

Влияние питающего напряжения на скорость пролёта доменов в диоде Ганна

Г.А. Костров, Д.В. Завьялов.

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград

Аннотация: Представлены результаты расчётов перемещения домена сильного поля в диоде Ганна при постоянном питающем напряжении. Приведены графики спектра сигнала, скорости доменов, изменения напряжённости поля внутри диода с течением времени.

Ключевые слова: диод Ганна, СВЧ, моделирование физических процессов, Фурье спектр, радиолокационные системы.

Расширение области применения диода Ганна ставит большое количество задач перед исследователями, как теоретиками, так и практиками. Среди теоретических вопросов в первую очередь актуальным является математическое моделирование режимов работы диодов Ганна [1,2], позволяющее прогнозировать поведение экспериментальных схем при различных режимах работы генераторов. Второй класс задач – разработка аппаратных частей генераторов на диодах Ганна. Примером может служить работа [3], в которой рассматривается схема такого источника для импульсного режима работы диода.

В приёмопередающей технике важны шумовые характеристики используемых генераторов. В работе [4] исследуются спектры генерации автодина на базе диода Ганна в зависимости от питающего напряжения.

В области практического применения диодов Ганна изменение частоты генерации в зависимости от внешних факторов можно использовать для исследования диэлектрических свойств сыпучих материалов [5].

В [6] диод используется для создания генератора, способного заменить собой импульсные магнетронные СВЧ-генераторы в системах радиолокации. В отличие от громоздких электровакуумных схем, полупроводниковый генератор уместается на коротком отрезке волновода, что положительно сказывается на мобильности установки.

В работе [7], диод используется для генерации частот 32.9-39.6 ГГц для исследования антиагрегантной эффективности микроволнового облучения тромбоцитов. Так как диод Ганна имеет малую мощность, то образцы облучались так, что изменение температуры было плавным.

В радиолокации диоды Ганна находят применение не только как шумогенераторы, но и как часть устройства для повышения помехоустойчивости радиолокационных датчиков. В работе [8] говорится о таком применении. Для отсекавания автодинных помех излучателя рассматривается питающий ток у генератора на базе диода Ганна, который обрабатывается АЦП сигнального процессора.

Конструкция диодов претерпевает изменение в сторону увеличения мощности и рабочей частоты, что достигается планарным исполнением диодов в работе [9].

Исследование поведения диодов при их амплитудной и частотной модуляции питающего напряжения были проведены в работе [10]. В работе исследовалось влияние нестабильности источника питания на спектр генерации диодов.

Помимо перечисленных направлений исследований, актуальным, например, для контроля работы электронных приборов, является математическое моделирование процессов в кристаллических структурах диода Ганна и моделирование работы самого диода в различных электрических цепях.

В работе исследуется влияние низкочастотных наводок в цепи питания диода Ганна на Фурье спектр генерируемого СВЧ-сигнала.

Для исследования процессов формирования и движения домена в кристаллической структуре используется локально-полевая модель диода Ганна, основанная на предположении о том, что средняя дрейфовая скорость электронов зависит от мгновенного значения электрического поля [11], а коэффициент диффузии не зависит от приложенного электрического поля [12]. Моделируется последовательная схема включения диода с источником питания и резистивной нагрузкой.

Одним из основных, хорошо изученных экспериментально и теоретически, является пролётный доменный режим работы генератора на диоде Ганна. Такой режим имеет место при малом значении сопротивления нагрузки, когда амплитуда колебаний напряжения на диоде мала и не оказывает заметного влияния на процессы образования и движения доменов.

Уравнения математической модели диода получаются из уравнений Максвелла и уравнений непрерывности, где плотность тока определяется суммой трёх слагаемых: плотности тока проводимости, диффузионного тока и тока смещения.

