

СВЕТОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПРИ ПОМОЩИ ФОТОЭЛЕМЕНТОВ *

М. М. Гуревич, Ленинград

ВВЕДЕНИЕ

Большое число статей, посвященных вопросу о световых измерениях при помощи фотоэлементов за прежние и последние годы, говорит с полной очевидностью о том, что фотоэлементы применяются для этих целей уже давно и в самых разнообразных случаях. Даже если сразу отбросить все измерения невидимых излучений, на которые физики очень охотно распространяют понятие „свет“, и ограничиться значительно более узкой областью видимого спектра, то и тогда мы столкнемся с очень большим разнообразием случаев использования фотоэлементов. Все эти случаи можно разбить на три больших раздела. К первому разделу мы относим спектрофотометрические установки¹, выполняемые иногда в виде сложных регистрирующих приборов², в которых происходит сравнение двух монохроматических пучков одинаковой длины волны. Последнее обстоятельство весьма сильно упрощает принципиальную сторону вопроса, так как дело сводится к количественному сравнению качественно одинаковых и при том элементарно простых составов излучения. Спектральные свойства самого фотоэлемента оказываются при этом мало существенными.

Они остаются мало существенными и для второго раздела случаев применения фотоэлементов, отличающегося тем, что сравнивать приходится пучки не монохроматические, а сложные, но с одинаковыми спектральными составами. Последний случай имеет, например, место при изучении пространственного распределения света каким-либо источником. Так же, как и в первом случае, спектральные свойства фотоэлемента не играют никакой роли, и так же весь интерес установок этого рода лежит в другой области — например, в автоматизации всего процесса^{3,4}. Однако не спектрофотометрия и не измерение светораспределения источников является основной проблемой фотоэлектрических измерений.

* Доклад, прочитанный в Светотехнической комиссии группы технической физики ОТН Акад. наук 4/VI 1936 г.

Основная задача тех случаев, которые мы относим к третьему разделу, состоит в сравнении световых пучков с различными спектральными составами. Для примера достаточно было бы назвать фотометрирование обычной газополной лампы, при котором ее приходится сравнивать с пустотным эталоном, если бы перед нами не стояли гораздо более трудные задачи фотометрирования газосветных трубок. Здесь уже на первый план выдвигается спектральная чувствительность воспринимающего свет фотоэлемента, которая должна соответствовать спектральным свойствам глаза, что не может в настоящее время считаться достигнутым с достаточной степенью точности. Но так как фотометрирование разноцветных источников является задачей, имеющей серьезное техническое значение и не имеющей к тому же удовлетворительного решения при помощи визуальных методов, то становится совершенно понятной причина, вызвавшая в последние годы большое число работ, которые мы относим к третьему разделу нашей классификации и которые посвящены фотоэлектрическим способам сравнения световых пучков с различными спектральными составами.

Нет ни возможности, ни необходимости останавливаться на описании всех случаев применения фотоэлементов. С большей или меньшей степенью точности ими пользуются для измерения силы света, световых потоков, освещенностей, определения коэффициентов отражения и пропускания, для измерения цвета, в комбинации с микроскопом, телескопом и т. д.

Недостаточно высокая степень точности всех этих измерений видна хотя бы из того, что эталонирование фотометрических величин до сих пор производится исключительно визуально. Вместе с тем нет никакого сомнения в том, что непрерывно совершенствующиеся методы фотоэлектрических измерений в скором времени не только догонят, но и перегонят заставшую в своих возможностях совершенствования методику визуальную. В предвидении этого положения мы наметили дать в первой части доклада набросок такой возможности, разобрав на этом примере особенности световых измерений при помощи фотоэлементов, и остановиться во второй части на работах фотометрической лаборатории Государственного оптического института в области использования фотоэлементов.

1. Возможность фотоэлектрического эталонирования световых величин

Прежде чем говорить о способе фотоэлектрического измерения эталона, остановимся в двух словах на дефектах визуальных способов фотометрирования. Не развивая подробнее неоднократно отмеченные недостатки визуальных методов, недостатки, связанные с психо-физиологическим характером основного процесса установления фотометрического равновесия, зависящего от состояния организма в данный момент, отметим одно обстоятельство, оставшееся, как нам кажется, неоттененным до сих пор. Мы имеем в виду

различия в спектральных свойствах человеческого глаза, установленные большим числом исследователей и, может быть, лучше всего выраженные Кобленцом и Эмерсоном^{*}, нанесшими 125 кривых чувствительностей на один график (рис. 1).

В дополнение к этому следует считать, что кривая чувствительности каждого наблюдателя не является неизменной во времени.

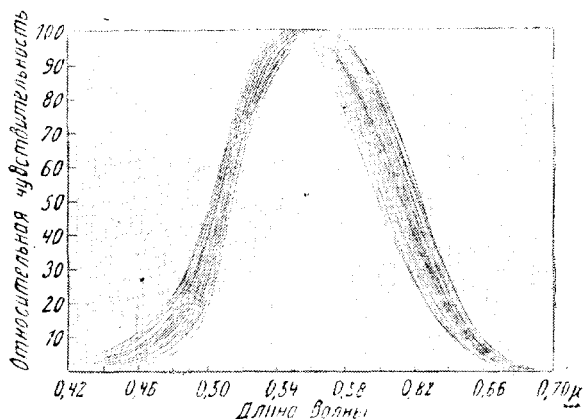


Рис. 1. Кривые спектральной чувствительности глаз 125 наблюдателей

Выберем две кривые v_1 и v_2 (рис. 2) из числа полученных Кобленцом и Эмерсоном и посмотрим, что получится при фотометрировании, произведенном двумя соответственными наблюдателями. Пусть сравниваются два поля — одно, излучающее соответственно цветовой температуре^{*} 2400° K, и другое — соответственно 2800° K. Пусть один наблюдатель установит для себя некоторое положение фотометрического равновесия с большой точностью.

