

## РОЛЬ РАССЕЯНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ НА НЕЙТРАЛЬНЫХ ПРИМЕСЯХ И СПЛАВНОМ ПОТЕНЦИАЛЕ В ФОРМИРОВАНИИ ВОЛН ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАРЯДА В ПРИБОРАХ С МЕЖДОЛИННЫМ ПЕРЕНОСОМ ЭЛЕКТРОНОВ

И. П. Стороженко

*Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина,  
4, пл. Свободы, Харьков, 61077, Украина  
E-mail: [storozhenko\\_igor@mail.ru](mailto:storozhenko_igor@mail.ru)*

Исследована роль рассеяния электронов на неравномерно распределённых нейтральных примесях и сплавном потенциале. Показано, что возрастающая зависимость низкополевой подвижности от координаты в  $n^+-n-n^+$  приборах с междолинным переносом электронов может приводить к возникновению и дрейфу дипольных доменов. Причиной этого могут служить стационарные компоненты скорости релаксации импульса, такие как убывающие функции координаты концентрации нейтральной примеси, сплавного потенциала и процентного содержания бинарной компоненты в тройных и четверных полупроводниках. При оптимальном распределении нейтральной примеси в активной области эффективность генерации колебаний тока возрастает, а их оптимальная рабочая частота падает. Ил. 5. Библиограф. 9 назв.

**Ключевые слова:** междолинный перенос электронов, рассеяние электронов, нейтральная примесь, сплавной потенциал, дипольный домен, частота.

В настоящее время большой интерес представляют исследования приборов на основе тройных или четверных полупроводников  $A_3B_5$  с градиентом процентного содержания бинарных компонент. В частности приборы с междолинным переносом электронов (ПМПЭ) с  $Al_{x(z)}Ga_{1-x(z)}As$  варизонным слоем в активной области по высокочастотным характеристикам превосходят аналогичные приборы на основе GaAs [1, 2]. Численные эксперименты [3] показали, что в варизонных ПМПЭ с омическим  $n^+-n$  катодным контактом может реализовываться режим с дипольными доменами, что вообще-то является необычным. Дело в том, что в  $n^+-n-n^+$  приборах на основе однородных по составу полупроводников реализуется режим с дрейфом обогащённых слоёв [4]. Проведенный в работе [5] более подробный анализ показал, что наибольшее влияние на работу варизонного ПМПЭ оказывают зависимости от координаты энергетического зазора между  $\Gamma$  долиной и ближайшей к ней по энергии верхней долиной  $\Delta(z)$ , а также энергия электронного сродства  $\chi(z)$ . В варизонных ПМПЭ распространяются дипольные домены в случае, когда энергетический зазор  $\Delta(z)$  в активной области прибора является возрастающей функцией. Энергия электронного сродства становится существенной при длине варизонного слоя меньше, чем  $0,2 \div 0,4$  мкм [3, 5]. Однако не выяснена роль зависимости от координаты других электрофизических параметров варизонного полупроводника. В настоящем сообщении рассматривается роль пространственной неоднородности рассеяния электронов на сплавном потенциале [6] и на нейтральных примесях. Такое рассмотрение будет полезно при анализе электронных процессов в варизонных ПМПЭ.

**1. Роль рассеяния на нейтральных примесях.** Роль рассеяния электронов на сплавном потенциале и нейтральных примесях исследуется на примере  $n^+-n-n^+$  структуры ПМПЭ. Для этого используется одномерная двухтемпературная  $\Gamma$ - $L$  модель ПМПЭ на основе GaAs [7]. Длина активной области диода  $l_a = 2,5$  мкм и концентрация ионизированных доноров в ней  $n = 10^{16}$  см $^{-3}$ . Температура кристаллической решётки считалась постоянной, равной 300 К. Распределение концентрации нейтральных примесей задавалось соотношением

$$N_n(z) = \frac{N_{нк} - N_{на}}{1 + \exp\left(\frac{4(z - z_0)}{l}\right)} + N_{на}, \quad (1)$$

где  $z$  – пространственная координата;  $z_0$  – координата центра активной области;  $l = 1,5$  мкм – длина, на которой происходит основное изменение концентрации;  $N_{нк}$  и  $N_{на}$  – концентрация нейтральных примесей соответственно в катодном и анодном контакте.

