

ОСОБЕННОСТИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И ДРЕЙФА ВОЛН ОБЪЁМНОГО ЗАРЯДА В ПРИБОРАХ С МЕЖДОЛИННЫМ ПЕРЕНОСОМ ЭЛЕКТРОНОВ НА ОСНОВЕ ВАРИЗОННОГО $\text{GaP}_{x(z)}\text{As}_{1-x(z)}$

И. П. Стороженко

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

Исследовано возникновение и дрейф волн объёмного заряда в диоде Ганна на основе варизонного $\text{GaP}_{x(z)}\text{As}_{1-x(z)}$ с $n^+ - n$ катодом. Показано, что в варизонных диодах Ганна существуют эффекты, которых нет в диодах на основе пространственно-однородных по составу полупроводников. Сделано обобщение тройных варизонных полупроводников A_3B_5 . Ил. 6. Библиограф. назв. 14.

Ключевые слова: варизонный полупроводник, диод Ганна, дипольный домен, частота.

Приборы, работающие на эффекте междолинного переноса электронов (МПЭ) в миллиметровом диапазоне длин волн имеют ряд принципиальных проблем, ограничивающих сверху рабочую частоту. Одна из основных проблем связана с разогревом электронного газа вблизи катодного контакта. Длина области начального разогрева электронов (“холодная” зона) в GaAs диодах Ганна с омическим $n^+ - n$ или $m - n$ катодом равняется ~ 1 мкм [1]. Частотный предел работы таких диодов ограничен 75-100 ГГц, что значительно ниже частотных возможностей МПЭ в GaAs (~ 600 ГГц) [2]. Для того, чтобы сократить размеры “холодной” зоны, используют всевозможные катодные контакты, которые обеспечивают разогрев электронного газа у катода. Это, как правило, резкие гомо- или гетеропереходы [1-4], создающие в окрестности катода короткую область с высоким значением электрического поля, где электроны без столкновений набирают энергию, достаточную для рассеяния в боковые долины. Частотный предел таких GaAs приборов лежит в интервале 200-280 ГГц. Использование катодных контактов, позволяющих инжектировать в активную область диода электроны с высоким уровнем энергии (туннельные контакты [5], антизапорные гетеропереходы [6]), не имело значительного успеха. Другим подходом к данной проблеме является поиск полупроводниковых материалов с частотным пределом работы большим, чем GaAs или InP, например нитриды III группы [7].

На ограничение частотных возможностей субмикронных диодов оказывает отрицательное влияние также и анодный контакт. Область высокого поля анодного $n - n^+$ контакта влияет на электроны, находящиеся в окрестности катодного контакта. Для развязки катода с анодом исполь-

зуют двухзонный $n^+ - n^- - n^+ - n$ катод [8] или гетеропереход [9] на аноде. Создание приборов со сложными контактами является технологически дорогостоящей задачей. Поэтому для получения генерации электромагнитных колебаний в миллиметровом диапазоне, как правило, используют генерацию гармоник на диодах с омическим $n^+ - n$ или $m - n$ катодом и анодом.

В варизонных полупроводниках A_3B_5 разогрев электронного газа имеет ряд отличительных черт, которые позволяют принципиально по-другому решить названные выше проблемы. Теоретические исследования МПЭ в варизонных полупроводниках и приборах на их основе были предприняты в работах [10-13]. С помощью двухтемпературной модели МПЭ в варизонном полупроводнике, которая получена в [10], исследована работа $\text{In}_{x(z)}\text{Ga}_{1-x(z)}\text{As}$ [11], $\text{Al}_{x(z)}\text{Ga}_{1-x(z)}\text{As}$ [12], $\text{InP}_{1-x(z)}\text{As}_{x(z)}$ [13] варизонных диодов Ганна с $n^+ - n$ и $n^+ - n^- - n$ катодами. По выходной мощности и придельной рабочей частоте такие диоды могут превосходить аналогичные диоды с другими известными типами катодными контактами. Обобщающих исследований физических явлений, лежащих в основе улучшения высокочастотных свойств приборов с МПЭ на основе варизонных полупроводников, проделано не было. Результатом такого исследования могла бы стать теория МПЭ в варизонных полупроводниках, которая позволила бы систематизировать варизонные полупроводники A_3B_5 для диодов Ганна миллиметрового диапазона. В данной работе исследованы физические явления, связанные с МПЭ и возникающие в диоде Ганна с $n^+ - n$ катодом на основе варизонного $\text{GaP}_{x(z)}\text{As}_{1-x(z)}$, а также обобщены полученные результаты для варизонных соединений A_3B_5 .

1. Методика исследования. Исследования проводились с помощью двухтемпературной модели МПЭ в варизонном полупроводнике [10], которая состоит из уравнений непрерывности (1), плотности тока (2), баланса энергии электронов (3) для двух долин зоны проводимости и уравнения Пуассона (4):

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

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

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

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

где индексы i, j относятся соответственно к центральной (Γ) и боковой (L) долинам, или наоборот, когда речь идет о процессах в боковой долине; $n_i, \mu_i, m_i, J_i, T_i$ - соответственно концентрация, подвижность, эффективная масса, плотность тока и температура электронов в i -й долине; $1/\tau_{ni}$ и $1/\tau_{ei}$ - обратные времена релаксации электронов, усредненные соответственно по концентрации и энергии; χ_i - энергия, необходимая для перевода электронов с энергетического минимума i -й долины до локального уровня вакуума (рис. 1); E - напряженность электрического поля; n_0 - концентрация ионизированных доноров; ε - диэлектрическая проницаемость; e - модуль заряда электрона; k - постоянная Больцмана; t - время; z - координата.