Если не будет никаких дополнительных и мешающих причин, то картина, полученная первым наблюдателем, не будет представляться второму равновесной. Различие в спектральных кривых приведет к тому, что он установит другое положение фотометрического равновесия, отличающееся от первого примерно на 4%. При этом первый наблюдатель (v_1) по сравнению со вторым (v_2) недооценит излучение, соответствующее температуре 2400° K, или, что то же, переоценит излучение, соответствующее температуре 2800° K.

Еще значительно большее расхождение между нашими наблюдателями получится, если мы, например, обратимся к измерению ртутных газосветных ламп и будем их сравнивать с излучением, соответствующим цветовой температуре 2400° K. Мы можем произ-

^{*} Цветовой температурой излучения называется такая температура абсолютно черного тела, при которой оно дает излучение того же цвета, что и данный источник. Цветовая температура излучения многих раскаленных металлов выше их истинной температуры.

водить сравнение при помощи лучших мигающих фотометров*, уничтожающих различие в цветах между полями, и все-таки из-за различия в спектральных чувствительностях мы неизбежно придем к разным оценкам. В этом случае расхождение будет составлять около 20%, причем снова первый наблюдатель (v_1) не дооценит излучения, соответствующего температуре 2400° K, по сравнению со вторым наблюдателем (v_2).

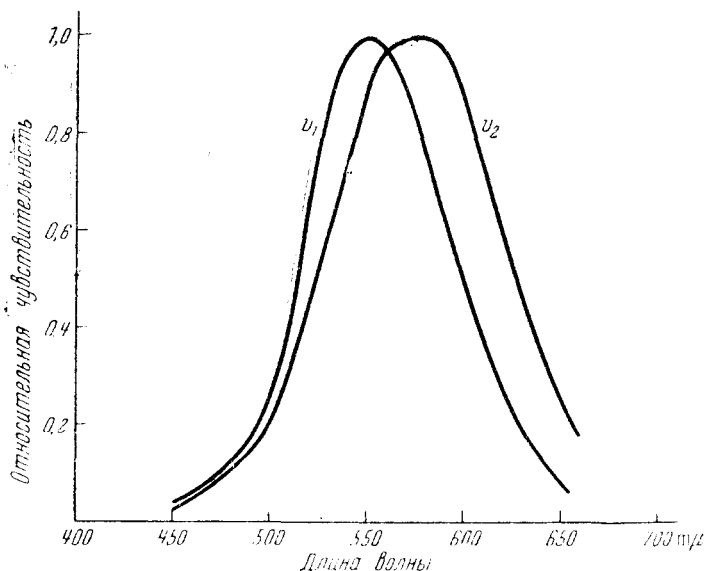


Рис. 2. Кривые спектральной чувствительности двух наблюдателей с нормальным цветным зрением

Мы видим, таким образом, что существующие различия в спектральных свойствах глаз отдельных наблюдателей делают принципиально невозможной точное измерение световых величин на визуальной основе.

Трудности разноцветного фотометрирования, выявившиеся уже достаточно давно, вызвали в литературе ряд предложений о переходе к чисто физическим методам измерения световых величин. Среди этих предложений отметим относительно недавно появившиеся статьи Орнштейна^{6,7}, который предлагает упразднить специально фотометрические (светотехнические) стандарты и единицы и пользоваться общими физическими CGS-единицами.

Считая необходимым сохранить общепринятые фотометрические единицы и в то же время обойти трудности разноцветного фото-

* Мигающим фотометром называется фотометр, предназначенный для сравнения разноцветных излучений. Его действие основано на быстром переходе излучений с одной части поля зрения на другое, при котором различие в цветах исчезает.

метрирования, мы ставим вопрос о фотоэлектрических методах эталонного фотометрирования.

Остановимся в нескольких словах на причинах, не позволяющих в настоящее время считать удовлетворительным положение со световым эталоном.

В качестве основной причины следует указать на неустойчивость любого процесса излучения, связанного с высокой температурой. Всякий материал, подвергнутый нагреванию выше 2000°K , относительно быстро изнашивается, всякая установка изменяется и притом тем быстрее, чем выше температура. Поэтому световые эталоны, которые должны быть наиболее устойчивы, имеют наиболее низкую температуру, а экономически более выгодными и потому широко распространенными оказываются лампы со значительно более высокой температурой.

Угольные эталоны силы света имеют цветовую температуру 2080°K , эталоны вольфрамовые 2360°K , в то время как лампы, применяемые для освещения, имеют цветовую температуру $2700\text{—}3000^{\circ}\text{K}$, в зависимости от потребляемой ими мощности. Эта разница температур вызывает такое различие в цветах, которое создает серьезные неудобства и вызывает большие ошибки при визуальных измерениях.

Кроме того, принятый сейчас метод хранения эталона в виде группы ламп, конечно, не является надежным и не обеспечивает неизменности эталона. Стремление улучшить сохранность эталона привело к идее использования абсолютно черного тела. В настоящее время американцы⁸ добились на этом пути хороших результатов, осуществляя абсолютно черное тело при температуре затвердевания чистой платины и сравнивая визуально его свечение с угольным эталоном. Не подлежит, однако, сомнению, что хорошие результаты, полученные в США, связаны с тем, что температура затвердевания чистой платины (2046°K) случайно оказалась близко к температуре угольного эталона (2080°K) и что сравнивать, таким образом, пришлось световые пучки почти точно одинакового состава.

Однако, даже преодолев серьезные трудности получения устойчивого режима излучения абсолютно черного тела при температуре 2046°K , мы окажемся перед прежними препятствиями при визуальном сравнении этого излучения с излучениями, даваемыми другими источниками света, трудностями, причина которых лежит в физических различиях, существующих в спектральных свойствах глаз отдельных наблюдателей.

С другой стороны, метод фотоэлектрический, свободный от всякой связи с психофизиологией, позволит устранить ошибки, связанные с неопределенностью кривой чувствительности глаза.

