

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра физики полупроводников

**Влияние частоты и мощности накачки на процесс распространения волн
пространственного заряда в тонкопленочных полупроводниковых
структурах на основе n-GaAs, n-InP и n-GaN**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студента 2 курса 202 группы

направления 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»

факультета нано - и биомедицинских технологий

Дудкина Андрея Михайловича

Научный руководитель

доцент, к.ф.-м.н., доцент

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

С.А. Сергеев

инициалы, фамилия

Заведующий кафедрой

д.ф.-м.н., профессор

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

А.И. Михайлов

инициалы, фамилия

Саратов 2018

ВВЕДЕНИЕ

Общая характеристика работы.

Актуальность исследования. В настоящее время большой интерес представляет создание устройств на основе тонкопленочных полупроводниковых структур с отрицательной дифференциальной проводимостью, имеющей место в таких полупроводниках, как n-GaAs, n-InP и n-GaN. Это связано с особенностями распространения в них ВПЗ в условиях разогрева электронов в сильных электрических полях. Подобные структуры могут быть использованы для создания интегральных устройств обработки сигналов вплоть до миллиметрового диапазона длин волн, выполняющих такие радиотехнические функции, как усиление, генерация, задержка и изменение фазы сигнала, управляемая фильтрация, преобразование и синтез частот.

Распространение собственных волн в тонкопленочных полупроводниковых структурах с отрицательной дифференциальной проводимостью к настоящему времени достаточно хорошо исследовано [1]. Известна общая теория [2], проведен анализ при частоте накачки, равной граничной частоте [3, 4] параметрического взаимодействия волн пространственного заряда в тонкопленочных полупроводниковых структурах с отрицательной дифференциальной проводимостью. В то же время влияние параметров полупроводниковой структуры и сигналов, подаваемых на нее, изучено недостаточно.

Цель и задачи магистерской работы. **Целью** магистерской работы является исследование влияния мощности и частоты накачки на процессы параметрического взаимодействия волн пространственного заряда в тонкопленочных структурах на основе n-GaAs, n-InP и n-GaN.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

- Проведение литературного обзора по соответствующей тематике;
- Анализ влияния параметров накачки на параметрическое взаимодействие волн пространственного заряда в тонкопленочных структурах на основе n-GaAs, n-InP или n-GaN.

– Проведение сравнительного анализа перспектив применения n-InP и n-GaN в устройствах на волнах пространственного заряда.

Структура и объем работы

Кроме ВВЕДЕНИЯ, ЗАКЛЮЧЕНИЯ, СПИСКА ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ И ПРИЛОЖЕНИЯ работа включает 5 основных разделов:

1 Волны пространственного заряда в полупроводниковых структурах с отрицательной дифференциальной проводимостью

2 Общая теория параметрического взаимодействия ВПЗ в ТПС с ОДП.

Вывод основных уравнений

3 Методика расчета коэффициентов усиления и преобразования

4 Результаты расчета

5 Перспективы использования фосфида индия и нитрида галлия для функциональных устройств на волнах пространственного заряда.

Общий объем работы составляет 52 страницы и включает 19 рисунков.

Положение, выносимое на защиту. Установлено, что по ряду параметров InP и GaN имеют преимущество над традиционным GaAs, то есть эти материалы являются перспективными для использования в приборах на волнах пространственного заряда коротковолновой части СВЧ диапазона.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении описана актуальность темы исследования, раскрыта новизна работы, а так же сформированы цель и задачи исследования.

В разделе 1 проводится анализ литературы по теме исследований, рассматривается распространение волн пространственного заряда в тонкопленочных полупроводниковых структурах n-GaAs, n-InP и n-GaN.

В разделе 2 рассмотрена общая теория параметрического взаимодействия ВПЗ в ТПС с ОДП и проведен вывод основных уравнений для расчета.

Третий раздел посвящена методике расчета коэффициентов усиления и преобразования.

В разделе 4 приведены результаты проведенных расчетов.

На рисунке 1 приведена зависимость коэффициентов усиления K_a (сплошная кривая) и преобразования K_t (пунктирная) от координаты z .

