

Диод Ганна с туннельным $p^{++}-n^{++}$ -катодом

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

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

Статья поступила 2 июня 1999 г., после переработки 22 июля 1999 г.

На основе двухтемпературной модели GaAs разработана методика исследования диодов с вырожденным $p^{++}-n^{++}$ -переходом на катодном контакте. Учет туннельной инжекции на катоде сводился к заданию граничных условий в системе уравнений двухтемпературной модели.

Рассмотрены диоды с длиной активной области от 0.4 до 1.0 мкм. Показано, что в субмиллиметровом диапазоне длин волн в диоде с туннельной инжекцией электронов возникают неустойчивости тока, связанные с распространением заряженных слоев. Исследовано влияние падения напряжения на $p^{++}-n^{++}$ -переходе и временной задержки инжекции электронов за счет емкости $p^{++}-n^{++}$ -перехода на выходные характеристики диода. Определена предельная частота генерации, которая составила ~ 320 ГГц.

На основі двохтемпературної моделі GaAs розроблено методику дослідження діодів з виродженим $p^{++}-n^{++}$ -переходом на катодному контакті. Вплив тунельної інжекції на катоді враховувався заданням граничних умов у системі рівнянь двохтемпературної моделі.

Розглянуто діоди з довжиною активної області від 0.4 до 1.0 мкм. Показано, що в субмиліметровому діапазоні довжин хвиль в діоді з тунельною інжекцією електронів виникають нестійкості струму, пов'язані з розповсюдженням заряджених шарів. Досліджено вплив падіння напруги на $p^{++}-n^{++}$ -переході і часової затримки інжекції за рахунок ємності $p^{++}-n^{++}$ -переходу на вихідні характеристики діода. Знайдено граничну частоту генерації діода, яка склала ~ 320 ГГц.

Введение

Известно, что работу коротких диодов Ганна, работающих в мм-диапазоне, во многом определяет катодный контакт, от которого зависит напряженность электрического поля вблизи контакта и протяженность области начального разогрева электронов ("мертвая зона") [1]. В диоде GaAs структуры n^+-n-n^+ , наиболее часто применяемой на практике, частотный предел ~ 65 ГГц ограничен протяженной "мертвой зоной" (~ 1 мкм) [2]. Аналогичными свойствами обладает диод с антизапорным металлическим катодным контактом [3]. Для уменьшения длины "мертвой зоны" создают различные типы катодных контактов, которые обеспечивают высокую напряженность электрического поля у катода. К ним относятся катод n^+-n^- с высокоомной неоднородностью (частотный предел работы ~ 250 ГГц) [2], двухзонный катод $n^+-n^-n^+-n$ (частотный предел ~ 280 ГГц) [4], металлический запорный катодный контакт $m-n$ (частотный предел ~ 100 ГГц) [5,6], запорный гетеропереход на катоде (частотный предел ~ 160 ГГц) [7-9].

Одна из возможностей увеличения эффективности генерации диодов Ганна и увеличения их частотного предела заключается в сочетании междолинного переноса электронов

(МПЭ) с модуляцией проводимости активной области диода [10,11]. Один из способов управления проводимостью активной области диода – инжекция электронов из катодного контакта. В работе [10] было предложено использовать туннельную инжекцию электронов вырожденным $p^{++}-n^{++}$ -переходом, включенным в обратном направлении, на катоде. В настоящей работе исследуется $p^{++}-n^{++}-n^+-n^+$:GaAs диод. Цель работы – исследовать физические процессы, протекающие в диоде с $p^{++}-n^{++}$ туннельным катодом и определить его энергетические и частотные характеристики.

