

Ptashnik Vialiy Vladimirovich

E-mail: angellite2006@gmail.com.

The Department of Micro- and Nanoelectronics; Postgraduate Student.

Solodovnik Maksim Sergeevich

E-mail: solodovnikms@mail.ru.

The Department of Micro- and Nanoelectronics; Postgraduate Student.

Fedotov Alexandr Alexandrovich

E-mail: falex@fep.tsure.ru.

The Department of Micro- and Nanoelectronics; Associate Professor.

Zamburg Evgeniy Genad'evich

E-mail: Zamburg.evgeniy@gmail.com.

The Department of Micro- and Nanoelectronics; Magistrate.

Klimin Victor Sergeevich

E-mail: KliminV.S@mail.ru.

The Department of Micro- and Nanoelectronics; Postgraduate Student.

Il'in Oleg Igorevich

E-mail: ru.saint@gmail.com.

The Department of Micro- and Nanoelectronics; Magistrate.

Gromov Alexandr Leonidovich

E-mail: adn13.ru@gmail.com.

The Department of Micro- and Nanoelectronics; Magistrate.

Rukomoykin Andrey Vasil'evich

E-mail: rukomoykin@gmail.com.

The Department of Micro- and Nanoelectronics; Magistrate.

УДК 621.382:621.3

П.Ю. Волощенко, Е.Т. Замков

АНАЛИЗ ТРАНСФОРМАЦИИ ФАЗЫ ВОЛН В МОП-СТРУКТУРЕ

Проведено исследование композиции волн в одномерной электронной цепи с распределенными параметрами. Методом эквивалентных синусоид рассчитан фазовый сдвиг между колебаниями напряжения на входе и выходе длинной линии с активным нелинейным элементом, моделирующей сверхскоростную МОП-структуру. В аналитическом виде найдена зависимость фазового отклика многомодовой нелинейной цепи, положение фронта волн от интенсивности внешнего воздействия.

МОП-структура; электронная цепь; длинная линия; негатрон.

P.Y. Voloshchenko, E.T. Zamkov

**ANALYSIS OF THE PHASE TRANSFORMATION OF WAVES
IN MOS-STRUCTURE**

A theoretical study of the wave composition in the one-dimensional electronic circuit with distributed parameters. By the methods of equivalent sinusoids is calculated the phase shift between the oscillations of the voltage at the input and output of a long line with an active nonlinear element, which simulates the ultra-high speed MOS-structure. In the analytical form are found the dependence of the phase response of the multimode nonlinear circuit, the position of the wave front from the intensity of external action.

MOS-structure; the electronic circuit; a long line; negatron.

Использование теоремы наложения при моделировании самоорганизации когерентных процессов в сверхскоростных МОП-структурах не позволяет анализировать взаимное влияние полупроводниковых приборов (ПП) [1-3]. Кроме того, известные методы расчета характеристик интегральных схем (ИС) не учитывают зависимость фазы бегущих и стоячих волн в межсоединениях от интенсивности воздействия и реакции ПП. Поэтому для решения задачи проектирования приборов и устройств когерентной микроэлектроники необходимо рассмотреть вопрос о виде нелинейных функций, описывающих изменение начальной фазы колебаний электрического поля открытой полупроводниковой структуры.

Анализ нелинейной композиции волн в фрагменте ИС проведем методами эквивалентных синусоид и схем, комплексных амплитуд [2].

