

Диоды Ганна на основе варизонного $\text{Al}_{x(z)}\text{Ga}_{1-x(z)}\text{As}$ с различными катодными контактами

И. П. Стороженко

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

Статья поступила в редакцию 24 февраля 2006 г.

С помощью двухуровневой модели междолинного переноса электронов в варизонном полупроводнике исследована работа диодов Ганна на основе варизонного $\text{Al}_{x(z)}\text{Ga}_{1-x(z)}\text{As}$ с $n^+ - n$ и $n^+ - n^- - n$ катодами при различной длине активной области и толщине варизонного слоя. Показано, что $\text{Al}_{x(z)}\text{Ga}_{1-x(z)}\text{As}$ диоды по выходной мощности и эффективности генерации во всем диапазоне частот превосходят диоды на основе пространственно однородных по составу полупроводниковых соединений $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ при $x = 0 \div 0.2$.

Введение

У диодов, работающих на эффекте междолинного переноса электронов (МПЭ), частотный предел генерации электромагнитных колебаний в основном обусловлен инерционностью МПЭ, скоростью разогрева электронного газа вблизи катодного контакта и большим полем анодного контакта. Область эффективного взаимодействия поля с подвижной неустойчивостью заряда сокращается как со стороны катода, так и анода. Для частичного устранения этих причин традиционно используют всевозможные катодные и анодные контакты (см. например, [1-5]). Другой путь увеличения предельной частоты генерации диодов состоит в поиске полупроводниковых материалов, частотные возможности которых выше, чем у GaAs или InP. Среди перспективных в этом плане материалов можно назвать тройные соединения InGaAs, InPAs [6], а также бинарные нитриды GaN, AlN [7]. Метод, который объединяет эти два направления и приводит к некоторым совершенно новым эффектам, заключается в использовании полупроводниковых соединений, состав которых плавно изменяется с координатой,

т. е. варизонных полупроводников [8-11]. В диодах на основе варизонного тройного полупроводникового соединения выходные характеристики зависят от распределения состава полупроводника вдоль активной области диода. В работах [9, 10] на основе двухтемпературной модели исследованы энергетические и частотные характеристики диодов Ганна на основе варизонного $\text{In}_{x(z)}\text{Ga}_{1-x(z)}\text{As}$ с различными катодными контактами в широких интервалах толщин варизонного слоя и частот. Расчеты показывают, что по выходной мощности, эффективности генерации (КПД), ширине частотного диапазона работы и предельной частоте генерации при оптимальной толщине варизонного слоя такие диоды могут превосходить аналогичные диоды с другими известными типами катодных контактов на основе пространственно однородных по составу полупроводников A_3B_5 [1-5]. В работе [11] этот эффект подтвержден на ряде других тройных варизонных соединений, в частности на $\text{InP}_{1-x(z)}\text{As}_{x(z)}$ и $\text{Al}_{x(z)}\text{Ga}_{1-x(z)}\text{As}$. Полупроводниковое соединение $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x(z)}\text{As}$ по оценкам, сделанным в работе [12], не является перспективным высокочастотным материа-

лом для диодов Ганна. Однако это соединение широко используется в GaAs диодах Ганна как составной элемент гетероперехода. В ряде теоретических и экспериментальных публикаций отмечается повышение выходной мощности и частотного предела работы диодов Ганна с $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x(z)}\text{As}/\text{GaAs}$ гетерокатодом [13-17]. А в работе [8] $\text{Al}_{x(z)}\text{Ga}_{1-x(z)}\text{As}$ варизонный слой у анодного контакта GaAs диода Ганна сантиметровой диапозона использовался для расширения частотного диапазона работы. В связи с этим возникает необходимость исследовать работу $\text{Al}_{x(z)}\text{Ga}_{1-x(z)}\text{As}$ варизонных диодов Ганна (рис. 1) с разными катодными контактами в широком интервале частот, выявить основные закономерности, связанные с МПЭ, определить частотный предел работы и дать объяснение результатам работы диодов с $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ гетерокатодом, полученных ранее, например, в работах [13-17].

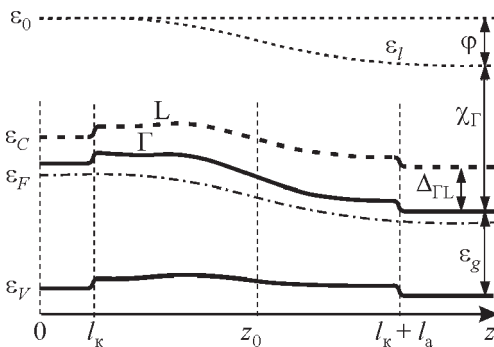


Рис. 1. Схематическая зонная диаграмма диода $\text{Al}_{x(z)}\text{Ga}_{1-x(z)}\text{As}$ с варизонным слоем ($x(z)$ – убывающая функция): ϵ_0 – уровень вакуума при отсутствии внешних сил; ϵ_l – уровень вакуума в присутствии внешних сил (локальный); ϵ_C – дно зоны проводимости (энергетический минимум Γ -долины); ϵ_F – энергетический уровень Ферми; ϵ_V – потолок валентной зоны; ϵ_g – ширина запрещенной зоны; Γ – энергетический минимум Γ -долины; L – энергетический минимум L -долины; $\Delta_{\Gamma L}$ – энергетический зазор между минимумами Γ - и L -долин; χ_Γ – энергия электронного сродства; ϕ – потенциал внешних сил; z – координата; l_k – длина катода; l_a – длина активной зоны

Методика исследования и электрофизические параметры диода

Исследования проводились на основе двухтемпературной модели МПЭ в варизонном полупроводнике. Использовалась система, состоящая из уравнений непрерывности, плотности тока, баланса энергии электронов для двух долин зоны проводимости и уравнения Пуассона [9, 10]:

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} = -\frac{1}{e} \frac{\partial J_i}{\partial z} - n_i \nu_{ni} + n_j \nu_{nj},$$

$$J_i = en_i \mu_i E + n_i \mu_i \frac{\partial \chi_i}{\partial z} - k \mu_i \frac{\partial (n_i T_i)}{\partial z} + \frac{3}{2} k \frac{\mu_i n_i T_i}{m_i} \frac{\partial m_i}{\partial z},$$

$$\frac{3}{2} k \frac{\partial n_i T_i}{\partial t} = J_i E + \frac{1}{e} J_i \frac{\partial \chi_i}{\partial z} - \frac{5}{2} k \frac{1}{e} \frac{\partial (J_i T_i)}{\partial z} - kn_i T_i \nu_{ei} + kn_j T_j \nu_{ej},$$