Исследуется работа диода Ганна с омическим катодным и анодным контактами - $n^+ - n - n^+$: $\text{GaP}_{x(z)}\text{As}_{1-x(z)}$ (рис. 1). Процентная доля GaP в соединении $\text{Ga}_{1-x(z)}\text{P}_{x(z)}\text{As}$ зависит от координаты z и определяется выражением:

$$x(z) = \frac{x_1 - x_2}{1 + \exp\left(\frac{4(z - z_0)}{l_v}\right)} + x_2, \quad (5)$$

где x_1 и x_2 - предельное содержание GaP в $\text{GaP}_{x(z)}\text{As}_{1-x(z)}$ соответственно на $-\infty$ и $+\infty$; z_0 - координата центра варизонного слоя; l_v - толщина варизонного слоя. Электрофизические параметры бинарных полупроводников GaAs и GaP взяты из работы [14]. Энергия электронного сродства χ_Γ в

GaAs - 4,07 эВ и χ_L в GaP - 3,8 эВ. Параметры промежуточных по составу соединений между GaAs и GaP определялись из предположения о линейной зависимости параметров соединения от $x(z)$. Содержание GaP в $\text{GaP}_x\text{As}_{1-x}$ не превышало 35 %, так как при большем содержании GaP из-за слишком малого значения $\Delta_{\Gamma L}$ увеличивается заселенность электронами боковых долин и эффект МПЭ отсутствует [14]. Координата центра варизонного слоя z_0 совпадает с центром активной области (рис. 1). Длина активной области $l_a = 2,5$ мкм, концентрация ионизированных примесей в ней $n_0 = 10^{16}$ см $^{-3}$. Температура кристаллической решетки T_0 считалась постоянной, равной 300 К. Рассмотрен случай уменьшения процентного содержания GaP в $\text{GaP}_{x(z)}\text{As}_{1-x(z)}$ ($\text{GaP}_{0,35}\text{As}_{0,65}$ -GaAs диоды) и его возрастания (GaAs - $\text{GaP}_{0,35}\text{As}_{0,65}$ диоды).

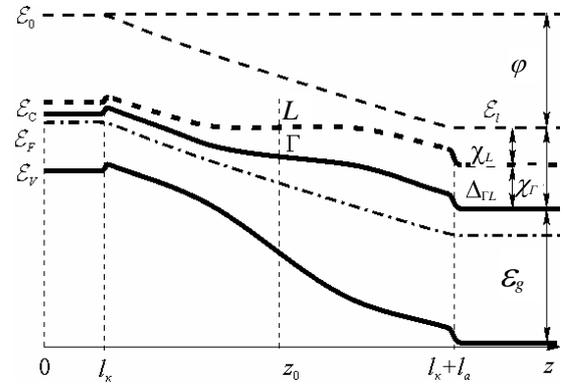


Рис. 1. Схематическая зонная диаграмма $\text{GaP}_{0,35}\text{As}_{0,65}$ -GaAs варизонного диода с омическим $n^+ - n$ катодом: ε_0 - уровень вакуума при отсутствии внешних сил; ε_i - уровень вакуума с внешними силами (локальный); ε_c - дно зоны проводимости (энергетический минимум Γ -долины); ε_f - 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 -долинами; χ_Γ - энергия электронного сродства для Γ -долины; χ_L - энергия электронного сродства для L -долины; φ - потенциал внешних сил; z - координата; l_k - длина катода; l_a - длина активной зоны

2. Анализ зависимостей от координаты энергии электронного сродства и эффективной массы электронов. В двухтемпературной модели МПЭ в варизонных полупроводниках в отличие от такой же модели МПЭ в пространственно-однородных по составу полупроводниках в уравнениях сохранения импульса (2) и энергии (3) электронов присутствуют слагаемые, зависящие от энергии электронного сродства χ_i и эффективной массы электронов m_i [10].

Зависимости $m_i(z)$ и $\chi_i(z)$ в варизонном полупроводнике приводят к потоку электронов в направлении увеличения m_i и χ_i . В $\text{GaP}_{0,35}\text{As}_{0,65}$ -GaAs

диодах $\chi_{\Gamma}(z)$ - возрастающая, а $m_{\Gamma}(z)$ - убывающая функции. Следовательно, потоки электронов в Γ -долине, вызванные этими величинами, направлены в противоположные стороны. Поэтому целесообразней оценить их совместное влияние на МПЭ в точке $z = z_0$, где градиенты ∇m_i и $\nabla \chi_i$ по абсолютному значению максимальны и $x(z_0) = 0,175$. В качестве оценивающего параметра будем использовать пороговое электрическое поле и эквивалентный ему дрейфовый поток электронов

$$\frac{\partial \chi_i}{\partial z} + \frac{3}{2} \kappa \frac{T_i}{m_i} \frac{\partial m_i}{\partial z} = e E_n. \quad (6)$$

