

Влияние температуры на энергетические и частотные характеристики диодов Ганна мм-диапазона с гетерокатодом

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

Харьковский государственный университет
310077, Украина, Харьков, пл. Свободы, 4

Статья поступила в редакцию 10 июня 1997 г.

Исследовано влияние температуры кристаллической решетки на физические процессы в диодах Ганна на основе $GaAs$ с длиной активной области 1 мкм и различными гетерокатодными контактами ($In_xGa_{1-x}As$ и $Al_xGa_{1-x}As$). Для широкого диапазона температур получены энергетические и частотные характеристики. Показано, что диоды с гетерокатодом могут эффективно работать в мм-диапазоне длин волн в непрерывном режиме. Найдены предельные температуры, при которых диоды перестают работать и которые составили для $GaAs$ -диода с $In_{0,45}Ga_{0,55}As$ -катодом ~ 780 К и с $Al_{0,15}Ga_{0,85}As$ -катодом ~ 510 К.

Досліджено вплив температури кристалічної ґратки на фізичні процеси в діодах Ганна на основі $GaAs$ з довжиною активної області 1 мкм та різними гетерокатодними контактами ($In_xGa_{1-x}As$ і $Al_xGa_{1-x}As$). Для широкого діапазону температур отримано енергетичні та частотні характеристики. Показано, що діоди з гетерокатодом можуть ефективно працювати у мм-діапазоні довжин хвиль в безперервному режимі. Знайдено граничні температури, при яких діоди перестають працювати і котрі становлять для $GaAs$ -діода з $In_{0,45}Ga_{0,55}As$ -катодом ~ 780 К і з $Al_{0,15}Ga_{0,85}As$ -катодом ~ 510 К.

Введение

На выходные характеристики радиоэлектронных устройств большое влияние оказывает температура (T_0). Характеристики твердотельных активных элементов, выполненных на различных полупроводниковых материалах, как правило, значительно ухудшаются с увеличением температуры. Этому способствует и их неизбежный самогрев.

Один из известных активных элементов, широко используемый для генерации и усиления в см- и мм-диапазонах длин волн - диод Ганна. Для диодов мм-диапазона большое значение имеет тип катодного контакта, который во многом определяет физические процессы и выходные характеристики самого диода. К диодам Ганна применяют различные катодные контакты: омический (n^+-n) [1], с высокоомной неоднородностью (n^+-n^-n) [1], двухзонный ($n^+-n^-n^+-n$) [2], запиорный контакт металл-полупроводник ($m-n$) [3], антизапорный контакт металл-полупроводник [4], запиорный гетеропереход [5], антизапорный гетеропереход [6].

Значительный интерес представляют диоды с гетеропереходом на катодном контакте. По эффективности генерации и частотному диапазону такие диоды превосходят диоды с металлическим и омическим катодными контактами, а в некоторых диапазонах частот - диоды с высокоомной

неоднородностью у катода и с двухзонным катодом [5-7].

Исследования [5-7] были проведены при температуре кристаллической решетки 300 К, т.е. в импульсном режиме работы генератора. Вопрос о влиянии температуры на работу диода с гетерокатодом является актуальным как с точки зрения практической реализации, так и теоретического анализа генерационных свойств диодов Ганна при высоких температурах.

К сожалению, экспериментальных работ, посвященных исследованию влияния температуры на работу диодов Ганна с гетерокатодом практически нет. В работе [8] было экспериментально установлено увеличение термостабильности $GaAs$ -диодов с $Al_xGa_{1-x}As$ -катодом по сравнению с диодами с омическим катодным контактом.

В настоящей работе для широкого диапазона температур были проведены исследования энергетических и частотных характеристик, а также физических процессов в диодах Ганна на основе $GaAs$ с различными полупроводниковыми соединениями в катоде.

