

И. П. Стороженко

Национальный фармацевтический университет
53, ул. Пушкинская, Харьков, 610027, Украина
E-mail: storozhenko.igor@gmail.com

**СТАТИЧЕСКИЙ ДОМЕН В ПРИБОРЕ С МЕЖДОЛИННЫМ ПЕРЕНОСОМ ЭЛЕКТРОНОВ
НА ОСНОВЕ ВАРИЗОННОГО AlGaAs**

Использование варизонных полупроводников в однородно-легированных приборах с эффектом междолинного переноса электронов может приводить к возникновению статического электрического домена. Интерес к статическому домену продиктован возможностью создания локальной напряженности электрического поля, достаточной для ударной ионизации зона–зона. Диоды с лавинной ионизацией в статическом домене можно использовать как активные элементы генераторов шума. В статье проводится анализ процесса формирования статического домена и лавинного умножения тока в нем на основе двухтемпературной модели варизонного AlGaAs. Показано, что для возникновения статического домена при комнатной температуре необходимо, чтобы минимальное значение энергетического зазора между Г-долиной и ближайшей по энергии боковой долиной было меньше тепловой энергии электронов при скорости изменения энергетического зазора с координатой более $150 \text{ эВ}\cdot\text{см}^{-1}$. Соответственно в приборах на основе $\text{Al}_{0,36}\text{Ga}_{0,64}\text{As}-\text{GaAs}$ формируется катодный, а на основе $\text{GaAs}-\text{Al}_{0,36}\text{Ga}_{0,64}\text{As}$ анодный статический домен. Определены варизонные полупроводниковые соединения, в которых возможно формирование статического домена. Использование варизонного соединения $\text{Al}_{0,36}\text{Ga}_{0,64}\text{As}-\text{GaAs}$ с пониженным уровнем легирования в окрестности катода позволяет увеличить эффективный и интегральный коэффициенты умножения тока по сравнению с аналогичным GaAs-диодом. Результаты исследования расширяют знания о физических процессах переноса носителей заряда в сложных полупроводниковых структурах. Они могут быть использованы для технологических разработок новых быстродействующих приборов, таких как транзисторы, диоды Ганна, диоды со статическим доменом, лавинно-пролетные диоды, умножители частоты. Ил. 8. Табл. 1. Библиогр.: 7 назв.

Ключевые слова: диод Ганна, статический домен, междолинный перенос электронов, варизонный полупроводник, генератор шума, ударная ионизация, коэффициент умножения тока.

Диоды Ганна (ДГ) по-прежнему широко используются в качестве активных элементов для генерации и усиления в миллиметровом диапазоне длин волн. Сочетание низкого уровня фазового шума и умеренной мощности с относительно небольшой стоимостью делают их широко востребованными приборами. В основе работы ДГ лежит эффект междолинного переноса электронов (МПЭ). Традиционными проблемами приборов с МПЭ являются продвижение в терагерцевую область электромагнитных волн и повышение стабильности работы. Одним из нетрадиционных применений эффекта МПЭ является его сочетание с ударной ионизацией зона–зона. В работе [1] была высказана и экспериментально подтверждена гипотеза о возможности создания катодного статического домена, в котором происходит ударная ионизация, лавинно-пролетный эффект и шумовая генерация в широком диапазоне частот [2]. Для возникновения статического домена необходимо существенное локальное понижение проводимости в активной области диода. Для формирования статического домена традиционно используются барьер Шоттки и локальное понижение уровня легирования у катодного контакта [1–3]. Диоды с таким типом статического домена в достаточной степени изучены. Другими способами создания статического домена являются локальное понижение подвижности электронов, а также использование гетероперехода. Возможность формирования статического домена, связанного с локальным понижением низкополевой подвижности электронов, высказывалась в работе [2].

В работе [4] это предположение нашло подтверждение, однако подробного исследования проведено не было. Интерес к статическим доменам продиктован изучением стабильности работы ДГ [5] и возможностью создания локальной напряженности электрического поля, достаточной для ударной ионизации зона–зона. Диоды с лавинным умножением тока в статическом домене можно использовать как активные элементы генераторов шума [1].

В настоящей работе проводится анализ процесса формирования статического домена и лавинного умножения тока в нем на основе температурной модели МПЭ.

1. Методика исследования. Рассматриваются n^+-n-n^+ - и $n^+-n^-n-n^+$ -приборы на основе варизонного AlGaAs. Схема зоны проводимости n^+-n-n^+ -ДГ представлена на рис. 1. На схеме использованы обозначения: \mathcal{E}_0 – уровень вакуума при отсутствии внешних сил; \mathcal{E}_l – уровень вакуума с внешними силами; \mathcal{E}_c – дно зоны проводимости; \mathcal{E}_F – энергетический уровень Ферми; \mathcal{E}_v – потолок валентной зоны; \mathcal{E}_g – ширина запрещенной зоны; Г и L – энергетические минимумы Г- и L-долины; χ – энергия электронного сродства; φ – потенциал внешних сил; z – координата; l_c – длина катода; l_a – длина активной зоны.

