

Министерство образования и науки Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.
ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра физики твердого тела

**ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПИТАНИЯ ДИОДА ГАННА НА
УСТОЙЧИВОСТЬ ГЕНЕРАЦИИ**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса

направления 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»
факультета нано- и биомедицинских технологий

Курбатова Виталия Константиновича

Научный руководитель

профессор, д.ф.-.м.н.

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

Д. А. Усанов

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой

профессор, д.ф.-.м.н.

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

Д. А. Усанов

инициалы, фамилия

Саратов, 2018

Введение. В работе был проведен критический анализ работ, связанных с исследованием работы диода Ганна. Выполнен расчет зависимости коэффициента диффузии от напряженности электрического поля. Построена вольт-амперная характеристика с учетом коэффициента диффузии. генерации можно наблюдать домен сильного поля.

Актуальность данной работы состоит в том, что диод Ганна является широко распространенным и применяемым полупроводниковым прибором, на его основе производят генераторы СВЧ колебаний. Исследование физики его работы позволит улучшить характеристики диода.

Отличительными особенностями, которых, являются малые габариты, вес, низкая мощность, потребляемая от источника питания.

В настоящих работах [1-5] при исследовании диода Ганна для наблюдения, устойчивой генерации, на диод подавалось прямое смещение, превышающее пороговое значение в 1.5-3 раза. Данное напряжение подбиралось экспериментально. Взаимосвязь же, напряжения питания выше порогового и устойчивой генерации, с учетом увеличения числа доменов, при повышении напряжения, объяснено не было, что и является направлением исследования данной работы.

Поэтому целью данной работы являлось объяснение влияния напряжения питания диода Ганна на устойчивость генерации.

В конце работы представлены, результаты сопоставления зависимостей коэффициентов диффузии от напряженности электрического поля. Сделан вывод о напряжении питания в проанализированных статьях. Приведена вольт-амперная характеристика с учетом зависимости коэффициента диффузии от напряженности электрического поля. Сделан вывод о напряжении питания диода Ганна выше порогового.

1.1 Анализ работы [2]

Йеппесен, Йеппссон. Влияние диффузии на устойчивость усилителя со сверхкритической структурой на переносе электронов. ТИИЭР, 1972, т. 60, №4, с. 143-145

Статья имеет теоретический и прикладной характер, так как в ней проводятся машинные и физические эксперименты с полупроводниковым прибором.

В настоящей работе на основе модели процессов в объемном заряде прибора, проведены машинные эксперименты по изучению влияния зависимости коэффициента диффузии от поля на устойчивость усилителя на переносе электронов с омическими контактами [11].

В экспериментах прибор считался присоединенным к батарее питания через последовательное сопротивление $R_G = 50\Omega$, что соответствовало условиям работы в 50- Ω линии с согласованной нагрузкой (рис. 1).

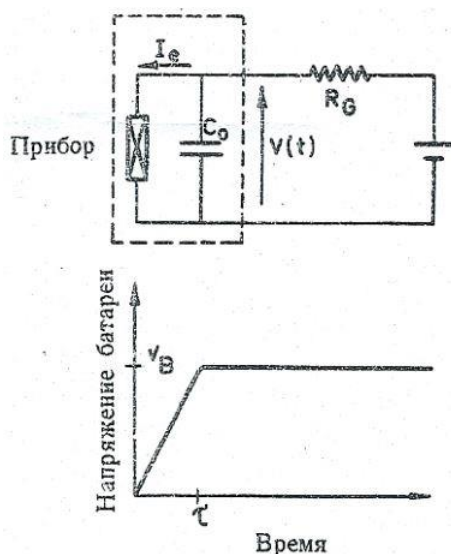


Рисунок 1. Эквивалентная схема прибора с переносом электронов, учитывающая «холодную» емкость C_0 и внешней цепи с батареей питания.

Прибор имел сопротивление в слабых полях $R_0 = 5\Omega$, ширину $L_a = 10\mu m$; концентрация примеси n_0 менялась в пределах $(0,8-4) \cdot 10^{15} cm^{-3}$. Омические контакты модель представляла в виде низкоомных областей, а распределение примесей принималось однородным (за исключением тех

экспериментов где специально изучалось влияние распределения примесей). Зависимость дрейфовой скорости электронов от поля $v(E)$ выбиралась с учетом влияния температуры [12]. По уравнению теплопроводности рассчитывалось пространственное распределение температуры и в соответствии с ним принималось пространственное неоднородное распределение $v(E)$. Температурная зависимость $D(E)$ определялась в допущении о справедливости соотношения Эйнштейна для слабых полей. Для температуры решетки $T_0 = 300 K$ и при не зависящем от поля $D = 200 \text{ cm}^2/\text{s}$ было обнаружено существование стабильного домена сильного поля на аноде для уровня легирования $n_0 > 2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. При $D = 400 \text{ cm}^2/\text{s}$ граница неустойчивости по n_0 снижается до $1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. Эти результаты показывают, что роль диффузии весьма существенна.

