор  $\Delta$  и подвижность электронов в  $\Gamma$ -долине  $\mu_{\Gamma}$ , которые в  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  и  $\text{GaP}_x\text{As}_{1-x}$  уменьшаются при росте  $x$ . Сложность процессов заключается в том, что, как оказалось, влияние  $\Delta$ ,  $\mu_{\Gamma}$ ,  $\Delta\phi$  и  $n_{0K}$  на зарождение неустойчивостей заряда в диоде является комплексным. Влияние одного параметра без учета другого сильно искажает процесс зарождения неустойчивостей заряда.

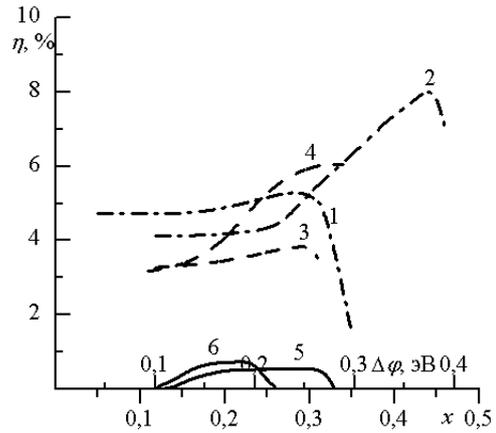


Рис. 3. Зависимость КПД от состава  $\text{GaP}_x\text{As}_{1-x}$ -катода и изгиба зоны проводимости  $\Delta\phi$  GaAs-диодов при разной длине активной области  $l_a$  и концентрации доноров в катоде  $n_{0K}$ : 1-2,5 мкм,  $10^{16}$  см $^{-3}$ ; 2-2,5 мкм,  $8 \cdot 10^{16}$  см $^{-3}$ ; 3-1,5 мкм,  $1,7 \cdot 10^{16}$  см $^{-3}$ ; 4-1,5 мкм,  $9 \cdot 10^{16}$  см $^{-3}$ ; 5-0,8 мкм,  $3,1 \cdot 10^{16}$  см $^{-3}$ ; 6-0,8 мкм,  $9 \cdot 10^{16}$  см $^{-3}$ . Сплошные кривые - диоды с длиной активной области 0,8 мкм; пунктирные - диоды с длиной активной области 1,5 мкм; штрихпунктирные - диоды с длиной активной области 2,5 мкм

Уменьшение  $\Delta$  неизбежно приводит к увеличению доли рассеяния электронов на междолинных центрах рассеяния и росту концентрации электронов в боковых долинах катода. Влияние  $\Delta\phi$  более сложное. С одной стороны, увеличение  $T_{\Gamma}$ , которое происходит при росте  $\Delta\phi$ , приводит к росту заселенности  $L$ -долин  $n_L$ . С другой стороны, возрастание  $\Delta\phi$  увеличивает обедненную электронами область, что уменьшает концентрацию как в  $\Gamma$ -, так и в  $L$ -долинах. Суммарное воздействие  $\Delta\phi$  и  $\Delta$  таково, что при одинаковом уровне легирования катода и активной области концентрация электронов в боковых долинах  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  и  $\text{GaP}_x\text{As}_{1-x}$  возрастает с  $x$ , но остается незначительной по сравнению с уровнем легирования (рис. 4, кривая 1). В активной области у катода возникает всплеск концентрации электронов в  $L$ -долинах, максимум которого незначительно растет при увеличении  $x$ . Локальное уменьшение подвижности  $\mu_{\Gamma}$  или возрастание концентрации электронов в  $L$ -долинах увеличивает на соответствующей области падение напряжения, что стимулирует МПЭ и формирование неустойчивости заряда. При этом определяющей причиной повышения КПД, по всей видимости, является комплексное взаимодействие  $\Delta$ ,  $\mu_{\Gamma}$ . Влияние же  $\Delta\phi$  и всплеска электронной температуры в гетеропереходе на наш взгляд является в лучшем случае вспомогательным. Это предположение подтверждает тот факт, что влияние только  $\Delta\phi$  (все параметры полупроводника в катоде, кроме энергии электронного сродства соответствуют GaAs) не приводит к возникновению дипольных доменов. В то же время учет  $\Delta$  или

рассеяния на сплавном потенциале [7], которые уменьшают подвижность электронов в катоде, приводит к режиму с дипольными доменами.