Отсюда можно получить, что суммарное воздействие ∇m_i и $\nabla \chi_i$ эквивалентно воздействию порогового поля при толщине варизонного слоя $l_v = l_{кр}$

$$l_{кр} = \left| 4 \frac{x_2 - x_1}{e E_n} \left((\chi_{2i} - \chi_{1i}) + 3 \kappa T_i \frac{m_{2i} - m_{1i}}{m_{2i} + m_{1i}} \right) \right|, \quad (7)$$

где индексы 1 и 2 соответствуют параметрам $\text{GaP}_{x(z)}\text{As}_{1-x(z)}$ на $-\infty$ и $+\infty$ (для $\text{GaP}_{0,35}\text{As}_{0,65}$ -GaAs диода 1 - $\text{GaP}_{0,35}\text{As}_{0,65}$, 2 - GaAs); E_n - пороговое поле зависимости дрейфовой скорости электронов от электрического поля в $\text{GaP}_x\text{As}_{1-x}$ при $x = (x_1 + x_2)/2 = 0,175$.

Численные оценки показывают, что плотность тока, вызванная $\nabla \chi_{\Gamma}(z)$, в ~ 10 раз превышает плотность тока, вызванную $\nabla m_{\Gamma}(z)$. Их совместное влияние становится эквивалентно пороговому электрическому полю в $\text{GaP}_{0,175}\text{As}_{0,825}$ ($\sim 3,2$ кВ/см) при толщине варизонного слоя $l_v = 0,97$ мкм. Аналогичные оценки для электронов, находящихся в боковых долинах, показали, что в L -долинах плотность тока из-за $\nabla \chi_L(z)$ в пять раз превышает плотность тока, вызванного $\nabla m_L(z)$, а их совместное влияние в ~ 10 раз меньше, чем влияние $\nabla \chi_{\Gamma}(z)$ и $\nabla m_{\Gamma}(z)$. Причём направление потоков электронов в Γ - и L -долинах противоположно. В приведенных оценках распределение концентрации электронов равномерно, а их температура равнялась температуре кристаллической решётки. Поэтому оценочное значение $l_{кр}$ оказалось несколько завышенным. Так, максимальное значение поля в варизонном слое при $l_v = 0,97$ мкм равно $\sim 2,9$ кВ/см, а не $3,2$ кВ/см. Следовательно, при $l_v > 0,97$ мкм влияние на МПЭ градиентов $m_i(z)$ и $\chi_i(z)$ в $\text{GaP}_{x(z)}\text{As}_{1-x(z)}$ незначительное.

3. Электронные процессы. Вместе с тем численные эксперименты показывают, что в $\text{GaP}_{0,35}\text{As}_{0,65}$ -GaAs диодах при $l_v \gg 0,97$ мкм и даже при исключении $\nabla \chi_i(z)$ и $\nabla m_i(z)$ из уравнений сохранения импульса и энергии электронов про-

цессы, происходящие в диоде, значительно отличаются от процессов в $\text{GaP}_x\text{As}_{1-x}$ диодах. Последовательное исключение из модели зависимости различных параметров полупроводника от координаты z показало, что наибольшее влияние на электронные процессы в диоде оказывает зависимость от координаты энергетического зазора между центральной долиной и ближайшей к ней по энергии боковой долиной $\Delta(z)$. Энергетический зазор Δ влияет на время релаксации концентрации и энергии электронов. В $\text{GaP}_{0,35}\text{As}_{0,65}$ $\Delta = 0,073$ эВ, а в GaAs $\Delta = 0,36$ эВ. При малых полях, когда разогрев электронов в Γ -долине не существенный ($T_{\Gamma} \approx T_0$), рассеяние электронов в GaAs происходит преимущественно на оптических и акустических фононах, а в $\text{GaP}_{0,35}\text{As}_{0,65}$ - на междолинных. Время перехода электронов в боковые долины усредненно как по концентрации, так и по энергии в $\text{GaP}_{0,35}\text{As}_{0,65}$ значительно меньше, чем в GaAs. В $\text{GaP}_{0,35}\text{As}_{0,65}$ -GaAs диодах у катодного контакта актов рассеяния в боковые долины происходит больше, чем у анодного контакта. Обратный переход электронов из L -долин в Γ -долину интенсивней происходит у анода, чем у катода. В результате из-за термического разогрева, даже при отсутствии внешнего поля, концентрация электронов в боковых долинах в $\text{GaP}_{0,35}\text{As}_{0,65}$ -GaAs диодах убывает от катода к аноду. Например, при $l_v = 3,5$ мкм концентрация электронов у катодного контакта в Γ -долине $n_{\Gamma} \approx 8,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и в L -долинах $n_L \approx 4,2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, а у анодного контакта соответственно $n_{\Gamma} \approx 12 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и $n_L \approx 4,3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$. Градиент концентрации электронов приводит к появлению в долинах противоположно направленных диффузионных потоков электронов. В Γ -долине диффузионный поток направлен от анода к катоду, а в L -долинах, наоборот, от катода к аноду. Подвижность электронов в Γ -долине значительно больше подвижности электронов в L -долинах. Диффузионный поток электронов в Γ -долине по абсолютному значению значительно превосходит поток электронов в L -долинах. Для достижения равновесия часть электронов смещается относительно центра варизонного слоя в сторону катода. В результате в окрестности катода образуется обогащенная электронами область, а у анода - обеднённая (рис. 2). Такое распределение электронов приводит к появлению внутреннего поля, направление которого совпадает с направлением внешнего поля. Возникшее внутреннее электрическое поле, кроме того, что приводит к появлению дрейфовой составляющей потока электронов, ещё дополнительно разогревает электроны и стимулирует их переход из центральной долины в боковые. Воздействие внутреннего поля неоднозначно, тем не менее, можно утверждать, что в

