

УДК 60.1:006.91(045)

Сунетчиева С. Р.

Національний авіаційний університет, Київ

КВАНТОВЫЕ ЭТАЛОНЫ И НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Эталон – вершина измерительной техники – прошли путь от единиц длины связанных с размерами человеческого тела до единиц базирующихся на фундаментальных постоянных. В статье требование точности определило всю историю развития эталонов, дано описание перспектив их развития. Более подробно рассмотрены этапы становления одной из основных единиц – метра.

Развитие лазерно-изотопной техники в XX веке показала высокую стабильность частоты излучений радиоизотопов и оптических генераторов (погрешность $2 \cdot 10^{-13}$ - $5 \cdot 10^{-14}$). Учитывая универсальность этого параметра удалось создать современные эталоны времени и длины с максимальной точностью $1 \cdot 10^{-11}$ - $1 \cdot 10^{-12}$. Именно появление квантовых эталонов ознаменовало начало квантовой метрологии.

Что же такое квантовая метрология? Это раздел метрологии об измерениях, базирующихся на квантовых явлениях. Центральная проблема квантовой метрологии – установление так называемой естественной системы единиц физических величин основанных на фундаментальных (мировых) константах. Главные направления в квантовой метрологии: разработка и реализация квантовых эталонов (КЭ); установление соответствия между размерами единиц, воспроизводимых различными КЭ, а также преемственности между ними и традиционными эталонами; выявление и изучение погрешностей КЭ, поиск квантовых явлений, в которых наиболее стабильно и с минимальной погрешностью воспроизводятся значения фундаментальных констант и их комбинаций; уточнение и согласование их значений; развитие методов измерений с наивысшей точностью и минимализации порога чувствительности, основанных на квантовых явлениях.

С развитием науки появились более точные единицы на основе стабильных физических эффектов и констант физических взаимодействий. В табл. 1 представлены современные эталоны единиц системы СИ и их погрешности.

В системе СИ эталоны времени (секунда определяющаяся интервалом, в котором укладывается 9192631770 периодов колебаний излучения, соответствующего квантовому переходу между уровнями сверхтонкой структуры основного состояния атома цезия-133) и длины (основанное

на значении скорости света в вакууме) уже связаны с фундаментальными константами.

На очереди «квантование» эталонов массы и силы тока, исследования по которым ведутся уже более 15 лет. Развитие эталона массы развивается по двум направлениям: через постоянную Планка с помощью ватт-весов и через атомную единицу массы число Авогадро с помощью образца сверхчистого кристаллического кремния. На сегодняшний день Германия уже приняла как национальный эталон кремниевый шар, в котором посчитано число атомов равным числу Авогадро.

В табл. 2 представлены основные исторические этапы развития длины. Мы видим переход от прототипа метра на эталонную длину волны. Этот переход позволил: упростить воспроизведение единицы длины; повысить точность измерений; и обеспечить стабильность эталона основной физической величины.

Переход от микро- к наноэлектронике был обусловлен революцией в микроскопии начавшейся с появлением в 1981 году зондового микроскопа и соответствующей аппаратуры для создания деталей и механизмов на атомном уровне. На сегодняшний день количество и разнообразие микроскопов стремительно увеличивается, например атомно-силовой микроскоп (АСМ), растровый электронный микроскоп (РЭМ), зондовый атомно-силовой микроскоп (ЗАСМ) и их вариации. А так же можно считать большим прорывом в микроскопии появление методики подсчета, перекладкиывания и компоновки атомов в различные структуры, (например, немецкие ученые смогли посчитать и скомпоновать число атомов равным числу Авогадро). Но такое развитие требует соответствующее метрологическое обеспечение, а так же необходимость единства измерений, их передача с высокой точностью в квантовом диапазоне, то есть калибровка и стандартизация этих самых наноприборов.

