

Металлический катодный контакт к диодам Ганна на основе некоторых перспективных соединений полупроводников A_3B_5

Ю. В. Аркуша

*Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина,
Украина, 61077, г. Харьков, пл. Свободы, 4*

Статья поступила в редакцию 21 декабря 2001 г.

С помощью двухтемпературной модели междолинного переноса электронов теоретически исследованы энергетические и частотные характеристики диодов Ганна на основе $In_pGa_{1-p}As$ (с докритическим уровнем легирования активной области в режиме однородного поля) и на основе $InP_{1-p}As_p$ (в пролетном режиме с запиорным металлическим катодным контактом). Показано, что диоды Ганна на основе $In_pGa_{1-p}As$ в режиме однородного поля имеют отрицательную дифференциальную проводимость в широком диапазоне частот (до 200 ГГц), а диоды Ганна на основе $InP_{1-p}As_p$ являются перспективными по своим энергетическим и частотным характеристикам.

За допомогою двотемпературної моделі міждолинного переносу електронів теоретично досліджені енергетичні та частотні характеристики діодів Ганна на основі $In_pGa_{1-p}As$ (з докритичним рівнем легування активної області у режимі однорідного поля) і на основі $InP_{1-p}As_p$ у пролітному режимі із запиорним металевим катодним контактом. Показано, що діоди Ганна на основі $In_pGa_{1-p}As$ у режимі однорідного поля мають негативну диференціальну провідність у широкому діапазоні частот, а діоди Ганна на основі $InP_{1-p}As_p$ є перспективними за своїми енергетичними та частотними характеристиками.

Введение

Работа диодов Ганна миллиметрового диапазона в пролетном режиме во многом определяется типом катодного контакта. Для диодов Ганна на основе GaAs исследовались контакты различной структуры. Частотный предел $n^+ - n - n^+$ -структуры (~ 65 ГГц) ограничен из-за наличия достаточно протяженной области начального разогрева электронов (ОНРЭ) вблизи катода (~1 мкм) [1]. В $n^+ - n^- - n - n^+$ -структуре ОНРЭ значительно сокращается из-за наличия высокоомной неоднородности вблизи катода (n^- -области), и ее частотный предел составляет ~250 ГГц на основной гармонике [1]. Исследованы и другие типы катодных контак-

тов в диодах Ганна, позволяющие сократить ОНРЭ вблизи катода: металлический запиорный контакт $m - n$ (частотный предел ~100 ГГц [2]), запиорный гетеропереход на катоде (частотный предел ~160 ГГц [3]).

Диоды Ганна изготавливаются не только на основе арсенида галлия. Перспективным является целый ряд соединений полупроводников A_3B_5 : $In_pGa_{1-p}As$, $InP_{1-p}As_p$, $In_{1-p}Ga_pP_{1-z}As_z$.

Одна из возможностей увеличения эффективности генерации диодов Ганна и увеличения их частотного предела заключается в том, чтобы использовать определенный тип катодного контакта, позволяющий сократить ОНРЭ вблизи катода, и перспективное соединение полупроводников A_3B_5 в активной области.

Один из вариантов – это диод Ганна на основе $InP_{1-p}As_p$ с металлическим катодным контактом. К сожалению, теоретических или экспериментальных работ, посвященных исследованию энергетических и частотных характеристик диодов Ганна на основе $InP_{1-p}As_p$ с металлическим катодным контактом, в литературе, насколько известно автору, не имеется.