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

где индексы i, j относятся соответственно к центральной (Γ -долина) и одной из боковых долин (X - или L -долина) или наоборот, когда речь идет о процессах в боковой долине. Здесь $n_i, \mu_i, m_i, J_i, T_i$ – соответственно концентрация, подвижность, эффективная масса, плотность тока и температура электронов в i -й долине; ν_n и ν_e – частоты релаксации электронов, усредненные соответственно по концентрации и энергии; χ_i – энергия, необходимая, чтобы перевести электроны с энергетического минимума i -й долины до локального уровня вакуума; E – напряженность электрического поля; n_0 – концентрация ионизированных доноров; ϵ – диэлектрическая проницаемость; e – модуль заряда электрона; k – постоянная Больцмана; t – время; z – координата.

Процентная доля AlAs в соединении $\text{Al}_{x(z)}\text{Ga}_{1-x(z)}\text{As}$ зависит от координаты z и определяется из выражения:

$$x(z) = \frac{x_1 - x_2}{1 + \exp(4(z - z_0)/l_v)} + x_2,$$

где x_1 и x_2 – предельное содержание AlAs в $\text{Al}_{x(z)}\text{Ga}_{1-x(z)}\text{As}$ соответственно на $-\infty$ и $+\infty$; z_0 – координата центра варизонного слоя; l_v – толщина варизонного слоя. Электрофизические параметры бинарных полупроводников GaAs и AlAs взяты из работ [11, 12]. Энергия электронного сродства χ_Γ в GaAs – 4.07 эВ и в AlAs – 2.62 эВ. Параметры промежуточных по составу соединений, между GaAs и AlAs, определялись из предположения о линейной зависимости параметров соединения от $x(z)$. Содержание AlAs в $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ не должно превышать 30 %, так как при большем содержании AlAs из-за слишком малого значения $\Delta_{\Gamma L}$ увеличивается заселенность электронами боковых долин и эффект МПЭ отсутствует [12]. Координата центра варизонного слоя z_0 совпадает с центром активной области (рис. 1).

Для того чтобы найти предельную частоту генерации, длина активной области l_a постепенно снижалась от 2.5 до 0.5 мкм. Концентрация ионизированных примесей в активной области n_0 находилась из соотношения $n_0 l_a = 2.5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. В качестве анодного контакта использовался $n-n^+$ контакт. Температура кристаллической решетки T_0 считалась постоянной, равной 300 К. На диод подавалось синусоидальное напряжение с постоянной составляющей, что соответствует помещению диода в одноконтурный резонатор. Выходные характеристики оптимизировались для разных частот по напряжению смещения и амплитуде первой гармоники. Вычисления эффективности генерации диодов производилось для 2-го и 3-го периодов колебаний.

Варизонные диоды с омическим катодом ($n^+ - n$)

В диодах с $\text{Al}_{x(z)}\text{Ga}_{1-x(z)}\text{As}$ варизонным слоем в зависимости от направления изменения состава полупроводникового соединения по всей длине активной области распространяются дипольные домены или за-

ряженные слои. Если процентная доля AlAs в $\text{Al}_{x(z)}\text{Ga}_{1-x(z)}\text{As}$ убывает от катода к аноду ($\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ -GaAs диоды) то в диоде распространяются дипольные домены. Если процентная доля AlAs в $\text{Al}_{x(z)}\text{Ga}_{1-x(z)}\text{As}$ возрастает от катода к аноду (GaAs- $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ диоды), то, как в диодах на основе пространственно однородных по составу полупроводников (GaAs, $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$, $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$), распространяются заряженные слои. Причины этого явления лежат в непостоянной у катодного контакта скорости переноса электронов из Γ -долины в боковые долины ($v_{n\Gamma}$). В диодах на основе варизонных полупроводниковых соединений, у которых в активной области в силу зависимости от координаты всех параметров полупроводника, $v_{n\Gamma}$ – убывающая функция координаты при постоянной электронной температуре, распространяются дипольные домены [9, 11]. В варизонном $\text{Al}_{x(z)}\text{Ga}_{1-x(z)}\text{As}$ это имеет место, когда $x(z)$ – убывающая функция координаты, т. е. процентная доля AlAs в $\text{Al}_{x(z)}\text{Ga}_{1-x(z)}\text{As}$ уменьшается от катода к аноду.

Если толщина $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ -GaAs варизонного слоя во много раз превышает длину активной зоны диода ($l_v \gg l_a$), то состав полупроводника в активной области меняется несущественно, оставаясь во всем диоде приблизительно одинаковым на уровне $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$. В таких диодах, как и в диодах на основе $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$, возникают и распространяются заряженные слои. Выходные характеристики $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ -GaAs и $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ диодов почти идентичны. По мере уменьшения l_v , начиная с $\sim 20 \div 25$ мкм, на работу диода начинает влиять зависимость электрофизических параметров полупроводника от координаты. Электроны, которые находятся у катода, быстрее и при меньших уровнях энергии переходят в боковые долины. Длина области разогрева электронов у катода (“холодная” зона) уменьшается. Этот процесс сопровождается ростом эффективности генерации и выходной мощности (см. рис. 2, сплошная кривая 1). Возле катодного контакта из-за координатной зависимости скорости переноса электронов в боковые долины возникает простран-

