

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

Кафедра физики полупроводников

**Перспективы применения полупроводниковых материалов групп  $A_3B_5$  и  $A_2B_6$   
в устройствах на волнах пространственного заряда**

**АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ**

студентки 2 курса 2252 группы

направления 11.04.01 «Электроника и наноэлектроника»

Института физики

Сергеевой Гузель Николаевны

Научный руководитель:

доцент, к.ф.-м.н., доцент  
должность, уч. степень, уч. звание

Зав. кафедрой физики

полупроводников:

д.ф.-м.н., профессор  
должность, уч. степень, уч. звание

\_\_\_\_\_  
подпись, дата

Сергеев С.А.  
фамилия, инициалы

\_\_\_\_\_  
подпись, дата

Михайлов А.И.  
фамилия, инициалы

Саратов 2021

## ВВЕДЕНИЕ

**Общая характеристика темы.** Одно из важных направлений в современной физике – исследование колебательных и волновых процессов в твердых телах. Большое внимание уделяется изучению волновых процессов в активных средах. Данное направление перспективно для создания новых и совершенствования известных устройств СВЧ диапазона. Устройства на волнах пространственного заряда (ВПЗ) в полупроводниках обладают широкими функциональными возможностями, которые аналогичны возможностям акустоэлектронных устройств, но более чем на порядок превосходят их по рабочим частотам. Базовым элементом функциональных устройств на ВПЗ в полупроводниках можно считать тонкопленочный усилитель бегущей волны, который конструктивно представляет собой тонкопленочную полупроводниковую структуру (ТПС) с отрицательной дифференциальной проводимостью (ОДП). Однако созданные к настоящему времени устройства такого типа имеют сравнительно низкий частотный предел работы ( $\sim 15$  ГГц). Одним из путей повышения верхнего частотного предела усиления бегущих ВПЗ является применение новых материалов вместо традиционного арсенида галлия.

К числу наиболее перспективных и интересных с практической точки зрения полупроводниковых материалов уже многие годы относятся полупроводники из групп  $A_3B_5$  и  $A_2B_6$ . Большинство известных теоретических и экспериментальных работ по распространению и взаимодействию волн пространственного заряда в ТПС с ОДП выполнены для структур на основе  $n-GaAs$ , относительно небольшое количество теоретических работ посвящено  $n-InP$ . Данные по оценке перспектив использования  $n-GaN$ ,  $n-InN$  и  $n-AlN$  для создания устройств на ВПЗ в литературе практически отсутствуют, анализ перспектив использования соединений  $A_2B_6$  в устройствах на ВПЗ не обнаружен. Таким образом, проведение исследований в данном направлении и изучение электрофизических свойств полупроводниковых соединений  $A_3B_5$  и  $A_2B_6$  актуально и имеет большое практическое значение.

В связи с этим **целью** данной работы является:

Теоретическое исследование особенностей распространения волн пространственного заряда в структурах на основе полупроводниковых соединений групп  $A_3B_5$  и  $A_2B_6$ .

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

1. Анализ, систематизация и обобщение научно-технической информации по теме исследований и изучение физико-химических свойств полупроводниковых соединений групп  $A_3B_5$  и  $A_2B_6$ .

2. Анализ перспектив применения полупроводниковых соединений групп  $A_3B_5$  и  $A_2B_6$  в устройствах на волнах пространственного заряда.

3. Рассмотрение особенностей влияния диффузии и частотной дисперсии дифференциальной подвижности электронов в пленках нитридов галлия, индия, алюминия ( $n-GaN$ ,  $n-InN$ ,  $n-AlN$ ) и фосфида индия ( $n-InP$ ) на характеристики распространения волн пространственного заряда.

Выпускная работа занимает 82 страницы, имеет 15 рисунков и 3 таблицы. Обзор составлен по 144 информационным источникам.

**Актуальность темы.** Полупроводниковые соединения групп  $A_3B_5$  и  $A_2B_6$  относятся к наиболее перспективным полупроводниковым материалам. Однако лишь небольшое число теоретических и экспериментальных работ по распространению и взаимодействию волн пространственного заряда в ТПС с ОДП выполнены для структур на основе  $n-GaN$  и  $n-InP$ , практически отсутствуют данные по оценке перспектив использования соединений  $n-GaN$ ,  $n-InN$ ,  $n-AlN$ ,  $InP$  для создания устройств на ВПЗ. Не обнаружены также данные по анализу перспектив использования полупроводниковых соединений группы  $A_2B_6$  в устройствах на ВПЗ. Следовательно, проведение исследований в данном направлении и изучение электрофизических свойств полупроводниковых соединений групп  $A_3B_5$  и  $A_2B_6$  представляется достаточно актуальным и имеет большое практическое значение.