Таблиця 1

Название единицы	Символ	Название физической величины	Принята	Погрешность
Метр	м	Длина	17-я Конференция по мерам и весам (1983г, Резолюция 1)	$1,3 \cdot 10^{-10}$ – $1,1 \cdot 10^{-9}$
Килограмм	кг	Масса	3я Конференция по мерам и весам (1901г)	$2 \cdot 10^3$
Секунда	с	Время	13я Конференция по мерам и весам (1967/68г, Резолюция 1)	$2 \cdot 10^{-13}$ – $5 \cdot 10^{-14}$
Ампер	А	Сила тока	9я Конференция по мерам и весам (1948г)	$3 \cdot 10^{-4}$
Кельвин	К	Термодинамическая Температура	13я Конференция по мерам и весам (1967/68г, Резолюция 4)	$1 \cdot 10^{-3}$ – $3 \cdot 10^{-3}$
Моль	моль	Количество вещества	14я Конференция по мерам и весам (1971г, Резолюция 3)	
Кандела	кд	Сила света	16я Конференция по мерам и весам (1979, Резолюция 3)	

Таблиця 2

	Название единицы	Год	История развития ФВ – метр	
Человек	Фут, сажень, дюйм, ярд, локоть	середина XVIII века	1824 г.	Изготовление ярда в виде стержня. Погрешность 1 см.
Земля	Метр	1795-1889г.г.	1795 г.	“Метр – длина, равная 1/40.000.000 длины Парижского меридиана”. Погрешность 0,1 мм.
			20 мая 1875 г.	Подписана Международная метрическая конвенция. Создано Международное бюро мер и весов (Париж).
			Сентябрь 1889г. 1-я Генеральная конференция по мерам и весам	Прототип метра – платино-иридиевый жезл – штриховая мера. Погрешность 0,1 мкм.

Продолжение табл. 2

Квантовые эталоны	Метр	1960-1997г.г.	Октябрь 1960г. XI Генеральная конференция по мерам и весам.	“Метр – длина, равная 1650763,73 длин волн в вакууме излучения, соответствующего переходу между уровнями 2p ₁₀ -5d ₅ атома криптона-86” (Резолюция 6). Погрешность 0,01 мкм
			Октябрь 1983г. XVII Генеральная конференция по мерам и весам.	“Метр есть длина пути проходимого светом в вакууме за интервал времени, равный 1/299792458 секунды” (Рекомендация 1) “Значение скорости света в вакууме c=299792458 м/с. Погрешность 4·10 ⁻⁹ м.
			Сентябрь 1997г. 9-я Сессия Консультативного комитета по длине.	Рекомендованные значения частоты и длины волны излучения в вакууме He-Ne/ I2 лазера ν = 473612214705 кГц λ = 632,99139822 нм Наивысшая точность воспроизведения метра 10 ⁻¹¹ м.

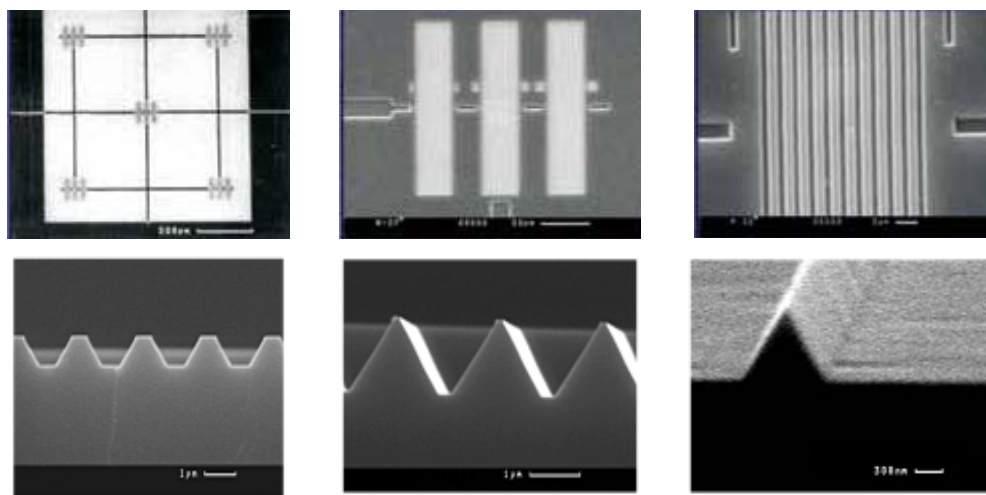


Рис. 1. Общий вид

Таблица 3

Номинальные размеры	Погрешность аттестации
Шаг 2000 нм	1 нм
Ширина линии 10–1500 нм	1 нм
Высота (глубина) 100–1500 нм	1 %

Носитель размера – длина волны стабилизированного *He-Ne* лазера.

