

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК**ОДНОИЗОТОПНЫЕ ИСТОЧНИКИ СВЕТА В МЕТРОЛОГИИ*****Н. Р. Батарчукова***

В связи с предстоящим переходом на световой метр является своевременной постановка вопроса об окончательном выборе спектральной линии, длина волны которой должна будет определить единицу длины. Мысль об использовании световой волны в качестве неизменного, воспроизводимого эталона длины впервые была высказана более ста двадцати лет назад (в 1827 г.) Ж. Бабине¹. Однако реальная возможность такого использования длины волны появилась лишь в 1887 г., когда Майкельсон и Морли² разработали первые методы применения явления интерференции световых волн к измерениям длины. Эту работу следует считать началом серьезных исследований вопроса определения единицы длины через световую волну.

В 1892 г. Майкельсон³, устанавливая пределы видимости интерференции в различных спектральных линиях, обнаружил, что большинство из них имеет сложное строение, которого он не наблюдал лишь у одной красной линии естественного кадмия. Вот почему последняя и была предложена им в качестве основной. Удачный выбор Майкельсона обеспечил спектроскопию и метрологию эталоном длин световых волн более чем на пятьдесят лет³. Красная линия естественного кадмия до настоящего времени служит эталоном не только при спектроскопических измерениях; она принята основной и в метрологии для интерференционных измерений концевых мер длины. Как показали дальнейшие исследования, эта линия, долгое время считавшаяся простой, на самом деле также имеет сложное строение. Составляющие её сверхтонкой структуры настолько близко расположены друг к другу, что ширина линии в излучении стандартных⁶ источников света не позволяла разрешить их интерференционным прибором. Наблюдать сверхтонкую структуру красной линии естественного кадмия впервые удалось М. Ф. Романовой и А. А. Ферхмин⁴ при исследовании спектра кадмия, излучаемого трубкой с полым катодом, являющейся источником значительно суженных спектральных линий.

В 1928 г. при подробном изучении спектральных линий, применяемых для интерференционных измерений длины⁵, было установлено, что длина волны сложной спектральной линии как бы меняется с разностью хода в интерферометре. Это кажущееся изменение вызвано смещением максимума интерференции сложной линии при изменении разности хода в связи с перераспределением интенсивностей в составляющих сверхтонкой структуры. Длина волны, соответствующая центру тяжести сложной линии, получила название «эффективной длины световой волны». Воспроизводимость этого значения при измерениях мер различной длины является необходимым условием для применения спектральных линий при интерференционных измерениях. Чем сложнее линия и чем шире раздвинута структура, тем хуже воспроизводится длина волны с изменением разности хода в интерферометре. Поэтому самой низкой воспроизводимостью длины волны обладает зелёная линия естественной ртути, что и помешало, несмотря на исключительную яркость этой линии, выбрать её эталоном длин световых волн.

За последние годы была подробно изучена воспроизводимость длины волны красной линии естественного кадмия и проведены многократные сравнения её с длиной прототипа метра⁶. Эффективная длина волны этой линии, излучаемой лампой Майкельсона при строго стандартизованных условиях, воспроизводится с самой высокой точностью ($\pm 0,0001 \div \pm 0,0002 \text{ \AA}$) по сравнению с длинами волн любых других сложных спектральных линий. Это объясняется тем, что красная линия кадмия обладает очень узкой структурой, разрешение которой, как это уже упоминалось, возможно лишь в источниках света, излучающих суженные спектральные линии. Воспроизводимость красной линии кадмия вполне удовлетворяет современным высокоточным измерениям длины в световых волнах *).

Однако естественным является желание дальнейшего повышения точности воспроизведения самой единицы длины. С этой целью необходимо расширение предела абсолютных интерференционных измерений длины, что возможно осуществить путём применения источников света специальной конструкции, излучающих суженные спектральные линии. Такого рода источники не дадут особых преимуществ в отношении воспроизводимости длины волны красной линии естественного кадмия, так как начнёт неизбежно сказываться влияние сверхтонкой структуры, которое до того могло оставаться незаметным.

Совсем по-другому решается вопрос воспроизводимости длины волны простых линий, не имеющих сверхтонкой структуры. Само понятие «эффективной длины световой волны» здесь теряет смысл.

*) См. статью М. Ф. Романовой «Современное состояние вопроса об определении метра длиной световой волны», помещённую выше (стр. 259).

При симметричном распределении интенсивности в спектральной линии значение её длины волны, отнесённое к максимуму интенсивности, принципиально не может меняться с изменением разности хода в интерферометре. Асимметрия линии или смещение максимума, ведущее к снижению воспроизводимости длины волны, появляется у простой линии только в источниках света с большим давлением паров или газов или при наличии внешних электрических или магнитных полей.

В естественном состоянии ни один элемент не излучает простых линий. Однако в результате недавних успехов ядерной физики оказалось возможным получить стабильные чётные изотопы некоторых элементов. Спектральные линии, излучаемые чётными изотопами, не обладают сверхтонкой структурой и потому всегда будут иметь для метрологии преимущества перед соответствующими линиями естественных элементов.

В некоторых случаях получение простых линий можно осуществить применением интерференционной монохроматизации⁷. Этот метод позволяет применять для интерференционных измерений яркие сложные линии естественных элементов⁸ наряду с простыми линиями чётных изотопов.