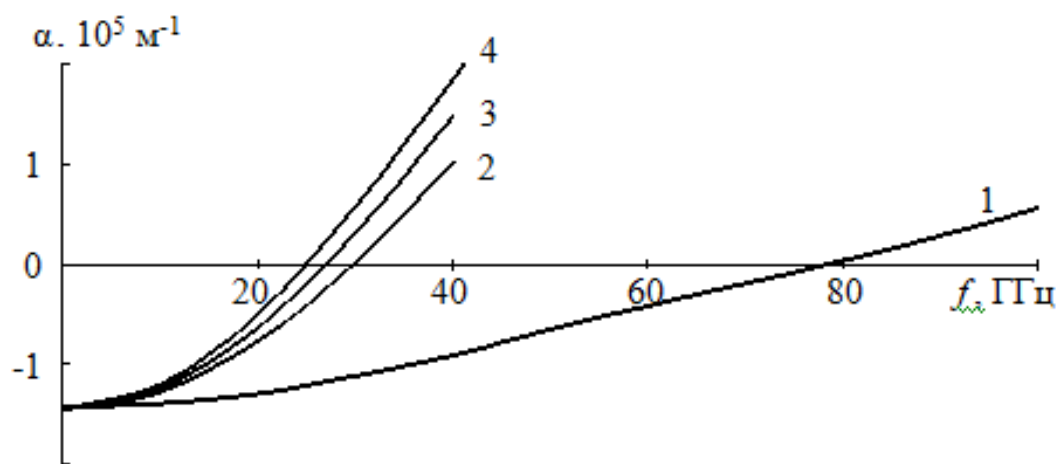
Анализ литературных данных позволил также обосновать выбор параметров и величин, характерных для *GaAs*, *InN*, *GaN*, *InP* и *AlN*, которые в дальнейшем будут использоваться в численных расчетах: для *n-GaAs*:  $\varepsilon = 12,5$ ; для  $E_0 = 5,5$  кВ/см,  $v_0 = 1,7 \cdot 10^7$  см/с,  $D = 200$  см<sup>2</sup>/с; для *n-InN*:  $\varepsilon = 14$ ; для  $E_0 = 90$  кВ/см,  $v_0 = 3 \cdot 10^7$  см/с,  $D = 50$  см<sup>2</sup>/с; для *n-GaN*:  $\varepsilon = 9,7$ ; для  $E_0 = 200$  кВ/см,  $v_0 = 2,8 \cdot 10^7$  см/с,  $D = 23$  см<sup>2</sup>/с; для *n-InP*:  $\varepsilon = 12,35$ ; 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-AlN*:  $\varepsilon = 8,5$ ; для  $E_0 = 750$  кВ/см,  $v_0 = 1,45 \cdot 10^7$  см/с,  $D = 5$  см<sup>2</sup>/с.

Проведен численный расчет зависимости действительной  $\alpha$  и мнимой  $\beta$  компонент постоянной распространения  $\gamma_1$  от частоты для *n-GaAs*, *n-InN*, *n-GaN*, *n-AlN* и *n-InP*.

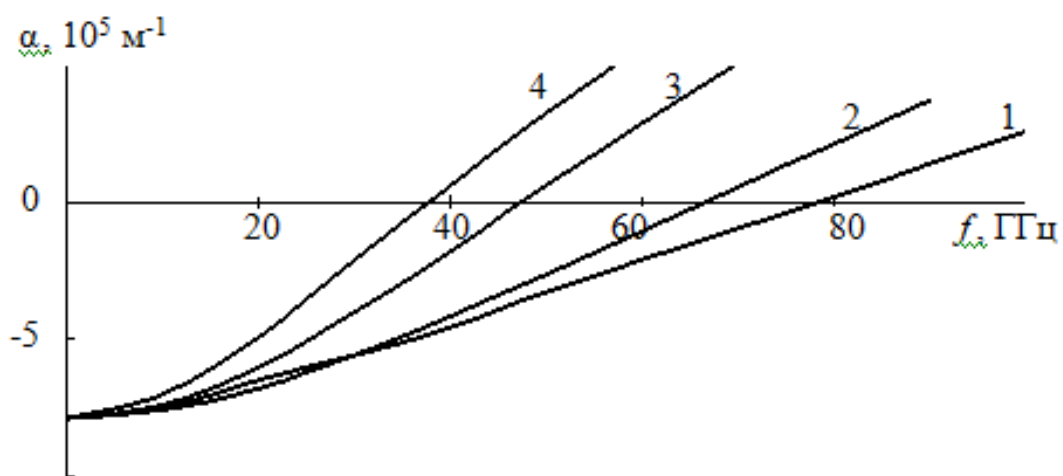
На рисунках 1 и 2 приведены зависимости действительной  $\alpha$  и мнимой  $\beta$  компонент постоянной распространения  $\gamma_1$  от частоты для *n-GaAs*.

