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

Кафедра физики твердого тела

ВОЗБУЖДЕНИЕ ВОЛН ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАРЯДА В ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУРАХ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ И НИТРИДА ИНДИЯ

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 4 курса 4052 группы
направления 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»
Института физики
Некрасова Евгения Константиновича

Научный руководитель:
доцент, к.ф.-м.н., доцент
должность, ученая степень, ученое звание
_____
подпись, дата
С.А. Сергеев
инициалы, фамилия

Зав. кафедрой физики твёрдого тела: д.ф.-м.н., профессор
должность, ученая степень, ученое звание
_____
подпись, дата
Ал.В. Скрипаль
инициалы, фамилия

Саратов 2025

ВВЕДЕНИЕ

Для усиления, фильтрации и других видов обработки СВЧ сигналов могут быть использованы такие волновые процессы в поляризованных средах как акустические волны в пьезоэлектриках, спиновые волны в ферромагнетиках, волны носителей заряда [1]. Отличительной особенностью функциональной микроэлектроники является использование для обработки сигналов динамических неоднородностей, возбуждаемых с помощью внешних динамических воздействий, как правило, в твёрдых однородных средах. Примером таких неоднородностей являются поверхностные акустические волны, цилиндрические магнитные домены, спиновые волны [2]. Сюда можно отнести и волны пространственного заряда, распространяющиеся в полупроводнике с дрейфом носителей заряда.

Важной и актуальной проблемой остается увеличение рабочих частот устройств функциональной микроэлектроники. Для поверхностных акустических волн, с точки зрения физики, нет принципиальных ограничений на возможности возбуждения и распространения в СВЧ диапазоне. Однако рабочие частоты устройств на поверхностных акустических волнах не превышают единиц ГГц. Это связано с технологическими ограничениями при создании элементов возбуждения поверхностных акустических волн.

Одним из путей повышения граничной частоты является использование параметрического режима работы. В работах [3-5] теоретически и экспериментально показано, что параметрический режим работы тонкоплёночного усилителя бегущей волны с низкочастотной накачкой повышает граничную частоту усиления волн пространственного заряда, а также позволяет дополнить перечень его возможных функций, по крайней мере, двумя: смешением со сдвигом частоты и управляемой фильтрацией с перестройкой путём изменения частоты накачки. Другим путем повышения граничной частоты является поиск, исследование и освоение новых полупроводниковых материалов, которые могли бы заменить традиционный в данном применении GaAs [6, 7]. В последнее время активно проводятся

исследования и разработки нитридных полупроводников, структур и приборов на их основе [8-11].

Целью работы является теоретическое исследование влияния концентрации электронов в рабочем слое, ширины одиночного полоскового барьера Шоттки, частоты СВЧ сигнала, высоты потенциального барьера на эффективность возбуждения волн пространственного заряда одиночным полосковым барьером Шоттки в тонких пленках арсенида галлия и нитрида индия.

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

1. Анализ и обобщение научно-технической информации по теме исследований.
2. Построение математической модели для теоретического исследования.
3. Создание программы для расчетов.
4. Исследование влияния различных параметров (концентрации, ширины барьера Шоттки, частоты сигнала, высоты потенциального барьера) на эффективность возбуждения волн пространственного заряда.

Выпускная работа занимает 39 страниц, состоит из введения, теоретической и практической частей, заключения, имеет 17 рисунков и 2 таблицы. Обзор составлен по 56 информационным источникам.

Теоретическое исследование влияния концентрации электронов в рабочем слое, ширины барьера Шоттки, высоты потенциального барьера и частоты СВЧ напряжения на эффективность возбуждения волн пространственного заряда

Одним из перспективных направлений является создание устройств на волнах пространственного заряда в тонкопленочных полупроводниковых структурах с отрицательной дифференциальной проводимостью, обусловленной междолинными переходами в полупроводниках типа n-GaAs, n-InP или InN [1, 5].

