

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра физики твердого тела

ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВОЛН  
ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАРЯДА В ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ  
СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ n-GaAs И n-InP

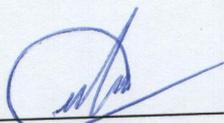
АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса 4052 группы  
направления 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»

Института физики

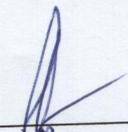
Орлянского Андрея Александровича

Научный руководитель:  
доцент, к.ф.-м.н., доцент  
должность, ученая степень, ученое звание

  
\_\_\_\_\_

С.А. Сергеев  
инициалы, фамилия

Зав. кафедрой физики твёрдого  
тела: д.ф.-м.н., профессор  
должность, ученая степень, ученое звание

  
\_\_\_\_\_

Ал.В. Скрипаль  
инициалы, фамилия

Саратов 2025

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время актуальны исследования динамических проявлений нелинейных свойств полупроводников, полупроводниковых структур, приборов и устройств в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах, где начинают проявляться инерционные свойства носителей заряда и связанные с этим эффекты, которые являются физической причиной ограничения сверху диапазона рабочих частот полупроводниковых приборов и устройств [1].

Расширение функциональных возможностей полупроводниковых приборов и устройств и увеличение их рабочих частот может быть решено различными путями: оптимизацией режимов работы; поиском новых перспективных полупроводниковых материалов; новых эффектов и т.п.

Наиболее развитый в научном плане и технически хорошо реализованный раздел среди вновь возникших направлений функциональной микроэлектроники – акустоэлектроника [2]. Перспективным классом акустоэлектронных устройств являются устройства на поверхностных акустических волнах (ПАВ). Фазовые скорости волн пространственного заряда в полупроводниках, распространяющихся в направлении дрейфа носителей, на два порядка выше, чем у ПАВ. Современный уровень технологии не исключает создания функциональных устройств на волнах пространственного заряда (ВПЗ) даже в миллиметровом диапазоне [3-5].

Исследование параметрического взаимодействия волн в активных средах, способных усиливать монохроматические волны определенного ограниченного диапазона частот за счет собственных непараметрических механизмов неустойчивости представляют большой научный и практический интерес.

Примером такой нелинейной активной среды является полупроводник с отрицательной дифференциальной проводимостью (ОДП) в некотором диапазоне частот вследствие междолинных электронных переходов в сильных электрических полях. Представляет интерес исследование параметрического взаимодействия ВПЗ в полупроводниках с ОДП при низкочастотной накачке.

Большинство известных теоретических и экспериментальных работ по исследованию ВПЗ в полупроводниках с ОДП и устройствам на них выполнены для арсенида галлия (n-GaAs). Данные по оценке перспективности использования другого полупроводника – фосфида индия (n-InP) для создания устройств на ВПЗ в литературе практически отсутствуют. Однако еще в 70-х годах была обоснована перспективность фосфида индия, определены зависимости  $V(E)$ , пороговые токи и поля, модели переноса электронов [6]. Таким образом, исследование параметрических и нелинейных колебательных и волновых процессов в полупроводниках и полупроводниковых структурах в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах является весьма актуальным.

**Целью** данной работы является изучение влияния параметров низкочастотной накачки на характеристики распространения и взаимодействия волн пространственного заряда в тонких пленках полупроводников n-GaAs и n-InP.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. Проведен литературный обзор по соответствующей тематике.
2. Проведен сравнительный анализ физико-химических свойств и перспектив применения n-GaAs, n-InP и n-GaN в устройствах на волнах пространственного заряда.
3. Проведен анализ влияния частоты и мощности накачки на параметрическое взаимодействие волн пространственного заряда в тонкопленочных структурах на основе n-GaAs и n-InP.

Выпускная работа занимает 54 страниц, состоит из введения, теоретической и практической частей, заключения, имеет 9 рисунков и 1 таблицу. Литературный обзор имеет 52 информационных источника.

**Параметрическое взаимодействие волн пространственного заряда в полупроводниках и тонкопленочных структурах с отрицательной дифференциальной проводимостью**

Теоретическому исследованию параметрического взаимодействия и усиления волн разной природы в различных средах посвящено достаточно

большое число работ [7-13]. В [14] впервые теоретически рассмотрена возможность увеличения верхнего частотного предела усиления бегущих ВПЗ в полупроводниках с ОДП с помощью механизма параметрического взаимодействия ВПЗ, при котором усиление возможно даже при низкочастотной накачке.