Методика исследования

1. Модель исследования. Для точного моделирования физических процессов в диоде с туннельным катодом необходимо, чтобы кроме обычных условий для диода Ганна мм-диапазона модель учитывала наличие вырожденных p^{++} и n^{++} областей, распределение напряжения между активной областью и $p^{++}-n^{++}$ -переходом, энергию и количество электронов, протуннелированных как в центральную, так и в боковые долины зоны проводимости активной области диода. Это задача довольно сложная и громоздкая. Поэтому были сделаны некоторые упрощения:

1. Так как концентрация примесей в p^{++} - и n^{++} -областях высокая ($\sim 6 \cdot 10^{19} \text{см}^{-3}$), то падением напряжения на этих областях можно пренебречь.

2. Считаем, что длина n^{++} -области меньше длины свободного пробега электронов и концентрации туннельно инжектируемых электронов на границе n^{++} -области и активной n -области диода одинаковы.

3. Туннелирование электронов происходит в центральную долину с энергией, равной энергии кристаллической решетки ($T_0=300 \text{ К}$).

4. На p^{++} - n^{++} -переход подавалась часть от общего приложенного к диоду напряжения и таким образом, что напряжение на p^{++} - n^{++} -переходе могло изменяться по амплитуде и фазе независимо от напряжения на активной области.

Вычисление характеристик диодов с туннельным катодом проводилось путем решения кинетического уравнения Больцмана с учетом неэквивалентного разогрева электронов в центральной и одной из боковых долин зоны проводимости (двухтемпературная модель). Рассматривалась Г-Л модель МПЭ в GaAs.

Система уравнений двухтемпературной модели состоит из уравнений непрерывности (1), плотности тока (2), баланса энергии (3) для Г- и L-долин и уравнения Пуассона для электрического поля (4):

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

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

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

$$\frac{\partial E}{\partial x} = \frac{4\pi q}{\epsilon} (n_i + n_j - N_0), \quad (4)$$

где индексы i, j относятся соответственно к нижней и верхней долинам зоны проводимости. Здесь n_i, J_i, μ_i, T_i – соответственно концентрация, плотность тока, подвижность и температура в i -долине; E – напряженность электрического поля; $A_i(T_i)$ и $A_j(T_j)$ – обратные времена релаксации, усредненные по концентрации; $C_i(T_i)$ и $C_j(T_j)$ – обратные времена релаксации, усредненные по энергии.

В рассматриваемой модели учет туннелирования электронов через p^{++} - n^{++} -переход сводился к заданию граничных условий:

$$n_{\Gamma}(0,t) = N_0(0) + n_{\Gamma}(t), \quad (5)$$

$$n_L(0,t) = \frac{A_{\Gamma}(T_0)}{A_{\Gamma}(T_0) + A_L(T_0)} N_0, \quad (6)$$

$$E(0,t) = \frac{J_{\Gamma}(t)}{qn_{\Gamma}(0,t)\mu(T_{\Gamma}(0,t))}. \quad (7)$$

Здесь $n_i(t), J_i(t)$ – концентрация и плотность тока протуннелированных электронов, определяемые через коэффициент туннельной генерации электронов p^{++} - n^{++} -переходом – G_i , по формулам:

$$n_i(t,0) = \int_0^{\Delta t} G_i dt, \quad (8)$$

$$J_i(t) = qG_i l_{pn}, \quad (9)$$

где l_{pn} – длина p^{++} - n^{++} -перехода, а Δt – шаг интегрирования по времени. Рассматривалось туннелирование через барьер треугольной формы. Для такого барьера коэффициент туннельной генерации электронов имеет вид [12]:

$$G_i = A_i E_{pn}^2 \exp\left\{-\frac{B_i}{E_{pn}}\right\}, \quad (10)$$

$$A_i = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{q}{\epsilon_g}\right)^2 \frac{\epsilon_g}{2\pi\hbar} \left(\frac{2\epsilon_g m_r^*}{\hbar^2}\right)^{1/2}, \quad (11)$$

$$B_i = \frac{\pi \epsilon_g}{4 q} \left(\frac{2\epsilon_g m_r^*}{\hbar^2}\right)^{1/2}. \quad (12)$$

Здесь E_{pn} – среднее поле в p^{++} - n^{++} -переходе; ϵ_g – ширина запрещенной зоны; m_r^* – приведенная эффективная масса электронов в Г-долине,

$$m_r^* = \frac{2m_{\Gamma} m_p}{m_{\Gamma} + m_p}; \quad (13)$$

m_{Γ} и m_p – массы электронов и дырок.