Был проведен сравнительный анализ основных свойств GaAs и InN, который показал, что InN является перспективными материалами для использования в устройствах на ВПЗ. Проведенный обзор литературных

данных позволил обосновать выбор параметров и величин, характерных для GaAs и InN для использования в численных расчетах:

– для n-GaAs: ε = 12,5; для E_{Z0} = 5,5 кВ/см, $v_0 = 1{,}7 \cdot 10^7$ см/с, D = 200 см^2/с;

– для n-InN: ε = 14; для E_0 = 90 кВ/см, $v_0 = 3 \cdot 10^7$ см/с, D = 50 см^2/с.

Было теоретически исследовано влияние на коэффициент связи $|K|$ таких параметров как концентрация электронов в рабочем слое n_0, ширина БШ l_2, высота потенциального барьера φ_k и частота СВЧ-напряжения f, действующего на входном БШ и рассчитаны зависимости коэффициента связи от этих параметров в тонких пленках арсенида галлия и нитрида индия.

Были получены зависимости $|K|$ от концентрации электронов в рабочем слое n_0, ширины БШ l_2, высоты потенциального барьера φ_k и частоты СВЧ-напряжения f, действующего на входном БШ. Расчеты проведены для следующих параметров, соответствующих n-GaAs: $v_0 = 1{,}7\ 10^7$ см/с; ε = 12,5; E_{Z0} = 5,5 кВ/см, для толщины T = 5 мкм.

Были получены зависимости коэффициента связи $|K|$ от высоты потенциального барьера φ_k при ширине БШ l_2 = 1 мкм для различных частот f = 25 ГГц (μ_d=- 0,14 м^2/Вс), для f = 30 ГГц (μ_d=-0,128 м^2/Вс), для f = 35 ГГц (μ_d = -0,12 м^2/Вс) и концентраций электронов n_0: $1 \cdot 10^{21}$ м$^{-3}$, $5 \cdot 10^{20}$ м$^{-3}$, $5 \cdot 10^{21}$ м$^{-3}$.

Показано, что коэффициент связи БШ с малой высотой потенциального барьера выше $|K|$ БШ с φ_k = 0,7 – 0,9 эВ, которые наиболее типичны при использовании барьеров Шоттки на n-GaAs. Следовательно, для повышения коэффициента связи СВЧ напряжения на БШ и электрического поля в рабочей области устройств на ВПЗ, для возбуждения ВПЗ нужно применять барьеры Шоттки с наименьшим значением φ_k. При проведении дальнейших расчетов мы будем считать φ_k = 0,2 эВ.

Получены зависимости модуля коэффициента связи $|K|$ от частоты СВЧ сигнала на БШ для φ_k = 0,2 эВ, l_2 = 1 мкм, T = 5 мкм для разных концентраций электронов в рабочем слое n_0: $1 \cdot 10^{21}$ м$^{-3}$, $5 \cdot 10^{20}$ м$^{-3}$, $3 \cdot 10^{21}$ м$^{-3}$, $5 \cdot 10^{21}$ м$^{-3}$. Характер зависимости $|K|(f)$ меняется при $n_0 > 2 \cdot 10^{21}$ м$^{-3}$, из убывающей она

становится нарастающей, что связано с учетом дисперсии дифференциальной подвижности электронов при проведении расчетов.

Получены зависимости |К| от частоты для двух концентраций: $n_0 = 5 \cdot 10^{21}$ м$^{-3}$ и $n_0 = 1 \cdot 10^{21}$ м$^{-3}$ при μ_d = -0,2 м^2/Вс = const, φ_k = 0,2 эВ, l_2 = 1 мкм, T = 5 мкм, E_0 = 5,5 кВ/см. Показано, что с ростом частоты зависимость остается убывающей для любых концентраций. Это обстоятельство подтверждает тот факт, что при исследовании возбуждения ВПЗ одиночным полосковым БШ необходим учет частотной зависимости дифференциальной подвижности электронов, как и при исследовании распространения и взаимодействия ВПЗ в тонкопленочных полупроводниковых структурах с ОДП.