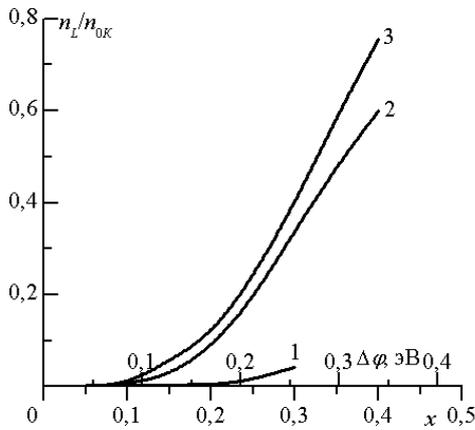


Рис. 4. Зависимость концентрации электронов в  $L$ -долинах  $\text{GaP}_x\text{As}_{1-x}$ -катода, нормированной на уровень легирования катода от процентного содержания GaP, и изгиба зоны проводимости  $\Delta\varphi$  в  $\text{GaP}_x\text{As}_{1-x}$ -GaAs гетерокатоде GaAs-диодов с длиной активной области 2,5 мкм при различном уровне легирования катода: 1 -  $10^{16} \text{ см}^{-3}$ ; 2 -  $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ; 3 -  $8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$

При повышении уровня легирования  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  или  $\text{GaP}_x\text{As}_{1-x}$  происходит ряд важных изменений в гетерокатоде. Во-первых, уменьшаются энергетический барьер гетероперехода  $\Delta\mathcal{E}$  и изгиб зоны проводимости в катоде  $\Delta\varphi_1$ . Изгиб зоны проводимости со стороны активной области  $\Delta\varphi_2$  возрастает. Так что размер обогащенного слоя гетероперехода становится больше. Во-вторых, возрастает температура электронов в области пространственного заряда гетероперехода. Например, для  $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$ -GaAs гетерокатода с  $n_{0K}=5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  максимальная температура электронов составляет  $\approx 1121 \text{ K}$  (0,145 эВ) и для  $\text{GaP}_{0,3}\text{As}_{0,7}$ -GaAs  $\approx 997 \text{ K}$  (0,129 эВ). Причем вне области пространственного заряда гетероперехода, в активной области у катода температура электронного газа уже не падает до температуры  $T_0$ , как при одинаковых уровнях легирования катода и активной области. В третьих, значительно возрастает концентрация электронов в  $L$ -долинах катода (рис. 4, кривые 2, 3). Высокая концентрация электронов в боковых долинах приводит к увеличению падения напряжения на гетерокатоде. Как следствие всех вышеизложенных факторов в совокупности в активной области формируются дипольные домены. КПД и выходная мощность диодов возрастают (рис. 2, 3, кривые 1, 2).

Так как при увеличении содержания GaP или AlAs в соединениях уменьшается  $\Delta$ , то существует предельное значения содержания этих компонент. Из-за слишком высокой концентрации электронов в боковых долинах гетерокатода неустойчивости заряда в активной области перестают форми-

роваться. В катодной области возникает статический домен. Генерация колебаний тока срывается.

Зависимость КПД от уровня легирования катода имеет монотонный характер со слабовыраженным максимумом (рис. 5).

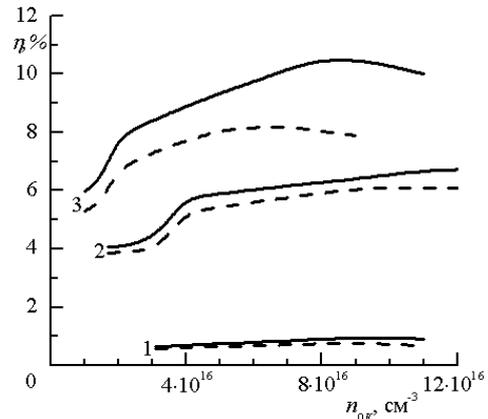


Рис. 5. Зависимость КПД от концентрации доноров в катоде GaAs-диодов с разной длиной активной области: 1-0,8 мкм; 2-1,5 мкм; 3-2,5 мкм. Сплошные кривые - диоды с  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -катодом, пунктирные - диоды с  $\text{GaP}_x\text{As}_{1-x}$ -катодом

При уменьшении длины активной области диода электронные процессы, происходящие в диоде, в целом не претерпевают значительных изменений, что видно из сохранения характера зависимости КПД от состава соединения в катоде (рис. 2, 3, кривые 3, 4). Для диодов с длиной активной области равной 0,8 мкм существует уже минимальное значение  $x$ , при котором становится возможна генерация колебаний тока (рис. 2, 3, кривые 5, 6).