Как известно, коэффициент диффузии для арсенида галлия на самом деле зависит от поля, хотя эти сведения об этой зависимости весьма не точные, как видно из (рис. 2.).

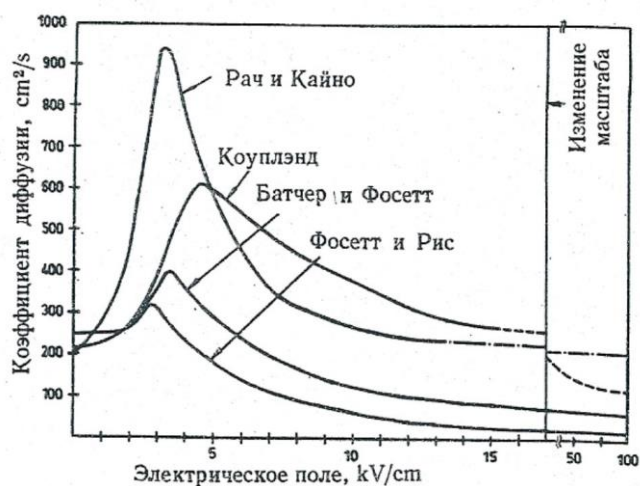


Рисунок 2. Кривые $D(E)$ для арсенида галлия при $T_0 = 300 K$, снятые экспериментально (Рач и Кайно) и рассчитанные по методу Монте-Карло (Фоссет и Рис), по смещенному распределению Максвелла (Батчер и Фосетт) и с коррекцией кривой Батчера и Фосетта путем введения члена, учитывающего диффузию «переброшенных» электронов (Коуплэнд).

Для изображенных кривых подбирались аналитические аппроксимации, и проводился ряд машинных экспериментов с целью сравнения влияния этих зависимостей, при этом все остальные параметры прибора в этих экспериментах были постоянны. Напряжение питания на приборе V_0 в этих экспериментах было выбрано равным 12,7 В, $T_0 = 300$ К, а при $n_0 = 1,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ (в середине интервала $1 - 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, по которому имеются сведения из работы [13]).

Кривая Коуплэнда[14] рассчитана путем добавления к значениям, найденным Батчером и Фосеттом, члена, выражающего вклад «переброшенных» электронов. Для этой зависимости прибор, как показано на (рис. 4.), оказался в устойчивом состоянии с доменом сильного поля на аноде. Видно, что начальный переходный процесс не приводит в этом случае к колебательному режиму большой амплитуды благодаря меньшей пиковой концентрации (что в свою очередь обусловлено более высокими значениями $D(E)$ в полях от 5 до 25 кВ/см). Изучение зависимости устойчивости от концентрации примеси показало, что устойчивость сохраняется при снижении n_0 вплоть до значений $8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, но при линейном росте концентрации от катода к аноду даже при 10% во всем диапазоне концентраций от 0,8 до $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ наблюдались колебания, обусловленные пробегом домена, при любых значениях V_0 ниже 30 В.

Остальные кривые мало способствуют устойчивости работы прибора. При использовании кривой Фосетта и Риса, из-за малости коэффициента диффузии в сильных полях, слой накопления узок, а максимальная концентрация в нем высока ($11 \cdot n_0$).

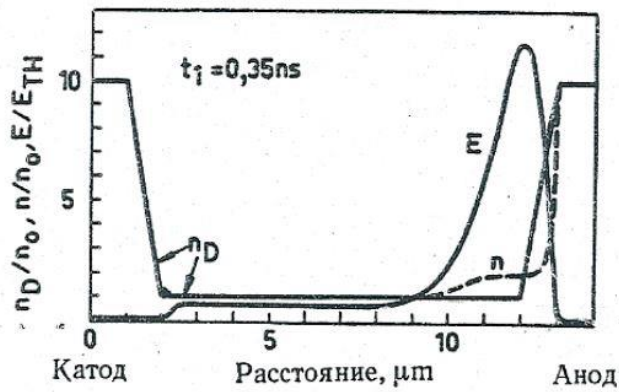


Рисунок. 3. Распределение по координате нормированного поля E/E_{Th} , концентрации электронов n/n_0 и доноров p/p_0 .

Перераспределение концентрации в этом слое при движении его к аноду не может привести его в устойчивое состояние. Теоретическая кривая Батчера и Фосетта получена при использовании смещенного максвелловского распределения для электронов, не учитывает вклад «переброшенных электронов». Из-за более высоких значений коэффициента диффузии в полях выше порогового максимальная концентрация в слое накопления для этой кривой оказалась ниже. Для кривой Рача и Кайно, максимальная концентрация оказалась еще ниже.

Итак, в данной работе, машинные эксперименты показали, что при комнатной температуре однородно легированный прибор с переносом электронов имеющий омические контакты, при концентрации примеси $\geq 8 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, будучи помещен в схему с резистивной нагрузкой 50Ω , оказывается устойчивым, как на малом, так и на больших сигналах. Устойчивость, обеспечивается только за счет диффузии, описываемой зависимостью $D(E)$, полученной Коуплэндом, так как другие явления, способствующие устойчивости, не учитывались.