Поле в p^{++} - n^{++} -переходе считалось однородным и определялось как отношение приложенного внешнего напряжения и контактной разности потенциалов U_k в p^{++} - n^{++} -переходе к его длине:

$$E_{pn} = \frac{U_k + U_{0t} + U_{1t} \sin(\omega t)}{l_{pn}}, \quad (14)$$

где U_{0t} и U_{1t} – напряжение смещения и амплитуда колебания напряжения на $p^{++}-n^{++}$ -переходе, ω – циклическая частота колебания.

Длина $p^{++}-n^{++}$ -перехода определялась так же, как и для обычного $p-n$ -перехода [13]:

$$l_{pn} = \sqrt{\frac{\epsilon(U_k + U_{0t} + U_{1t} \sin(\omega t))}{\pi q N^*}}, \quad (15)$$

где N^* – приведенная концентрация доноров с концентрацией N_d и акцепторов с концентрацией N_a в вырожденных областях:

$$N^* = \frac{2N_d N_a}{N_d + N_a}. \quad (16)$$

Высота потенциального барьера qU_k в $p^{++}-n^{++}$ -переходе равна сумме ширины запрещенной зоны и уровней Ферми в p^{++} - и n^{++} -областях:

$$qU_k = \Phi_p + \Phi_n + \epsilon_g, \quad (17)$$

где Φ_n и Φ_p – уровни Ферми в n^{++} - и p^{++} -областях соответственно (рис. 1). Система уравнений (1)-(4) решается методом прогонок,

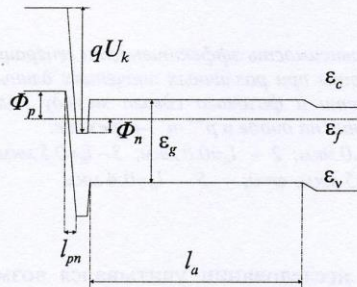


Рис. 1. Зонная структура $p^{++}-n^{++}-n^-$ -GaAs-диода

как в работе [2]. Эффективность генерации колебаний находилась по формуле:

$$\eta = \frac{U_1 \int_0^T J(t) \sin(\omega t) dt}{U_0 \int_0^T J(t) dt}, \quad (18)$$

где U_0 – напряжение смещения на диоде, U_1 – амплитуда колебания напряжения на диоде, $J(t)$ – средняя плотность тока в диоде, T – период колебания.

2. Структура и параметры диода. Рассматривался $p^{++}-n^{++}-n^-$ -GaAs-диод, зонная структура которого показана на рис. 1. Длина активной области диодов составляла 1.0, 0.8, 0.5, 0.4 мкм, а концентрации электронов в ней – $2.5 \cdot 10^{16}$, $3.1 \cdot 10^{16}$, $5.0 \cdot 10^{16}$, $6.2 \cdot 10^{16}$ см $^{-3}$, соответственно. Все необходимые параметры GaAs были взяты из работ [2,7,10]. Температура кристаллической решетки – $T_0=300$ К. Концентрация доноров и акцепторов в n^{++} - и p^{++} -областях составляли $6 \cdot 10^{19}$ см $^{-3}$. Для такой концентрации энергии уровней Ферми составляют $\Phi_n = 1.04 \cdot 10^{-14}$ эрг, $\Phi_p = 1.16 \cdot 10^{-14}$ эрг и контактная разность потенциалов – $U_k = 1.44$ В.

