

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

Кафедра физики полупроводников

**Исследование свойств полупроводниковых материалов групп  $A_3B_5$  и  $A_2B_6$   
и оценка перспектив их применения в устройствах на волнах  
пространственного заряда**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студентки 2 курса 2294 группы

направления 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов»

Института физики

Сергеевой Бэлы Владимировны

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* и *n-InN* 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  $n-GaN$  и  $n-InN$  на характеристики распространения волн пространственного заряда.

Выпускная работа занимает 79 страниц, имеет 12 рисунков и 3 таблицы. Обзор составлен по 159 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  $n-InN$ , практически отсутствуют данные по оценке перспектив использования данных соединений 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.

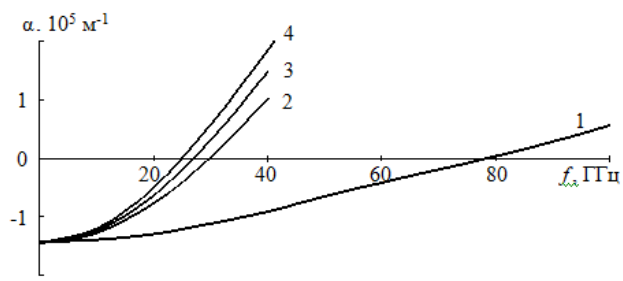
Анализ литературных данных позволил также обосновать выбор параметров и величин, характерных для *GaAs*, *InN* и *GaN*, которые в дальнейшем будут использоваться в численных расчетах: для *n-GaAs*:  $\varepsilon = 12,5$ ; для  $E_0 = 5,5$  кВ/см,  $v_0 = 1,7 \cdot 10^7$  см/с,  $D = 200$  см<sup>2</sup>/с;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

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

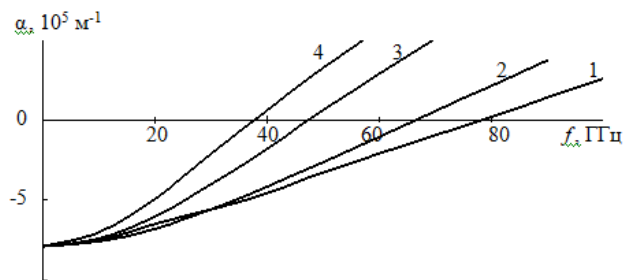
На рисунках 1 и 2 приведены зависимости действительной  $\alpha$  и мнимой  $\beta$  компонент постоянной распространения  $\gamma_1$  от частоты для *n-GaAs*.

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).

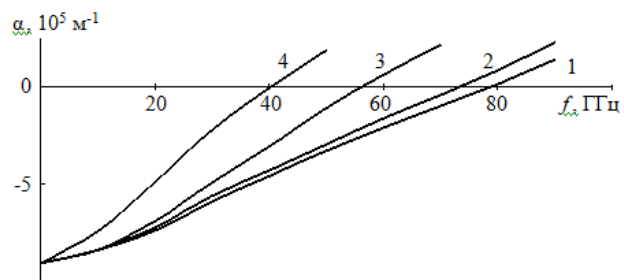
На рисунке 4 приведены зависимости  $\alpha$  и  $\beta$  от частоты для *GaN*. Кривые 1 и 2 построены для  $n_0 = 10^{14}$  см<sup>-3</sup>; 3 и 4 – для  $n_0 = 5 \cdot 10^{14}$  см<sup>-3</sup>, 5 и 6 – для  $n_0 = 10^{15}$  см<sup>-3</sup>, причем, кривые 1, 3 и 5 построены с учетом диффузии электронов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



а)

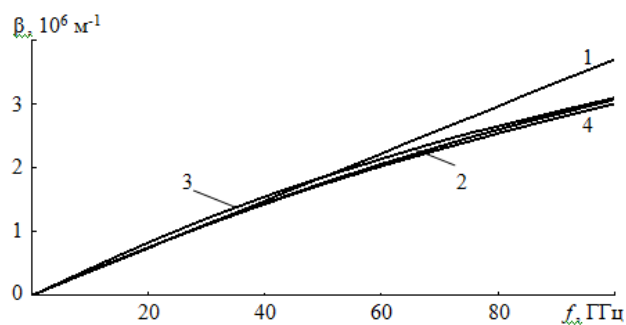


б)