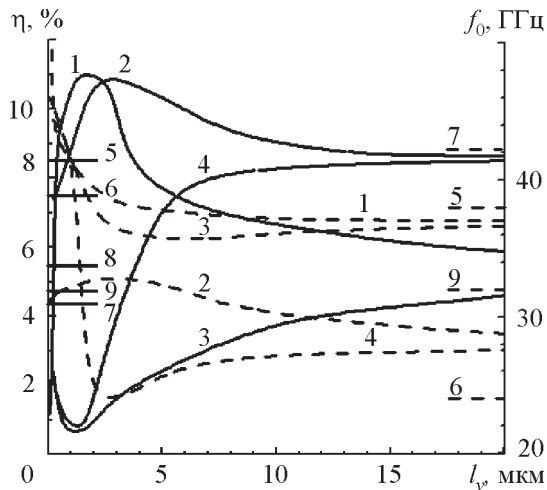


Рис. 2. Зависимость эффективности (сплошные кривые) и оптимальной частоты (пунктирные кривые) генерации диодов с различными катодными контактами и длиной активной области 2.5 мкм от толщины варизонного слоя: кривая 1 – $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ -GaAs диод с n^+ - n^- - n катодом; кривая 2 – $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ -GaAs диод с n^+ - n^- - n катодом; кривая 3 – GaAs- $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ диод с n^+ - n^- катодом; кривая 4 – GaAs- $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ диод с n^+ - n^- - n катодом; кривая 5 – GaAs диод с n^+ - n^- - n катодом; кривая 6 – $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ диод с n^+ - n^- - n катодом; кривая 7 – GaAs диод с n^+ - n катодом; кривая 8 – $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ диод с n^+ - n катодом; кривая 9 – $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ диод с n^+ - n катодом

ственная неоднородность концентрации электронов в боковых долинах зоны проводимости. В таких диодах у катодного контакта формируются дипольные домены. На значительном промежутке длины варизонного слоя от ~4 до ~10 мкм нельзя однозначно определить тип пространственной неустойчивости заряда, который распространяется в диоде. Преобразование режима, при котором в диоде распространяются заряженные слои, в режим с дипольными доменами по мере уменьшения длины варизонного слоя происходит постепенно. Поэтому лишь приблизительно можно выделить длину варизонного слоя $l_v \approx 5$ мкм, при которой в диоде начинается распространение неустойчивостей заряда, передний фронт которых обеднен носителями заряда, т. е. дипольных доменов. Этот про-

цесс сопровождается более резким ростом эффективности и оптимальной частоты генерации при уменьшении l_v (рис. 2, кривые 1). Возрастание оптимальной частоты генерации связано с тем, что в половине активной области, примыкающей к аноду, доля GaAs в $\text{Al}_{x(z)}\text{Ga}_{1-x(z)}\text{As}$ возрастает, что приводит к росту скорости дрейфа дипольных доменов. Дело в том, что минимальная дрейфовая скорость электронов в GaAs в ~1.4 раза больше, чем в $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$.

В случае $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ -GaAs диодов существует оптимальная толщина варизонного слоя, при которой эффективность генерации и выходная мощность достигают максимального значения. В диоде с длиной активной области 2.5 мкм оптимальная толщина варизонного слоя составляет ~1.9 мкм. Оптимальное значение толщины варизонного слоя обусловлено тем, что градиент процентного содержания AlAs в $\text{Al}_{x(z)}\text{Ga}_{1-x(z)}\text{As}$ у катода достигает своего максимального значения при $l_v \approx l_a$. При уменьшении l_v от значения l_a область с максимальной неоднородностью состава полупроводника сосредотачивается в центре активной области. В окрестности катода и анода состав полупроводника становится однородным, соответственно $x(z) \approx 0.2$ ($\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$) у катода и $x(z) \approx 0$ (GaAs) у анода. Поэтому пространственная неоднородность скорости переноса электронов из центральной долины в боковые у катода уменьшается. Условия зарождения дипольных доменов у катодного контакта ухудшаются. Кроме того, при короткой длине варизонного слоя ($l_v < 1$ мкм) на работу диода оказывает влияние электрическое поле варизонного слоя, которое уменьшает энергию электронов в центре активной области и является дополнительным фактором рассасывания дипольных доменов. Следовательно, при уменьшении l_v от оптимального значения ухудшаются как условия формирования дипольных доменов у катода, так и условия дрейфа доменов в центре активной области. Эффективность генерации и выходная мощность падают (рис. 2, сплошная кривая 1).

При $l_v \approx 0.3$ мкм в диоде возникают два центра формирования дипольных доменов: область катода и центр варизонного слоя, который совпадает с центром активной зоны. На низких частотах формируются дипольные домены в окрестности катода. Они дрейфуют вдоль активной области, частично рассасываются на варизонном слое и вновь дрейфуют уже во второй половине активной зоны. На высоких частотах дипольные домены образуются только в варизонном слое. В этом случае длина пролетной области составляет половину длины активной зоны. Частота колебаний увеличивается приблизительно в два раза. Формирование дипольных доменов в варизонном слое и у катода соответствует разным питающим напряжениям. В результате диод имеет непрерывную перестройку частоты в интервале $30 \div 85$ ГГц (этот факт экспериментально подтвержден в работе [8]). Если l_v становится еще меньше, то суммарное электрическое поле в варизонном слое приобретает направление, противоположное направлению внешнего поля. Длина варизонного слоя сравнима с длиной свободного пробега электронов, что уменьшает рассеяние электронов на междолинных центрах. Преимущество варизонной области как области с пространственно неоднородной частотой релаксации электронов утрачивается. Низкое значение поля и небольшая длина варизонного слоя делают невозможным зарождение дипольных доменов. Уже за варизонным слоем, или, точнее, за обогащенной электронами областью, формируются заряженные слои. Оптимальная частота колебаний увеличивается примерно в 2 раза и составляет 65 ГГц, а эффективность генерации падает до 1.2%. В этом случае выходные характеристики диодов соответствуют характеристикам диодов с $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ гетеропереходом в центре активной области.

По выходной мощности и эффективности генерации диоды с $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}-\text{GaAs}$ варизонным слоем превосходят $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$, $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ и GaAs диоды как с $n^+ - n$ катодом при $l_v > 0.5$ мкм, так и с $n^+ - n^- - n$ катодом при $l_v = 0.5 \div 3.7$ мкм (рис. 2).