Содержание AlAs в $\text{Al}_{x(z)}\text{Ga}_{1-x(z)}\text{As}$ задается следующим распределением:

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

где x_1 и x_2 – предельное содержание бинарной компоненты в $\text{Al}_{x(z)}\text{Ga}_{1-x(z)}\text{As}$ в $-\infty$ и $+\infty$ соответственно; l_v – длина варизонного слоя ($l_v = |x_2 - x_1|/x'(z_0)$); z_0 – координата, определяющая местоположение переходных слоев в диоде ($x(z_0) = 0,5(x_2+x_1)$); z – пространственная координата.

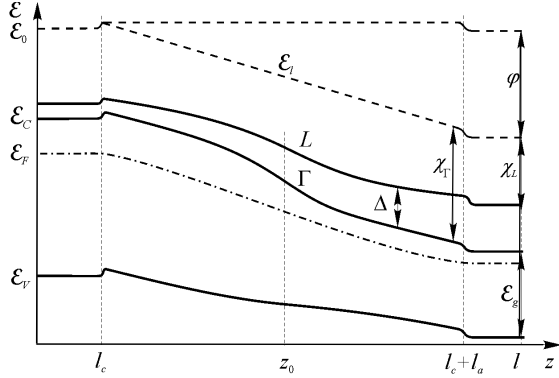


Рис. 1. Схема зонной диаграммы n^+-n-n^+ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -диода

Температура кристаллической решетки считалась постоянной, равной 300 К.

Исследования проводились с помощью двухуровневой модели МПЭ в варизонных полупроводниках, основанной на решении кинетического уравнения Больцмана для случая смещенного максвелловского распределения электронов [6]. Модель представляет собой систему уравнений, состоящую из уравнений непрерывности (1), плотности тока (2) и баланса энергии для каждой из Γ - и L -неэквивалентных долин зоны проводимости полупроводника (3), а также уравнения Пуассона (4):

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} = -\frac{1}{e} \frac{\partial J_i}{\partial z} - \frac{n_i}{\tau_{n,ij}} + \frac{n_j}{\tau'_{n,ji}}; \quad (2)$$

$$J_i = n_i \mu_i \left(eE + \frac{\partial \chi_i}{\partial z} \right) + \kappa_B \mu_i \left(\frac{3n_i T_i}{2m_i} \frac{\partial m_i}{\partial z} - \frac{\partial (n_i T_i)}{\partial z} \right); \quad (3)$$

$$\frac{3}{2} \kappa_B \frac{\partial n_i T_i}{\partial t} = J_i E + \frac{J_i}{e} \frac{\partial \chi_i}{\partial z} - \frac{5}{2} \kappa_B \frac{1}{e} \frac{\partial (J_i T_i)}{\partial z} - \frac{3}{2} \kappa_B \left(\frac{n_j T_j}{\tau'_{\varepsilon,ji}} - \frac{n_i T_i}{\tau_{\varepsilon,ij}} \right); \quad (4)$$

$$\frac{\partial (\varepsilon E)}{\partial z} = 4\pi e (n_i + n_j - n_0), \quad (5)$$

где индексы i и j определяют Γ - и L -неэквивалентные долины. Уравнения (1)–(4) записаны для i -долины. Здесь n_i , μ_i , m_i , J_i , T_i – соответственно концентрация, подвижность, эффективная масса, плотность тока и температура электронов в i -долине; $\tau_{n,ij}$, $\tau_{\varepsilon,ij}$ – время релаксации концентрации и энергии электронов при междолинном переходе из i - в j -долину; $\tau_{\varepsilon,i}$ – время релаксации энергии электронов в i -долине; χ_i – энергия, не-

обходимая для перевода электронов 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; κ_B – постоянная Больцмана; t – время; z – координата. Система уравнений (2)–(5) решалась численным методом.

Для анализа ударной ионизации вычислялся эффективный коэффициент умножения тока:

$$\langle \alpha \rangle = \alpha_n(z) \exp \left\{ - \int_0^z (\alpha_n(z) - \alpha_p(z)) dz \right\}, \quad \text{где } \alpha_n(z) \text{ и}$$

$\alpha_p(z)$ – коэффициенты ударной ионизации электронов и дырок. За начало пробоя условно принимают момент, когда интегральный коэффициент

$$\text{умножения тока } \beta = \int_0^l \langle \alpha \rangle dz > 0,1.$$

Коэффициент ударной ионизации для дырок и электронов в $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, как правило, определяют экспериментально и аппроксимируют однотипной экспоненциальной функцией [7]:

$$\alpha(z) = \alpha_0 \exp \left\{ - \left(\frac{E_i}{E(z)} \right)^r \right\},$$

где параметры α_0 , E_i и r для разного содержания AlAs в $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ взяты из работы [7] и представлены в таблице. Зависимость коэффициентов ударной ионизации от содержания AlAs для промежуточных значений x считалась линейной.