1. Методика исследования и электрофизические параметры диода

Для расчета характеристик диодных структур с гетерокатодом можно использовать двухтемпературную модель [1], расширенную на случай гете-

перехода. Система уравнений двухтемпературной модели имеет следующий вид:

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

$$J_i = q n_i \mu_i (E - E_0) - k \mu_i \frac{\partial (n_i T_i)}{\partial x}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial (n_i T_i)}{\partial x} = \frac{2}{3} (E - E_0) J_i - \frac{5}{3q} \frac{\partial (J_i T_i)}{\partial x} + \frac{2}{3} (T_j n_j C_j(T_j) - T_i n_i C_j'(T_j)), \quad (3)$$

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

где индексы i, j относятся соответственно к нижней и верхней долине или, наоборот, когда речь идет о верхних долинах. Здесь n_i, J_i, μ_i, T_i - соответственно концентрация, плотность тока, подвижность и температура электронов в i -долине, E - напряженность электрического поля, E_0 - напряженность электрического поля в области пространственного заряда гетероперехода без приложенного внешнего напряжения, q - заряд электрона, k - постоянная Больцмана, ϵ - диэлектрическая постоянная, $A_i(T_i)$ и $A_j(T_j)$ - обратные времена релаксации по концентрации, $C_j(T_j)$ и $C_j'(T_j)$ - обратные времена релаксации по энергии [1].

Для нахождения E_0 в гетеропереходе решается уравнение Пуассона отдельно для обогащенной и обедненной областей гетероперехода совместно со следующими уравнениями:

$$\Delta \epsilon_c = \Delta \phi_k + \Delta \phi_a, \quad (5)$$

$$\int_{l_k - d_k(\Delta \phi_k)}^{l_k} (n_i(x) - N_k) dx + \int_{l_k}^{l_k + d_k(\Delta \phi_a)} (n_i(x) - N_a) dx = 0, \quad (6)$$

где $\Delta \epsilon_c$ - разрыв зоны проводимости, l_k - длина катода, d_k и d_a - длина областей гетероперехода, $\Delta \phi_k$ и $\Delta \phi_a$ - изгиб зоны проводимости, N_k и N_a - концентрация доноров, соответственно в катоде и активной области.

Для запорного гетерокатода выражения для d_k, d_a , и $n_i(x)$ задаются следующими.

Обогащенная область:

$$d_k(\Delta \phi_k) = r_k \arccos \left\{ \exp \left(-\frac{\Delta \phi_k}{k T_0} \right) \right\}, \quad (7)$$

$$n_i(x) = \frac{N_k}{\cos^2 \left(\frac{x - l_k}{r_k} \right)}, \quad l_k - d_k \leq x \leq l_k, \quad (8)$$

Обедненная область:

$$d_a(\Delta \phi_a) = r_a \sqrt{\frac{\Delta \phi_a}{k T_0}}. \quad (9)$$

$$n_i(x) = N_a \cdot \exp \left(-\frac{(x - l_k)^2}{r_a^2} \right), \quad l_k \leq x \leq l_k + d_a,$$

$$n_i(x) \ll N_a \quad (10)$$

Здесь r_k и r_a дебаевские радиусы экранировки, соответственно для полупроводника в катоде и в

$$\text{активной области} - r_{k,a} = \sqrt{\frac{\epsilon_{k,a} k T_0}{2\pi N_{k,a} q^2}}.$$

Для антизапорного гетерокатода выражения для d_k, d_a , и $n_i(x)$ будут аналогичны, меняется только последовательность расположения обогащенного и обедненного слоев.

Таким образом, учет гетероперехода в двухтемпературной модели [1] сводится к следующему.

1. Изменение структуры зоны проводимости, характерное для гетероперехода, учитывается только в Γ -долине. Это выражается в учете E_0 в формуле для плотности тока электронов (2) и баланса энергии (3) в Γ -долине в области гетероперехода, т.е. в области $l_k - d_k \leq x \leq l_k + d_a$.

2. Параметры полупроводников меняются скачком в точке разрыва зоны проводимости при $x = l_k$.

4. Начальное распределение концентрации электронов в Γ -долине в области гетероперехода определялось по формулам (8) и (10). Вне области гетероперехода $n_i(x) = N_{k,a}(x)$.

Система уравнений (1)-(4) решалась, как в работе [1], методом встречных прогонок [9].

Рассматривались две различные диодные структуры: $n:In_xGa_{1-x}As-n:GaAs-n^+:GaAs$

(рис. 1) и $n:Al_xGa_{1-x}As-n:GaAs-n^+:GaAs$. В первом случае обедненная область гетероперехода находится в активной области диода ($n:GaAs$) - запорный гетерокатод, во втором обедненная область находится в катодной области - антизапорный гетерокатод.