диоде без внешнего поля возникает стационарное равновесие всех дрейфовых и диффузионных составляющих плотностей тока в Г- и L-долинах с распределением концентрации электронов соответствующему подвижному электрическому диполю (рис. 2). При уменьшении толщины варизонного слоя поле диполя возрастает, а его линейные размеры уменьшаются. Внутреннее поле и размах концентрации электронов в диполе незначительны. Например, при $l_v = 1,2$ мкм максимальное значение поля диполя равно $\sim 0,9$ кВ/см.

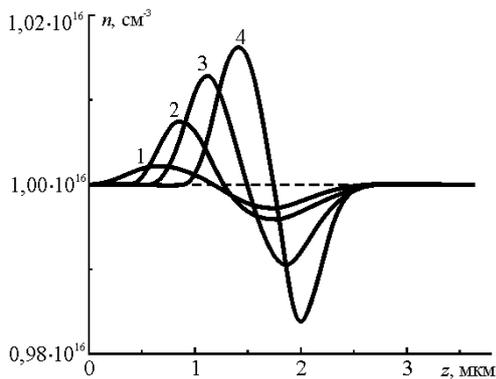


Рис. 2. Распределение концентрации электронов при различной толщине GaP_{0,35}As_{0,65}-GaAs слоя варизонного полупроводника, в котором учтена только зависимость $\Delta(z)$, все остальные параметры соответствуют GaAs: 1 - 2,9 мкм; 2 - 2,3 мкм; 3 - 1,8 мкм; 4 - 1,2 мкм

Рассмотрим общий случай варизонного полупроводника A₃B₅. В варизонном полупроводнике в соответствии с зависимостью от координаты энергетического зазора между центральной долиной и ближайшей к ней по энергии боковой долиной $\Delta(z)$, обратные времена релаксации концентрации $1/\tau_n$ и энергии электронов $1/\tau_\epsilon$ зависят от координаты. Эта зависимость обусловлена тепловым нагревом электронов и их преимущественным рассеянием на междолинных фононах в области с меньшим значением $\Delta(z)$. В центральной и боковых долинах возникают градиенты концентрации электронов и соответствующие им диффузионные потоки. Градиент концентрации электронов в центральной долине совпадает по направлению с градиентом энергетического зазора, а в боковых долинах имеет противоположное направление. Поток электронов в боковых долинах направлен в сторону увеличения Δ , где $1/\tau_n$ и $1/\tau_\epsilon$ меньше. В области с низкими значениями $1/\tau_n$ и $1/\tau_\epsilon$ электроны из боковых долин возвращаются в центральную долину и начинают диффундировать в обратном направлении, т. е. в сторону уменьшения Δ , где $1/\tau_n$ и $1/\tau_\epsilon$ становятся больше. В области с высокими значениями $1/\tau_n$ и $1/\tau_\epsilon$ электроны

опять рассеиваются в боковые долины, и процесс повторяется. Но так как подвижность электронов в центральной долине значительно превосходит подвижность в боковых долинах, то равновесие только диффузионных составляющих недостижимо. Часть электронов относительно центра варизонного слоя смещается в сторону уменьшения Δ . Возникающее внутреннее поле и связанная с ним дрейфовая составляющая приводят к равновесию. В центре варизонного слоя появляется подвижный диполь заряда, направление вектора поляризованности которого совпадает с направлением градиента $\Delta(z)$. Подвижный диполь заряда является прообразом дипольного домена.

Если к варизонному диоду с возрастающей функцией $\Delta(z)$ приложить напряжение, то равновесие нарушается. В случае, когда направления вектора поляризованности диполя и внешнего поля совпадают, дрейфовые составляющие плотностей тока в центральной и боковых долинах диполя возрастают. Увеличивается также кинетическая энергия электронов Г-долины, причём в большей степени у катода. У катода из-за значительной заселённости электронами боковых долин средняя подвижность электронов меньше, чем у анода. Следовательно, падение напряжения на области у катода превышает падение напряжения на области у анода. Дополнительный разогрев электронов в области у катодного контакта стимулирует их рассеивание в боковые долины. Тем самым увеличиваются диффузионные потоки электронов, связанные с зависимостью $\Delta(z)$. Концентрация электронов в переднем фронте диполя подвижного заряда уменьшается, а в заднем - возрастает. Электрическое поле диполя возрастает ещё больше, что приводит к форсированию процессов, описанных выше. Диполь подвижного заряда растёт. В диоде формируется домен высокого поля независимо от типа катодного контакта (рис. 3).