Рассеяния электронов на нейтральных примесях и на сплавном потенциале уменьшают подвижность электронов и не зависят от электронной температуры. Компонента скорости релаксации импульса электронов при их рассеянии на нейтральных примесях определяется выражением [8]

$$\frac{1}{\tau_{кн}} = \frac{20\varepsilon_0\hbar^3 N_n}{e^2 m^2}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость полупроводника на низких частотах;  $m$  – эффективная масса электронов;  $e$  – элементарный заряд электрона;  $\hbar$  – постоянная Дирака. При электронной температуре равной 300 К подвижность электро-

нов в  $\Gamma$  и  $L$  долинах является возрастающей функцией координаты, если концентрация нейтральных примесей согласно формуле (2) уменьшается от значения  $N_{нк}$  в катоде до  $N_{на} = 0 \text{ см}^{-3}$  в аноде. В этом случае в приборах с омическим  $n^+$ - $n$  катодом формируются дипольные домены, как например, в диоде с убывающей зависимостью  $N_n(z)$  от  $10^{16}$  до  $0 \text{ см}^{-3}$  (рис. 1). Пролётная частота колебаний в таком диоде при напряжении  $U_0 = 3 \text{ В}$  составляет  $\approx 46 \text{ ГГц}$ . Если подвижность электронов убывает от катода к аноду, что возникает при возрастающей функции  $N_n(z)$ , в приборах возникает дрейф обогащённых слоёв или анодный статический домен. Например, в диоде с возрастающей зависимостью  $N_n(z)$  от  $0$  до  $10^{16} \text{ см}^{-3}$  при  $U_0 = 3 \text{ В}$  колебания тока отсутствуют. В анодном контакте наблюдается статический домен (рис. 2).

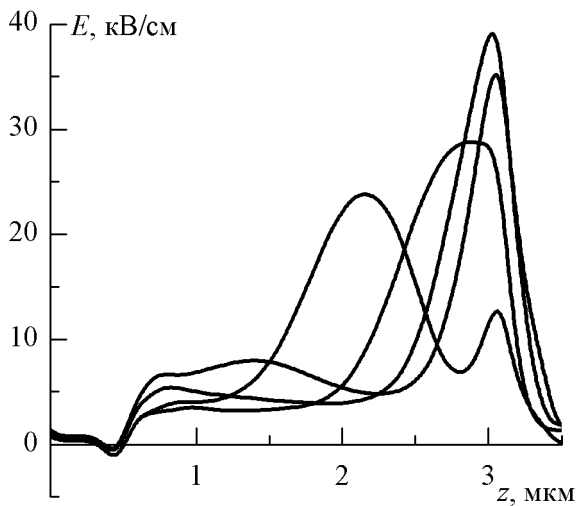


Рис. 1. Распределения напряжённости электрического поля в различные моменты времени в GaAs диоде при убывающей концентрации нейтральных примесей от  $10^{16}$  до  $0 \text{ см}^{-3}$ , напряжении на диоде  $U_0 = 3 \text{ В}$  и пролётной частоте  $f \approx 46 \text{ ГГц}$

ПМПЭ в режиме работы с дрейфом дипольных доменов обладают большей эффективностью генерации колебаний тока, чем с обогащёнными слоями. В GaAs диоде с длиной активной области  $l_a = 2,5 \text{ мкм}$  при убывающей зависимости  $N_n(z)$  (в аноде  $N_n = 0 \text{ см}^{-3}$ ) существует оптимальное значение концентрации нейтральных примесей в катоде, равное  $\approx 2,7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , при котором КПД максимальное (рис. 3, кривая 1).

При малых значениях  $N_n$  в катоде в диоде формируются обогащённые слои, а при больших – катодный статический домен. При концентрации  $N_{нк} \approx 9,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  генерации колебаний тока в диоде не происходит из-за возникновения катодного статического домена.

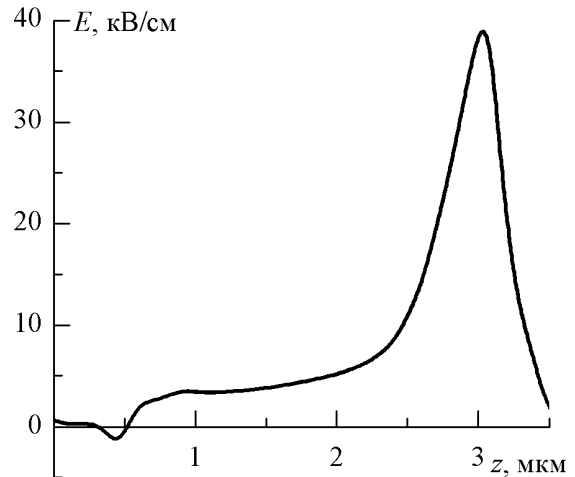


Рис. 2. Распределение напряжённости электрического поля в различные моменты времени в GaAs диоде при возрастающей концентрации нейтральных примесей от  $0$  до  $10^{16} \text{ см}^{-3}$  и напряжении на диоде  $U_0 = 3 \text{ В}$