В $\text{GaAs}-\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ диодах $v_{n\Gamma}$ является возрастающей функцией координаты. В диодах происходят формирование и дрейф заряженных слоев. При уменьшении l_v длина “холодной” зоны растет, эффективность генерации и выходная мощность падают (рис. 2, сплошная кривая 3). Оптимальная частота генерации первоначально при уменьшении l_v незначительно уменьшается (рис. 2, пунктирная кривая 3), что связано с увеличением содержания AlAs в $\text{Al}_{x(z)}\text{Ga}_{1-x(z)}\text{As}$ в активной области у анода. В результате скорость дрейфа заряженных слоев у анодного контакта уменьшается. Когда $l_v \approx 3$ мкм, влияние координатной зависимости $v_{n\Gamma}$ становится столь сильным, что приводит к смещению области формирования заряженных слоев в сторону анода. Область эффективного взаимодействия поля с дрейфующими заряженными слоями сокращается, частота колебаний увеличивается. При $l_v \approx 1.2$ мкм значения эффективности генерации и выходной мощности достигают своих минимальных значений (рис. 2, сплошная кривая 3). Дальнейшее уменьшение l_v приводит к росту КПД и выходной мощности. Это связано (как и для $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}-\text{GaAs}$ диодов) с влиянием внутреннего поля варизонного слоя. Внутреннее поле $\text{GaAs}-\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ варизонного слоя и внешнее поле имеют одинаковое направление. Электрическое поле в центре активной области возрастает. Первоначально узкий варизонный слой приводит только к расширению частотного диапазона работы диода в сторону высоких частот за счет формирования заряженных слоев как у катода, так и в центре активной области. Однако минимальная скорость дрейфа электронов в GaAs в ~ 1.7 раза больше, чем в $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$. Поэтому, хотя заряженные слои формируются в центре активной области $\text{GaAs}-\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ диода (длина пролетной области сокращается), скорость их дрейфа в ~ 1.7 меньше, чем в таком же $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}-\text{GaAs}$ диоде. По этой причине ширина частотного диапазона работы $\text{GaAs}-\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ диода при $l_v \approx 1.2$ мкм составляет всего 30 ГГц (от 25 до 55 ГГц) с максимальным значением КПД $\sim 0.6\%$ на частоте ~ 40 ГГц.

По мере уменьшения толщины варизонного слоя формирование неустойчивостей заряда начинает определяться электрическим полем варизонного слоя. Электроны на длине варизонного слоя набирают энергию достаточную для перехода в боковые долины. Кроме того, в $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ скорость переноса электронов из центральной долины в боковые больше, чем в GaAs. В результате в центре активной зоны, на варизонном слое, формируются дипольные домены. Однако из-за низкой скорости дрейфа электронов в $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ оптимальная частота колебаний увеличивается незначительно и составляет ~ 45 ГГц. Следует отметить, что переход в режим генерации в одной половине активной области, примыкающей к аноду, в GaAs- $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ диодах происходит при большей длине варизонного слоя, чем в $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ -GaAs диодах. По-видимому, это связано с различием направлений внутренних полей, возникающих в варизонных слоях.

Уменьшение длины активной области приводит к возрастанию отрицательного влияния на работу диода инерционности МПЭ, высокого поля анодного контакта и длины “холодной” зоны. Все эти факторы сокращают длину области эффективного взаимодействия поля с электронным газом. Эффективность генерации и выходная мощность падают. Однако общая картина зависимости выходных характеристик от толщины варизонного слоя и направления изменения состава полупроводникового соединения при уменьшении длины активной зоны сохраняется (рис. 3, сплошные кривые).

Оптимальное значение толщины $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ -GaAs варизонного слоя в диоде с 1.5-мкм активной зоной составляет ~ 1.7 мкм. При толщинах варизонного слоя ($0.15 \div 0.3$ мкм) неустойчивости заряда распространяются как по всей длине активной области, так и только в примыкающей к аноду половине активной области. При $l_v < 0.15$ мкм неустойчивости заряда распространяются только в примыкающей к аноду половине активной области с максимальным значением КПД ~ 0.14 %. У дио-

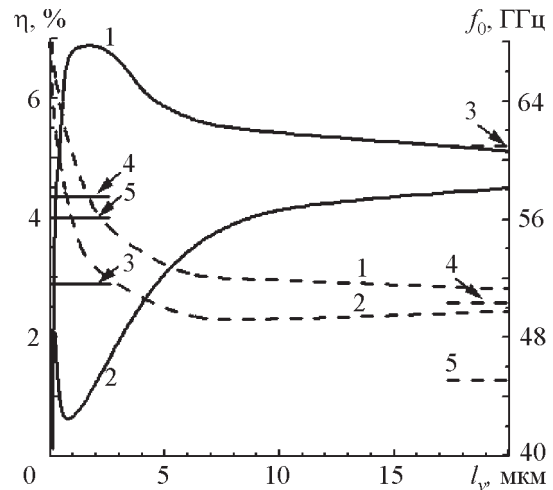


Рис. 3. Зависимость эффективности (сплошные кривые) и оптимальной частоты (пунктирные кривые) генерации диодов с n^+ - n катодом и длиной активной области 1.5 мкм от толщины варизонного слоя: кривая 1 – $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ -GaAs диод; кривая 2 – GaAs- $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ диод; кривая 3 – GaAs диод; кривая 4 – $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ диод; кривая 5 – $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ диод

дов с $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ -GaAs варизонным слоем эффективность генерации больше, чем у диодов на основе $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$, $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ и GaAs, если $l_v > 0.36$ мкм.

Зависимость эффективности генерации от l_v диодов с GaAs- $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ варизонным слоем с длиной активной области 1.5 и 2.5 мкм похожи (рис. 2, 3). При $l_v = 1.5$ мкм эффективность генерации и выходная мощность достигают минимальных значений, соответственно 0.66 % и 0.4 кВт/см² при максимальной ширине частотного диапазона 50 ГГц (от 30 до 80 ГГц), что связано с распространением неустойчивостей заряда по всей длине активной области или в примыкающей к аноду половине активной области. Если l_v меньше, чем $0.3 \div 0.4$ мкм, то в диоде неустойчивости заряда распространяются только в примыкающей к аноду половине активной области. При уменьшении l_v оптимальные частоты генерации в $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ -GaAs диодах возрастают на 34 %, а в GaAs- $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ диодах сначала падают на 2 %, а затем возрастают на 39 % (рис. 3, пунктирные кривые 1, 2). Причем оптималь-

ные частоты генерации $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}-\text{GaAs}$ диодов выше, чем $\text{GaAs}-\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$.

