

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

Кафедра физики полупроводников

**Параметрическое взаимодействие волн пространственного заряда в  
тонкопленочных структурах на основе n-GaAs и n-InP**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса 412 группы

направления 11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника»

факультета нано - и биомедицинских технологий

Альмикеева Артема Евгеньевича

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 2019

## **ВВЕДЕНИЕ.**

### **Общая характеристика темы.**

**Актуальность темы.** В настоящее время большой интерес представляет создание устройств на основе тонкопленочных полупроводниковых структур (ТПС) с отрицательной дифференциальной проводимостью (ОДП), 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 ОДП 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 (ВПЗ) в ТПС с ОДП. В то же время влияние параметров полупроводниковой структуры и сигналов, подаваемых на нее, изучено недостаточно.

### **Цель и задачи бакалаврской работы**

**Целью** бакалаврской работы является исследование влияния частоты и мощности низкочастотной накачки на характеристики распространения и взаимодействия ВПЗ в ТПС на основе  $n$ -GaAs и  $n$ -InP на основе общей теории параметрического взаимодействия ВПЗ в приближении жесткой границы потока носителей заряда.

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

- Проведение литературного обзора по соответствующей тематике;
- Проведение сравнительного анализа перспектив применения  $n$ -InP и  $n$ -GaN в устройствах на волнах пространственного заряда.

– Анализ влияния параметров накачки на параметрическое взаимодействие волн пространственного заряда в тонкопленочных структурах на основе n-GaAs, n-InP.

### Структура и объем работы

Кроме ВВЕДЕНИЯ, ЗАКЛЮЧЕНИЯ, СПИСКА ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ И ПРИЛОЖЕНИЯ работа включает 3 основных раздела:

1 Теоретический обзор.

2 Теоретический анализ параметрического взаимодействия в полупроводниках n-GaAs и n-InP.

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

Общий объем работы составляет 54 страницы и включает 9 рисунков.

### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** описана актуальность темы исследования, раскрыта новизна работы, а также сформулированы цель и задачи исследования.

**В первой главе** проводится анализ литературы по теме исследований, рассмотрена общая теория параметрического взаимодействия ВПЗ в ТПС с ОДП и проведен вывод основных уравнений для расчета. На рисунке 1 показана схема ТПС с сильной асимметрией.

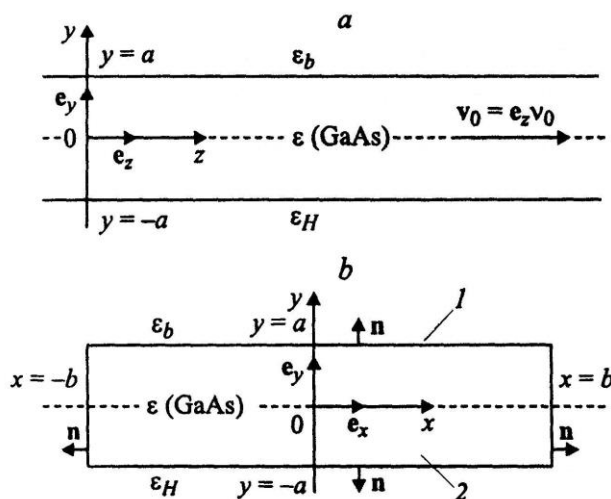


Рисунок 1 – Схема ТПС с сильной асимметрией

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.

| Характеристика полупроводника            | Арсенид галлия GaAs                         | Фосфид индия InP                             | Нитрид галлия GaN                            |
|------------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|
| $\Delta E_g$ , эВ                        | 1,42÷1,46                                   | 1,34÷1,432                                   | 3,22÷3,302                                   |
| $E_{пор}$ , кВ/см                        | 3,2÷3,5                                     | 10÷10,5                                      | 80÷150                                       |
| $\tau_M$ , с                             | $6 \cdot 10^{-12}$                          | $3 \cdot 10^{-12}$                           |                                              |
| $\tau_\Delta$ , с                        | $1,48 \cdot 10^{-12}$                       | $0,75 \cdot 10^{-12}$                        |                                              |
| $v_{max}/v_{min}$                        | 2÷2,4                                       | 3÷4                                          | 2,1÷2,2                                      |
| $D$ , см <sup>2</sup> /с                 | 142÷500 ( $E_0 = 5,5$ кВ/см)                | 40÷118 ( $E_0 = 18,5$ кВ/см)                 | 22÷25 ( $E_0 = 200$ кВ/см)                   |
| $k$ , Вт/(см °С)                         | 0,45÷0,54                                   | 0,68                                         | 1,3÷1,7                                      |
| $ \mu_d _{max}$ , см <sup>2</sup> /(В с) | 2400÷2500                                   | 1190÷2000                                    | 110÷220                                      |
| $\epsilon$                               | 12,5-13,5                                   | 12,35-14                                     | 9,5÷9,95                                     |
| $\rho$ , г/см <sup>3</sup>               | 5,317÷5,37                                  | 4,79÷4,81                                    | 6,087÷6,15                                   |
| $v_0$ , см/с                             | $(1,5-1,7) \cdot 10^7$ ( $E_0 = 5,5$ кВ/см) | $(2,0-2,3) \cdot 10^7$ ( $E_0 = 15,0$ кВ/см) | $(2,35÷2,8) \cdot 10^7$ ( $E_0 = 200$ кВ/см) |
| $T_{пл}$ , К                             | 1510                                        | 1327                                         | 1773÷2273                                    |

**Во второй главе** проведен теоретический анализ параметрического взаимодействия в полупроводниках n-GaAs и n-InP.

**Третья глава** приведены результаты теоретического исследования волн пространственного заряда в полупроводниках n-GaAs и n-InP.