Графики под буквой (а) построены для структуры с равновесной концентрацией электронов  $n_0 = 1 \cdot 10^{14}$  см<sup>-3</sup>, под буквой (б) для  $n_0 = 5 \cdot 10^{14}$  см<sup>-3</sup>, под буквой (в) для  $n_0 = 1 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup>. На рисунке 3 приведены зависимости действительной  $\alpha$  (а, б) и мнимой  $\beta$  (в) компонент постоянной распространения  $\gamma_1$  от частоты *n-InN*. График под буквой (а) построен для структуры с равновесной концентрацией электронов  $n_0 = 5 \cdot 10^{14}$  см<sup>-3</sup>, с буквой (б) для  $n_0 = 1 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup>. Кривые 1 получены с учетом только дисперсии действительной части дифференциальной подвижности электронов; 2 – с учетом только диффузии электронов; 3 – с учетом дисперсии действительной части дифференциальной подвижности электронов и диффузии электронов; 4 – с учетом дисперсии действительной и мнимой частей дифференциальной подвижности электронов и диффузии электронов. Без учета дисперсии дифференциальной подвижности и диффузии электронов зависимость  $\alpha$  от частоты представляет собой прямую, параллельную оси абсцисс (ВПЗ не затухает во всем исследуемом диапазоне).

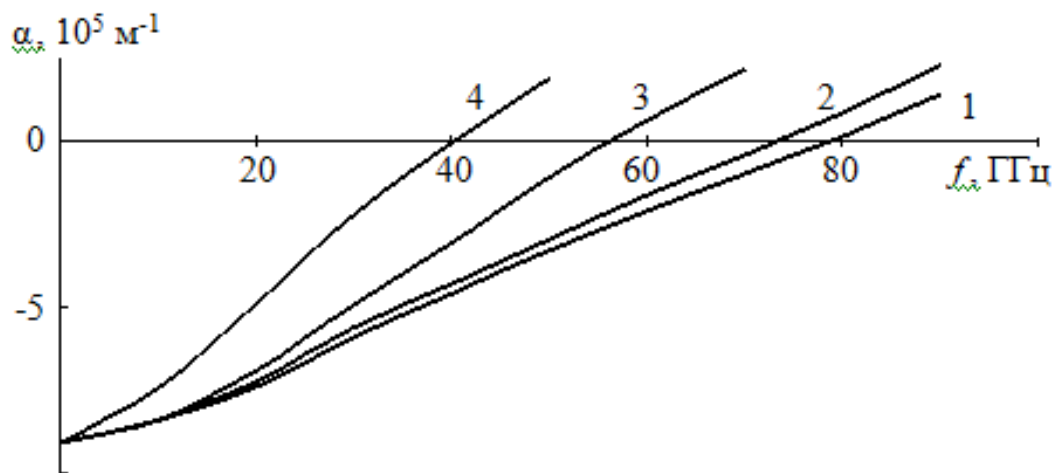
На рисунке 4 приведены частотные зависимости  $\alpha$  (а) и  $\beta$  (б) для *n-InP* для структуры с равновесной концентрацией электронов  $n_0 = 1 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup>.



а)

