

РАДИОФИЗИКА

УДК 537.86

ПЕРЕСТРОЙКА ФАЗЫ В ЦЕПОЧКЕ ВЗАМОСИНХРОНИЗОВАННЫХ СПИНОВЫХ НАНОГЕНЕРАТОРОВ

© 2014 г.

К.Н. Алешин,^{1,2} К.Г. Мишагин,^{1,2} В.В. Матросов¹

¹ Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского
² ЗАО «Время-Ч», Н. Новгород

kirill_al@bk.ru

Поступила в редакцию 25.09.2013

Спиновые наногенераторы являются перспективным техническим решением для различных областей промышленности, в которых используются генераторы СВЧ диапазона, однако малая мощность и высокий уровень фазовых шумов требует развития методов синхронизации подобных наногенераторов. Предложен алгоритм, позволяющий добиться когерентного сложения мощностей в цепочке спиновых генераторов, приведены результаты численного моделирования в его поддержку.

Ключевые слова: спиновый наногенератор, спиновые волны, синхронизация.

Введение

Спиновые наногенераторы в силу своих частотных характеристик и малого размера являются весьма привлекательными для многих приложений [1, 2]. Однако малая мощность излучения таких генераторов приводит к постановке задачи о синхронизации нескольких спиновых наногенераторов для когерентного сложения их мощностей.

Под термином спиновый наногенератор будем понимать структуру, составленную из двух тонких ферромагнитных слоёв, разделённых слоем немагнитного материала толщиной, много меньшей длины спиновой релаксации [3]. Примером такой структуры может служить мультислой из двух слоев пермаллоя толщиной 4 нм, разделённых медным слоем толщиной 8 нм [4]. Эффект генерации СВЧ колебаний при пропускании электрического тока через подобную структуру был теоретически предсказан в работах [5, 6], эти публикации стали причиной быстрого роста исследований в области спинтроники.

Подобные структуры обладают рядом примечательных особенностей, среди которых присутствуют как положительные, так и отрицательные характеристики. Одним из наиболее привлекательных параметров является диапазон рабочих частот – от единиц гигагерца до сотен

гигагерц и выше. Сила электрического тока и рабочее напряжение, требующиеся для нормального функционирования устройства, находятся в пределах нескольких единиц миллиампер и десятых долей вольта соответственно. Поперечный размер наногенератора обычно не превышает ста нанометров. Отрицательными с точки зрения применения устройства характеристиками являются малая выходная мощность порядка одного нановатта и высокий уровень фазовых шумов.

Для преодоления трудностей, вызванных указанными выше недостатками, можно предложить объединение подобных генераторов в цепочки и решётки для их взаимной синхронизации и фазирования.

Одним из вариантов связи наногенераторов является связь посредством спиновых волн при условии размещения генераторов на общей многослойной структуре. Из других методов связи, например через общий электрический ток или внешнее высокочастотное магнитное поле, метод связи через спиновые волны выделяется в первую очередь удобством и простотой компактного размещения наногенераторов на общей многослойной структуре. Однако этот метод не лишён изъяна, препятствующего взаимной синхронизации и фазированию наногенераторов, вариант компенсации которого мы предлагаем далее.

Модель двух связанных спиновых наногенераторов

В качестве базовой теоретической модели двух связанных наногенераторов возьмём модель, предложенную в [7], и опишем динамику комплексных амплитуд возбуждаемых спиновых волн. Для большей наглядности и удобства анализа запишем уравнения модели в переменных для вещественных амплитуд и разности фаз, в итоге получим для двух связанных наногенераторов систему трёх обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \dot{\rho}_1 = -(\lambda + \beta \rho_1^2) \rho_1 + \\ + \rho_1 \rho_2^2 \delta (J_1 C + J_1 D \cos(2\Delta\varphi) - B \sin(2\Delta\varphi)), \\ \dot{\rho}_2 = -(\lambda + \beta \rho_2^2) \rho_2 + \\ + \rho_2 \rho_1^2 \delta (J_2 C + J_2 D \cos(2\Delta\varphi) + B \sin(2\Delta\varphi)), \\ \Delta\dot{\varphi} = \xi + (\rho_2^2 - \rho_1^2) [\alpha + \delta A + \delta B \cos(2\Delta\varphi)] + \\ + \delta D [J_1 \rho_2^2 + J_2 \rho_1^2] \sin(2\Delta\varphi), \end{cases} \quad (1)$$

где $\xi = (\omega_2 - \omega_1)/\omega_1$ – относительная частотная расстройка между двумя генераторами, $\rho_{1,2}$ – вещественные амплитуды, $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$, а все остальные параметры вычислены с учетом параметров физической системы.

