

Фазовая скорость волн пространственного заряда в полупроводниковых структурах на основе нитридов индия, галлия и алюминия

С. А. Сергеев,* А. И. Михайлов,† О. С. Сенатов,‡ Б. В. Сергеева§
Саратовский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского
Россия, г. Саратов, ул. Астраханская, 83

(Статья поступила 04.09.2013; Подписана в печать 12.04.2014)

В данной работе приводятся результаты теоретического исследования влияния диффузии и частотной дисперсии дифференциальной подвижности электронов на фазовую скорость волн пространственного заряда, распространяющихся в дрейфовом потоке электронов в полупроводниковых структурах на основе нитридов галлия, индия и алюминия.

PACS: 71.45.Lg, 72.20.Ht

УДК: 621.382

Ключевые слова: функциональная электроника, нитриды, отрицательная дифференциальная проводимость, волны пространственного заряда.

ВВЕДЕНИЕ

Функциональная электроника представляет собой перспективную область современной интегральной электроники, в которой изучается возникновение и взаимодействие динамических неоднородностей в континуальных средах в совокупности с физическими полями, а также создаются приборы и устройства на основе динамических неоднородностей для целей обработки, генерации и хранения информации [1–3].

Перспективным классом функциональных микроэлектронных устройств СВЧ диапазона являются устройства на волнах пространственного заряда (ВПЗ) в полупроводниках с отрицательной дифференциальной проводимостью, обусловленной междолинными электронными переходами в сильных электрических полях. Эти устройства могут выполнять в СВЧ диапазоне такие радиотехнические функции как усиление, преобразование, генерация, задержка и изменение фазы сигналов и др. [1–6]. Однако реально созданные в настоящее время устройства на ВПЗ на основе n-GaAs имеют сравнительно низкий частотный предел работы [7, 8]. Одним из путей повышения граничной частоты устройств на ВПЗ является поиск, изучение свойств и технологическое освоение новых полупроводниковых материалов, которые могли бы заменить традиционный в этом применении n-GaAs. Проведенный в [9, 10] сравнительный анализ основных свойств соединений A_3B_5 показал, что нитриды индия, галлия и алюминия являются перспективными материалами для использования в устройствах на ВПЗ.

Наиболее известным функциональным устройством на волнах пространственного заряда в полупроводниках является тонкопленочный усилитель бегущей волны на n-GaAs [7, 8]. Одной из отличительных

особенностей этого усилителя является широкополосность, которую, однако, не всегда можно рассматривать как полезное свойство. Для реализации частотно-избирательных режимов в [8, 11] была предложена новая конструкция полупроводниковой структуры преобразователя частоты миллиметрового диапазона, работа которого основана на параметрическом взаимодействии ВПЗ в полупроводниках с отрицательной дифференциальной проводимостью. Предложенная конструкция содержит выходной элемент связи с электродинамической системой в виде встречно-штыревого преобразователя (ВШП). Для эффективной фильтрации полезных и подавления паразитных спектральных составляющих преобразователя за счет частотно-избирательного выходного элемента связи должны быть выбраны соответствующие параметры ВШП. При определении шага ВШП необходимо точно знать фазовую скорость ВПЗ фильтруемого сигнала.

В [12] был проведен теоретический расчет частотной зависимости фазовой скорости ВПЗ v_{ph} в n-GaAs. Показано, что фазовая скорость ВПЗ может существенно отличаться от дрейфовой скорости электронов v_0 . В [13] показано, что для n-InP различие между v_{ph} и v_0 не такое существенное и составляет 4–6%, что связано с меньшей величиной коэффициента диффузии электронов у n-InP по сравнению с n-GaAs.

В данной работе приводятся результаты теоретического исследования влияния диффузии и частотной дисперсии дифференциальной подвижности электронов на фазовую скорость ВПЗ в полупроводниковых структурах на основе нитридов индия, галлия и алюминия с гексагональной кристаллической решеткой (würцит).

Рассмотрим уравнения, описывающие динамику электронов в полупроводнике. Выберем положительное направление постоянных и переменных составляющих скорости электронов, электрического поля и плотности тока так, как показано на рис. 1 [14], e_z — единичный орт оси z .