Исключение сверхтонкой структуры не решает полностью вопроса о выборе какой-нибудь спектральной линии в качестве основной, так как при выборе линии предъявляются также требования и к ширине. Все спектральные линии, излучаемые современными источниками монохроматического света, значительно расширены. Одной из главных причин расширения спектральных линий является, как известно, тепловое движение излучающих атомов. Величина этого расширения пропорциональна $\sqrt{\frac{T}{M}}$, где T — абсолютная температура, а M — молекулярный вес вещества. Исходя из этого закона теплового расширения, при выборе основной линии считают необходимым исследовать излучения только тяжёлых элементов (например, ртути) или таких лёгких элементов, упругость паров которых оказывается достаточной для возбуждения спектра при очень низких температурах (-196°C и ниже)^{9, 10}. При этом совершенно забывают, что доплеровское расширение линии можно значительно уменьшить и иным способом, например путём применения источника света специальной конструкции, позволяющего наблюдать излучение в направлении, перпендикулярном к движению излучающих атомов (направленные атомные пучки)¹¹.

Несомненно, при выборе основной спектральной линии следует предъявлять определённые требования не только к самой спектральной линии, но и к условиям её возбуждения. В большинстве работ^{9, 12, 13}, посвящённых этому вопросу, на первое место выдвигается требование минимума доплеровского расширения, а воспроизводимость длины волны при изменении разности хода в ин-

терферометре остаётся в тени. Допплеровское расширение, будучи симметричным, не оказывает влияния на воспроизводимость длины волны. Поэтому, с нашей точки зрения, оно не является основным препятствием для выбора линии. Наличие его должно быть учтено при создании условий возбуждения.

Значительно более важным оказывается смещение максимума спектральной линии и её асимметричное расширение под влиянием давления пара или газа в источнике света. Расширение давлением зависит от температуры, плотности и рода газа, окружающего излучающий атом¹⁴. Оно вызывается соударениями излучающего атома с атомами той же природы (резонансное расширение), а также в результате соударений с атомами другого газа, который обязательно вводится в источник света с малым количеством исследуемого вещества для облегчения возбуждения и поддержания разряда.

Взаимодействие излучающего атома с соседними происходит по-разному у различных веществ. Кроме того, даже и для данного вещества, далеко не все спектральные термы излучающих атомов в одинаковой степени подвержены влиянию давления. В спектре любого вещества есть линии, для которых при определённых условиях легко появляется самообращение, и есть линии, для которых оно никогда не наблюдалось. Самообращение в линиях, несомненно, следует принимать во внимание при выборе нового эталона длин световых волн, который должен представлять собой длину волны спектральной линии, соответствующей термам, менее всего подверженным влиянию давления.

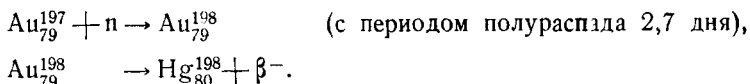
Для удобства работы при измерениях линия должна быть достаточно яркой, легко выделяться из спектра и, кроме того, обеспечивать наилучшую преемственность в определении единицы длины. Последнее означает, что точность сравнения длины волны новой линии с длиной волны красной линии кадмия должна быть наивысшей.

При интерференционных измерениях длины большим преимуществом является применение такого источника монохроматического света, который помимо эталонной линии излучает ряд вспомогательных простых линий, расположенных в видимой области спектра и удобных для нахождения порядка интерференции методом совпадения дробных частей. Длины волн вспомогательных линий могут играть роль вторичных эталонов.

За последние десять лет в метрологических лабораториях ряда стран ведутся работы по созданию одноизотопных источников света с целью выбора в их излучении простой спектральной линии для определения единицы длины. Таковыми являются источники света, заполненные чётными изотопами ртути (Hg^{198} , Hg^{202}), изотопами криптона (Kr^{84} , Kr^{86}) и изотопами кадмия (Cd^{112} , Cd^{114} , Cd^{116}).

ИСТОЧНИКИ СВЕТА С ИЗОТОПОМ РТУТИ

Получение изотопа ртути Hg^{198} было разработано ещё в 1940 г.^{15, 16}. Чистый стабильный изотоп ртути 198 в достаточных для спектроскопических исследований количествах можно получить путём бомбардировки химически чистого золота (99,99%) мощным пучком нейтронов. При этом используется следующая ядерная реакция:



Изотопы ртути разделяют также и на масс-спектрографе, но степень чистоты изотопа 198 оказывается меньшей.

Первая лампа с изотопом ртути, изготовленная в Национальном бюро стандартов (НБС), представляла собой безэлектродную трубку (длиной 10 см и внутренним диаметром 5 см) из пирексового стекла. На одном из концов такой трубки имелся шарик для наблюдения излучения вдоль разряда. Трубка содержала изотоп ртути Hg^{198} в ничтожном количестве и чистый аргон. Яркий спектр ртути возбуждался в ней посредством генератора высокой частоты (110 Мгц). Из-за быстрого поглощения пирексом молекул ртутного пара свечение трубки прекратилось. Однако удалось получить фотографии интерференционных колец равного наклона во всех линиях видимой области спектра, которые позволили сделать заключение об отсутствии сверхтонкой структуры в этих линиях. Зелёная линия естественной ртути является самой сложной из всех спектральных линий. Поэтому простота её в излучении изотопа Hg^{198}

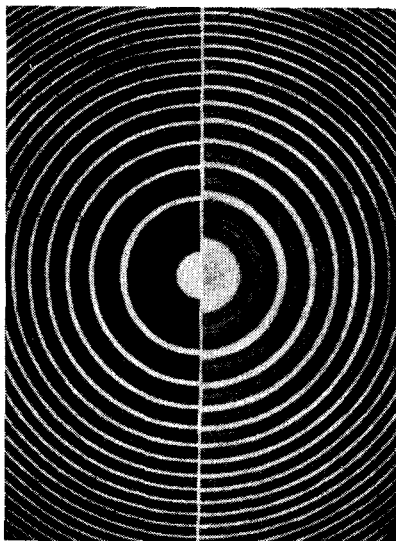


Рис. 1.