Обратим внимание на то, что координата $\Delta\varphi$ является периодической с периодом π , а это значит, что если устойчивые состояния равновесия системы (1), соответствующие синхронным режимам, существуют на периоде координаты $\Delta\varphi$, то существует бесконечное счётное множество состояний равновесия с теми же свойствами на всей числовой оси $\Delta\varphi$. Всё множество этих устойчивых состояний равновесия можно подразделить на два класса (не путать с типом): отвечающие режиму синхронизации «в фазе» и отвечающие режиму синхронизации «в противофазе», расположенные по оси $\Delta\varphi$ один за другим с постоянным шагом, равным периоду $\Delta\varphi$. Очевидно, что если система двух наногенераторов синхронизована «в противофазе», то суммарная выходная мощность генерации будет близкой к нулю.

При условии малости параметра связи и малости амплитуд, учитывая слагаемые до третьего порядка малости включительно, систему (1) можно свести к одному уравнению типа фазового осциллятора (в режиме установившихся колебаний), что будет полезно при изучении цепочек связанных наногенераторов далее.

Модель спиновых наногенераторов, связанных в цепочку

Как было указано выше, при малых амплитудах колебаний и при малом параметре связи систему (1) можно свести к системе второго порядка относительно фаз 1-го и 2-го наногенераторов. Тогда, используя это приближение для цепочки связанных через спиновые волны наногенераторов, получим систему n обыкновенных дифференциальных уравнений, где n – полное число элементов в этой цепочке:

$$\begin{cases} \dot{\varphi}_1 = \omega_1 + \Omega \sin(2(\varphi_1 - \varphi_2)), \\ \dot{\varphi}_i = \omega_i + \Omega \sin(2(\varphi_i - \varphi_{i-1})) + \\ + \Omega \sin(2(\varphi_i - \varphi_{i+1})), \\ \dot{\varphi}_n = \omega_n + \Omega \sin(2(\varphi_n - \varphi_{n-1})). \end{cases} \quad (2)$$

Для оценки синфазности колебаний в системе воспользуемся критерием максимума параметра порядка [8]:

$$\eta = \frac{1}{n} \left| \sum_{i=1}^n e^{j\varphi_i} \right|, \quad (3)$$

где j – мнимая единица. Если рассматривать цепочку генераторов как излучающую систему, то параметр порядка можно понимать как нормированную суммарную мощность колебаний всех элементов цепочки в направлении максимума диаграммы направленности.

Проведём численное моделирование системы (2). Для этого используем метод интегрирования систем обыкновенных дифференциальных уравнений Рунге–Кутты 4-го порядка точности с постоянным шагом. Начальные условия для всех фаз выбираем случайным образом с равномерным распределением на интервале $[-\pi, \pi]$. Собственные частоты ω_i также выбираются случайным образом с равномерным распределением на интервале $[1 - 0.05\Omega, 1 + 0.05\Omega]$.

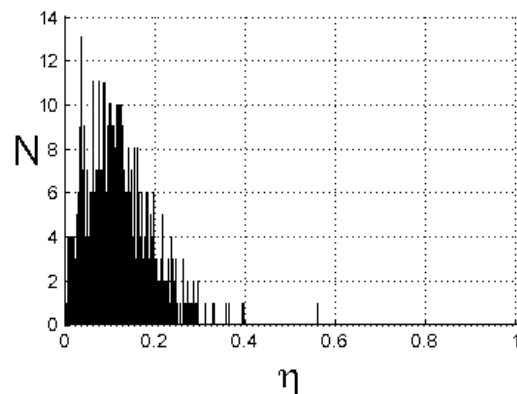


Рис. 1. Распределение параметра порядка η для 60 наногенераторов на тысяче реализаций

На рис. 1 показано распределение параметра порядка для цепочки из 60 наногенераторов, усреднённое по 1000 реализаций.

Отметим, что распределение параметра порядка имеет максимум вблизи значения 0.1, что означает всего 10% от суммарной мощности наногенераторов. Потеря 90% не является удовлетворительным результатом решения задачи синхронизации цепочки наногенераторов, поэтому требуется найти метод преодоления этого затруднения.

В целях решения проблемы малой суммарной мощности авторы предлагают алгоритм перестройки фазы. Суть метода в том, что наногенераторы подключаются к цепочке последовательно, и при подключении нового наногенератора происходит измерение мощности генерации. Если суммарная мощность не увеличилась на величину порядка P_{\max}/n^2 раз, где n – количество подключенных элементов на данный момент, а P_{\max} – максимальная суммарная мощность цепочки, то подаётся импульс электрического тока на последний элемент. Длительность импульса можно приблизительно оценить из уравнений (2) как

$$T = \int_{\frac{1}{2} \arcsin \frac{\Delta\omega}{\Omega}}^{\pi + \frac{1}{2} \arcsin \frac{\Delta\omega}{\Omega}} \frac{d\theta}{\Delta\omega - \Omega \sin(2\theta)}, \quad (4)$$

где $\Delta\omega$ – средняя по цепочке частота генерации элементов. При необходимости процедуру можно повторить снова.