Системы уравнений (1) и (2) решены численно методом Эйлера.

$$\frac{dA_s}{dz} = C_{11}(z)A_s(z) + C_{12}(z)A_i(z) \quad (1)$$

$$\frac{dA_i}{dz} = C_{21}(z)A_s(z) + C_{22}(z)A_i(z), \quad (2)$$

При расчетах использовались следующие параметры полупроводниковой структуры: диэлектрическая проницаемость пленки и подложки  $\epsilon = 12,5\epsilon_0$  (n-GaAs),  $\epsilon = 12,35\epsilon_0$  (n-InP), диэлектрическая проницаемость среды над пленкой (воздух)  $\epsilon_0$ , концентрация носителей зарядов  $4 \cdot 10^{14}$  см<sup>-3</sup>, толщина пленки 0,25 мкм, коэффициент диффузии 200 см<sup>2</sup>/с (n-GaAs) и 50 см<sup>2</sup>/с (n-InP), дрейфовая скорость электронов  $1,7 \cdot 10^7$  см/с при напряженности поля  $E_0 = 5,5$  кВ/см (n-GaAs) и  $2,3 \cdot 10^7$  см/с при  $E_0 = 18,5$  кВ/см (n-InP). На рисунке 2 зависимости коэффициентов усиления  $K_a(z)$  и

преобразования  $K_t(z)$  приведены для n-GaAs при следующих частотах и мощностях:  $f_s = 35$  ГГц,  $f_p = 30$  ГГц,  $P_p = 6,981$  мкВт (а);  $f_s = 40$  ГГц,  $f_p = 34,67$  ГГц,  $P_p = 99,78$  мкВт (б);  $f_s = 45$  ГГц,  $f_p = 20$  ГГц,  $P_p = 0,374$  мкВт (в) для n-GaAs.

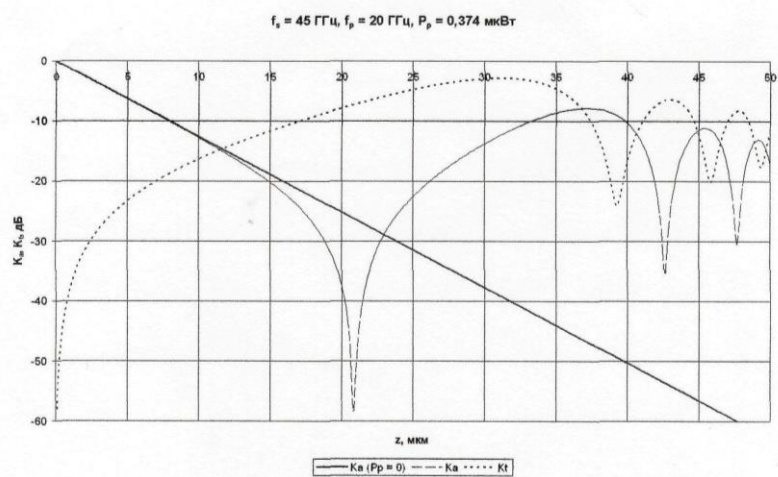
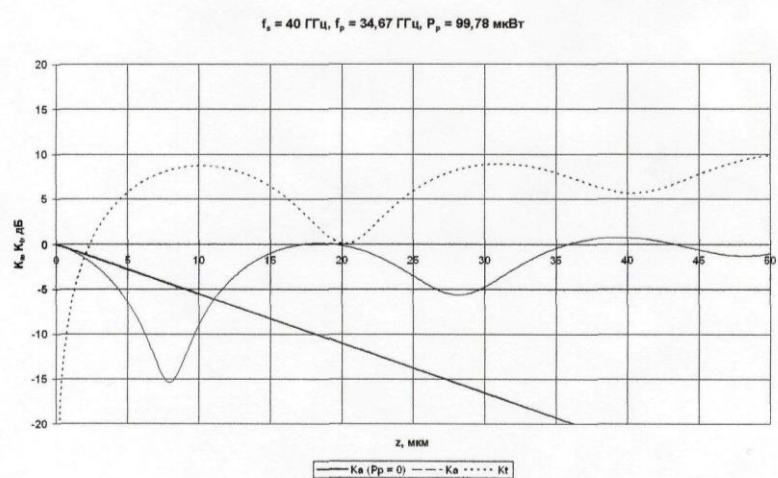
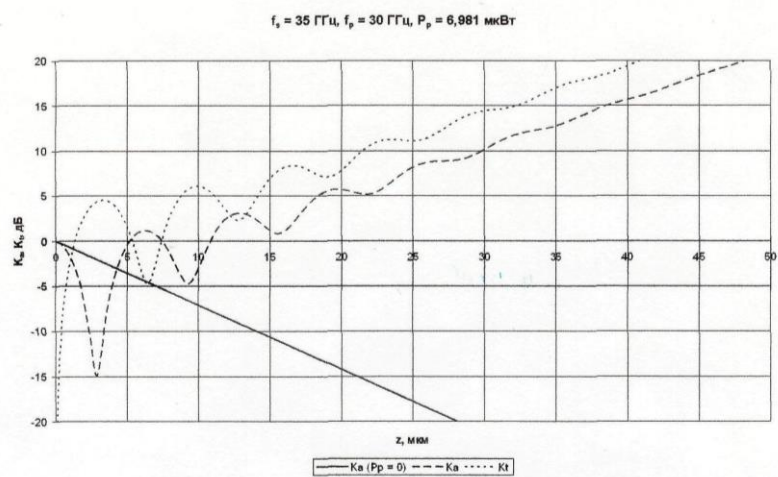


Рисунок 2 – Зависимости коэффициентов усиления  $K_a$  и преобразования  $K_t$  от координаты  $z$  для n-GaAs.

На рисунке 3 приведены аналогичные зависимости для n-InP при:  $f_s = 100$  ГГц,  $f_p = 30$  ГГц,  $P_p = 0,1239$  мкВт (а),  $f_s = 120$  ГГц,  $f_p = 70$  ГГц,  $P_p = 0,02795$  мкВт (б),  $f_s = 130$  ГГц,  $f_p = 106,1$  ГГц,  $P_p = 75,375$  мкВт (в).