На рис. 1 приведена схема замещения сверхскоростной МОП-структуры в виде отрезка длинной линии с двухполюсным нелинейным элементом (НЭ), учитывающая инерционность процессов переноса носителей заряда в ПП и электромагнитного (ЭМ) поля между ними [4]. Здесь величины: A_2 , $I_2=I_{n2}+I_{e2}[A_2(A_1)]$ – амплитуды напряжения и тока в точках подключения НЭ; $\gamma=\alpha+j\beta$ – коэффициент распространения волн в однородной линии (α и β – коэффициенты ослабления и фазы); $Y_0=1/Z_0$, l – волновая проводимость, геометрическая длина отрезка линии; $G_{n1}=Y_0$, G_{n2} , $G_{e2}(A_2)$ – частотно-независимые проводимости внешнего источника, резистора и негatronа [5]. Считаем, что первичный источник энергии, характеризуемый э.д.с. E_1 и частотой ω колебаний, локализован в сечении 1-1 линии и обеспечивает в нем амплитуду A_1 напряжения. На зажимах 1-1 и 2-2 схемы одномерной цепи выполняются граничные условия: $G_1=G_{n1}=Y_0$, $I_2[A_2(A_1)]=A_2\{G_{n2}+G_{e2}[A_2(A_1)]\}$, $G_{n2}>0$, $G_{e2}(A_2)<0$. Поэтому электронный участок, соединяющий выходы 2-2 схемы (рис.1), рассматриваем как пассивный либо активный двухполюсный элемент цепи переменного тока в зависимости от рабочей точки НЭ и когерентный вторичный источник бегущих волн.

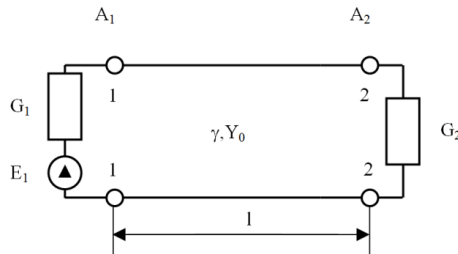


Рис. 1. Схема замещения сверхскоростной МОП-структуры

Действительная амплитуда $A_1=|A_1|$ мгновенного напряжения $u_1(t,\theta,A_1,A_2)=A_1\cos(\omega t+\varphi_A)$ равна модулю комплексных величин $A_1=\text{Re}A_1+j\text{Im}A_1$, где $(\omega t+\varphi_A)$ – полная, а φ_A – начальная фаза волнового процесса, учитывающая параметры линии и резистивно-негатронного НЭ. Тогда при $t=0$ текущие амплитуда и аргумент (полный фазовый сдвиг) напряжения в электронной цепи с распределенными параметрами имеют вид

$$A_1^2(A_2^2) = A_2^2[\cos^2 \theta + g_2^2(A_2^2) \sin^2 \theta], \quad (1)$$

$$\varphi_A(A_2^2) = \pi n + \text{arctg} \Psi, \Psi(A_2^2) = g_2(A_2^2) \text{tg} \theta. \quad (2)$$

Выражения (1), (2) совместно описывают закон изменения амплитуд A_1 и A_2 напряжения на входе и выходе многомодовой ($n=0,1,2,..$) электронной цепи и сдвига фаз между ними при регулировке параметров НЭ в результате сложения и вычитания мгновенных значений величин волн. В функции Ψ амплитудно-

зависимый масштабный множитель $g_2(A_2^2)$ фазового отклика, вносимого линией, увеличивает или уменьшает $\text{tg}\theta$ и соответственно длину θ . Коэффициент n учитывает соотношение пространственного периода ЭМ-колебаний и продольного размера межсоединения МОП-структуры. Величина сомножителя $g_2(A_2^2) > 0$ в формулах (1),(2), характеризующего импедансно-амплитудную зависимость волнового процесса, может варьироваться в интервале $/0, \infty/$. Поэтому напряжение A_2 на резистивно-негатронном двухполюснике имеет максимальное или минимальное значение. Кроме того, фазовый угол φ_A определяет координаты расположения узлов и пучностей поля (A_1) в линии, месторасположение которых меняется, когда проводимость НЭ $g_2(A_2^2) = 1$. В области $g_2(A_2^2) \approx 1$ сумма (2) равна $\varphi_A \approx \pi n + \theta$. Следовательно, наблюдается примерно линейная трансформация фазы электрического поля, а интенсивность внешнего воздействия слабо влияет на фазовую реакцию цепи.