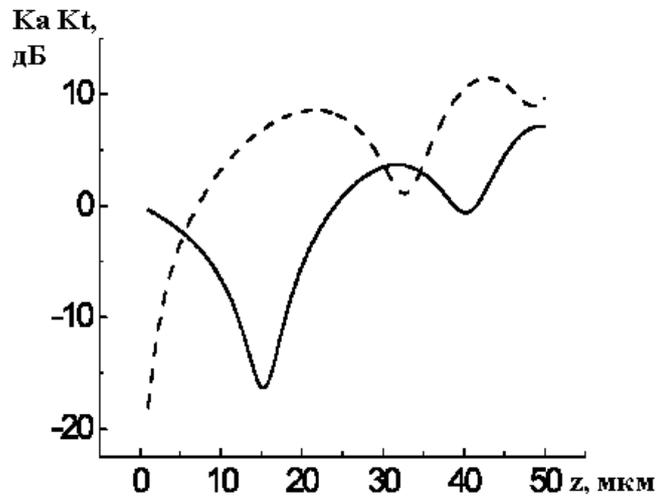


Рисунок 1 – Зависимость K_a и K_t от координаты z (GaAs $f_s = 35$ ГГц, $f_p = 28$ ГГц, $P_p = P_{pmax} = 0,0011$ мВт).

По мере распространения вдоль оси z сигнальная и холостая ВПЗ периодически обмениваются мощностью, сохраняя общую тенденцию роста амплитуды обеих волн. На конце участка ($z = 50$ мкм) величины $K_a(z)$ и $K_t(z)$ становятся положительными, что свидетельствует об эффективной параметрической связи ВПЗ сигнальной и холостой частот. Меняя параметры структуры, амплитуду и частоту накачки, можно управлять значениями коэффициентов на выходе (на длине 50 мкм) (рисунок 2, 3).

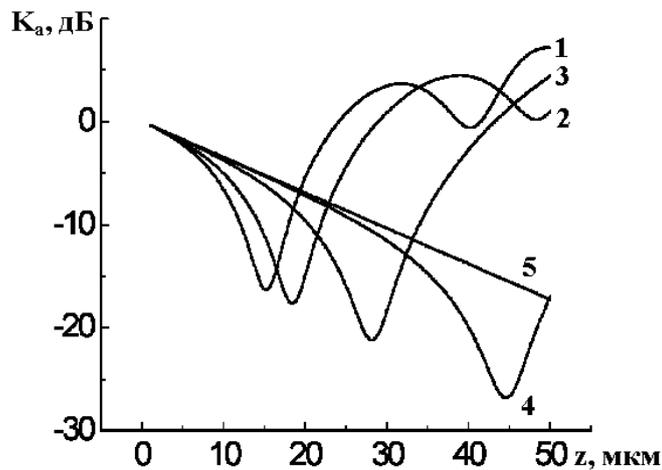


Рисунок 2 – Зависимость K_a от координаты z (GaAs $f_s = 35$ ГГц, $f_p = 28$ ГГц, $P_p = P_{max} = 9,34 \cdot 10^{-3}$ (1); $5 \cdot 10^{-3}$ (2); $1 \cdot 10^{-3}$ (3); $1 \cdot 10^{-4}$ (4); 0(5)).