Содержание данной работы полностью оправдывает ее название, цели и задачи поставлены четко и ясно, процедура исследования написана подробно. Однако в данной работе не был обоснован выбор питания диода

12.7 В. Следовательно можно сделать вывод, что данное напряжение подбиралось экспериментально.

1.5 Вывод к анализу работ

Проведен анализ работ [2-5] из которого можно сделать вывод, что в данных работах напряжение питания диода, использовалось выше порогового и подбиралось экспериментально. При данных напряжениях порядка 6-10 В, наблюдалась устойчивая генерация сигнала. В работе [5] данное напряжение питание объяснялось теорией больших сигналов. Однако ни в одной работе, не учитывалось возникновение сразу нескольких доменов сильного поля. Данное явление описывается в исследовательской работе [1]. Условия и результаты, которой приведены далее.

В работе [1] проводились исследования диода Ганна, при котором, использовалось напряжения питания выше порогового значения и исследовалось распределение поля, а так же концентрации носителей заряда вдоль диода. При пороговом напряжении, наблюдался один домен, а при повышении напряжения выше порогового, наблюдалось увеличение числа доменов до трех. Из чего можно сделать вывод, что устойчивая генерация диода наблюдается при возникновении двух-трех доменов, что влияет на волновое сопротивление диода. При этом учитывалась зависимость коэффициента диффузии от приложенного электрического поля, что близко к зависимости, описываемой по методу Рач и Кайно[2].

1.6 Ближнеполевой сверхвысокочастотный микроскоп

В данной главе приведены: принцип работы, структура, и способы использования ближнеполевого СВЧ-микроскопа. В качестве резонатора, применялась система короткозамыкателя с выемкой – металлический штырь, который был размещен, с противоположной стороны от выемки, на расстояниях, существенно меньшем длины волны основного типа, между штырем и выемкой с короткозамыкателем.

При производстве структур твердотельной микро- и нанoeлектроники, важной составляющей является контроль изделий для уменьшения числа

бракованных изделий. В качестве способа контроля используется СВЧ-микроскопия. Отличительными особенностями, такого способа можно назвать, такие преимущества, как отсутствие квантовых эффектов поглощения веществом, падающего излучения, исследуемым материалом, так многие вещества прозрачны в СВЧ-диапазоне в отличие от оптического.

В работе [1] для получения результатов проводили измерения на панорамном измерителе коэффициента стоячей волны по напряжению и ослабления Р2-61. Сверхвысокочастотный сигнал, создаваемый генератором ГКЧ-61, подавали в СВЧ тракт волновода 1. Вследствие этого, получалось, что штырь 3 и короткозамыкатель 2, имеющий выемку 4, начинал ответно реагировать на СВЧ сигнал. Результатом такой реакции, является возникновение ближнего поля, что ведет к получению резонанса в системе. Сигнал, будучи отраженным от низкоразмерной системы, попадал на измерительный блок Я2Р-67 имеющий аналоговый вход и аналогово-цифровой преобразователь Е14-140 – после прохождения, которого попадал на компьютер. После этого с помощью программной среды Mathcadv14, преобразовывался.