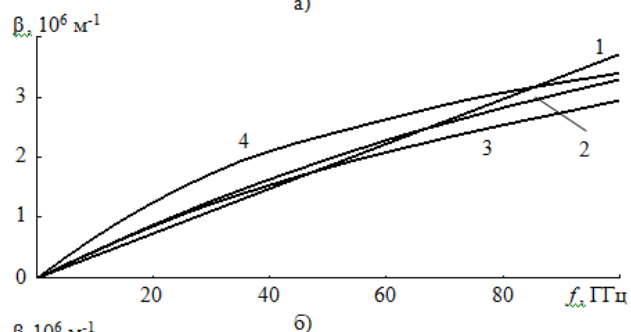


в)

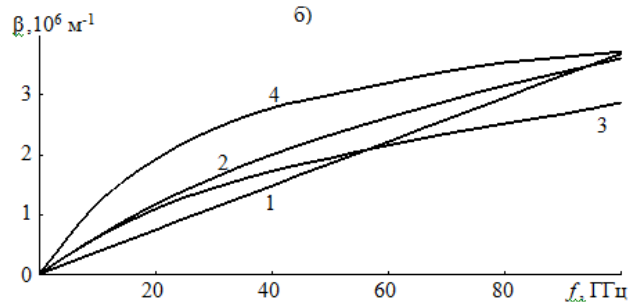
Рисунок 1 – Частотные зависимости действительной  $\alpha$  компоненты постоянной распространения  $\gamma_1$  для  $n$ -GaAs



а)



б)



в)

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

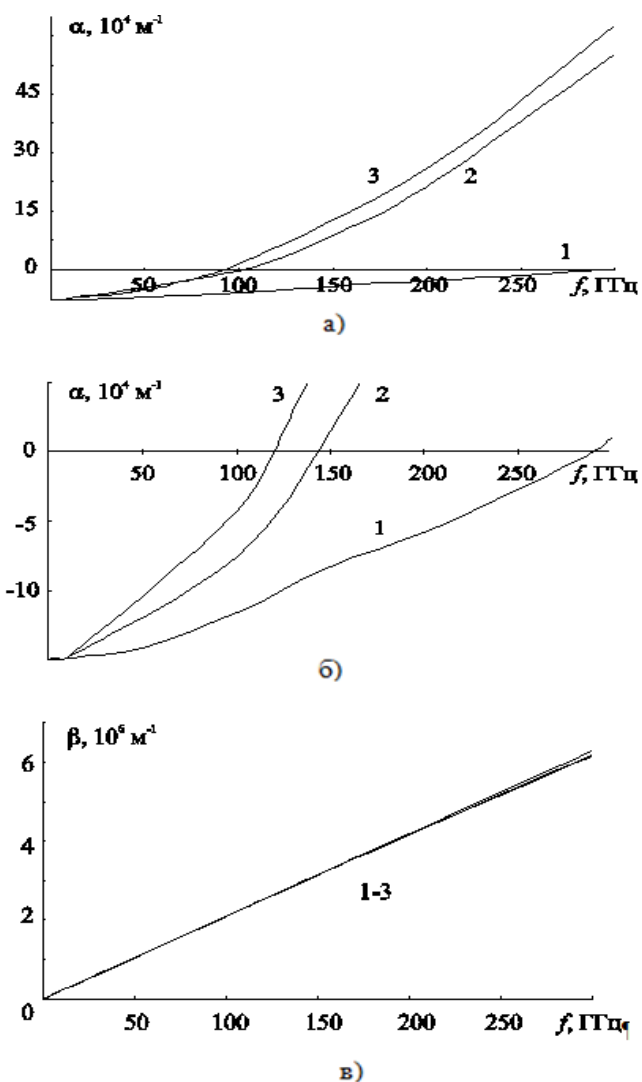


Рисунок 3 – Частотные зависимости действительной  $\alpha$  (а, б) и мнимой  $\beta$  (в) компоненты постоянной распространения  $\gamma_1$  для  $n\text{-InN}$

