

7. **Стребков В. И.** Импульсный частотно-фазовый дискриминатор на интегральных микросхемах // Электронная техника в автоматике. 1977. Вып. 9. С. 223—230.

8. **Zhang Jiawei, Zhao Hui, Ma Kema.** Phase-Locked Loop in Constant Speed Control System for the Flywheel Motor // Recent Advances in CSIE. 2011. V. 129. P. 323—330.

9. **Емашов В. А., Бубнов А. В., Чудинов А. Н.** Эффективный способ регулирования электропривода с фазовой синхронизацией // Известия вузов. Электромеханика. 2011. № 5. С. 46—49.

10. **Чудинов А. Н., Емашов В. А., Бубнов А. В.** Способ косвенного определения ошибки по частоте вращения в электроприводе с фазовой синхронизацией в режиме насыщения логического устройства сравнения // Омский научный вестник. 2011. № 1. С. 99—103.

11. **Харченко Е. Ф., Емашов В. А., Бубнов А. В.** Способ определения углового ускорения синхронно-синфазного электропривода // Динамика систем, механизмов и машин: Матер. VIII Междунар. науч.-техн. конф. Омск, 2012. Кн. 1. С. 99—102.

Дата принятия 09.06.2014 г.

681.2.531.71

Прецизионные фотоэлектрические преобразователи перемещения в нанометрии

В. Н. ЯНУШКИН, Ю. Б. КОЛЯДА

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана,
Москва, Россия, e-mail: yura_kolyada@mail.ru

Рассмотрена возможность использования в нанометрии разработанного цифрового фотоэлектрического интерферометра для измерений малых перемещений. Проанализирован частный случай использования интерферометра, имеющего достаточные показатели по точности, надежности, функциональности и высокий индекс интерполяции для цифровой фиксации перемещений в нанометровом диапазоне.

Ключевые слова: цифровой фотоэлектрический интерферометр, нанометрия, индекс интерполяции.

The possibility of using the digital photoelectric interferometer in nanometry to measure the small displacements is considered. In particular the analysis of use of interferometer with a high interpolation index for digital record of displacements in nanometer range due to its high accuracy, reliability and functionality — has been carried out.

Key words: digital photoelectric interferometer, nanometry, interpolation index.

В настоящее время бурно развиваются такие нанотехнологии, как микролитография, супрмолекулярная химия, наноплазмоника. Появляются новые нанообъекты: нанотранзисторы, размеры которых за период 2007—2011 гг. уменьшились с 45 до 22 нм; мемристоры с запоминанием силы тока; плазмоны; графен, заменяющий кремний в интегральных схемах; литийные наноаккумуляторы большой емкости; углеродные трубки для бронежилетов повышенной прочности; сверхбыстродействующие нейрокомпьютеры; широкополосные фотоприемники. Нанотехнологии существенно повышают потребительские свойства промышленных изделий и, следовательно, очень перспективны. Поэтому промышленно развитые страны выделяют на исследования и разработку нанотехнологий огромные средства, создают исследовательские центры и производства. Однако в нашей стране метрологии в этой области уделяется недостаточно внимания.

Д. И. Менделеев говорил, что «наука начинается там, где начинают измерять». Он был услышан, метрологию начали развивать и в России. Сейчас наступило время нанотехнологий, поэтому надо ускоренно развивать нанометрологию, так как «если нельзя измерить, то невозможно создать» [1].

Пути этого развития находятся на стыке методов исследования поверхности твердого тела — сканирующей зондовой микроскопии — и прецизионных измерений линейных величин.

Основными средствами измерений и исследования микроструктур, нашедших широкое применение, являются:

атомно-силовой микроскоп, работающий с проводящими материалами и позволяющий наблюдать атомы;

сканирующий туннельный микроскоп, позволяющий не только наблюдать, но и передвигать атомы;

электросиловой микроскоп для детектирования единичных зарядов на поверхности образцов, использующийся для изучения локальных диэлектрических свойств поверхностных слоев образцов;

магнитно-силовой микроскоп, предназначенный для исследования образцов с сильно развитым рельефом поверхности;

ближнепольный оптический микроскоп, применяемый для исследования локальных оптических и фотоэлектрических свойств полупроводниковых структур и биологических объектов.

Перечисленные приборы в настоящее время широко используют в исследованиях. Существует также ряд других приборов, работающих по принципу сканирующих зондовых микроскопов.

