

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКНОВЫЕ ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ**ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЕЛЕНОВЫХ
ФОТОЭЛЕМЕНТОВ С ЗАПОРНЫМ СЛОЕМ***С. Г. Юров и В. С. Хазанов*

1. ВВЕДЕНИЕ

Физика, химические производства, полиграфия, геофизика, метеорология, светотехника, текстильное производство — таков далеко не полный перечень областей науки и техники, в которых не малую роль играют измерения излучений и, в частности, световые измерения с помощью фотоэлементов.

В настоящее время для этих целей наиболее широко применяются селеновые фотоэлементы с запирающим слоем. Это объясняется тремя основными причинами:

1. Селеновые фотоэлементы *) просты в эксплуатации, ибо они не требуют посторонних источников напряжения.

2. Эти фотоэлементы обладают сравнительно высокой чувствительностью, доходящей до 500 $\mu\text{a}/\text{лм}$.

3. Их спектральная чувствительность напоминает кривую чувствительности человеческого глаза, что имеет значение для световых измерений, производимых, безусловно, наиболее часто.

Теории действия и различным свойствам селеновых фотоэлементов посвящено громадное количество работ, однако достаточно полных обзоров фотометрических свойств селеновых фотоэлементов различных марок практически не имеется. В результате потребителям этих фотоэлементов, не имеющим достаточного опыта и возможности ознакомиться по отдельным многочисленным работам с их свойствами, не известны с достаточной полнотой фотометрические свойства используемых фотоэлементов, что приводит зачастую к весьма большим ошибкам, ощутимым даже при самых грубых измерениях.

*) Для краткости впредь будут опускаться необходимые по существу слова «с запирающим слоем».

Используя опыт работы фотометрической лаборатории ВЭИ и литературные данные, авторы делают попытку с единой точки зрения охарактеризовать наиболее важные фотометрические свойства селеновых фотоэлементов, отнюдь не имея намерения излагать теорию их действия¹.

Для правильной оценки тех численных данных, которые приводятся ниже, следует иметь в виду, что они являются и могут являться только ориентировочными, ибо, как показала практика, селеновые фотоэлементы по своим свойствам индивидуальны, причём различия заметны не только между разными марками (фирмами), но также и внутри одной и той же марки и даже серии. Изложенные ниже сведения дают представление о возможных ошибках, средствах их устранения и вероятных причинах возникновения.

2. ХАРАКТЕРИСТИКА «ФОТОТОК — ОСВЕЩЁННОСТЬ»

«Первичный» фототок, возникающий в результате действия на фотоэлемент потока излучения, прямо пропорционален этому потоку¹.

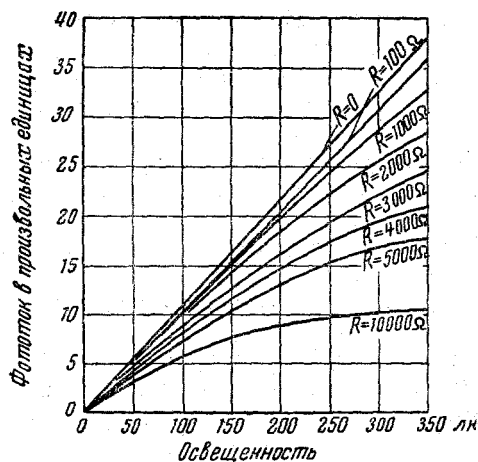


Рис. 1. Зависимость фототока от освещённости при различных сопротивлениях нагрузки.

Первичный фототок протекает по двум параллельным цепям: внешней (включающей измерительный прибор), сопротивление которой остаётся постоянным, и внутренней (селен, запирающий слой), сопротивление которой зависит от освещённости фотоэлемента. Только в том случае, если внутреннее сопротивление фотоэлемента значительно больше внешнего сопротивления, ток, протекающий во внешней цепи, можно, с некоторым приближением, считать пропорциональным освещённости, т. е. полагать, что характеристика «ток — освещённость» линейна (рис. 1). Внутреннее темновое сопротивление запирающего слоя зависит от приложенного напряжения и имеет величину от 1 до 250 Ком для разных марок фотоэлементов (рис. 2). Оно уменьшается с увеличением освещённости, следовательно, характеристика «ток — освещённость» будет тем менее отклоняться от прямой, чем меньше освещённость и меньше сопротивление внешней цепи, т. е. измерительного прибора. Э. д. с. селенового фотоэлемента, по этим же причинам, увеличивается с возрастанием освещённости нелинейно

при росте освещённости приближается к некоторой постоянной величине.