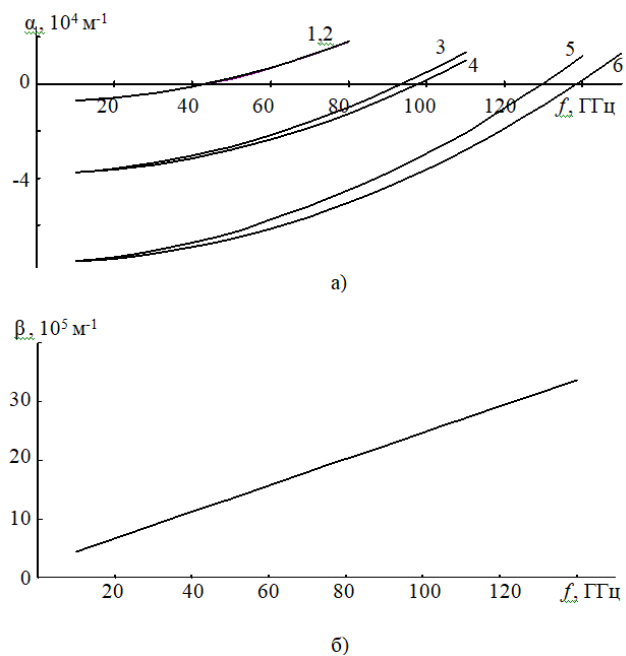


Рисунок 4 – Частотные зависимости действительной  $\alpha$  (а) и мнимой  $\beta$  (б) компоненты постоянной распространения  $\gamma_1$  для  $n\text{-GaN}$

Из приведенных зависимостей видно, что учет дисперсии действительной части дифференциальной подвижности электронов приводит к ограничению области усиления ВПЗ для  $n\text{-GaAs}$  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  $n_0 = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  до 73 ГГц при  $n_0 = 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  для  $n\text{-GaAs}$ ; с 42 ГГц при  $n_0 = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  до 130 ГГц при  $n_0 = 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  для  $\text{GaN}$ ; с 46 ГГц при  $n_0 = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  до 120 ГГц при  $n_0 = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  для  $n\text{-InN}$ ).

Граничная частота  $f_c$  для  $\text{GaN}$  (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  $\text{GaAs}$ , для  $\text{InN}$  (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  $\text{GaN}$ . 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  $\text{GaAs}$  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  $f_c$ , 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  $\text{GaAs}$ .

Диффузия в  $\text{GaN}$  и  $\text{InN}$  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  $n-GaN$  и  $n-InN$  на характеристики распространения ВПЗ.

Сравнительный анализ основных свойств  $GaAs$ ,  $InN$  и  $GaN$  показал, что  $InN$  и  $GaN$  – перспективные материалы для использования их в устройствах на ВПЗ в полупроводниках. Проведенный обзор литературных данных позволил также обосновать выбор параметров и величин, характерных для  $GaAs$ ,  $InN$  и  $GaN$ , которые были использованы в численных расчетах данной работы.

При расчете характеристик распространения ВПЗ кроме учета диффузии необходим учет дисперсии действительной части дифференциальной подвижности электронов. 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 усложняет модель и увеличивает время численных расчетов.

Диффузия в  $GaN$  и  $InN$  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.

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.

В настоящее время проводятся исследования в рамках научного проекта РФФИ № 20-07-00603 А «Исследование процессов возбуждения, распространения и параметрического взаимодействия волн пространственного заряда в микро- и наноразмерных структурах на основе многодолинных полупроводников для элементов функциональной микроэлектроники в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн». Результаты проведенных исследований по данной тематике опубликованы в следующих работах:

1. *Сергеев С.А., Михайлов А.И., Сергеева Б.В.* Перспективы нитрида галлия для устройств на волнах пространственного заряда // Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы: Труды. конф. – Ульяновск: УлГУ, 2009. – С. 26.