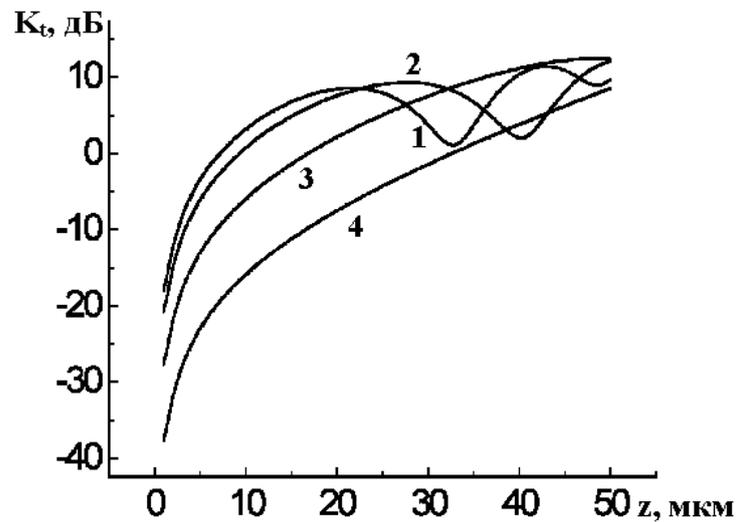


Рисунок 3 – Зависимость K_t от координаты z (GaAs $f_s = 35$ ГГц, $f_p = 28$ ГГц, $P_p = P_{\max} = 9,34 \cdot 10^{-3}$ (1); $5 \cdot 10^{-3}$ (2); $1 \cdot 10^{-3}$ (3); $1 \cdot 10^{-4}$ (4); 0 (5)).

На рисунке 4 наблюдается максимум при $f_p \approx \frac{1}{2} f_s$. Также можно отметить резко выраженные минимумы, в которых небольшое изменение частоты накачки приводит к значительному изменению коэффициентов. Зависимость K_a и K_t от мощности накачки (рисунок 5) характеризуется общей тенденцией роста при наличии нескольких максимумов.

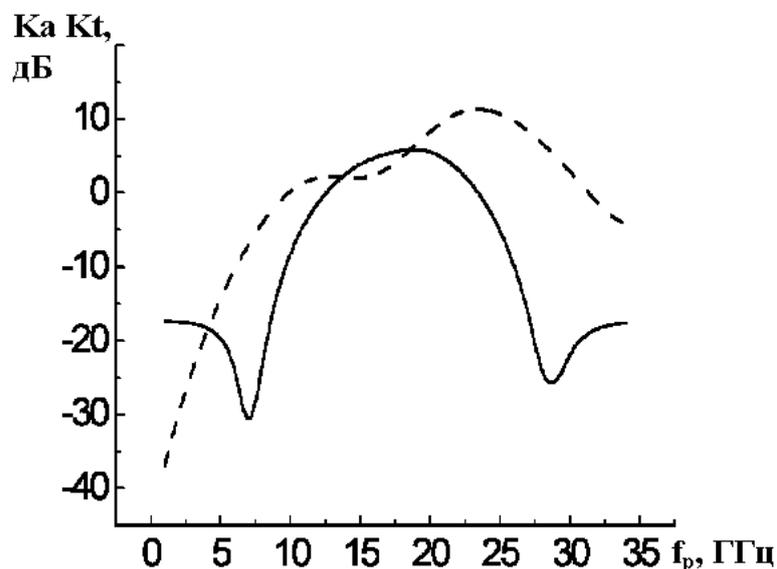


Рисунок 4 – Зависимость K_a и K_t от частоты накачки (GaAs $f_s = 35$ ГГц, $P_p = 6,34 \cdot 10^{-5}$ мВт).

По данным зависимостям можно определить диапазоны наиболее эффективной работы устройства в качестве параметрического усилителя или

управляемого фильтра. Перестройкой частоты и мощности накачки можно управлять амплитудой волны на частоте сигнала на выходе.