Используя известную одномерную модель [15] рассмотрим систему исходных уравнений, которая состоит из уравнений непрерывности (1), Пуассона (2) и выра-

*E-mail: ssergeev@bk.ru

†E-mail: semicond@yandex.ru

‡E-mail: OlegX16@yandex.ru

§E-mail: bsergeeva@bk.ru

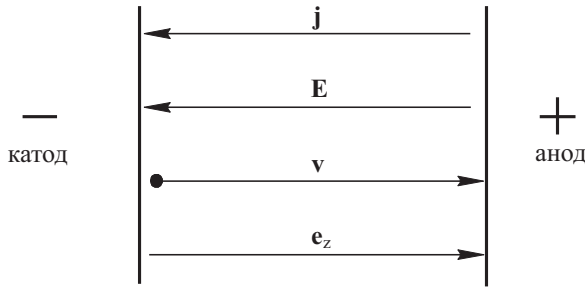


Рис. 1: Положительное направление постоянных и переменных составляющих

жения для плотности полного тока (3) с учетом диффузионной составляющей и тока смещения

$$\frac{\partial j}{\partial z} = -q \frac{\partial n}{\partial t} \quad (1)$$

$$\frac{\partial E}{\partial z} = \frac{q}{\varepsilon \varepsilon_0} (n - n_0) \quad (2)$$

$$j_f = j + \varepsilon \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \quad (3)$$

где $j = qnv - qD \frac{\partial n}{\partial z}$.

Будем считать, что скаляры j , j_f , v , E в (1–3) есть z -компоненты векторов \mathbf{j} , \mathbf{j}_f , \mathbf{v} , \mathbf{E} ; q , n , v , d — модуль заряда, концентрация, дрейфовая скорость и коэффициент диффузии электронов; ε — относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника; n_0 — равновесная концентрация электронов; E — напряженность электрического поля; ε_0 — электрическая постоянная; z , t — координата и время.

Предположим, что

$$\begin{aligned} n &= n_0 + n_1, \quad n_1 \ll n_0; \quad v = v_0 + v_1, \quad v_1 \ll v_0; \\ E &= E_0 + E_1, \quad E_1 \ll E_0; \quad j = j_0 + j_1, \quad j_1 \ll j_0; \\ j_f &= j_{f0} + j_{f1}, \quad j_{f1} \ll j_{f0}; \quad j_0 = qn_0 v_0; \quad D = \text{const}. \end{aligned} \quad (4)$$

Тогда, с учетом (4) и в пренебрежении членами второго порядка малости (типа $n_1 v_1$), уравнения (1–3) перепишутся в следующем виде:

$$\frac{\partial j_1}{\partial z} = -q \frac{\partial n_1}{\partial t} \quad (5)$$

$$\frac{\partial E_1}{\partial z} = \frac{qn_1}{\varepsilon \varepsilon_0} \quad (6)$$

$$j_{f1} = j_1 + \varepsilon \varepsilon_0 \frac{\partial E_1}{\partial t}, \quad (7)$$

где $j_1 = qn_1 v_0 + qn_0 v_1 - qD \frac{\partial n_1}{\partial z}$.

Полагая $E_1 \sim e^{i\omega t - \gamma z}$ и введя обозначения $\omega_M = \frac{qn_0 \mu_e}{\varepsilon \varepsilon_0}$, где $\mu_e = \frac{v_0}{E_0}$ и $\kappa = \frac{\mu_d}{\mu_0}$, где $\mu_d = \frac{dv}{dE}$, из уравнений (5–7) можно получить дисперсионное уравнение для постоянной распространения ВПЗ $\gamma = \alpha + i\beta$:

$$\gamma^2 - i \frac{v_0}{D} \gamma + \left(\kappa \frac{\omega_M}{D} + i \frac{\omega}{D} \right) = 0, \quad (8)$$

где ω — циклическая частота ВПЗ.

Из (8) получим выражения (9, 10) для постоянной распространения:

$$\gamma_1 = \frac{v_0}{2\omega_M L_D^2} \left[\sqrt{1 + 4 \left(\frac{L_D \omega_M}{v_0} \right)^2 \left(\kappa + i \frac{\omega}{\omega_M} \right)} - 1 \right] \quad (9)$$

$$\gamma_2 = -\frac{v_0}{2\omega_M L_D^2} \left[\sqrt{1 + 4 \left(\frac{L_D \omega_M}{v_0} \right)^2 \left(\kappa + i \frac{\omega}{\omega_M} \right)} + 1 \right], \quad (10)$$

где $L_D = \sqrt{D/\omega_M}$ — дебаевская длина экранирования.