Энергетические и частотные характеристики

1. Влияние туннельной инжекции на работу диода было подробно изучено для диода с $l_a=0.8$ мкм. Исследования показали, что в диоде распространяются заряженные слои (рис. 2), что само по себе является интересным фактом при такой малой длине активной области. Было определено, что существует оптимальное падение напряжения на $p^{++}-n^{++}$ -переходе, при котором эффективность генерации максимальная. Увеличение напряжения на $p^{++}-n^{++}$ -переходе приводит к росту концентрации электронов, электрического поля, заселенности электронами боковой долины зоны проводимости вблизи катода. В результате изменяется форма тока, протекающего через диод. С одной стороны, амплитуда колебания тока

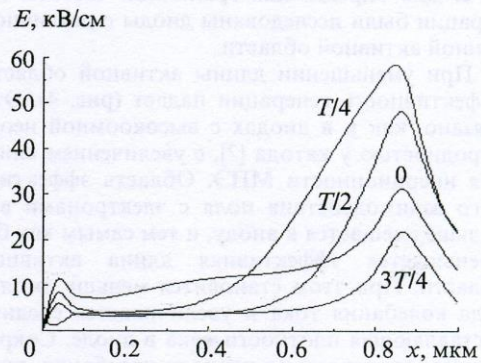


Рис. 2. Распределение электрического поля по длине диода в различные моменты времени в течение периода колебания T ($l_a=0.8$ мкм, $f=110$ ГГц, $U_{0t}=1.5$ В, $U_{1t}=1.3$ В)

становится меньше, из-за роста минимального значения тока, и возрастает средняя плотность тока. Действительно, инжекция дополнительных электронов у катода, где поле мало и нет значительного переноса электронов в боковые долины, должна приводить к росту средней плотности тока электронов в центральной долине. С другой стороны, увеличение количества инжектируемых электронов улучшает соотношение фаз между колебанием тока и напряжением. В результате увеличение напряжения на $p^{++}-n^{++}$ -переходе приводит к ухудшению амплитудных, но улучшению фазовых характеристик колебаний тока в диоде. Следовательно, мы пришли к выводу, что должно существовать оптимальное значение эффективности генерации (рис. 3).

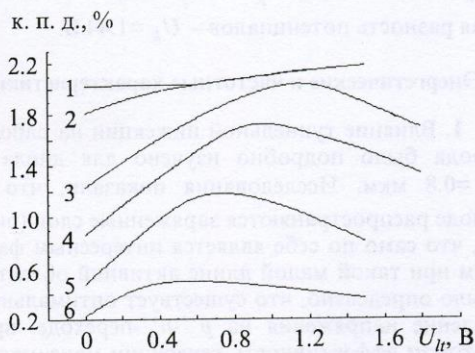


Рис. 3. Зависимость эффективности генерации диода с $l_a=0.8$ мкм на частоте 110 ГГц от амплитуды колебания напряжения на $p^{++}-n^{++}$ -переходе при различном напряжении смещения на $p^{++}-n^{++}$ -переходе: 1 - $U_{0r}=0.6$ В; 2 - $U_{0r}=1.5$ В; 3 - $U_{0r}=2.1$ В; 4 - $U_{0r}=2.4$ В; 5 - $U_{0r}=2.7$ В; 6 - $U_{0r}=3.0$ В

2. Для определения граничной частоты генерации были исследованы диоды с различной длиной активной области.

При уменьшении длины активной области эффективность генерации падает (рис. 4). Это связано, как и в диодах с высокоомной неоднородностью у катода [2], с увеличением влияния инерционности МПЭ. Область эффективного взаимодействия поля с электронами все больше смещается к аноду, и тем самым как бы уменьшается эффективная длина активной области. При этом становится меньше амплитуда колебания тока и увеличивается средняя составляющая плотности тока в диоде. Сокращается, относительно периода колебания, промежуток времени дрейфа заряженного слоя, а значит, ухудшаются фазовые характеристики колебаний тока в диоде. При длине диода 0.5 мкм на зависимости средней плотности тока в диоде от времени уже отсутствует об-

ласть, характеризующая дрейф заряженного слоя, т. е. за время пролета электронов от катода к аноду заряженные слои не успевают сформироваться.