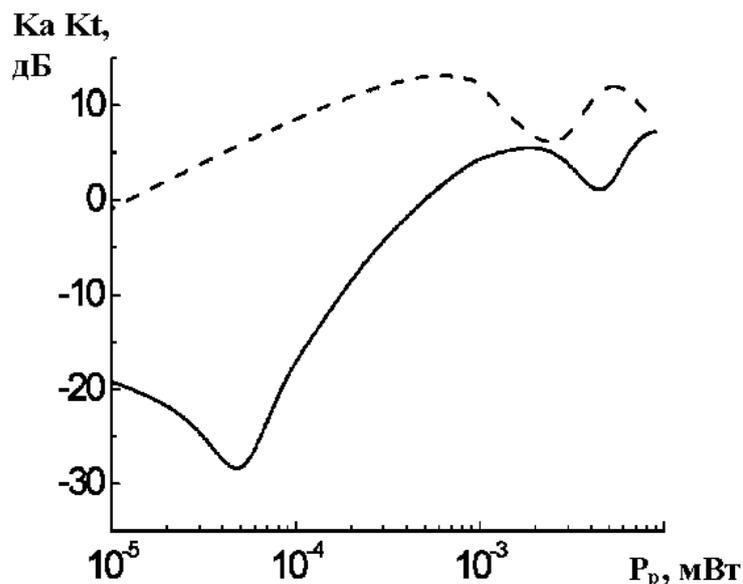


Рисунок 5 – Зависимость коэффициентов усиления K_a и преобразования K_t от мощности накачки (GaAs $f_s = 35$ ГГц, $f_p = 28$ ГГц, $P_{pmax} = 0,0011$ мВт).

Все приведенные выше зависимости получены для n-GaAs. Однако использование n-InP сулит целый ряд преимуществ. Граничная частота усиления ВПЗ в нем достигает 80 ГГц против 31 ГГц у n-GaAs при одинаковом уровне легирования. Энергетический зазор между G и L долинами у n-InP – 0,53 эВ, против 0,31 для арсенида галлия. В результате этого протяженность падающего участка на ВАХ также существенно больше.

Зависимости коэффициентов усиления и преобразования от параметров полупроводниковой структуры, а также амплитуды и частоты накачки для n-InP приведены на рисунках 6-10.

Видно, что эффективное усиление и автодинное преобразование сигнала наблюдается на частотах вплоть до 100 ГГц, а на зависимости существуют участки, где небольшое изменение частоты накачки приводит к изменению коэффициентов на 40 дБ. Таким образом, эффективность фильтрации сигнала структурами на основе n-InP также существенно выше.

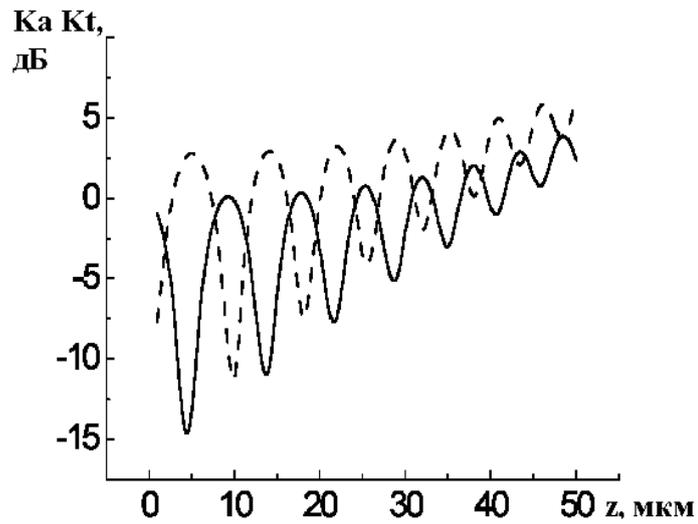


Рисунок 6 – Зависимость K_a и K_t от z ($\ln P f_s = 100$ ГГц, $f_p = 75$ ГГц, $P_p = P_{\max} = 0,074$ мВт).

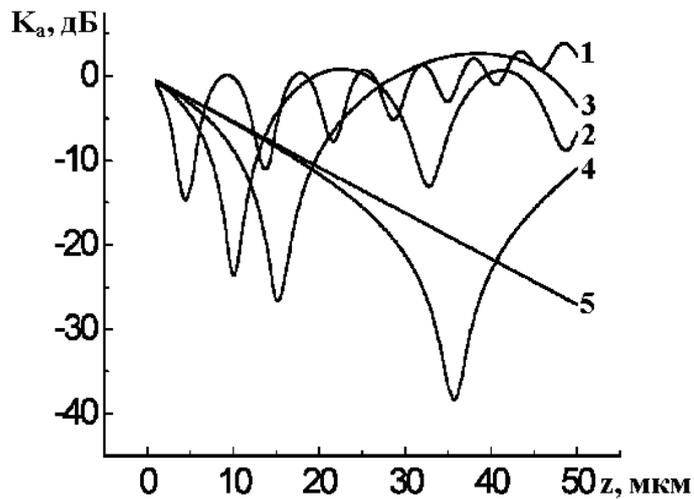


Рисунок 7 – Зависимость K_a от z ($P_p = P_{\max} = 7,39 \cdot 10^{-2}$ (1); $1 \cdot 10^{-2}$ (2); $3 \cdot 10^{-3}$ (3); $1 \cdot 10^{-4}$ (4); 0 (5)).