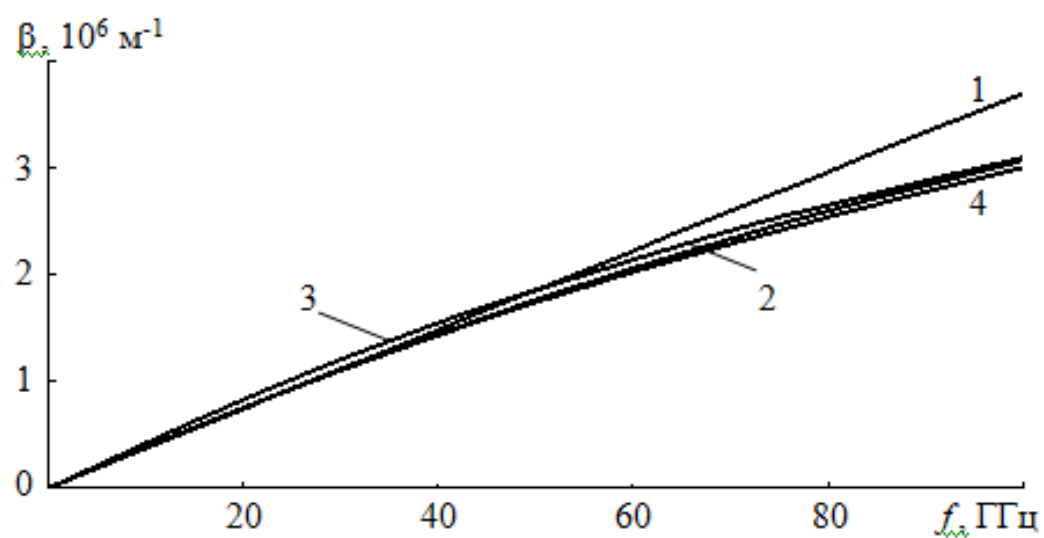


б)

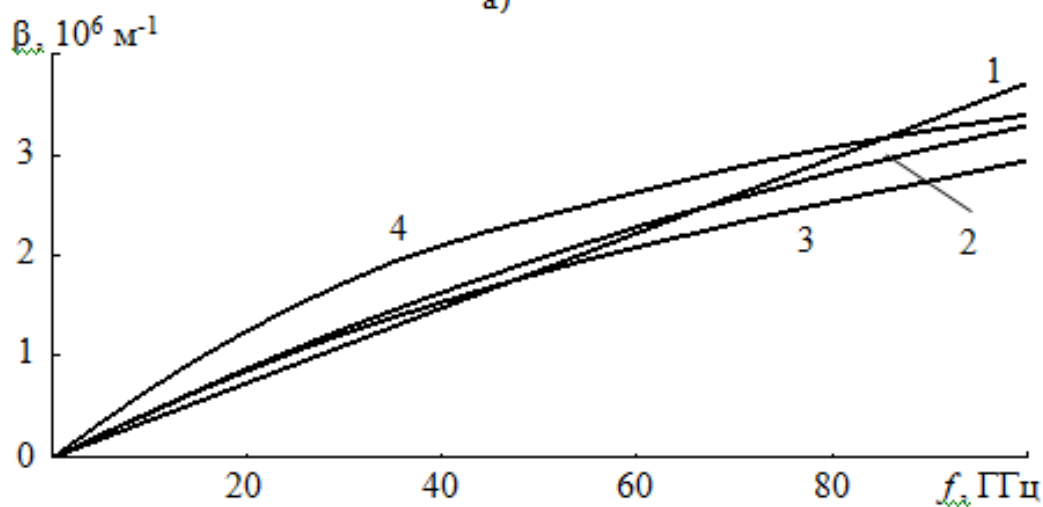


в)

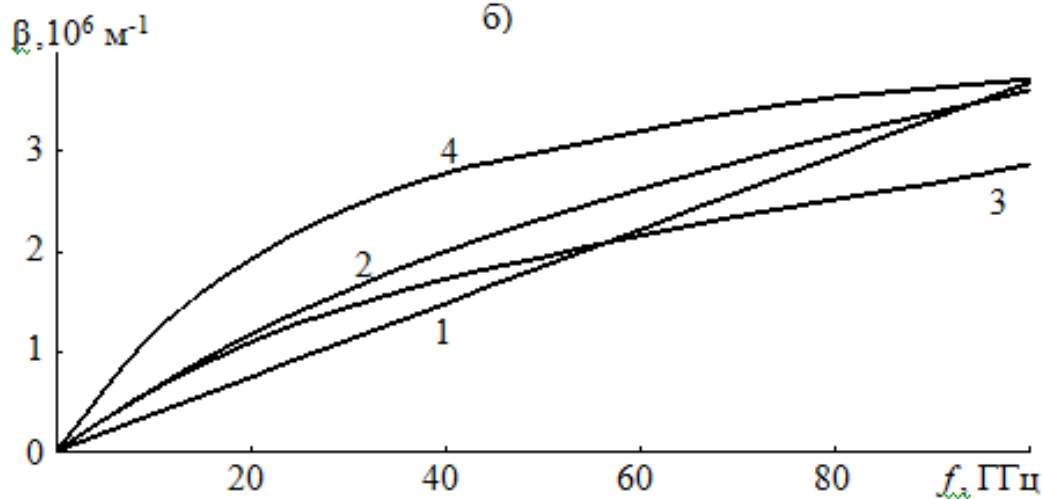
Рисунок 1 – Частотные зависимости действительной  $\alpha$  компоненты постоянной распространения  $\gamma_1$  для  $n$ -GaAs.