особенно хорошо заметна на приведённой в качестве примера сравнительной фотографии (рис. 1) интерференционных колец равного наклона с разделённым полем. На основании уже этих предварительных данных зелёная линия $\lambda = 5461 \text{ \AA}$, как самая яркая и простая, была предложена Меггерсом для замены красной линии естественного кадмия⁹.

Дальнейшее совершенствование техники получения стабильных изотопов в достаточно больших количествах позволило создать лампы с изотопом ртути для проведения подробных исследований излучения Hg^{198} . Такие исследования были проведены в различных лабораториях Америки¹⁸

и Англии^{19, 20}, а также в Международном бюро мер и весов (МБМВ) во Франции^{21, 22}.

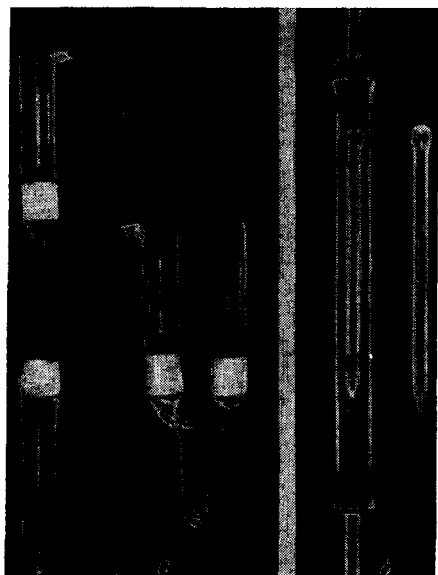


Рис. 2.

Лампы НБС представляют собой обычные газоразрядные трубки (типа трубок Гейслера) с холодными катодами (рис. 2, а) или безэлектродные трубки, такие же, как и первая лампа Меггера, только не из пирекса, а из специального стекла (96 % кремния). В результате длительных экспериментов было выяснено, что 1—3 мг изотопа при давлении 5 мм рт. ст. чистого аргона вполне достаточно для заполнения безэлектродных трубок при возбуждении свечения в них высокой частотой 30—100 Мгц.

Было также установлено, что чем выше частота генератора и чем больше давление аргона, тем ярче ртутный спектр и тем больше срок службы трубки. Поэтому Меггерс использовал для возбуждения свечения своих трубок частоту в 100 Мгц. В литературе имеются указания на возможность дальнейшего повышения частоты возбуждения безэлектродного разряда до 2700—3000 Мгц^{23, 24} путём применения магнитронных генераторов. Такая частота сильно увеличивает яркость линий при очень малых количествах светящегося вещества, но данные о том, как она влияет на ширину спектральной линии, отсутствуют.

Путём сравнения с длиной волны красной линии естественного кадмия определены длины волн шести линий изотопа ртути Hg^{198} , в интервале $\lambda = 5790 \text{ \AA}$ до $\lambda = 4046 \text{ \AA}$. Установлено, что точность их воспроизведения при многократных измерениях порядка $\pm 0,0000, \div \pm 0,0001 \text{ \AA}$. В этих исследованиях особое внимание было обращено на зелёную линию $\lambda = 5461 \text{ \AA}$. Максимальная разность хода для этой линии, при которой ещё видна интерференция, составляет 500 мм.

При выяснении предела видимости интерференции в лампе с Hg^{198} было обнаружено, что он сильно сокращается, если лампа во время свечения не охлаждается проточной водой. Как только температура светящегося источника превысит 30°C , так во всех линиях, кроме $\lambda = 4358$, появляется самообращение²¹. Явление самообращения особенно резко выражено для зелёной линии $5461 \text{ \AA}$. Интерференционные кольца равного наклона (рис. 3) сняты в свете зелёной линии, излучаемой безэлектродной трубкой без охлаждения её проточной водой при разности хода $42,2 \text{ мм}$ ²⁵. Каждое кольцо разделяется на два в результате явного самообращения линии. Интерферограмма показывает, что для того, чтобы видеть интерференцию с этой линией на максимально возможном для неё расстоянии (500 мм), необходимо поддерживать источник света при температуре не выше 20°C .

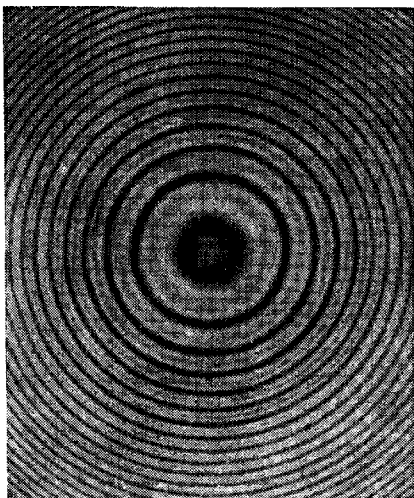


Рис. 3.

Попытки охладить источник до более низкой температуры привели лишь к резкому снижению яркости спектральных линий, так как уже при 15°C начинается сильная конденсация паров ртути и упругость пара падает настолько, что источник перестаёт излучать ртутный спектр. Таким образом, исключение доплеровского расширения в линиях ртути путём охлаждения источника ниже 15°C оказывается неприемлемым. Следует отметить, что при наблюдении свечения в трубке не поперёк, а вдоль разряда зелёная линия всегда оказывается самообращённой²¹.

Баррелл в Национальной физической лаборатории (НФЛ)²⁵ исследовал излучение ртути 198 в трубках, заполненных чистым изотопом без примеси аргона, и в лампах с холодными катодами, содержащими всего лишь $0,25 \text{ мг}$ Hg^{198} при 10 мм рт. ст. давления чистого аргона. Это исследование позволило ему выяснить влияние давления аргона на ширину спектральных линий Hg^{198} .