Разрыв зоны проводимости в гетеропереходе равнялся разности электронного сродства в полупроводниках. Энергии электронного сродства были приняты следующими [10]: для $AlAs$ - 2,62 эВ, для $GaAs$ - 4,07 эВ, для $InAs$ - 4,90 эВ. Остальные параметры полупроводниковых материалов были взяты из работ [1] (для $GaAs$), [7,11] (для $InAs$) и [6,10] (для $AlAs$). Для промежуточ-

ных составов тройных соединений параметры находились из линейноаппроксимированных диаграмм. Общая длина исследуемого диода - 2 мкм, длина активной области - 1 мкм, концентрация доноров в активной и катодной областях - $2,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, концентрация доноров в аноде - $9 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, как в работах [1, 3-7].

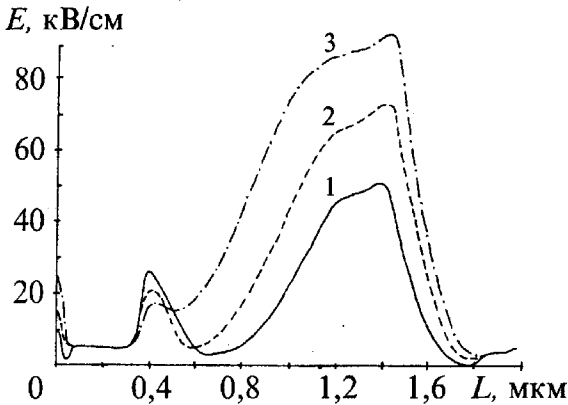


Рис. 1. Распределение электрического поля в диоде с $In_{0,45}Ga_{0,55}As$ -катодом в момент времени $T/4$ (T -период колебания): 1 - 300 К; 2 - 500 К; 3 - 700 К

На диоде напряжение менялось по закону: $U(t) = U_0 + U_1 \sin(2\pi ft)$, где U_0 - питающее напряжение (напряжение смещения), U_1 - амплитуда колебания напряжения на диоде, f - частота колебания.

Все полученные выходные характеристики были оптимизированы по U_0 и U_1 на каждой частоте. Для избежания переходного процесса в диоде все физические явления и выходные характеристики рассматривались для второго периода СВЧ-колебания.

Помимо исследования влияния T_0 на работу диода в динамическом режиме было изучено влияние T_0 на зависимость дрейфовой скорости электронов от электрического поля $V(E)$ в $In_xGa_{1-x}As$, $Al_xGa_{1-x}As$ и на электрофизические параметры соответствующих гетеропереходов.

2. Диод с запорным гетерокатодом

Исследовались физические процессы в $n:In_xGa_{1-x}As-n:GaAs-n^+:GaAs$ - структуре.

В соединении $In_xGa_{1-x}As$, как и в $GaAs$, с ростом T_0 уменьшаются максимальная дрейфовая скорость электронов V_{max} и отношение максимальной скорости к минимальной V_{max}/V_{min} , увеличиваются пороговое поле E_n и протяженность участка отрицательной дифференциальной проводимости $E_{одн}$. При увеличении доли $InAs$ в соединении температура, при которой $V_{max}/V_{min} \rightarrow 1$ или $E_{одн} \rightarrow 0$, возрастает.

Изменение температуры оказывает влияние и на распределение электронов в гетеропереходе. С ростом температуры становится меньше энергетический барьер в гетеропереходе и увеличивается его длина. Причем, длина обогащенной области увеличивается, а обедненной уменьшается. Также с ростом температуры становится меньше перепад концентрации электронов в гетеропереходе, т.е. в обогащенной области концентрация падает, а в обедненной растет, уменьшается максимальное поле в гетеропереходе.

В режиме генерации СВЧ-колебаний с ростом температуры кристаллической решетки в исследуемой структуре были обнаружены следующие изменения электрофизических параметров и процессов.

1. В диоде становится меньше амплитуда колебаний тока, что связано с уменьшением отношения V_{max}/V_{min} зависимости $V(E)$. Такое уменьшение амплитуды колебаний тока также связано со следующими процессами. С ростом T_0 увеличиваются оптимальные напряжения смещения и амплитуда колебаний напряжения вследствие увеличения E_n и $E_{одн}$. Возрастание питающего напряжения приводит к увеличению максимального значения электрического поля в домене, но при этом, как передний, так и задний фронт домена становятся более пологими (рис. 1), т.е. уменьшается градиент неравновесной концентрации электронов в домене. Геометрические размеры домена увеличиваются (рис. 1), и при $T_0 \sim 800 \text{ К}$ длина домена становится равной длине активной области диода. Конечным результатом описанных выше изменений диода является уменьшение амплитуды колебания тока и эффективности генерации (рис. 2). Для оптимального состава катода - $In_{0,45}Ga_{0,55}As$ максимальная температура, при которой диод перестает работать - $\sim 780 \text{ К}$ (рис. 2).