В диодах с длиной активной области 0.8 мкм максимальные значения эффективности генерации и выходной мощности становятся еще меньше (рис. 4, сплошные кривые 2, 4). Максимальное значение потока выходной мощности $\sim 1.9 \text{ кВт/см}^2$ достигается в $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}-\text{GaAs}$ диодах с толщиной варизонного слоя $\sim 0.9 \text{ мкм}$ на частоте $\sim 98 \text{ ГГц}$ с КПД $\sim 2 \%$. При $l_v > 0.53 \text{ мкм}$ $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}-\text{GaAs}$ диоды по выходной мощности и эффективности генерации превосходят диоды на основе $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$, $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ и GaAs . Однако при такой длине активной области варизонные диоды имеют критическое значение толщины варизонного слоя, т. е. значение, при котором диод теряет активные свойства по генерации электромагнитных колеба-

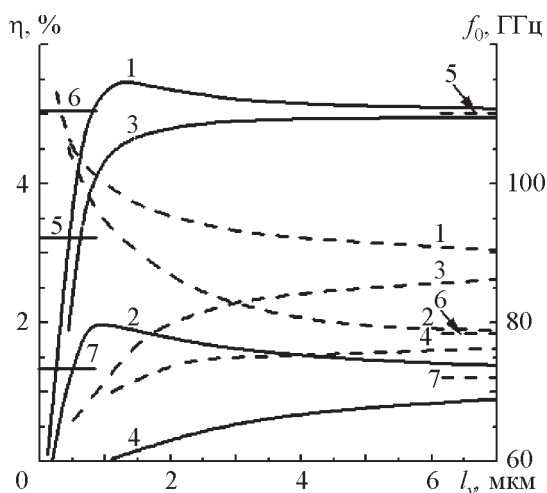


Рис. 4. Зависимость эффективности (сплошные кривые) и оптимальной частоты (пунктирные кривые) генерации диодов с различными катодными контактами и длиной активной области 0.8 мкм от толщины варизонного слоя: кривая 1 – $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}-\text{GaAs}$ диод с n^+-n катодом; кривая 2 – $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}-\text{GaAs}$ диод с $n^+-n^- - n$ катодом; кривая 3 – $\text{GaAs}-\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ диод с n^+-n катодом; кривая 4 – $\text{GaAs}-\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ диод с $n^+-n^- - n$ катодом; кривая 5 – GaAs диод с $n^+-n^- - n$ катодом; кривая 6 – $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ диод с $n^+-n^- - n$ катодом; кривая 7 – $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ диод с $n^+-n^- - n$ катодом

ний. Так, в $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}-\text{GaAs}$ диодах критическое значение l_v составляет $\sim 0.2 \text{ мкм}$, а в $\text{GaAs}-\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ диодах – $\sim 1.0 \text{ мкм}$. Существование критических значений l_v связано с тем, что в том случае, когда неустойчивости заряда зарождаются в варизонном слое, длина области их дрейфа составляет половину длины активной области, т. е. $\sim 0.4 \text{ мкм}$. Это значение длины является слишком малым для эффективного взаимодействия электрического поля с дрейфующей неустойчивостью заряда, характерного для приборов с МПЭ. Поэтому режимы работы диодов, когда неустойчивости заряда дрейфуют в примыкающей к аноду половине активной области (а это происходит только при малых значениях l_v), не приводят к генерации электромагнитных колебаний.

У $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}-\text{GaAs}$ диодов оптимальные частоты генерации также выше, чем у $\text{GaAs}-\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ диодов (рис. 4, пунктирные кривые 2, 4). Следует отметить, что в субмикронных диодах влияние толщины варизонного слоя на частотные свойства возрастает. Так, в $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}-\text{GaAs}$ диодах оптимальные частоты генерации увеличиваются при уменьшении l_v на 39 %, а в $\text{GaAs}-\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ диодах падают на 9 %. Необходимо при этом учитывать, что генерация колебаний происходит только в режиме дрейфа неустойчивостей заряда по всей длине активной области.

Экстраполяция зависимостей эффективности генерации от частоты позволяет выявить критическую частоту генерации диодов с n^+-n катодным контактом и $\text{Al}_{x(z)}\text{Ga}_{1-x(z)}\text{As}$ варизонным слоем. Критическая частота генерации диодов с $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}-\text{GaAs}$ слоем составляет $\sim 125 \text{ ГГц}$ (рис. 6, кривая 5) при оптимальной толщине варизонного слоя приблизительно равной длине активной области. Критическая частота генерации диодов с $\text{GaAs}-\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ слоем составляет $\sim 82 \text{ ГГц}$ при оптимальной толщине варизонного слоя значительно больше длины активной области, что сходно с характеристиками $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ диодов (рис. 6, кривая 7).

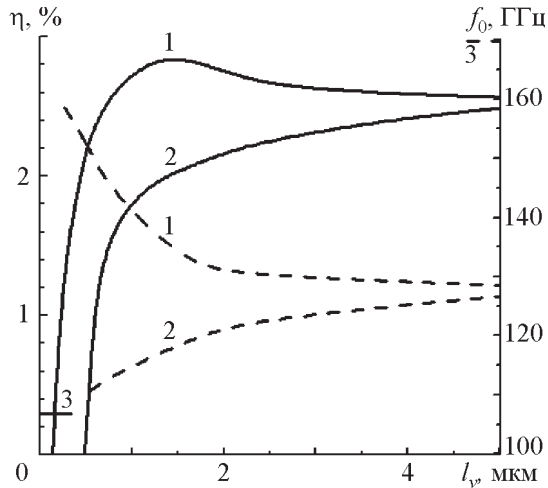


Рис. 5. Зависимость эффективности (сплошные кривые) и оптимальной частоты (пунктирные кривые) генерации диодов с $n^+ - n^- - n$ катодом и длиной активной области 0.8 мкм от толщины варизонного слоя: кривая 1 – $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As} - \text{GaAs}$ диод; кривая 2 – $\text{GaAs} - \text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ диод; кривая 3 – GaAs диод

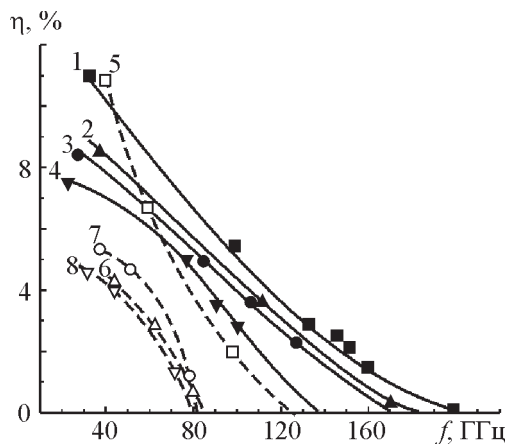


Рис. 6. Зависимость эффективности генерации от частоты для диодов с разной длиной активной области: кривые 1, 5 – $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As} - \text{GaAs}$ диоды; кривые 2, 6 – GaAs диоды; кривые 3, 7 – $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ диоды; кривые 4, 8 – $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ диоды. Сплошные кривые – диоды с $n^+ - n^- - n$ катодом. Пунктирные кривые – диоды с $n^+ - n$ катодом