Кроме того, проведенные в [4] исследования для GaAs-диодов показали, что понижение концентрации легирующей примеси в диоде с металлическим катодным контактом переводит его в состояние с однородным электрическим полем в активной области из состояния с сильным полем у катода и полем ниже порогового в остальной части диода. Режим однородного поля характерен для коротких диодов, длина которых сравнима с шириной области пространственного заряда у контакта металл – полупроводник. Длина диодов в этом режиме не играет такой роли, как в пролетных режимах. Частота токовых колебаний здесь не связана со временем пролета зарядовой неоднородности через образец, а определяется частотой приложенного напряжения (аналогично режиму ограничения накопления объемного заряда). В [4] показано, что в режиме однородного поля у диодов Ганна на основе GaAs с металлическим контактом на катоде генерация возможна в достаточно широком частотном диапазоне (до ~180 ГГц). Поэтому определенный интерес представляет также изучение аналогичного режима работы диодов Ганна на основе одного из перспективных полупроводников A_3B_5 – $In_pGa_{1-p}As$.

Цель работы – исследовать физические процессы, протекающие в диодах Ганна на основе $In_pGa_{1-p}As$, $InP_{1-p}As_p$ с металлическим катодным контактом, и определить энергетические и частотные характеристики таких диодов.

Методика исследования и параметры диодов

В большинстве теоретических исследований коротких диодов Ганна миллиметрового диапазона используется двухтемпературная (двухуровневая) модель междолинного пере-

носа электронов (МПЭ) [5]. Эта модель позволяет учитывать инерционные эффекты, характерные для диодов такой длины, и проводить расчеты диодов с большими градиентами концентраций и электрических полей. Система уравнений для двухтемпературной модели МПЭ получается путем усреднения кинетического уравнения Больцмана по импульсу с использованием смещенного максвелловского распределения. Она состоит из уравнений непрерывности, уравнений для тока, уравнений сохранения энергии для каждой из долин зоны проводимости, а также уравнения Пуассона [1, 5] и имеет следующий вид:

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \frac{1}{q} \frac{\partial J_i}{\partial x} = -n_i A_i(T_i) + n_j A_j(T_j), \quad (1)$$

$$J_i = q n_i \mu_i E - k \mu_i \frac{\partial (n_i T_i)}{\partial x}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial (n_i T_i)}{\partial x} = \frac{2}{3} E J_i - \frac{5}{3q} \frac{\partial (J_i T_i)}{\partial x} + \frac{2}{3} (T_j n_j C_j(T_j) - T_i n_i C'_j(T_j)), \quad (3)$$

$$\frac{\partial E}{\partial x} = \frac{4\pi q}{\epsilon} (n_i(x,t) + n_j(x,t) - n_0(x)). \quad (4)$$

Здесь индексы i, j относятся соответственно к нижней и верхней долинам; n_i , J_i , μ_i , T_i – соответственно концентрация, плотность тока, подвижность и температура электронов в i -долине; E – напряженность электрического поля; q – заряд электрона; k – постоянная Больцмана; ϵ – диэлектрическая постоянная; $n_0(x)$ – концентрация примесей по длине диода;

$A_i(T_i) = \frac{1}{\tau_{n_{ij}}(T_i)}$ и $A_j(T_j) = \frac{1}{\tau_{n_{ji}}(T_j)}$ – обратные времена релаксации по концентрации;

$C_i(T_i) = \frac{1}{\tau_{\epsilon_{ij}}(T_i)}$ и $C'_j(T_j) = \frac{1}{\tau_{\epsilon_{ji}}(T_j)}$ – обратные времена релаксации по энергии [1]; x – теку-

щее значение координаты ($0 \leq x \leq L$), L – общая длина диода.

Учет влияния контакта металл-полупроводник (его положение определяется значением координаты $x=0$) на работу диодов осуществляется заданием граничных условий, аналогичных приведенным в [6]:

$$n_1(0, t) = n_0 \exp[-q(\varphi_0 - \Delta\varphi)/kT_0], \quad (5)$$

$$n_2(0, t) = 0, \quad (6)$$

где $q\varphi_0$ – высота потенциального барьера на контакте; T_0 – температура кристаллической решетки; $\Delta\varphi = \sqrt{\frac{q}{\epsilon}} E(0, t)$ – понижение величины потенциального барьера за счет сил зеркального отображения [6];

$$E(0, t) = \frac{4\pi q n_0}{\epsilon} d + \frac{U(t)}{L}; \quad (7)$$

$d = \sqrt{\frac{\epsilon\varphi_0}{2\pi q n_0}}$ – ширина области пространственного заряда вблизи контакта; $U(t)/L$ – среднее поле в образце, $U(t)$ – действующее на диоде внешнее напряжение.