На основании данных Баррелла построен график (рис. 4) зависимости средней величины смещения максимума шести линий ртути ($4046\text{—}5790 \text{ \AA}$) от давления аргона в лампах. На графике по оси абсцисс отложено давление аргона в мм рт. ст., а по оси орди-

нат — разности между частотами линий, излучаемых различными трубками НБС (с давлением аргона 3—6 мм), и частотами линий, излучаемых трубкой НФЛ, не содержащей аргона. На график нанесена также точка, соответствующая излучению лампы с холодными катодами при 10 мм рт. ст. давления аргона. Значения длин волн, излучаемых трубками НБС, были взяты как среднее из работ различных авторов. Отдельно нанесены точки (всех ламп) для зелёной

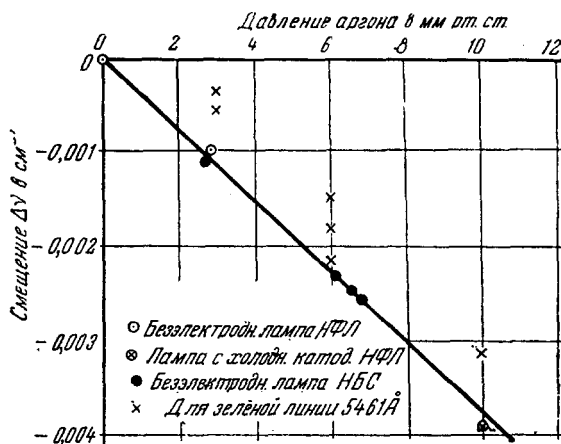


Рис. 4.

линии ртути. Средняя величина смещения максимумов всех линий (в красную сторону спектра) пропорциональна давлению и составляет $0,0001 \text{ Å}$ ($0,0004 \text{ см}^{-1}$) на 1 мм рт. ст. Отсюда вытекает, что для достижения указываемой в работе Баррелла точности воспроизведения длин волн Hg^{198} ($\pm 0,00005 \text{ Å}$) необходимо контролировать давление при изготовлении лампы с точностью $\pm 0,5 \text{ мм рт. ст.}$ или перейти к лампам, совсем не содержащим аргона. Последние имеют очень короткий срок службы, требуют для их заполнения больших количеств дорогостоящего в настоящее время изотопа ртути и для возбуждения свечения в них более высокой частоты от магнетронных генераторов.

Уже начиная с 1950 г., длину волны зелёной линии Hg^{198} $\lambda = 5460, 7532 \text{ Å}$ используют в качестве основной для измерений других длин волн. В работе Мергера и Кесслера²⁶ сравнением с длиной волны этой линии были получены значения длин волн остальных²⁷ линий спектра Hg^{198} с точностью $\pm 0,0001 \text{ Å}$. Точность такого порядка является обычной для сравнения длин волн простых линий спектрометрическими методами с длиной волны

красной линии естественного кадмия. Измерения Меггера и Кесслера представляют большой интерес, так как именно они повели к пересмотру формул для определения дисперсии воздуха и выводу новых усреднённых выражений^{27, 28}, одно из которых было принято на Международной конференции по спектроскопии в 1952 г. Основываясь также на длине волны зелёной линии Hg^{198} , недавно в Америке были произведены измерения шестидесяти длин волн спектров Hg^{198} и Hg^{202} , а также двадцати линий Hg I в безэлектродном разряде^{29, 30}. Источник света, заполненный ртутью 202, был предложен в виде безэлектродной трубки в 1949 г.³¹ Изотоп ртути 202 для этого был получен методом масс-спектрографа с чистотой 98,06 %.

Источники света с простыми линиями чётного изотопа Hg^{198} уже применяются и для интерференционных измерений плоскопараллельных концевых мер длины до 100 мм^{32, 33, 34}.

ИСТОЧНИКИ СВЕТА С ИЗОТОПАМИ КРИПТОНА 84 И 86

Линии криптона предлагались для замены красной линии естественного кадмия ещё до того, как стало возможным выделять чётные стабильные изотопы. Так, жёлто-зелёная линия $\lambda = 5650 \text{ \AA}$ была предложена Кестерсом³⁵, линия $\lambda = 5562 \text{ \AA}$ Пераром²⁵ и, наконец, инфракрасная линия $\lambda = 9751 \text{ \AA}$ Понизовским³⁶. Все эти три линии естественного криптона не имели никаких существенных преимуществ по сравнению с красной линией кадмия. Когда же в 1942 г.⁴² удалось получить чистые чётные стабильные изотопы криптона Kr^{84} и Kr^{86} , его линии вновь предложены для выбора нового эталона длин световых волн. Криптон относится к числу средних элементов. Предел видимости интерференции с его линиями, излучаемыми обычными источниками света, невелик, но возбуждение линий криптона возможно при очень низких температурах. Поэтому линии криптона могут быть сильно сужены путём охлаждения источника света до температуры затвердевания кислорода.

Специальный источник света, разработанный Кестерсом и Энгельгартом³⁷, позволил им наблюдать интерференцию в линиях криптона при разности хода 700—800 мм. Внешний вид этого источника представлен на рис. 5. Лампа имеет накалинные электроды³⁸.