Основное условие, которое позволило бы выполнить подобную работу, состоит в приведении спектральной чувствительности фотоэлемента к достаточному совпадению с установленной средней кривой чувствительности человеческого глаза. Такое приведение представляет само по себе трудную задачу, но ее решение имело

бы смысл даже в том случае, если бы оно позволило только переходить от эталона первичного к эталонам вторичным и не давало бы возможности производить точного фотометрирования газосветных источников. При этом оказалось бы возможным понизить температуру первичного эталона, что сделало бы его более легко осуществимым и увеличило бы его устойчивость в работе.

Можно было бы, например, перейти от температуры плавления платины, дающей для визуальных измерений еще слишком желтый свет, к значительно более доступной температуре 1500°K , при которой абсолютно черное тело имеет яркость, еще совершенно достаточную для фотоэлектрических измерений.

Яркость черного тела при 1500°K составляет около $0,8\text{ sb}$ и если создать на фотоэлементе площадью 10 см^2 освещенность в 20 lx , то при чувствительности фотоэлемента порядка $300\text{ }\mu\text{A/lm}^*$ мы получим фототок около $6\text{ }\mu\text{A}$, измерение которого с достаточной точностью не представит труда.

Гораздо сильнее заставляет задуматься не малость подлежащего измерению энергии, а одновременное попадание на фотоэлемент относительно очень мощного потока инфракрасных лучей. Уже в области длин волн до $1,2\text{ }\mu$ заключена мощность, превосходящая измеряемую в сотни раз и представляющая поэтому громадную опасность для измерения, даже при наличии очень незначительной чувствительности фотоэлемента. Следует указать, что фотоэлементы, наиболее чувствительные к видимому излучению, — в частности фотоэлементы селеновые, — обладают еще заметной чувствительностью в этой части спектра. Поэтому прежде всего следует как-то избавиться от этой хотя и незначительной чувствительности. Забегая несколько вперед, скажем, что в настоящее время если и не имеется готового решения этой задачи, то имеются пути, обещающие привести к намеченной цели.

Еще более значительная мощность, лежащая в более длинноволновой области, представляется уже менее опасной по двум причинам. Во-первых, чувствительность фотоэлемента падает здесь уже практически до нуля, а во-вторых, если бы и были опасные остатки чувствительности, то десятисантиметровый слой чистой воды, прекрасно пропускающий всю видимую область, представляет собой непреодолимую преграду для этого рода лучей⁹ (прозрачность не выше $0,0005\%$).

Но отсутствие чувствительности в инфракрасной области, очевидно, недостаточно для того, чтобы фотоэлемент мог с достаточной точностью служить для световых измерений. Кривая его спектральной чувствительности должна мало отличаться от кривой, принятой за кривую чувствительности глаза¹⁰. Очевидно, здесь трудно

* $1\text{ }\mu\text{A} = 10^{-6}\text{ A}$. lm — сокращенное обозначение для единицы светового потока — люмена.

⁹ См. любой курс фотометрии, например Ш. Фабри, Общее введение в фотометрию; ОНТИ, 1934 или С. О. Майзель, Свет и зрение, ГТТИ, 1932.

ожидать абсолютного совпадения, да вряд ли оно и необходимо. При сравнении источников со сплошным спектром мы можем, очевидно, предъявлять различные требования к точности совпадения кривых в разных частях видимого спектра.

Принимая во внимание большую энергию, сосредоточенную в длинноволновой части спектра, мы, очевидно, должны будем по-разному оценивать ошибки в сине-фиолетовом и красном участках.

Окончательно процесс фотоэлектрического эталонирования представляется нам в таком виде. Отверстие нагретого до 1500°K абсолютно черного тела освещает поверхность фотоэлемента. Если нужно, то по пути включается кювета с водой; она может быть полезна для того, чтобы избежать нагревания фотоэлемента. Спектральное поглощение воды с нужной степенью точности получить нетрудно.

Измерив получающийся фототок и зная созданную на фотоэлементе освещенность, мы получаем градуировку фотоэлемента на освещенность. Затем, заменяя черное тело вторичным вольфрамовым или угольным эталоном, измеряем освещенность, создаваемую им, и определяем, таким образом, силу света эталона.

Для того чтобы рассчитать освещенность, создаваемую на фотоэлементе абсолютно черным телом, кроме спектральных свойств оптики, нам необходимы только условно установленная кривая чувствительности глаза и механический эквивалент света*. Последний нам нужен только для того, чтобы выразить освещенность в практических единицах. И если, осуществив описанный процесс, мы положим в основу расчета с некоторым произволом выбранное значение для механического эквивалента, то тем самым мы установим новую систему фотометрических единиц, основанную на излучении абсолютно черного тела, связанную точным соотношением с абсолютной CGS-системой единиц и произвольно близкую к тем практическим единицам, которыми мы привыкли пользоваться.

Лампы накаливания, которые сейчас служат эталонами, должны быть при этом сохранены, но вместо поддержания первичного группового эталона на их долю придется роль эталонов вторичных, градуируемых объективно по первичному эталону — абсолютно черному телу.

Заканчивая изложение соображений о возможности фотоэлектрических измерений светового эталона, отметим, что, несмотря на большие трудности, несомненно стоящие на этом пути, задача представляет достаточный принципиальный интерес для того, чтобы стоило затратить труд на ее решение.

* Механический эквивалент света представляет собой соотношение между световым и лучистым потоками для излучения с длиной волны $0,555\ \mu$, где глаз имеет максимальную чувствительность. Механический эквивалент света равен $0,00161\ \text{W/lm}$.

II. РАБОТЫ ФОТОМЕТРИЧЕСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ ГОСУДАРСТВЕННОГО ОПТИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА В ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ФОТОЭЛЕМЕНТОВ К СВЕТОВЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ

Первые попытки применения фотоэлементов к световым измерениям были сделаны в фотометрической лаборатории ГОИ уже довольно давно.