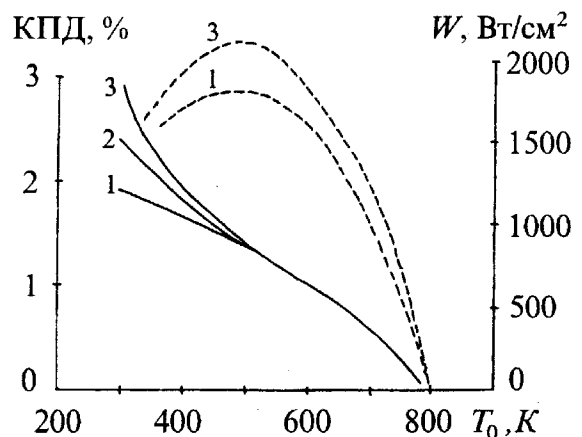


Рис. 2. Зависимость эффективности генерации и потока выходной мощности диодов с $In_xGa_{1-x}As$ -катодом от температуры: 1 - $x=0,30$; 2 - $x=0,50$; 3 - $x=0,45$ (непрерывная линия - КПД, штрихпунктирная линия - W)

2. При $T_0 \sim 500$ К поток выходной мощности достигает наибольшего значения (рис. 2). Это объясняется тем, что с ростом T_0 увеличивается оптимальная амплитуда колебаний напряжения, но уменьшается амплитуда колебания тока в диоде и ухудшаются фазовые соотношения.

3. Уменьшается влияние гетероперехода на эффективность генерации и поток выходной мощности (рис. 2), что можно видеть из рис. 1 по увеличению длины гетероперехода и уменьшению максимального поля на катоде. В результате область начального разогрева электронов становится длиннее.

4. Уменьшается скорость дрейфа доменов, вследствие уменьшения минимальной дрейфовой скорости электронов. Это видно по изменению оптимальной частоты генерации f_0 , которая уменьшается от ~ 110 ГГц для 300 К до ~ 75 ГГц для 700 К (рис. 3). Частотный диапазон изменения рабочей частоты Δf (на котором КПД больше нуля) меняется незначительно (рис. 3).

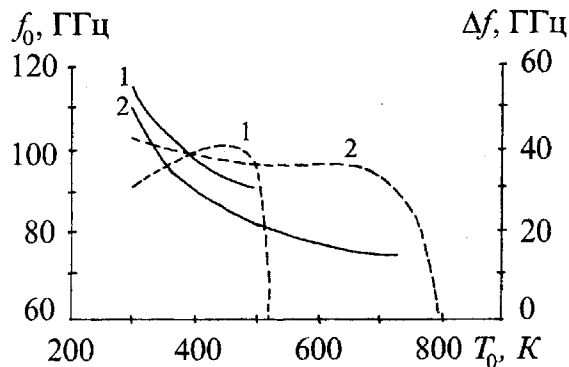


Рис. 3. Зависимость оптимальной частоты генерации (непрерывная линия) и частотного диапазона (штрихпунктирная линия) от температуры: 1 - $Al_{0,15}Ga_{0,85}As$ -катод; 2 - $In_{0,45}Ga_{0,55}As$ -катод

3. Диод с антизапорным гетерокатодом

Исследовались физические процессы в $n:Al_xGa_{1-x}As-n:GaAs-n^+:GaAs$ -структуре.

Исследования показали, что с ростом T_0 для любого состава $Al_xGa_{1-x}As$ происходит уменьшение V_{max} , V_{min} , V_{max}/V_{min} , увеличение E_n и $E_{одн}$. Максимальная температура существования ОДП для различных составов соединения составила: ~ 950 К для $GaAs$; ~ 750 К для $Al_{0,10}Ga_{0,90}As$; ~ 600 К для $Al_{0,20}Ga_{0,80}As$.

С ростом T_0 времена релаксации электронов уменьшаются, что говорит об увеличении вероятности рассеяния электронов на различных центрах рассеяния.

Возрастание T_0 , как и для запорного гетерокатода, приводит к уменьшению энергетического

барьера и увеличению области пространственного заряда (при этом обедненная область гетероперехода уменьшается).

Возрастание T_0 в режиме генерации приводит к следующему.