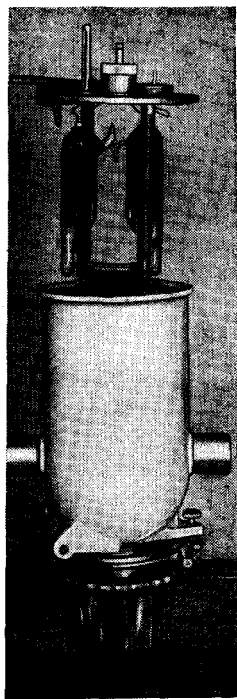


Рис. 5.

Свечение в ней наблюдается так же, как и в обычной трубке Гейслера, вдоль капилляра. Напряжение между электродами в время разряда достигает 160 в при токе 20 ма.

Для наблюдения интерференции при больших разностях хода лампа охлаждается до температуры тающего азота. Давление криптона в ней при этом должно быть $h = 0,03$ мм рт. ст. Срок службы ламп, содержащих такие малые количества газа, очень короток — всего лишь несколько минут. Для продления срока службы Кестерс и Энгельгарт⁵⁷ подвергали их длительной тренировке, которая заключалась в пропускании через лампу, наполненную криптоном до давления 1—2 мм рт. ст., переменного тока силой в несколько миллиампер при напряжении в 2000 в в течение многих часов без подогрева электродов. Во время такой тренировки электроды очищаются благодаря распылению. Большая часть атомов криптона вследствие ионной бомбардировки поглощается электродами. Часть из них из-за распыления поверхностей электродов возвращается обратно. Через некоторое время наступает подвижное равновесие: число атомов, поглощаемых электродами при ионной бомбардировке, делается равным числу атомов, возвращающихся обратно при распылении поверхностей электродов. В конце тренировки давление в лампе становится равным нескольким сотым миллиметра ртутного столба. Срок службы таких ламп достигает 100 час. Большим недостатком подобного тренировки является заметное разрушение электродов. Они делаются настолько хрупкими, что малейшая тряска может повести лампу к гибели. Этот недостаток заставил обратиться к другому способу увеличения срока службы. Лампы заполняют при нормальной температуре до сравнительно большого давления криптона (3—5 мм рт. ст.) и затем регулируют давление изменением температуры источника света. Для этого последний погружают в дюаровский сосуд (рис. 5) цилиндрической формы. При температуре кипения азота давление криптона понижается до 1,8 мм рт. ст. С целью дальнейшего понижения давления криптона в источнике света жидкий воздух в дюаре охлаждается до точки затвердевания азота (63° К) путём откачки. Дюар помещают в металлическую герметически закрывающуюся камеру. В верхней крышке последней имеются вводы для лампы и два патрубка: один для заполнения дюара жидким воздухом, а другой для соединения с насосом. Против двух очищенных от серебра просветов на боковой поверхности дюара в камере расположены два окна. Юстировочные приспособления позволяют совмещать центр капилляра лампы с осью конденсатора и коллиматора установки.

Заполнив дюар жидким воздухом, закрывают герметически один из патрубков и через второй патрубок посредством насоса со скоростью откачки $5 \text{ м}^3/\text{час}$ быстро понижают давление внутри сосуда. Вследствие понижения давления жидкий воздух охлаждается до точки затвердевания азота (63° К) и даже ниже — до точки

затвердевания кислорода (55°K). Когда жидкий воздух в дюаре весь охладится до температуры затвердевания азота, насос можно заменить другим менее мощным. Температура внутри дюара измеряется посредством термометра, вставленного через крышку камеры. По экстраполяционному уравнению, связывающему давление криптона с температурой, находят величину давления в источнике света $0,03 \text{ мм рт. ст.}$, соответствующую 63°K . Это давление является самым благоприятным для работы с излучением криптона. Согласно исследованиям Кестерса и Энгельгарта³⁷ асимметричное расширение и смещение максимумов спектральных линий криптона в этих условиях очень малы.

На рис. 6 приведены кривые зависимости смещения максимумов спектральных линий криптона от давления в источнике света³⁷.

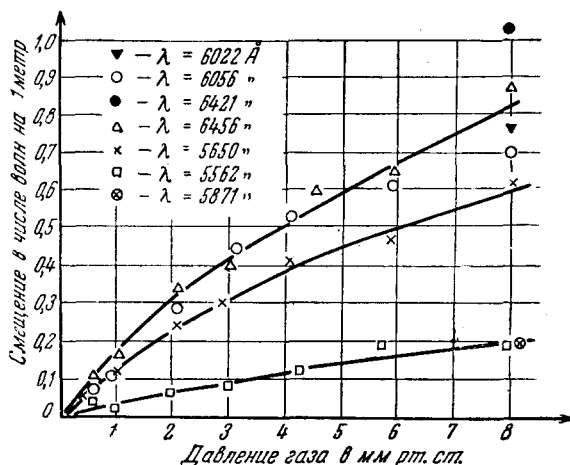


Рис. 6.

Смещения Δn выражены в долях порядка интерференции на метр, а давление p — в мм рт. ст. По этим данным можно вычислить, что средняя величина смещения для линий криптона в красную сторону при давлении 3 мм рт. ст. составляет $\sim 0,001 - 0,004 \text{ см}^{-1}$, т. е. несколько больше, чем для линий ртути. Эти экспериментальные кривые соответствуют следующему аналитическому выражению: $\Delta n = C \cdot p^{2/3}$, т. е. смещение максимума линий криптона обусловливается элементарным явлением Штарка, так как известно³⁹, что средняя напряжённость электрического поля в ионизованном газе пропорциональна числу ионов в единице объёма в степени $2/3$.

Линии криптона в обычных условиях излучения обладают небольшой яркостью, особенно жёлто-зелёная линия $\lambda = 5649 \text{ Å}$. При

ничтожных давлениях (0,03 мм рт. ст.) в лампе яркость их должна быть ещё меньше. Для рядовых интерференционных измерений такой источник света вряд ли является простым и удобным в обращении.