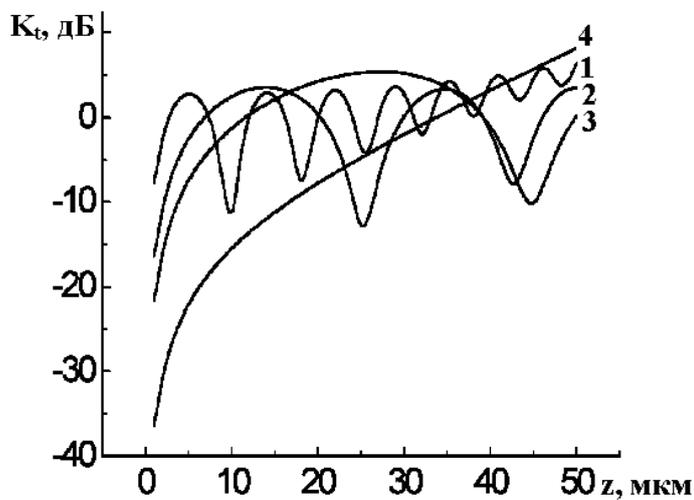


Рисунок 8 – Зависимость K_t от z ($P_p = P_{\max} = 7,39 \cdot 10^{-2}$ (1); $1 \cdot 10^{-2}$ (2); $3 \cdot 10^{-3}$ (3); $1 \cdot 10^{-4}$ (4); 0 (5)).

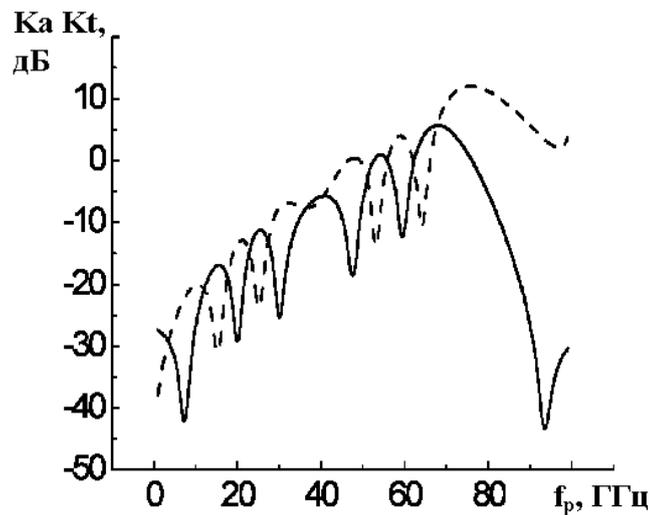


Рисунок 9 – Зависимость K_a и K_t от частоты накачки (InP $f_s = 100$ ГГц, $P_p = 4,59 \cdot 10^{-4}$ мВт).

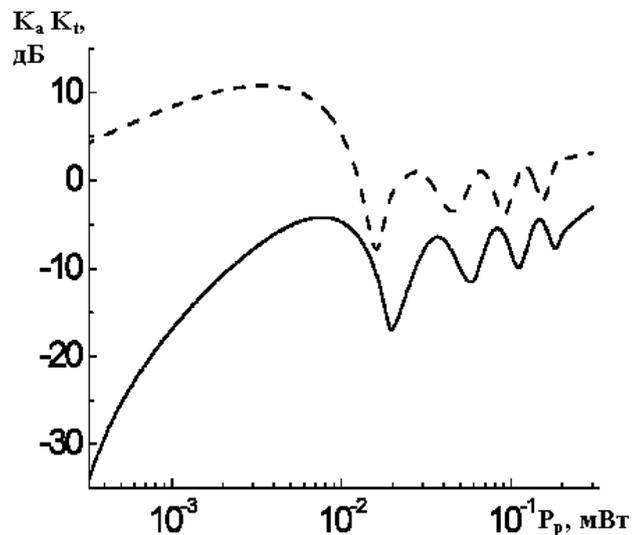


Рисунок 10 – Зависимость K_a и K_t от мощности накачки (InP $f_s = 100$ ГГц, $f_p = 90$ ГГц).