В области методов и средств прецизионных измерений линейных величин наиболее перспективными являются фотоэлектрические методы и средства измерений, в которых в качестве мер используют голографические, дифракционные и растровые решетки или интерференционные поля. При этом измерительные системы (ИС) содержат, как правило, устройство для счета периодов мер и интерполятор. Повышение точности таких ИС проводится по двум направлениям — уменьшение периода используемой меры и повышение дилности интерполяторов для уменьшения дискретности отсчета повышением индекса интерполяции.

В конструкциях средств измерений основным элементом, определяющим уровень точности, являются меры.

В настоящее время разработаны широкопредельные линейные голографические дифракционные решетки с диапазоном измерений 0—1,000 мм, ценой деления 1 мкм, погрешностью $\pm 0,4$ мкм. На их основе разработан голографический преобразователь линейных перемещений, разрешающая способность которого составляет 0,01 мкм, а погрешность определяется как $\pm(0,02+0,4L/1000)$ мкм, где L — измеряемая дилна в миллиметрах [1]. Подобный преобразователь используется в ряде приборов, например таких, как длиномер голографический (субмикрометр). В диапазонах измерений 0—30; 0—100; 0—200 мм их погрешность составляет соответственно $\pm 0,1$; $\pm 0,2$; $\pm 0,4$ мкм [1].

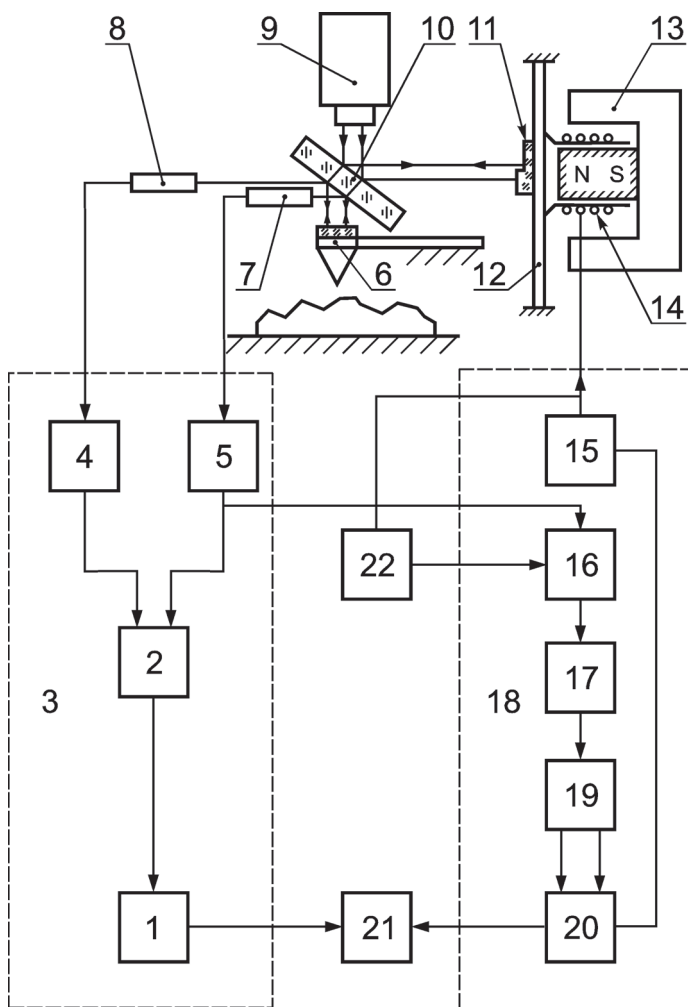
Уменьшение периода многозначных мер в 3—5 раз возможно при использовании интерференционных полей. Дальнейшее обеспечение высокой точности измерений требует применения интерполяторов с большим индексом интерполяции.

В фазовых счетно-интерполяционных ИС с квадратурными сигналами фотоприемников достигнутый индекс интерполяции составляет на практике около восьми значений в пределах периода меры. Считается, что возможно получение указанного индекса в пределах 16—32 значений, а в перспективе — около 100 [2]. Дальнейшее повышение индекса интерполяции проблематично из-за уменьшения освещенности рабочего поля. Данную проблему можно решить при применении компенсационных методов интерполяции, использующихся в экстремальных счетно-интерполяционных фотоэлектрических системах [3]. В таких ИС с применением сканирующих компенсационных интерполяторов (СКИ), пьезоэлектрических и электронно-оптических интерполяторов индекс интерполяции может реально составлять 100, в перспективе — 200 значений [4]. Целью является достижение 1000 значений в пределах периода используемой меры, а при применении магнитоэлектрических СКИ — 1000, 2000, 10000 значений, соответственно [5]. Измерительная система указанных приборов построена по двухотсчетной схеме, причем в интерполяторе используется только один фотоприемник, а все его элементы охвачены обратной связью [6].