Параметры коэффициента ударной ионизации в $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$

x	α_{0n} , см ⁻¹	E_{in} , В·см ⁻¹	r_n	α_{0p} , см ⁻¹	E_{ip} , В·см ⁻¹	r_p
0	$2,45 \cdot 10^5$	$6,65 \cdot 10^6$	–	$2,45 \cdot 10^5$	$6,65 \cdot 10^6$	–
0,1	$1,81 \cdot 10^5$	$6,31 \cdot 10^5$	2,0	$3,05 \cdot 10^5$	$7,22 \cdot 10^5$	1,9
0,2	$1,09 \cdot 10^6$	$1,37 \cdot 10^6$	1,3	$6,45 \cdot 10^5$	$1,11 \cdot 10^6$	1,5
0,3	$2,21 \cdot 10^5$	$7,64 \cdot 10^5$	2,0	$2,791 \cdot 10^5$	$8,47 \cdot 10^5$	1,9
0,4	$1,74 \cdot 10^7$	$3,39 \cdot 10^6$	1,0	$3,06 \cdot 10^6$	$2,07 \cdot 10^6$	1,2

2. Результаты исследования и их анализ.

Для определенности рассмотрим процессы в n^+-n-n^+ -приборах со следующими параметрами: общая длина диода $l = 3,5$ мкм, длина активной области $l_a = 2,5$ мкм, концентрация ионизированных доноров в активной области $n_a = 10^{16}$ см⁻³.

Проведенные численные эксперименты показывают, что статический домен в n^+-n-n^+ -структуре на основе варизонного $\text{Al}_{x(z)}\text{Ga}_{1-x(z)}\text{As}$ возникает при соблюдении двух условий. Минимальное значение энергетического зазора между Γ -долиной и ближайшей по энергии боковой долиной $\Delta(z)$ в активной области должно быть

меньше тепловой энергии электронов ($x_{\min} > 0,35$) и абсолютное значение градиента $\Delta(z)$ больше $150 \text{ эВ}\cdot\text{см}^{-1}$. При этом в диодах с возрастающей функцией $\Delta(z)$ возникает катодный статический домен (рис. 2), а с убывающей – анодный (рис. 3).

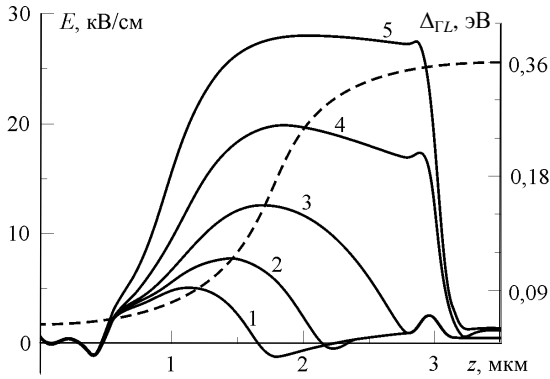


Рис. 2. Статический домен в n^+-n-n^+ $\text{Al}_{0,36}\text{Ga}_{0,64}\text{As}-\text{GaAs}$ с длиной варизонного слоя $l_v = 1,17 \text{ мкм}$ при разных значениях U : 1 – 0,5 В; 2 – 1 В; 3 – 2 В; 4 – 6 В; 5 – 8 В

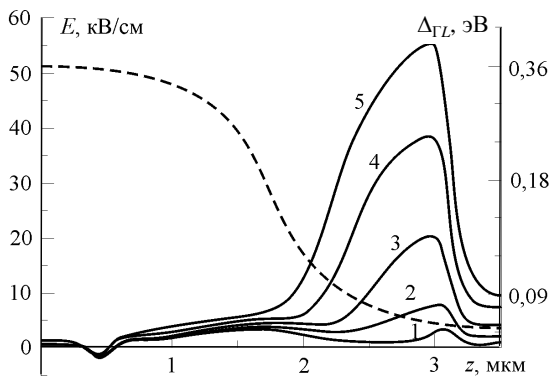


Рис. 3. Статический домен в n^+-n-n^+ $\text{GaAs}-\text{Al}_{0,36}\text{Ga}_{0,64}\text{As}$ с длиной варизонного слоя $l_v = 1,17 \text{ мкм}$ при разных значениях U : 1 – 0,5 В; 2 – 1 В; 3 – 2 В; 4 – 6 В; 5 – 8 В