Что же такое стабилизированный *He-Ne* лазер? В 1960 году, когда за эталон длины приняли криптоновый стандарт, был создан принципиально новый источник излучения – лазер, и началось бурное развитие лазерной техники. Обнаружилось, что газовый лазер на смеси гелия и неона (*He-Ne*) может генерировать чрезвычайно узкие спектральные линии – гораздо уже, чем криптонового стандарта. Однако частоты этих линий могут «плавать», меняться не контролируемым образом (например, вследствие изменения длины резонатора). Поэтому, что бы получить источник света намного лучший, чем криптоновая лампа, необходимо стабилизировать частоту лазерного излучения. Такой стабилизации достигли использованием молекулярных линий поглощения некоторых газов, у которых частота одной из линий поглощения близка к частоте излучения лазера. Такие лазеры обеспечивают генерацию очень узких линий излучения со стабильностью частоты такого же порядка, что и в стандартах времени. Естественно, возникла мысль об использовании стабилизированных лазеров в качестве стандартов длины вместо криптонового эталона.

На рис. 1 представлена калибровка растрового электронного микроскопа (РЭМ) с помощью эталонного лазерного интерферометрического измерителя наноперемещений. Его назначение заключается в измерении линейных перемещений в реальном масштабе времени, в том числе калибровке систем сканирования и позиционирования в микро- и нанотехнологии.

Аттестуются шаг меры и размеры верхних и нижних оснований выступов и канавок (ширина линии), а также высота (глубина) рельефа таблица 3. Меры позволяют по одному изображению меры в растровом электронном микроскопе (РЭМ) определить увеличение микроскопа, линейность его шкал и диаметр его электронного зонда. Абсолютная погрешность измерений ле-

жит в диапазоне $0.5 \div 3$ нм при максимальном значении скорости перемещения 3 мм/с.

В верхнем ряду рисунка 1 представлена мера, которая состоит из пяти групп шаговых структур по три структуры в каждой. Далее приведено изображение одной из шаговых структур. В верхнем ряду на третьей картинке мы видим структуру состоящую из одиннадцати канавок с трапециевидным профилем в кремнии. Боковые стенки канавок соответствуют кристаллографическим плоскостям кремния, а дно канавки и верх выступа – другим его плоскостям.

Высокое качество меры демонстрируют изображения сколов шаговой структуры в растровом электронном микроскопе (РЭМ). Благодаря такому выбору формы канавок обеспечивается меры с разными высотами и ширинами выступов. В нижнем ряду рисунка 1 на первой картинке показано увеличение – верх выступа 520 нм, низ канавки 560 нм, высота структуры 650 нм. На второй картинке – верх выступа 110 нм, низ канавки 260 нм, высота структуры 1150 нм. На третьей – верх выступа 30 нм, высота структуры 320 нм.

Переход на квантовые эталоны (основанные на фундаментальных константах) и новые технологии дают возможность уже сейчас создавать индивидуальные эталоны для новых информационно – измерительных систем.

Список литературы:

1. *Квантовые стандарты частоты* / Жаботинский М.Е., Золин В.Ф., 2.Тодуа П.А. – М.: 1968. – 164 с.
2. *Nanometer – Scale Metrology* / Postek M.T. – Proc.s of SPIE, 2002, v. 4608.
3. *Государственный первичный эталон единицы длины*. Российская метрологическая энциклопедия / Федорин В.Л. – С.-Петербург: Изд-во “Лики России”, 2001. – С. 228–231.
4. *Экстремальная ультрафиолетовая литография – будущее нанoeлектроники*. Нано- и микросистемная техника. Гапонов С.В. – 2005. – № 2. – С. 2-4.
5. *Введение в нанотехнологию* / Кобаяси Н. –М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. – 134 с.

Научный руководитель – Пустовойтов Н. А., канд. техн. наук, доц.