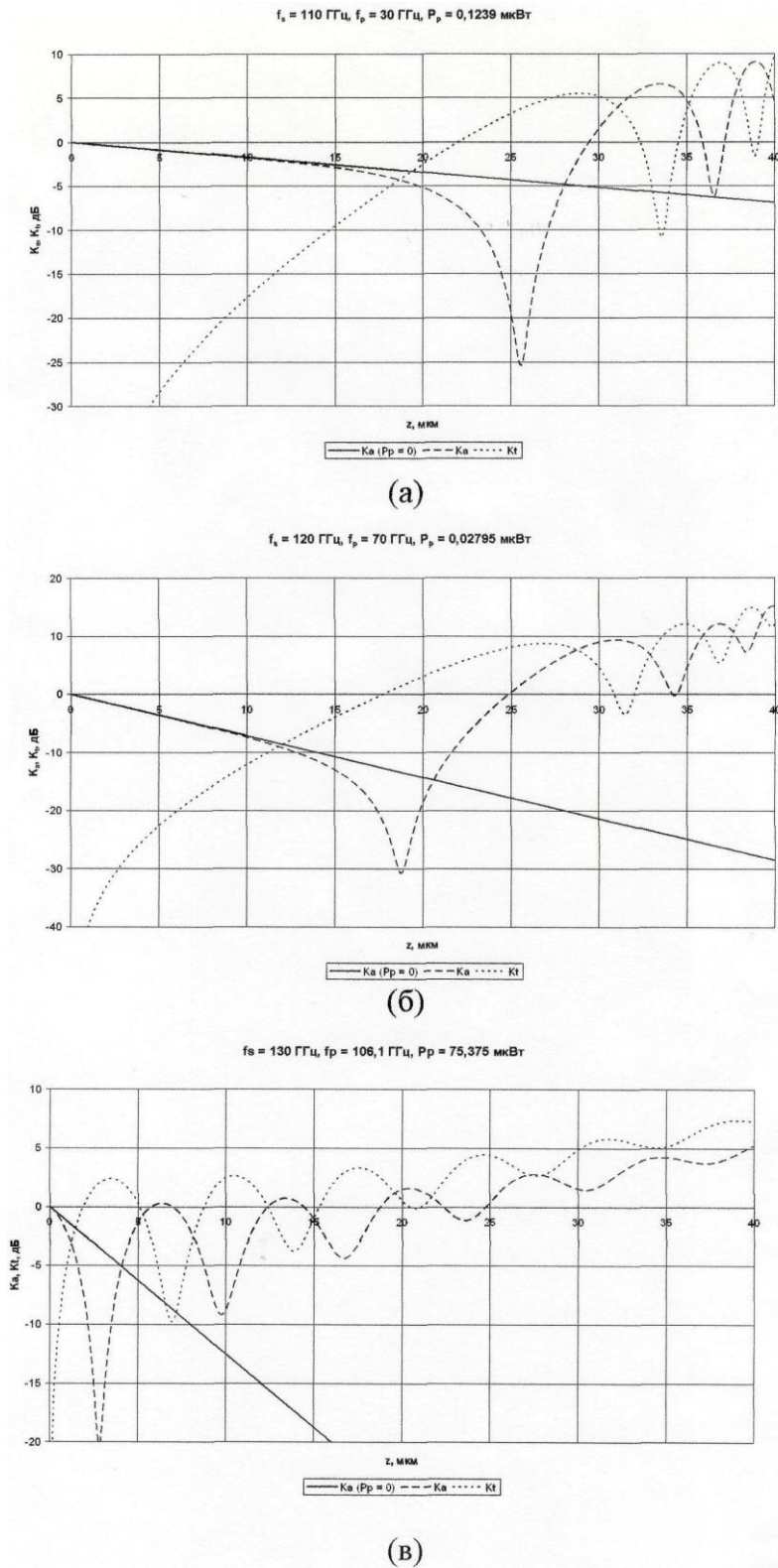


Рисунок 3 – Зависимости коэффициентов усиления  $K_a$  и преобразования  $K_t$  от координаты  $z$  для n-InP

Видно, что наличие в дрейфовом потоке носителей заряда в полупроводнике с ОДП ВПЗ с частотой накачки  $f_p$  приводит к тому, что затухающие в обычных условиях (без накачки – сплошная кривая) ВПЗ с частотой сигнала  $f_s > f_p$  и с образовавшимися в результате параметрического взаимодействия комбинационными частотами  $f_s \pm f_p$ , могут при определенных условиях стать нарастающими, либо их затухание может быть уменьшено значительно. Это объясняется 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 указывает на эффективную параметрическую связь ВПЗ сигнальной и холостой частот. Это означает, что низкочастотная накачка повышает верхний частотный предел усилителей бегущей волны на n-GaAs и n-InP. На фоне общей тенденции роста зависимостей коэффициенты усиления  $K_a$  и преобразования  $K_t$  от координаты  $z$  при увеличении  $z$  имеют довольно сильные колебания этих зависимостей, причем фазы этих колебаний практически противоположны, а их размах максимален при малых  $z$ , и уменьшается с ростом  $z$ . При увеличении  $P_p$  «частота» колебаний зависимостей  $K_a(z)$  и  $K_t(z)$  возрастает. Причем для n-InP «частота» колебаний этих зависимостей более высокая, чем для n-GaAs. Подавая низкочастотную накачку, можно как усилить ВПЗ сигнальной частоты (для определенных  $z$ ), так и заглушить их для обоих материалов.

На рисунках 4 и 5 приведены зависимости  $K_a$  и  $K_t$  от мощности накачки  $P_p$  для следующих параметров:  $f_s = 35$  ГГц,  $f_p = 5$  ГГц (а);  $f_s = 40$  ГГц,  $f_p = 15$  ГГц (б);  $f_s = 45$  ГГц,  $f_p = 25$  ГГц (в) для n-GaAs и  $f_s = 100$  ГГц,  $f_p = 50$  ГГц (а),  $f_s = 120$  ГГц,  $f_p = 40$  ГГц (б),  $f_s = 130$  ГГц,  $f_p = 106,1$  ГГц (в) для n-InP соответственно. Для всех зависимостей длина взаимодействия равна 50 мкм.