2. *Сергеев С.А., Михайлов А.И., Сергеева Б.В.* Граничная частота усиления волн пространственного заряда тонкопленочных устройств на основе n-InP // Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы: Труды XI Международ. конф. – Ульяновск: УлГУ, 2009. – С. 256.

3. *Сергеев С.А., Михайлов А.И., Сергеева Б.В.* Влияние концентрации электронов в пленке фосфида индия и нитрида галлия на граничную частоту усиления волн пространственного заряда в тонкопленочных полупроводниковых структурах // Физика и технические приложения волновых процессов: материалы докл. конф. – СПб.: Политехника, 2009. – С. 127-128.

4. *Сергеев С.А., Михайлов А.И., Сергеева Б.В.* Фазовая скорость волн пространственного заряда в полупроводниковых структурах на основе n-InP // Физика и технические приложения волновых процессов: материалы докл. Международ. науч.- технич. конф. – СПб.: Политехника, 2009. – С. 132-133.

5. Численное моделирование распространения волн пространственного заряда в длинных высокоомных структурах арсенида галлия / С.А. Сергеев, А.И. Михайлов, А.В. Митин, Б.В. Сергеева и др. // Физика и технические приложения

волновых процессов: материалы докл. конф. – СПб.: Политехника, 2009. – С. 133.

6. Параметрическое взаимодействие волн пространственного заряда в тонкопленочных полупроводниковых структурах нитрида галлия / *С.А. Сергеев, А.И. Михайлов, Д.Н. Браташов, Б.В. Сергеева* // Актуальные проблемы современной науки и образования: Мат. конф. – Уфа: РИЦ БашГУ, 2010. – С. 121.

7. *Сергеев С.А., Михайлов А.И., Сергеева Б.В.* Эффективность спектрального преобразования при параметрическом взаимодействии волн пространственного заряда в полупроводниках с отрицательной дифференциальной проводимостью // В мире научных открытий. – 2010. – № 4, Часть 6. – С. 49-52.

8. *Сергеев С.А., Михайлов А.И., Сергеева Б.В.* Особенности спектрального преобразования при параметрическом взаимодействии волн пространственного заряда в тонкопленочных структурах на основе n-GaAs, n-InP, n-GaN // Физика и технические приложения волновых процессов: материалы конф. – Челябинск: Изд. Челяб. гос. ун-та, 2010. – С. 87.

9. *Сергеев С.А., Михайлов А.И., Сергеева Б.В.* Возбуждение волн пространственного заряда в тонкопленочных структурах на основе n-GaAs, n-InP, n-GaN полосковым барьером Шоттки / Физика и технические приложения волновых процессов: мат. конф. – Челябинск: Изд. Челяб. гос. ун-та, 2010. – С. 86.

10. *Сергеев С.А., Михайлов А.И., Сергеева Б.В.* Возможности использования тонкопленочных структур на основе соединений  $A_3B_5$  в устройствах на волнах пространственного заряда / Научное творчество XXI века: материалы Всеросс. конф. – Красноярск, 2011. – Вып. 2. – С. 125-127.

11. *Сергеев С.А., Михайлов А.И., Сергеева Б.В.* Сравнительный анализ свойств полупроводниковых материалов для функциональных устройств на волнах пространственного заряда / Физика и технические приложения волновых процессов: материалы конф. – Самара: ООО «Книга», 2011. – С. 130-131.

12. Влияние диффузии и дисперсии дифференциальной подвижности электронов на постоянную распространения волн пространственного заряда в n-

InN / *С.А. Сергеев, А.И. Михайлов, О.С. Сенатов, Б.В. Сергеева* // Физика и технические приложения волновых процессов: труды Междунар. конф. – Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2012. – С. 184-187.

