

## Пьезо-электрический кварц и применение его для измерения весьма слабых электрических токов.

(К статье 1 стр. чертежей).

Прибор, известный под названием пьезо-кварца Кюри, состоит из кварцевой кристаллической пластинки около 10 см длиной, 1.5—2 см шириной и 0.05—0.07 см толщиной, вырезанной так, что оптическая ось кристалла (черт. 1) параллельна ширине и перпендикулярна ее длине, а одна из бинарных или электрических осей перпендикулярна пластинке. При растяжении такой пластинки на широких ее гранях появляются одинаковые, но разноименные количества электричества, которые собираются станиоловыми листиками, неклеенными на кварцевую пластинку. Поэтому пьезо-кварц можно назвать эталоном количества электричества. Им пользуются для измерения весьма слабых электрических токов порядка  $10^{-14}$ — $10^{-17}$  ампер.

Черт. 2 изображает пьезо-кварц в конструкции фирмы «Société Centrale de produits chimiques. Paris», которым я пользовался в своих исследованиях. Пьезо-кварцевая пластинка ПК своими концами заделана в металлические обоймы ОБ. Пластинка подвешивается на крючок К, и к ее нижнему концу прикрепляется стержень С с чашкой Ч, на которую ставятся грузы (до 5 кг) для растяжения. Заряды, появляющиеся при растяжении улавливаются станиоловыми или серебряными обкладками, покрывающими обе стороны пластинки. Каждая обкладка имеет по две узких (0.1—0.2 мм) щели Щ, отделяющие центральную часть обкладки от ее концов. К центральным частям, образующим вместе с кварцевой пластинкой плоский конденсатор, приклеены небольшие металлические кружки, соединенные спиральными медными пружинками с зажимами З с янтарной изоляцией. Одну из обкладок можно соединять с землей при помощи особого приспособления, состоящего из кулака КЛ, рычага Р и горизонтального вращающегося стержня, снабженного рукояткой РК. Другая обкладка обыкновенно всегда находится в соединении с землей. Нижняя часть латунного футляра Ф имеет отъемное дно Д, которое прикрепляется при помощи двух штоков. Чтобы снять дно, нужно повернуть его до упора и затем, слегка поворачивая, стягивать вниз. На дне футляра лежит кольцеобразная стеклянная чашка СЧ, в которую наливается, приблизительно до одной трети, чистая серная кислота с небольшим количеством дымящейся нордгаузенской кислоты для поглощения водяных паров, так как только при отсутствии влаги внутри футляра щели Щ хорошо изолируют и прибор функционирует правильно. Через латунную трубку Т (см. также черт. 2-а) проходит стержень С с чашкой. Металлические пробки ПР служат для уменьшения отверстий, а, следовательно, для затруднения доступа влаги и для устранения качаний стержня возникающих при наложении гирь на чашку. Сверху прибор закрывается латунным колпаком КП (черт. 2-б). Зажимы З проходят через металлические передвигающиеся пробки, которые на время перерывов в опытах придвигаются вплотную к стенкам колпака и только во время опытов для изоляции зажимов они отодвигаются.

Кварцевую пластинку следует держать в большой чистоте. В особенности следует обращать внимание на изолирующие щели и на открытые узкие грани пластинки. До них ни в коем случае нельзя дотрагиваться пальцами. Если изоляция открытых граней и щелей не достаточно совершенна, то их следует промыть кусочком чистой бумаги, смоченный сначала дистиллированной водой, затем чистым спиртом и, наконец, снова водой. После промывки прибором нельзя пользоваться в течение нескольких часов.