С уменьшением длины активной области и соответственно с увеличением рабочей частоты КПД и выходная мощность диодов падают, как и характерно для всех диодов Ганна (рис. 6). КПД диодов с  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -катодом во всем диапазоне частот незначительно превышает КПД диодов с  $\text{GaP}_x\text{As}_{1-x}$ -катодом. По-видимому, это связано с тем, что при одинаковой величине  $\Delta\varphi$  энергетический зазор между долинами  $\Delta$  в  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  принимает меньшее значение, чем в  $\text{GaP}_x\text{As}_{1-x}$ . Экстраполяция зависимости КПД от частоты дает возможность выявить предельные рабочие частоты исследуемых диодов. Максимальная рабочая частота GaAs-диода с  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -катодом составляет  $\approx 135 \text{ ГГц}$ , с  $\text{GaP}_x\text{As}_{1-x}$ -катодом -  $\approx 130 \text{ ГГц}$ . На рис. 6 для сравнения приведена зависимость КПД от частоты GaAs-диода Ганна с гомогенным  $n^+$ - $n$  катодным контактом. Во всем диапазоне частот такие диоды уступают по КПД GaAs-диодам с  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ - и  $\text{GaP}_x\text{As}_{1-x}$ -катодом. Аналогичные соотношения и по выходной мощности. Например, при длине активной области равной 1,5 мкм и одинаковом уровне легирования  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -катода и активной области максимальная плотность выход-

ной мощности составляет  $\approx 2,9$  кВт/см<sup>2</sup>, при  $n_{0K} = 9 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup> -  $\approx 5$  кВт/см<sup>2</sup>, а в  $n^+ - n - n^+$ : GaAs-дио-  
дах  $\approx 2,7$  кВт/см<sup>2</sup>.

По результатам эксперимента [2] GaAs-  
диоды площадью сечения  $0,02 \times 0,02$  см<sup>2</sup> и с  
Al<sub>0,23</sub>Ga<sub>0,77</sub>As-катодом в непрерывном режиме при  
 $l_a = 2$  мкм имели выходную мощность 60 мВт с  
КПД = 1,5% и при  $l_a = 1,5$  мкм, 45 мВт с  
КПД=0,35%. GaAs-диоды с гомогенным  $n^+ - n$ -  
катодом при  $l_a = 2$  мкм имели выходную мощ-  
ность 25 мВт с КПД=0,45%, а при  $l_a = 1,5$  мкм СВЧ  
генерации не происходило. Лучшие характери-  
стики имели GaAs-диоды с Al<sub>0,3</sub>Ga<sub>0,7</sub>As-катодом в  
работах [3, 8]. В диапазоне частот  $66 \div 96$  ГГц  
диоды с  $l_a = 1$  мкм имели выходную мощность  
 $53 \div 2,5$  мВт с КПД=1  $\div$  1,6%.

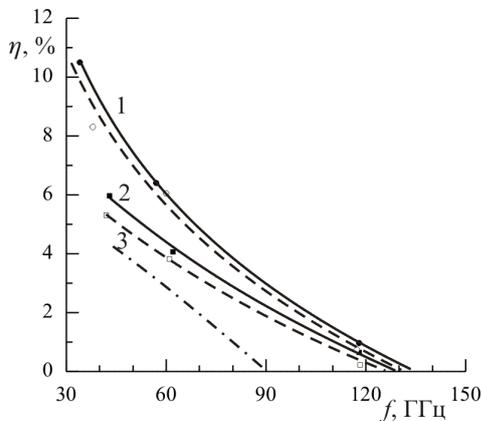


Рис. 6. Зависимость КПД от частоты: 1 - оптимальная кон-  
центрация доноров в катоде; 2 - концентрации доноров в катоде и  
активной области равны; 3 - GaAs-диод с  $n^+ - n$ -катодом.  
Сплошные кривые - диоды с Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As-катодом; пунктирные  
- диоды с GaP<sub>x</sub>As<sub>1-x</sub>-катодом; штрихпунктирные - GaAs-диоды  
с омическим  $n^+ - n$ -катодом