Варизонные диоды с “зарубкой” у катода ($n^+ - n^- - n$)

Высокое поле на катодном контакте приводит к тому, что независимо от того, уменьшается процентная доля AlAs в варизонном $\text{Al}_{x(z)}\text{Ga}_{1-x(z)}\text{As}$ или растет от като-

да к аноду, в диоде происходит зарождение и дрейф дипольных доменов. Однако в зависимости от толщины варизонного слоя неустойчивости заряда также могут возникать как у катода, так и в центре активной области. Выходные характеристики диодов с разными типами катодных контактов различаются больше всего в области, где $l_v \gg l_a$. В этом случае влияние варизонного слоя мало. Все различия соответствуют различиям для диодов с $n^+ - n^- - n$ и $n^+ - n$ катодом. Например, максимальные значения выходной мощности и КПД в диодах с $n^+ - n^- - n$ катодом больше, чем с $n^+ - n$ катодом, а оптимальная частота генерации меньше (рис. 2, сплошные кривые). При уменьшении толщины варизонного слоя влияние координатной зависимости состава полупроводника на работу диода усиливается. Различия между выходными характеристиками уменьшаются. В случае, когда толщина варизонного слоя сравнима с длиной активной области, физические процессы в $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As} - \text{GaAs}$ диодах с $n^+ - n^- - n$ и $n^+ - n$ катодом становятся во многом похожими. В обоих случаях вдоль всей длины активной области распространяются дипольные домены. Максимальные значения КПД и выходной мощности в диодах с длиной активной области 2.5 мкм с разными типами катода почти одинаковы и составляют $\sim 11\%$. Следовательно, варизонный слой оказывает на работу диода большее влияние, чем тип катодного контакта. Однако оптимальное значение толщины варизонного слоя в диоде с $n^+ - n^- - n$ катодом составляет ~ 2.8 мкм, что на ~ 0.9 мкм больше, чем в диоде с $n^+ - n$ катодом. Отличаются также частотные свойства (рис. 2, пунктирные кривые). Например, оптимальные частоты генерации диодов с $n^+ - n^- - n$ катодом меньше, чем у диода с $n^+ - n$ катодом, причем зависимость оптимальной частоты генерации от толщины варизонного слоя сильнее, чем в диоде с $n^+ - n$ катодом. В случае диодов с $n^+ - n^- - n$ катодом отчетливо прослеживается, что при уменьшении толщины варизонного слоя оптимальная частота в $\text{GaAs} - \text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ диодах убывает, а в $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As} - \text{GaAs}$ диодах возрас-

тает. Это связано с различием координатной зависимости минимальной дрейфовой скорости электронов в активной области диода. В $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}-\text{GaAs}$ диодах минимальная дрейфовая скорость электронов в активной области возрастает от $\sim 5 \cdot 10^6$ см/с в $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ у катода до $\sim 9 \cdot 10^6$ см/с в GaAs у анода. По мере движения дипольный домен как бы ускоряется за счет координатной зависимости свойств полупроводника. В $\text{GaAs}-\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ диодах минимальная дрейфовая скорость электронов, наоборот, убывает. По мере продвижения от катода к аноду дипольный домен тормозится не только за счет роста заселенности электронами боковых долин, но также за счет уменьшения подвижности электронов в боковых долинах.

Когда толщина варизонного слоя меньше своего оптимального значения, на дрейф дипольных доменов оказывает сильное влияние внутреннее электрическое поле варизонного слоя. В $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}-\text{GaAs}$ диодах внутреннее поле варизонного слоя тормозит, а в $\text{GaAs}-\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ диодах ускоряет дрейф дипольных доменов в центре активной области. Поэтому при толщине варизонного слоя ~ 2.8 мкм кривая оптимальной частоты генерации имеет экстремум – соответственно максимум для $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}-\text{GaAs}$ и минимум для $\text{GaAs}-\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ диодов (рис. 2, пунктирные кривые 2, 4).

Выходная мощность диодов с $n^+ - n^- - n$ катодом зависит от толщины варизонного слоя слабее, чем у диодов с $n^+ - n$ катодом. Так, в диоде с $n^+ - n^- - n$ катодом различие по КПД между диодами с $\text{GaAs}-\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ и $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}-\text{GaAs}$ варизонными слоями становится существенным при меньшем значении l_v , чем в диоде с $n^+ - n$ катодом. Например, при $l_v = 6$ мкм разность значений КПД диодов с $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}-\text{GaAs}$ и $\text{GaAs}-\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ варизонными слоями в случае $n^+ - n^- - n$ катода составляет 2.3 %, а в случае $n^+ - n$ катода 4.6 %.

При уменьшении l_v от оптимального значения характер работы диодов изменяется. В диоде с $\text{GaAs}-\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ слоем при l_v , равном $0.7 \div 2.4$ мкм, в зависимости от питающего напряжения дипольные домены

дрейфуют или по всей длине активной области, или только в половине активной области, примыкающей к аноду. Ширина частотного диапазона работы диода незначительна для такого режима работы. Так, при $l_v = 2.3$ мкм $\text{GaAs}-\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ диод работает в интервале частот $16 \div 60$ ГГц с двумя максимумами КПД. Первый составляет ~ 3.4 % на частоте 24 ГГц, а второй – ~ 1.4 % на частоте 39 ГГц. Если толщина $\text{GaAs}-\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ варизонного слоя меньше ~ 0.6 мкм, дипольные домены формируются только в варизонном слое в центре активной зоны. Так, при $l_v = 0.3$ мкм максимальное значение КПД составляет 1.8 % на частоте 44 ГГц.