Ж. и П. Кюри<sup>1)</sup> показали, что количество электричества  $Q$ , выраженное в электростатических единицах, которое появляется на каждой обкладке пьезо-кварца при его растяжении или сжатии, выражается через:

$$Q = k \frac{L}{D} P,$$

где  $L$  см — длина действующей части кварцевой пластинки, т. е. длина обкладки,  $D$  см — толщина пластинки,  $P$  дин — груз, растягивающий или сжимающий пластинку и  $k$  — так называемая пьезо-электрическая постоянная, численно равная тому количеству электричества, которое появляется на обкладке кварцевого конденсатора, имеющего длину и толщину в 1 см при действующей силе в одну дину. Ученые, изучавшие пьезо-электрические свойства кварца, получили следующие значения постоянной  $k$ :

Ж. и П. Кюри<sup>2)</sup>  $k = 6 \cdot 32 \cdot 10^{-8}$  на одну дину, Ж. Кюри<sup>3)</sup>  $k = 6 \cdot 90$ , П. Цермак<sup>4)</sup> —  $6 \cdot 26$ , Е. Риеке и В. Воигт<sup>5)</sup> —  $6 \cdot 45$ , Ф. Поккельс<sup>6)</sup> —  $6 \cdot 27$  и В. Рöntgen<sup>7)</sup> —  $6 \cdot 94 \cdot 10^{-8}$ .

Последнее число, полученное Рöntgen'ом довольно значительно отличается от остальных чисел, за исключением числа Ж. Кюри. Постоянная  $k$ , отнесенная к килограмму, по Рöntgen'у равняется  $0 \cdot 0681$ , а по Ж. Кюри  $k = 0 \cdot 0677$ . Рöntgen видит причину расхождения его числа с числами других исследователей в целом ряде обстоятельств, не вполне учтенных при более ранних исследованиях. Число  $k$  может получиться меньше истинного 1) при неправильном расположении оптической и электрической осей относительно грани пластинки, 2) при недостаточной однородности напряжения в кристалле, 3) при существовании примесей в кристалле, 4) при недооценке емкости абсолютного конденсатора, употребляемого при определении  $k$ , 5) при недооценке значений электродвижущих сил нормальных элементов и, наконец, 6) при недостаточном совершенстве изоляции.

На черт. 3 изображена схема соединения приборов при определении постоянной  $k$ . Одна из обкладок кварцевой пластинки соединена с землей, другая — с изолированной парой квадрантов квадрантного электромметра Э. С этой же парой квадрантов соединена одна из обкладок плоского нормального конденсатора С с охранным кольцом, другая обкладка которого при помощи переключателя ПР может соединяться или с землей или с полюсом батареи Б<sub>2</sub> нормальных элементов.

Опыт заключается в том, что сначала размыканием ключа КЛ изолируется пара квадрантов, затем, перекидыванием переключателя ПР, заряжается обкладка конденсатора до потенциала  $V$  и в то же время накладывается на чашку или снимается с нее подходящая гиря  $P$ , которая подбирается так,

<sup>1)</sup> J. Curie. Ann. de Chim. et Phys. 17, 385 (1889).

<sup>2)</sup> P. Curie. Oeuvres p 36;

<sup>3)</sup> J. Curie. l. c.;

<sup>4)</sup> P. Czermak, Wien. Sitzungsber. 96, 1217 (1887);

<sup>5)</sup> E. Riecke u. W. Voigt. W. A. 45 549 (1892);

<sup>6)</sup> F. Pockels. Abh. d. Ges. d. Wiss. Göttingen. 39 (1894);

<sup>7)</sup> W. Röntgen. Ann. d. Phys. 41, 449 (1913).

чтобы количество электричества  $Q$ , появляющееся на кварцевой пластинке, точно компенсировалось зарядом противоположного знака на обкладке конденсатора. При равенстве этих зарядов стрелка электрометра остается в покое и постоянная  $k$  определяется из равенства:

$$Q = CV = k \frac{L}{D} P,$$

где  $C$  емкость абсолютного конденсатора. На практике можно поступить иначе, а именно: измерить  $L$  и  $D$  и воспользоваться готовым значением  $k$ .

В 1881 году братья  $P$  и  $J$ , Curie<sup>1)</sup> предложили особый компенсационный метод для измерения весьма слабых электрических токов, который получил довольно широкое распространение в особенности после работ супругов Curie,<sup>2)</sup> над радиоактивными веществами. На черт. 4 изображена схема соединения приборов при этом методе.

