

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2021-35-05>

УДК 537.811, 537.621

Я. С. ВОЛЬВАЧ¹, к. ф.-м. наук, інженер

e-mail: ivolvach@eng.ucsd.edu ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0537-2092>

О. М. ДУМІН², д. ф.-м. наук, доц.

e-mail: dumin@karazin.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5067-9689>

В. А. ПЛАХТІЙ², аспірант, м.н.с

e-mail: plakhtii@karazin.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0442-2716>

П. Г. ФОМІН², студент

e-mail: miroriiis@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6346-4270>

¹ Material Science & Engineering Department, University of California, San Diego (UCSD), 9500 Gilman Drive, La Jolla, CA 92093-0418, USA

² Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, 61022, м. Харків, м. Свободи, 4

ПІДВИЩЕННЯ ПОТУЖНОСТІ ГЕНЕРАТОРА НА НЕЛІНІЙНІЙ МАГНІТНІЙ НАНОСТРУКТУРІ

Актуальність. Одним з найбільш перспективних напрямів розвитку сучасної електроніки вважається створення приладів спінтроніки, які повинні прийти на заміну традиційним напівпровідниковим елементам. Використання спіну електрона як носія інформації в магнітних наноструктурах може докорінно змінити сучасне життя.

Мета роботи. Метою даної роботи є пошук способів підвищення потужності генератора на магнітній наноструктурі шляхом зміни його електричної схеми та більш оптимальних зовнішніх електромагнітних параметрів, що впливають на стан електронів у досліджуваній шаруватій структурі.

Матеріали та методи. Вирішення поставленої задачі проводиться шляхом числового моделювання магнітної наноструктури за допомогою спеціально створеного мікромагнітного симулятора, в якому реалізований алгоритм одночасного розв'язання системи рівнянь Максвелла та Ландау-Ліфшиця-Гільберта. Розв'язання такої складної задачі прискорюється використанням квазістатичного наближення при розв'язанні системи рівнянь Максвелла, що є обгрунтованим через малі розміри розрахункової області і порівнянні із глибиною скін-шару. Подальші розрахунки електродинамічної системи проводяться за допомогою метода скінченних елементів. Для отримання кращих частотних та енергетичних параметрів генератора пропонується введення резонансної ланки до принципової схеми досліджуваного генератора, який збуджується короткими наносекундними імпульсами.

Результати. Запропонована схема генератора на магнітній наноструктурі, що містить резонатор із зосередженими параметрами, та отримана в загальному вигляді система нелінійних інтегро-диференціальних рівнянь відносно електричних струмів. Числовий розрахунок цієї системи, що включає окрім розрахунку схеми ще й моделювання нелінійної електродинамічної структури методом скінченних елементів. Отримані енергетичні і спектральні характеристики досліджуваного генератора. Проведений пошук оптимальних значень геометричних параметрів наноструктури та величини зовнішнього поздовжнього підмагнічування.

Висновки. Внаслідок складної природи нелінійних процесів у магнітній наноструктурі використання зовнішнього резонатора, який би міг покращити спектральні параметри згенерованого струму, не дало помітного покращення. Вплив величини зовнішнього намагнічення на вихідну потужність генератора є складним і нелінійним, але, в цілому, зменшення рівня намагнічування призводить до помітного зменшення потужності. Встановлено, що для покращення енергетичних характеристик генератора оптимальною є товщина магнітного шару у 6 нм.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: часовий простір, рівняння Ландау-Ліфшиця-Гільберта, нелінійна магнітна наноструктура, квазістатичне наближення, параметричний генератор

Як цитувати: Вольвач ЯС, Думін ОМ, Плахтій ВА, Фомін ПГ. Підвищення потужності генератора на нелінійній магнітній наноструктурі. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2021;35:56-63. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2021-35-05>