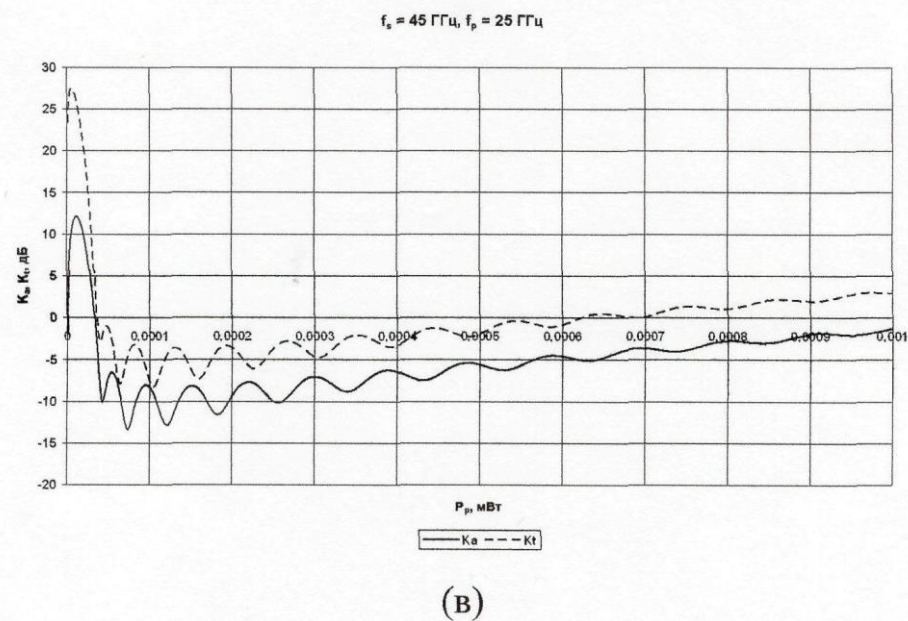
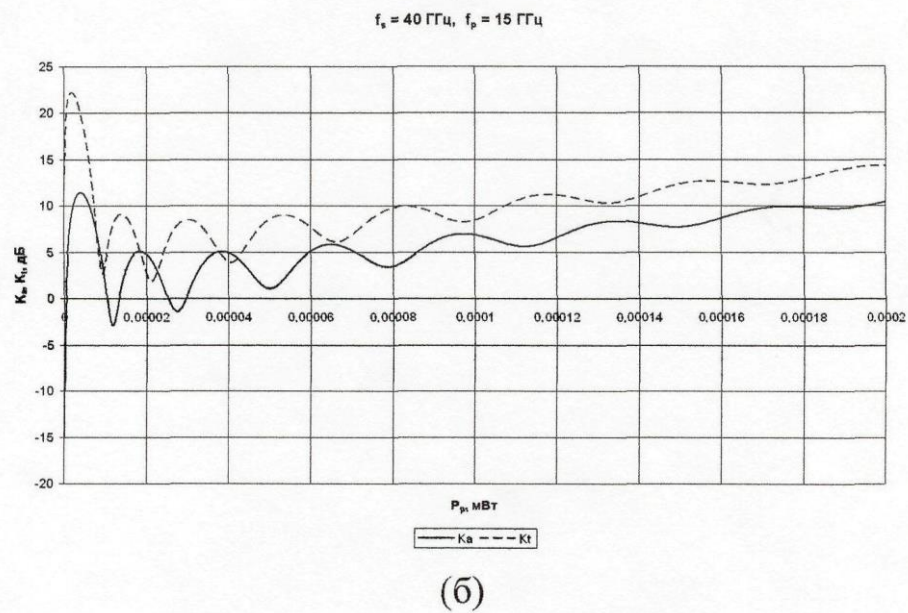
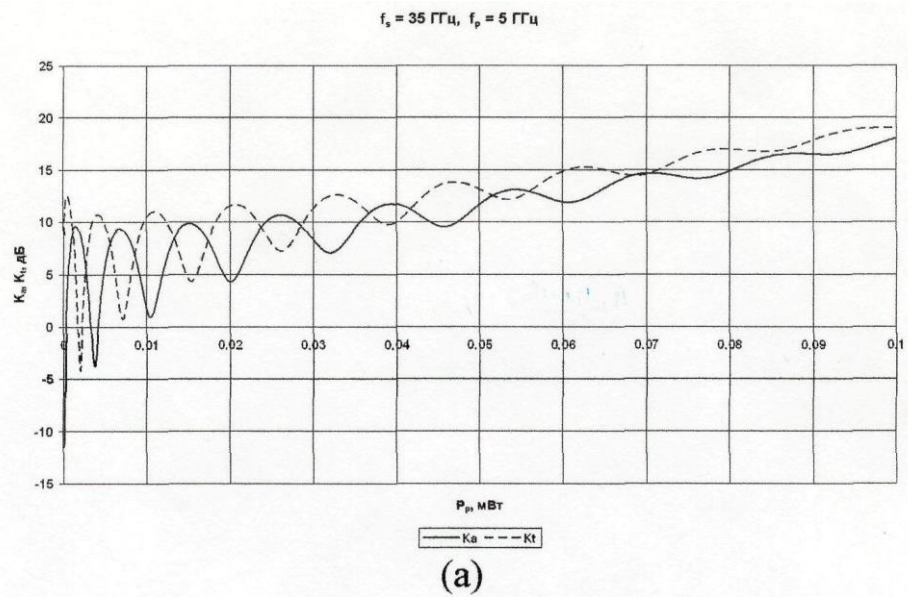


Рисунок 4 – Зависимости  $K_a$  и  $K_t$  от мощности накачки  $P_p$  для n-GaAs.