Наиболее существенные из старых работ были в свое время опубликованы в нашей печати^{10, 11}. Считаю только необходимым напомнить, что одной из первых осуществленных установок была установка для определения спектральной чувствительности фотоэлементов¹², собранная при помощи простого стеклянного монохроматора и ленточной лампы с известной цветовой температурой. Эта установка работает у нас до сих пор.

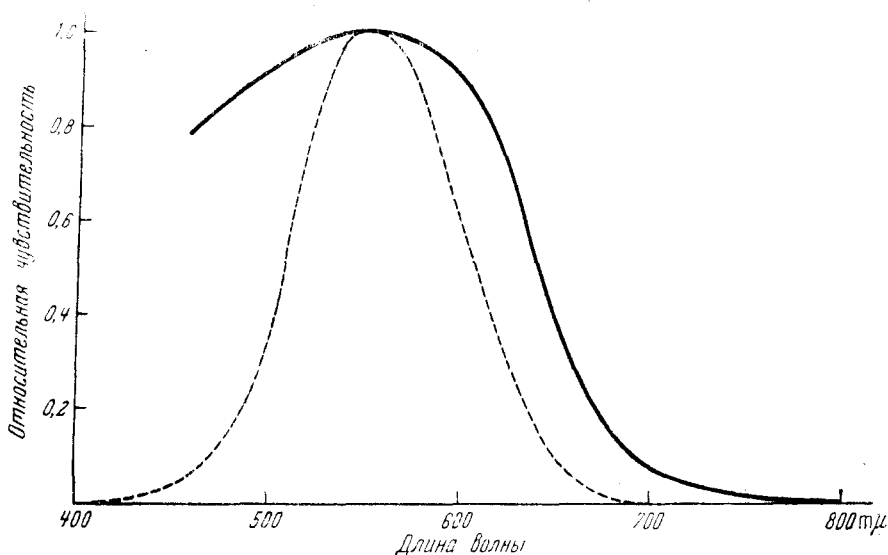


Рис. 3. Спектральная чувствительность селенового фотоэлемента и среднего глаза

Вначале мы применяли фотоэлементы с внешним фотоэффектом, калиевые и цезиевые, изготовлявшиеся в разных лабораториях. Но, начиная примерно с 1933 г., наше внимание все больше и больше обращалось в сторону нового типа фотоэлементов, так называемых вентильных или фотоэлементов с запирающим слоем, в частности — фотоэлементов селеновых. В настоящее время мы интересуемся только этими фотоэлементами и возможностями их использования для световых измерений.

Остановимся вкратце на свойствах селеновых фотоэлементов с запирающим слоем, делающих их столь интересными с фотометрической точки зрения. Прежде всего отметим спектральную

чувствительность фотоэлемента (рис. 3), больше, нежели чувствительность какого-либо другого, приближающуюся к кривой чувствительности среднего глаза и перекрывающую ее справа и слева. Последнее обстоятельство позволяет без большой потери света применять светофильтры, приближающие свойства фотоэлемента еще больше к свойствам глаза.

Затем следует указать на высокую интегральную чувствительность этих фотоэлементов, имеющую одно из наиболее высоких значений среди всех известных нам фотоэлементов. Для наших фотоэлементов она составляет от 300 до 500 $\mu\text{A}/\text{lm}$ (при цветовой температуре 2800°K), что позволяет в большинстве случаев обходиться без усиления фототоков.

Далее, громадное практическое удобство этих фотоэлементов состоит в том, что вентильные фотоэлементы не требуют для своей работы приложения какой-либо внешней электродвижущей силы. При отсутствии усиления это сводит светоизмерительную систему к совокупности из фотоэлемента и гальванометра. Соединение всех этих свойств делает селеновый фотоэлемент чрезвычайно интересным для фотометриста.

В нескольких словах процесс изготовления селеновых фотоэлементов состоит в следующем. На специально подготовленную железную пластинку возгоняется в вакууме тонкий слой селена — толщиной в 30—80 μ . Получающийся в непроводящем состоянии селен, путем выдерживания в течение нескольких часов при температуре близкой к 200°C , переводится в полупроводящую модификацию. После этого селен покрывается тончайшим (полупрозрачным) слоем золота, который служит одним из электродов. Нанесение прозрачного электрода производится путем катодного распыления.

Этот, казалось бы, очень несложный процесс изготовления приводит к получению фотоэлементов с весьма значительной индивидуальной изменчивостью свойств. Нахождение причины того или другого отклонения оказывается задачей чрезвычайно сложной и в большинстве случаев до сих пор не разрешенной. Вследствие этого весь процесс имеет в себе до сих пор значительный элемент грубой эмпирики, а необходимый результат не является полностью обеспеченным.

В результате довольно значительная часть изготовленных фотоэлементов получается не вполне удовлетворительной. Надо все же отметить, что в последнее время эта часть сильно уменьшилась, несомненно в связи с некоторыми найденными нами зависимостями.

Прежде всего следует отметить совершенно неожиданно обнаруженное нами свойство селеновых фотоэлементов терять свою чувствительность при помещении фотоэлемента в вакуум. Этот процесс наблюдался неоднократно и иногда завершался за 2—3 часа полностью. Вынутый из-под колокола фотоэлемент своей чувствительности не восстанавливал, его цвет менялся и поверхность селена начинала значительно лучше проводить электрический ток.

Так как фотоэлементы, покрытые тонким слоем шеллака, сохраняли свою чувствительность в вакууме, то это повело к предположению, что запирающий слой фотоэлемента представляет собой слой газа, который выделяется из него в вакууме и задерживается пленкой шеллака¹³. Не останавливаясь на деталях, отметим только, что в настоящий момент мы отказались от этого предположения и пришли к заключению, что потеря чувствительности связана с разрушением запирающего слоя под действием ртутных паров, присутствующих под эвакуированным колоколом.