In cites: Volvach IS, Dumin OM, Plakhtii VA, Fomin PG. Increasing power of generator on nonlinear magnetic nanostructure. Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series "Radio Physics and Electronics". 2021;35:56-63. (In Ukrainian). <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2021-35-05>

ВСТУП

Магніторезистивна пам'ять з довільним доступом (MRAM) вважається перспективною технологією постійної пам'яті через її тривале зберігання даних і надійність [1]. Для розрахунку нанорозмірних магнітних

© Вольвач Я. С., Думін О. М., Плахтій В. А., Фомін П. Г., 2021

Open access. This article is licensed under a Creative Commons Attribution 3.0 <http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>

елементів використовують метод скінчених елементів [2] або метод скінчених різниць [3]. Для прискорення розрахунку таких задач розвивають методи адаптації симуляторів для паралельного розрахунку на графічних процесорах [4]. Науковці розробляють окремі електродинамічні симулятори, які можуть точніше та швидше розраховувати та оптимізувати магнітні наноструктури [2], [5-6]. Проте для отримання пристрою з конкретними вихідними параметрами, наприклад, частотою генерації, заданим робочим діапазоном частот, потужністю генерації, геометричними розмірами тощо необхідно проведення оптимізації. Так, наприклад, в низці робіт [7-11] описані методи оптимізації, за допомогою яких можна розрахувати параметри системи.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

На основі схеми генератора, представленій в попередній роботі [12], пропонується покращена схема, в якій для покращення спектрального складу коливань додатково введений послідовний резонансний контур, як показано на Рис. 1. Через взаємний вплив схеми пристрою на нелінійну наноструктуру необхідно провести всебічний аналіз запропонованої моделі. Були вибрані такі початкові параметри пристрою та стали числового моделювання (Рис. 1): $C1 = 7e-12$ Ф, $L1 = 0,3e-6$ Гн, $R1 = 10$ Ом, $Rsv = 1000$ Ом, $d = 6e-7$ см, $dt = 0,01e-12$, $V_{max} = 11$ В, $f0 = 0.1e9$ Гц.

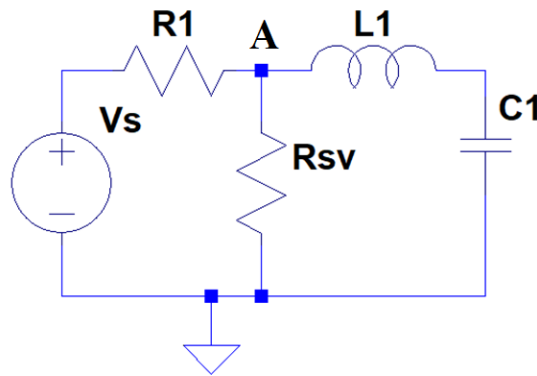


Рис. 1 Принципова схема генератора на нелінійній наноструктурі R_{sv} , що збуджується короткими імпульсами V_s наносекундної тривалості.

Fig. 1 Schematic circuit of the generator on a nonlinear nanostructure R_{sv} excited by short pulses V_s of nanosecond duration.

Часові залежності струмів були розраховані за допомогою підходів, описаних в [7, 12], де паралельно розв'язуються пов'язані диференціальні рівняння Ландау-Ліфшиця-Гілберта (LLGE) та магнітоквазістатичні рівняння Максвелла (PM).

РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ

Рівняння напруги для лівого кола:

$$R_1 I_1 + R_{sv} I_{sv} = V_s. \quad (1)$$

Рівняння напруги для правого кола,

$$R_{sv} I_{sv} = L_1 \frac{dI_{L1}}{dt} + \frac{1}{C_1} \int I_{C1} dt. \quad (2)$$