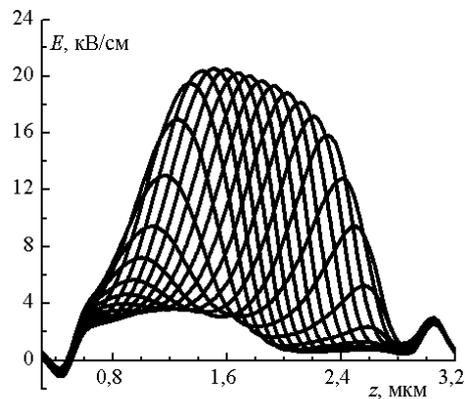


Рис. 3. Распределение электрического поля в GaP_{0,35}As_{0,65}-GaAs диоде с толщиной варизонного слоя $l_v = 2,3$ мкм при напряжении на диоде $U = 1,6$ В в различные моменты времени

С эффектом возникновения дипольных доменов связано уменьшению длины “холодной” зоны. В варизонных диодах, у которых $\Delta(z)$ - возрастающая функция координаты, происходят повышения КПД, выходной мощности и предельных рабочих частот [11-13].

В варизонных диодах существует эффект ускорения или замедления дрейфа дипольного домена, который связан с зависимостью подвижности электронов в боковых долинах от координаты $\mu_L(z)$. Разогрев электронов в боковых долинах незначителен и их температура $T_L \approx T_0$. Поэтому в $\text{GaP}_{0,35}\text{As}_{0,65}\text{-GaAs}$ диодах $\mu_L(z)$ - стационарная, возрастающая функция координаты (в $\text{Ga}_{0,65}\text{P}_{0,35}\text{As}$ $\mu_L \approx 70 \text{ см}^2/(\text{Вс})$, в GaAs - $\sim 210 \text{ см}^2/(\text{Вс})$). Скорость дрейфа полностью сформировавшегося домена, которая определяется в основном μ_L , должна возрастать по мере продвижения домена к аноду. В этом и заключается эффект ускорения или замедления дрейфа дипольного домена в варизонных диодах. В коротких диодах дипольные домены полностью сформироваться не успевают. Эффект ускорения движения дипольного домена в $\text{GaP}_{0,35}\text{As}_{0,65}\text{-GaAs}$ диодах “смазывается” процессом роста дипольного домена, из-за чего скорость его движения падает. Тем не менее, как показали численные эксперименты, даже в этом случае данный эффект имеет место (рис. 4). Возрастание скорости движения дипольных доменов происходит в области от центра активной области до анода. Из зависимости $\mu_L(z)$ следовало ожидать, что скорость движения домена должна возрасти примерно в три раза. На самом деле скорость возрастала только в $\sim 1,8$ раза.

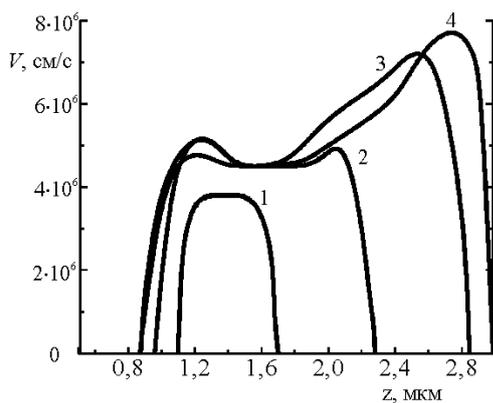


Рис. 4. Зависимость скорости дрейфа дипольного домена от координаты в $\text{GaP}_{0,35}\text{As}_{0,65}\text{-GaAs}$ диоде с толщиной варизонного слоя $l_v = 2,3 \text{ мкм}$ при различном напряжении U : 1 - 1 В; 2 - 1,4 В; 3 - 2 В; 4 - 3 В

В варизонных диодах возможен эффект зависимости от напряжения глубины проникнове-

ния дипольного домена в активную область. При сильной возрастающей зависимости $\Delta(z)$ пороговое поле возникновения и рассасывания дипольного домена возрастают вдоль активной области диода. Внешнее поле в области у катода распределено равномерно или имеет небольшой отрицательный градиент. Возможна ситуация, когда у катодного контакта поле равно пороговому значению возникновения дипольного домена, а на некотором удалении от него меньше порогового значения рассасывания домена. Дипольные домены образуются у катодного контакта и дрейфуют в активной области до места, где внешнее поле становится равным пороговому значению их рассасывания. Домен рассасывается, и у катода образуется новый домен. По мере увеличения напряжения на диоде координата равенства значений внешнего и порогового поля рассасывания домена смещается к аноду. Тем самым проникновение дипольных доменов от катода в глубь активной области управляется внешним полем (рис. 3, 4). Чем выше внешнее поле, тем больше длина пролётной области и ниже частота колебаний (рис. 5). Эффект зависимости глубины проникновения дипольных доменов в активную область в $\text{GaP}_{0,35}\text{As}_{0,65}\text{-GaAs}$ диодах наиболее выражен при длине варизонного слоя $l_v = 2\text{-}2,8 \text{ мкм}$ и напряжении на диоде $U = 1,0\text{-}2,6 \text{ В}$ (рис. 5, кривая 1). Если $U > 2,8 \text{ В}$ дипольные домены рассасываются на анодном контакте (рис. 4, кривая 4). Этот эффект позволяет в варизонных диодах внешним полем в широких пределах изменять пролётную частоту колебаний (рис. 5, кривые 1 и 5). Аналогичный эффект должен иметь место в GaSb-GaAs , $\text{Al}_{0,35}\text{Ga}_{0,65}\text{As-GaAs}$, $\text{In}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{P-InP}$, $\text{In}_{0,94}\text{Al}_{0,06}\text{P-InP}$, $\text{Al}_{0,8}\text{B}_{0,2}\text{N-AlN}$, $\text{Ga}_{0,65}\text{B}_{0,35}\text{N-GaN}$, AlN-InN , AlN-GaN , $\text{In}_{0,37}\text{Al}_{0,63}\text{As-In}_{0,78}\text{Al}_{0,22}\text{As}$.