Такую интерференционную ИС можно применить, например, в атомно-силовом микроскопе для измерений перемещения зонда, включив зеркало, размещенное на зонде, в схему двухлучевого интерферометра. Существенное отличие этого интерполятора — реализация позиционного принципа преобразования, что делает ИС нечувствительной к помехам. Потери информации не происходят даже при вык-

лучении питания. Перемещение зонда в атомно-силовом микроскопе может составлять 0,1—10 нм. Разрешающая способность интерферометра с экстремальным интерполятором оценивается как $\lambda/2000$, где $\lambda = 0,6057$ (криптон 86).

Функциональная схема интерференционной ИС, построенной по схеме Майкельсона, приведена на рисунке. Она включает: фотоприемники 7, 8; осветитель 9; формирователь интерференционных полос, состоящий из измерительного зеркала 6, референтного зеркала 11 и светоделителя 10; обратный преобразователь, состоящий из магнитной системы 13, в зазор которой помещена катушка 14, закрепленная на упругом элементе преобразователя — якоре 12, к которому прикреплено референтное зеркало 11. На половине референтного зеркала напылена ступенька, обеспечивающая сдвиг фазы сигнала на 90° для получения квадрата-



Функциональная схема интерференционной измерительной системы, построенной по схеме Майкельсона:

1, 20 — реверсивные счетчики; 2 — формирователь счетных импульсов; 3 — канал счета целого числа полос; 4, 5 — усилители переменного тока; 6 — измерительное зеркало; 7, 8 — фотоприемники; 9 — осветитель; 10 — светоделитель; 11 — референтное зеркало; 12 — якорь; 13 — магнитная система; 14 — катушка; 15 — цифроаналоговый преобразователь; 16 — демодулятор; 17 — фильтр; 18 — канал интерполятора; 19 — нуль-орган; 21 — цифровой индикатор; 22 — генератор синусоидального напряжения

турных сигналов, которые используются для реверсивного счета интерференционных полос. Сигналы фотоприемников поступают в канал счета целого числа полос 3 и канал интерполятора 18.

Канал счета целого числа полос состоит из усилителей переменного тока 4, 5, формирователя счетных импульсов 2, реверсивного счетчика 1. Канал интерполятора включает демодулятор 16, фильтр низких частот 17, нуль-орган 19, реверсивный счетчик 20, генератор синусоидального напряжения 22, цифроаналоговый преобразователь 15. К выходам реверсивных счетчиков 1, 20 подключен цифровой индикатор 21.

Работа системы заключается в следующем. При перемещении зеркала 6 на выходах фотоприемников 7, 8 формируются периодические сигналы, смещенные относительно друг друга по фазе на 90° . Эти сигналы промодулированы с частотой напряжения, подводимого к катушке 14 обратного преобразователя от генератора синусоидального напряжения 22. Модуляция происходит вследствие колебательного движения (сканирования) зеркала 11, жестко связанного с якорем 12 обратного преобразователя. Амплитуда колебаний индикаторного зеркала может изменяться в пределах от долей длины волны света до величины, несколько превышающей половину длины волны света, что не влияет на работоспособность устройства. Фотоприемники 7, 8 подключены к усилителям переменного тока 4, 5 а их выходы — к блоку формирования счетных импульсов 2. Соединение выходов усилителей переменного тока 4, 5 непосредственно со входами блока формирования импульсов 2 исключает операцию интегрирования при восстановлении огибающей сигнала, выполняемую в известных устройствах демодулятором, что существенно повышает быстродействие системы. Счетные импульсы поступают на вход реверсивного счетчика 1. Выходной код 1, соответствующий целому числу пройденных полос, подается на блок цифровой индикации 21. В канале интерполятора один вход демодулятора 16 подключен к выходу усилителя переменного тока 5, а второй — к генератору 22, напряжение которого служит в качестве опорного. Вследствие колебания зеркала 11 на выходе усилителя переменного тока 5 появляется сигнал, содержащий в общем случае гармонические составляющие, кратные частоте сканирования. Первая гармоническая составляющая отсутствует в сигнале при совпадении центра колебания референтного зеркала 11 с экстремумом освещенности интерференционного поля. Сигнал, однозначно связанный с амплитудой и фазой первой гармоники, вырабатывается демодулятором 16. В момент наведения на экстремум напряжения на выходе 16 равно нулю. При смещении измерительного зеркала 6 в том или ином направлении на выходе демодулятора 16 появляется напряжение соответствующего знака, что фиксируется нуль-органом 19.