Відповідно до схеми, ми маємо ємність $C1$ та індуктивність $L1$, які з'єднані послідовно $I_{C1} = I_{L1}$. Для вузла А маємо,

$$I_1 = I_{sv} + I_{L1}, \quad (3)$$

де

$$I_1 = \frac{V_s - R_{sv} I_{sv}}{R_1}, \quad (4)$$

як слідує з (1). Тоді

$$\frac{dI_{L1}}{dt} = \frac{1}{L_1} \left(R_{sv} (I_1 - I_{L1}) - \frac{1}{C_1} \int I_{C1} dt \right), \quad (5)$$

де використано, згідно (3),

$$I_{sv} = I_1 - I_{L1}. \quad (6)$$

Таким чином, у вигляді (5), постановка задачі допускає застосування ітеративної процедури знаходження шуканих параметрів електричного кола.

РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЛОВОГО МОДЕЛЮВАННЯ

В попередній роботі [1] був описаний підхід, за допомогою якого можна розраховувати подібні структури. Проведена оптимізація генератора з метою підвищення результуючої потужності високочастотної генерації шляхом підбору належної комбінації параметрів задачі.

На Рис. 2 зображена часова залежність струму через індуктивність L_1 .

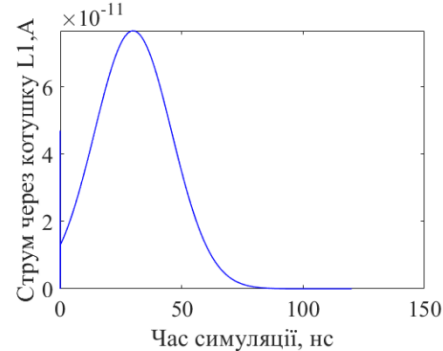


Рис. 2 Залежність сили струму через індуктивність L_1 від часу.
Fig. 2 Time dependence of current amplitude through inductance L_1 .

В процесі протікання струму гаусової форми через нелінійний елемент R_{sv} в ньому з'являються високочастотні коливання магнітних компонент, а саме, зміна m_x та m_y . Цей процес зміни намагнічування в трьох напрямках представлений на Рис. 3.

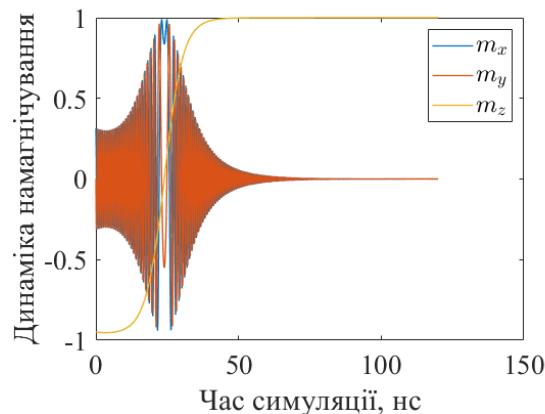


Рис. 3 Залежність намагніченості від часу
Fig. 3 Time dependence of magnetization

Як наслідок коливання магнітних компонент викликає зміну миттєвого опору R_{sv} . Це можна помітити на часовій залежності сили струму через цей елемент, як відображено на Рис. 4.

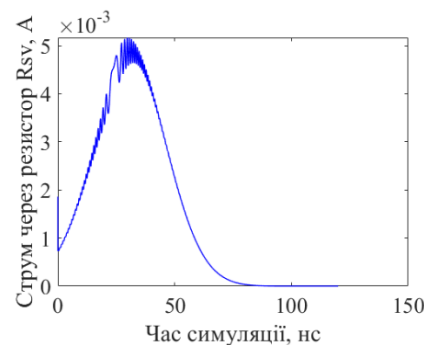


Рис. 4 Залежність сили струму через нелінійний опір R_{sv} від часу.
Fig. 4 Time dependence of current through nonlinear resistance R_{sv} .

Виявилось, що візуально струм через резистор R_1 майже не відрізняється від струму через нелінійний елемент, що представлено на Рис. 5.

