DOI: 10.17117/na.2016.09.01.385

<http://ucom.ru/doc/na.2016.09.01.385.pdf>

Поступила (Received): 02.09.2016

**Астахов Л.Д., Примакова О.В., Волощенко П.Ю.
Математическое моделирование сверхскоростных
интегральных схем**

**Astakhov L.D., Primakova O.V., Voloshchenko P.Yu.
Mathematical modeling of high-speed integrated circuits**

Проанализированы нелинейные инерционные процессы в интегральной схеме СВЧ на примере четвертьволнового трансформатора с нелинейным элементом при регулировке отрицательной проводимости негatrona

Ключевые слова: интегральная схема, электронная волновая цепь

Analyzed non-linear inertial processes in the integrated circuit of the microwave on the example of a quarter of the transformer with a nonlinear element when adjusting the negative conductivity negatron

Key words: integrated circuit, electronic wave circuit

Астахов Лев Дмитриевич

Магистр

Южный федеральный университет

г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44

Astakhov Lev Dmitrievich

Master

Southern federal university

Taganrog, Nekrasovsky lane, 44

Примакова Ольга Викторовна

Магистр

Южный федеральный университет

г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44

Primakova Olga Viktorovna

Master

Southern federal university

Taganrog, Nekrasovsky lane, 44

Волощенко Пётр Юрьевич

Кандидат технических наук, доцент

Южный федеральный университет

г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44

Voloshchenko Petr Yurievich

Candidate of Engineering Sciences, Associate

Professor

Southern federal university

Taganrog, Nekrasovsky lane, 44

Известно, что сверхскоростные интегральные схемы (ИС), содержащие негatronы – лавинно-пролетные и резонансно-туннельные диоды (ЛПД и РТД), могут рассматриваться как материальная среда, осуществляющая превращение энергии электромагнитного (ЭМ) поля. В этом случае совокупность электронных приборов (ЭП), характеризуется диэлектрической и магнитной проницаемостью, удельным и волновым сопротивлением, скоростью распространения фронта волн и подвижностью свободных носителей заряда, зависящих от интенсивности воздействия. Они обобщенно отражают инерционные и нелинейные электрические свойства областей ИС, выполненных из различных материалов электронной техники, и динамические возможности веществ, используе-

мых при ее изготовлении с точки зрения макроскопической теории электромагнетизма. Кроме того в подобной синергетической системе наблюдается когерентное накопление и обмен, диссипация и перераспределение колебательной энергии, явления интерференции и дифракции ЭМ волн вдоль кондуктивных и беспроводных межсоединений. В тоже время подобное представление внутреннего устройства аналоговой или цифровой ИС, созданного изолирующими, выпрямляющими и омическими участками, металлическими электродами ввода постоянного тока и выводами сигнала, игнорирует. Поэтому конструктивный синтез гига- и терагерцовых (ГГц и ТГц) ИС любого типа, обеспечивающий оптимизацию токопотребления, необходимо осуществить на основе междисциплинарного подхода, учитывающего особенности традиционного моделирования микроволновых ЭП и фракталов [1, 2]. В них невозможно применение статических методов расчета КПД, базирующихся на принципе суперпозиции, априорных концепциях дискретности энергетического состояния и неразличимости взаимодействующих ЭП, образующих композиционный материал микро- и наноэлектроники. Вместе с тем упорядоченную структуру множества ЭП СВЧ правомерно изучать как электронную волновую цепь, в ветвях и контурах которой циркулирует обобщенный и полный токи. Тогда первоначальная оценка перераспределения колебательной энергии в синергетической системе сводится к составлению и решению семейства уравнений управляемого электрического равновесия и устойчивости ее многомодовых режимов методами комплексных амплитуд и эквивалентных синусоид. В качестве взаимосвязанных неизвестных параметров макромодели ИС фигурируют постоянное и переменное напряжение и ток резистивно-негатронных нелинейных элементов (НЭ), замещающих коррелированно работающие ЛПД и РТД.

Считаем, что первичное монохроматическое воздействие сигнала, характеризующее ЭДС E_1 и частотой ω , локализовано на входе «длинной» линии и обеспечивает в нем комплексную амплитуду $\dot{U}_1$ напряжения. Тогда ветвь, соединяющую выходные зажимы (2-2') схемы, рассматриваем как пассивный либо активный нелинейный элемент (НЭ) в зависимости от положения его «рабочей» точки и когерентный вторичный источник переменного тока. Запишем решение волнового уравнения для электронной цепи с распределенными параметрами в виде суммы стоячих волн напряжения [1,2]:

$$\dot{U}_1(E_1) = U_2(U_1) \cos \theta + jI_2[U_2(U_1)]Z_0 \sin \theta, \quad (1)$$

где $\theta = \beta l = 2\pi l / \lambda$ - электрическая длина межсоединения, λ - длина волны ЭМ колебаний, задающая пространственный период упорядоченной структуры материала. Соотношение (1) в общем символьном виде отображает расположение ЭП СВЧ в узле или пучности электрических поля при вариации его импедансных свойств.

$$F(U_1^2, U_2^2) = U_1^2 - U_2^2 [\cos^2 \theta + g_2^2(U_2^2) \sin^2 \theta] = 0, g_2 = G_2 / Y_0 \quad (2)$$