а)

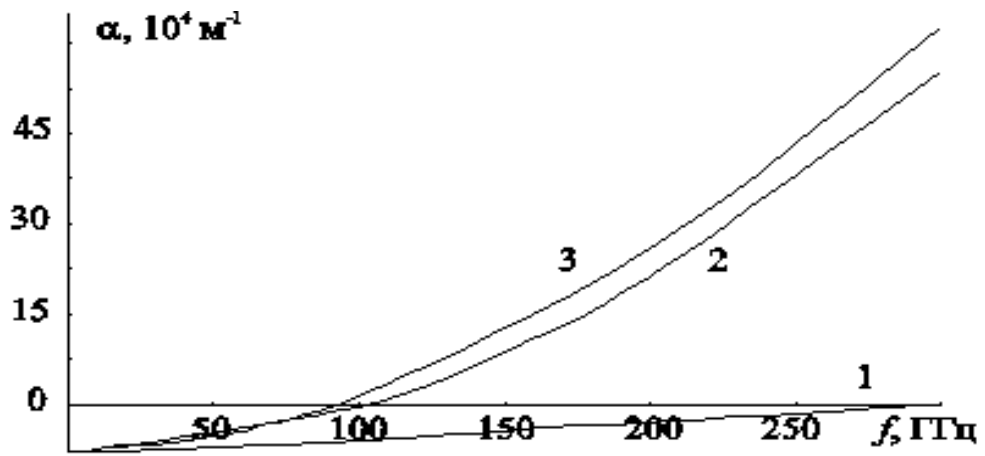


б)

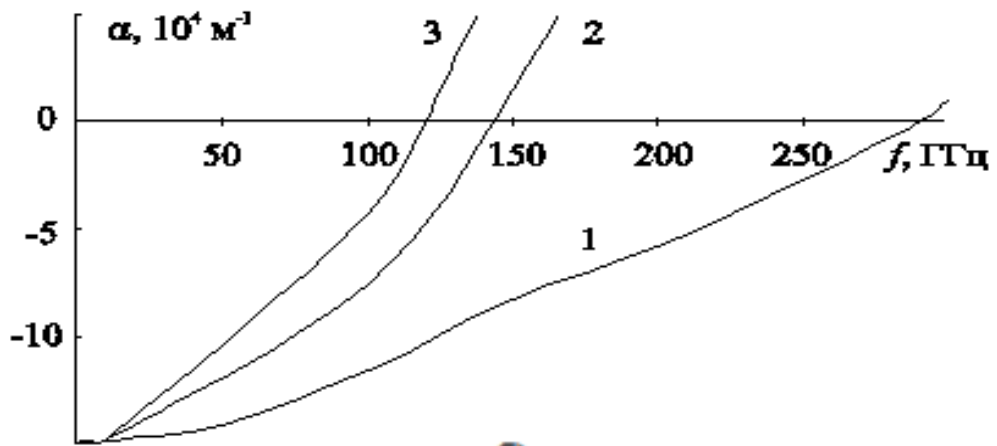


в)

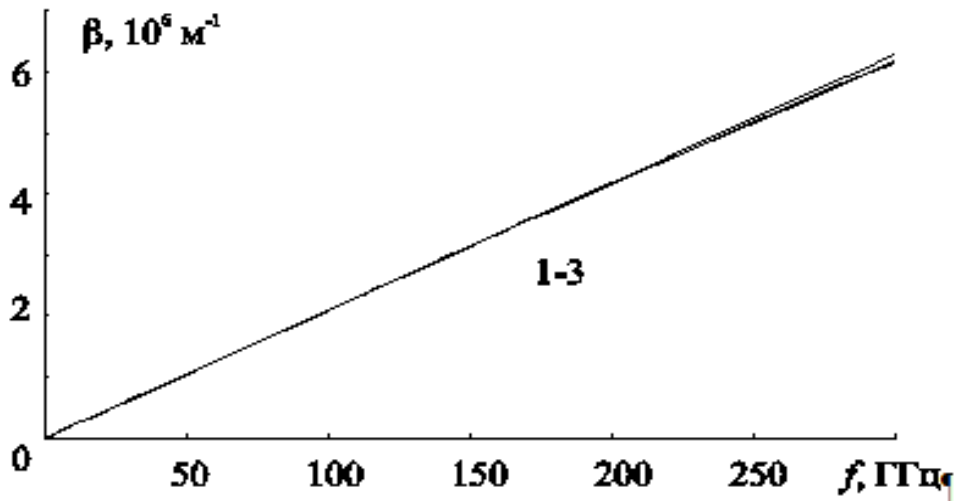
Рисунок 2 – Частотные зависимости действительной  $\beta$  компоненты постоянной распространения  $\gamma_1$  для  $n$ -GaAs.