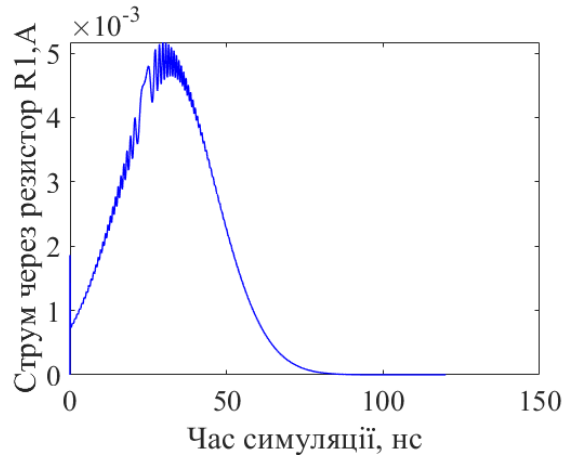


Рис. 5 Залежність сили струму через опір R_1 від часу.
Fig. 5 Time dependence of current through resistance R_1 .

Для кращої оцінки характеристик виникаючого високочастотного коливання застосований фільтр високих частот, що дозволяє виділити малу амплітуду генерованого коливання (Рис. 6) та прибрати збуджуючий імпульс (Рис. 2).

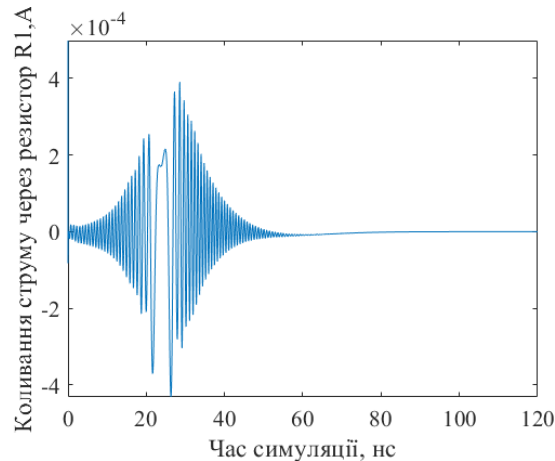


Рис. 6 Залежність високочастотної складової струму через резистор R_1 від часу.
Fig. 6 Time dependence of the high-frequency component of the current through the resistor R_1 .

Для кращої оцінки характеристик виникаючого високочастотного коливання, а саме частоти генерації та його загальної потужності, розрахований спектр амплітуди сили струму через резистор R_1 . На Рис. 7 зображений типовий приклад спектру коливань, які виникають на резисторі R_1 .

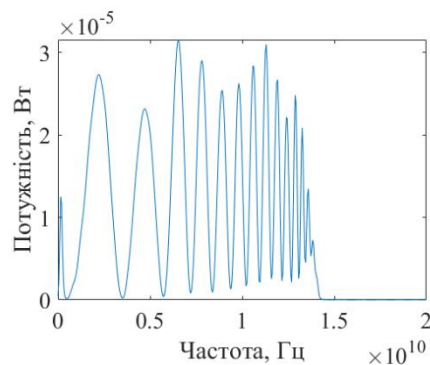


Рис. 7 Частотна залежність потужності високочастотної складової через опір R_1 .
Fig. 7 Frequency dependence of the power of the high-frequency component through the resistance R_1 .

Для підвищення потужності високочастотного коливання було проведено дослідження впливу початкових параметрів на енергію вихідного коливання. Так, на Рис. 8 зображена залежність потужності сигналу від амплітуди поздовжньої магнітної компоненти m_z . Бачимо, що найбільша енергія сигналу досягається при амплітуді m_z рівній -1 і при її збільшенні потужність монотонно спадає.