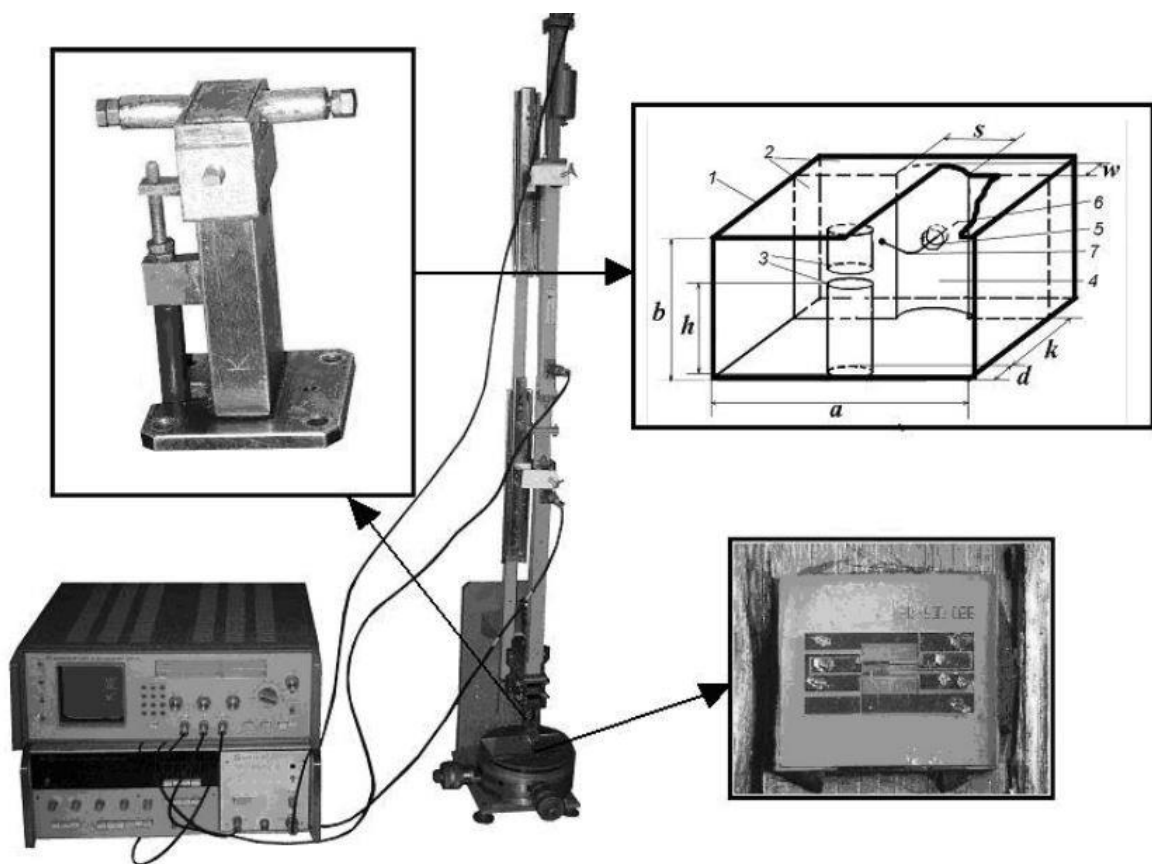


Рисунок 4. На данном изображении представлена конструкция ближнеполевого СВЧ микроскопа, на вставке справа и слева вверху: изображена система «короткозамыкатель с выемкой –штырь с зазором», вставка внизу справа – фотография структуры из нойбата лития покрытым слоем металлизации в виде встречно-штыревой алюминиевой системы, имеющая период 0.5 мкм .

Изменяя промежуток между штырем 3 и короткозамыкателем 4, получали появление резонанса с малым коэффициентом отражения, такое расстояние фиксировалось при достижении резонанса. Ближнее поле взаимодействовало с иглой 6, которая является продолжение петли связи 7. После чего ближнее поле с иглы реагировало на измеряемый образец, который находился рядом с иглой 6. В устройство для измерения поступал отраженный сигнал. Таким образом, снимались значения коэффициента отражения и резонансной частоты.

В данной главе был описан ближнеполевой СВЧ микроскоп на основе система «штырь с зазором – короткозамыкатель с выемкой» и принцип его работы.

1.11 Математическое моделирование распределения концентрации и напряженности электрического поля вдоль диода Ганна

В данной главе представлены результаты, математического моделирования напряженности электрического поля и концентрации вдоль диода Ганна. С помощью расчетов показана возможность, существования стационарного домена сильного поля.

Авторы [1] провели анализ работы диода Ганна. Для этого были использованы численные методы, основанные на решении уравнения Пуассона, в совокупности с уравнением для полного тока. Выполнен численный расчет стационарного распределения электрического поля и концентрации носителей заряда в диоде, с помощью ЭВМ. Учитывалась зависимость коэффициента диффузии от напряженности электрического поля. Приведены результаты экспериментальных исследований распределения этих величин. С помощью описанного выше ближнеполевого СВЧ микроскопа.

Численное моделирование в работе [1], проводилось при помощи уравнения Пуассона (1) и уравнения для полного тока в диоде (2). Уравнение (2) представлено для одномерного случая.

$$j = en\mu_n(E)E + eD_n(E) \frac{dn}{dx}, \quad (2)$$

где j – плотность тока, протекающего через диод Ганна,

$\mu_n(E)$ – зависимость подвижности электронов от напряженности электрического поля в арсениде галлия,

E – напряженность электрического поля,

e – заряд электрона,

$D_n(E)$ – зависимость коэффициента диффузии электронов от напряженности электрического поля.

ϵ_0 – диэлектрическая постоянная,

ϵ – диэлектрическая проницаемость арсенида галлия n-типа,

n_0 – равновесная концентрация носителей заряда,

n – концентрация носителей заряда (электронов проводимости).

Подставляя n из (1) в уравнение (2), можно записать его в следующем виде:

$$j = en\mu_n(E)E \frac{dE}{dx} + en_0\mu_n(E)E - \epsilon\epsilon_0 D_n(E) \frac{d^2E}{dx^2}. \quad (3)$$

В качестве зависимости $\mu_n(E)$ было использовано выражение, приведенное в [1]. Эта зависимость имеет вид:

$$\mu(E) = \frac{1}{E(x)} \frac{\mu_0 E(x) + v_s \left(\frac{E(x)}{E_n}\right)^4}{1 + \left(\frac{E(x)}{E_n}\right)^4}, \quad (4)$$

где для GaAs $\mu_0 = 6000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$;

$$v_s = 8,5 \cdot 10^6 \text{ см/с};$$

$$E_n = 4000 \text{ В/см}.$$

В качестве зависимости $D(E)$ авторы [1] использовали предложенное ими выражение, аппроксимирующее известную для GaAs из [14] экспериментальную зависимость, в виде:

$$D_n(E) = a \cdot e^{\frac{-(E(x)-b)^2}{c}} + d, \quad (5)$$

где для GaAs $a = 830 \text{ см}^2/\text{с}$;

$$b = 3000 \text{ В/см};$$

$$c = 17 \cdot 10^7 \text{ В/см};$$

$$d = 150 \text{ см}^2/\text{с}.$$

Экспериментальная зависимость из [16] и аппроксимирующее ее выражение (5), приведены на (рис.6) (сплошная – аппроксимирующая зависимость, штрихованная – экспериментальная из [16]). Как следует из

(рис.13), сравнение этих зависимостей показывает их качественное соответствие.