Для одномерной модели диода Ганна совместное решение этих уравнений даст нам уравнение (1). Дискретизация равенства приводит нас к уравнению напряжённостей в явном виде, полученному из уравнения Пуассона для распределения поля (2):

$$\frac{\partial E}{\partial t} = D \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} - V(E) \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{e}{\varepsilon_a} D \frac{\partial n_0}{\partial x} - \frac{e}{\varepsilon_a} n_0 V(E) + \frac{I}{\varepsilon_a S} \quad (1)$$

$$E_i^{k+1} = E_i^k + \Delta t \left[D(E_i^k) \frac{E_{i+1}^k + E_{i-1}^k - 2E_i^k}{\Delta x^2} - V(E_i^k) \frac{E_{i+1}^k - E_{i-1}^k}{2\Delta x} + \frac{e}{\varepsilon_a} \left(D(E_i^k) \frac{n_{0i+1} - n_{0i-1}}{2\Delta x} - n_{0i} V(E_i^k) + \frac{U_0 - \frac{1}{2}\Delta x \sum_{j=2}^N (E_{j-1}^k + E_j^k)}{eRS} \right) \right], \quad (2)$$

где Δt – временной шаг интегрирования; $D(E_i^k)$ – коэффициент диффузии; Δx – пространственный шаг интегрирования; ε_a – абсолютная диэлектрическая проницаемость GaAs; n_{0i} – значение локальной концентрации легирующих примесей; U_0 – напряжение питания диода Ганна; N – число пространственных интервалов разбиения диода; R – сопротивление нагрузки; S – площадь сечения кристаллической структуры диода.

За нелинейную часть прибора отвечает скорость электронов в заданной точке пространства в данный момент времени $V(E_i^k)$, которая определяется, как [13]:

$$V(E_i^k) = \frac{\left[\mu_a E_i^k + V_{\text{нас}} \left(\frac{E_i^k}{E_{\text{пор}}} \right)^4 \right]}{\left[1 + \left(\frac{E_i^k}{E_{\text{пор}}} \right)^4 \right]},$$

где μ_a – подвижность электронов; $V_{\text{нас}}$ – скорость, соответствующая насыщению характеристики при большом поле; $E_{\text{пор}}$ – пороговое значение напряжённости в поле.

Для уравнения (2) должны выполняться условия Неймана для границ с контактами диода:

$$E_1^k = E_2^k \quad E_N^k = E_{N-1}^k$$

Начало домену дает случайное повышение концентрации электронов в окрестности некоторой точки, где имеются различные дефекты кристаллической решетки. Таким образом, домен формируется у катода и движется к аноду со скоростью, равной дрейфовой скорости электронов (для арсенида галлия $\sim 10^5$ м/с). Достигнув анода, домен втягивается в него. Значительная часть напряжения, приложенного к образцу, снижается на

домене; вне домена напряженность поля намного меньше пороговой, и флуктуации заряда развиваться не могут, т.е. как правило в объеме полупроводника возникает только один домен сильного поля. В то время, как один домен исчезает на аноде, на катоде зарождается новый домен, и в цепи нагрузки генерируются короткие импульсы. Расстояние между импульсами равно времени пролета домена через рабочую область диода.

На каждом временном шаге находится напряжённость поля во всех точках пространства в диоде [14]. Таким образом, появляется возможность отследить перемещение максимумов напряжённости, соответствующих домену сильного поля. На рис.1 представлены графики напряжённостей, по которым можно проследить динамику перемещения зарядов. Максимумы, образуются неоднородностями, из которых и начинается генерация при преодолении напряжением питания пороговой напряжённости поля. Сначала напряжённость поля постепенно набирает своё максимальное значение с течением времени, затем максимум напряжённости перестаёт изменяться, и домен движется к контактам анода диода. В конце пути домен поглощается стенкой анода, после этого процесс формирования домена начинается заново.

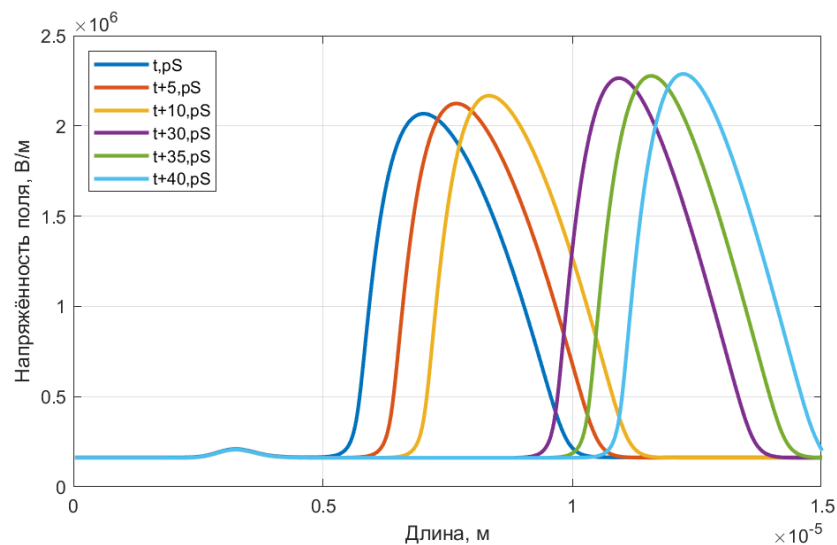


Рис. 1. – Изменение напряжённости поля внутри диода с течением времени при постоянном напряжении U_0