Кроме весьма существенных практических следствий, с которыми связано обнаруженное свойство, оно позволило нам убедиться в том, что причина, обуславливающая наличие светочувствительности фотоэлемента, действительно лежит в очень тонком слое на поверхности полупроводящего селена. Это подтверждается тем, что если с фотоэлемента, потерявшего полностью свою чувствительность, соскоблить сверху очень тонкий слой, то такую пластинку можно затем снова превратить в фотоэлемент, путем нанесения полупрозрачного золотого электрода. Отсюда следует, что вредное влияние ртути, уничтожившее светочувствительность фотоэлемента, не распространилось на сколько-нибудь глубоко лежащие слои селена.

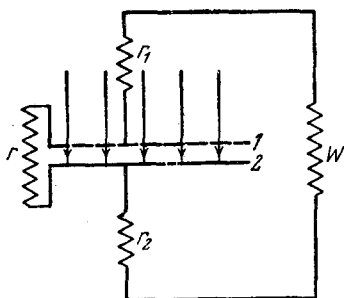


Рис. 4. Эквивалентная схема селенового фотоэлемента вентильного типа

Присутствие ртути, поглощенной верхним слоем, было установлено спектроскопически в вынутых из "ртутного вакуума" фотоэлементах.

Прежде чем обратиться к рассмотрению устойчивости и температурного коэффициента селеновых фотоэлементов, разберем общепринятую эквивалентную схему фотоэлемента, изображенную на рис. 4. Здесь 1 и 2 представляют собой полупрозрачный золотой слой и поверхностный слой полупроводящего селена, образующие как бы обкладки некоторого конденсатора. Под влиянием света, проникающего через слой золота, из слоя селена вырываются фотоэлектроны в количестве, пропорциональном падающей на фотоэлемент лучистой энергии. Накоплению электронов препятствует создаваемая на обкладках конденсатора разность потенциалов и обратный переход электронов в полупроводник, для которого запирающий слой представляет некоторое сопротивление, обозначенное на рис. 4 через r . Буквами r_1 и r_2 обозначены сопротивления полупрозрачного слоя золота и полупроводящего слоя селена. W — внешнее сопротивление, на которое замкнут фотоэлемент.

Вырываемый светом поток электронов I распределяется на две части: $i_{\text{ф}}$ — фототок во внешней цепи и i — ток обратной утечки через сопротивление r .

При этом

$$I = i_1 + i_\Phi.$$

Сумму $r + r_1 + r_2 = R$ назовем сопротивлением фотоэлемента.

Тогда соотношение между полным током I и фототоком i_Φ будет определяться формулой:

$$I = i_\Phi \frac{R + W}{r}.$$

Если W достаточно мало и им можно пренебречь по сравнению с сопротивлением R , то фототок во внешней цепи обозначим через i_0 и назовем током короткого замыкания.

Тогда

$$i_0 = I \frac{r}{R}.$$

Другой крайний случай работы фотоэлемента соответствует $W = \infty$ — случай разомкнутой внешней цепи или холостого хода. Напряжение холостого хода обозначим через E_0 . Так как в последнем случае $i_\Phi = 0$, то, следовательно, $I = i$ и $E_0 = Ir$. Нетрудно видеть, что сопротивление фотоэлемента R может быть получено отсюда путем деления электродвижущей силы холостого хода на фототок короткого замыкания:

$$R = \frac{E_0}{i_0}.$$

Основной характеристикой фотоэлемента является его интегральная чувствительность A , представляющая собой отношение электронного тока I к общему упавшему на фотоэлемент световому потоку

$$A = \frac{I}{F}, \text{ или } I = AF.$$

Кроме того, как мы видим

$$E_0 = AFr$$

и

$$i_0 = AF \frac{r}{r_1 + r_2 + r}.$$

На рис. 5 представлены зависимости E_0 и i_0 от освещенности для двух изготовленных нами фотоэлементов. Сплошные линии относятся к одному фотоэлементу, а пунктирные — к другому.

Для того чтобы фотоэлемент был в достаточной мере устойчив, т. е. мало менялся во времени, необходимо, чтобы величины,

определяющие напряжение холостого хода и ток короткого замыкания, сохраняли бы свое значение. Для большинства фотоэлементов, представленных на большой промежуток времени (месяцы) свободному действию атмосферного воздуха, наблюдается значительное уменьшение E_0 и незначительное уменьшение i_0 (рис. 6, сплошные линии).

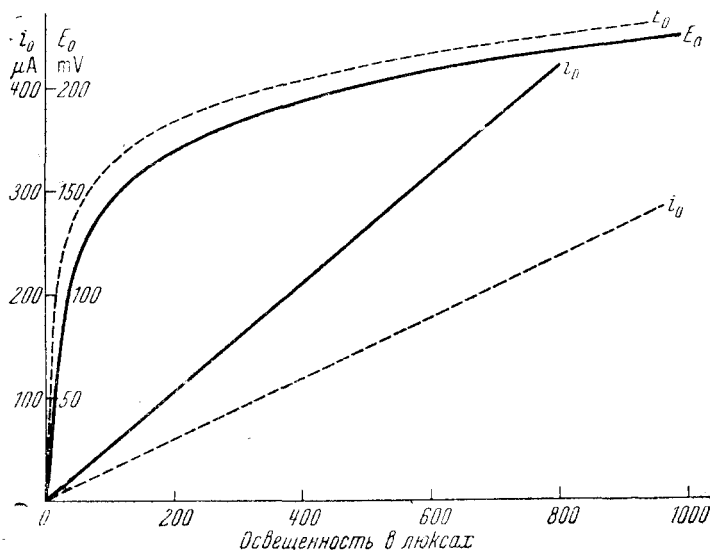


Рис. 5. Зависимости э. д. с. холостого хода (E_0) и тока короткого замыкания (i_0) от освещенности для двух изготовленных в ГОИ фотоэлементов

Из формул для E_0 и i_0 можно заключить, что такие изменения могут быть вызваны уменьшением сопротивления утечки r при постоянной чувствительности фотоэлемента A .

