

Министерство образования и науки Украины
Харьковский национальный университет радиоэлектроники
Академия наук прикладной радиоэлектроники
ЗАО «НПК «Наука»
НТО РЭС Украины
НТО РЭС им. А.С. Попова РФ

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

**2-й Международной научной конференции
«ЭЛЕКТРОННАЯ КОМПОНЕНТНАЯ БАЗА.
СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ»**

30 сентября - 3 октября 2009г.

Харьков - Кацивели
2009

О ВОЗМОЖНОСТИ ДОСТИЖЕНИЯ ПИКОМЕТРОВОЙ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПРИ ЧАСТОТНЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ НАНОРАЗМЕРОВ

Данелян А.Г., Мачехин Ю.П., Гарибашвили Д.И., Канкия Р.Р.,
Мкртычян С.А., Шоташвили С.В.

Национальный Институт метрологии
Грузия, 0192, Тбилиси, ул. Чаргальская 67, тел (995 32) 61-35-00
E-mail: adanelyan@mail.ru

Possibility of application of the generator of rectangular light pulses (the generator of an optical meander) for measurements of lengths and linear displacements basis of which is the closed, adjustable, completely optical delay (OD) is considered. The OD contour is closed on the breaker of light by light. Measurements of length are connected with changes of length of the OD contour and these are made by measurements of frequency changes of the light pulses in the OD contour. It is expedient to carry out these measurements by means of phase-frequency comparator in a nanoscale range. It is shown, that achievement of resolution better, than 0.0003 nanometers is possible at measurement of lengths in a range from 0 to 3 μm .

В работе [1] был предложен частотный метод измерений длин и линейных перемещений нанометрового диапазона. Реализация метода основана на предложенном полностью оптическом генераторе прямоугольных импульсов света (генераторе-формирователе оптического меандра - ГОМ), упрощённая схема которого была описана в [1] (см. рис.2 в [1]). Основой генератора является регулируемая замкнутая полностью оптическая задержка (ОЗ), в которую вводится излучение непрерывного лазера, находящегося вне замкнутого контура задержки. Излучение лазера вводится через узел оптической бистабильности (управления света светом) [2]. Точнее – через прерыватель лазерного излучения (проходящего через этот узел) светом, который прошёл контур ОЗ. По ходу излучения лазера в контуре ОЗ последовательно установлены оптический усилитель (для компенсации оптических потерь в контуре), подвижный отражатель (например, поворотная призма) и светоделитель для вывода формируемых в данной системе импульсов света через фотоприёмник (установленный вне контура ОЗ) в систему обработки результатов измерений. Контур ОЗ замыкается на прерывателе света светом. Нам известны, по крайней мере, 2 разных метода (один из них, основанный на свойствах поляризованного света), которые могут позволить реально создать оптическую бистабильность, каждый из которых может быть использован для ГОМ. Однако, из-за ограниченности объёма описывать их не будем.

Описанная схема формирует прямоугольные импульсы света с длительностью $T_i = \frac{L}{c}$ и паузой между соседними импульсами T_p , также равной $T_p = \frac{L}{c}$, где L – оптическая длина контура ОЗ. Другими словами, в описанной системе генерируется оптический меандр, временные характеристики которого определяются размерами замкнутого контура ОЗ и скоростью света. Приведённое ниже выражение (1) отражает связь между длительностью генерируемого импульса света T_i , частотой повторения импульсов f и расстоянием L , которое проходит свет в рабочем плече ГОМ

$$f = \frac{1}{2T_i} = \frac{c}{2L} \quad (1)$$

При дальнейшем рассмотрении учтём, что оптическая длина L и геометрическая длина l связаны соотношением $L = nl$.

Если подвижный отражатель контура ОЗ жёстко связан с микроскопом (зондом) и его положения, определяющие начальную и конечную точки воспроизводимого (или измеряемого) пространственного интервала, определяют также и изменения интервала времени, проходимого светом, эта система может быть использована для частотных измерений изменений длин замкнутого контура ОЗ. Воспроизводимая (или измеряемая)

длина Δl может быть определена по изменению частоты импульсов, генерируемых в ГОМ. Используя выражение (1), легко показать, что искомое значение длины Δl (расстояния) между двумя положениями отражателя при наведении зонда (микроскопа) на точки, ограничивающие измеряемый объект, определяется выражением:

$$\Delta l = \frac{c}{4n} \{T_2 - T_1\} = \frac{c}{4n} \left\{ \frac{1}{f_2} - \frac{1}{f_1} \right\} = \frac{c(f_1 - f_2)}{4nf_1f_2} \quad (2)$$

а интервал времени Δt , в течение которого свет проходит между этими точками, равен

$$\Delta t = \frac{1}{4n} \{T_2 - T_1\} = \frac{1}{4n} \left\{ \frac{1}{f_2} - \frac{1}{f_1} \right\} = \frac{(f_1 - f_2)}{4nf_1f_2} \quad (3)$$

где f_1 и f_2 – значения частот импульсов, генерируемых в ГОМ, соответствующие начальному и конечному положению отражателя, T_1 и T_2 – периоды повторения этих импульсов, а n – значение показателя преломления среды, в которой перемещается отражатель (эти перемещения отражателя желательнее проводить в вакууме).