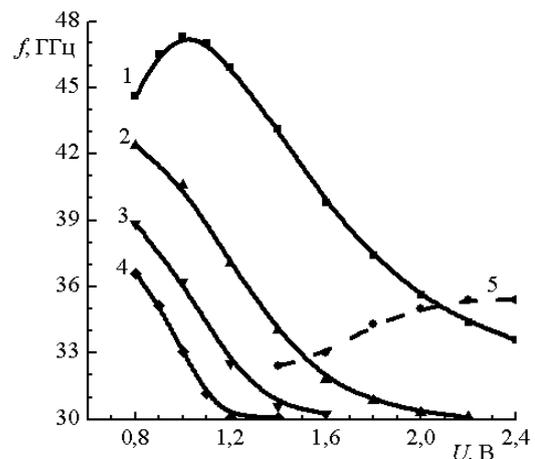


Рис. 5. Зависимость пролётной частоты от напряжения в $\text{GaP}_{0,35}\text{As}_{0,65}\text{-GaAs}$ (сплошные кривые) и $\text{GaP}_{0,175}\text{As}_{0,875}$ (пунктирная кривая) диодах при различной толщине варизонного слоя: 1 - 2,3 мкм; 2 - 2,9; 3 - 3,5; 4 - 4,1; 5 - ∞

На процессы, происходящие в активной области, оказывает влияние толщина варизонного слоя l_v . Уменьшение l_v приводит к возрастанию градиента процентного содержания GaP в $\text{GaP}_{x(z)}\text{As}_{1-x(z)}$ в центре варизонного слоя, т. е. в нашем рассмотрении в центре активной области. Поэтому при уменьшении l_v все описанные выше процессы в окрестности центра варизонного слоя усиливаются. При $l_v < 1,5-1,8$ мкм в $\text{GaP}_{0,35}\text{As}_{0,65}$ -GaAs диодах у катодного контакта $\Delta < 0,1$ эВ. Практически все электроны у катодного контакта находятся в L -долинах. В активной области между катодным контактом и центром варизонного слоя при любом внешнем поле формируется статический домен высокого поля (рис. 6).

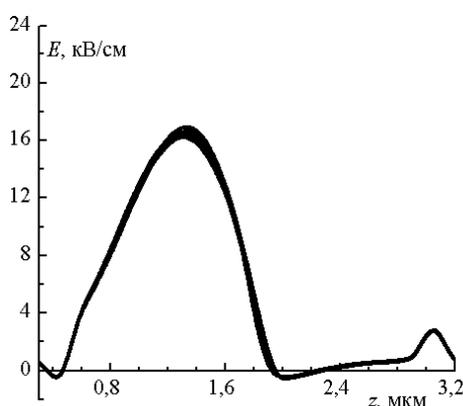


Рис. 6. Распределение электрического поля в $\text{GaP}_{0,35}\text{As}_{0,65}$ -GaAs диоде с толщиной варизонного слоя $l_v = 1,2$ мкм при напряжении на диоде $U = 1,6$ В в различные моменты времени

Рост l_v приводит к ослаблению влияния $\Delta(z)$. При $l_v \gg l_a$ $\text{GaP}_{x(z)}\text{As}_{1-x(z)}$ можно считать в активной области пространственно-однородным по составу полупроводником близкому к $\text{GaP}_{0,175}\text{As}_{0,825}$. При этом в активной области возникают волны объёмного заряда, напоминающие обогащённые слои. Преобразование дипольных доменов в обогащённые слои происходит постепенно, без резких изменений в режимах работы. Рост l_v сопровождается увеличением линейных размеров и уменьшением максимального поля дипольного домена. При этом возрастает длина области начального разогрева электронов. Таким образом, случай $l_v \gg l_a$ является предельным, когда теория МПЭ в варизонном диоде преобразуется в хорошо известную теорию МПЭ в диоде на основе пространственно-однородных по составу полупроводников.

В случае $\text{GaAs-GaP}_{0,35}\text{As}_{0,65}$ диодов все описанные выше процессы имеют противоположную направленность. Энергетический зазор меж-

ду долинами Δ убывает от катода к аноду. Из-за зависимости $\Delta(z)$ в активной области подвижный диполь образуется, но его вектор поляризованности имеет направление противоположное внешнему полю. Внешнее поле приводит к рассасыванию подвижного дипольного заряда. В диодах происходит формирование волн объёмного заряда, напоминающих обогащённый слой. При уменьшении толщины варизонного слоя l_v длина области начального разогрева электронов растёт. Если $l_v < \sim 7$ мкм, то на анодном контакте $\text{GaAs-GaP}_{0,35}\text{As}_{0,65}$ диода образуется статический домен. Анализ работы $\text{GaAs-GaP}_{0,35}\text{As}_{0,65}$ диодов показывает, что варизонные диоды с убывающей функцией $\Delta(z)$ мало эффективны по сравнению с диодами на основе однотипных однородных по составу полупроводников.