В диодах с $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}-\text{GaAs}$ варизонным слоем при $l_v \approx 0.15$ мкм в зависимости от питающего напряжения распространяются дипольные домены по всей активной области или заряженные слои в примыкающей к аноду половине активной области. Диод работает в интервале частот от 22 до 80 ГГц также с двумя максимумами КПД. Первый составляет ~ 7.3 % на частоте 31 ГГц, а второй – ~ 0.35 % на частоте 63 ГГц.

Диоды с $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}-\text{GaAs}$ варизонным слоем превосходят по КПД диоды на основе $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ при $l_v > 0.4$ мкм, а также на основе $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ и GaAs при $l_v > 1$ мкм (рис. 2, сплошные кривые).

При уменьшении длины активной зоны общие закономерности работы диодов сохраняются, а также возрастают различия в выходных характеристиках диодов с $n^+ - n^- - n$ и $n^+ - n$ катодом. Так, максимальные значения выходной мощности и эффективности генерации у $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}-\text{GaAs}$ диодов с длиной активной области 0.8 мкм и $n^+ - n^- - n$ катодом в ~ 2.7 раза превышают соответствующие значения у таких же диодов с $n^+ - n$ катодом (рис. 4, сплошные кривые 1-4). Оптимальная толщина варизонного слоя $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}-\text{GaAs}$ диода составляет ~ 1.3 мкм с максимальным КПД ~ 5.5 % на частоте ~ 99 ГГц. При уменьшении толщины варизонного слоя оптимальная частота генерации $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}-\text{GaAs}$ диодов монотонно растет, а $\text{GaAs}-\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$

диодов убывает (рис. 4, пунктирные кривые 1, 3). Различие оптимальных частот $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}-\text{GaAs}$ и $\text{GaAs}-\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ диодов при малых значениях l_v значительное. Так, при $l_v \approx 0.4$ мкм оптимальная частота $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}-\text{GaAs}$ диода составляет ~ 107 ГГц, а $\text{GaAs}-\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ – 65 ГГц. Критическая толщина $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}-\text{GaAs}$ варизонного слоя равняется ~ 0.1 мкм и $\text{GaAs}-\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ – ~ 0.2 мкм. Диоды с $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}-\text{GaAs}$ варизонным слоем по эффективности генерации превосходят диоды на основе $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$, $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ и GaAs при l_v , соответственно больше, чем 0.25, 0.8 и 0.43 мкм.

Оптимальная толщина варизонного слоя в $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}-\text{GaAs}$ диоде с длиной активной области 0.5 мкм составляет ~ 1.4 мкм (рис. 5, сплошная кривая 1). В субмикронных диодах приблизительное равенство оптимальной толщины варизонного слоя и длины активной области, как видно, нарушается. Это связано с влиянием внутреннего поля варизонного слоя. Следует также отметить, что с уменьшением длины активной области возрастает зависимость оптимальной частоты генерации от толщины варизонного слоя. Для $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}-\text{GaAs}$ диода максимальное значением потока выходной мощности равно ~ 2.7 кВт/см² на частоте ~ 135 ГГц с КПД ~ 2.6 %. Критическое значение толщины $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}-\text{GaAs}$ и $\text{GaAs}-\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ варизонных слоев составляет соответственно ~ 0.13 и 0.52 мкм (рис. 5, сплошные кривые 1, 2).

Обобщенные характеристики показывают, что наибольшая критическая частота ~ 200 ГГц соответствует $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}-\text{GaAs}$ диодам с $n^+-n^- - n$ катодом при толщине варизонного слоя ~ 0.3 мкм. Это значение критической частоты больше, чем в GaAs , $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ и $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ диодах с $n^+-n^- - n$ катодом соответственно на ~ 20 , ~ 30 и ~ 60 ГГц (рис. 6, кривые 1-4).

Заключение

Диоды с $n^+-n^- - n$ катодом при оптимальной толщине $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}-\text{GaAs}$ варизонного слоя по выходной мощности и эффективности генерации во всем диапазоне

частот превосходят диоды на основе пространственно однородных по составу полупроводниковых соединений $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ при $x = 0 \div 0.2$ с $n^+-n^- - n$ и n^+-n катодом.

Выходная мощность и эффективность генерации варизонных диодов с $n^+-n^- - n$ катодом выше, чем у аналогичных диодов с n^+-n катодом. При уменьшении длины активной области различие в выходных характеристиках диодов с $n^+-n^- - n$ и n^+-n катодом усиливается.

Для каждой длины активной области и типа катодного контакта существует своя оптимальная толщина $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}-\text{GaAs}$ варизонного слоя.

Толщина варизонного слоя значительно влияет на частотные свойства диодов. В субмикронных $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}-\text{GaAs}$ диодах при уменьшении толщины варизонного слоя оптимальная частота генерации растет, а в $\text{GaAs}-\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ убывает.

В микронных диодах при определенных значениях толщины варизонного слоя возможна реализация режима работы, когда в зависимости от питающего напряжения неустойчивости заряда формируются у катодного контакта или в варизонном слое. В микронных диодах с узким (менее $0.1 \div 0.3$ мкм) варизонным слоем неустойчивости заряда образуются не у катодного контакта, а в варизонном слое.

Таким образом, явления, связанные с междолинным переносом электронов в диоде на основе варизонного $\text{Al}_{x(z)}\text{Ga}_{1-x(z)}\text{As}$, зависят от длины, местоположения и направления изменения состава полупроводника. Поэтому можно прогнозировать создание большого разнообразия варизонных диодов на основе одного полупроводникового соединения, но отличающихся по выходным характеристикам. Использование варизонного полупроводника в активной области диода, предположительно, позволяет, с одной стороны, повысить выходную мощность, эффективность и предельную частоту генерации диода, с другой, увеличить ширину частотного диапазона работы диода в ~ 2 раза при незначительной эффективности генерации.

Полученные результаты позволяют дать иное объяснение экспериментальным данным по увеличению выходной мощности и эффективности генерации электромагнитных колебаний миллиметрового диапазона GaAs диодами Ганна с $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ катодом, по сравнению с обычными GaAs диодами Ганна (например, [13-17]). Эффект возрастания выходной мощности в этих работах объяснялся инжекцией горячих электронов через антизапорный $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ гетеропереход. При этом о том, что инжектированные электроны сразу попадают в тормозящее электрическое поле [13], авторы умалчивают, ссылаясь на рост заселенности электронами боковых долин зоны проводимости у катода [14-17]. Следует отметить, что максимальные значения выходной мощности и эффективности генерации получены в диодах с вплавным гетеропереходом [14, 15], т. е. в тех случаях, когда состав $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ технологически изменялся постепенно. В диодах, у которых гетеропереход создавался методом молекулярно лучевой эпитаксии [16, 17], значения выходной мощности были несколько меньше. Это как нельзя лучше подтверждает, что главной причиной роста выходной мощности диодов является плавная зависимость параметров полупроводника от координаты, а не рост температуры электронного газа у катода из-за инжекции электронов через барьер $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ гетероперехода.