Статический домен локализован в пространстве с пониженной подвижностью электронов, что соответствует области с малым значением энергетического зазора Δ . Для $\text{Al}_{0,36}\text{Ga}_{0,64}\text{As}-\text{GaAs}$ -диода это часть активной области, примыкающей к катоду. Причина возникновения статического домена лежит в локальном значении энергетического зазора между долинами – меньше, чем тепловая энергия электронов. Низкое значение Δ приводит к большой заселенности электронами верхних долин, из-за чего в этой области падает подвижность электронов. При увеличении приложенного к диоду напряжения возрастают линейные размеры домена и максимальная напряженность поля в нем, однако дрейфа домена не происходит. Причем линейные размеры домена в основном увеличиваются в направлении возрастания энергетического зазора $\Delta(z)$. Для $\text{Al}_{0,36}\text{Ga}_{0,64}\text{As}-\text{GaAs}$ -диода размеры домена растут от катода к аноду.

Похожая ситуация наблюдается и в $\text{GaAs}-\text{Al}_{0,36}\text{Ga}_{0,64}\text{As}$ -диоде. В таком диоде линейные размеры домена меньше, а максимальная напряженность поля больше, чем в $\text{Al}_{0,36}\text{Ga}_{0,64}\text{As}-\text{GaAs}$ -диоде, что связано с дополнительным влиянием поля $n-n^+$ анодного контакта. При возрастании напряжения статический домен растет в направлении от анода к катоду.

Размеры домена определяются также длиной переходной области l_v . Увеличение l_v приводит к возрастанию линейных размеров домена и уменьшению максимального значения напряженности поля в нем. При достижении критического значения l_v , равного 2,7 мкм, статический катодный домен не образуется (рис. 4, кривые 1, 2).

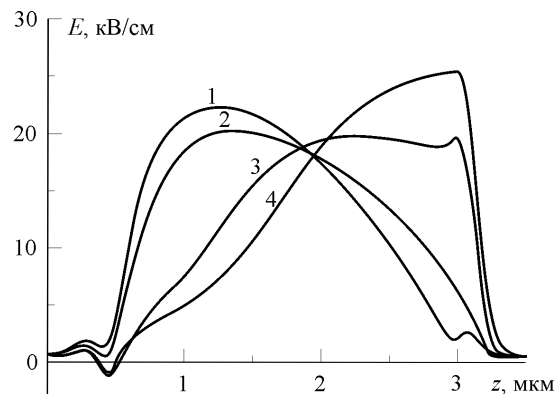


Рис. 4. Распределение напряженности электрического поля в n^+-n-n^+ $\text{Al}_{0,36}\text{Ga}_{0,64}\text{As}-\text{GaAs}$ с напряжением $U = 4 \text{ В}$ при разной длине варизонного слоя l_v : 1 – 0,59 мкм; 2 – 1,76 мкм; 3 – 2,93 мкм; 4 – 4,51 мкм

В этом случае при малых значениях напряженности внешнего поля возникают дрейфующие домены, а при больших формируется анодный статический домен (рис. 4, кривые 3, 4). Например, в $\text{Al}_{0,36}\text{Ga}_{0,64}\text{As}-\text{GaAs}$ -диоде при $l_v = 2,93 \text{ мкм}$ и приложенном к диоду напряжении U от 1,0 до 2,5 В происходят колебания тока из-за дрейфа доменов. При $U > 3 \text{ В}$ колебания тока отсутствуют, но в активной области сформирован статический домен, примыкающий к анодному контакту.

В диодах с убывающей функцией $\Delta(z)$ (например, $\text{GaAs}-\text{Al}_{0,36}\text{Ga}_{0,64}\text{As}$) наблюдается противоположная зависимость размеров домена от длины варизонного слоя. При увеличении l_v максимальная напряженность поля в анодном статическом домене растет, а линейные размеры домена сокращаются (рис. 5).

Статические домены могут формироваться и в других варизонных соединениях при выполнении необходимых для этого условий. Такие полупроводниковые соединения можно выявить из анализа энергетических диаграмм зоны проводимости в тройных полупроводниковых соединениях. К их числу относятся $\text{In}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{P}-\text{GaP}$,