13. Влияние диффузии и дисперсии дифференциальной подвижности электронов на характеристики распространения волн пространственного заряда в структурах на основе n-InN / *С.А. Сергеев, А.И. Михайлов, О.С. Сенатов, Б.В. Сергеева* // Электроника и микроэлектроника СВЧ. II Всеросс. науч.-техн. конф: Сборник трудов. – СПб: СПбГЭТУ, 2013.

14. *Сергеев С.А., Михайлов А.И., Сергеева Б.В.* Перспективные материалы для функциональных устройств на волнах пространственного заряда // Полупроводниковая электроника и молекулярные нанотехнологии: Сб. ст. / Под общ. ред. проф. А.И. Михайлова. – Саратов: Наука, 2013. – С. 154-170.

15. Фазовая скорость волн пространственного заряда в полупроводниковых структурах на основе нитридов индия, галлия и алюминия / *С.А. Сергеев, А.И. Михайлов, О.С. Сенатов, Б.В. Сергеева* // Ученые Записки Физического Факультета МГУ. – 2014. – № 2. – 142302 (5 с.).

16. *Сергеев С.А., Михайлов А.И., Сергеева Б.В.* Перспективы применения нитридов галлия, индия и алюминия для функциональных устройств на волнах пространственного заряда // Ученые Записки Физического Факультета МГУ. – 2014. – № 2. – С. 7-11 (142301) (6 с.)

17. Фазовая скорость волн пространственного заряда в полупроводниковых структурах на основе нитридов индия, галлия и алюминия / *С.А. Сергеев, А.И. Михайлов, О.С. Сенатов, Б.В. Сергеева* // Нитриды галлия, индия и алюминия: структуры и приборы: 9-я Всеросс. конф. – М.: Изд-во МГУ, 2013. – С. 239-240.

18. *Сергеев С.А., Сенатов О.С., Сергеева Б.В.* Граничная частота усиления волн пространственного заряда в тонкопленочных полупроводниковых структурах на основе нитрида индия // Нитриды галлия, индия и алюминия: структуры и

приборы: 10-я Всеросс. конф. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2015. – С. 43-44.

19. *Sergeev S., Senatov O., Sergeeva B.* Indium phosphide as perspective material for functional microwave microelectronics // Наночастицы, наноструктурированные покрытия и микроконтейнеры: технология, свойства и области применения: Матер. конф. – Саратов: СГУ, 2015. – С. 74.

20. *Сергеев С.А., Сенатов О.С., Сергеева Б.В.* Граничная частота усиления волн пространственного заряда в тонкопленочных полупроводниковых структурах на основе нитрида индия // Ученые Записки Физического Факультета Московского Университета. – 2015. – № 5. – С. 1-5. (15502).

21. *Sergeev S.A., Senatov O.S., Sergeeva B.V.* Boundary Frequency of Space-Charge Waves Amplification in thin Film Semiconductor Structures of n-InN //«Presenting Academic Achievements to the World». Natural Science: Papers from the VI international conference. – Saratov: Saratov University Press, 2015. Is. 6. P. 288-292.

22. *Сергеев С.А., Михайлов А.И., Сергеева Б.В.* Новые функциональные материалы для устройств на волнах пространственного заряда / Нано- и биомедицинские технологии. Управление качеством. Проблемы и перспективы: Сб. статей, вып 2. – Саратов: Техно-Декор, 2018. – С. 80-86.

23. *Сергеев С.А., Михайлов А.И., Сергеева Б.В.* Волновые процессы в твердых телах и их использование в микроэлектронике // Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика»: тез. докл. XIII Всерос. конф. молодых ученых. – Саратов: Техно-Декор, 2018. – С. 283-285.

24. *Сергеева Б.В., Сергеева Г.Н.* Перспективы соединений  $A_3B_5$  и  $A_2B_6$  для устройств на волнах пространственного заряда // Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика»: тез. докл. XV Всерос. конф. – Саратов: Техно-Декор, 2020. – С. 245-246.