Получены зависимости модуля коэффициента связи $|K|$ от ширины БШ для φ_k = 0,2 эВ, f = 30 ГГц, μ_d = -0,128 м^2/Вс, T = 5 мкм для разных концентраций электронов в рабочем слое: $3 \cdot 10^{21}$ м$^{-3}$, $2 \cdot 10^{21}$ м$^{-3}$, $1 \cdot 10^{21}$ м$^{-3}$, $5 \cdot 10^{20}$ м$^{-3}$. Показано, что все представленные зависимости имеют ярко выраженные максимумы, причем проведенный анализ показал, что эти максимумы наблюдаются при некоторой характерной ширине барьера Шоттки - $l_2^{\max}$, которую можно рассчитать по формуле: $l_2^{\max} = \dfrac{\varepsilon\varepsilon_0 v_0}{q n_0 |\mu_d|}$.

Функция $l_2^{\max}$ является функцией только параметров материала рабочего слоя и частоты СВЧ сигнала подаваемого на БШ (при учете дисперсии μ_d), это дает возможность рассчитывать ширину БШ для конкретных структур и частот.

Получены зависимости модуля коэффициента связи от концентрации электронов в рабочем слое n_0 для φ_k = 0,2 эВ, l_2 = 1 мкм, T = 5 мкм для трёх частот: f = 25 ГГц (μ_d = -0,14 м^2/Вс), f = 30 ГГц (μ_d = -0,128 м^2/Вс), f = 35 ГГц (μ_d = -0,12 м^2/Вс) [5].

Показано, что при определенных значениях концентрации зависимости имеют максимумы. Рост в области низких концентраций объясняется ростом w_d, а спад в области высоких концентраций объясняется уменьшением глубины области обеднения под барьером Шоттки с ростом концентрации и,

соответственно, уменьшением модуляции электронного потока СВЧ напряжением на БШ.

Данные результаты справедливы для предположения, что под БШ поле превышает критическое значение и имеет место ОДП. В реальных устройствах распределение электрического поля неоднородно по длине образца. Поэтому дальнейшие расчеты коэффициента преобразования электромагнитного сигнала в ВПЗ на входе и коэффициента обратного преобразования ВПЗ в электромагнитный сигнал на выходе проводились для реального распределения электрического поля по длине образца [12].

Были также получены графики зависимостей модуля коэффициента связи |K| от концентрации электронов в рабочем слое n_0, ширины БШ l_2, высоты потенциального барьера φ_k и частоты СВЧ-напряжения f, действующего на входном БШ, рассчитанные для нитрида индия. Расчеты проведены для следующих параметров, соответствующих n-InN, в предположении, что напряженность статического электрического поля под БШ E_{Z0} = 90 кВ/см: v_0 = $5 \cdot 10^7$ см/с, ε = 13,52, T = 5 мкм. Во всех расчетах полагалось, что $U_0 = -1$ В.

Получены зависимости модуля коэффициента связи |K| от высоты потенциального барьера φ_k для ширины БШ l_2 = 1 мкм для следующих частот и концентраций электронов: f = 30 ГГц ($n_0 = 1 \cdot 10^{21}$ м$^{-3}$), f = 20 ГГц ($n_0 = 4 \cdot 10^{21}$ м$^{-3}$), f = 40 ГГц ($n_0 = 4 \cdot 10^{21}$ м$^{-3)}$, f = 35 ГГц ($n_0 = 5 \cdot 10^{21}$ м$^{-3}$). Показано, что при любых частотах сигнала и концентрациях электронов в рабочем слое для БШ с малым значением φ_k модуль коэффициента связи выше, чем для наиболее типичных БШ с φ_k = 0,7÷0,9 В. Это связано с тем, что при уменьшении φ_k увеличивается коэффициент модуляции емкости и глубины области обеднения под БШ. Следовательно, для эффективного возбуждения ВПЗ в ТПС с ОДП целесообразно применять барьеры Шоттки со значением φ_k = 0,2÷0,3 В, что обеспечит высокий коэффициент связи и гарантирует достаточно высокую температурную стабильность работы устройства, поскольку при этом $\varphi_k >> kT/q$, где k – постоянная Больцмана, T – температура. Поэтому в дальнейших

расчетах φ_k полагалась равной 0,2 В.