Ни в одной из опубликованных работ нет исчерпывающих данных об исследовании воспроизводимости длин волн линий изотопов криптона. В статьях Кестерса и Энгельгарта^{37,38} есть только указание, что длины волн линий Kr^{84} полностью совпадают с длинами волн естественного криптона. Это им позволило, несмотря на меньший процент чистоты Kr^{84} по сравнению с Kr^{86} , предложить в качестве нового эталона длин световых волн длину волны жёлто-зелёной линии криптона Kr^{84} .

Совсем недавно появилось сообщение⁴³ Международного бюро мер и весов о том, что в линии криптона $86 \lambda = 9856 \text{ \AA}$, излучаемой лампой вышеприведённой конструкции, удалось получить фотографию интерференционных колец равного наклона при разности хода в 1000 мм. Однако без подробного исследования воспроизводимости длин волн, излучаемых этим источником света, и особенно инфракрасных линий, видимость интерференционной картины в них при больших разностях хода ещё не говорит об окончательном его преимуществе.

ИСТОЧНИКИ СВЕТА, ЗАПОЛНЕННЫЕ ИЗОТОПАМИ КАДМИЯ

Как уже упоминалось, воспроизводимость длины волны красной линии естественного кадмия достаточно высока. Следует предполагать, что она будет ещё выше, если пользоваться излучением одного из его чётных стабильных изотопов. В Оптической лаборатории ВНИИМ были произведены исследования излучений трёх чётных стабильных изотопов кадмия Cd^{112} , Cd^{114} , Cd^{116} в безэлектродном разряде. Эти исследования позволили предложить⁴⁰ для замены красной линии естественного кадмия красную линию Cd^{114} . Такая замена обеспечит наилучшую преемственность в определении единицы длины при всех прочих преимуществах одноизотопного излучения.

В первых исследованиях источник света с изотопами кадмия представлял собой безэлектродную трубку, подобную трубке с изотопом ртути (рис. 7, а). Этот источник заполнялся восстановленным из окиси изотопом кадмия в количестве 1—3 мг при 0,2—2 мм рт. ст. давления чистого аргона или водорода.

Для возбуждения свечения кадмия трубка подогревалась в специальной печи (рис. 8) до 300°C . Температура внутри печи контролировалась с помощью термпары (хромель — копель) с точностью $\pm 5^\circ$. Такой контроль за постоянством температуры дал возможность полностью избежать самообращения в линиях кадмия.

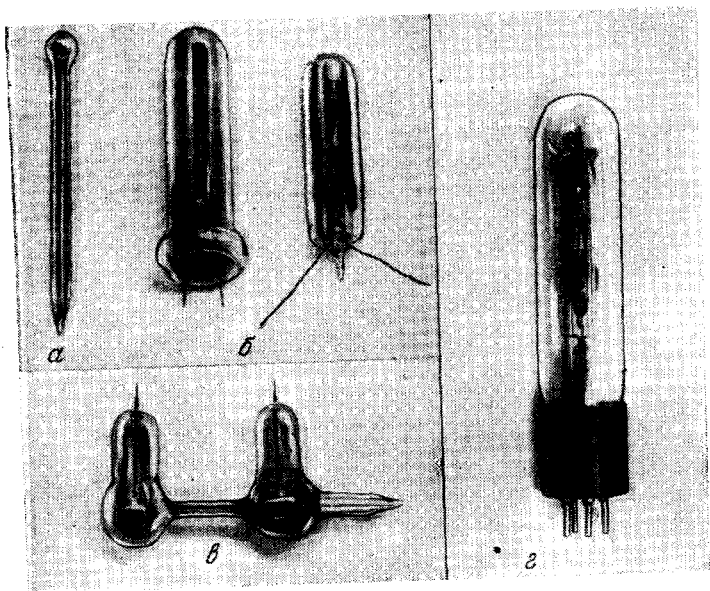


Рис. 7.

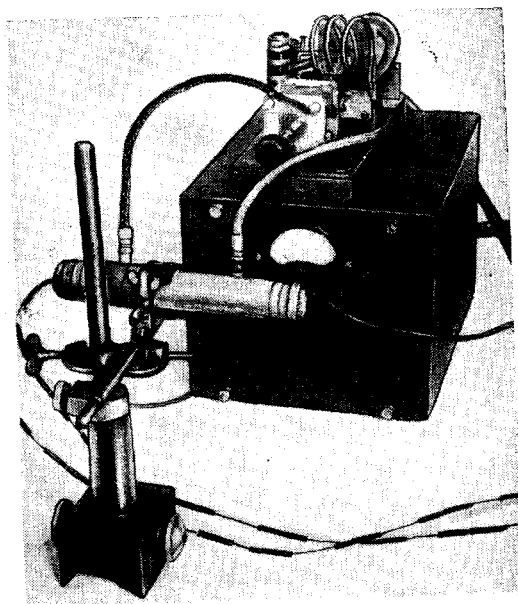


Рис. 8.

Возбуждение свечения в трубках осуществлялось посредством генератора высокой частоты 60—75 Мгц.