1. В гетерокатоде становятся меньше перепад концентрации электронов и абсолютное значение электрического поля (рис. 4), увеличиваются максимальная электронная температура и заселенность электронами боковой долины. Точка начала увеличения заселенности электронами боковой долины в активной области смещается к аноду, т.е. область начального разогрева электронов становится шире.

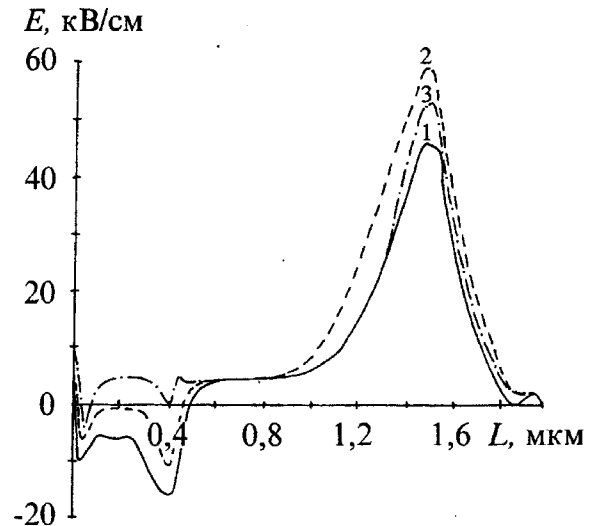


Рис. 4. Распределение электрического поля в диоде с $Al_{0,15}Ga_{0,85}As$ -катодом в момент времени $T/4$: 1 - 300 К; 2 - 400 К; 3 - 500 К

2. Максимальное электрическое поле в заряженном слое возрастает (рис. 4), а электронная температура и заселенность электронами боковой долины становятся меньше.

3. Падает амплитуда колебаний тока в диоде и ухудшаются фазовые соотношения между колебаниями тока и напряжения. Спад амплитуды колебания тока можно объяснить уменьшением отношения V_{max}/V_{min} на зависимости $V(E)$ и уменьшением отношения заселенности электронами боковой долины в заряженном слое и вне его. Ухудшение фазовых соотношений, по-видимому, связано с увеличением длины области начального разогрева электронов. В результате эффективность генерации быстро уменьшается без изменения оптимального состава катодного контакта (рис. 5).

4. Как и для случая диода с запорным гетерокатодом оптимальные режимы работы диодов наблюдаются при больших значениях напряжения смещения и амплитуды колебания напряжения. Поэтому при $T_0=400$ К и $x=0,15$ выходной по-

ток мощности достигает максимального значения (рис. 5).

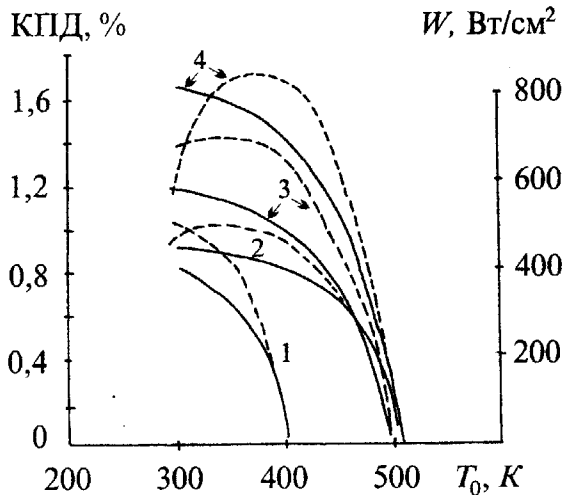


Рис. 5. Зависимость эффективности генерации и потока выходной мощности диодов с $Al_xGa_{1-x}As$ -катодом от температуры: 1 - $x=0,05$; 2 - $x=0,25$; 3 - $x=0,10$; 4 - $x=0,15$ (непрерывная линия - КПД, штрихпунктирная линия - W)

5. Оптимальная частота генерации уменьшается (рис. 3), т.к. уменьшается V_{min} на зависимости $V(E)$. Частотный диапазон изменяется незначительно, он имеет максимальное значение в диапазоне температур 400-500 К (рис. 3).

6. Температура кристаллической решетки, при которой генерация прекращается для различных составов катода, различна. Наибольшая температура ~ 500 К получена при содержании $AlAs$ в катоде $\sim 15\%$ (рис. 5).