Подставив (4) и (5) в (3), получим уравнение:

$$-\epsilon\epsilon_0 \left(a \cdot e^{\frac{-(E(x)-b)^2}{c}} + d \right) \frac{d^2 E(x)}{dx^2} - \epsilon\epsilon_0 \frac{\mu_0 E(x) + v_s \left(\frac{E(x)}{E_n} \right)^4}{1 + \left(\frac{E(x)}{E_n} \right)^4} \frac{dE(x)}{dx} + en_0 \frac{\mu_0 E(x) + v_s \left(\frac{E(x)}{E_n} \right)^4}{1 + \left(\frac{E(x)}{E_n} \right)^4} - j = 0, (6)$$

В качестве граничных условий использовался следующие:

$$\begin{cases} E(0) = 0; \\ E(l) = 0; \end{cases} \quad (7)$$

где l – длина активной n-области диода Ганна.

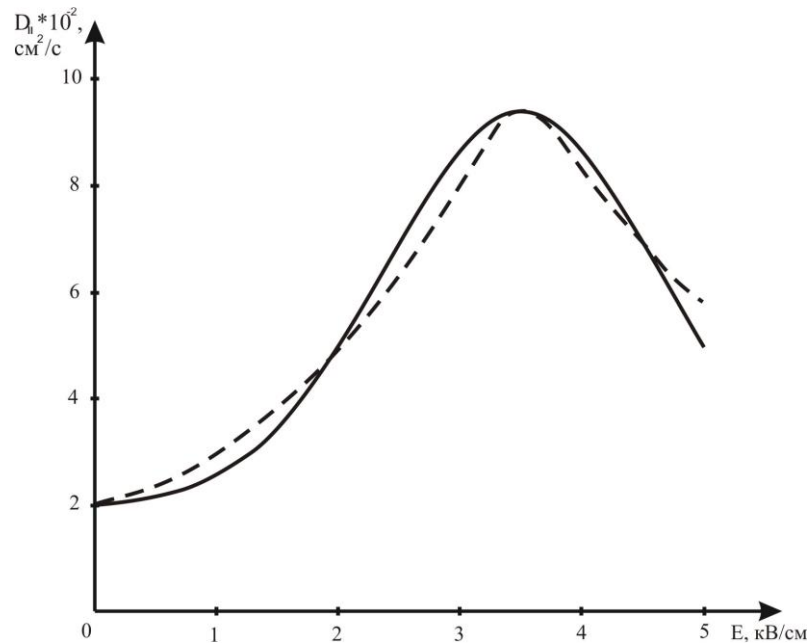


Рисунок 6. Экспериментальная зависимость из [13] и аппроксимирующее ее выражение (5).

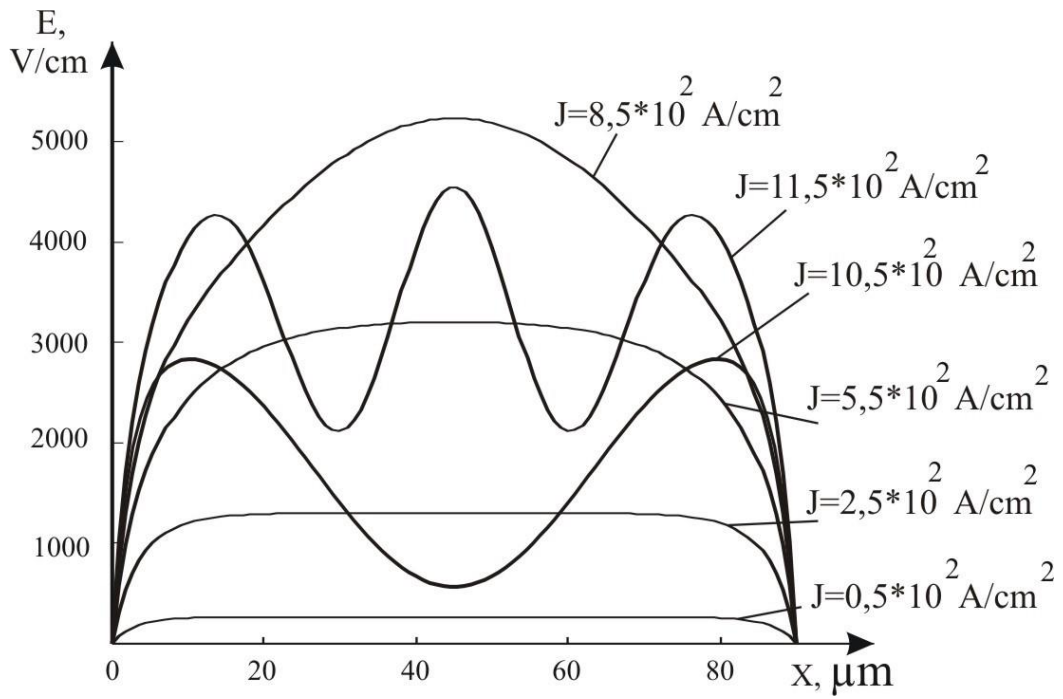


Рисунок 7. Профили распределения напряженности электрического поля вдоль кристалла диода Ганна.