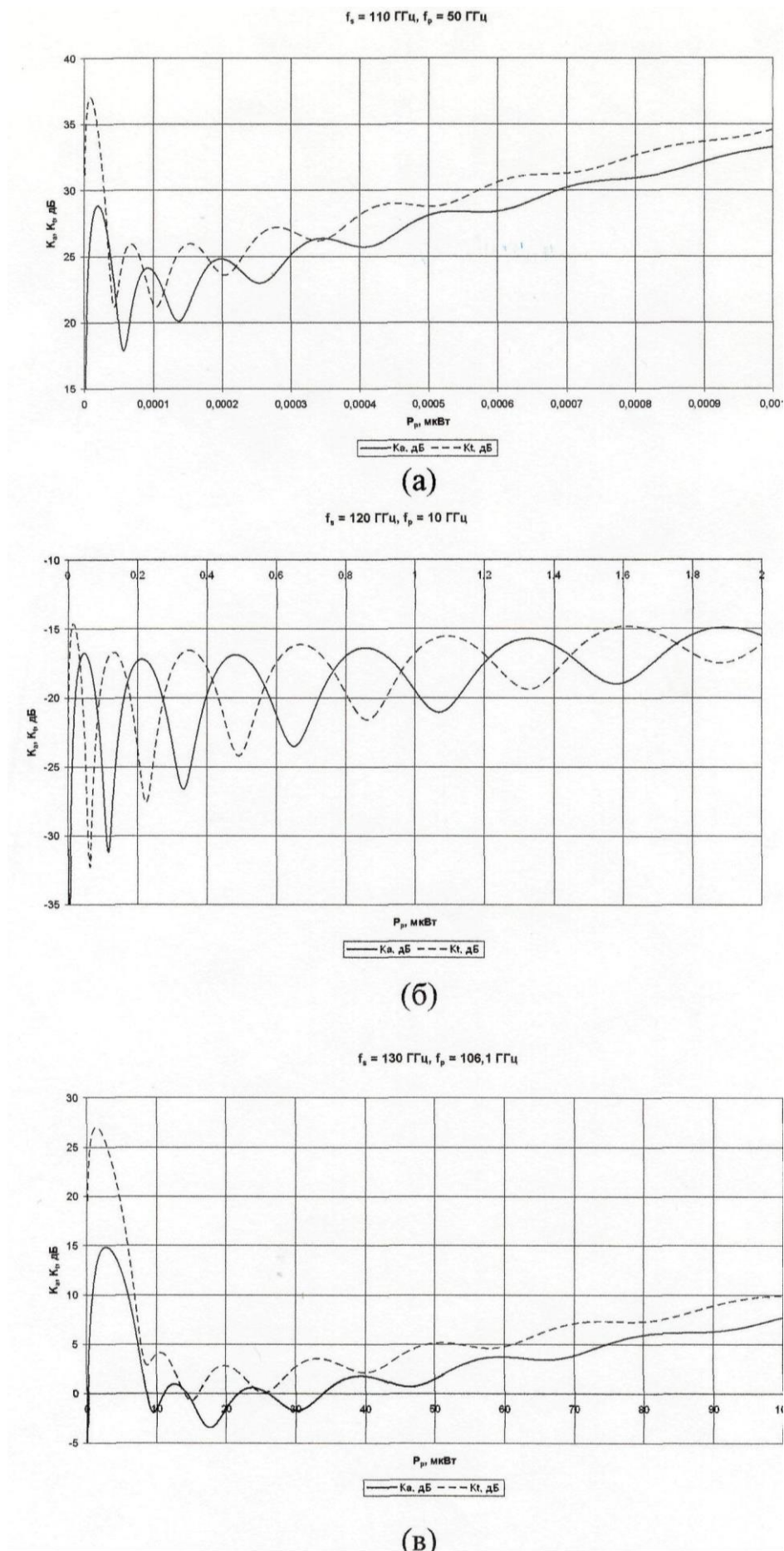
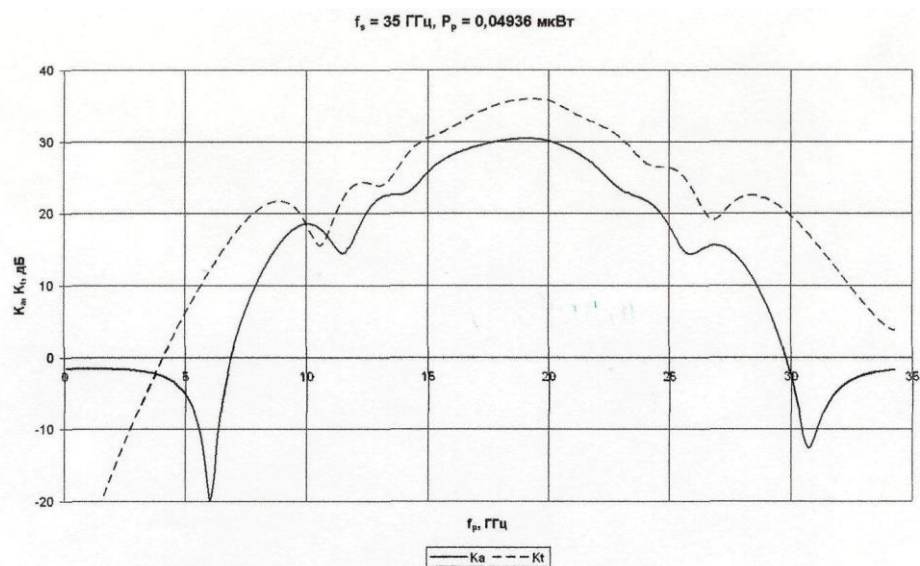


Рисунок 5 – Зависимости  $K_a$  и  $K_t$  от мощности накачки  $P_p$  для n-InP.

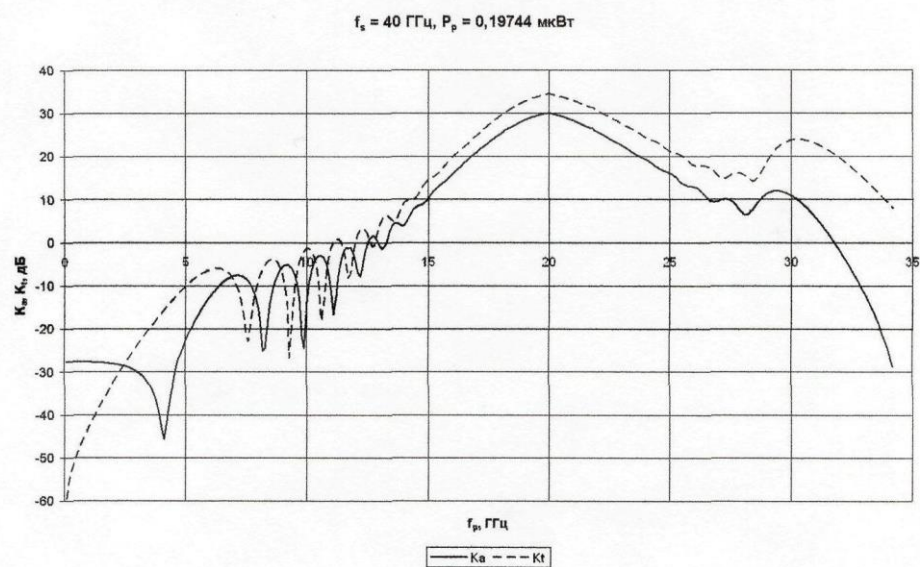
Наблюдается сходное поведение зависимостей  $K_a$  и  $K_t$  от  $z$ . Максимальная мощность накачки  $P_p$  для каждой частоты накачки определялась из условия  $P_p = \frac{P_{p0}}{e^{-\alpha_p z}}$ , где  $P_{p0} = 0,1$  мВт. На всех зависимостях наблюдается тенденция роста  $K_a$  и  $K_t$  с увеличением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