Видно, что по мере распространения вдоль оси z сигнальная и холостая ВПЗ периодически обмениваются мощностью, сохраняя общую тенденцию роста амплитуд обеих волн. На конце участка ($z = 50$ мкм) $K_a(z)$ и $K_t(z)$ могут становиться положительными, что свидетельствует об эффективной параметрической связи ВПЗ сигнальной и холостой частот. Существуют участки, где значения K_a и K_t лежат ниже штрихпунктирной линии. То есть, подача накачки может приводить и к ослаблению ВПЗ сигнала.

При определенных значениях P_p , K_a , K_t на конце участка взаимодействия ($z = 50$ мкм) могут стать положительными, а амплитуда сигнальной и холостой ВПЗ составляют величины одного порядка. Таким образом, параметрический механизм взаимодействия ВПЗ в ТПС с ОДП может быть основой создания активных смесителей 8-мм диапазона.

В разделе 5 рассмотрены перспективы использования фосфида индия и нитрида галлия для функциональных устройств на волнах пространственного заряда

Проведен литературный обзор параметров и характеристик соединений A_3B_5 для выяснения перспектив их использования в устройствах на ВПЗ.

Некоторые наиболее важные параметры и характеристики соединений представлены в таблице 1.

Таблица 1 – параметры и характеристики соединений

	<i>GaAs</i>	<i>InP</i>	<i>GaN</i>
ΔE_g , эВ	1,42÷1,46	1,34÷1,432	3,22÷3,302 (3,39÷3,51)
m_T/m_0	0,063÷0,072	0,062÷0,082	0,133÷0,15 (0,19÷0,22)
m_X/m_0	0,39÷0,58	0,32÷0,88	0,23÷0,3
m_L/m_0	0,17÷0,35	0,23÷0,47	0,34÷0,5
$\Delta_{ГХ}$, эВ	0,33÷0,52	0,8÷0,96	0,969÷1,22
$\Delta_{ГЛ}$, эВ	0,28÷0,33	0,51÷0,6	2,269÷2,299
ϵ	12,5÷13,5	11,93÷12,61	9,5÷9,95 (8,9÷10,4)
k , Вт/(см·°С)	0,45÷0,54	0,68	1,3÷1,7 (1,95)
$E_{пр}$, В/см	$4 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^5$	$33 \cdot 10^5$ ($50 \cdot 10^5$)
$T_{пл}$, К	1510	1327	1773÷2273
ρ , г/см ³	5,317÷5,37	4,79÷4,81	6,087÷6,15 (6,087÷6,15)
Твердость по Моосу	4÷5,5	5	6
a , Å	5,653÷5,654	5,8687÷5,869	4,5÷4,52

В таблице 2 приведены наиболее значимые в свете применения в устройствах на ВПЗ характеристики соединений. В таблице 3 проводится сравнение основных электрофизических параметров *GaAs*, *InP* и *GaN* с точки зрения их использования для создания СВЧ приборов («++» – существенное преимущество, «+» – достоинство, «±» – среднее значение, «-» – недостаток).