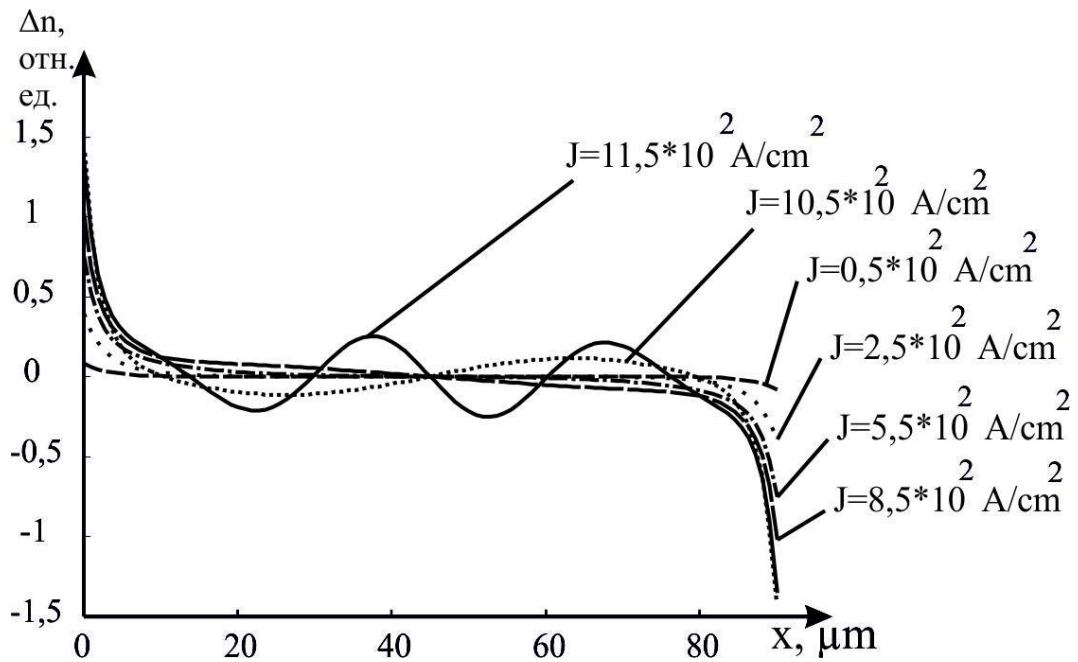


Рисунок 8. Профили распределения неравновесной компоненты концентрации Δn вдоль кристалла диода Ганна.

Как видно на графике (рис. 7) после прохождения определенного порога значения тока, в диоде образуется неравновесное распределение напряженности электрического поля, что и характеризует наличие стационарного домена. На графике (рис. 8) распределения неравновесной концентрации заряда, также наблюдается неравновесное распределение.

В данной главе были представлены решения уравнения Пуассона и уравнения для полного тока. На основе данных уравнений были построены графики распределения напряженности электрического поля и неравновесной компоненты носителей заряда, на которых наблюдалось неравновесное распределение полученное в результате эксперимента.

2.1 Сопоставление кривых зависимости коэффициента диффузии от поля

После проведенного анализа работы [2], можно соотнести изображенные на (рис. 9) и (рис. 6) кривые. Следует сделать вывод, что зависимости полученным экспериментально и аппроксимирующей ее функции, из работы [13] и [1], больше всего соответствует кривая предложенная Рач и Кайно. Сравнение кривых приведено на (рис. 9).