Обкладка  $A$  измерительного конденсатора ИК, через который протекает измеряемый ток от батареи  $B_2$ , может быть соединена при помощи переключателя  $\Pi$  или с землей или с изолированной парой квадрантного электрометра Э, находящейся в постоянном соединении с одной из обкладок пьезо-кварца ПК. Вторая пара квадрантов в вторая обкладка пьезо-кварца всегда соединены с землей. Стрелка электрометра соединена с одним из полюсов батареи  $B_1$ , другой полюс которой заземлен.

Электрический ток, протекающий через измерительный конденсатор, уходит в землю. Для его измерения, в некоторый момент перекидывают переключатель  $\Pi$  и одновременно растягивают кварц, увеличивая нагрузку так, чтобы стрелка электрометра все время находилась на нуле. В момент перекидывания переключателя пускают в ход секундомер и останавливают его через такой промежуток времени  $T$ , когда растягивающая сила  $P$  достигает определенного значения. Сила тока определяется по формуле:

$$i = k \frac{L}{D} \cdot \frac{P}{T} \text{ эл. ст. ед.}$$

Для получения силы тока в амперах следует полученное значение разделить на  $3 \cdot 10^9$ . Вместо постепенного увеличения растяжения кварца, можно наоборот уменьшать растягивающий груз от некоторого значения  $P$  до нуля, только в этом случае с землей нужно соединить другую обкладку кварца.

Самую важную роль при этом методе играет постепенное плавное изменение нагрузки.  $J$ . Curie указывает два способа такого изменения.

Первый способ заключается в том, что на чашку пьезо-кварца ставится сосуд, в который через кран вливается ртуть. Можно так регулировать вытекание, что будет точная компенсация. Количество ртути, втекшей в сосуд в течение времени  $T$  определяется путем взвешивания. Этот способ дает большую точность и удобен только при неизменной силе тока. Урегулировав втекание ртути при постоянном токе, можно продолжать наблюдения в течение большого промежутка времени. Однако этот способ неприменим при изменяющемся токе, с которым часто приходится иметь дело при исследовании проводимости диэлектриков.

Второй, более простой, способ состоит в том, что во время компенсации постепенно накладывают гири на чашку, и, поддерживая ее все время рукою, регулируют нагрузку так, чтобы стрелка не отклонялась от нуля, при

<sup>1)</sup> J. Curie. l. c.

<sup>2)</sup> M-me S. K. Curie. Recherches sur les substances radioactives. Paris 1903.

этом замечают время от момента начала растяжения до отнятия руки, поддерживающей чашку. Можно просто на чашку положить подходящий груз  $P$  и в начале компенсации поддерживать его усилием руки, которую во избежании утомления следует положить на опору подходящей высоты. При некотором навыке этим способом можно делать хорошие измерения. Рука постепенно привыкает к регулированию и инстинктивно поддерживает или опускает груз.

Преимущество второго способа перед первым — прежде всего в его простоте. Затем, второй способ применим при изменяющемся токе, когда приходится производить компенсацию в течение малых (несколько секунд) и быстро чередующихся один за другим промежутков времени. Оперировав рукою и без перерыва переходя от одного груза к следующему, нужно только отмечать моменты каждого изменения нагрузки. Фирма «Société central de produits chimiques. Paris» изготовляет особое приспособление для более удобного поддержания грузов, но у прибора, которым я пользовался, такого приспособления не было.

Довольно много времени я посвятил на то, чтобы хорошо овладеть этим способом, и убедился на практике в том, что он обладает существенными недостатками. Прежде всего очень трудно плавно ослаблять усилие руки, поддерживающей чашку с грузами: получаются толчки, влекущие за собой смещение стрелки электрометра, которые с трудом удается аннулировать при дальнейшей компенсации. Когда приходится работать в течение нескольких часов, то рука настолько устает от напряжения, что в конце концов получается плохая компенсация. Непокойное состояние наблюдателя сильно сказывается на точности измерений. Для устранения толчков я пробовал прикреплять к чашке спиральные пружинки, которые удерживал рукой в натянутом состоянии и постепенно спускал. Это внесло некоторое улучшение в сглаживании толчков, но рука по-прежнему быстро утомлялась.

