

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЕЛИЧИНЫ НАПРЯЖЕНИЯ ПИТАНИЯ ДИОДА ГАННА НА ФУРЬЕ-СПЕКТР ГЕНЕРИРУЕМОГО ТОКА С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ РАЗНОСТЕЙ

Костров Г. А., Жариков Д. Н., Завьялов Д. В.

Волгоградский Государственный Технический Университет, Волгоград, Россия,
kostroff.jora@mail.ru

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.

В разработке генераторов электромагнитного излучения СВЧ уже давно актуальной является задача освоения пикосекундного диапазона времен нарастания, спада и длительностей импульсов.

В последние годы диод Ганна всё чаще исследуется [1-5]. Например, 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.

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 [7], а коэффициент диффузии не зависит от приложенного электрического поля [8]. 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 следующее уравнение.

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

Дискретизация этого равенства приводит нас к уравнению напряжённостей в явном виде, полученному из уравнения Пуассона для распределения поля:

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

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 [9]:

$$V(E_i^k) = \frac{\left[\mu_a E_i^k + V_{\text{нас}} \left(\frac{E_i^k}{E_{\text{пор}}} \right)^4 \right]}{\left[1 + \left(\frac{E_i^k}{E_{\text{пор}}} \right)^4 \right]}, \quad (3)$$

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:

$$E_1^k = E_2^k \quad E_N^k = E_{N-1}^k \quad (4)$$

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 [10]. Таким образом, появляется возможность отследить перемещение максимумов напряжённости, соответствующих домену сильного поля. На рисунке 1 представлены графики напряжённостей, по которым можно проследить динамику перемещения зарядов. Максимумы,

находящиеся в левой части 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. Через некоторое время 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.

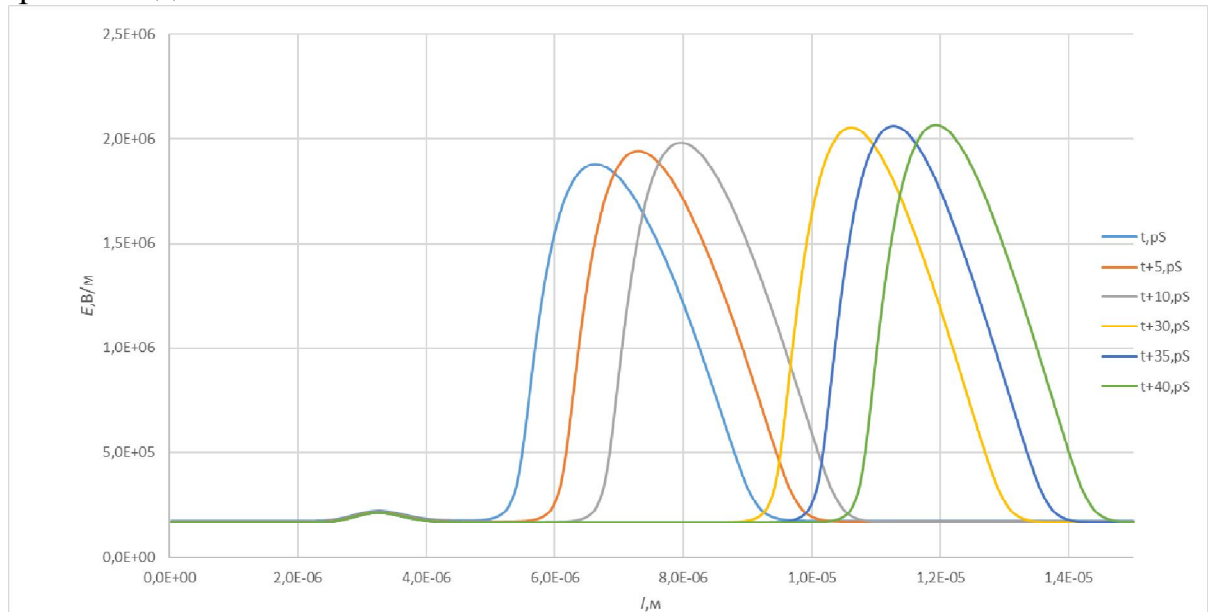


Рисунок 1 – Изменение напряжённости поля внутри диода с течением времени при постоянном напряжении U_0

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 рисунке 2.

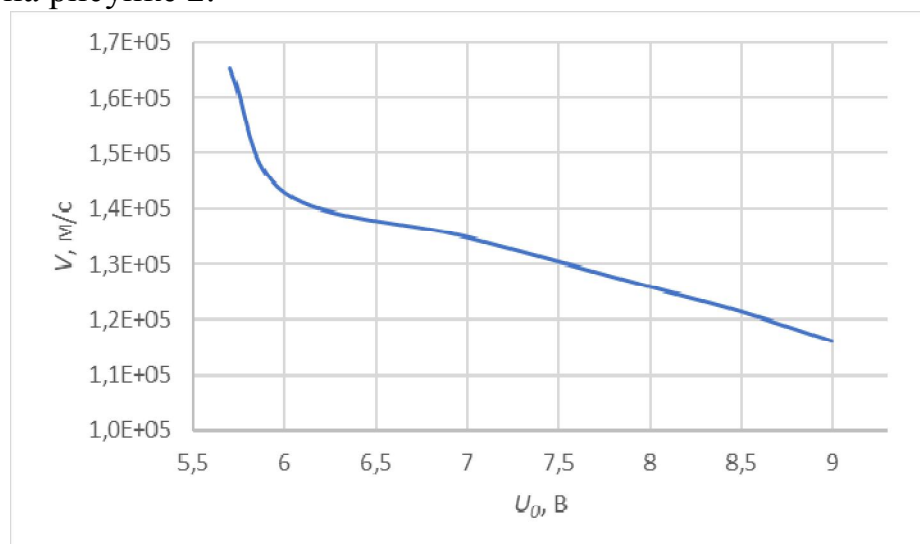


Рисунок 2 – Зависимость скорости пролёта домена в зависимости от напряжения питания диода Ганна

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.