Выводы. Приборы с $n^+ - n$ катодом на основе варизонного $\text{GaP}_{x(z)}\text{As}_{1-x(z)}$, работающие на основе эффекта МПЭ, при температуре кристаллической решётки равной 300 К обладают следующими свойствами.

Величины градиентов энергии электронного сродства и эффективной массы электронов в долинах зоны проводимости могут оказывать ощутимое влияние на МПЭ в $\text{GaP}_{x(z)}\text{As}_{1-x(z)}$ при толщине варизонного слоя $l_v < 0,9$ мкм.

Зависимость энергетического зазора между центральной и ближайшей к ней по энергии боковой долиной от координаты $\Delta(z)$ приводит к появлению подвижного электрического диполя, вектор поляризованности которого по направлению совпадает с градиентом $\Delta(z)$. Если внешнее поле совпадает по направлению с вектором поляризованности диполя, как в $\text{GaP}_{0,35}\text{As}_{0,65}$ -GaAs диодах, то электрический диполь начинает расти, и в активной области независимо от типа катодного контакта реализуется режим с доменами высокого поля. Если внешнее поле противоположно направлено вектору поляризованности диполя, как в $\text{GaAs-GaP}_{0,35}\text{As}_{0,65}$ диодах, то диполь разрушается, а вместо него формируется волна объёмного заряда, напоминающая обогащённый слой.

Возрастающую функцию $\Delta(z)$ имеют GaSb-GaAs , $\text{GaAs}_{0,65}\text{P}_{0,35}\text{-GaAs}$, $\text{Al}_{0,35}\text{Ga}_{0,65}\text{As-GaAs}$, $\text{GaAs-In}_{0,6}\text{Ga}_{0,4}\text{As}$, $\text{Ga}_{0,9}\text{B}_{0,1}\text{As-GaAs}$, $\text{In}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{P-InP}$, $\text{InP-InP}_{0,6}\text{As}_{0,4}$, $\text{In}_{0,94}\text{Al}_{0,06}\text{P-InP}$, $\text{In}_{0,37}\text{Al}_{0,63}\text{As-In}_{0,78}\text{Al}_{0,22}\text{As}$, $\text{InP-In}_{0,96}\text{B}_{0,04}\text{As}$, $\text{GaSb-In}_{0,69}\text{Ga}_{0,31}\text{Sb}$, $\text{In}_{0,69}\text{B}_{0,31}\text{As-In}_{0,86}\text{B}_{0,14}\text{As}$, $\text{In}_{0,45}\text{Al}_{0,55}\text{Sb-In}_{0,85}\text{Al}_{0,15}\text{Sb}$, $\text{Al}_{0,8}\text{B}_{0,2}\text{N-AlN}$, $\text{Ga}_{0,65}\text{B}_{0,35}\text{N-GaN}$, AlN-InN , InN-GaN и AlN-GaN варизонные полупроводники. В диодах на их основе следует ожидать режим с дипольными доменами, повышение выходной мощности, КПД и предельной рабочей частоты.

В $\text{GaP}_{0,35}\text{As}_{0,65}\text{-GaAs}$ диодах существует эффект зависимости глубины проникновения домена в активную область от напряжения из-за чего пролётная частота меняется в интервале 30-48 ГГц. Для сравнения пролётная частота в $\text{GaP}_{0,175}\text{As}_{0,825}$ диоде лежит в интервале 32-36 ГГц. Аналогичный эффект возможен в варизонных полупроводниках с сильной зависимостью $\Delta(z)$, в таких, например, как GaSb-GaAs , $\text{Al}_{0,35}\text{Ga}_{0,65}\text{As-GaAs}$, AlN-InN , AlN-GaN , $\text{In}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{P-InP}$, $\text{In}_{0,94}\text{Al}_{0,06}\text{P-InP}$, $\text{Al}_{0,8}\text{B}_{0,2}\text{N-AlN}$, $\text{Ga}_{0,65}\text{B}_{0,35}\text{N-GaN}$, $\text{In}_{0,37}\text{Al}_{0,63}\text{As-In}_{0,78}\text{Al}_{0,22}\text{As}$ варизонных диодах.

В $\text{GaP}_{0,35}\text{As}_{0,65}\text{-GaAs}$ диодах из-за зависимости подвижности электронов в боковых долинах существует эффект ускорения дрейфа дипольного домена при его пролёте от катода к аноду. Эффект возрастания скорости домена следует ожидать в GaSb-GaAs , $\text{Al}_{0,35}\text{Ga}_{0,65}\text{As-GaAs}$ и $\text{In}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{P-InP}$ диодах, а эффект уменьшения скорости домена в $\text{GaAs-In}_{0,6}\text{Ga}_{0,4}\text{As}$ и $\text{InP-InP}_{0,6}\text{As}_{0,4}$ диодах.