Заключение

1. В соединениях $In_xGa_{1-x}As$ и $Al_xGa_{1-x}As$ при увеличении T_0 уменьшаются V_{max} , V_{min} , V_{max}/V_{min} , времена релаксации электронов и увеличивается E_d . Максимальные температуры существования отрицательной дифференциальной проводимости в $Al_xGa_{1-x}As$ с увеличением x уменьшаются, в $In_xGa_{1-x}As$ - увеличиваются.

2. При увеличении температуры уменьшается энергетический барьер и увеличивается ширина области пространственного заряда гетероперевода.

3. Увеличение температуры в режиме генерации не приводит к изменению типа неустойчивости тока в диодах. В диоде с $In_xGa_{1-x}As$ -катодом распространяются дипольные домены, с $Al_xGa_{1-x}As$ - заряженные слои. Становятся

меньше амплитуда колебания тока и отношение амплитуды к постоянной составляющей тока в диоде. Уменьшается эффективность генерации диода. Предельные температуры для оптимальных составов катода составили 780 К для $In_{0,45}Ga_{0,55}As$ и 510 К для $Al_{0,15}Ga_{0,85}As$.

4. В связи с тем, что при увеличении температуры увеличивается оптимальная амплитуда колебаний напряжения на диоде, но уменьшается амплитуда колебаний тока, существует температура, при которой поток выходной мощности имеет наибольшее значение ~ 500 К для $In_{0,45}Ga_{0,55}As$ и ~ 400 К для $Al_{0,15}Ga_{0,85}As$.

5. Влияние гетерокатода на работу диода с увеличением температуры уменьшается. В связи с этим область начального разогрева электронов становится длиннее.

6. Рост температуры приводит к уменьшению оптимальной частоты генерации и незначительному изменению частотного диапазона.

Таким образом, полученные результаты показывают, что использование диодов с гетерокатодом перспективно в непрерывном режиме, как для диодов с дипольными доменами, так и с заряженными слоями. При работе диодов сохраняется возможность получения высоких значений эффективности генерации и выходной мощности излучения в широком диапазоне частот.

Литература

1. Ю.В. Аркуша, А.А. Дрогаченко, Э.Д. Прохоров. РЭ. 1987, 32, №5, с. 1050-1054.
2. А.А. Кальфа, А.С. Тагер. Электронная техника. Серия 1. Электроника СВЧ. Вып. 10, 1982, с. 17-21.
3. Ю.В. Аркуша, А.А. Дрогаченко, Э.Д. Прохоров. РЭ. 1988, 33, №6, с. 1295-1299.
4. Ю.В. Аркуша, А.А. Дрогаченко, Э.Д. Прохоров. РЭ. 1988, 33, №6, с. 1336-1337.
5. Ю.В. Аркуша, Э.Д. Прохоров, И.П. Стороженко. РЭ. 1996, 41, №2, с. 248-252.
6. Ю.В. Аркуша, Э.Д. Прохоров, И.П. Стороженко. В кн. Применение радиоволн мм и субмм диапазонов. Сб. науч. тр. Харьков, ИРЭ НАН Украины, 1994, с. 78-75.
7. Ю.В. Аркуша, Э.Д. Прохоров, И.П. Стороженко. РЭ, 1994, 39, №11, с. 1816-1818.
8. N.R. Couch, H. Sporer, P.H. Beton. IEEE Electron Device Lett.. 1989, 10, No. 7, p. 288-290.
9. А.А. Самарский. Введение в численные методы. Москва, Наука, 1987, 210 с.
10. Физико-химические свойства полупроводниковых веществ. Справочник. Под ред. А.В. Новоселова. Москва, Наука, 1978, 400 с.
11. А.В. Дядченко, Э.Д. Прохоров. РЭ. 1976, 21, №12, с. 2641.

Influence of Temperature on Energy and Frequency Characteristics of mm-Waves Heterocathode Gunn Diodes

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

The influence of the crystal lattice temperature on the physical processes in the *GaAs* Gunn diodes with 1 μm active region length and different heterocathode

contacts ($\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ and $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$) is examined. Energy and frequency characteristics in wide temperature range are obtained. It is shown that diodes with heterocathode can effectively work in mm-wave range in continuous mode. Limit temperatures by which the diode cuts of its operation are found for *GaAs*-diodes with $\text{In}_{0,45}\text{Ga}_{0,55}\text{As}$ -cathode it is ~ 780 K and $\text{Al}_{0,15}\text{Ga}_{0,85}\text{As}$ -cathode it is ~ 510 K.