Граничная концентрация (5) не зависит от напряжения и близка к равновесному значению, а граничное поле (7) является суперпозицией поля в приконтактной области и среднего поля в образце.

Анодным контактом служит $n-n^+$ -контакт. Предложенные граничные условия (5)-(7) описывают контакт металл-полупроводник в рамках диффузионной теории выпрямления [7]. Они справедливы для диодов Ганна с запорными металлическими катодными контактами, у которых работа выхода электронов из металла φ_m больше работы выхода из полупроводника $\varphi_{\text{пн}}$.

Учет пространственных производных в нашей модели дает возможность рассчитывать распределения физических величин (концентраций

электронов в долинах – $n_1(x, t)$, $n_2(x, t)$, напряженности электрического поля – $E(x, t)$, температур (энергий) электронов в долинах – $T_1(x, t)$, $T_2(x, t)$) в прикатодной области как в равновесной части объема полупроводника, не выделяя ее для отдельного рассмотрения. Необходимо отметить, что при исследовании энергетических характеристик диодов Ганна на основе тройных соединений, что имеет место в данном случае, необходимо, наряду с основными механизмами рассеяния, учитывать и рассеяние электронов на сплавном потенциале. Время релаксации электронов для рассеяния на сплавном потенциале для трехкомпонентных соединений зависит от параметра упорядочения S ($0 \leq S \leq 1$; $S=0$ – соответствует идеально упорядоченному соединению, $S=1$ – полностью неупорядоченному соединению) и потенциала рассеяния $|\Delta U|$ [8]:

$$\frac{1}{\tau_3} = \frac{3\pi m_i^{*3/2}}{8\sqrt{2}\hbar^4} [p(1-p)] \left(\frac{3}{2} kT_i \right)^{1/2} \Omega |\Delta U|^2 S.$$

Здесь p отражает содержание компонент в сплаве; m_i^* – эффективная масса электронов в i -долине; $\Omega = a^3$, где a – постоянная кристаллической решетки.

Система уравнений (1)-(4) с учетом граничных условий (5)-(7) решалась, как и в работе [4], методом встречных прогонок [11].

Исследовались диоды Ганна с запорным катодным $m-n$ -контактом и длиной активной области $l_a = 2.5$ мкм при $T_0 = 300$ К. Моделировалась работа диодов Ганна в одноконтурном резонаторе, т. е. напряжение на диоде записывалось в виде: $U(t) = U_0 + U_1 \sin \omega t$, где U_0 – питающее напряжение (напряжение смещения), U_1 – амплитуда колебаний напряжения на диоде, ω – частота колебаний. Значения эффективности генерации диодов оптимизированы по U_0 и U_1 на каждой частоте. Во избежание влияния переходного процесса в диоде все физические явления и выходные характеристики рассматривались для второго периода СВЧ-колебания.

Энергетические характеристики диодов Ганна на основе $InP_{0.6}As_{0.4}$ с запертым металлическим катодным контактом

При исследовании энергетических и частотных характеристик диодов важным является выбор оптимальной высоты потенциального барьера, т. е. порогового напряжения, при котором диод начинает работать в пролетном режиме. При этом в диоде распространяются дипольные домены, эффективность генерации которых выше, чем у диодов с заряженными слоями. С одной стороны, высота потенциального барьера должна быть достаточно большой, чтобы создать высокое поле на катоде, тем самым сократив ОНРЭ вблизи катода, и создать условия для МПЭ. С другой стороны, высота потенциального барьера должна быть достаточно малой, чтобы на катодном контакте не образовался статический домен.