В варизонных диодах размеры домена зависят от толщины варизонного слоя l_v . При возрастании l_v увеличиваются линейные размеры домена, уменьшается максимальное поле домена, передний и задний фронт домена становится более пологим, растёт длина области начального разогрева электронов. Если l_v значительно больше длины активной области диода, то теория МПЭ в варизонном диоде преобразуется в хорошо известную теорию МПЭ в диоде на основе пространственно однородных по составу полупроводников.

В $\text{GaP}_{0,35}\text{As}_{0,65}\text{-GaAs}$ диодах при $l_v < 1,5\text{-}1,8$ мкм образуется статичный домен. Аналогичное явление должно иметь место в варизонных диодах, у которых минимальное значение Δ в активной области меньше чем $\sim 0,1$ эВ.

Таким образом, использование варизонного полупроводника в активной области приборов с МПЭ, предположительно, позволяет улучшить их высокочастотные свойства.

1. Аркуша Ю. В., Дрогаченко А. А., Прохоров Э. Д. Влияние формы напряжения на энергетические характеристики коротких диодов Ганна // Радиотехника и электроника. - 1987. - 32, №9. - С.1947-1954.
2. Кальфа А. А., Пореш С. Б., Тагер А. С. Эффект Ганна на высоких частотах // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. - 1984. - Вып.4 (1008). - С.2-34.
3. Аркуша Ю. В., Дрогаченко А. А., Прохоров Э. Д. Влияние запорного металлического катодного контакта на работу коротких диодов Ганна // Радиотехника и электроника. - 1988. - 33, №6. - С.1295-1301.
4. Аркуша Ю. В., Прохоров Э. Д., Стороженко И. П. Гетерокатод $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As/GaAs}$ в GaAs диоде Ганна мм-диапазона // Радиотехника и электроника. - 2000. - 45, №4. - С.508-510.
5. Стороженко И. П., Прохоров Э. Д., Боцула О. В. GaAs диоды Ганна с AlAs-GaAs-AlAs резонансно туннельным

- катодом // Радиофизика и радиоастрономия. - 2006. - 11, №4. - С.385-396
6. Sponer H., Couch N. R. Advances in hot electron injector Gunn diodes // GEC Journal of Reseach. - 1989. - 7, N1. - P.34-35.
7. Alekseev E., Pavlidis D. Large-signal microwave performance of GaN-based NDR diode oscillators // Solid State Electronics. - 2000. - 44. - P.941-947.
8. 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.
9. Борисов В. И., Гореленок А. Т., Дмитриев С. Г. и др. Диоды Ганна на основе гетероструктуры $n\text{-InGaAs}/n^+\text{-InP}$ // Физика и техника полупроводников. - 1992. - 26, №4. - С.611-613.
10. Стороженко И. П. Моделирование диодов Ганна на основе варизонных полупроводников // Радиофизика и электроника. - Харьков: Ин-т. радиофизики и электрон. НАН Украины. - 2003. - 8, №2. - С.287-294.
11. 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. - 51, №3. - С.371-377.
12. Стороженко И. П. Диоды Ганна на основе варизонного $\text{Al}_{x(z)}\text{Ga}_{1-x(z)}\text{As}$ с различными катодными контактами // Радиофизика и радиоастрономия. - 2006. - 11, №2. - С.186-197.
13. Стороженко И. П. Варизонные $\text{InP}_{1-x(z)}\text{As}_{x(z)}$ диоды Ганна с различными катодными контактами // Радиофизика и электроника. - Харьков: Ин-т. радиофизики и электроники НАН Украины. - 2006. - 11, №3. - С.421-429.
14. Прохоров Э. Д., Белецкий Н. И. Полупроводниковые материалы для приборов с междолинным переносом электронов. - Харьков: Вища школа, 1982. - 144 с.

SINGULARITIES FORMATION AND DRIFT OF VOLUME CHARGE WAVE IN BASED VARIBAND $\text{GaP}_{x(z)}\text{As}_{1-x(z)}$ INTERVALLEY TRANSFER ELECTRON DEVICES

I. P. Storozhenko

Singularities formation and drift of volume charge wave in based variband $\text{GaP}_{x(z)}\text{As}_{1-x(z)}$ Gunn diodes with n^+n cathode has been studied. These diodes are shown exist of phenomena's which not in employing spatially efficiency homogeneous semiconductors. To made extension of A_3B_5 variband threefold semiconductors.
Key words: variband semiconductor, Gunn diode, dipole domain, frequency.

ОСОБЛИВОСТІ ВИНІКНЕННЯ І ДРЕЙФУ ХВИЛЬ ОБ'ЄМНОГО ЗАРЯДУ В ПРИЛАДАХ З МІЖДОЛИННИМ ПЕРЕНОСОМ ЕЛЕКТРОНІВ НА ОСНОВІ ВАРІЗОННОГО $\text{GaP}_{x(z)}\text{As}_{1-x(z)}$

І. П. Стороженко

Досліджено виникнення та дрейф хвиль об'ємного заряду в діоді Ганна на основі варизонного $\text{GaP}_{x(z)}\text{As}_{1-x(z)}$ з n^+n катодом. Показано, що у варизонних діодах існують ефекти, яких нема у діодах Ганна на основі просторово-однорідних за складом напівпровідників. Зроблено узагальнення потрійних варизонних напівпровідників A_3B_5 .

Ключові слова: варизонний напівпровідник, діод Ганна, дипольний домен, частота.

Рукопись поступила 30 октября 2006 г.