В состав нуль-органа входят два диодно-регенеративных компаратора, уровни срабатывания которых регулируются напряжением, соответствующим смещению измерительного зеркала на половину дискретности. При превышении этого напряжения импульсы с выхода 19 поступают на вход суммирования или вычитания реверсивного счетчика 20. Изменение состояния счетчика 20 приводит к изменению напряжения на выходе цифроаналогового преобразователя 15. Напряжение с выхода 15 подается в катушку 14 обратного преобразователя. В результате этого референтное зеркало 11 перемещается в положение, соответствующее экстремуму

освещенности интерференционного поля. Разрядность реверсивного счетчика 20 определяется требуемой дискретностью интерполятора. Коэффициент преобразования цифроаналогового преобразователя 15 устанавливается таким, чтобы максимальное смещение индикаторного зеркала 11 с погрешностью, не превышающей половины дискретности интерполятора, было равно периоду интерференционной шкалы. Код в счетчике 20, однозначно соответствующий величине дробной доли полосы, подается на цифровой индикатор 21.

Функциональная схема компенсационного преобразователя перемещений не зависит от вида шкалы (голографическая, интерференционная, растровая).

Растровые цифровые длиномеры с дискретностью отсчета 0,1 и 0,05 мкм (шаг растров 100, 50 мкм, соответственно) выпускали малыми сериями в течение ряда лет и применяют до настоящего времени на предприятиях России [7, 8].

Благодаря использованию в конструкции и схемных решениях последних достижений в области метрологии интерференционный преобразователь имеет уникальные метрологические характеристики при высокой надежности и простоте в эксплуатации, что позволяет применять его в атомно-силовых микроскопах.

Литература

1. Новиков Ю. А., Тодуа П. А. Нанотехнология и нанометрология // Наноиндустрия. 2007. № 1. С. 20—22.
2. Преснухин Л. Н., Шаньгин В. Ф., Шаталов Ю. А. Фотоэлектрические преобразователи информации. М: Машиностроение, 1974.
3. Коляда Ю. Б. и др. Перспективы применения экстремальной счетно-интерполяционной системы в устройствах точного измерения линейных и угловых перемещений // Измерительная техника. 2002. № 6. С. 15—18; Kolyada Yu. B. Prospects for Using a Digital Extremal Counting Interpolation System in Devices for Accurately Measuring Linear and Angular Displacements // Measurement Techniques. 2002. V. 45. N. 6. P. 589—592.
4. А. с. 261484 СССР. Фотоэлектрическое устройство для измерения перемещений двух частей механизма / А. В. Мироненко, А. В. Балашов, Ю. Б. Коляда // Бюл. изобрет. 1970. № 5.
5. Коляда Ю. Б., Янушкин В. Н. Исследования и разработка способов коррекции погрешностей преобразователей с совмещенными функциями // Измерительная техника. 2001. № 3. С. 29—33; Kolyada Yu. B., Yanushkin V. N. Investigation and Development of Methods of Correcting the Errors of Converters with Joint Functions // Measurement Techniques. 2001. V. 44. N. 3. P. 265—269.
6. А. с. 1422002 СССР. Устройство для измерения перемещений / А. В. Мироненко, Г. П. Дмитриев, Ю. Б. Коляда, В. Н. Янушкин // Бюл. изобрет. 1988. № 33.
7. Янушкин В. Н., Коляда Ю. Б. Комплексное решение проблемы повышения точности измерения // Измерительная техника. 2014. № 3. С. 20—23; Yanushkin V. N., Kolyada Yu. B. Complex Solution of the Problem of Increasing the Precision of Linear-Angular Measurements by Means of Photoelectric Methods // Measurement Techniques. 2014. V. 57. N. 3. P. 255—259.
8. Янушкин В. Н., Коляда Ю. Б., Крушняк Н. Т. Приоритетное направление развития прецизионной техники измерения // Метрология. 2014. № 3. С. 20—24.

Дата принятия 07.05.2014 г.