$\text{In}_{0,92}\text{Al}_{0,08}\text{P}-\text{InP}$, $\text{GaP}_{0,5}\text{As}_{0,5}-\text{GaAs}$, $\text{Ga}_{0,6}\text{Al}_{0,4}\text{As}-\text{GaAs}$, $\text{Ga}_{0,85}\text{B}_{0,15}\text{As}-\text{GaAs}$, $\text{In}_{0,65}\text{B}_{0,35}\text{As}-\text{InAs}$, $\text{In}_{0,4}\text{Al}_{0,6}\text{Sb}-\text{InSb}$, $\text{In}_{0,3}\text{Al}_{0,7}\text{As}-\text{InAs}$, $\text{BN}_{0,74}\text{P}_{0,26}-\text{BN}_{0,41}\text{P}_{0,59}$, $\text{Ga}_{0,63}\text{B}_{0,37}\text{N}-\text{GaN}$ (вюрцит), $\text{In}_{0,62}\text{B}_{0,38}\text{N}-\text{InN}$ (вюрцит), $\text{Al}_{0,78}\text{B}_{0,22}\text{N}-\text{AlN}$ (вюрцит). Во всех перечисленных соединениях энергетический зазор Δ является убывающей функцией координаты с минимальным значением, меньше 0,1 эВ. При соответствующей длине варизонного слоя и температуре кристаллической решетки в 300 К в диодах на основе перечисленных варизонных полупроводников должен возникнуть катодный статический домен, а в случае противоположного направления изменения процентного содержания бинарных компонент – анодный статический домен.

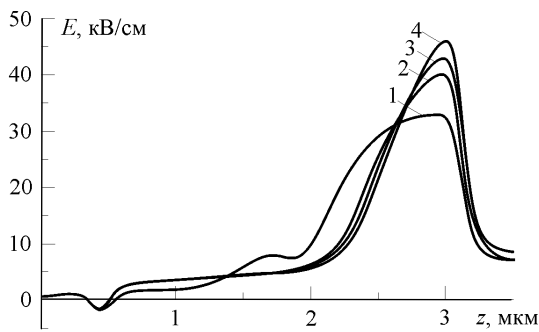


Рис. 5. Распределение напряженности электрического поля в $n^+-n^-n^+$ $\text{GaAs}-\text{Al}_{0,36}\text{Ga}_{0,64}\text{As}$ с напряжением $U = 4$ В при разной длине варизонного слоя l_v : 1 – 0,59 мкм; 2 – 1,76 мкм; 3 – 2,93 мкм; 4 – 4,51 мкм

Анализ процессов возникновения электрических доменов в варизонных кристаллах показывает, что статические домены возникают в области широкозонного полупроводника, каким является, например, $\text{Al}_{0,36}\text{Ga}_{0,64}\text{As}$ в паре с GaAs . Но в широкозонном полупроводнике напряженность электрического поля возникновения лавинного пробоя выше, чем в узкозонном. Поэтому перспектива использования варизонных полупроводников для лавинного пробоя в статическом домене остается не выясненной. Кроме того, оказалось, что добиться напряженности поля локального пробоя в статическом домене для $n^+-n^-n^+$ -структуры на основе $\text{Al}_{0,36}\text{Ga}_{0,64}\text{As}-\text{GaAs}$ не удается. Статические домены в таких приборах при больших напряжениях сливаются с полем анодного контакта (см. рис. 1). Увеличение длины активной области при сохранении формы распределения бинарной компоненты, задаваемой формулой (1), не приводит к желаемому результату. При любой длине диода и любой локализации варизонного слоя напряженность электрического поля остается недостаточной для развития лавинного пробоя в домене. Чтобы сохранить локальность статического домена, в исследовании применяются диоды не только с большей длиной активной области, но и с дополнительной неоднородностью – пониже-

нием уровня легирования («зарубкой») в активной области. Параметры $n^+-n^-n^+$ -приборов следующие: общая длина диода $l = 8$ мкм, длина активной области $l_a = 4$ мкм, длина «зарубки» у катода $l_n = 1,3$ мкм, концентрация ионизированных доноров в активной области $n_a = 4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, центр локализации варизонного слоя z_0 совпадает с началом «зарубки», концентрация ионизированных доноров в «зарубке» $n_n = 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Приложенное к прибору напряжение равно 30 В.

Рассмотрим распределение напряженности электрического поля и эффективного коэффициента умножения тока $\langle \alpha \rangle$ в диоде на основе пространственно однородного соединения $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ при разном содержании AlAs (рис. 6).

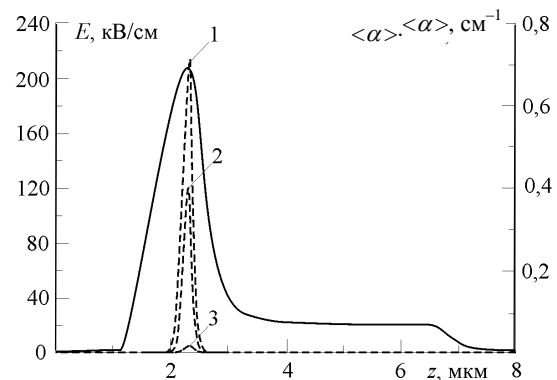


Рис. 6. Распределение напряженности электрического поля (непрерывная линия) и коэффициента умножения тока (пунктирная линия) в $n^+-n^-n^+$ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ при $U = 30$ В: 1 – GaAs ; 2 – $\text{Al}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{As}$; 3 – $\text{Al}_{0,18}\text{Ga}_{0,82}\text{As}$