**Выводы.** Таким образом, прямосмещен-  
ный гетеропереход на катодном контакте в GaAs-  
диодах может приводить к возникновению режи-  
ма работы с дрейфом дипольных доменов. Эф-  
фективность генерации колебаний тока и выход-  
ная мощность таких диодов должна быть в  
 $\approx 2$  раза выше, чем GaAs-диодов с гомогенным  $n^+ - n$ -  
катодным контактом. Установлено влияние на  
выходные характеристики диодов различных  
электрофизических параметров соединения в ка-  
тоде. При этом определяющая роль, по всей ви-  
димости, принадлежит энергетическому зазору  
между долинами и подвижности электронов в до-  
линах катода. Также установлено, что существует  
оптимальное сочетание состава полупроводнико-  
вого соединения и концентрации доноров в като-  
де, при котором эффективность генерации коле-  
баний тока достигает максимальных значений.

Можно предположить улучшение высокочастотных свойств приборов на основе других

полупроводниковых соединений A<sub>3</sub>B<sub>5</sub> с соответ-  
ствующим гетерокатодом

1. Tomizawa K., Awano Y., Hashizume N., Kawashina M. Simulation on near ballistic electron transport in submicron GaAs diode with Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs heterojunctions cathode // IEEE Proceedings. - 1985. - 1132. - N1. - P.37-41.
2. Grenwald Z., Woodard P. W., Colawa A. R., Estman L. F. The effect of a high energy injection on the performance of mm wave Gunn oscillators // Solid State Electron. - 1988. - 31, N7. - P.1211-1214.
3. Sponer H., Couch N. R. Advances in hot electron injector Gunn diodes // GEC Journal of Research. - 1989. - 7, N1. - P.34-35.
4. Frisco I. M., Rolland P. A., Pernisek M. Heterojunction cathode contact transferred electron oscillators // IEEE Electron Device Lett. - 1985. - EDL-6, N10. - P.497-499.
5. Прохоров Э. Д., Белецкий Н. И. Полупроводниковые материалы для приборов с междолинным переносом электронов. - Харьков: Вища школа, 1982. - 144 с.
6. Стороженко И. П. Моделирование диодов Ганна на основе варизонных полупроводников // Радиофизика и электроника. - Харьков: Ин-т. радиофизики и электрон. НАН Украины. - 2003. - 8, №2. - С.287-294.
7. Littlejohn M. A., Hauser J. R., Glisson T. H. Alloy scattering and high field transport in ternary and quaternary III-V semiconductors // Solid State Electron. - 1978. - 21, N1. - P.107-114.
8. Couch N. R., Beton P. H., Kelly M. J. et. al. The use lineary graded composition AlGaAs injectors for intervalley transfer in GaAs: theory and experiment // Solid State Electron. - 1988. - 31, N4. - P.613-616.

#### ENERGY AND FREQUENCY CHARACTERISTICS OF GaAs GUNN DIODES WITH Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As AND GaP<sub>x</sub>As<sub>1-x</sub> CATHODES

I. P. Storozhenko, Yu. V. Arkusha, E. D. Prokhorov

Operation of the GaAs TED's with Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As and GaP<sub>x</sub>As<sub>1-x</sub> cathodes is studied with the two-level model of intervalley electron transfer in the semiconductors. Fundamental behaviors and specialty operation of the GaAs TED's with forward bias isotype heterojunction in cathode are defined. Energy and frequency characteristics are calculated. Boundary operation frequencies are determined.

**Key words:** intervalley transferred, forward bias hetero-cathode, dipole domain, oscillation efficiency.

#### ЕНЕРГЕТИЧНІ ТА ЧАСТОТНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ GaAs ДЮДІВ ГАННА З Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As I GaP<sub>x</sub>As<sub>1-x</sub> КАТОДАМИ

И. П. Стороженко, Ю. В. Аркуша, Е. Д. Прохоров

За допомогою дворівневої моделі міждолинного переносу електронів (МПЕ) у напівпровідниках досліджена робота GaAs діодів Ганна з Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As і GaP<sub>x</sub>As<sub>1-x</sub> катодами. Показані основні закономірності та особливості роботи приладів з МПЕ, у яких катодним контактом є ізотопний, прямозміщений гетероперехід на катодному контакті. Розраховані енергетичні та частотні характеристики. Визначені граничні робочі частоти.

**Ключові слова:** міждолинний перенос, прямозміщений гетерокатод, дипольний домен, ефективність генерації.

Рукопись поступила 2 июля 2007 г.