Для иллюстрации работы метода приведём следующий результат численного моделирования.

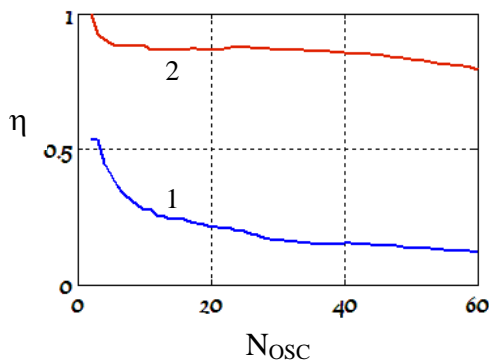


Рис. 2. Зависимость параметра порядка от количества подключенных наногенераторов, усреднённая на 100 реализациях

На рисунке 2 кривая 1 – результат моделирования без использования алгоритма перестройки фазы, а кривая 2 – результат при использовании данного алгоритма. Выигрыш в суммарной мощности очевиден, например, в точке, соответствующей 60 подключенным наногенераторам, мощность выше в 8 раз.

Выводы

В рамках данной работы показано, что в модели связанных наногенераторов присутствует бистабильность синхронных режимов, которая серьёзным образом влияет на синхронизацию массива подобных элементов. Для разрешения проблемы малой выходной мощности цепочки связанных через спиновые волны наногенераторов предложен алгоритм перестройки фазы. В поддержку метода проведено численное моделирование и представлены его результаты со сравнительным анализом.

Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ № 13-08-00844, № 13-02-97028.

Список литературы

1. Мишагин К.Г., Шалфеев В.Д. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. В. 22. С. 51–57.
2. Alma E. Wickenden, et al. Spin Torque Nano Oscillators as Potential Terahertz (THz) Communications Devices. ARL-TR-4807. N.Y., 2009. P. 20.
3. Мишагин К.Г., Алешин К.Н. // Вестник Нижегородского университета им. Лобачевского. 2011. № 5 (3). С. 270–273.
4. Krivorotov I.N., et al. // Science. 2005. V. 307. P. 228.
5. Slonczewski J.C. // J. Magn. Magn. Mater. 1996. V. 159. P. L1.
6. Berger L. // Phys. Rev. B. 1996. V. 54. P. 9353.
7. Rezende S.M., et al. // PRL. 2007. V. 98. P. 087202.
8. Мишагин К.Г., Шалфеев В.Д., Пономаренко В.П. Нелинейная динамика систем фазирования в антенных решётках: Учебное пособие. Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2007. 188 с.

**PHASE TUNING IN THE CHAIN OF MUTUALLY
SYNCHRONIZED SPIN-TORQUE NANO-OSCILLATORS***K.N. Aleshin, K.G. Mishagin, V.V. Matrosov*

Spin-torque nano-oscillators are promising devices for various branches of industry, where nanoscale ultra high frequency generators are needed. However, low power and high phase noise require the development of synchronization methods for such nano-oscillators. An algorithm is proposed for coherent power addition in the chain of nano-oscillators. The results of numerical simulations to support the algorithm are presented.

Keywords: spin-torque nano-oscillator, spin waves, synchronization.

References

1. Mishagin K.G., Shalfeev V.D. // *Pis'ma v ZhTF*. 2010. T. 36. V. 22. S. 51–57.
2. Alma E. Wickenden, et al. Spin Torque Nano Oscillators as Potential Terahertz (THz) Communications Devices. ARL-TR-4807. N.Y., 2009. P. 20.
3. Mishagin K.G., Aleshin K.N. // *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. Lobachevskogo*. 2011. № 5 (3). S. 270–273.
4. Krivorotov I.N., et al. // *Science*. 2005. V. 307. P. 228.
5. Slonczewski J.C. // *J. Magn. Magn. Mater.* 1996. V. 159. P. L1.
6. Berger L. // *Phys. Rev. B*. 1996. V. 54. P. 9353.
7. Rezende S.M., et al. // *PRL*. 2007. V. 98. P. 087202.
8. Mishagin K.G., Shalfeev V.D., Ponomarenko V.P. *Nelinejnaja dinamika sistem fazirovanija v antennyh reshjotkah: Uchebnoe posobie*. N. Novgorod: Izd-vo NNGU, 2007. 188 s.