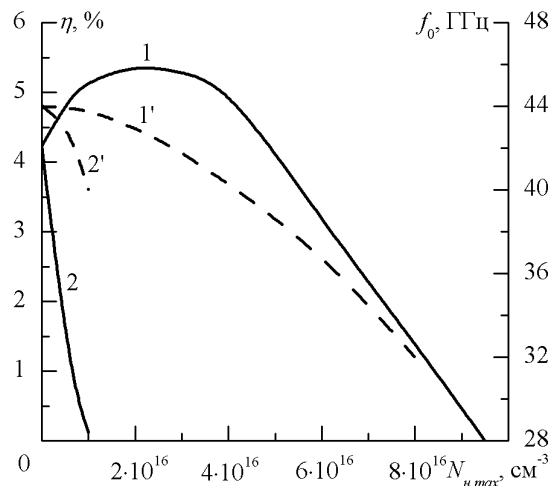


Рис. 3. Зависимость КПД (непрерывная линия) и оптимальной частоты (пунктирная линия) генерации колебаний тока в GaAs диоде от максимального значения концентрации нейтральной примеси при  $l = 1,5$  и  $l_a = 2,5 \text{ мкм}$ : 1, 1' -  $N_{на} = 0 \text{ см}^{-3}$  (убывающая  $N_n(z)$ ); 2, 2' -  $N_{нк} = 0 \text{ см}^{-3}$  (возрастающая  $N_n(z)$ )

В случае возрастающей зависимости  $N_n(z)$  ( $N_{нк} = 0$ ) приборы малоэффективны (рис. 3, кривая 2). При максимальной концентрации примесей в аноде, равной  $\approx 10^{16} \text{ см}^{-3}$  диод теряет активные свойства. Статический домен локализован на анодном контакте. При возрастании в катоде или аноде  $N_n$  оптимальная частота генерации падает из-за убывания средней подвижности электронов в диоде (рис. 3, кривые 1' и 2').

**2. Роль рассеяния на сплавленном потенциале.** Распределение нейтральной примеси в диоде зависит от технологии производства и может быть сведено к минимуму. В тройных и четверных полупроводниковых соединениях  $A_3B_5$  из-за неупорядоченного размещения разных сор-

тов атомов в кристаллической решётке всегда имеет место рассеяние на сплавном потенциале [6]. Скорость рассеяния импульса электронов для трёхкомпонентных соединений  $A_{1-x}B_xC$  согласно работе [6] определяется следующим выражением

$$\frac{1}{\tau_{\text{ксп}}} = \frac{3\pi}{8\sqrt{2}} \frac{m^{3/2}}{\hbar^4} x(z)(1-x(z)) \times a^3(z)DU^2(z), \quad (4)$$

где  $a$  – постоянная решётки;  $DU$  – сплавной потенциал;  $x(z)$  – содержание бинарной компоненты ВС в  $A_{1-x}B_xC$ . В бинарных полупроводниках данный вид рассеяния отсутствует. Для выяснения значения рассеяния электронов на сплавном потенциале в варизонных ПМПЭ рассмотрим работу прибора на основе полупроводникового соединения с такими же электрофизическими параметрами, как в GaAs, но в котором присутствует рассеяние на сплавном потенциале. К суммарной скорости релаксации импульса добавляется слабое, определяемое по формуле (4). Значение сплавного потенциала считалось постоянным, а процентное содержание бинарной компоненты  $x(z)$  задавалось таким же законом, как  $N_n(z)$

$$x(z) = \frac{x_k - x_a}{1 + \exp\left(\frac{4(z - z_0)}{l}\right)} + x_a, \quad (5)$$