Расчеты показывают, что оптимальная высота барьера составляет 0.03 эВ для диодов на основе $InP_{0.6}As_{0.4}$ с $l_a = 2.5$ мкм (концентрация примесей в активной области – 10^{16} см⁻³, в n^+ -области – $8 \cdot 10^{16}$ см⁻³) на частоте 33 ГГц. Кривая для $InP_{0.6}As_{0.4}$ приведена на рис. 1. Для сравнения здесь же показана кривая для GaAs из работы [2]. При высоте барьера 0.03 эВ и оптимальных значениях $U_0 = 6U_{\Pi}$ и $U_1 = 0.6U_0$ (U_{Π} – пороговое напряжение, которое для диодов рассматриваемой длины составляет 1 В) КПД достигает ~16 %. Анализ распределения напряженности электрического поля по длине образца в различные моменты СВЧ-периода на пролетной частоте 33 ГГц для оптимальной величины потенциального барьера позволяет говорить о том, что в диоде развиваются неустойчивости, связанные с образованием доменов сильного поля. У исследуемого образца электрическое поле в домене на $15 \div 20$ кВ/см выше, чем у диода Ганна на основе GaAs, что говорит о более полном формировании домена сильного поля. В связи с этим эффективность генерации у рассматриваемых диодов выше, чем у диодов на основе GaAs (~8 %) (рис. 1).

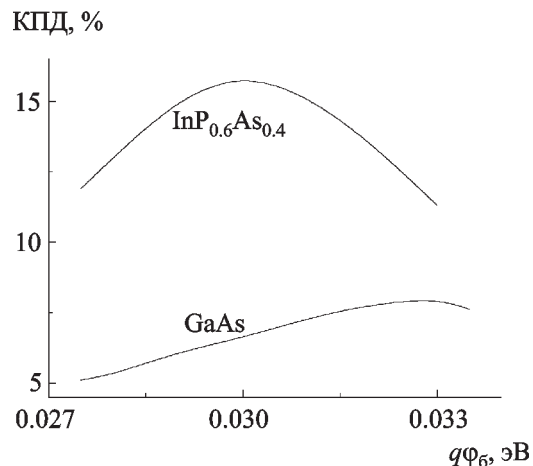


Рис. 1. Зависимость КПД генерации диодов Ганна от величины потенциального барьера

При высотах потенциального барьера ниже оптимального значения увеличивается ОНРЭ вблизи катода и уменьшается величина электрического поля у катодного контакта, что в свою очередь приводит к уменьшению эффективности генерации. При дальнейшем уменьшении величины потенциального барьера в диоде начинают распространяться заряженные слои. При значениях потенциального барьера выше оптимального растет электрическое поле вблизи катода, однако одновременно увеличивается обеднение прикатодной области носителями заряда. При этом диод переходит в режим с катодным статическим доменом, т. е. с достаточно высоким полем у катода и полем ниже порогового в остальной части образца. Эффективность генерации при этом также уменьшается.

На рис. 2 приведена зависимость эффективности генерации от частоты для различных значений величины потенциального барьера. Необходимо отметить, что для оптимального значения величины барьера максимум КПД наблюдается на пролетной частоте (33 ГГц) и составляет ~16 %. При этом частотный диапазон Δf работы диода на основной гармонике составляет от 15 до 50 ГГц (~35 ГГц). Отличие величины потенциально-