Хорошее влияние на устойчивость фотоэлемента оказывает покрытие фотоэлемента тонким и прозрачным защитным слоем лака (мы применяли цапон-лак), особенно в случае фотоэлементов, для которых нанесение золотого электрода происходило в воздухе. Эти фотоэлементы показывают наибольшую степень постоянства на достаточно больших промежутках времени (несколько месяцев), особенно в отношении тока короткого замыкания (рис. 6, пунктирная линия).

На фотоэлементах вентильного типа часто наблюдается значительная температурная зависимость фотоэффекта; под влиянием меняющейся температуры, при неизменной освещенности, изменяется как фототок короткого замыкания i_0 , так и электродвижущая сила холостого хода E_0 . При этом для разных образцов эта зависимость оказывается различной в количественном отношении.

Как видно из рис. 7 (сплошные кривые), при низких температурах порядка -100°C , наблюдается довольно быстрый рост i_0 и E_0

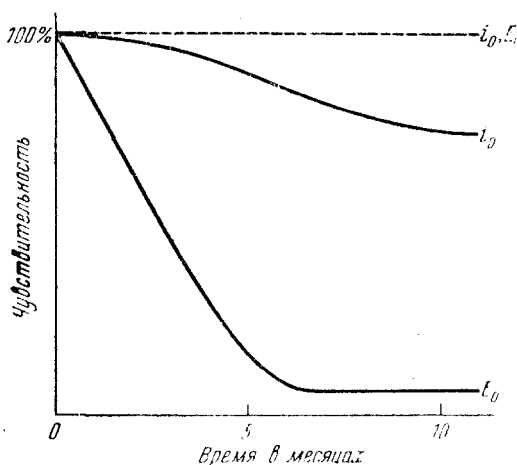


Рис. 6. Изменение э. д. с. холостого хода (E_0) и тока короткого замыкания (i_0) со временем

с повышением температуры. Этот рост постепенно замедляется, затем останавливается (что происходит при разных температурах

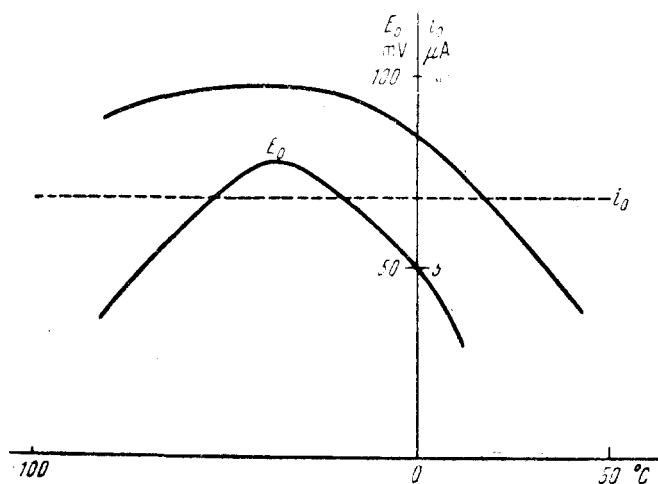


Рис. 7. Зависимость э. д. с. холостого хода (E_0) и тока короткого замыкания (i_0) от температуры

для i_0 и E_0) и переходит в падение, наблюдаемое при комнатной температуре для большинства фотоэлементов.

Различия в свойствах отдельных фотоэлементов заставили нас искать таких случаев, когда температурная зависимость достигает минимума или даже, если возможно, сводится на-нет. Оказывается, что такие случаи наблюдаются. На рис. 7 (пунктирная линия) изображена картина температурных свойств одного из изготовленных нами фотоэлементов. Как видно, в пределах от -100°C до $+100^{\circ}\text{C}$ фототок короткого замыкания остается практически постоянным при изменяющейся электродвижущей силе. Здесь приведен лучший из полученных нами результатов, но имеется серия фотоэлементов, если и не столь удачных, то во всяком случае вполне пригодных для практических целей.

Более внимательное рассмотрение различий в свойствах отдельных фотоэлементов приводит к предположению, что температурный коэффициент селенового фотоэлемента определяется соотношением между суммой сопротивлений $r_1 + r_2$ — золотого электрода и сопротивления полупроводящего селена — и сопротивлением r запирающего слоя фотоэлемента.

Общий электронный ток I , вызываемый светом, падающим на фотоэлемент, разделится при коротком замыкании на две части: i и i_0 . Соотношение этих двух частей зависит от соотношения сопротивлений r и $r_1 + r_2$. Мы уже видели, что

$$i_0 = I \frac{1}{1 + \frac{r_1 + r_2}{r}}.$$

Предполагая, что I не зависит от температуры, мы будем иметь постоянство в двух случаях: либо, когда $r_1 + r_2$ изменяется пропорционально r , чего ожидать трудно ввиду совершенно различной природы этих сопротивлений, либо, когда отношение

$$\frac{r_1 + r_2}{r}$$

настолько мало по сравнению с единицей, что даже заметное его изменение не повлияет на величину i_0 .

Заканчивая этим изложение свойств селеновых фотоэлементов с запирающим слоем, переходим теперь к тем опытам, которые мы сделали в направлении применения этих фотоэлементов к световым измерениям.

Довольно хорошее соответствие, существующее между спектральной чувствительностью селенового фотоэлемента и среднего человеческого глаза, заставляет сразу сделать попытку замены глаза фотоэлементом, хотя бы для наиболее простых источников со сплошным спектром. При этом существенным является то влияние, которое окажет различие кривых чувствительностей на результаты измерений.

Для выяснения вопроса мы поступили следующим образом.

В шар Ульбрихта * помещали одну вольфрамовую лампу и, изменяя режим ее питания, получали излучения, соответствующие различным цветовым температурам между крайними пределами в 2300° К и 2800° К.