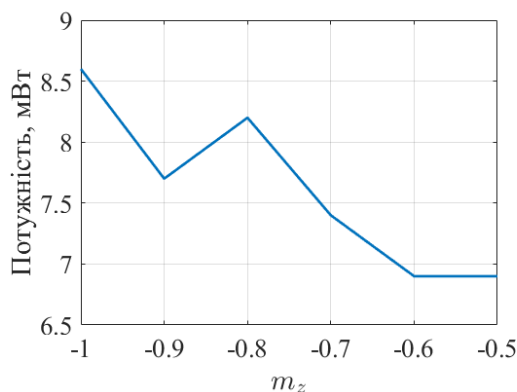


Рис. 8 Залежність потужності високочастотної складової від рівня усередненої за об'ємом z складової нормованої намагніченості

Fig. 9 Dependence of the power of the high-frequency component on the level of the volume-averaged component z of the normalized magnetization

Для значення усередненої за об'ємом нормованої намагніченості $m_z = -1$ було проведено дослідження впливу товщини нелінійного магнітного шару елемента R_{sv} (Рис. 9). Було встановлено, що максимальна потужність сигналу досягається при товщині, рівній 6 нм.

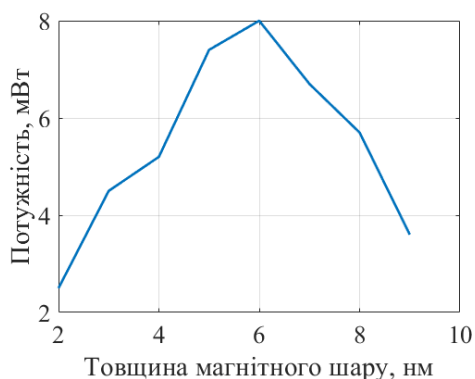


Рис. 9 Залежність потужності високочастотної складової від товщини магнітного шару

Fig. 8 Dependence of the power of the high-frequency component on the thickness of the magnetic layer

ВИСНОВОК

В даній роботі були проаналізовані умови генерації високочастотних коливань нелінійної магнітної наноструктури. З'ясовано, що максимальна вихідна потужність генерації досягається при товщині нелінійного магнітного шару у 6 нм та коли значення нормованої поздовжньої намагніченості дорівнює -1. Для обраної моделі вдалось отримати найвищу частоту спектру генерованих коливань у 15 ГГц.

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ikegawa S, Mancoff FB, Janesky J, Aggarwal S. Magnetoresistive Random Access Memory: Present and Future. IEEE Transactions on Electron Devices. April 2020;67(4):1407-1419. <https://doi.org/10.1109/TED.2020.2965403>
2. Fischbacher T, Franchin M, Bordignon G, Fangohr H. A systematic approach to multiphysics extensions of finite-element-based micromagnetic simulations: Nmag. IEEE Trans. Magn. June 2007;43(6):2896-2898. <http://dx.doi.org/10.1109/TMAG.2007.893843>