Из равенства (1) и закона Кирхгофа получаем условие баланса амплитуд $A_2 = f(A_1)$ напряжения в одномерной электронной цепи:

$$F(A_1^2, A_2^2) = A_1^2 - A_2^2 [\cos^2 \theta + g_2^2(A_2^2) \sin^2 \theta] = 0, \quad g_2 = G_2 / Y_0. \quad (3)$$

Используем аппроксимацию нелинейной зависимости активной нормированной проводимости $g_2(A_2^2) = g_{n2} - g_{e02}(1 + \nu A_2^2)$, где $\nu = \partial g_2 / \partial A_2^2 < 0$ – параметр нелинейности, $g_{02} = g_{n2} - g_{e02}$ – малосигнальная проводимость НЭ, соответствующую методу гармонической линеаризации [6]. Введем новые переменные $x = \nu A_2^2$, $y = \nu A_1^2$. Тогда для стационарного режима многомодовой электронной цепи из равенства (3) записываем:

$$F(x, y) = (g_{e02}^2 \sin^2 \theta) x^3 + [2(g_{n2} - g_{e02}) g_{e02} \sin^2 \theta] x^2 + [(g_{n2} - g_{e02})^2 \sin^2 \theta + \cos^2 \theta] x - y = 0. \quad (4)$$

Кубическое уравнение (4) имеет одно действительное решение:

$$x(y) = \sqrt[3]{-q_x + \sqrt{q_x^2 + p_x^3}} + \sqrt[3]{-q_x - \sqrt{q_x^2 + p_x^3}} - \frac{2(g_{n2} - g_{e02})}{3g_{e02}}, \quad (5)$$

$$2q_x = - \left[\frac{2(g_{n2} - g_{e02})}{3g_{e02}} \right] \left[\left(\frac{g_{n2} - g_{e02}}{3g_{e02}} \right)^2 + \left(\frac{\text{ctg} \theta}{g_{e02}} \right)^2 \right] - \frac{y(1 + \text{ctg}^2 \theta)}{g_{e02}^2} < 0,$$

$$3p_x = \left(\frac{\text{ctg} \theta}{g_{e02}} \right)^2 - \frac{1}{3} \left(\frac{g_{n2} - g_{e02}}{g_{e02}} \right)^2 > 0,$$

так как дискриминант $D_x = q_x^2 + p_x^3 > 0$ при любом y в области значений $g_{n2} - g_{e02} > 0$. Выражение (5) в аналитической форме характеризует зависимость $A_2(A_1)$ колебаний суммарного ЭМ-поля открытой МОП-структуры. Совместно формулы (2),(5), в рамках предложенной математической модели фрагмента сверхскоростной ИС, описывают в символьном виде закон трансформации начальной фазы волнового процесса двухполюсным НЭ, размещенным в длинной линии.

На рис. 2 приведены зависимости $\varphi_A = f(y)$ отрезка линии с НЭ для значений $g_{n2} = 2$ «полезной» нагрузки, $n = 1$ и различной малосигнальной проводимости негатрона: графики 1- $g_{e02} = 0$, 2- $g_{e02} = 1,5$, 3- $g_{e02} = 2$ при $\theta = 3\pi/4$, 4- π , 5- $g_{e02} = 2$, 6- $g_{e02} = 1,5$, 7- $g_{e02} = 0$ при $\theta = \pi/8$.

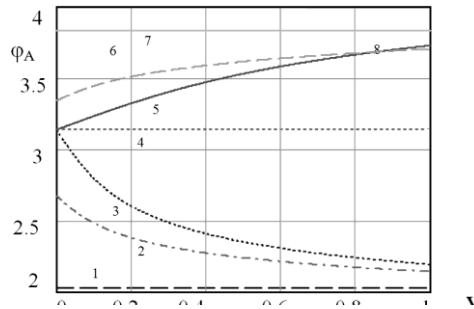


Рис. 2. Зависимость начальной фазы φ_A волнового процесса от интенсивности u воздействия