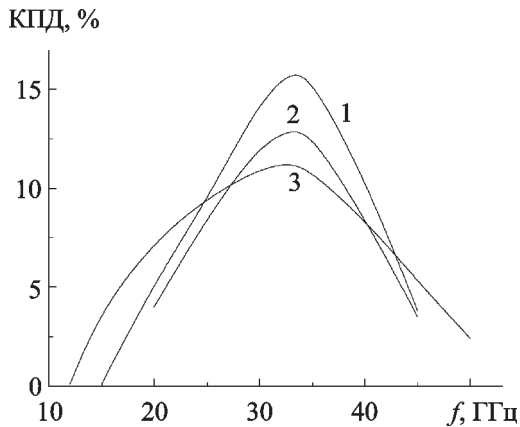


Рис. 2. Зависимость КПД генерации диодов Ганна на основе $\text{InP}_{0.6}\text{As}_{0.4}$ с $m-n$ -катодным контактом от частоты f для различных значений величины потенциального барьера: 1 – 0.03 эВ; 2 – 0.028 эВ; 3 – 0.033 эВ

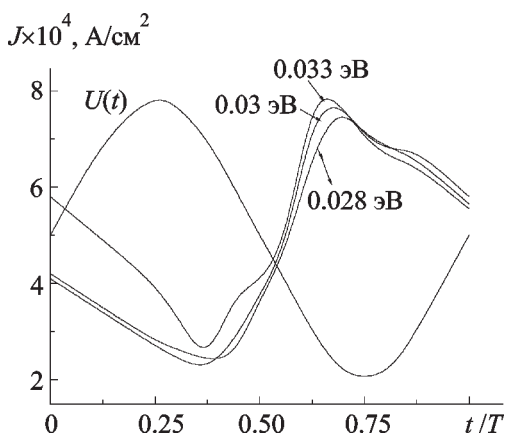


Рис. 3. Зависимость плотности тока, протекающего через диод, от времени для различных значений величины потенциального барьера: $f = 33$ ГГц, t – текущее время, T – период колебания

го барьера от оптимального значения приводит не только к уменьшению эффективности генерации на пролетной частоте, но и к расширению частотного диапазона работы диода. Уменьшение эффективности в этом случае связано со следующим. При величине барьера выше оптимального значения амплитуда плотности тока, протекающего через диод, увеличивается, но ухудшаются фазовые соотноше-

ния между этой плотностью тока и приложенным напряжением (рис. 3).

Уменьшение барьера относительно оптимального значения улучшает фазовые соотношения между плотностью тока и приложенным напряжением, но уменьшается амплитуда плотности тока, что приводит к падению эффективности генерации.

Таким образом, применение запорного металлического контакта позволяет повысить эффективность генерации диодов на основе $\text{InP}_{0.6}\text{As}_{0.4}$ по сравнению с диодами на основе GaAs.

Особенности режима однородного поля в диодах Ганна на основе $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ с металлическим катодным контактом

Физическая предпосылка существования однородного поля вдоль образца в течение всего СВЧ-периода состоит в следующем.

С одной стороны, в диоде при достаточной высоте барьера на контакте металл – полупроводник доменная неустойчивость не возникает и сверхкритически легированный образец в целом не обладает отрицательной дифференциальной проводимостью (ОДП). Распределения электрического поля и концентрации электронов вдоль диода при постоянном напряжении ($U(t) = U_0$) стационарны.

С другой стороны, докритически легированный диод с омическим контактом обладает ОДП, в нем существуют нарастающие волны объемного заряда при приложении переменного напряжения определенной частоты. ОДП образца при этом невелика, поскольку значительная часть диода находится в поле с напряженностью ниже пороговой.

Если совместить оба описанных случая, т. е. если в докритически легированном диоде будет металлический контакт с достаточной высотой барьера, то логично ожидать, что распределение поля будет близким к однородному, а величина этого поля при определенных напряжениях может превышать пороговое значение во всем образце.

Поэтому для получения режима однородного поля в образце важным является подбор уровня легирования активной области диода, высоты потенциального барьера на катодном контакте и длины диода.