Скорость перемещения домена зависит от питающего напряжения диода Ганна. При увеличении напряжения изменяется энергия, переносимая доменом. Для различных значений питающего напряжения, получен график зависимости скорости перемещения доменов от напряжения питания, приведенный на рис.2.

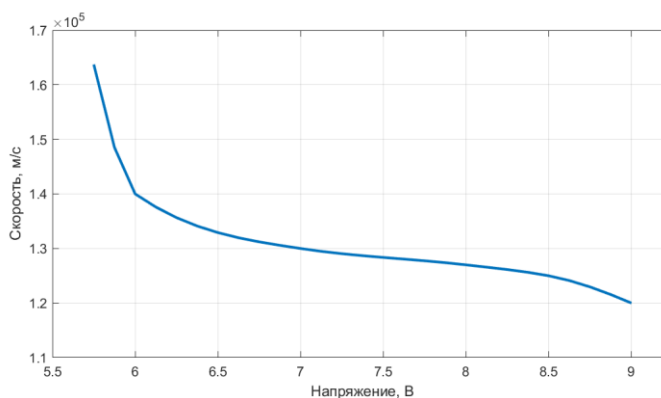


Рис. 2. – Зависимость скорости пролёта домена в зависимости от напряжения питания диода Ганна

По графику видно, что с увеличением напряжения питания диода уменьшается скорость перемещения доменов сильного поля. Это связано с тем, что при приложении большего внешнего поля уменьшается добротность домена, увеличивается количество основных носителей заряда, при этом неоднородность в диоде остаётся постоянной. Для образования нового домена формируется более сильное поле, эффективная масса увеличивается.

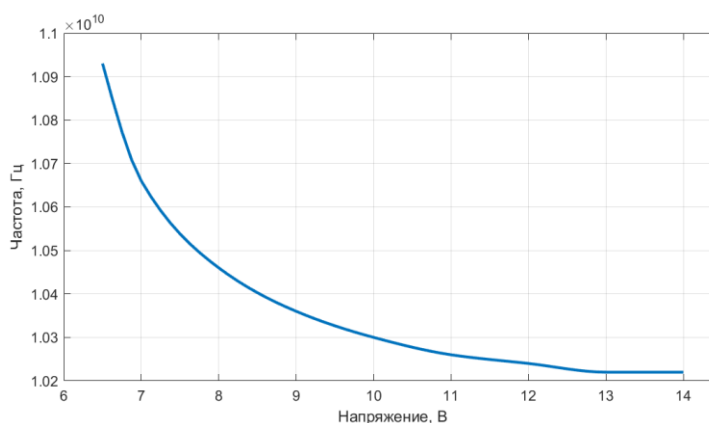


Рис. 3. – Зависимость частоты основной гармоники Фурье спектра тока выходного сигнала от напряжения питания

Скорость доменов существенно зависит от величины питающего напряжения. При изменении скорости изменяется и частота генерации. На рис.3 представлена зависимость частоты основной гармоники Фурье спектра тока выходного сигнала от напряжения питания.

Для подтверждения работоспособности программы была собрана экспериментальная установка на базе диода Ганна 3А703Б. Диод помещён в волновод с подвижной стенкой, электрические контакты подключены к стабилизированному источнику питания диода напрямую. Полученные данные совпадают с экспериментальными характеристиками диодов Ганна, работающими на участках после номинального напряжения питания на спаде частотных характеристик.

Спектральный анализ выходного сигнала проводится методом быстрого преобразования Фурье функции мощности тока через диод.

На рис.4 показан спектр выходного сигнала при напряжении питания 9 В. Основная гармоника соответствует частоте 10.36 ГГц, также присутствуют вторая и третья гармоники.