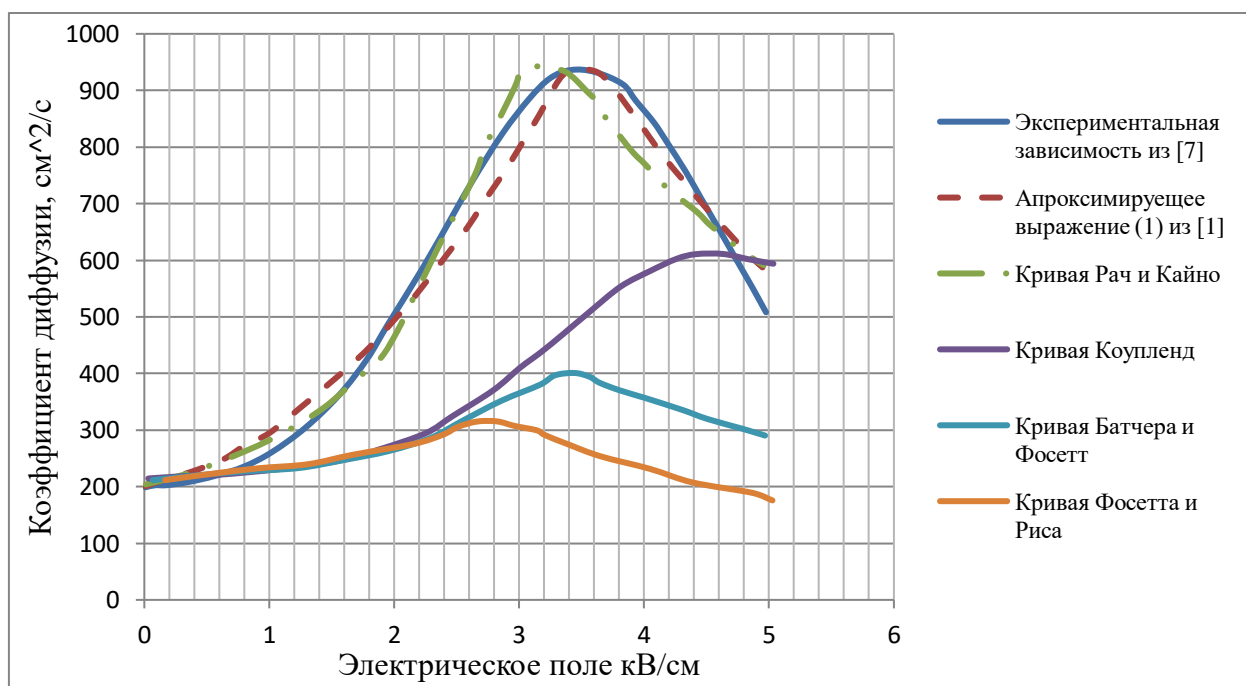


Рисунок 9. Кривые $D(E)$ для арсенида галлия при $T_0 = 300\text{ K}$, экспериментальная зависимость из [13] и ее аппроксимирующая функция (5) из [1], снятые экспериментально (Рач и Кайно) и рассчитанные по методу Монте-Карло (Фоссет и Рис), по смещенному распределению Максвелла (Батчер и Фосетт) и с коррекцией кривой Батчера и Фосетта путем введения члена, учитывающего диффузию «переброшенных» электронов (Коупленд).

В свою очередь в работе [2] для описания зависимости коэффициента диффузии от напряженности поля использовалась кривая Коуплэнда, учет, которой позволил наблюдать устойчивый домен сильного поля рядом с анодом, приведенный на (рис. 4). В работе [1] принималась другая зависимость $D(E)$, что можно видеть из (рис. 9), которая больше всего подходит к кривой Рач и Кайно, при которой в работе [2] не наблюдалось домена сильного поля. Из этого следует, что используя зависимость коэффициента диффузии от напряженности поля предложенную Рач и Кайно, можно наблюдать несколько, доменов сильного поля, чего не было показано при выборе напряжения питания в работе [2].

2.2 Построение вольт-амперной характеристике на основе теоретических расчетов напряженности и тока, сравнение с экспериментом

В данной главе показан график, построенный на основе экспериментальных данных. И сделаны выводы сравнения двух графиков.

Для построения вольт-амперной характеристики диода использовались данные с графиков профиля распределения напряженности электрического поля (рис. 15). Данные были проинтегрированы с использованием программной среды Mathcadv14. В результате были получены значения напряжения для каждого из графиков. Значения тока были вычислены авторами [1] и представлены (рис. 15). На основе этих данных был построен вольт-амперная характеристика (рис. 18).

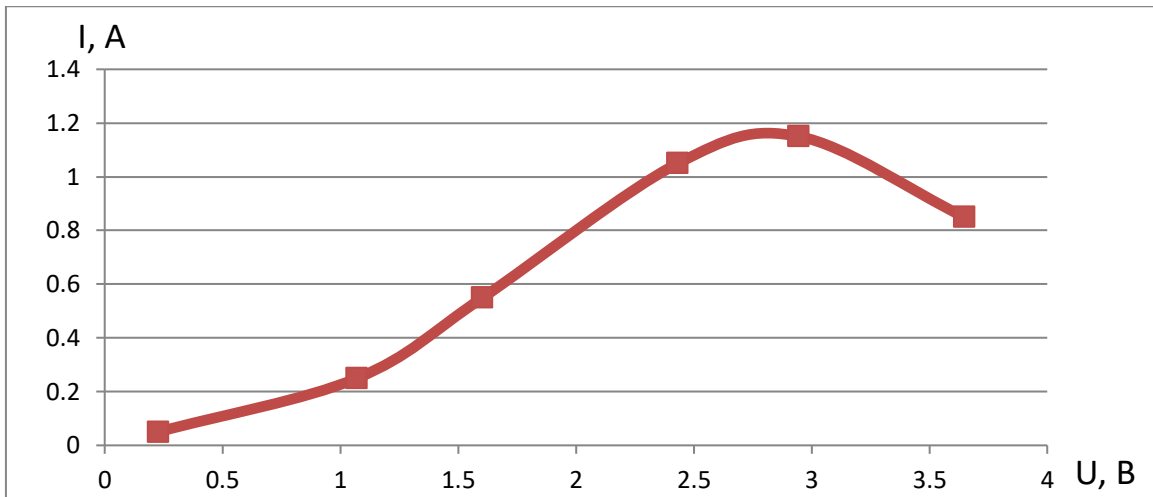


Рисунок 10. Вольт-амперная характеристика диода Ганна на основе моделированных данных с учетом коэффициента диффузии.