В таких диодах статический домен возникает только из-за пониженного уровня легирования в «зарубке». Наибольшее значение эффективного коэффициента умножения тока $\langle \alpha \rangle \approx 720 \text{ см}^{-1}$ возникает в GaAs -диодах. Максимальная напряженность электрического поля в статическом домене при любом составе $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ приблизительно одинаковая. При этом ширина запрещенной зоны в GaAs минимальная по сравнению с $\text{Al}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{As}$ и $\text{Al}_{0,18}\text{Ga}_{0,82}\text{As}$. Даже для GaAs -диодов значение интегрального коэффициента умножения тока $\beta \approx 7 \cdot 10^{-6}$ является недостаточным для лавинного умножения тока.

Распределение напряженности электрического поля и коэффициента умножения тока в аналогичном приборе на основе варизонного $\text{Al}_{0,36}\text{Ga}_{0,64}\text{As}-\text{GaAs}$ представлено на рис. 7. Можно обратить внимание, что максимальная напряженность электрического поля в статическом домене в этом случае немного больше, чем в диодах на основе GaAs . При уменьшении длины варизонного слоя l_v напряженность электрического поля в статическом домене возрастает. При этом в области максимума поля доля AlAs в $\text{Al}_{x(z)}\text{Ga}_{1-x(z)}\text{As}$ приближается к нулю. Поэтому

при уменьшении l_v пиковое значение эффективного коэффициента умножения тока растет. При $l_v = 0,64$ мкм коэффициент умножения тока $\langle \alpha \rangle$ в статическом домене достигает значения 2700 см^{-1} и интегральный коэффициент $\beta \approx 0,06$ на четыре порядка больше, чем в GaAs-диоде.

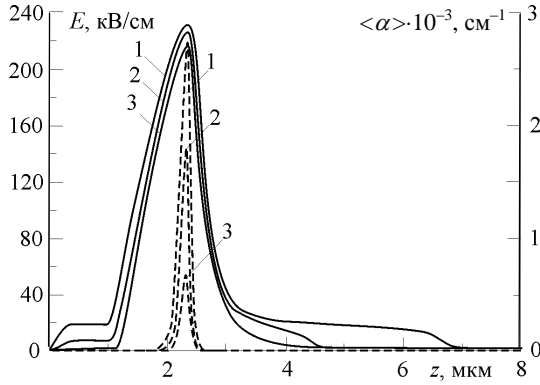


Рис. 7. Распределение напряженности электрического поля (непрерывная линия) и коэффициента умножения тока (пунктирная линия) в $n^+ - n^- - n^- - n^+$ Al_{0,36}Ga_{0,64}As-GaAs с напряжением $U = 30$ В при разной длине варизонного слоя: 1 – 0,64 мкм; 2 – 1,92 мкм; 3 – 5,28 мкм

В GaAs-Al_{0,36}Ga_{0,64}As-приборах из-за «зарубки» статический домен возникает не в анодном контакте, как в однородно легированном диоде (рис. 3), а у катода (рис. 8).

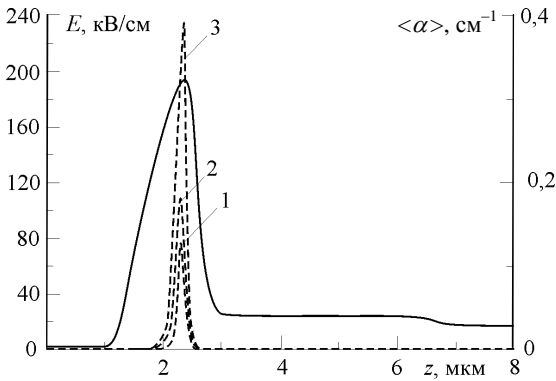


Рис. 8. Распределение напряженности электрического поля (непрерывная линия) и коэффициента умножения тока (пунктирная линия) в $n^+ - n^- - n^- - n^+$ GaAs-Al_{0,36}Ga_{0,64}As с напряжением $U = 30$ В при разной длине варизонного слоя: 1 – 0,64 мкм; 2 – 1,92 мкм; 3 – 5,28 мкм

Максимальная напряженность поля в статическом домене меньше, чем в GaAs-диодах. При уменьшении длины переходной области l_v максимум эффективного коэффициента умножения тока убывает, в отличие от Al_{0,36}Ga_{0,64}As-GaAs-диодов. Эффективный коэффициент умножения тока $\langle \alpha \rangle$ в сравнении с Al_{0,36}Ga_{0,64}As-GaAs- и GaAs-диодами пренебрежимо мал. Для рассмотренного случая ударная ионизация в статическом домене GaAs-Al_{0,36}Ga_{0,64}As-прибора маловероятна. Низкие

значения коэффициентов $\langle \alpha \rangle$ и β связаны с тем, что в области максимума напряженности поля состав Al_{x(z)}Ga_{1-x(z)}As близок к Al_{0,36}Ga_{0,64}As, который является более широкозонным материалом, чем GaAs.