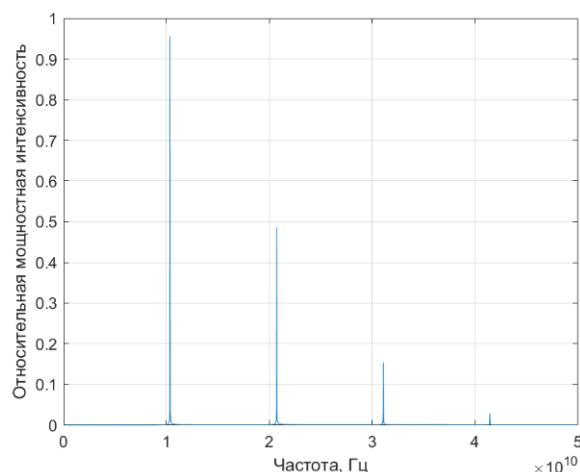


Рис. 4. – Спектр выходного сигнала при напряжении питания 9 В.

Для исследования влияния коротковолновых наводок в цепи питания диода Ганна была собрана схема с двумя блоками питания. Первый обеспечивает постоянное напряжение питания, а второй – генерирует

гармонические колебания, при этом соединение между блоками устроено так, чтобы между ними не возникало обратной связи. На рис.5 представлен спектр, получаемый при моделировании процессов переноса доменов в диоде и спектр частот генерации диода 3A703Б в волноводе на экспериментальной установке.

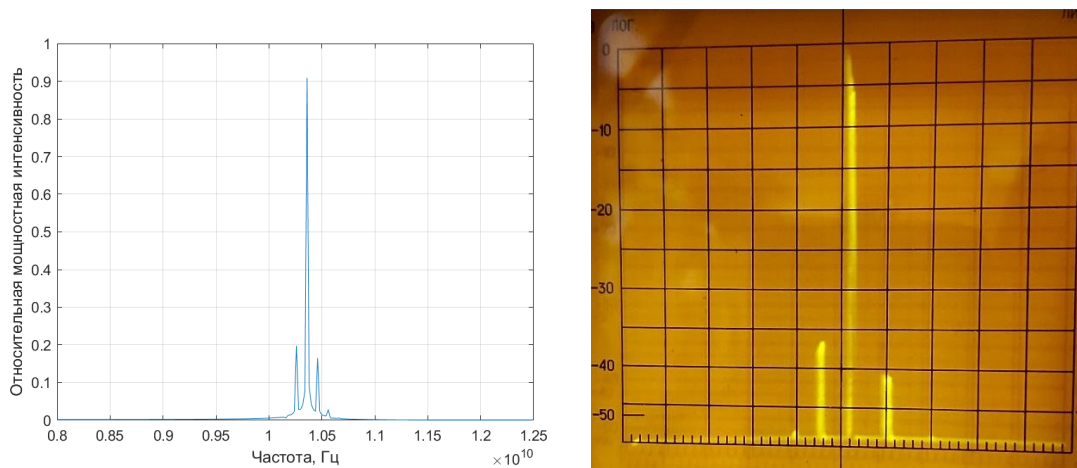


Рис. 5. – Спектр Фурье, наблюдаемый в программе и на экспериментальной установке.

Экспериментально получилось представить график Фурье спектра диода, где видно, что при добавлении коротковолновых наводок появляются дополнительные гармоники, отстающие от основной генерируемой частоты на значение частоты наводки.

Форма неоднородностей в кристаллической решётке при их одинаковой ширине не влияет на образование доменов. Исследованы прямоугольная, параболическая и градиентная функции изменения концентрации легирующих примесей. Если функция изменяется более плавно, то максимальная амплитуда напряжённостей доменов будет больше, но домен будет формироваться немного дольше.

Полученную модель можно применять для расчётов полей с различной нагрузкой в электрической цепи. Планируется добавить в схему LC-контур, что позволит производить расчёты для разных волноводов. Это должно упростить разработку и отладку экспериментальных схем.