а)



б)



в)

Рисунок 3 – Частотные зависимости действительной  $\alpha$  (а, б) и мнимой  $\beta$  (в) компоненты постоянной распространения  $\gamma_1$  для  $n\text{-InN}$ .

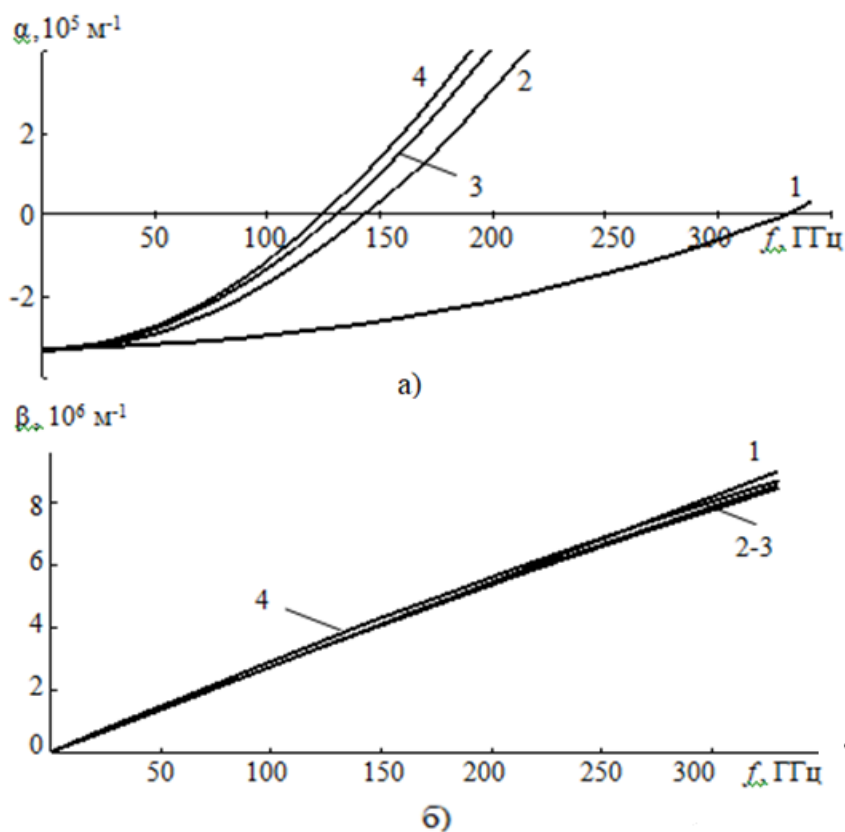


Рисунок 4 – Частотные зависимости действительной  $\alpha$  (а) и мнимой  $\beta$  (б) компонент постоянной распространения  $\gamma_1$  для  $n$ -InP.

На рисунке 5 приведены зависимости  $\alpha$  и  $\beta$  от частоты для  $GaN$ . Кривые 1 и 2 построены для  $n_0 = 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ; 3 и 4 – для  $n_0 = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , 5 и 6 – для  $n_0 = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , причем, кривые 1, 3 и 5 построены с учетом диффузии электронов и зависимости дисперсии действительной части дифференциальной подвижности электронов, а 2, 4 и 6 – без учета этой зависимости с учетом только диффузии электронов.

На рисунке 6 приведены частотные зависимости  $\alpha$  для  $n$ -AlN. Кривые построены с учетом диффузии электронов для следующих концентраций: 1 и 2 – для  $n_0 = 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , 3 и 5 – для  $n_0 = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , 4 и 6 – для  $n_0 = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . К сожалению, в литературных источниках не обнаружена зависимость реальной части дифференциальной подвижности электронов, что не позволило провести анализ ее влияния на характеристики распространения. Кривые 1, 3 и 4 построены для наихудших параметров ( $|\mu_d|_{\max} = 19 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ ,  $D = 3,3 \text{ см}^2/\text{с}$ ,  $v_0 = 1,1 \text{ см}/\text{с}$  для  $E_0 =$



$6 \cdot 10^7$  В/см) при расчете постоянной распространения, кривые 2,5 и 6 – для лучших параметров ( $|\mu_d|_{\max} = 5,4$  см<sup>2</sup>/В·с,  $D = 7$  см<sup>2</sup>/с,  $v_0 = 1,45$  см/с для  $E_0 = 6 \cdot 10^7$  В/см).