Наличие дополнительного подогрева лампы является некоторым усложнением исключительно простого источника света. Поэтому в последних моделях безэлектродных трубок кадмий возбуждается без дополнительного подогрева. Эти трубки (рис. 7, б) представляют собой небольшие кварцевые ампулы диаметром 5 мм и длиной 30—40 мм. Ампула заполняется 1—2 мг изотопа кадмия при 0,2 мм рт. ст. давления чистого аргона и помещается в стеклянный баллон с посеребрёнными стенками. Воздух из баллона откачивают. Возбуждение свечения в лампе производится тем же генератором высокой частоты. Кадмий разогревается в разряде аргона, и постепенно вместо спектра аргона появляется яркий спектр кадмия. Подобные лампы без дополнительной печи особенно удобны для применения их при интерференционных измерениях концевых мер длины на современных интерференционных компараторах. Исследование этих ламп показало, что срок службы их достаточно большой и излучаемые ими линии кадмия не имеют самообращения. В лаборатории были также изготовлены лампы типа Майкельсона (рис. 7, в) и лампы с накаливаемыми электродами (рис. 7, г), заполненные изотопом Cd^{114} . В последние введено некоторое усовершенствование в виде дополнительного подогрева внутреннего баллона лампы. Подогрев позволил снизить силу тока, проходящего через разряд, до нескольких десятых ампера. Это обеспечивает некоторое сужение линий кадмия, излучаемых лампой подобной конструкции.

На приведённой в качестве примера на рис. 9 фотографии интерференционных полос равного наклона для зелёной линии кадмия

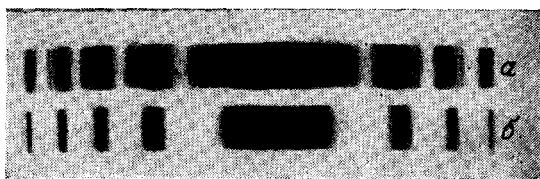


Рис. 9.

(в увеличенном масштабе) спектр *a* соответствует излучению естественного кадмия, а спектр *б* — излучению Cd^{114} . Отсутствие на спектре *б* побочных интерференционных максимумов, отвечающих сверхтонкой структуре линии, наглядно демонстрирует простоту линий изотопического кадмия.

При измерениях длин волн спектральных линий Cd^{112} , Cd^{114} и Cd^{116} интерференционным методом сравнения с длиной волны

красной линии естественного кадмия была получена высокая точность их воспроизведения (порядка $\pm 0,9 \cdot 10^{-4} \text{ \AA}$ для красной линии и $1,7 \cdot 10^{-4} \text{ \AA}$ для остальных). Полученное значение длины волны красной линии Cd^{114} всего лишь на $0,0018 \text{ \AA}$ отличается от длины волны естественного кадмия. Сравнение двух таких близких линий может производиться с очень высокой точностью, так как возможные систематические погрешности, связанные с введением поправок на дисперсию воздуха и на дисперсию скачка фазы при отражении от светоделительных слоёв зеркал интерферометра, сводятся до минимума.

На фотографии интерференционных колец (позитив) с разделённым полем (рис. 10) правая сторона соответствует интерференционным кольцам в свете красной линии изотопа Cd^{114} ,

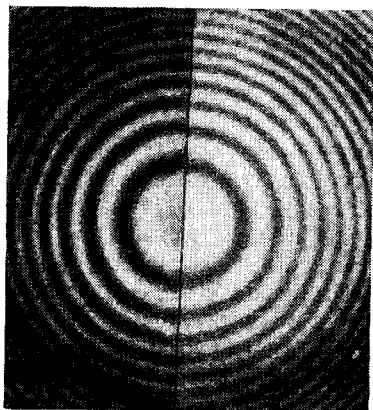


Рис. 10.

а левая сторона — красной линии естественного кадмия. Ослабление фона в минимумах и увеличение контрастности интерференционных колец (правая сторона) ещё раз подтверждает наличие некоторого сужения красной линии изотопа Cd^{114} по сравнению с естественным кадмием. Фотография получена при разности хода в 200 мкм^{41} .

Предварительные исследования влияния давления постороннего газа в источнике света на ширину красной линии Cd^{114} показали, что смещение максимума происходит в красную сторону, и порядок величины этого смещения во всяком случае не превосходит $1 \cdot 10^{-4} \text{ \AA}$ ($0,0004 \text{ см}^{-1}$) на 1 мм рт. ст.

Если до настоящего времени кадмиевые источники применялись лишь для измерения мер малой длины, не свыше 100 мкм , то кадмиевые одноизотопные источники света позволят производить изме-

рения мер длиной до 200 *м.м.* В свете одноизотопных кадмиевых линий уже производились измерения концевых мер длиной до 175 *м.м.* на интерференционном компараторе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённый обзор одноизотопных источников света показывает, что любая линия, излучаемая этими источниками, при современном состоянии интерференционных измерений длины наравне с красной линией естественного кадмия пригодна для выбора её в качестве основной, и выбор линии не должен был бы задерживать переход на определение единицы длины через световую волну.

Более высокая воспроизводимость эталона длины световых волн обеспечивается выбором лучшего из излучений чётных изотопов чётных элементов. Для такого выбора приведённые результаты экспериментальных исследований ещё недостаточны. Несомненно, следовало бы произвести исследования всех предложенных источников света в национальных лабораториях и Международном бюро мер и весов. Несмотря на то, что все три одноизотопных источника света уже применяются при интерференционных измерениях длины, до настоящего времени ещё не произведено сравнение излучений этих источников друг с другом с целью выяснения метрологических преимуществ одного из них.

Безусловно, изготовление одноизотопных источников света не может быть ограничено только вышеприведёнными тремя элементами (ртуть, криптон и кадмий). Возможно создание одноизотопных источников света, заполненных чётными изотопами других элементов, например свинцом 206 и 208, ксеноном 132 и чётными изотопами некоторых редких земель.

С целью дальнейшего повышения точности воспроизведения единицы длины в световых волнах по сравнению с существующей желательным является расширение предела видимости интерференции в выбранной линии. В этом отношении при выборе линии представляет некоторый интерес переход к спектральным линиям с большими длинами волн, расположенным и в далёкой красной и близкой инфракрасной областях спектра.