Приведена вольт-амперная характеристика на основе моделированных данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью работы было установить взаимосвязь напряжения питания диода Ганна выше порогового [1-5] и устойчивой генерации в широком диапазоне частот [3].

В ходе данной исследовательской работы, был проведен критический анализ работ, связанных с исследованием диода Ганна. Сделаны выводы по каждой из работ о напряжении питания диода. Из чего, можно сказать, что в данных работах напряжение питания диода использовалось выше порогового и подбиралось экспериментально. При данных напряжениях порядка 6-10 В, наблюдалась устойчивая генерация сигнала. В работе [5], данное напряжение питание объяснялось, теорией больших сигналов. Однако, ни в одной работе не учитывалось возникновение сразу нескольких доменов сильного поля. Возникновение сразу нескольких доменов экспериментально обнаружено в работе [1]. Следствием увеличения числа доменов является изменение отрицательного дифференциального сопротивления, что влияет на общее сопротивление цепи, вследствие чего происходит согласование положительного сопротивления и ОДС. Показаны результаты сопоставления зависимостей коэффициента диффузии от поля работы [1] и [2]. Сделан вывод о взаимосвязи напряжения питания диода и устойчивости генерации, при напряжениях питания выше порогового. Приведена вольт-амперная характеристика с учетом коэффициента диффузии, которая согласуется с экспериментальной.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Нелинейная динамика распределения концентрации носителей заряда, напряженности электрического поля и образование доменов в диодах Ганна. / В. Ю. Кваско // Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук 2013. г. Саратов. С. 15-21.
2. Йеппесен, Йеппссон. Влияние диффузии на устойчивость усилителя со сверхкритической структурой на переносе электронов. ТИИЭР, 1972, т. 60, №4, с. 143-145.
3. Широкополосный усилитель 3-см диапазона длин волн на диоде с переносом электронов. Д. А. Усанов, В. Н. Посадский, П. В. Буренин, С. С. Горбатов. «ЭЛЕКТРОНИКА СВЧ», № 8, 1975, С. 98-100.
4. Spitalnik R., Shaw M. P., Rabier A., Magarshack J. On the mechanism for microwave amplification in supercritically doped n-GaAs. Appl. Phys. Lett., 1973, vol. 22, No 4, pp. 162-164.
5. Ashok K. T., Walter R. C. An experimental study of stabilized transferred-electron amplifiers. IEEE Trans. MTT, 1973, vol. 21, No7, pp. 477-481.
6. Sene A., Rosenbaum F. I. A Wide-Band Gunn-Effect CW Waveguide Amplifier. IEEE Trans. MTT, 1972. Vol. 20, No 10, pp. 645-650.
7. Perlman B. S., Upadhyayula C. L., Siekanowicz W. W. Microwave properties and applications of negative conductance transferred electron devices. Proc. IEEE, 1971, vol/ 59, No 8, pp. 1229-1237.
8. Hines M. E., Buntschun C. Broad-band power amplification with Gunn-effect diodes. IEEE I. Solid-State Circuits, 1969, vol. 4, No 6, pp. 370-374.
9. Magarshack I. Mircea A. Wideband CW amplification in X-band with Gunn diodes. Int. Solid State Circuits Conf. Dig. Techn. Philadelphia, 1970, pp. 134-135.
10. Baskaran S., Robson P. N. Gain and noise figure for GaAs transferred-electron amplifiers at 34 GHz. Electronics Letters, 1972, vol. 8, No 5, pp. 109-110.

11. P. Jeppesen and B. I. Jeppsson, «LSA relaxation oscillator principles», IEEE Trans. Electron Devices, vol. ED-18, pp. 439-449, July 1971.
12. J. G. Ruch and W. Fawcett, «Temperature dependence of the transport properties of gallium arsenide determined by a monte Carlo method», J. Appl. Phys., vol. 41, pp. 3843-3849, Aug. 1970.
13. Электроны в полупроводниках. Вып.3. Диффузия горячих электронов. / В. Барейкс, А. Матуленис, Ю. Пожела, [и др.]; под ред. Ю. Пожелы. – Вильнюс: Моклас, – 1981 г. – 212 с.
14. J. A. Copeland and S. Knight, «Applications utilizing bulk negative resistance», in Semiconductors and Semimetals, vol. 7A, R. K. Willardson and A. C. Beer, Eds. New York, Academic Press, 1971, pp. 3-72.
15. Перлмен, Упадхияюла, Секанович, «Сверхвысокочастотные свойства и применения приборов с переносом электронов и отрицательной проводимостью», ТИИЭР, т. 59, № 8, стр. 115-125 (август 1971).