Следует отметить, что инжекция электронов приводит к значительному сокращению "мертвой зоны". При всех длинах активной области диода у катода присутствует достаточно высокая заселенность электронами боковой долины при низком (меньше порогового значения) поле, что обеспечивает быстрое формирование заряженных слоев. Тем самым происходит уменьшение длины "мертвой зоны" без локального увеличения поля. Учитывая также, что скорость распространения заряженных слоев несколько выше, чем дипольных доменов, граничная частота генерации составила ~ 320 ГГц ($l_a=0.4$ мкм), что на ~ 40 ГГц больше, чем в диодах с двухзонным катодом [4] (рис. 4).

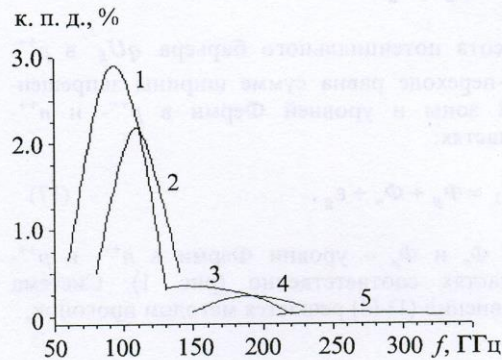


Рис. 4. Зависимость эффективности генерации диода от частоты при различных значениях длины активной области и фазового сдвига между колебанием напряжения на диоде и $p^{++}-n^{++}$ -переходе: 1 - $l_a=1.0$ мкм; 2 - $l_a=0.8$ мкм; 3 - $l_a=0.5$ мкм, $\varphi=\pi/2$; 4 - $l_a=0.5$ мкм, $\varphi=0$; 5 - $l_a=0.4$ мкм

3. В исследовании учитывался возможный эффект сдвига фазы колебаний между напряжениями на активной области и на $p^{++}-n^{++}$ -переходе.

Вырожденный $p^{++}-n^{++}$ -переход обладает значительной емкостью, которая зависит от падения напряжения на нем. Последовательно соединенный $p^{++}-n^{++}$ -переход и активная область диода Ганна представляют собой сильно нелинейную R-С-цепь. Нелинейность обусловлена нелинейностью вольт-амперной характеристики активной области и $p^{++}-n^{++}$ -перехода, а также нелинейностью распределения общего напряжения между активной областью и $p^{++}-n^{++}$ -переходом.

Были исследованы диоды с $l_a=0.5$ мкм и со сдвигом фазы ϕ между колебаниями напряжений на активной области и на $p^{++}-n^{++}$ -переходе.

Оценки показали, что на частоте 200 ГГц при напряжении на активной области ~ 1.05 В ($6U_n$, U_n – пороговое напряжение) временная задержка составляет от $2.56 \cdot 10^{-11}$ до $9.48 \cdot 10^{-11}$ с, что соответствует сдвигу фазы $\sim (-\pi/2)$.

На рис. 4 (кривые 3, 4) видно, что задержка инжекции электронов приводит к увеличению эффективности и уменьшению оптимальной частоты генерации. При запаздывании инжекции электронов происходит изменение амплитуды и фазы колебаний тока, что и сказывается на выходных характеристиках диода.

Заключение

Исследование основных физических явлений, лежащих в основе работы диода с $p^{++}-n^{++}$ -катодом, а также анализ его выходных характеристик позволяет сделать следующие выводы.

1. В диоде Ганна с туннельной инжекцией электронов распространяются заряженные слои.