Параметр θ прямо пропорционально зависит от размера l и частоты ω внешнего воздействия. При величине $\theta = \pi n$ ($n=1,2,3...$) выполняется равенство $U_1^2 = U_2^2$, а для случая $\theta = \pi(n-1/2)$ взаимосвязь $U_1^2 = U_2^2 [g_2^2(U_2^2)]$ характеризуется суммарной нормированной проводимостью $g_2^2(U_2^2)$ НЭ, который может быть больше

или меньше 1. Постоянная n учитывает дискретность спектра собственных колебаний и многозначность электрического состояния моделирующей многомодовой цепи. Следовательно, соотношения (1),(2) позволяют осуществить символичный анализ амплитудно-зависимых свойств электронных неоднородностей в волновом масштабе (т.е. относительно величин λ и Y_0 без указания конкретных значений параметров ее элементов в метрической системе единиц). Используем аппроксимацию нелинейной зависимости активной составляющей импеданса $g_2(U_2^2) = g_{n2} - g_{e02}(1 + \nu U_2^2)$ НЭ, соответствующую методу гармонической линеаризации [1,2], где $\nu = \partial g_2 / \partial U_2^2 < 0$ - параметр нелинейности, $g_{02} = g_{n2} - g_{e02}$ - малосигнальная проводимость резистивно-негатронного элемента. Обозначим переменные $x = \nu U_2^2$, $y = \nu U_1^2$. Тогда из равенства (2) получаем кубическое уравнение, которое имеет одно действительное решение:

$$\begin{aligned} x(y) = & \sqrt[3]{-q_x + \sqrt{q_x^2 + p_x^3}} + \sqrt[3]{-q_x - \sqrt{q_x^2 + p_x^3}} - \frac{2(g_{n2} - g_{e02})}{3g_{e02}}, \\ 2q_x = & - \left[\frac{2(g_{n2} - g_{e02})}{3g_{e02}} \right] \left[\left(\frac{g_{n2} - g_{e02}}{3g_{e02}} \right)^2 + \left(\frac{ctg\theta}{g_{e02}} \right)^2 \right] - \frac{y(1 + ctg^2\theta)}{g_{e02}^2} < 0, \\ 3p_x = & \left(\frac{ctg\theta}{g_{e02}} \right)^2 - \frac{1}{3} \left(\frac{g_{n2} - g_{e02}}{g_{e02}} \right)^2 > 0, \end{aligned} \quad (3)$$

так как дискриминант $D = q_x^2 + p_x^3 > 0$ при любом y в области значений параметра $0 < g_{e02}/g_{n2} < 1$. Аналитический оператор (3) описывает композицию волн, характеризует напряжение U_2 , ток $I_2 = U_2 G_2$ и «рабочую» точку НЭ в стационарном режиме ЭП. Следовательно, регулировка интенсивности возмущения единого поля открытой структуры материала ИС сопровождается мгновенным изменением расположения экстремальных значений потенциала электрического поля в конце длинного межсоединения из-за дифракции ЭМ волн. Кроме того, эквивалентная линия, нагруженная активным двухполюсником, может одновременно повышать амплитуды переменного напряжения U_2 и тока I_2 за счет преобразования электрической энергии электронной ветвью.

Рассмотрим нелинейные инерционные процессы в базовом элементе аналоговой ИС на примере четвертьволнового трансформатора с НЭ при регулировке отрицательной проводимости негатрона. Известно, что использование отрезка линии, длиной $\theta = \pi/2$, оптимизирует передачу электрической энергии в идеализированных цепях с распределенными параметрами [1-3]. С другой стороны, такой тестовый случай фрактальной структуры композиционного СВЧ материала дает возможность аналитически исследовать влияние интерференции на «виртуальных» границах ИС в явном виде, верифицировать модель нелинейного сложения и вычитания сигналов.

Таким образом, граничные условия в начале и конце исследуемой одномерной электронной цепи, положения узла и пучности электрического поля СВЧ относительно ЭП зависят от интенсивности первичного источника и явления интерференции. Поэтому уровень ее выходного сигнала можно увеличивать и уменьшать при фиксированном воздействии, варьируя соответствующим образом амплитудно-зависимую реакцию НЭ вторичного источника когерентных волн. «Согласование» параметров электронной ветви и длинной линии

обеспечивается регулировкой нелинейных характеристик негатрона. Вместе с тем, размещение ЛПД или РТД в минимуме либо максимуме стоячей волны напряжения соответствует принципиально разным его рабочим точкам и устойчивым режимам коллективного взаимодействия смежных диодов, интегрируемых по технологии когерентной электроники. Поэтому авторы считают, что на первом этапе моделирования ИС ГГц и ТГц диапазона различного назначения, как композиционного материала синергетической системы, невозможен аналитический и численный расчет мгновенного состояния отдельного ЭП, предполагающих выполнение условия «малых возмущений» или «слабой нелинейности».

Список используемых источников:

1. Астахов Л.Д., Примакова О.В., Волощенко П.Ю. Резистивно-негатронная модель лавинно – пролетного диода // Научный альманах. Тамбов: Консалтинговая компания Юком, 2015. С. 675-678.
2. Волощенко П.Ю., Волощенко Ю.П. Основы системного моделирования электрической структуры интеграции сверхбыстродействующих электронных приборов. Таганрог: ЮФУ, 2014. 94 с.

© 2016, Астахов Л.Д., Примакова О.В.,
Волощенко П.Ю.

Математическое моделирование
сверхскоростных интегральных схем

© 2016, Astakhov L.D., Primakova O.V.,
Voloshchenko P.Yu.

Mathematical modeling of high-speed integrated
circuits