Литература

1. Аркуша Ю. В., Дрогаченко А. А., Прохоров Э. Д. Влияние формы напряжения на энергетические характеристики коротких диодов Ганна // Радиотехника и электроника. – 1987. – Т. 32, №9. – С. 1947-1954.
2. Кальфа А. А., Тагер А. С. Теоретическое исследование арсенид галлиевых диодов Ганна с двухзонным катодом // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1982. – Вып.10. – С. 17-21.
3. Аркуша Ю. В., Дрогаченко А. А., Прохоров Э. Д. Влияние запорного металлического катодного контакта на работу коротких диодов Ганна // Радиотехника и электроника. – 1988. – Т. 33, №6. – С. 1295-1301.
4. Аркуша Ю. В., Прохоров Э. Д., Стороженко И. П. Гетерокатод $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ в GaAs диоде Ганна мм-диапазона // Радиотехника и электроника. – 2000. – Т. 45, №4. – С. 508-510.
5. Couch N. R., Beton P. H., Kelly M. J., Kerr M. M. The use of linearly graded composition AlGaAs injectors for intervalley transfer in GaAs: theory // Solid State Electron. – 1988. – Vol. 31, No. 3. – P. 2-4.
6. Аркуша Ю. В., Прохоров Э. Д., Стороженко И. П. Пути развития приборов с междолинным переносом электронов // Вісник Харківського національного університету ім. В. Н. Каразіна. Сер. "Радіофізика та електроніка". – 2001. – Вип. 1'2001, №513. – С. 50-55.
7. Alekseev E., Pavlidis D. Large-signal microwave performance of GaN-based NDR diode oscillators // Solid State Electronics. – 2000. – Vol. 44. – P. 941-947.
8. Акимов А. К., Зайцев А. М., Мороз Е. П., Челноков В. Е. Варизонный генератор Ганна с электронной перестройкой частоты на основе $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1981. – Вып. 7. – С. 20-22.
9. Аркуша Ю. В., Прохоров Э. Д., Стороженко И. П. Влияние толщины варизонного слоя на энергетические и частотные характеристики $\text{In}_{x(z)}\text{Ga}_{1-x(z)}\text{As}$ диодов Ганна // Радиотехника и электроника. – 2006. – Т. 51, №3. – С. 371-377.
10. Arkusha Yu. V., Prokhorov E. D., Storozhenko I. P. Influence of the Variband-Layer Thickness on the Energy and Frequency Characteristics of $\text{In}_{x(z)}\text{Ga}_{1-x(z)}\text{As}$ Gunn Diode // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2006. – Vol. 51, No. 3. – P. 352-358.
11. Storozhenko I. P., Prokhorov E. D., Arkusha Yu. V. Simulation of mm-waves transferred electron devices with linearly graded composition of 3-5 threefold semiconductor in active zone // International Journal of Infrared and Millimeter Waves. – 2004. – Vol. 25, No. 6. – P. 879-890.
12. Прохоров Э. Д., Белецкий Н. И. Полупроводниковые материалы для приборов с междолинным переносом электронов. – Харьков: Вища школа, 1982. – 144 с.
13. Аркуша Ю. В., Прохоров Э. Д., Стороженко И. П. Влияние антизапорного гетерокатода на энергетические и частотные характеристики GaAs диодов Ганна мм диапазона Гетерокатод $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ в GaAs диоде Ганна мм-диапазона // Радиотехника и электроника. – 2000. – Т. 45, № 5. – С. 628-631.
14. Spomer H., Couch N. R. Advances in hot electron injector Gunn diodes // GEC Journal of Research. – 1989. – Vol. 7, No. 1. – P. 34-35.
15. Couch N. R., Spomer H., Beton P. H. High-performance graded AlGaAs injector GaAs Gunn di-

- odes at 94 GHz // IEEE Electron Device Lett. – 1989. – Vol. 10, No. 7. – P. 288-290.
16. 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. – Vol. 31, No. 7. – P. 1211-1214.
17. Couch N. R., Beton P. H., Kelly M. J., Kerr M. M. The use of linearly graded composition AlGaAs injectors for intervalley transfer in GaAs: experiment // Solid State Electron. – 1988. – Vol. 31, No. 4. – P. 613-616.

Диоды Ганна на основе варизонного $\text{Al}_{x(z)}\text{Ga}_{1-x(z)}\text{As}$ з різними катодними контактами

І. П. Стороженко

За допомогою дворівневої моделі міждолинного переносу електронів у варизонному напівпровідникові досліджено роботу діодів Ганна на основі варизонного $\text{Al}_{x(z)}\text{Ga}_{1-x(z)}\text{As}$ з $n^+ - n$ та $n^+ - n^- - n$ катодами для різної довжини активної області та товщини варизонного шару. Показано, що $\text{Al}_{x(z)}\text{Ga}_{1-x(z)}\text{As}$ діоди за вихідною по-

тужністю та ефективністю генерації в усьому діапазоні частот перевищують діоди на основі просторово однорідних за складом напівпровідникових сполук $\text{Al}_{x(z)}\text{Ga}_{1-x(z)}\text{As}$ для $x = 0 \div 0.2$.

$\text{Al}_{x(z)}\text{Ga}_{1-x(z)}\text{As}$ Variband Gunn Diodes with Different Cathode Contacts

I. P. Storozhenko

Operation of the $\text{Al}_{x(z)}\text{Ga}_{1-x(z)}\text{As}$ variband Gunn diodes with $n^+ - n$ and $n^+ - n^- - n$ cathode contacts for different active region lengths and variband layer thicknesses is studied with the two-level model of intervalley electron transfer in a variband semiconductor. These diodes are shown to outperform by output and generation efficiency those employing spatially homogeneous $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ compound semiconductor within the whole frequency range for $x = 0 \div 0.2$.