Постоянная распространения γ_1 (9) соответствует прямой волне, распространяющейся в направлении дрейфа электронов, а γ_2 (10) — обратной. Все приводимые ниже результаты и рассуждения будут относиться только к прямой волне, так как говорилось выше, обратная волна является быстро затухающей и не представляет практического интереса.

Фазовая скорость ВПЗ при известной γ может быть рассчитана:

$$v_{ph} = \omega/\beta. \quad (11)$$

По формуле (11) рассчитывались зависимости фазовой скорости ВПЗ от частоты. В расчетах использовались численные значения параметров и величин, характерные

$$\begin{aligned} &\text{для n-InN: } \varepsilon = 14; \\ &E_0 = 90 \text{ кВ/см}, \quad v_0 = 3 \cdot 10^7 \text{ см/с}, \quad D = 50 \text{ см}^2/\text{с}; \\ &\text{для n-GaN: } \varepsilon = 9.7; \\ &E_0 = 200 \text{ кВ/см}, \quad v_0 = 2.8 \cdot 10^7 \text{ см/с}, \quad D = 23 \text{ м}^2/\text{с}; \\ &\text{для n-AlN: } \varepsilon = 8.5; \\ &E_0 = 750 \text{ кВ/см}, \quad v_0 = 1.5 \cdot 10^7 \text{ см/с}, \quad D = 5 \text{ см}^2/\text{с}. \end{aligned}$$

Анизотропия диэлектрической проницаемости GaN не учитывается, считается, что волны пространственного заряда распространяются в направлении вдоль стороны кристаллической решетки c . Для нитридов индия и галлия указанным значениям E_0 соответствуют и величины отрицательной дифференциальной подвижности электронов $\mu_d = dv/dE|_{E_0}$, полученные по данным работ [16, 17].

На рис. 2 представлены зависимости фазовой скорости ВПЗ v_{ph} от частоты $f = \omega/2\pi$ для нитрида индия (рис. 2а) и нитрида галлия (рис. 2б). Параметром в расчетах была концентрация электронов в полупроводнике $n_0 = 10^{14} \text{ см}^{-3}$ (кривые с номером 1),

$5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ (2) и 10^{15} см^{-3} (3 и 4). На рис. 2а для сравнения приведена зависимость v_{ph} от f для $D = 100 \text{ см}^2/\text{с}$ и $n_0 = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ (кривая 5). На рис. 2б приведена аналогичная зависимость для п-GaN: $D = 50 \text{ см}^2/\text{с}$ и $n_0 = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ (кривая 5). Все приведенные на рисунках зависимости получены с учетом частотной дисперсии дифференциальной подвиж-

ности электронов за исключением кривых под номером 4, которые получены без учета зависимости μ_d от f для тех же параметров, что и кривые 3. Горизонтальные пунктирные прямые отмечают значения $v_0 = 2.8 \cdot 10^7 \text{ м/с}$ для нитрида галлия и $v_0 = 3 \cdot 10^7 \text{ м/с}$ для нитрида индия.