Можно предложить другие способы сохранения локальности статического домена у катодного контакта при напряжении возникновения лавинного пробоя. Например, гауссовское распределение AlAs-компоненты в Al_{x(z)}Ga_{1-x(z)}As.

Выводы. Таким образом, в $n^+ - n^- - n^+$ -структурах на основе варизонного Al_{x(z)}Ga_{1-x(z)}As может формироваться катодный или анодный статический домен. Условиями возникновения статического домена в $n^+ - n^- - n^+$ -приборах являются, во-первых, наличие локального минимума энергетического зазора между Г-долиной и ближайшей к ней по энергии боковой долиной $\Delta(z)$ со значением меньше тепловой энергии электронов и, во-вторых, абсолютное значение градиента $\Delta(z)$, превышающее $150 \text{ эВ}\cdot\text{см}^{-1}$. Для Al_{x(z)}Ga_{1-x(z)}As-диодов при температуре кристаллической решетки 300 К указанные условия выполняются при содержании AlAs в соединении более 0,35 и длине варизонного слоя менее 2,7 мкм. В приборах на основе варизонных полупроводников с возрастающей зависимостью $\Delta(z)$, например в Al_{0,36}Ga_{0,64}As-GaAs-диоде, формируется катодный статический домен. Уменьшение длины варизонного слоя до длины, сравнимой с длиной свободного пробега электронов, влечет за собой рост максимальной напряженности поля в статическом домене. В приборах на основе варизонных полупроводников с убывающей зависимостью $\Delta(z)$, например в GaAs-Al_{0,36}Ga_{0,64}As-диоде, формируется анодный статический домен. Уменьшение длины варизонного слоя до длины, сравнимой с длиной свободного пробега электронов, влечет за собой снижение максимальной напряженности поля в статическом домене.

Найдены варизонные полупроводники, в которых возможно возникновение статического домена.

При монотонной зависимости содержания AlAs-компоненты в Al_{x(z)}Ga_{1-x(z)}As в $n^+ - n^- - n^+$ -диодах любой длины добиться напряженности поля локального пробоя в статическом домене для структуры на основе Al_{0,36}Ga_{0,64}As-GaAs не удастся.

В $n^+ - n^- - n^- - n^+$ -приборах на основе варизонного Al_{0,36}Ga_{0,64}As-GaAs с центром в $n^+ - n^-$ -переходе эффективный и интегральный коэффициенты умножения тока значительно больше, чем в аналогичном GaAs-диоде при одинаковом приложенном напряжении.

Таким образом, использование варизонных полупроводников с возрастающей зависимостью $\Delta(z)$ в приборах с высокоомной неодно-

родностью у катода может привести к увеличению интегрального коэффициента умножения тока в статическом домене и уменьшению пробивного напряжения. Результаты исследования могут быть использованы для технологических разработок новых быстродействующих приборов, таких как транзисторы, диод Ганна, лавинно-пролетные диоды, умножители частоты. Непосредственной областью приложения являются диоды со статическим доменом, которые используются как активные источники шума. Можно предположить улучшение шумовых характеристик таких диодов на основе варизонных полупроводников, в частности $Al_{x(z)}Ga_{1-x(z)}As$.

Библиографический список

1. Прохоров Э. Д. Генерация СВЧ-шума диодом Ганна с катодным статическим доменом / Э. Д. Прохоров, С. Н. Скоробогатова, Е. С. Золотарев // Радиотехника и электрон. – 1976. – Вып. 21, № 8. – С. 1732–1739.
2. Прохоров Э. Д. Шумовой спектр диода с катодным статическим доменом / Э. Д. Прохоров, С. Н. Скоробогатова // Радиотехника и электрон. – 1985. – Вып. 31, № 7. – С. 1447–1449.
3. Прохоров Э. Д. Влияние параметров прикатодной области в диоде с катодным статическим доменом на порог генерации СВЧ-шума / Э. Д. Прохоров, О. В. Боцула, С. Б. Соколов // Радиофизика и электрон. – 2010. – 1(15), № 1. – С. 91–95.
4. Стороженко И. П. Особенности возникновения и дрейфа волн объемного заряда в приборах с междолинным переносом электронов на основе варизонного $GaP_{x(z)}As_{1-x(z)}$ / И. П. Стороженко // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2007. – 12, № 1. – С. 243–249.
5. Shiau Y. Stochastic postponement of the domain transitions and destabilization of current in the Gunn diode / Y. Shiau, Y. Cheng, C. Hu // Phys. Rev. E. – 1998. – 57, N 2. – P. R1227–R1230.
6. Storozhenko I. P. Simulation of transferred electron devices with linearly graded composition of 3-5 threefold semiconductor in active zone / I. P. Storozhenko, E. D. Prokhorov, Yu. V. Arkusha // Int. J. Infrared and Millimeter Waves. – 2004. – 25, N 6. – P. 879–890.
7. New Semiconductor Materials. Characteristics and Properties [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/AlGaAs/ionization.html>.