На рисунках 6 и 7 приведены зависимости коэффициентов  $K_a$  и  $K_t$  от частоты накачки  $f_p$  при  $f_s = 35$  ГГц,  $P_p = 0,04936$  мкВт (а),  $f_s = 40$  ГГц,  $P_p = 0,19744$  мкВт (б),  $f_s = 45$  ГГц,  $P_p = 0,09872$  мкВт (в) для n-GaAs и  $f_s = 110$  ГГц,  $P_p = 0,0256$  мкВт (а),  $f_s = 110$  ГГц,  $P_p = 0,0786$  мкВт (б),  $f_s = 100$  ГГц,  $P_p = 0,01024$  мкВт (в) для n-InP. Видно, что имеются довольно сильные колебания зависимостей: существуют участки, на которых небольшое изменение параметров накачки приводит к значительному изменению коэффициентов усиления и преобразования. Изменяя только мощность накачки при прочих равных параметрах, возможно, как усилить ВПЗ сигнальной и холостой частот, так ослабить их (рисунок 7). 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 (рисунок 7 (в)). Все зависимости имеют куполообразную форму. На частотных зависимостях  $K_a$  и  $K_t$  виден максимум при частоте накачки  $f_p \approx f_s/2$ .

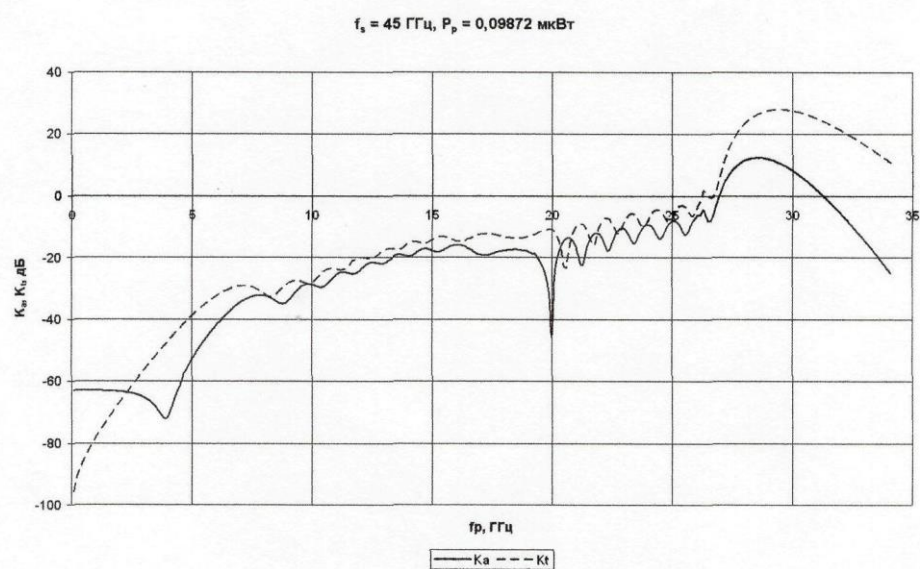
На зависимостях имеется большая изрезанность линий, связанная с накачкой. Проведенные исследования показали, что основное влияние на это оказывает произведение  $MC_{11}$ .



(а)



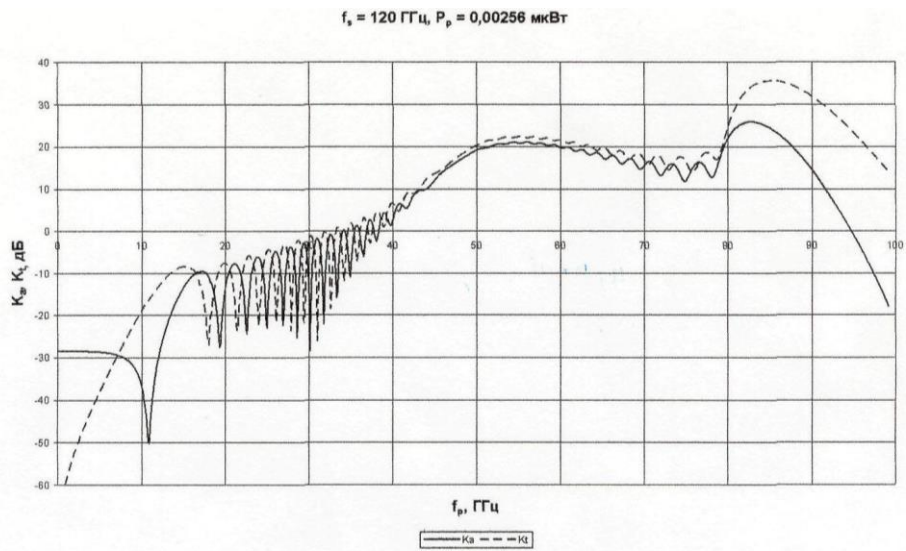
(б)