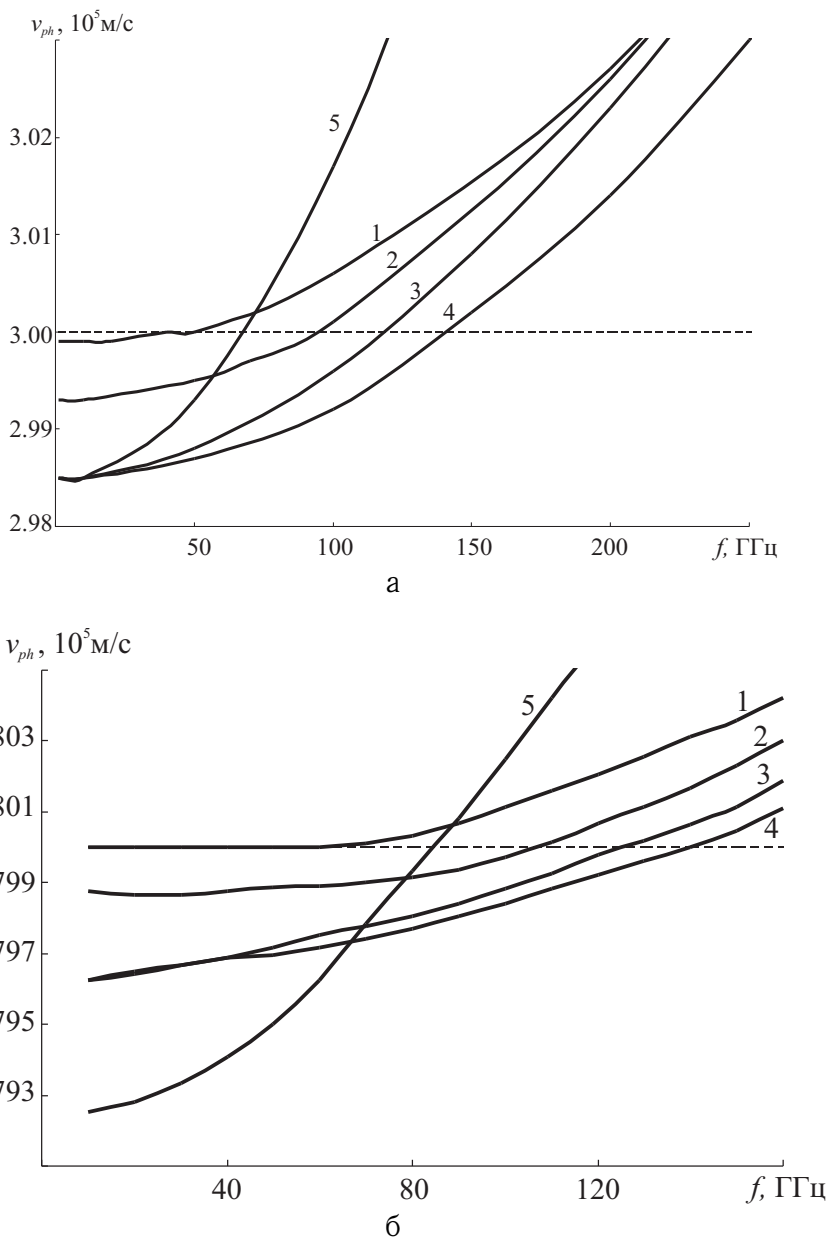


Рис. 1: Зависимости фазовой скорости ВПЗ v_{ph} от частоты $f = \omega/2\pi$ для нитрида индия (а) и нитрида галлия (б)

Из приведенных на рисунке зависимостей видно, что фазовая скорость ВПЗ может отличаться от дрейфовой скорости электронов. При этом на частотах ниже граничной частоты усиливаемых ВПЗ [18] f_c фа-

зовая скорость ВПЗ v_{ph} меньше, чем дрейфовая скорость электронов v_0 , а для частот $f > f_c$ фазовая скорость становится больше v_0 . Анализ показывает, что отличие фазовой скорости ВПЗ от v_0 непосредственно

связано с влиянием диффузии. Приведенные результаты свидетельствуют о том, что диффузия замедляет нарастающие ВПЗ и ускоряет затухающие. Различие v_{ph} и v_0 возрастает с ростом концентрации электронов n_0 и может достигать 1–2% для нитрида индия. Для GaN различие между v_{ph} и v_0 менее существенное, что связано с меньшей величиной коэффициента диффузии электронов D у GaN по сравнению с InN. Проведенный анализ показал, что для AlN различия между v_{ph} и v_0 для данных n_0 пренебрежимо малы, так как у этого соединения коэффициент диффузии электронов значительно ниже, чем у нитридов индия и галлия.

Отметим также, что различие между v_{ph} и v_0 становится еще более существенным при увеличении D (кривые с номерами 2 и 5 на рис. 2а и кривые 3 и 5 на рис. 2б) и при учете частотной дисперсии дифферен-

циальной подвижности электронов (кривые с номером 3 и 4).

Полученные результаты необходимо учитывать при определении геометрических размеров элементов связи, служащих для преобразования электромагнитных сигналов в ВПЗ и обратно. Это становится особенно важным при разработке функциональных устройств на ВПЗ в тонкопленочных полупроводниковых структурах с ОДП для коротковолновой части СВЧ диапазона, предназначенных для работы в режиме преобразования частот и требующих создания частотно-избирательных элементов связи. Кроме того, значение v_{ph} важно для определения времени задержки сигнала при его переходе от входа к выходу в устройствах на ВПЗ.