Напомним, что в данной работе речь идёт об измерениях длин и линейных перемещений нанометрового диапазона, которые определяются соответствующими изменениями длины замкнутого контура ОЗ ГОМ. При таких изменениях длины контура ОЗ, разности частот f_1 и f_2 будут небольшими. Поэтому для частотных измерений значений Δl могут быть использованы прецизионные частотные или фазо-частотно компараторы, которые применяются в метрологических лабораториях времени и частоты. Но в таком случае целесообразно в замкнутый контур ОЗ ГОМ последовательно ввести дополнительную регулирующую оптическую задержку (ДОЗ). Её назначение следующее. При осуществлении процесса измерений длины объекта, после установки на первом этапе измерений микроскопа (или зонда), и т.е. связанного с ним отражателя ОЗ, на начальную точку измеряемого объекта, регулировкой оптической длины ДОЗ целесообразно установить частоту f_1 импульсов света ГОМ, равную одной из стандартных частот, принятых в эталонных измерениях времени и частоты (например, $f_1 = 5$ МГц), которую можно получить от стандарта частоты. Это равенство частот устанавливается с использованием указанного выше компаратора частоты. На втором этапе измерений, после установки микроскопа (или зонда) на вторую точку измеряемого объекта, компаратором частот измеряется отклонение новой полученной частоты f_2 импульсов света ГОМ от частоты f_1 .

На основе одного из указанных выше компараторов – компаратора типа VCH-314, который производит российская акционерная компания "Время-Ч" (www.vremya-ch.com/html_rus/company.htm) сделаем оценку возможностей описанного метода. Приведём краткие характеристики VCH-314. Частотный компаратор типа VCH-314 предназначен для прецизионного сравнения частоты и фазы сигналов стандартов частоты и времени; содержит два идентичных измерительных канала, и за счёт использования корреляционной обработки, обеспечивает предельно малую погрешность измерения и расчёт нестабильности частоты каждого отдельного сигнала. Входные сигналы: синусоидальные – 5 МГц; 10 МГц; 100 МГц.

- Предел измерения относительной разности частот: $(Df/f) = \pm 1 \times 10^{-6} = \pm 1 \times 10^{-6}$
- Диапазон значений времени измерения: $t = 1 \text{ с} + 10^5 \text{ с}$.
- Погрешность измерения (вносимая нестабильность частоты в зависимости от режима работы и разности частот):

Время измерения, с	Основная погрешность ($Df/f = 0$, полоса пропускания 3 Гц)		Дополнительная погрешность (Df/f)
	Одноканальный режим	Двухканальный режим	
1с	$< 8 \times 10^{-14}$	$< 2 \times 10^{-14}$	$< 2 \times 10^{-3} (Df/f)$
10 с	$< 1 \times 10^{-14}$	$< 3 \times 10^{-15}$	
100 с	$< 1.5 \times 10^{-15}$	$< 1.5 \times 10^{-15}$	
1000с	$< 5 \times 10^{-16}$	$< 5 \times 10^{-16}$	

Проведённая нами расчётная оценка изменений частот импульсов ГОМ Δf с использованием выражения (2) для Δl (в случае измерений, проводимых в вакууме, когда значение $n=1$), полученная для случаев перемещений отражателя ОЗ на задаваемые значения Δl (при увеличении длины контура задержки ГОМ), лежащие в нанометровом диапазоне, отражена в приведённой ниже таблице 1. Из таблицы видно, что если за начальную точку при перемещениях отражателя выбрать положение, при котором частота $f_1=5$ МГц, то перемещения отражателя ОЗ в пределах от 0 до 3 мкм вызовут изменения частоты импульсов ГОМ в пределах, когда относительная разность частот $(\Delta f/f)$ не превышает значения $\pm 1 \times 10^{-6}$. При таком изменении частоты импульсов ГОМ можно считать, что разрешающая способность измерения частоты (с учётом характеристик VCH-314 в двухканальном режиме) составляет $\Delta f_r = 5 \cdot 10^6 \cdot 2 \cdot 10^{-14}$ Гц = 10^{-7} Гц. Учитывая, что частота $f_1=5$ МГц, и что частота $f_2 \approx 5$ МГц, подставляя эти значения в выражение (2), при изменении частоты импульсов ГОМ на $\Delta f_r = 10^{-7}$ Гц, получим для разрешающей способности измерения длины $\Delta l_r = 3 \cdot 10^{-13}$ м = 0,0003 нм.