Рукопись поступила 15.06.2015.

I. P. Storozhenko

STATIC DOMAIN IN DEVICE WITH INTERVALLEY ELECTRON TRANSFER ON THE BASIS OF VARIBAND AlGaAs

The use of variband semiconductors in uniformly doped devices with the effect of intervalley electron transfer can lead to the appearance of a static electric domain. The interest in the static domain is due to the possibility of creating a local electric

field sufficient for impact ionization of zone area. Diodes with avalanche ionization in the static domain can be used as active elements of noise generators. The article analyzes the process of formation of a static domain and avalanche multiplication of current in it on the basis of the two-temperature model variband Al-GaAs. It is shown that for the formation of a static domain at room temperature, it is necessary that the minimum value of the energy gap between the Γ -valley and the closest by energy side valley was smaller than the thermal energy of the electrons at the rate of change of the energy gap to coordinate more than $150 \text{ eV}\cdot\text{cm}^{-1}$. Accordingly, in devices based on $Al_{0,36}Ga_{0,64}As$ -GaAs cathode static domain is formed, and on the basis of GaAs- $Al_{0,36}Ga_{0,64}As$ anode static domain is formed. The variband semiconductor compounds in which it is possible to form a static domain were determined. Using variband compounds $Al_{0,36}Ga_{0,64}As$ -GaAs with low levels of doping in the vicinity of the cathode increases the effective and integral current multipliers as compared to GaAs-diode. The findings expand the knowledge of the physical processes of charge transport in complex semiconductor structures. They can be used for technological development of new high-speed devices, such as transistors, Gunn diodes, diodes with a stationary domain, avalanche-transit diodes, frequency multipliers.

Key words: Gunn diode, static domain, intervalley electron transfer, graded-gap semiconductor, noise generator, impact ionization, current multiplication factor.

I. П. Стороженко

СТАТИЧНИЙ ДОМЕН У ПРИЛАДІ З МІЖДОЛИННИМ ПЕРЕНЕСЕННЯМ ЕЛЕКТРОНІВ НА ОСНОВІ ВАРІЗОННОГО AlGaAs

Використання варизонних напівпровідників в одно-рідно-легованих приладах з ефектом міждолинного перенесення електронів може привести до виникнення статичного електричного домена. Інтерес до статичного домена продиктовано можливістю створення локальної напруженості електричного поля, достатньої для ударної іонізації зона-зона. Діоди з лавинною іонізацією в статичному домені можна використовувати як активні елементи генераторів шуму. У статті проводиться аналіз процесу формування статичного домена та лавинного множення струму в ньому на основі двотемпературної моделі варизонного AlGaAs. Показано, що для виникнення статичного домена за кімнатної температури необхідно, щоб мінімальне значення енергетичного зазору між Γ -долиною і найближчою за енергією бічною долиною було менше теплової енергії електронів при швидкості зміни енергетичного зазору з координатою більше $150 \text{ eV}\cdot\text{cm}^{-1}$. Відповідно в приладах на основі $Al_{0,36}Ga_{0,64}As$ -GaAs формується катодний, а на основі GaAs- $Al_{0,36}Ga_{0,64}As$ анодний статичний домен. Визначені варизонні напівпровідникові сполуки, в яких може формуватися статичний домен. Використання варизонної сполуки $Al_{0,36}Ga_{0,64}As$ -GaAs з пониженим рівнем легування біля катода дозволяє збільшити ефективний та інтегральний коефіцієнти множення струму в порівнянні з аналогічним GaAs-діодом. Результати дослідження поширюють знання про фізичні процеси переносу носіїв заряду в складних напівпровідникових структурах. Вони можуть бути використані для технологічних розробок нових швидкодіючих приладів, таких як транзистори, діоди Ганна, діоди зі статичним доменом, лавинно-пролетні діоди, помножувачі частоти.

Ключові слова: діод Ганна, статичний домен, міждолинне перенесення електронів, варизонний напівпровідник, генератор шуму, ударна йонізація, коефіцієнт множення струму.