Есть, по крайней мере, два способа увеличения верхнего частотного предела усиления бегущих волн пространственного заряда в полупроводниках в ОДП (а, следовательно, и в тонкопленочных усилителях бегущей волны): переход от n-GaAs к n-InP – одному из наиболее перспективных материалов твердотельной электроники СВЧ, и использование механизма параметрического взаимодействия волн пространственного заряда, при котором усиление возможно даже при низкочастотной накачке [15]. При замене арсенида галлия на фосфид индия верхний частотный предел усиливаемых ВПЗ возрастает в 2-3 раза.

Для проведения численных расчетов был выбран n-GaAs со следующими параметрами:  $\epsilon = 12,5$ ; для  $E_0 = 5,5$  кВ/см,  $v_0 = 1,7 \cdot 10^7$  см/с,  $D = 160$  см<sup>2</sup>/с и  $\alpha_i$ , соответствующие значению  $E_0 = 5,5$  кВ/см, рассчитанные по данным [16].

Из результатов численных расчетов были сделаны следующие выводы:

1) для параметрического усиления ВПЗ существенным является полный синхронизм волн накачки и холостой, а рассинхронизм взаимодействующих сигнальной и холостой волн имеет меньшее значение;

2) рассмотренный механизм параметрического взаимодействия волн пространственного заряда приводит к заметному увеличению (в 1,6 раза) верхнего частотного предела усиления ВПЗ в полупроводнике с ОДП [17].

В основе общей теории параметрического взаимодействия ВПЗ в тонких пленках полупроводников [7, 18] лежит известная электродинамическая теория возбуждения волноводов заданными токами, обобщенная А.А. Барыбиным для случая тонкопленочных волноведущих структур с различными активными средами, в том числе тонкопленочной полупроводниковой структуры (ТПС) с ОДП [8].

## Результаты теоретического исследования волн пространственного заряда в полупроводниках n-GaAs и n-InP

Численные расчеты были проведены для двух материалов: арсенида галлия и фосфида индия. Для численных расчетов на основе анализа литературных данных были выбраны характерные для GaAs и InP параметры:

- $\varepsilon = 12,5$ ; для  $E_0 = 5,5$  кВ/см,  $v_0 = 1,7 \cdot 10^7$  см/с,  $D = 200$  см<sup>2</sup>/с (для n-GaAs);
- $\varepsilon = 12,35$ ; для  $E_0 = 18,5$  кВ/см,  $v_0 = 2,3 \cdot 10^7$  см/с,  $D = 50$  см<sup>2</sup>/с (для n-InP).

В расчетах были использованы приведенные в [16] и [19] данные по частотным зависимостям дифференциальной подвижности электронов для арсенида галлия и фосфида индия n-типа.

Было проведено теоретическое исследование волн пространственного заряда в тонкопленочных полупроводниковых структурах с отрицательной дифференциальной проводимостью на основе арсенида галлия и фосфида индия n-типа.

Системы уравнений

$$\frac{dA_s}{dz} = C_{11}(z)A_s(z) + C_{12}(z)A_i(z) \quad \frac{dA_i}{dz} = C_{21}(z)A_s(z) + C_{22}(z)A_i(z)$$

были решены численно методом Эйлера. При расчетах использовались следующие параметры полупроводниковой структуры:

- диэлектрическая проницаемость пленки и подложки  $\varepsilon = 12,5\varepsilon_0$  (для n-GaAs),  $\varepsilon = 12,35\varepsilon_0$  (для n-InP),
- диэлектрическая проницаемость среды над пленкой (воздух)  $\varepsilon_0$ ,
- концентрация носителей зарядов  $4 \cdot 10^{14}$  см<sup>-3</sup>,
- толщина пленки, определяемая из условия обеспечения стационарного распределения поля и концентрации электронов (предотвращения образования ганновских доменов) 0,25 мкм [8],
- коэффициент диффузии 200 см<sup>2</sup>/с (для n-GaAs) и 50 см<sup>2</sup>/с (для n-InP),
- дрейфовая скорость электронов  $1,7 \cdot 10^7$  см/с (при напряженности поля  $E_0 = 5,5$  кВ/см для n-GaAs) и  $2,3 \cdot 10^7$  см/с (при  $E_0 = 18,5$  кВ/см для n-InP).

Частотная зависимость дифференциальной подвижности электронов была взята из [20, 21].