Сужение линии возможно получить при использовании линий в поглощении. Линии поглощения ещё не применялись для интерференционных измерений длины.

Расширение пределов видимости интерференции, как уже упоминалось, осуществляется применением узких линий, излучаемых источниками специальной конструкции.

При создании таких источников нам кажется правильным было бы исходить из следующих требований:

1. Достаточная яркость свечения при сравнительно малом давлении светящегося газа.

2. По возможности уменьшенное влияние теплового расширения.

3. Низкое напряжение при возбуждении свечения.

4. Минимальная плотность тока.

5. Большой срок службы источника.

6. Простота источника света и отсутствие сложного дополнительного оборудования для возбуждения свечения.

7. Малые габариты, позволяющие использовать его при работе на современных интерферометрах.

8. Безопасность применения.

Разработка этих источников света является задачей ближайших исследований.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Babinet, *Ann. chim. et phys.* **40**, 177 (1829).
2. A. A. Michelson and E. W. Morley, *Am. J. Sci.* **34**, 427 (1887).
3. A. A. Michelson, *Phil. Mag.* **34**, 280 (1892).
4. М. Ф. Романова и А. А. Ферхмин, *ДАН* **2** (1933).
5. A. Pérard, *Rev. d'Opt.* **7**, 1 (1928).
6. М. Ф. Романова, *УФН* **37**, № 2, 163 (1952).
7. Н. Р. Батарчукова, *ДАН* **63**, № 6, 1013 (1947).
8. Н. Р. Батарчукова и А. И. Карташев, *Изв. АН СССР, сер. физ.*, **14**, № 6, 753 (1950).
9. В. Ф. Мергерс, *УФН* **34**, № 1, 105 (1948).
10. J. Cabanes, *Tirage à part des Proc. Ver. C. I. Pds et Mes.* 2-я серия, XXIV, М—55 (1954).
11. Minkowsky und H. Bruck, *Zeits. f. Phys.* **95**, № 5, 284 (1935).
12. A. Pérard, *Comptes rendus* **237**, 364 (1953).
13. R. Lennuier, *Astronomie* **67**, 337 (1953).
14. H. Margenau and W. Watson, *Rev. Mod. Phys.* **8**, 22 (1936).
15. J. H. Wiens and L. W. Alavarez, *Phys. Rev.* **58**, 1005 (1940).
16. J. H. Wens, *Phys. Rev.* **70**, 910 (1946).
17. Keim, *Phys. Rev.* **76**, 12, 70 (1949).
18. W. F. Meggers and F. O. Westfall, *J. Res. NBS* **44**, 5, 447 (1950).
19. H. Barrell et M. Puttock, *C. R. IX Conf. Gen. Pds. Mes.* **77** (1949).
20. J. M. Blank, *J. Opt. Soc. Am.* **40**, 6, 345 (1950).
21. A. Pérard et J. Terrien, *J. phys. et rad.* **11**, № 6, 249 (1950).
22. A. Pérard et J. Terrien, *Comptes rendus* **228**, 964 (1949).
23. E. Jacobsen and Harrison, *J. Opt. Soc. Am.* **39**, 12 (1949).
24. M. Zelikoff, P. Wickoff, Z. Aschenbrand, R. Loomis, *J. Opt. Soc. Am.* **42**, № 11, 818 (1952).
25. H. Barrell, *Proc. Roy. Soc.* **209A**, 132 (1951).

26. W. Meggers and K. Kessler, *J. Opt. Soc. Am.* **40**, № 11, 737 (1950).
 27. H. Barrell, *J. Opt. Soc. Am.* **41**, № 5, 295 (1951).
 28. B. Edlen, *J. Opt. Soc. Am.* **43**, № 5, 339 (1953).
 29. K. Burns and K. Adams, *J. Opt. Soc. Am.* **42**, № 1, 56 (1952).
 30. G. Fowles, *J. Opt. Soc. Am.* **44**, № 10, 760 (1954).
 31. J. McNally, J. Griffin and Z. Burkhart, *J. Opt. Soc. Am.* **39**, № 12, 1036 (1949).
 32. H. Barrell, *Proc. Verb. C. I. Pds et Mes.*, XXIII — A, 149 (1952).
 33. J. Terrien, *Tirage á part Proc. Ver. C. I. Pds et Mes.*, XXIV, M—95 (1953).
 34. J. Claesen, *Bul. de Métrologie*, **168**, 227 (1954).
 35. W. Kösters, *Mitt. Phys. Techn. Reichsanstalt* **11**, № 4, 51 (1927).
 36. Л. Б. Понизовский, *Природа*, № 2, 27 (1945).
 37. W. Kösters et M. Engelhard, *Proc. Verb. C. I. Pds et Mes.*, XXII, 137 (1950).
 38. M. E. Engelhard, *Proc. Verb. C. I. Pds et Mes.*, XXIII — A, 665, (1952).
 39. P. Debye, *Phys. Zeits.* **20**, 160 (1919).
 40. Н. Р. Батарчукова, А. И. Карташев и М. Ф. Романова, *ДАН* **90**, № 2, 153 (1953).
 41. Н. Р. Батарчукова, А. И. Карташев и М. Ф. Романова, Измерение длин волн излучения C^{14} в видимой области спектра. Труды ВНИИМ, спец. выпуск (1954).
 42. K. Clusius und G. Dickel, *Zeits. f. phys. Chem.* **52**, 348 (1942).
 43. J. Terrien et J. Hamon, *Comptes rendus* **239**, 586 (1954).
-