

# Моделирование дисперсии свободных носителей заряда в GaAs – микроволноводе

В.В. Витько, А.А. Шевцов, А.А. Ершов, А.Б. Устинов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

**Аннотация:** работа посвящена моделированию дисперсии свободных носителей заряда в GaAs микроволноводе. Проведено численное моделирование дисперсии свободных носителей заряда в прямоугольных микроволноводах при обратном смещении *p-n* – перехода для различных значений обратного напряжения. Проведено численное моделирование изменения показателя преломления в зависимости от величины обратного напряжения.

**Ключевые слова:** арсенид галлия, оптический интегральный микроволновод, дисперсия свободных носителей заряда

## 1. Введение

В последнее десятилетие технологическая платформа  $A^{III}B^{IV}$  представляет интерес для исследователей благодаря возможности создания как активных, так и пассивных элементов фотонных интегральных схем (ФИС). Наиболее перспективными для нелинейных применений являются гетероструктуры GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As благодаря прямозонной структуре и сравнительно высоким нелинейным коэффициентам при сравнимых потерях на распространение с широко развитой технологией кремний-на-изоляторе [1]. Базовым элементом ФИС является микроволновод, при этом преимуществом технологической платформы GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As становится возможность подбора контраста коэффициентов преломления при изменении состава твердого раствора [2]. Для управления дисперсионными свойствами таких волноводов в их поперечном сечении реализуют *p-n*-переход [3]. В этом случае управление заключается в формировании обедненной области различной ширины при обратном смещении *p-n*-перехода. Наличие или отсутствие носителей заряда в полупроводнике влияет на его показатель преломления, а следовательно, смещает дисперсионную характеристику оптического излучения, распространяющегося в микроволноводе. Этот эффект называется дисперсией свободных носителей заряда (от англ. free carrier dispersion). Для описания этого эффекта в полупроводниках применяется модель Друде [4], а также модели, пришедшие ей на смену в последние десятилетия [4, 8]. Однако, применение этих моделей ограничено диапазоном рабочих длин волн и проявляющихся в полупроводниках эффектов. Поэтому целью данной работы является моделирование дисперсии свободных носителей заряда в GaAs – микроволноводе на телекоммуникационной длине волны 1.55 мкм.

## 2. Моделирование

В работе был рассмотрен полосковый микроволновод из GaAs, эскиз которого представлен на рис. 1. При моделировании на рабочей длине волны  $\lambda=1.55$  мкм использовались следующие параметры микроволовода: сердцевина толщиной 0.2 мкм и шириной 0.45 мкм из GaAs с показателем преломления 3.37; окружающим диэлектриком выступал воздух или Al<sub>0.7</sub>Ga<sub>0.3</sub>As с показателем преломления 3.05; уровни легирования *p*- и *n*-областей изменялись от  $2.5 \cdot 10^{17}$  до  $1 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>.

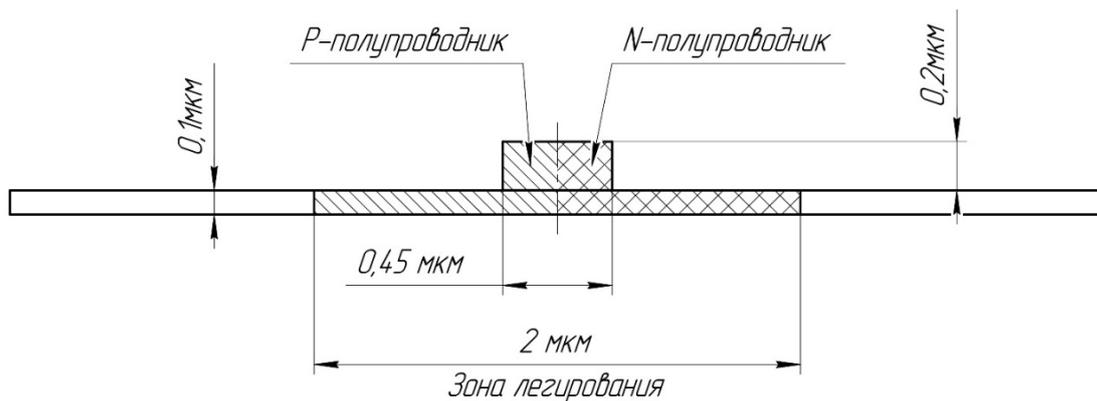


Рисунок 1. Эскиз исследуемого полоскового микроволновода.

Геометрические размеры микроволновода подбирались таким образом, чтобы был реализован одномодовый режим [9]. Для сравнения, моделирование проводилось для двух видов окружающего диэлектрика: воздуха и  $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$ . В поперечном сечении волновода был сформирован  $p$ - $n$  – переход с одинаковыми значениями концентраций примесей в  $p$ - и  $n$ -областях. Моделирование распределения носителей заряда в такой структуре при уровнях легирования  $2.5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  и  $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  показали, что в результате диффузии носителей заряда через границу  $p$ - $n$ -перехода формируются обедненные области шириной 155 нм и 95 нм соответственно. При подаче обратного напряжения на  $p$ - $n$ -переход от 0 до -10 В происходит увеличение размеров обедненной области до 535 и 235 нм при уровнях легирования  $2.5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  и  $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  соответственно.