Получены зависимости коэффициентов усиления  $K_a$  и преобразования  $K_t$  от координаты  $z$  для n-GaAs при следующих сигнальных частотах  $f_s$ , частотах накачки  $f_p$  и мощностях накачки  $P_p$ :  $f_s = 35$  ГГц,  $f_p = 30$  ГГц,  $P_p = 6,981$  мкВт;  $f_s = 40$  ГГц,  $f_p = 34,67$  ГГц,  $P_p = 99,78$  мкВт;  $f_s = 45$  ГГц,  $f_p = 20$  ГГц,  $P_p = 0,374$  мкВт. Получены аналогичные зависимости для n-InP при:  $f_s = 100$  ГГц,  $f_p = 30$  ГГц,  $P_p = 0,1239$  мкВт;  $f_s = 120$  ГГц,  $f_p = 70$  ГГц,  $P_p = 0,02795$  мкВт;  $f_s = 130$  ГГц,  $f_p = 106,1$  ГГц,  $P_p = 75,375$  мкВт. Получены также зависимости параметров без накачки.

На основе полученных зависимостей можно сделать следующий вывод: наличие в дрейфовом потоке носителей заряда в полупроводнике с ОДП волн пространственного заряда с частотой накачки  $f_p$  приводит к тому, что ВПЗ с частотой сигнала  $f_s > f_p$  и с образовавшимися в результате параметрического взаимодействия комбинационными частотами  $f_s \pm f_p$ , затухающие в обычных условиях, могут при определенных условиях стать нарастающими, либо их затухание может быть уменьшено значительно. Это можно объяснить параметрическим эффектом, приводящим к перекачке энергии от волны накачки к волнам сигнальной и комбинационных частот.

Сигнальная и холостая ВПЗ по мере взаимодействия и распространения периодически обмениваются мощностью, сохраняя общую тенденцию увеличения амплитуды обеих волн. На конце участка взаимодействия обе величины становятся положительными, что говорит об эффективной параметрической связи ВПЗ сигнальной и холостой частот.

Это означает, что низкочастотная накачка повышает верхний частотный предел усилителей бегущей волны на n-GaAs и n-InP. Зависимости коэффициентов усиления  $K_a$  и преобразования  $K_t$  от координаты  $z$  на фоне общей тенденции роста с увеличением  $z$  имеют довольно сильные колебания, причем фазы этих колебаний практически противоположны, их размах

уменьшается с ростом  $z$  и максимален при малых  $z$ . При увеличении мощности низкочастотной накачки «частота» колебаний зависимостей коэффициентов усиления  $K_a$  и преобразования  $K_t$  от  $z$  возрастает, причем для n-InP она выше, чем для n-GaAs. Подавая низкочастотную накачку можно как усилить ВПЗ сигнальной частоты (для определенных  $z$ ), так и заглушить их как для n-InP так и для n-GaAs.

Получены зависимости коэффициентов усиления  $K_a$  и преобразования  $K_t$  от мощности низкочастотной накачки для следующих сигнальных частот  $f_s$  и частот накачки  $f_p$ :  $f_s = 35$  ГГц,  $f_p = 5$  ГГц;  $f_s = 40$  ГГц,  $f_p = 15$  ГГц;  $f_s = 45$  ГГц,  $f_p = 25$  ГГц для n-GaAs и  $f_s = 100$  ГГц,  $f_p = 50$  ГГц;  $f_s = 120$  ГГц,  $f_p = 40$  ГГц;  $f_s = 130$  ГГц,  $f_p = 106,1$  ГГц для n-InP. Для всех полученных зависимостей длина взаимодействия равна 50 мкм.

Показано, что графики зависимостей коэффициентов усиления  $K_a$  и преобразования  $K_t$  от  $z$  имеют сходное поведение. На всех зависимостях наблюдается тенденция роста коэффициентов усиления  $K_a$  и преобразования  $K_t$  с увеличением мощности накачки. Максимальная мощность накачки  $P_p$  для каждой частоты накачки определялась из условия  $P_p = \frac{P_{p0}}{e^{-\alpha_p z}}$ , где  $P_{p0} = 0,1$  мВт. При определенных условиях зависимости коэффициентов усиления  $K_a$  и преобразования  $K_t$  от  $z$  могут стать положительными, т.е. на частоте  $f_s$  может быть достигнуто усиление, а на частоте  $f_i$  автодинное преобразование.