3. Recio G, Estebanez C. Micromagnetic modeling on magnetization dynamics with lossy magnetic material in thin film heads by FDTD calculations. *Appl. Comput. Electrom. Sept. 2012;27(9):717–725.*
4. Lopez-Diaz L, Aurelio D, Torres L, Martinez E, Hernandez-Lopez M.A, Gomez J, Alejos O, Carpentieri M, Finocchio G, Consolo G. Micromagnetic simulations using Graphics Processing Units. *J. Phys. D: Appl. Phys. July 2012;45(32):323001.* <https://doi.org/10.1088/0022-3727/45/32/323001>
5. Vansteenkiste A, Wiele BV. MuMax: a new high performance micromagnetic simulation tool. *J. Magn. Magn. Mater. Nov. 2011;323(21):2585–2591.* <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2011.05.037>
6. Chang R, Li S, Lubarda MV, Livshitz B, Lomakin V. FastMag: Fast micromagnetic simulator for complex magnetic structures (invited). *Journal of Applied Physics. 2011;109:07D358.* <https://doi.org/10.1063/1.3563081>
7. Couture S, Chang R, Volvach I, Goncharov A, Lomakin V. Coupled finite-element micromagnetic-integral equation electromagnetic simulator for modeling magnetization-eddy currents dynamics. *IEEE Transactions on Magnetics. December 2017;53(12).* <https://doi.org/10.1109/TMAG.2017.2745470>
8. Volvach I, Kuteifan M, Lubarda MV, Lomakin V. Circuit-Integrated Micromagnetic Modeling of MRAM Devices. 62-nd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials. Pittsburgh, Pennsylvania. Nov 6-10, 2017. p. 658.
9. Kuteifan M, Volvach I, Lomakin V. Forward Flux Sampling Method with Spin Transfer Torque for the Calculation of Thermal Relaxation Times of Free Layers. 62-nd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials. Pittsburgh, Pennsylvania. Nov 6-10, 2017. p. 659.
10. Volvach I, Kuteifan M, Marko V, Lubarda MV, Lomakin V. Circuit-Integrated Micromagnetic Modeling of MRAM Devices. Special joint poster session on MRAM. IEEE 63-rd International Electron Devices Meeting IEDM. San Francisco, California. Dec 4–7, 2016.
11. Volvach I, Kuteifan M, Lubarda MV, Lomakin V. Integrating FastMag with NGSPICE Framework. Research Review & Advisory Council Meeting (CMRR). San Diego, California. May 18-19, 2017. p. 19.
12. Вольвач ЯС, Думін ОМ, Плахтій ВА, Прищенко ОА. Генератор коливань на нелінійній магнітній наноструктурі. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Радіофізика та електроніка. 2018;28:34–43.*

REFERENCES

1. Ikegawa S, Mancoff FB, Janesky J, Aggarwal S. Magnetoresistive Random Access Memory: Present and Future. *IEEE Transactions on Electron Devices. April 2020;67(4):1407-1419.* <https://doi.org/10.1109/TED.2020.2965403>
2. Fischbacher T, Franchin M, Bordignon G, Fangohr H. A systematic approach to multiphysics extensions of finite-element-based micromagnetic simulations: Nmag. *IEEE Trans. Magn. June 2007;43(6):2896–2898.* <http://dx.doi.org/10.1109/TMAG.2007.893843>
3. Recio G, Estebanez C. Micromagnetic modeling on magnetization dynamics with lossy magnetic material in thin film heads by FDTD calculations. *Appl. Comput. Electrom. Sept. 2012;27(9):717–725.*
4. Lopez-Diaz L, Aurelio D, Torres L, Martinez E, Hernandez-Lopez M.A, Gomez J, Alejos O, Carpentieri M, Finocchio G, Consolo G. Micromagnetic simulations using Graphics Processing Units. *J. Phys. D: Appl. Phys. July 2012;45(32):323001.* <https://doi.org/10.1088/0022-3727/45/32/323001>
5. Vansteenkiste A, Wiele BV. MuMax: a new high performance micromagnetic simulation tool. *J. Magn. Magn. Mater. Nov. 2011;323(21):2585–2591.* <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2011.05.037>
6. Chang R, Li S, Lubarda MV, Livshitz B, Lomakin V. FastMag: Fast micromagnetic simulator for complex magnetic structures (invited). *Journal of Applied Physics. 2011;109:07D358.* <https://doi.org/10.1063/1.3563081>
7. Couture S, Chang R, Volvach I, Goncharov A, Lomakin V. Coupled finite-element micromagnetic-integral equation electromagnetic simulator for modeling magnetization-eddy currents dynamics. *IEEE Transactions on Magnetics. December 2017;53(12).* <https://doi.org/10.1109/TMAG.2017.2745470>
8. Volvach I, Kuteifan M, Lubarda MV, Lomakin V. Circuit-Integrated Micromagnetic Modeling of MRAM Devices. 62-nd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials. Pittsburgh, Pennsylvania. Nov 6-10, 2017. p. 658.
9. Kuteifan M, Volvach I, Lomakin V. Forward Flux Sampling Method with Spin Transfer Torque for the Calculation of Thermal Relaxation Times of Free Layers. 62-nd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials. Pittsburgh, Pennsylvania. Nov 6-10, 2017. p. 659.
10. Volvach I, Kuteifan M, Marko V, Lubarda MV, Lomakin V. Circuit-Integrated Micromagnetic Modeling of MRAM Devices. Special joint poster session on MRAM. IEEE 63-rd International Electron Devices Meeting IEDM. San Francisco, California. Dec 4–7, 2016.
11. Volvach I, Kuteifan M, Lubarda MV, Lomakin V. Integrating FastMag with NGSPICE Framework. Research Review & Advisory Council Meeting (CMRR). San Diego, California. May 18-19, 2017. p. 19.