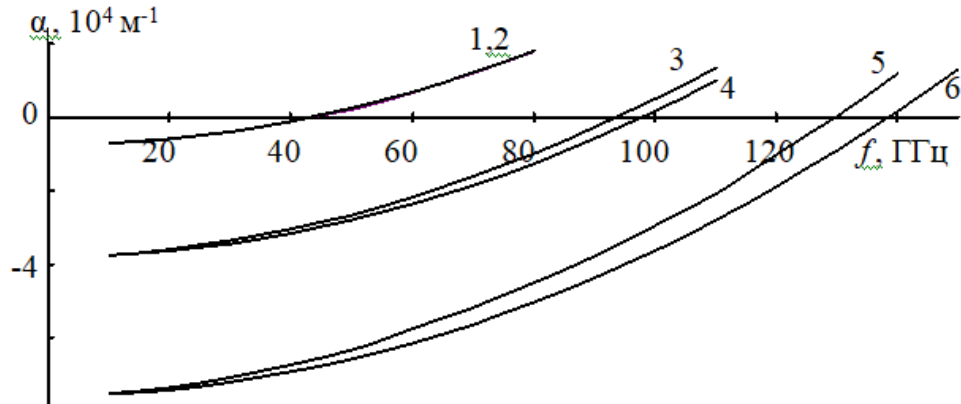


Рисунок 5 – Частотные зависимости действительной  $\alpha$  компоненты постоянной распространения  $\gamma_1$  для  $n$ -GaN.

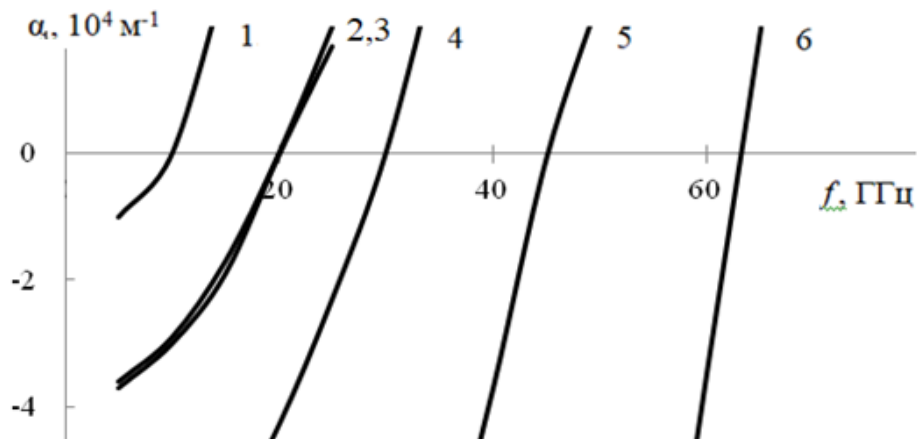


Рисунок 6 – Частотные зависимости действительной  $\alpha$  компоненты постоянной распространения  $\gamma_1$  для  $n$ -AlN.

Из приведенных зависимостей видно, что учет дисперсии действительной части дифференциальной подвижности электронов приводит к ограничению области усиления ВПЗ для  $n$ -GaAs до 80 ГГц, для GaN до 140 ГГц и для InN до 290 ГГц. Учет диффузии также приводит к ограничению области усиливаемых ВПЗ, причем, видно, что с ростом концентрации  $n_0$  растет и граничная частота  $f_c$  (с 30 ГГц при  $n_0 = 1 \cdot 10^{14}$  см<sup>-3</sup> до 73 ГГц при  $n_0 = 1 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup> для  $n$ -GaAs; с 42 ГГц при  $n_0 = 1 \cdot 10^{14}$  см<sup>-3</sup> до 130 ГГц при  $n_0 = 1 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup> для GaN; с 46 ГГц при  $n_0 = 1 \cdot 10^{14}$  см<sup>-3</sup> до

120 ГГц при  $n_0 = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  для  $n\text{-InN}$ ).

Граничная частота  $f_c$  для  $GaN$  (42 ГГц при  $n_0 = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  и 130 ГГц при  $n_0 = 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ) выше, чем у  $GaAs$ , для  $InN$  (46 ГГц при  $n_0 = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  и 120 ГГц при  $n_0 = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ) выше, чем у  $GaN$ . Учет дисперсии действительной части дифференциальной подвижности электронов приводит к снижению  $f_c$  у  $n\text{-GaN}$  (от 0,7 % при  $n_0 = 10^{14} \text{ см}^{-3}$  до 6,9 % при  $n_0 = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ) и у  $n\text{-InN}$  (от 2,2 % при  $n_0 = 10^{14} \text{ см}^{-3}$  до 16,1 % при  $n_0 = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ).