Получены зависимости коэффициентов усиления  $K_a$  и преобразования  $K_t$  от частоты накачки  $f_p$  при следующих сигнальных частотах  $f_s$  и мощностях накачки  $P_p$ :  $f_s = 35$  ГГц,  $P_p = 0,04936$  мкВт;  $f_s = 40$  ГГц,  $P_p = 0,19744$  мкВт;  $f_s = 45$  ГГц,  $P_p = 0,09872$  мкВт для n-GaAs и  $f_s = 110$  ГГц,  $P_p = 0,0256$  мкВт;  $f_s = 110$  ГГц,  $P_p = 0,0786$  мкВт;  $f_s = 100$  ГГц,  $P_p = 0,01024$  мкВт для n-InP. Показано, что колебания зависимостей довольно сильные: существуют участки, на которых небольшое изменение параметров накачки приводит к значительному изменению коэффициентов усиления и преобразования. Возможно усиление ВПЗ сигнальной и холостой частот и их ослабление только изменением

мощности накачки при прочих равных параметрах. Например при  $f_p = 10$  ГГц  $K_a = -6,92$  дБ и  $K_t = -4,5$  дБ, при  $f_p = 14,3$  ГГц  $K_a = -35,62$  дБ и  $K_t = 4,18$  дБ, а при  $f_p = 20$  ГГц  $K_a = 6,15$  дБ и  $K_t = 8,32$  дБ. Все зависимости имеют куполообразную форму. Максимум на частотных зависимостях коэффициентов усиления  $K_a$  и преобразования  $K_t$  виден при частоте накачки  $f_p \approx f_s/2$ .

На зависимостях имеется большая изрезанность линий, связанная с накачкой. Проведенные исследования показали, что основное влияние на это оказывает произведение  $MS_{11}$ .

Получены зависимости коэффициентов усиления  $K_a$  и преобразования  $K_t$  от частоты сигнала  $f_s$  при следующих частоте и мощности накачки:  $f_p = 15$  ГГц,  $P_p = 1,826$  мкВт;  $f_p = 34,67$  ГГц,  $P_p = 1,826$  мкВт для n-GaAs и  $f_p = 30$  ГГц,  $P_p = 0,219$  мкВт;  $f_p = 106,1$  ГГц,  $P_p = 1,826$  мкВт для n-InP.

Показано, что подача низкочастотной накачки ( $f_p < f_s$ ) для тонкопленочной полупроводниковой структуры с типичными электрофизическими параметрами приводит к заметному повышению (до 32,7 для n-GaAs и до 39,1 % для n-InP) верхнего частотного предела усиливаемых ВПЗ. Также обеспечивается автодинное преобразование при частоте входного сигнала до 46 ГГц для n-GaAs и до 147,6 ГГц для n-InP.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено исследование параметрического взаимодействия основных мод ВПЗ в условиях низкочастотной накачки в ТПС с ОДП с сильной асимметрией и жесткой границей потока носителей заряда.

Анализ представленных в работе результатов позволяет сделать следующие выводы:

- 1) Проведенный сравнительный анализ основных свойств GaAs, InP и GaN показал, что GaN и InP являются перспективными материалами для создания функциональных устройств на ВПЗ в полупроводниках с ОДП. Проведенный обзор литературных данных позволил обосновать выбор параметров и величин, характерных для GaAs и InP, которые были использованы в численных расчетах данной работы.

- 2) Подача накачки с низкой частотой приводит к заметному увеличению верхнего частотного предела усилителей бегущей волны, который составляет величину до 32,7 % для n-GaAs и до 39,1 % для n-InP;
- 3) Подача низкочастотной накачки обеспечивает преобразование с усилением до частот 46 ГГц для n-GaAs и до 147,6 ГГц для n-InP;
- 4) Частота и мощность накачки могут быть выбраны таким образом, что возможно как усиление сигнальной волны, так и автодинное преобразование одновременно с полным гашением сигнала.

Таким образом, показана возможность создания на основе параметрического взаимодействия волн в полупроводниках функциональных микроэлектронных устройств СВЧ диапазона различного типа и, в частности, параметрических устройств с низкочастотной накачкой.