Получены зависимости модуля коэффициента связи |К| от частоты СВЧ сигнала f для разной ширины БШ l_2 и различных концентрации электронов n_0 в рабочем слое: l_2 = 1 мкм ($n_0 = 5 \cdot 10^{21}$ м$^{-3}$), l_2 = 1,5 мкм ($n_0 = 5 \cdot 10^{21}$ м$^{-3}$), l_2 = 0,8 мкм ($n_0 = 7 \cdot 10^{21}$ м$^{-3}$), l_2 = 3 мкм ($n_0 = 1 \cdot 10^{21}$ м$^{-3}$). Все зависимости убывают с ростом частоты сигнала.

Получены зависимости модуля коэффициента связи К от n_0 для частоты сигнала f = 30 ГГц для разной ширины БШ l_2: 1,5 мкм, 1 мкм, 0,8 мкм. Все зависимости при определенных значениях концентрации имеют максимумы. Немонотонность зависимостей К от n_0 определяется сменой знака реальной части коэффициента связи.

Получены зависимости |К| от ширины БШ l_2 для различных частот сигнала и концентраций электронов в рабочем слое: частота f = 30 ГГц ($n_0 = 5 \cdot 10^{21}$ м$^{-3}$), f = 30 ГГц ($n_0 = 10 \cdot 10^{22}$ м$^{-3}$), f = 25 ГГц ($n_0 = 5 \cdot 10^{22}$ м$^{-3}$), f = 35 ГГц ($n_0 = 7 \cdot 10^{22}$ м$^{-3}$), f = 30 ГГц ($n_0 = 3{,}5 \cdot 10^{22}$ м$^{-3}$). Все кривые имеют максимумы, которые наблюдаются при некоторой характерной величине $(n_0 l_2)^{max}$, которая является функцией только параметров материала рабочего слоя и частоты СВЧ сигнала, подаваемого на БШ.

Таким образом, показано, что для эффективного возбуждения ВПЗ в ТПС с ОДП целесообразно применять одиночные барьеры Шоттки с пониженным значением контактной разности потенциалов φ_0 = (0,2÷0,3) В.

Использование таких БШ обеспечивает с одной стороны высокое значение коэффициента связи |К|, а с другой стороны гарантирует достаточно высокую температурную стабильность работы устройства. Ширина входного элемента связи и концентрация электронов под ним должны быть оптимальными для возбуждения слабой ВПЗ сигнальной частоты.

Возбуждение волн пространственного заряда под одиночным полосковым барьером Шоттки на входе преобразователя частоты

Выберем зазор l_1 между катодом и входным элементом связи равным 2 мкм. По данным работы [12] напряженность электрического поля под входным

БШ будет равна 1,5 кВ/см. Дифференциальная подвижность электронов при E_0 = 1,5 кВ/см была рассчитана по результатам работы [13] и составила μ_d = 0,5 м^2/Вс. Для этих значений E_0 и μ_d было проведено исследование возбуждения волн пространственного заряда под барьером Шоттки в тонкой полупроводниковой плёнке n-GaAs.

Рассчитана и построена зависимость коэффициента связи K_{BX} от высоты потенциального барьера. Характер зависимости остался прежним и для напряженности электрического поля E_0 = 1,5 кВ/см. Поэтому все приведенные выше рассуждения о влиянии высоты потенциального барьера на коэффициент связи остаются справедливыми и для допороговых полей.

Построена зависимость коэффициента связи от ширины барьера Шоттки на входе для двух частот 25 ГГц и 35ГГц, для всех кривых φ_k = 0,2 эВ, $n_0 = 8 \cdot 10^{20}$ м$^{-3}$, T = 5 мкм. До ширины БШ равной ≈ 2 мкм коэффициент связи сильно растет, после чего зависимость практически выходит на насыщение. Выберем ширину входного БШ l_2 = 2 мкм.

Построен график зависимости коэффициента связи K_{BX} от концентрации носителей заряда для двух частот 25 ГГц и 35ГГц. Обе кривые имеют максимумы при концентрации $n_0 \approx 5 \cdot 10^{20}$ м$^{-3}$. С ростом частоты максимум коэффициента связи несколько снижается. При больших концентрациях кривые почти совпадают, а значение величины коэффициента связи уменьшается.