12. Volvach IS, Dumin OM, Plakhtii VA, Pryshchenko OA. Oscillation generator on a nonlinear magnetic nanostructure. Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series "Radio Physics and Electronics". 2018;28:34–43. (In Ukrainian)

Стаття надійшла до редакції: 10 вересня 2021 р.

Рекомендовано до друку: 25 жовтня 2021 р.

INCREASING POWER OF GENERATOR ON NONLINEAR MAGNETIC NANOSTRUCTURE

I. S. Volvach¹, O. M. Dumin², V. A. Plakhtii², P. G. Fomin²

¹ Material Science & Engineering Department, University of California, San Diego (UCSD), 9500 Gilman Drive, La Jolla, CA 92093-0418, USA

² V. N. Karazin Kharkiv National University, 4 Svobody sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

Background: One of the most promising areas of development of modern electronics is the creation of spintronic devices, which should replace the traditional semiconductor elements. The use of electron spin as a carrier of information in magnetic nanostructures can radically change modern life.

Objectives: The aim of this work is to find ways to increase the power of the generator on the magnetic nanostructure by changing its electrical circuit and more optimal external electromagnetic parameters that affect the state of electrons in the studied layered structure.

Materials and methods: The solution of this problem is carried out by numerical simulation of the magnetic nanostructure using a specially created micromagnetic simulator, which implements an algorithm for the simultaneous solution of the system of Maxwell and Landau-Lifshitz-Hilbert equations. The solution of such a complex problem is accelerated by the use of a quasi-static approximation in solving the system of Maxwell's equations, which is justified by the small size of the calculation area compared to the depth of the skin layer. Further calculations of the electrodynamic system are performed using the finite element method. To obtain the best frequency and energy parameters of the generator, it is proposed to introduce a resonant circuit to the schematic diagram of the studied generator, which is excited by short nanosecond pulses.

Results: A scheme of a generator on a magnetic nanostructure containing a resonator with concentrated parameters is proposed, and a system of nonlinear integro-differential equations with respect to electric currents is obtained in general. Numerical calculation of this system includes, in addition to the calculation of the scheme, also the modeling of a nonlinear electrodynamic structure by the finite element method. The energy and spectral characteristics of the studied generator are obtained. The search for the optimal values of the geometric parameters of the nanostructure and the magnitude of the external longitudinal magnetization is carried out.

Conclusions: Due to the complex nature of nonlinear processes in the magnetic nanostructure, the use of an external resonator, which could improve the spectral parameters of the generated current, did not give a noticeable improvement. The influence of the value of the external magnetization on the output power of the generator is complex and nonlinear, but, in general, a decrease in the level of magnetization leads to a significant decrease in power. It is established that the thickness of the magnetic layer of 6 nm is optimal for improving the energy characteristics of the generator.

KEY WORDS: time domain, Landau-Lifshitz-Gilbert equation, nonlinear magnetic nanostructure, quasistatic approximation, parametric generator

The article was received by the editors: September 10 2021

The article is recommended for printing: October 25 2021.