Вторым крупным недостатком этого способа является малая точность при определении момента, когда рука перестает поддерживать груз.

После целого ряда попыток усовершенствовать компенсационный способ мне удалось, повидимому, достичь цели и выработать более удобный и точный способ. Сущность этого третьего способа состоит в следующем. К нижней оправе пьезо-кварца ПК (черт. 5) на нити подвешена стальная спиральная пружинка ПР, подходящей упругости, к нижнему концу пружинки прикреплен железный шар ЖШ подходящего для наблюдаемой силы тока веса. Шар можно сделать полым и его вес изменять для различных серий опытов при помощи дроби или ртути. Стекланный стакан СС наполняется таким количеством ртути, чтобы при поднятии его шар мог плавать. От верхней части шара и от ртути идут два гибких тонких спиралеобразных проводника к электромагниту электрического хронографа, при чем на пути ставится аккумулятор АК. Перед наблюдением стакан поднимается рукою на такую высоту, чтобы шар свободно плавал на ртути и чтобы пружинка была ослаблена. При таком положении цепь оказывается замкнутой и якорь с пером П притянутым к сердечнику электромагнита. После этого изолируют электрометр и пьезо-кварц от земли при помощи переключателя с ртутными контактами, при этом момент изоляции отмечается вторым пером хронографа<sup>1)</sup>. Опуская постепенно стакан, удерживают стрелку электрометра у нуля. В момент отрывания железного шара от ртути перо отскакивает от электромагнита и

<sup>1)</sup> Я пользовался хронографом с тремя электромагнитными отметчиками, пишущими на бумажной ленте, передвигаемой электромотором. Этот очень удобный и прекрасно действующий хронограф приобретен от фирмы «The Cambridge Scientific Instrument Co. Cambridge England» [Каталог № 52 стр. 15 (1908)].

делает отметку на ленте хронографа. Таким образом хронограф делает две отметки, по которым можно определить промежуток времени  $T$ , необходимый для увеличения растягивающей силы от нуля до значения, равного весу шара с пружиной. Этот промежуток времени легко определить с точностью до десятой секунды, так как третье перо хронографа отмечает секунды.

Описанный способ имеет большие практические выгоды. Прежде всего наблюдателю совершенно не приходится следить за временем, так как оно определяется автоматически. Следовательно, все внимание работающего может быть сосредоточено исключительно на точности компенсации, т. е. на удержании стрелки электрметра у нуля. Затем благодаря пружинке, на которой висит груз, значительно облегчается самый процесс компенсации. Пружинка сглаживает толчки, неизбежные при опускании груза, и делает опускание мягким и плавным. Этому также способствует и самый способ постепенного увеличения нагрузки путем уменьшения объема ртути, вытесняемой шаром. Мне много пришлось работать по этому способу и я не нашел в нем каких-либо существенных недостатков. Напротив, путем сравнения, я убедился, что этот способ имеет много преимуществ перед способами Сигиэ. Рука при этом способе устает несравненно меньше, чем при втором способе, так как она, благодаря пружинке и ртути во время наблюдения находится в меньшем напряжении. Правда и в этом способе есть один недостаток, но он целиком падает на хронограф и заключается в том, что иногда отметчики хронографа вследствие трения о бумагу начинают немного отставать и вводят тем самым ошибку в определении промежутка времени, но при внимательном отношении к их действию, путем соответствующего регулирования, этот недостаток легко устраняется.

Сначала я хотел было ограничиться применением только ртути и шара без пружинки, но это оказалось недостаточно удобным и не являлось значительным улучшением способа. Точно также оказалось мало пригодным применение цилиндрических железных гирь со сферическим основанием.

При первых опытах мне казалось, что пружинка во время опускания стакана может колебаться и тем может сделать неопределенным момент отрывания, но специальные опыты устранили сомнения.

К статье В. Д. Кузнецова. «Пьезо-Электрический кварц и применение его для измерения весьма слабых электрических токов».