На рис. 4 представлены распределения напряженности электрического поля по длине образца в различных фазах СВЧ-колебания. В диоде со сверхкритическим легированием, $n_0 = 10^{15} \text{ см}^{-3}$, и высотой потенциального барьера, равной 0.03 эВ, область пространственного заряда контакта занимает почти весь образец (кривые 1'–1''') и распределение электрического поля по длине активной области диода неоднородно во всех фазах СВЧ-колебания. Уменьшение уровня легирования до $n_0 = 10^{14} \text{ см}^{-3}$ приводит к тому, что распределение электрического поля по длине образца становится однородным (кривые 2'–2''').

Такой режим работы очень напоминает режим ограничения накопления объемного заряда с той лишь разницей, что здесь ограничения на временные интервалы накопления и рассасывания объемного заряда отсутствуют. Важно только, чтобы рассасывание пространственного заряда было полным и чтобы прибор не переключился в пролетный режим. Проведенные исследования показали, что прикатодная область, обедненная носителями заряда, занимает практически весь об-

разец и при приложении напряжения вида $U(t) = U_0 + U_1 \sin \omega t$ электрическое поле в образце однородно во времени (рис. 4, кривые 2'–2''').

Поскольку в режиме однородного поля длина диода не играет такой роли, как в пролетных режимах, такие диоды обладают ОДП в широком частотном диапазоне. Для определения частотных возможностей диодов в пролетном режиме оптимизировались значения напряжений U_0 и U_1 на различных частотах.

Рис. 5 иллюстрирует зависимость КПД генерации от частоты для диодов на основе $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ и GaAs. Как и в GaAs-диодах уменьшение эффективности генерации с увеличением частоты связано с инерционностью междолинного перераспределения электронов зоны проводимости. Предельная частота составляет ~200 ГГц, что несколько выше, чем в GaAs-диодах. Эффективность генерации на низких частотах составляет ~27%. Большие значения эффективности генерации на низких частотах объясняются, с одной стороны, более высокими значениями отношения максимальной скорости дрейфа электронов V_{\max} к минимальной V_{\min} [9], а с другой стороны, как и в [4], совместным действием контактных явлений и эффекта междолинного переноса электронов.

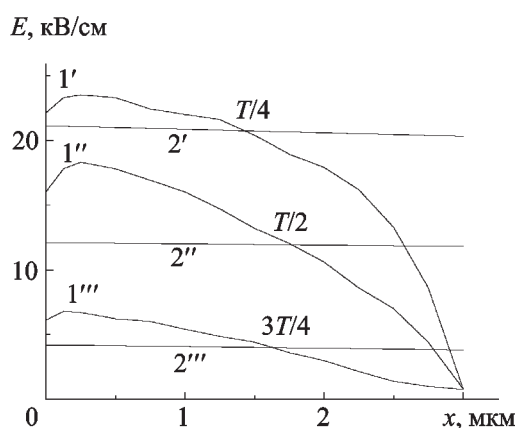


Рис. 4. Распределение электрического поля по длине образца в различных фазах СВЧ-периода: 1'–1''' – для $n_0 = 10^{15} \text{ см}^{-3}$; 2'–2''' – для $n_0 = 10^{14} \text{ см}^{-3}$

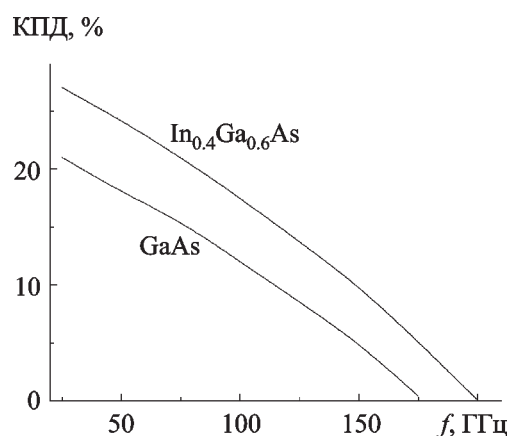


Рис. 5. Зависимость КПД генерации диодов Ганна от частоты в режиме однородного поля

Заключение

Проведенные исследования диодов с запорным металлическим катодным контактом позволяют сделать следующие выводы:

1. В диоде Ганна на основе $\text{InP}_{0.6}\text{As}_{0.4}$ существует оптимальное значение высоты потенциального барьера (0.03 эВ).