#### **Список использованных источников**

1. Михайлов А.И. Параметрические и нелинейные колебательные и волновые процессы в полупроводниковых структурах в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах: дисс. ... доктора физ.-мат. наук. – Саратов, 2000. – 364 с.
2. Гуляев Ю.В. Акустоэлектроника (исторический обзор) // УФН. – 2005. – Т. 175, № 8. – С. 887-895.
3. Сергеев С.А., Михайлов А.И. Волновые процессы в твердых телах и их использование в микроэлектронике // Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика: тез. докл. – Саратов: Техно-Декор, 2018. – С. 283-285.
4. Михайлов А.И., Сергеев С.А. Волновые процессы в твердых телах и их использование в электронике / Нано- и биомедицинские технологии. Управление качеством. Проблемы и перспективы – Саратов: Техно-Декор, 2018.
5. Михайлов А.И., Сергеев С.А. Волны пространственного заряда в полупроводниковых структурах с отрицательной дифференциальной проводимостью // Полупроводниковая электроника и молекулярные нанотехнологии. – Саратов: Наука, 2013. – С. 59-104.

6. Прохоров Э.Д., Белецкий Н.И. Полупроводниковые материалы для приборов с междолинным переносом электронов. – Харьков: Вища школа, 1982. – 144 с.
7. Белоусов Н.П., Чайка В.Е. Частотная зависимость отрицательной проводимости InP в режиме малого сигнала // Укр. физ. журн. – 1984. – Т. 29. Вып. 4. – С. 627-628.
8. Herbert D.C., Fawcett W., Nilsum C. High-field transport in indium phosphide // J. Phys. Chem. – 1976. – № 11. – P. 3969-3975.
9. Wandinger L. Mm-wave InP Gunn Devices: status and trends // Microwave J. – 1981. – Vol. 24, № 3. – P. 71-78.
10. Фазовая скорость волн пространственного заряда в полупроводниковых структурах на основе нитридов индия, галлия и алюминия / С.А. Сергеев, А.И. Михайлов, О.С. Сенатов // Ученые Записки Физического Факультета Московского Университета. – 2014. – Т. 1, № 2 (10). С. 1-5.
11. Rees H.D. Hot electron effects at microvawe frequencies in GaAs // Solid State Com. – 1969. – Vol. 7, № 2.
12. Барыбин А.А., Михайлов А.И. Параметрическое взаимодействие волн пространственного заряда в тонкопленочных полупроводниковых структурах. // ЖТФ. – 2000. – Т. 70, вып. 2. – С. 48-52.
13. Барыбин А.А. Волны в тонкопленочных полупроводниковых структурах с горячими электронами. – М.: Наука, 1986. – 288 с.
14. Барыбин А.А., Степанова М. Г. Перенос мощности и энергетическая нормировка волн пространственного заряда в тонкопленочных полупроводниковых структурах. // Изв. ЛЭТИ. – 1991. – Вып. 437. – С. 61-64.
15. Михайлов А.И. Влияние частотной дисперсии отрицательной дифференциальной подвижности электронов на усиление волн пространственного заряда в тонкопленочных структурах арсенида галлия и фосфида индия // Письма в ЖТФ. – 1995. – Т. 21, вып. 21.
16. Михайлов А.И., Сергеев С.А. Влияние концентрации электронов в пленке арсенида галлия на граничную частоту усиления волн пространственного

заряда в тонкопленочных полупроводниковых структурах / Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. Вып. 4. – С. 85-90.

17. Барыбин А.А., Михайлов А.И. Анализ параметрического взаимодействия волн пространственного заряда в тонкопленочных структурах асимметричного типа на основе арсенида галлия n-типа // ЖТФ. – 2003. – Т. 73, вып. 6. – С. 69.

18. Барыбин А.А., Михайлов А.И. Анализ параметрического взаимодействия волн пространственного заряда в тонкопленочных структурах асимметричного типа на основе арсенида галлия n-типа. // Физика полупроводников и полупроводниковая электроника – Саратов: Изд-во Гос. УНЦ «Колледж», 2001.

19. Иванченко В.А., Климов Б.Н., Михайлов А.И. Параметрическое взаимодействие высокочастотных волн в n-GaAs // ФТП. – 1979. – Т. 13, вып. 6.

20. Игнатъев Ю.М., Михайлов А.И. Параметрическое усиление волн пространственного заряда в полупроводнике с отрицательной дифференциальной проводимостью // Радиоэлектроника. – 1990. – Т. 33, №10.

21. Барыбин А.А., Михайлов А.И., Клецов А.А. Коэффициенты связи волн пространственного заряда при их параметрическом взаимодействии в тонкопленочных структурах арсенида галлия // Электродинам. и техн. СВЧ и КВЧ. – 1999. – Т. 7, № 2. – С. 88.

*Андрей Драеникин А.А.*