Таблица 1

Изменения длины контура ОЗ Δl	Изменения частоты импульсов света ГОМ при $f_1=5$ МГц $\Delta f = (f_1 - f_2)$, в Гц	Примечания
0,0003 нм	0,000 000 1 0 00	Разрешающая способность (р.с.), которую может обеспечить VCH-314 при времени измерения 1 с
0,0005 нм	0,000 000 1 6 6 8	
0,001 нм	0,000 000 3 3 3 6	
0,002 нм	0,000 000 6 6 7 1	
0,003 нм	0,000 001 0 0 0 6	
0,02 нм	0,000 006 6 7 1 3	Предельная (достигнутая) р.с. при воспроизведении единицы длины – метра – методами лазерной интерферометрии
0,1 нм	0,000 033 3 5 6 4	По принятой оценке размеры атомов
0,2 нм	0,000 066 7 1 2 8	
1,0 нм	0,000 333 5 6 4 2	
2,0 нм	0,000 667 1 2 8 3	
5,0 нм	0,001 667 8 2 0 2	
15 нм	0,005 003 4 6 2 4	
20 нм	0,006 671 2 8 1 9	
35 нм	0,011 674 4 6 4 5	Размеры уровней технологических узлов маршрутной карты ITRS (для производства компонентов нанозлектроники), взятые из таблицы в [3], для которых должна быть решена проблема обеспечения р.с. лучше, чем 0.003-0.002 нм.
50 нм	0,016 678 2 0 4 7	
70 нм	0,023 349 4 9 3 6	
100 нм	0,033 356 4 1 9 2	
130 нм	0,043 363 3 3 3 2	
200 нм	0,066 712 8 1 8 1	
500 нм	0,166 782 0 4 2 0	
1 мкм	0,333 564 1 7 2 9	
2 мкм	0,667 128 2 0 1 4	
3 мкм	1,004 398 3 5 2 3	

Заметим, что по изменениям частоты импульсов ГОМ $\Delta f = (f_1 - f_2)$ при известной частоте f_1 (частоте импульсов света ГОМ на первом этапе измерения) можно измерять изменения длины контура задержки Δl . В пределах от 0 до 2,0 мкм зависимость $\Delta l = F(\Delta f)$ очень близка к линейной, и её в рассматриваемом случае можно представить, как

$$\Delta l (\text{м}) = 2,997925 \cdot 10^{-6} \times \Delta f (\text{Гц})$$

Приведём краткую информацию о востребованности линейных измерений нанометрового диапазона с указанной выше разрешающей способностью (р.с.). Так в работе [3] Руководителя Отделения точной техники Национального Института стандартов и технологий (НИСТ, США), помощника директора НИСТ по направлению нанотехнологий Dr. Michael T. Postek говорится о составленной Международной технологической маршрутной карте для полупроводниковой промышленности ITRS. В ней отражены некоторые из метрологических потребностей для разных технологических узловых пунктов. Отмечается, что "некоторые из технологических узловых пунктов, находящихся при 100 нм или ниже 100 нм, не имеют пока очевидных решений, и в настоящее время выполняется работа в области нанометрологии для того, чтобы найти эти решения". Например, эта необходимость возникла для измерения толщины диэлектрика логики (с точностью порядка 0,004±0,002 нм), а также и в некоторых других технологических узловых пунктах, отмеченных в данной маршрутной карте. По оценке, которую можно сделать из Таблицы 1, указанные в [3] нерешённые проблемы точности измерений размеров уровней технологических узлов маршрутной карты ITRS (35, 50, 70 и 100 нм с точностью ~ 0,002 нм), для производства компонентов нанoeлектроники, возможно решить в случае реализации описанного выше метода.

Дополнительно отметим, что на предложенный метод и систему оформлен Патент Грузии на изобретение.

Список литературы:

1. Данелян А.Г., Гарибашвили Д.И., Мачехин Ю.П. "Частотные методы измерения линейных наноразмеров". 3-ий Международный радиоэлектронный форум "Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития". Сборник научных трудов. т.3 "Электронная компонентная база. Состояние и перспективы развития". стр. III-237-240. Украина, Харьков-Судак, 30 сентября – 3 октября 2008 г.
2. Гиббс Х. // "Оптическая бистабильность. Управление светом с помощью света" Пер. с англ. // М., Изд "Мир", 1988. 520 с.
3. Постек М. // "Метрология в нанометровом диапазоне". // Вестник технического регулирования // № 7 (44), 2007, стр. 8-17, (перевод с англ. статьи Postek M.T. "Nanometer-Scale Metrology" // Proceedings of SPIE, 2002, Vol.4608, p.84-96)