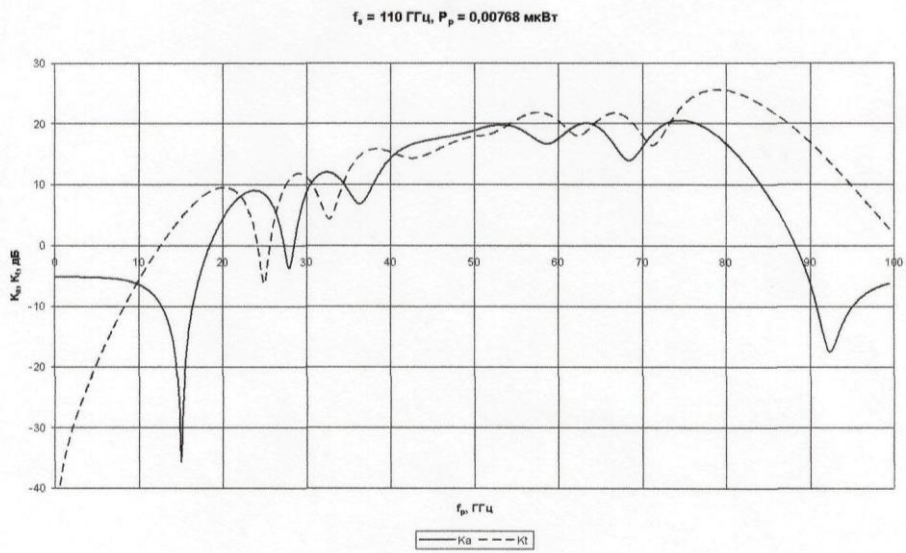
(в)

Рисунок 6 – Зависимости  $K_a$  и  $K_t$  от частоты накачки  $f_p$  n-GaAs.

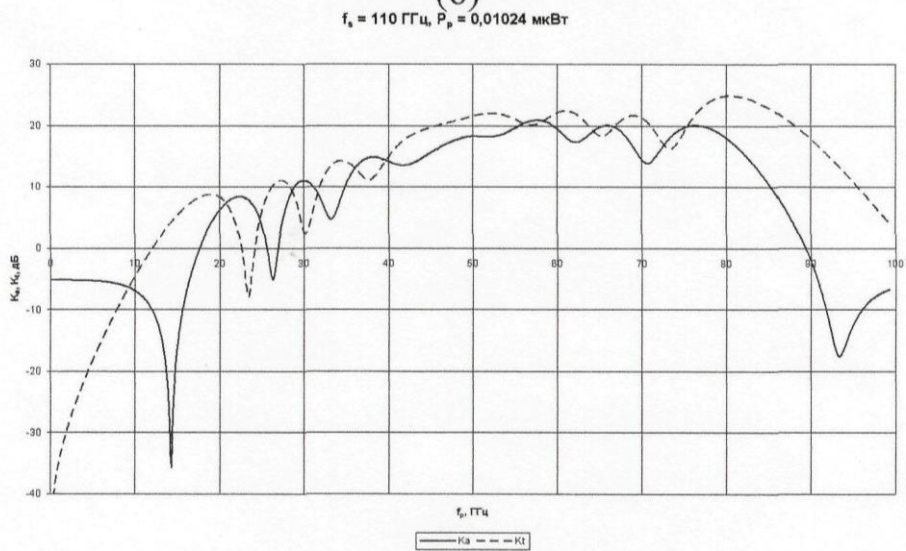




(а)



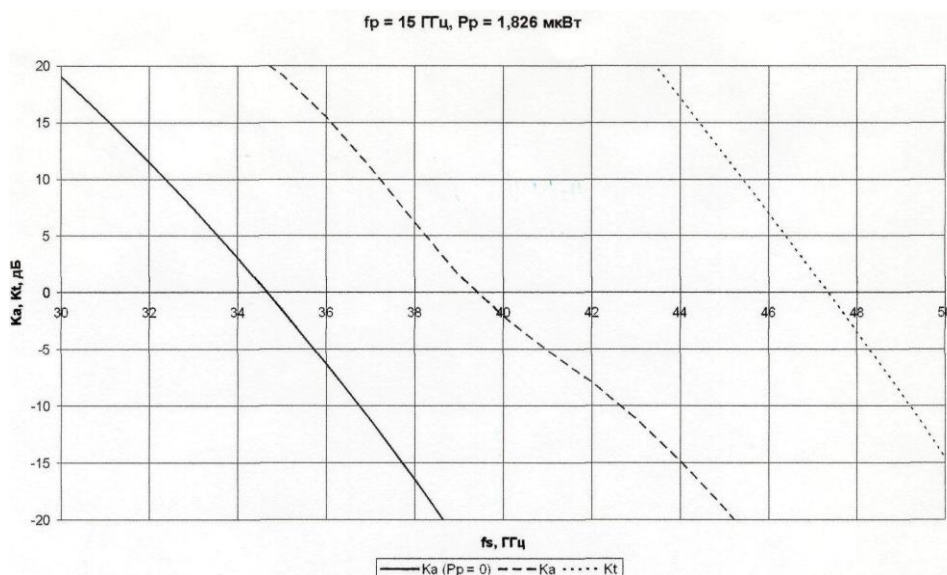
(б)



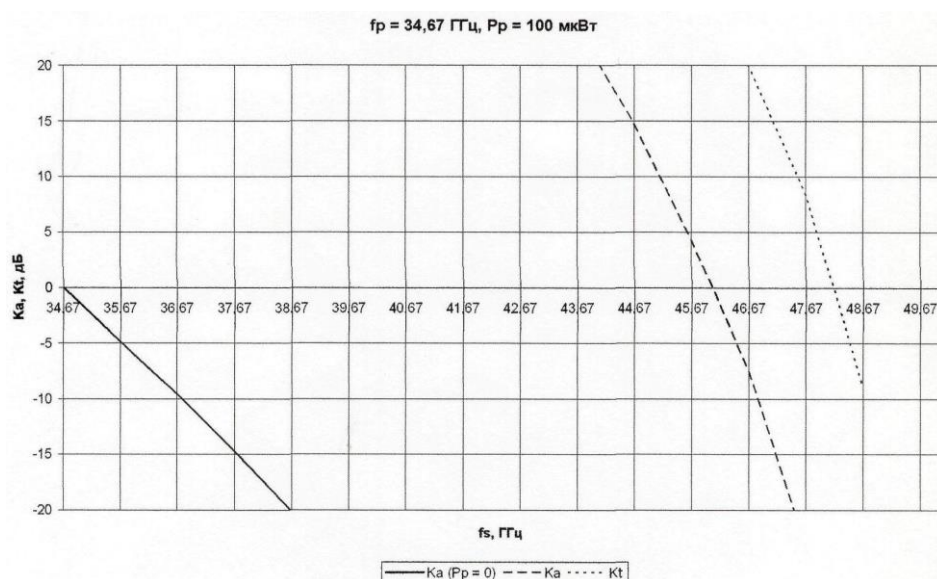
(в)

Рисунок 7 – Зависимости  $K_a$  и  $K_t$  от частоты накачки  $f_p$  p-InP.