Было проведено сравнение моделей, применяемых для описания эффекта дисперсии свободных носителей из статей [4, 8] с экспериментальными данными из статей [6, 7]. Для выбранных уровней легирования расчетные значения имели сильное расхождение с экспериментальным результатом  $\Delta n = 1 \cdot 10^{-4}$ . Поэтому далее для моделирования применялась эмпирическая модель Soref R.A., которая предсказывает степенную зависимость функции от изменения концентрации электронов и дырок в следующем виде [5]:

$$\Delta n = dn_{Ap} \Delta P^{dn_{Ep}} + dn_{An} \Delta N^{dn_{En}} \quad (1)$$

где  $n_{Ap} = -10^{-10}$ ,  $dn_{Ep} = 0.4$ ,  $dn_{An} = -7 \cdot 10^{-21}$ ,  $dn_{En} = 0.983$ . Коэффициенты модели подбирались в соответствии с экспериментальными данными из работ [6,7] и давали высокую сходимость результатов.

На следующем этапе проводилось моделирование влияния эффекта дисперсии свободных носителей на дисперсионные характеристики оптического излучения в исследуемых полосковых микроволноводах GaAs/Воздух и GaAs/ $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$  (см. рис.1). Для оценки величины влияния рассчитывался эффективный показатель преломления  $\Delta n_{eff} = \beta \lambda / 2\pi$ , где  $\beta$  – продольное волновое число. Для микроволновода GaAs/Воздух при концентрации легирующих примесей  $2.5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  и  $10^{18} \text{ см}^{-3}$  изменения эффективного показателя преломления при подаче обратного напряжения -10 В были равны  $2.2 \cdot 10^{-4}$  и  $4.91 \cdot 10^{-4}$  соответственно, а для микроволновода GaAs/ $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$  –  $0.87 \cdot 10^{-4}$  и  $1.69 \cdot 10^{-4}$  соответственно. Таким образом, для увеличения влияния эффекта необходимо увеличивать уровни легирования, однако, при этом будет изменяться обедненная область в связи с диффузией носителей заряда, что повлияет на уровень потерь на распространение оптического излучения.

### 3. Заключение

В работе проведено моделирование дисперсии свободных носителей заряда в GaAs – микроволноводе на телекоммуникационной длине волны 1.55 мкм. Были проанализированы различные эмпирические модели описания нелинейного эффекта дисперсии свободных носителей заряда. В результате было показано, что наилучшей точности удастся достичь с помощью модели Soref [5]. Выполнено моделирование изменения ширины области обеднения в поперечном сечении GaAs микроволновода при различных значениях легирующей примеси: при подаче обратного напряжения величиной от 0 до -10 В ширина обедненной области выросла со 155 нм до 535 нм при  $2.5 \cdot 10^{17} \text{см}^{-3}$ , а также 95 нм до 235 нм при  $10^{18} \text{см}^{-3}$ . Исследовано влияние эффекта дисперсии свободных носителей на дисперсионные характеристики оптического излучения в исследуемых полосковых микроволноводах при различной степени легирования: в гетероструктуре GaAs/Воздух –  $2.2 \cdot 10^{-4}$  и  $4.91 \cdot 10^{-4}$  при концентрациях легирующих примесей  $2.5 \cdot 10^{17} \text{см}^{-3}$  и  $10^{18} \text{см}^{-3}$  соответственно, а также в структуре GaAs/Al<sub>0.7</sub>Ga<sub>0.3</sub>As –  $0.87 \cdot 10^{-4}$  и  $1.69 \cdot 10^{-4}$  при концентрациях легирующих примесей  $2.5 \cdot 10^{17} \text{см}^{-3}$  и  $10^{18} \text{см}^{-3}$  соответственно.

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (грант номер **FSEE-2025-0014**).

#### Список литературы

1. Mobini E. et al. AlGaAs nonlinear integrated photonics //Micromachines. – 2022. – Т. 13. – №. 7. – С. 991.
2. Adachi S. Optical dispersion relations for GaP, GaAs, GaSb, InP, InAs, InSb, Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As, and In<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>As //Journal of Applied Physics. – 1989. – Т. 66. – №. 12. – С. 6030-6040.
3. Nickerson M. et al. Gallium arsenide optical phased array photonic integrated circuit //Optics Express. – 2023. – Т. 31. – №. 17. – С. 27106-27122.
4. Nickerson M. J. Gallium Arsenide Photonic Integrated Circuit Platform for Optical Phased Array Applications. – University of California, Santa Barbara, 2023.
5. Nedeljkovic M., Soref R., Mashanovich G. Z. Free-Carrier Electrorefraction and Electroabsorption Modulation Predictions for Silicon Over the 1–14- $\mu\text{m}$  Infrared Wavelength Range //IEEE Photonics Journal. – 2011. – Т. 3. – №. 6. – С. 1171-1180.
6. Huang H. C., Yee S. Change in refractive index for p-type GaAs at  $\lambda = 1.06, 1.3, \text{ and } 1.55 \mu\text{m}$  due to free carriers //Journal of applied physics. – 1991. – Т. 70. – №. 2. – С. 925-929.
7. Huang H. C., Yee S., Soma M. The carrier effects on the change of refractive index for n-type GaAs at  $\lambda = 1.06, 1.3, \text{ and } 1.55 \mu\text{m}$  //Journal of applied physics. – 1990. – Т. 67. – №. 3. – С. 1497-1503.
8. Berseth C. A., Wuethrich C., Reinhart F. K. The electro-optic coefficients of GaAs: Measurements at 1.32 and 1.52  $\mu\text{m}$  and study of their dispersion between 0.9 and 10  $\mu\text{m}$  //Journal of applied physics. – 1992. – Т. 71. – №. 6. – С. 2821-2825.
9. Витько В. В. и др. Исследование одномодового режима распространения оптического излучения в интегральных микроволноводах из арсенида галлия //Сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2023. – С. 493-496.