Для значений $\theta = \pi \pm |\theta|$ графики трансформации фазы φ_A волнового процесса в линии располагаются симметрично относительно прямой 4, соответствующей постоянной π . При выборе другой электрической длины θ (рис. 2) кривые 2,3 и 5,6 монотонно убывают ($\operatorname{tg} 3\pi/4 < 0$) или возрастают ($\operatorname{tg} \pi/8 > 0$) от малосигнального значения $\Psi = (g_{н2} - g_{e02}) \operatorname{tg} \theta$ фазы напряжения, так как проводимость НЭ $g_2(A_2^2) > 0$. Увеличение интенсивности воздействия u сопровождается нелинейным ростом проводимости $g_2(A_2^2)$, которая может быть больше и меньше единицы, определяемой волновым сопротивлением линии. В точке $g_2(A_2^2) = 1$ реализуется режим бегущей волны в линии и фазовая реакция одномерной цепи пропорциональна θ . Когда $g_{e02} = 0$ (графики 1,7), функция $\Psi = g_{н2} \operatorname{tg} \theta$ описывает границы диапазона регулировки φ_A в тестовом случае линейной электрической цепи [3]. Следовательно, поддерживая $\Psi = g_2(A_2^2) \operatorname{tg} \theta = \operatorname{const}$, можно фиксировать в линии начальную фазу колебаний и положение фронта волн, мгновенно меняя рабочую точку резистивно-негатронного НЭ регулировкой разности $g_{н2} - g_{e02}$ и (или) знака параметра ν нелинейности. Например, на рис. 2 точка (8) пересечения графиков 5,6 получена при $u = 0,86$, но разной малосигнальной проводимости негатрона.

Таким образом, на основе одномерной электронной цепи рассчитан фазовый сдвиг между колебаниями напряжения на входе и выходе отрезка длиной линии с НЭ, моделирующего сверхскоростную МОП-структуру. В аналитическом виде найдена зависимость фазового отклика многомодовой нелинейной цепи, положение фронта волн от интенсивности внешнего воздействия. Изменение параметров негатрона реализует вариацию режимов бегущей и стоячей волн в линии, плавную и скачкообразную трансформацию начальной фазы колебаний электрического поля. Авторы считают, что управление процессом нелинейного сложения и вычитания ЭМ-волн, сдвигом фазы напряжения ПП обеспечит однонаправленную передачу колебательной мощности (сигнала) в нагрузку, позволит повысить коэффициент полезного действия многомерной электронной цепи с распределенными параметрами при любой длине металлических соединений ИС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Попов В.П. Основы теории цепей. – М.: Высшая школа, 1985. – 496 с.
2. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. – М.-Л.: Энергия, 1966. – 408 с.
3. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи с распределенными параметрами. – М.: Высшая школа, 1980. – 152 с.

4. Волощенко П.Ю., Волощенко Ю.П., Замков Е.Т. Моделирование нелинейных волновых процессов в фрагменте сверхскоростной ИС // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2008. – № 1 (78). – С. 102-106.
5. Серьезнов А.Н., Степанова Л.И., Гаряинов С.А., Гагин С.В., Негоденко О.Н., Филинюк Н.А., Касимов Ф.Д. Негатроника. – Новосибирск: Наука, Сибирская издательская фирма РАН, 1995. – 315 с.
6. Андреев В.С. Теория нелинейных электрических цепей. – М.: Радио и связь, 1983. – 280 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор П.В. Серба.

Волощенко Петр Юрьевич

Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: vigcorp@mail.ru.

347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44.

Тел.: 88634371629.

Кафедра радиотехнической электроники; доцент.

Замков Евгений Терентьевич

E-mail: kes@fep.tti.sfedu.ru.

Тел.: 88634371603.

Кафедра конструирования электронной аппаратуры; доцент.

Voloshchenko Peter Yurevich

E-mail: vigcorp@mail.ru.

Phone: +78634371629.

The Department of Electronic Devices; Associate Professor.

Zamkov Evgeniu Terentevich

E-mail: kes@fep.tsure.ru.

Phone: +78634371603.

The Department of Electronic Apparatuses Design; Associate Professor.