где  $x_a$  и  $x_k$  – содержание бинарной компоненты соответственно в катодном и анодном контакте. При  $x(z)=0,5$  в соответствии с формулой (4)  $1/\tau_{\text{ксп}}$  – максимально. Поэтому максимальное значение  $x(z)$  в катоде или аноде равнялось 0,5. В случае убывающей зависимости  $x(z)$  от 0,5 до 0 подвижность электронов в долинах при электронной температуре 300 K является возрастающей функцией координаты. Увеличение сплавного потенциала понижает подвижность электронов в катоде. В таких диодах аналогично диодам с убывающей концентрацией нейтральных примесей возникает дрейф дипольных доменов. В диодах с  $l = 1,5$  мкм,  $U = 3$  В и  $\Delta U = 0,6$  эВ в результате дрейфа дипольных доменов (рис. 4) возникают колебания тока с частотой  $\approx 38$  ГГц, что на  $\approx 8$  ГГц меньше, чем в рассмотренном ранее диоде с  $N_{\text{нк}} = 10^{16}$  см $^{-3}$ . В таких диодах подвижность электронов у катода в  $\Gamma$  долинах приблизительно одинаковая, но в  $L$  долинах примерно в шесть раз меньше в диоде с рассеянием на сплавном потенциале (рис. 3, кривая 3, 4). Очевидно, поэтому так и отличаются пролётные частоты. При увеличении  $\Delta U$  от 0,4 до 0,8 эВ пролётная частота падает от  $\approx 45$  ГГц до  $\approx 34$  ГГц. Статический домен формируется при значениях  $\Delta U > 2,8$  эВ. В реальных полупроводниковых соединениях  $\Delta U = 0,4 \div 0,6$  эВ

[6]. В случае возрастания  $x(z)$  от 0 до 0,5 подвижность электронов является убывающей функцией координаты. В таких диодах формируются обогащённые слои или статический анодный домен. Например, в диоде с  $\Delta U = 0,6$  эВ колебания тока на частоте  $f \approx 44$  ГГц возникают в результате дрейфа обогащённых слоёв (рис. 5). Статический анодный домен в аналогичных диодах возникает при значениях  $\Delta U > 2,3$  эВ.

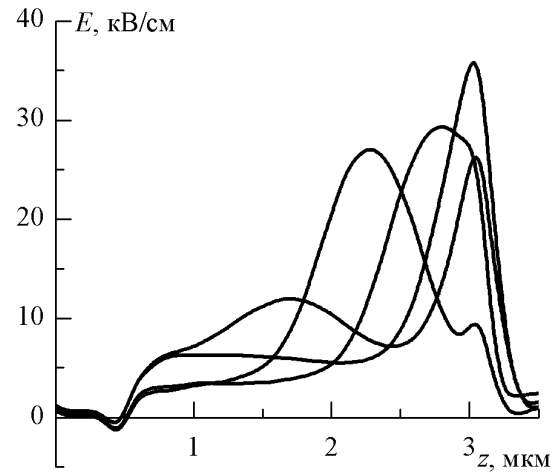


Рис. 4. Распределение напряжённости электрического поля в различные моменты времени одного периода колебания с пролётной частотой  $f \approx 38$  ГГц ( $U_0 = 3$  В) в GaAs диоде с учётом рассеяния на сплавном потенциале  $\Delta U = 0,6$  эВ при убывающей функции  $x(z)$  от 0,5 до 0

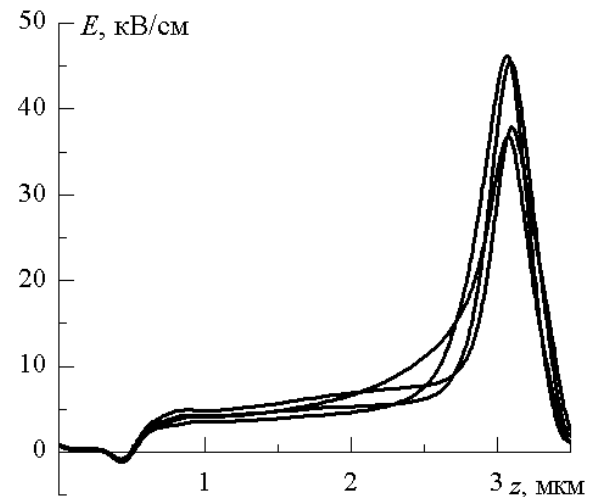


Рис. 5. Распределение напряжённости электрического поля в различные моменты времени одного периода колебания с пролётной частотой  $f \approx 38$  ГГц ( $U_0 = 3$  В) в GaAs диоде с учётом рассеяния на сплавном потенциале  $\Delta U = 0,6$  эВ при возрастающей функции  $x(z)$  от 0 до 0,5

**Выводы.** Таким образом, возрастающая зависимость низкополевой подвижности от координаты в  $n^+ - n - n^+$  диодах может приводить к формированию и дрейфу дипольных доменов. При-

чиной этого могут служить стационарные компоненты скорости релаксации импульса, такие как убывающие функции координаты концентрации нейтральной примеси, сплавного потенциала и процентного содержания бинарной компоненты в тройных и четверных соединениях. При оптимальном распределении нейтральной примеси в активной области КПД диода возрастает, а оптимальная рабочая частота падает. При значительных градиентах нейтральной примеси в активной области возникают статические домены, как предсказывалось в работе [9].