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

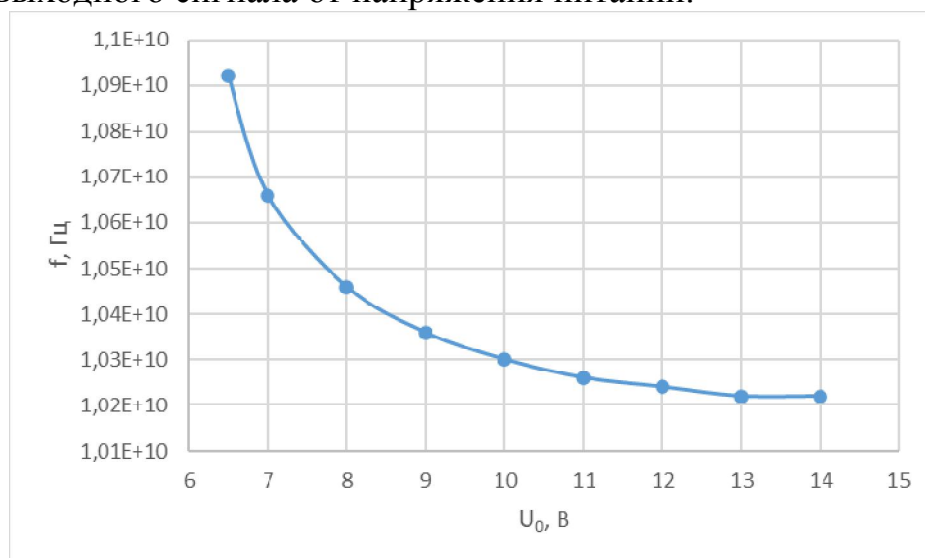


Рисунок 3 – Зависимость частоты основной гармоники Фурье спектра тока выходного сигнала от напряжения питания

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.

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., Нелинейная модель диода Ганна / В. П. Пушкарев, Д. Ю. Пелявин, С. А. Ламонова – Томск : Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов, 2013. – С. 1-7;
- 2 Пушкарёв В. П., Импульсный генератор на диоде Ганна с повышенной стабильностью выходных параметров / В. П. Пушкарёв и др. – Известия Томского политехнического университета. – т. 320 №4, 2012. – С.102-105;
- 3 Юрченко Л. В., Хаотические режимы генерации в протяжённой микрополосковой линии с цепочкой диодов Ганна / Л. В. Юрченко, В. Б. Юрченко – Электроника, №3, 2009. – С. 14-19;
4. Гошин Г. Г., Экспериментальное исследование автодина на диоде Ганна / Г. Г. Гошин, А. А. Трубочёв – доклады ТУСУРа. –т. 19, №2, 2016. – С. 174-178.
5. Костров Г. А., СВЧ влагомер на диоде Ганна / Г. А. Костров. – Сборник научных трудов, по материалам XVII международной научно-практической конференции 12 июня 2018 г. – Изд. ЦНК МОАН, 2018. – 48 с.;
6. Титов А. А., Импульсный сверхвысокочастотный генератор для систем ближней радиолокации и радионавигации 2011 г. / А. А. Титов, В. П. Пушкарев, Д. Ю. Пелявин –М. : Приборы и техника эксперимента, №5, 2011 С.111-114.
7. Gunn J. B., Instabilities of Current in III-V Semiconductors / J. B. Gunn – IBM Journal of Research and Development, Vol. 8, 1964. – С.141-159.
8. Веселов Г. И., Микроэлектронные устройства СВЧ: Учеб. Пособие для радиотехнических специальностей вузов / Г. И. Веселов, Е. Н. Егоров, Ю. Н. Алехин – М. : Высшая школа, 1988, с.280
- 9 McCumber D. E., Theory of negative-conductance amplification and of Gunn instabilities in Two-Valley semiconductors / D. E. McCumber – IEEE Trans. Electron Devices, Vol. ed-13, № 1, 1966. – С. 4-21.
10. Ruch J. G., Transport properties of GaAs / J. G. Ruch – Phys. Rev., Vol 174, № 3, 1969. – С. 921-931.

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE SUPPLY VOLTAGE OF THE
GUNN DIODE ON THE FOURIER SPECTRUM OF THE GENERATED
CURRENT USING FINITE DIFFERENCE SIMULATION

Kostrov G. A., Zjarikov D. N., Zav'yalov D. V.
Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

The results of calculations of the displacement of a strong field domain in a Gunn diode at a constant supply voltage are presented. Graphs of the signal spectrum, domain velocity, changes in the field strength inside the diode over time are given.

Keywords: Gunn diode, microwave frequency, simulation of physical processes