Фазовая скорость ВПЗ  $GaAs$  может заметно отличаться от дрейфовой скорости электронов (рисунок 1). При этом на частотах ниже некоторой частоты  $f = f_c$  фазовая скорость ВПЗ  $v_{ph}$  меньше, чем дрейфовая скорость электронов  $v_0$ , а для частот  $f > f_c$  фазовая скорость становится больше  $v_0$ . Частота, при которой  $v_{ph} = v_0$ , есть не что иное, как граничная частота усиливаемых ВПЗ. 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  $v_0$  увеличивается с ростом концентрации электронов  $n_0$  и, в частности, для частот, меньших  $f_c$ , может достигать 30÷40 % для  $GaAs$ .

Диффузия в  $GaN$  и  $InN$  не оказывает влияния на мнимую компоненту постоянной распространения  $\beta$ , т.е. фазовая скорость ВПЗ в этих соединениях может считаться приближенно равной дрейфовой скорости электронов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения выпускной работы был впервые проведен комплексный анализ литературных данных по вопросу перспективности применения полупроводниковых соединений групп  $A_3B_5$  и  $A_2B_6$  в устройствах на ВПЗ, изучены свойства данных соединений, рассмотрены особенности влияния диффузии и частотной дисперсии дифференциальной подвижности электронов в пленках  $n-GaN$ ,  $n-InN$ ,  $n-AlN$  и  $n-InP$  на характеристики распространения ВПЗ.

Проведенный сравнительный анализ основных свойств  $GaAs$ ,  $InN$ ,  $GaN$ ,  $AlN$  и  $InP$  показал, что по таким параметрам как коэффициент диффузии, дрейфовая скорость насыщения электронов и диэлектрическая проницаемость  $GaN$  и  $InN$  имеют очевидное превосходство над  $InP$  и  $AlN$ , которые в свою очередь превосходит аналогичные параметры  $GaAs$ . Теплопроводность у  $GaN$  и  $AlN$  выше, чем у остальных соединений, поле пробоя нитридов выше почти на порядок, что, несомненно, является достоинством при разработке мощных приборов. Таким образом,  $InN$ ,  $GaN$  и  $InP$  – перспективные материалы для применения в устройствах на ВПЗ в полупроводниках. Обзор литературных данных позволил обосновать выбор параметров и величин, характерных для  $GaAs$ ,  $InN$ ,  $GaN$ ,  $AlN$  и  $InP$  для использования в численных расчетах.

При расчете характеристик распространения ВПЗ кроме учета диффузии необходим учет дисперсии действительной части дифференциальной подвижности электронов, который приводит к их существенному изменению (снижению  $f_c$  для  $n-GaAs$ : от 10 % при  $n_0 = 10^{14} \text{ см}^{-3}$  до 23,3 % при  $n_0 = 4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ; для  $n-InN$ : от 2,2 % при  $n_0 = 10^{14} \text{ см}^{-3}$  до 16,1 % при  $n_0 = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ; для  $n-GaN$  от 0,7 % при  $n_0 = 10^{14} \text{ см}^{-3}$  до 6,9 % при  $n_0 = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ; для  $n-InP$ : от 1,5 % при  $n_0 = 10^{14} \text{ см}^{-3}$  до 9 % при  $n_0 = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ). Учет дисперсии мнимой части дифференциальной подвижности электронов также приводит к изменению характеристик распространения ВПЗ, но это изменение не такое значительное, как в случае с

действительной частью дифференциальной подвижности, а учет мнимой компоненты приводит к усложнению модели и увеличению времени численных расчетов, поэтому дальнейшие исследования проводились без учета мнимой компоненты дифференциальной подвижности электронов.

Для *InP* различие между фазовой и дрейфовой скоростями не такое существенное, как для *GaAs*, и составляет  $6 \div 10$  %. Диффузия в *GaN*, *InN* и *AlN* не оказывает существенного влияния на мнимую компоненту постоянной распространения, как в случае *GaAs*, то есть, фазовая скорость ВПЗ в этих соединениях может считаться приближенно равной дрейфовой скорости электронов. Полученные результаты необходимо учитывать при определении геометрических размеров элементов связи, служащих для преобразования электромагнитных сигналов в ВПЗ и обратно.

Имеющихся на данный момент сведений об отрицательной дифференциальной проводимости полупроводников группы  $A_2B_6$  в литературных источниках не найдено, что затрудняет анализ возможности применения данных материалов в устройствах на волнах пространственного заряда.