1. Couch N. R., Beton P. H., Kelly M. J. et al. The use of linearly graded composition AlGaAs injectors for intervalley transfer in GaAs: theory and experiment // Solid State Electron. - 1988. - 31, N3-4, chapter 6. - P.613-616.
2. 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. - 31, N7. - P.1211-1214.
3. Стороженко И. П. Диоды Ганна на основе варизонного  $Al_{x(z)}Ga_{1-x(z)}As$  с различными катодными контактами // Радиофизика и радиоастрономия. - 2006. - 11, N2. - С.186-197.
4. Аркуша Ю. В., Дрогаченко А. А., Прохоров Э. Д. Влияние формы напряжения на энергетические характеристики коротких диодов Ганна // Радиотехника и электроника. - 1987. - 32, N9. - С.1947-1954.
5. Стороженко И. П. Особенности возникновения и дрейфа волн объёмного заряда в приборах с междолинным переносом электронов на основе варизонного  $GaP_{x(z)}As_{1-x(z)}$  // Радиофизика и электроника. - Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. - 2007. - 12, N1. - С.243-249.
6. Littlejohn M. A., Hauser J. R., Glisson T. H. Alloy scattering and high field transport in ternary and quaternary III-V semiconductors // Solid State Electron. - 1978. - 21, N1. - P.107-114.
7. 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
8. Прохоров Э. Д., Белецкий Н. И. Полупроводниковые материалы для приборов с междолинным переносом электронов. - Харьков: Вища школа, 1982. - 144 с.
9. Прохоров Э. Д., Скоробогатова С. Н., Золотарёв Е. С. Влияние профиля легирования на развитие ударной ионизации в катодном статическом домене диода Ганна // Радиотехника и электроника. - 1977. - 22, №3. - С.640-641.

## NEUTRAL IMPURITY AND ALLOY POTENTIAL SCATTERING PART OF ELECTRONS IN FORMATION OF VOLUME CHARGE WAVE IN INTERVALLEY TRANSFERRED ELECTRON DEVICES

I. P. Storozhenko

Role of electron scattering by nonuniform distribution of neutral impurity and alloy potential has been studied. It has been shown that increasing coordinate dependence of low-field mobility in  $n^+ - n - n^+$  intervalley transferred electron devices can result to appearance and drift of dipole domains. Cause of these is stationary component of relaxation velocity such as decreasing of coordinate functions of neutral impurity concentration, alloy potential and binary components contents in ternary and quaternary semiconductors. Current oscillation efficiency increase and optimal work frequency decrease at optimum distribution of neutral impurity in active zone.

**Key words:** intervalley electrons transfer, electrons scattering, variband semiconductor, neutral impurity, alloy potential, dipole domain, frequency.

## РОЛЬ РОЗСІЮВАННЯ ЕЛЕКТРОНІВ НА НЕЙТРАЛЬНИХ ДОМІШКАХ І СПЛАВНОМУ ПОТЕНЦІАЛІ У ФОРМУВАННІ ХВИЛЬ ПРОСТОРОВОГО ЗАРЯДУ В ПРИЛАДАХ З МІЖДОЛИННИМ ПЕРЕНОСОМ ЕЛЕКТРОНІВ

И. П. Стороженко

Досліджена роль розсіювання електронів на нерівномірному розподілі нейтральних домішок та сплавному потенціалі. Показано, що зростаюча залежність низькополевої рухливості від координати в  $n^+ - n - n^+$  приладах з міждолинним переносом електронів може призвести до виникнення і дрейфу дипольних доменів. Причиною можуть служити стаціонарні компоненти швидкості релаксації імпульсу такі як функції, що спадають від координати концентрації нейтральної домішки, сплавного потенціалу і змісту бинарної компоненти в потрійних і почетверених сполуках. При оптимальному розподілі нейтральних домішок в активній області ефективність генерації коливачь струму зростає, а їх оптимальна робоча частота падає.

**Ключові слова:** міждолинний переніс електронів, розсіювання електронів, нейтральна домішка, сплавної потенціал, дипольний домен, частота.

Рукопись поступила 12 декабря 2007 г.