На рисунках 8 и 9 показаны зависимости  $K_a$  и  $K_t$  от частоты сигнала  $f_s$  при  $f_p = 15$  ГГц,  $P_p = 1,826$  мкВт (а),  $f_p = 34,67$  ГГц,  $P_p = 1,826$  мкВт (б) для n-GaAs и  $f_p = 30$  ГГц,  $P_p = 0,219$  мкВт (а),  $f_p = 106,1$  ГГц,  $P_p = 1,826$  мкВт (б) для n-InP.



а)

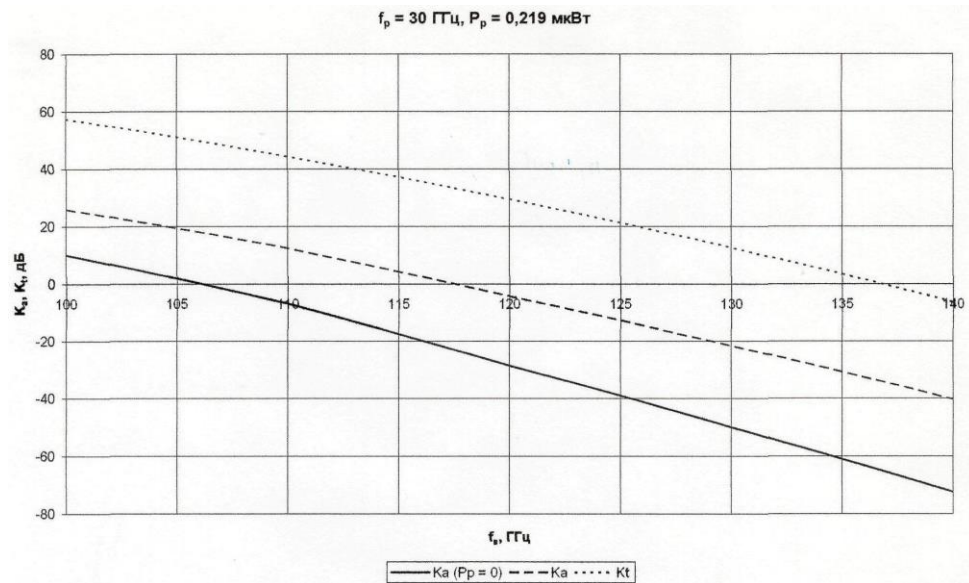


б)

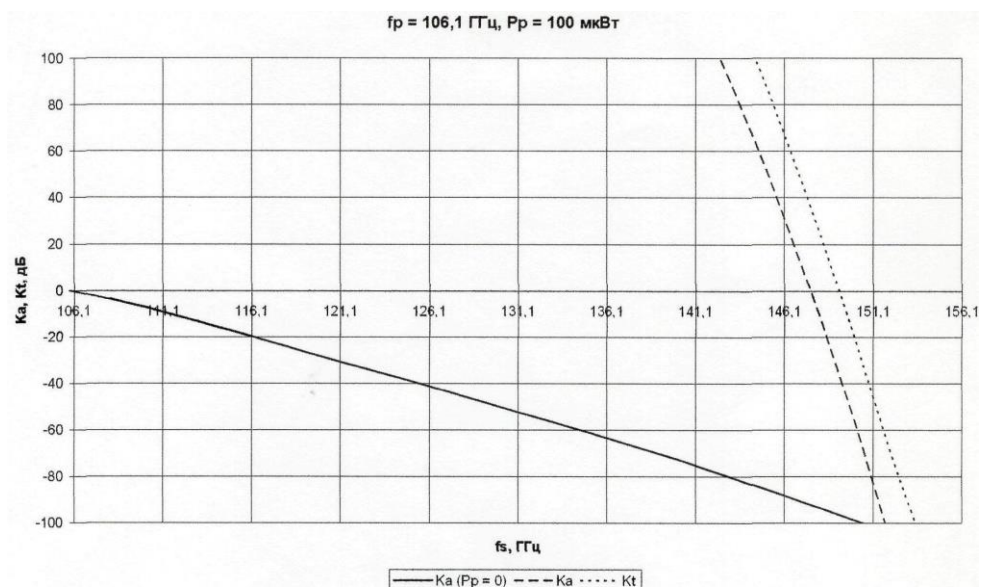
Рисунок 8 – Зависимости  $K_a$  и  $K_t$  от частоты сигнала  $f_s$  n-GaAs.

Видно, что подача низкочастотной накачки ( $f_p < f_s$ ) для ТПС с типичными электрофизическими параметрами приводит к заметному повышению (на 13,6 (а), 32,7 (б) и 10,7 (а), 39,1 % (б)) верхнего частотного предела усиливаемых ВПЗ. Также обеспечивается автодинное

преобразование при частоте входного сигнала до 39,4 (а), 46 (б) ГГц для n-GaAs и до 117,5 (а), 147,6 (б) ГГц для n-InP.



а)



б)

Рисунок 9 – Зависимости  $K_a$  и  $K_t$  от частоты сигнала  $f_s$  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 полученных результатов показывает, что:

1 Низкочастотная накачка приводит к заметному повышению верхнего частотного предела усилителей бегущей волны до 32,7 % для n-GaAs и до 39,1 % для n-InP;

2 Подача низкочастотной накачки обеспечивает автодинное преобразование до 46 ГГц для n-GaAs и до 147,6 ГГц для n-InP;

3 Параметры накачки могут быть подобраны таким образом, что можно добиться как усиления сигнальной волны, так и автодинного преобразования одновременно с полным гашением сигнала;

4 Проведенные исследования показали, что фосфид индия и нитрид галлия являются перспективными материалами для создания функциональных устройств на ВПЗ в полупроводниках с ОДП.

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.