2. Существует оптимальное падение напряжения на $p^{++}-n^{++}$ -переходе, при котором эффективность генерации колебаний диодом максимальная. Оптимум напряжения обусловлен оптимальным соотношением амплитуды и фазы колебания тока в диоде. При увеличении падения напряжения ухудшаются амплитудные, но улучшаются фазовые характеристики колебаний тока в диоде.

3. Частотный предел работы диода составляет ~ 320 ГГц при длине активной области 0.4 мкм.

4. Задержка инжекции электронов через $p^{++}-n^{++}$ -переход приводит к уменьшению оптимальной частоты и увеличению максимальной эффективности генерации колебаний.

Таким образом, проведенные исследования показали принципиальную возможность и перспективность использования рассмотренных диодов в качестве активных элементов в генераторах и усилителях мм- и субмм-диапазонов длин волн.

Литература

1. А. А. Кальфа, С. И. Конопляников, С. Б. Пореш, А. С. Тагер. Физика и техника полупроводников. 1981, **15**, №7, с. 1359-1362.
2. Ю. В. Аркуша, А. А. Дрогаченко, Э. Д. Прохоров. Радиотехника и электроника. 1987, **32**, №5, с. 1050-1054.

3. Ю. В. Аркуша, А. А. Дрогаченко, Э. Д. Прохоров. Радиотехника и электроника. 1988, **33**, №6, с. 1336-1337.
4. А. А. Кальфа, А. С. Тагер. Электронная техника. Сер. 1, Электроника СВЧ. 1982, Вып. 10, **17**, с. 17-21.
5. Ю. В. Аркуша, А. А. Дрогаченко, Э. Д. Прохоров. Радиотехника и электроника. 1988, **33**, №6, с. 1295-1299.
6. В. Е. Чайка, Г. Е. Чайка. Электронная техника. Сер. 1, Электроника СВЧ. 1985, Вып. 7, **37**, с. 37-40.
7. Ю. В. Аркуша, Э. Д. Прохоров, И. П. Стороженко. Радиотехника и электроника. 1996, **41**, №2, с. 248-252.
8. Ю. В. Аркуша, Э. Д. Прохоров, И. П. Стороженко. Применение радиоволн мм и субмм диапазонов. Сб. науч. тр. Харьков, ИРЭ НАН Украины. 1994, с. 78-85.
9. N. R. Couch, P. H. Beton, M. J. Kelly et. al. Solid State Electron. 1988, **31**, №3-4, pp. 2-4.
10. Э. Д. Прохоров, Н. И. Белецкий. Полупроводниковые материалы для приборов с межмолекулярным переносом электронов. Харьков, Вища школа. Издательство при Харьковском университете. 1982, 144 с.
11. Ю. В. Аркуша, Э. Д. Прохоров. Труды межведомственной научно-технической конференции "Приборы, техника и распространение мм, субмм волн", 30 июня – 3 июля 1992, Харьков. Высшая инженерная радиотехническая академия, 1992, с. 37.
12. M. E. Elta, G. I. Haddan. IEEE Trans. Electron. Devices. 1978, **ED-25**, pp. 694-701.
13. С. Зи. Физика полупроводниковых приборов. Москва, Мир, 1984, т. 1, 456 с.

Gunn Diode with Tunnel $p^{++}-n^{++}$ -cathode

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

The method for investigation of the diodes with degenerate $p^{++}-n^{++}$ -junction in cathode contact is developed on the base of GaAs two-temperature model. Tunnel injection from the cathode is taken into account by imposing the boundary conditions on the set of equations for the two-temperature model.

The diodes with the active region lengths from 0.4 to 1.0 μm are investigated. It is shown, that the extending of accumulation layers in the diodes with tunnel electron injection gives rise to the current instabilities in the submm-range. It is examined how the diode output characteristics are affected by both the voltage across the $p^{++}-n^{++}$ -junction and the time of delay for electron injection on account of the junction capacity. The limiting generation frequency in the diode is found to be ~ 320 GHz.