2. Максимум эффективности генерации $\text{InP}_{0.6}\text{As}_{0.4}$ -диодов на пролетной частоте (~33 ГГц) составляет ~16 %, что значительно выше, чем у аналогичных диодов на основе GaAs.

3. Частотный диапазон Δf работы на основной гармонике у диодов на основе $\text{InP}_{0.6}\text{As}_{0.4}$ меньше, чем у диодов на основе GaAs.

4. При определенных значениях высоты барьера и уровня легирования в диоде на основе $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ с $l_a = 2.5$ мкм возможно установление режима однородного поля.

5. Частотный предел работы $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ -диодов в режиме однородного поля выше (~200 ГГц), чем у GaAs-диодов (~180 ГГц). Эффективность генерации в рассмотренном частотном диапазоне выше, чем у GaAs-диодов.

Таким образом, проведенные исследования показали перспективность использования металлических катодных контактов в диодах Ганна на основе $\text{InP}_{0.6}\text{As}_{0.4}$ и $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ при работе в миллиметровом диапазоне.

Литература

1. Ю. В. Аркуша, А. А. Дрогаченко, Э. Д. Прохоров. Радиотехника и электроника. 1987, **32**, №9, с. 1947-1954.
2. Ю. В. Аркуша, А. А. Дрогаченко, Э. Д. Прохоров. Радиотехника и электроника. 1988, **33**, №6, с. 1295-1301.
3. Ю. В. Аркуша, Э. Д. Прохоров, И. П. Стороженко. Радиотехника и электроника. 2000, **45**, №4, с. 508-510.
4. Ю. В. Аркуша, А. А. Дрогаченко, Э. Д. Прохоров. Радиотехника и электроника. 1989, **34**, №7, с. 1538-1540.
5. Ю. В. Аркуша, Э. Д. Прохоров, И. П. Стороженко. Радиопизика и радиоастрономия. 1998, **3**, №4, с. 419-423.
6. В. Е. Чайка, Н. В. Жембровская. Украинский физический журнал. 1982, №5, с. 732-737.
7. С. Зи. Физика полупроводниковых приборов, ч. 1. Москва, Мир, 1984, 455 с.
8. J. R. Hauser, M. A. Littlejohn, T. A. Glisson. Appl. Phys. Lett. 1976, **28**, No. 8, pp. 458-460.
9. Ю. В. Аркуша, А. В. Дядченко, Э. Д. Прохоров. Радиотехника и электроника. 1991, **36**, №7, с. 1401-1404.
10. Ю. В. Аркуша, Э. Д. Прохоров, И. П. Стороженко. Радиотехника и электроника. 1994, **39**, №11, с. 1816-1818.
11. А. А. Самарский. Введение в численные методы. Москва, Наука, 1987, 210 с.

Metallic Cathode Contact for Gunn Diodes on Basis of Some Novel A_3B_5 Semiconductor Compounds

Yu. V. Arkusha

Theoretically with the use of two-temperature model the power and frequency characteristics of Gunn diodes on a basis of $\text{In}_p\text{Ga}_{1-p}\text{As}$ with subcritical doping level of active area in a homogeneous field regime, and $\text{InP}_{1-p}\text{As}_p$ Gunn diodes in transit time regime are investigated. It is shown that the Gunn diodes on a basis of $\text{In}_p\text{Ga}_{1-p}\text{As}$ in a homogeneous field regime have negative differential conductivity in a wide frequency range (up to 200 GHz), and the $\text{InP}_{1-p}\text{As}_p$ Gunn diodes have more promising power and frequency characteristics.