В табл. I сведены результаты измерений, произведенных визуально и при помощи двух фотоэлементов. Значение световых потоков для самой низкой температуры было принято общим.

ТАБЛИЦА 1

Напряже- ние на лампе в V	Световой поток в люменах, измеренный			Расхождение в %	
	визуально	фотоэле- м. № 1	фотоэле- м. № 2	фотоэле- м. № 1	фотоэле- м. № 2
69	248	248	248	0,0	0,0
80	454	461	427	+ 1,5	— 6,8
90	750	730	645	— 2,7	— 14,0
104	1300	1250	1040	— 3,8	— 20,0

Как видно из таблицы, один из фотоэлементов давал результаты довольно близкие к визуальным, в то время как другой закономерно увеличивал свои ошибки по мере повышения температуры источника, систематически преуменьшая значение световых потоков. Для наивысшей температуры расхождения достигли 20%, что, конечно, не может быть признано сколько-нибудь удовлетворительным.

Причиной таких отступлений является преувеличенная по сравнению с глазом чувствительность фотоэлементов в красной и инфракрасной области спектра, причем у разных фотоэлементов эта чувствительность бывает различна (рис. 3). Поэтому совершенно естественно перед нами встал вопрос о каких-то мерах борьбы, кроме выбора случайных фотоэлементов, обладающих нужными свойствами. Эти меры были тем более необходимы, что кроме чисто технических целей мы имеем в виду и более точные измерения.

Сам собой напрашивающийся метод применения специально подобранных светофильтров оказался недостаточным. Дело в том, что для подгонки кривой фотоэлемента в видимой части спектра мы приходим к зеленому фильтру. Но получить зеленый фильтр, не пропускающий в инфракрасной части спектра, нам не удалось. По этому в соединении с фотоэлементами, имеющими заметную инфракрасную чувствительность, зеленый фильтр может дать даже ухудшение результатов. Попытка применить метод, предложенный

* Шаром Ульбрихта называется прибор, предназначенный для измерения световых потоков и представляющий собой пустой шар, стенки которого покрыты ровным слоем матовой краски, в который помещается подлежащий измерению источник.

Дрезлером¹⁵ и состоящий в том, чтобы различные части фотоэлемента накрыть различными фильтрами и уничтожить колебания в свойствах отдельного фотоэлемента индивидуальной подгонкой частей его поверхности, закрытых тем или другим фильтром, — окончилась также неудачно из-за отсутствия в нашем распоряжении соответственных фильтров. Тогда у нас возникла мысль обойти трудности получения фильтров, хорошо прозрачных в видимой части спектра и не пропускающих инфракрасных лучей, следующим путем.

Мы взяли фильтр, обладающий обратными свойствами, а именно: непрозрачный в видимой части спектра и пропускающий крайнюю красную и инфракрасную часть спектра, и покрыли им второй фотоэлемент, поставленный рядом с основным. Освещая одновременно оба фотоэлемента, мы пропускаем возникающие в них токи через две обмотки одного гальванометра, так что их действия вычитаются. Подбирая соответственно чувствительности обмоток, мы получили результаты, значительно более благоприятные. Они приведены в табл. 2, которая показывает, что в прежних условиях

ТАБЛИЦА 2

Напряжение на лампе в V	Световой поток в люменах, измеренный		Расхождение в %
	визуально	2 фотоэлем.	
69	248	248	0,0
80	454	467	+ 2,9
90	750	755	+ 0,7
104	1300	1310	+ 0,8

эта система дает расхождения с визуальными измерениями всего в 3%, т. е. расхождения между визуальными и объективными измерениями уже лежат в пределах погрешностей (табл. 2).

Наконец, в самое последнее время путем изменения процесса изготовления фотоэлементов нам удалось получить кривую чувствительности самого фотоэлемента (сплошная линия на рис. 8), значительно более близкую к кривой глаза, по крайней мере, в красной части спектра. Что касается сине-фиолетовой его части, то здесь значения, полученные по кривой, несомненно, преувеличены из-за присутствия относительно большого количества рассеянного света.

Из числа приборов, основанных на применении селенового фотоэлемента, на первом месте стоит, несомненно, объективный люксметр. Представляя собой совокупность фотоэлемента и достаточно чувствительного стрелочного гальванометра, снабженного шкалой, градуированной прямо в люксах, объективный люксметр является очень удобным и простым в обращении прибором, полу-

чившим громадное распространение на Западе. Достаточно перечистать объявления светотехнических журналов, чтобы убедиться в том, что объективный люксметр скоро будет почти таким же общепотребительным прибором, как термометр.

Требования, предъявляемые к фотоэлементу люксметра, не так велики, как требования к лабораторному прибору. Здесь допустимо довольно значительное отступление в спектральных свойствах от свойств глаза в силу двух причин: во-первых, точность

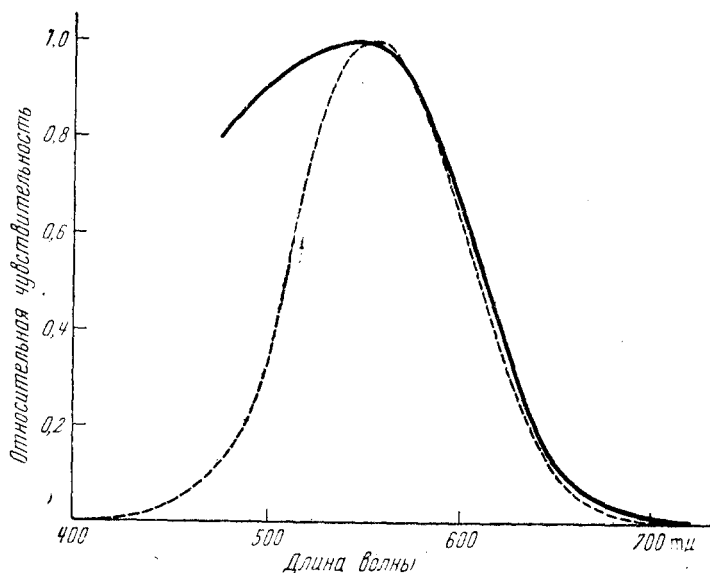


Рис. 8. Спектральная чувствительность селенс-сернистых фотоэлементов

в 10—15% для большинства технических целей совершенно достаточна и, во-вторых, для разных типов излучения можно ввести поправочные коэффициенты, таблица которых может быть приложена к прибору. По последнему пути идут некоторые заграничные фирмы. При этом коэффициенты эти могут довольно сильно отступать от единицы.