-
- [1] Шука А. А. Функциональная электроника Успехи современной радиоэлектроники. № 5-6. С. 149. (2004).
- [2] Барыбин А. А., Вендик И. Б., Вендик О. Г., Калинин Б. А., МIRONENKO И. Г., Тер-Мартirosян Л. Т. Микроэлектроника. **8**, вып. 1. С. 3. (1979).
- [3] Соляник С. П., Небогатых В. Е., Потапов А. С. Перспективные направления функциональной микроэлектроники. (Владивосток: Изд. ДВГТУ, 2009).
- [4] Барыбин А. А. Волны в тонкопленочных полупроводниковых структурах с горячими электронами. (М.: Наука, 1986).
- [5] Михайлов А. И., Сергеев С. А., Горячев А. А. Изв. ВУЗов. Радиоэлектроника. **43**, № 2. С. 16. (2000).
- [6] Михайлов А. И., Сергеев С. А. Физика волновых процессов и радиотехнические системы. **13**, № 1. С. 33. (2010).
- [7] Дин Р., Матарезе Р. ТИИЭР. **60**, № 12. Р. 23. (1972).
- [8] Kitabe K., Kanbe H. J. Electronics. **58**. P. 587. (1985).
- [9] Сергеев С. А., Михайлов А. И., Сергеева Б. В. Научное творчество XXI века: материалы IV Всерос. науч.-практич. конф с международ. участием. Красноярск. Вып. 2. С. 125. (2011).
- [10] Сергеев С. А., Михайлов А. И., Сергеева Б. В. Физика и технические приложения волновых процессов: материалы X Междунар. науч.-техн. конф. С. 130. (Самара: ООО «Книга», 2011).
- [11] Патент 2138116 РФ, МКИ Н 03 D 7/00, 7/12, Н 01 L 27/095. Преобразователь частоты СВЧ диапазона. Михайлов А. И., Сергеев С. А., Игнатъев Ю. М. (РФ). Опубл. 20.09.99. Бюл. № 26.
- [12] Михайлов А. И., Сергеев С. А. Вопросы прикладной физики: Межвуз. науч. сб. Вып. 4. С. 75. (Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1998).
- [13] Михайлов А. И., Сергеев С. А. Вопросы прикладной физики: Межвуз. науч. сб. Вып. 16. С. 38. (Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2009).
- [14] Михайлов А. И., Митин А. В. Вопросы прикладной физики: Межвуз. науч. сб. Вып. 13. С. 74. (Саратов: Изд-во СГУ, 2006).
- [15] Кэрролл Дж. СВЧ-генераторы на горячих электронах Пер. с англ. М.Е. Левинштейна, М.С. Шура; Под ред. Б.Л. Гельмонта. (М.: Мир, 1972).
- [16] Starikov E., Shiktorov P., Gruinskis V., Varani L., Vaissiere J. C., Palermo C., Reggiani L. Appl. Phys. **98**. 083701. (2005).
- [17] Starikov E., Shiktorov P., Gruinskis V., Varani L., Vaissiere J. C., Palermo C., Reggiani L. Acta Physica Polonica A. **107**, № 2. P. 408. (2005).
- [18] Михайлов А. И., Сергеев С. А. Письма в ЖТФ. **25**, № 4. P. 85. (1999).

Phase velocity of space-charge waves in n-InN, n-GaN and n-AlN semiconductor structures

S. A. Sergeev^a, A. I. Mikhailov^b, O. S. Senatov^c, B. V. Sergeeva^d

N. G. Chernyshevskiy Saratov State University

Astrakhanskaya Street, 83, Saratov, 410012, Russia

E-mail: ^as sergeev@bk.ru, ^bsemicond@yandex.ru, ^cOlegX16@yandex.ru, ^dbsergeeva@bk.ru

Some results of theoretical investigation of the influence of diffusion and frequency dispersion of electrons differential mobility on the phase velocity of space-charge waves propagating in drift beam of electrons in semiconductor structures of indium nitride, gallium nitride and aluminum nitride are given in the paper.

PACS:71.45.Lr, 72.20.Ht

Keywords: functional electronics, nitrides, negative differential conductivity, space-charge waves.

Received 04.09.2013.

Сведения об авторах

1. Сергеев Сергей Алексеевич — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: (8452) 51-11-81, e-mail: ssergeev@bk.ru.
2. Михайлов Александр Иванович — докт. физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой физики полупроводников факультета нано- и биомедицинских технологий ФГБОУ ВПО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»; тел.: (8452) 51-11-81, e-mail: semicond@yandex.ru.
3. Сенатов Олег Станиславович — студент; тел.: (8452) 51-11-81, e-mail: OlegX16@yandex.ru.
4. Сергеева Бэла Владимировна — ведущий инженер; тел.: (8452) 51-11-81, e-mail: bsergeeva@bk.ru.