Построена зависимость коэффициента связи K_{BX} от частоты СВЧ-сигнала. С ростом частоты значение K_{BX} незначительно падает, следовательно, преобразование СВЧ сигнала в волну пространственного заряда будет эффективным для широкой полосы частот.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы был проведен обзор литературы по вопросу перспективности применения полупроводниковых соединений арсенида галлия и нитрида индия в устройствах на волнах пространственного заряда, изучены электрофизические свойства данных полупроводниковых соединений.

Анализ представленных в работе результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. Проведенный обзор литературных данных позволил обосновать выбор параметров и величин, характерных для GaAs и InN для использования в численных расчетах работы.

2. Был теоретически рассмотрен процесс преобразования электромагнитного сигнала в волну пространственного заряда в тонкопленочной полупроводниковой структуре с отрицательной дифференциальной проводимостью, получена формула для расчета коэффициента преобразования, были рассчитаны характеристики преобразователя, выполненного в виде одиночного полоскового БШ.

3. Показано, что для эффективного возбуждения ВПЗ в ТПС с ОДП целесообразно применять одиночные барьеры Шоттки с пониженным значением контактной разности потенциалов (φ_0 = (0,2÷0,3) В).

4. Получены зависимости коэффициента связи от ширины БШ и концентрации электронов в пленке. Кривые имеют максимумы, причём их положение можно менять подбором параметров, добиваясь максимума коэффициента связи на рабочей частоте.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Перспективы интегральной электроники СВЧ / А.А. Барыбин, И.Б. Вендик, О.Г. Вендик и др. // Микроэлектроника. 1979. Т. 8. Вып. 1. С. 3–18.

2. Вендик О.Г. Поиск новых физических явлений в твердом теле для использования в электронике СВЧ // Радиоэлектроника. 1980. Т 23(10). С.4–11.

3. Иванченко В.А., Климов Б.Н., Михайлов А.И. Параметрическое взаимодействие высокочастотных волн в n-GaAs // ФТП. 1979. Т. 13. Вып. 6. С. 1172–1174.

4. Иванченко В.А., Игнатьев Ю.М., Михайлов А.И. Влияние низкочастотной накачки на выходной спектр тонкоплёночного УБВ на n-GaAs. В кн.: Взаимодействие электромагнитных волн с полупроводниково-диэлектрическими структурами. – Изд-во Сарат. ун-та. 1988. Ч. 2. С. 117–118.

5. Иванченко В.А., Михайлов А.И. Функциональные возможности УБВ на n-GaAs в условиях параметрического усиления при низкочастотной накачке. В кн.: Сборник тезисов докладов Всесоюзного совещания «Электроника. Преобразователи информации». – М., Н.Новгород, 1991. С. 12–14.

6. 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: Сборник научных статей, вып. 2. – Саратов: «Техно-Декор», 2018. – С. 80-86.

7. Михайлов А.И., Сергеев С.А., Сергеева Б.В. Определение перспектив использования полупроводников A_3B_5 и A_2B_6 для устройств на волнах пространственного заряда // Физика полупроводников и твердотельная электроника: Сборник статей. – Саратов: «Амирит», 2022. – С. 101-119.

8. Материалы Всероссийских совещаний и конференций «Нитриды галлия, индия и алюминия: структуры и приборы». 1997-2011 гг: http: nitrides-conf.ioffe.ru/history.htm.

9. Levinshtein M.E., Rumyantsev S.L., Shur M.S. Properties of advanced semiconductors materials: GaN, AlN, N-InN, BN, and SiGe. – New York: John Wiley and Sons, 2001.

10. Berrah S., Abid H., Boukortt A. Semicond // Phys., Quant.El. & Optoel. 2006. Vol. 9 (2). P. 12.

11. Takafumi Y., Soon-Ku H. Oxide and Nitride Semiconductors. Processing, Properties, and Applications. – Berlin: Springer, 2009.

12. Амплитудно-частотные характеристики приборов на волнах пространственного заряда с переменным сечением проводящего канала / М.А. Китаев, А.Л. Коган, М.Л. Пиковская, Е.И. Рыжова // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. 1990. Вып. 2. С. 14–18.

13. Левинштейн М.Е. Новые результаты в исследовании междолинного перехода горячих электронов // ФТП. 1979. Т. 13, вып. 7. С. 1249–1267.