Таблица 2 – наиболее значимые в свете применения в устройствах на ВПЗ характеристики соединений

	<i>GaAs</i>	<i>InP</i>	<i>GaN</i>
v_0 , см/с	$(1,5\div 1,7)\cdot 10^7$ ($E_0=5,5$ кВ/см)	$(2,0\div 2,3)\cdot 10^7$ ($E_0=18,5$ кВ/см)	$(2,35\div 2,8)\cdot 10^7$ ($2,8\cdot 10^7$) ($E_0=200$ кВ/см)
D , см ² /с	142÷500 ($E_0=5,5$ кВ/см)	40÷118 ($E_0=18,5$ кВ/см)	22÷25 (25) ($E_0=200$ кВ/см)
$E_{\text{пор}}$, кВ/см	3,2÷3,5	10÷10,5	80÷150 (150÷200)
τ_M , с	$6\cdot 10^{-12}$	$3\cdot 10^{-12}$	
τ_Δ , с	$(1,48\div 1,5)\cdot 10^{-12}$	$0,75\cdot 10^{-12}$	
τ_{NDR} , с	$(7,5\div 9,4)\cdot 10^{-12}$	$3,75\cdot 10^{-12}$	$0,25\cdot 10^{-12}$ ($1,4\cdot 10^{-12}$)
$v_{\text{max}} / v_{\text{min}}$	2÷2,4	3÷4	2,1÷2,2 (1,45÷1,5)
$ \mu_d _{\text{max}}$, см ² /В·с	2400÷2500	1190÷2000	110÷220 (50)
$(n_0d)_{\text{кр}}$, см ⁻²	$2,745\cdot 10^{10}$	$4,4016\cdot 10^{10}$	$38,034\cdot 10^{10}$ ($167,356\cdot 10^{10}$)

Таблица 3 – сравнение основных электрофизических параметров *GaAs*, *InP* и *GaN* с точки зрения их использования для создания СВЧ приборов

	Параметр								
	v_0	D	$E_{\text{пор}}$	τ_{NDR}	$\frac{v_{\text{max}}}{v_{\text{min}}}$	k	$E_{\text{пр}}$	$ \mu_d _{\text{max}}$	$(n_0d)_{\text{кр}}$
<i>GaAs</i>	±	–	+	±	+	–	±	+	±
<i>InP</i>	+	+	±	+	++	+	±	+	+
<i>GaN</i>	++	++	–	++	+	++	++	–	++

На рисунке 11 приведены частотные зависимости реальных (сплошные кривые) и мнимых (пунктирные) частей дифференциальной подвижности электронов для *n-GaAs* при $E_0 = 5,5$ кВ/см (рисунок 11 (а)), *n-InP* при $E_0 = 18,5$ кВ/см (рисунок 11 (б)), *n-GaN* – $E_0 = 200$ кВ/см (кривая 1, рисунок 11 (в)) и *n-InN* – $E_0 = 90$ кВ/см (кривая 2, рисунок 11 (в)) и $E_0 = 140$ кВ/см (кривая 3, рисунок 11 (в)), которые будут использоваться при исследовании распространения параметрического взаимодействия ВПЗ в рассмотренных соединениях.

Таким образом, проведенный сравнительный анализ основных свойств соединений A_3B_5 показал, что *GaN* и *InP* являются перспективными

материалами для использования их в устройствах на ВПЗ.