Дополнительное требование, которому должен удовлетворять объективный люксметр, — это пропорциональность показаний прибора косинуса угла падения, параллельного пучка лучей. Аналогичное требование предъявляется и к испытательной пластинке визуального люксметра и никогда точно не выполняется. Если оправа фотоэлемента не дает сильных теней на светочувствительной поверхности, то фотоэлементы довольно хорошо удовлетворяют этому требованию. Если почему-либо желательно приблизиться к точному закону в большей степени, то это можно сде-

лать, создавая над фотоэлементом особую крышку, усиливающую действие лучей, падающих под очень большим углом на поверхность¹⁶.

Сама по себе чувствительность фотоэлемента, равная от $3 \cdot 10^{-8}$ до $5 \cdot 10^{-8}$ А/лх см², совершенно достаточна для того, чтобы стрелочным прибором с чувствительностью 10^{-7} А измерять освещенности, начиная от 0,1 лх при поверхности в 25 см². Если такие малые освещенности измерять не требуется, то чувствительность прибора может быть понижена. Потребность в объективных люксметрах у нас в Союзе, несомненно, большая, и, в сущности говоря, нет принципиальных препятствий к тому, чтобы начать соответственное производство. Фотоэлементы мы делаем (кроме Оптического института, их изготавливает и ЦРЛ и Электротехнический институт, и еще ряд лабораторий), гальванометры тоже, но производства объективных люксметров пока еще не имеется.

Очень небольшое число люксметров было выпущено Оптическим институтом, и относительно некоторых из них мы имеем сведения, что они работают исправно.

Кроме объективного люксметра, Фотометрический сектор ГОИ занимается и другими применениями селеновых фотоэлементов. В частности нами разрабатываются компенсационные схемы соединения фотоэлементов, позволяющие производить относительные измерения, не контролируя строго постоянства напряжения на лампе.

В настоящее время нами выработаны условия для функционирования схемы э. д. с., изображенной на рис. 9, где Φ_1 и Φ_2 — два фотоэлемента, включенные навстречу друг другу через гальванометр G.

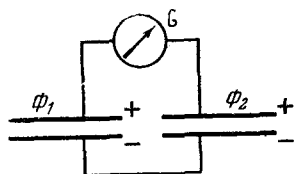


Рис. 9. Компенсационная схема (э. д. с.) включения двух селеновых фотоэлементов

Оба фотоэлемента освещаются одним источником света, и при изменении накала лампы показания гальванометра не должны изменяться. Для преодоления мешающего работе схемы различия между фотоэлементами нами с успехом применяется метод шунтировки фотоэлементов внешними сопротивлениями, малыми по сравнению с сопротивлением фотоэлемента. При подходящем подборе фотоэлементов и сопротивлений схема приобретает достаточную устойчивость, не теряя

слишком много в своей чувствительности.

Нам представляется, что схемы этого рода могут быть с успехом применены для создания ряда новых типов объективных приборов для различных световых измерений, например, для измерения коэффициентов пропускания и отражения. Установка, собранная по этому принципу для измерения прозрачности с гальванометром чувствительностью 10^{-9} А, давала смещение нуля в пределах 6 мм при изменении напряжения на лампе на 50% и откло-

нение в 200 мм при помещении обычного стекла в один из пучков*.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. K. S. Gibson, Bureau of Stand. Bull. N 349, 1919.
2. A. Hardy, J. O. S. A., 25, 305, 1935.
3. W. F. Little a. H. J. Eckweiler, Trans. Ill. Eng. Soc., 26, 810, 1931.
4. C. L. Dows a. G. R. Baumgartner, Trans. Ill. Eng. Soc., 30, 476, 1935.
5. W. W. Coblentz a. W. B. Emerson, Bureau of Stand. Bull., 14, 1918—1919.
6. L. S. Ornstein, Rev. Optique, 12, 390, 1933.
7. L. S. Ornstein, Rev. Optique, 12, 385, 1933.
8. H. T. Wensei, Wm. F. Roeser, L. E. Barbrow a. F. R. Caldwell, Bureau of Stand. Journ. Res., 6, 1103, N 6, 1931.
9. E. Aschkinass, Ann. Phys. u. Chem. N. F., 55, 401, 1895.
10. Е. Пуцейко, Журнал Технической физики, 4, 1163—1169, 1934.
11. Е. Пуцейко, Светотехника, № 5, 16—18, 1934.
12. М. Гуревич и Е. Пуцейко, Журнал технической физики 4, 748—767, 1934.
13. С. Фрейверт, Журнал технической физики, 5, вып. 10, 1935.
14. Е. Пуцейко, Температурный коэффициент селенового фотоэлемента, Журнал технической физики 7, 10, 1937.
15. A. Dresler, E. T. Z. 54, 476, 1933.
16. В. Б. Вейнберг, Труды Всесоюзной электротехнической ассоциации, 4, 28—38, 1935.

* Все перечисленные выше результаты, касающиеся селеновых фотоэлементов, получены следующими сотрудниками Фотометрической лаборатории ГОИ: руководителем группы Е. К. Пуцейко, аспирантом ГОИ С. И. Фрейверт и сотрудниками — Н. Б. Бердниковым, Б. И. Каменецким, Л. Н. Мейер и В. И. Рутковским.