Литература

1. Пушкарев В.П., Пелявин Д.Ю., Ламонова С.А. Нелинейная модель диода Ганна // Радиотехника, электроника и связь ("РЭС-2013"): Сборник докладов II Международной научно-технической конференции, Омск, 01–04 октября 2013 года. - Омск: Омский научно-исследовательский институт приборостроения, 2013. - С. 364-369.
 2. Пушкарев В.П. Импульсный генератор на диоде Ганна с повышенной стабильностью выходных параметров // Известия Томского политехнического университета. - 2012. - №4. - С. 102-105.
 3. Юрченко Л.В. Хаотические режимы генерации в протяжённой микрополосковой линии с цепочкой диодов Ганна // Электроника. - 2009. - №3. - С. 14-19.
 4. Гошин Г.Г., Трубочёв А.А. Экспериментальное исследование автодина на диоде Ганна // доклады ТУСУРа. - 2016. - №2. - С. 174-178.
 5. Костров Г.А. СВЧ влагомер на диоде Ганна // Сборник научных трудов, по материалам XVII международной научно-практической конференции 12 июня 2018 г. - СПб. ЦНК МОАН, 2018. - С. 9-13.
 6. Титов А.А. Импульсный сверхвысокочастотный генератор для систем ближней радиолокации и радионавигации // Приборы и техника эксперимента. - 2011. - №5. - С. 111-114.
 7. Чеканов А.В., Щелконогов В.А., Баранова О.А. Антиагрегатная эффективность микроволнового излучения // Электронная техника. - 2022. - №2. - С. 90-95.
 8. Носков В.Я. Метод повышения помехоустойчивости радиолокационных датчиков с переключением частоты // Ural Radio Engineering Journal. - 2021. - №5. - С. 284-304.
 9. Самойлов В.И. Планарный диод Ганна // Патент на изобретение №2780380, бюл. №27, №2021108013 - 2022 - С. 1-7.
-

10. Носков В.Я., Игнатков К.А., Шайдуров К.Д. Результаты экспериментальных исследований автодина на диоде Ганна с амплитудно-частотной модуляцией // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. - 2020. - №1. - С. 390-391.

11. Gunn J.B. Instabilities of Current in III-V Semiconductors // IBM Journal of Research and Development. - 1964. - №8. - С. 141-159.

12. Веселов Г.И., Егоров Е.Н., Алехин Ю.Н. Микроэлектронные устройства СВЧ: Учеб. Пособие для радиотехнических специальностей вузов. - М.: Высшая школа, 1988. - 280 с.

13. McCumber D.E. Theory of negative-conductance amplification and of Gunn instabilities in Two-Valley semiconductors // IEEE Trans. Electron Devices. - 1966. - №1. - С. 4-21.

14. Ruch J.G. Transport properties of GaAs // Phys. Rev.. - 1969. - №3. - С. 921-931.

References

1. Pushkarev V.P., Peljavin D.Ju., Lamonova S.A. Radiotekhnika, jelektronika i svjaz' ("RJeIS-2013"): Sbornik dokladov II Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii, Omsk, 01–04 oktjabrja 2013 goda. Omsk: Omskij nauchno-issledovatel'skij institut priborostroenija, 2013. pp. 364-369.

2. Pushkarev V.P. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. 2012. №4. pp. 102-105.

3. Yurchenko L.V. Elektronika. 2009. №3. pp. 14-19.

4. Goshin G.G., Trubachev A.A. doklady TUSURa. 2016. №2. pp.174-178.

5. Kostrov G.A. Sbornik nauchnykh trudov, po materialam XVII mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii 12 iyunya 2018 g. SPb.: TsNK MOAN, 2018. pp. 9-13.

6. Titov A.A. Pribory i tekhnika eksperimenta. 2011. №5. pp. 111-114.



7. Chekanov A.V., Shchelkonogov V.A., Baranova O.A. Elektronnaya tekhnika. 2022. №2. pp. 90-95.
8. Noskov V.Ya. Ural Radio Engineering Journal. 2021. №5. pp. 284-304.
9. Samojlov V.I. Planarnyj diod Ganna [Planar Gunn Diode] Patent na izobretenie №2780380, bull. №27, №2021108013. 2022. pp. 1-7.
10. Noskov V.Ya., Ignatkov K.A., Shaydurov K.D. SVCh-tehnika i telekommunikatsionnye tekhnologii. 2020. №1. pp. 390-391.
11. Gunn J.B. Journal of Research and Development. 1964. №8. pp.141-159.
12. Veselov G.I., Egorov E.N., Alekhin Yu.N. Ucheb. Posobie dlya radiotekhnicheskikh spetsial'nostey vuzov. [Microelectronic microwave devices: Proc. Manual for radio engineering specialties of universities.] M.: Vysshaya shkola, 1988. 280 p.
13. McCumber D.E. IEEE Trans. Electron Devices. 1966. №1. pp. 4-21.
14. Ruch J.G. Phys. Rev. 1969. №3. pp. 921-931.