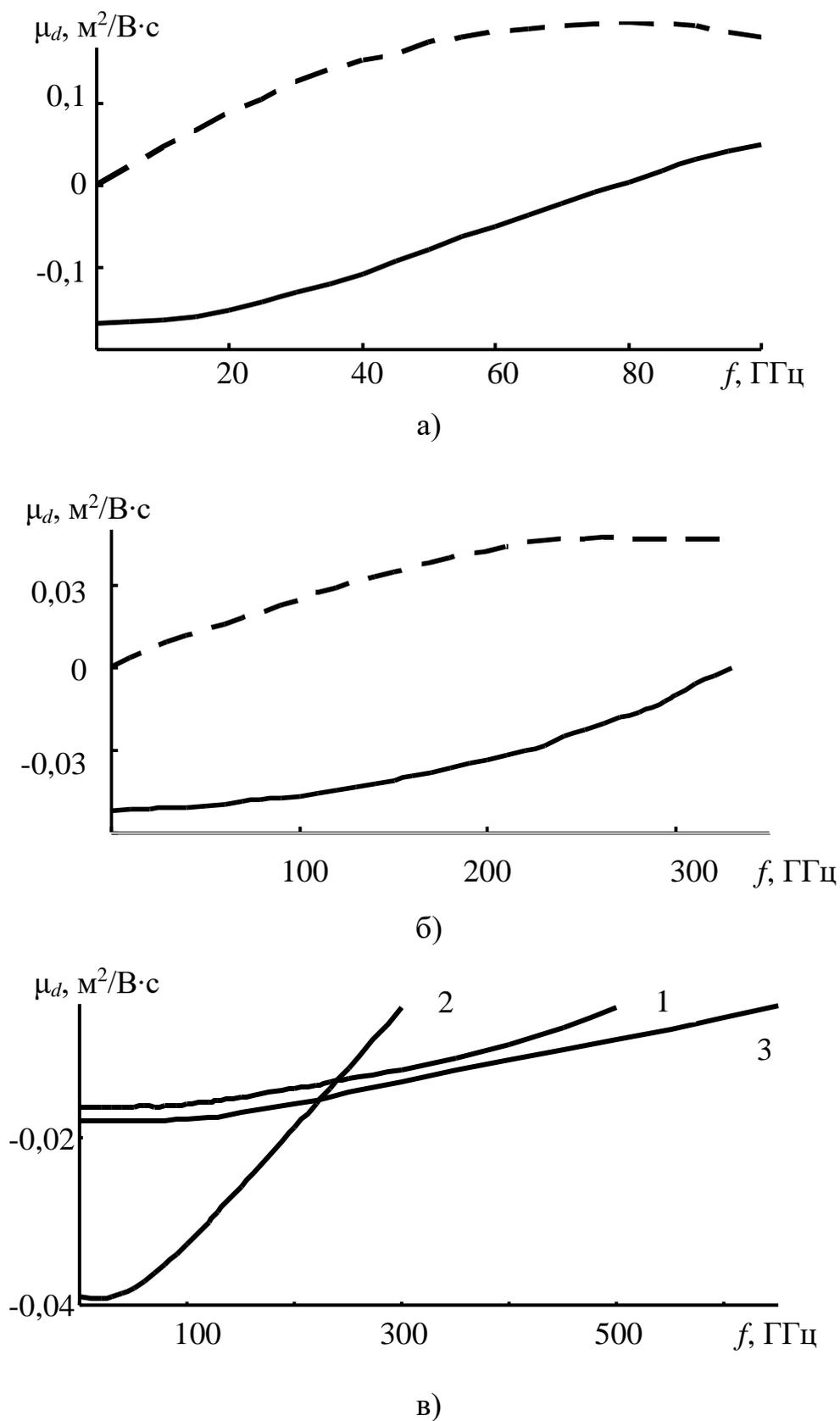


Рисунок 11 – частотные зависимости реальных (сплошные кривые) и мнимых (пунктирные) частей дифференциальной подвижности электронов для n -GaAs.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения магистерской работы можно сделать следующие выводы:

1. Максимальное увеличение верхнего частотного предела усиливаемых ВПЗ в ТПС с ОДП при параметрическом взаимодействии в условиях низкочастотной накачки наблюдается при $f_p \approx f_c$ и составляет для n-GaAs примерно 27,3 % (до 39,8 ГГц), для n-InP – примерно 31,6 % (до 106,4 ГГц) и для n-GaN – примерно 13,4 % (до 55,52 ГГц).

2. Амплитуда ВПЗ холостой частоты на конце участка параметрического взаимодействия может достигать величин того же порядка, что и амплитуда сигнальной ВПЗ, при этом может быть получено автодинное преобразование при частоте входного сигнала для n-GaAs примерно до 48 ГГц, n-InP – до 107,5 ГГц, n-GaN – до 61 ГГц. Таким образом, параметрический механизм взаимодействия ВПЗ в ТПС с ОДП может быть основой создания активных смесителей коротковолновой части СВЧ диапазона.

3. Изменение амплитуды накачки на входе, или ее частоты, приводит к значительному (до 40-50 дБ) изменению коэффициентов K_a и K_t .

4. Показано, что по ряду параметров InP и GaN имеют преимущество над традиционным GaAs, то есть эти материалы являются перспективными для использования в приборах на ВПЗ коротковолновой части СВЧ диапазона.