Многочисленные эксперименты^{2,3}, имевшие целью определить характеристику «ток—освещённость» для селеновых фотоэлементов, подтверждают в первом приближении эти выводы.

В качестве примера влияния величины внешнего сопротивления на ошибку измерения, которая может получиться в результате нелинейной зависимости фототока во внешней цепи от освещённости, приведена таблица I*).

Таблица I

Фотоэлемент	Диаметр чувствительной части в мм	Отношение чувствительности при 1000 лк к чувствительности при 400 лк при сопротивлении внешней цепи:	
		10 ом	200 ом
ГОИ № 1896	36	1,0	0,91
ГОИ № 1900	36	1,0	0,97
ЛЭТИ № 102	37	0,99	0,87
ЛЭТИ № 140	51	0,93	0,68
СВ № 25 **)	40	0,9	0,83
СВ № 92	40	0,9	0,83
Вестон	40	0,99	0,94
Электроселл	37	0,97	0,93
САФ	57	0,96	0,75
Тунгсрам	35	0,97	0,93
ФАИ № 776	51	0,94	0,72
ФАИ № 2607	51	0,99	0,91

Из данных таблицы можно заключить, что при сопротивлении нагрузки, равном 10 ом, большинство фотоэлементов обладает в интервале 400—1000 лк удовлетворительной линейностью (отклонение 2—3%), тогда как при внешнем сопротивлении 200 ом ошибка может достигать для низкоомного фотоэлемента 25%. В интервале освещённости

*) 1. Таблица составлена по результатам испытаний, проводившихся в ВЭИ, и по литературным данным.

2. В таблице помещены результаты испытаний лишь для некоторых, наиболее характеризующих марку, фотоэлементов.

3. Обычно, чем меньше площадь чувствительной поверхности фотоэлемента, тем лучшую линейность он обнаруживает.

4. Обычно фотоэлементы с большим внутренним сопротивлением (более линейные) обладают гладкой тёмносерой поверхностью, тогда как у низкоомных фотоэлементов чувствительная поверхность обычно неровная, светлая с металлическим блеском.

***) Селеновые фотоэлементы СВ № 25 и № 92 были любезно предоставлены Н. С. Хлебниковым и М. И. Беляевым.

щённостей до 10—30 мк у некоторых фотоэлементов встречаются отклонения фототока от линейности в сторону более быстрого роста. Вероятно, это случается, когда сопротивления слоя селена и запорного слоя имеют один порядок величины, и начинает играть заметную

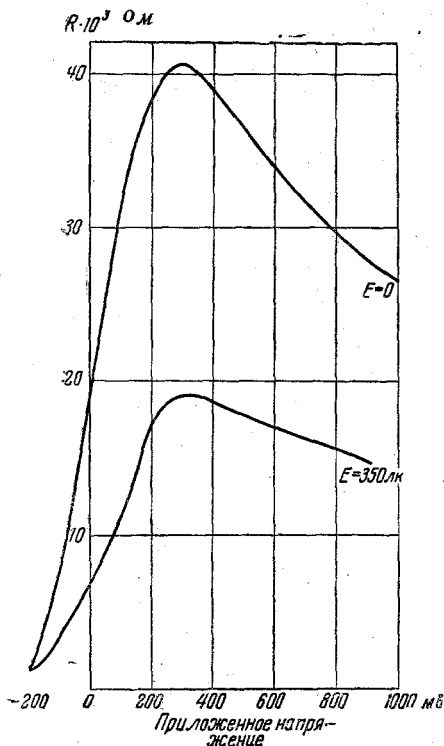


Рис. 2. Сопротивление селенового фотоэлемента в зависимости от освещённости и приложенного напряжения.

роль фотопроводимость селена. В этом случае наблюдается рост чувствительности фотоэлемента с освещённостью⁴. Для измерения освещённостей, меньших 0,1 мк, селеновые фотоэлементы считаются неприменимыми из-за большой начальной нестабильности (см. § 4). При освещённостях до 30—40 мк ток и даже э. д. с. для фотоэлементов с достаточно большим внутренним сопротивлением практически линейно зависят от освещённости⁵.

При дальнейшем росте освещённости э. д. с. растёт нелинейно, приближаясь к пределу, зависящему от спектрального состава падающего излучения и образца фотоэлемента^{6,7}. Начиная с освещённостей примерно в 10³ мк, даже при малом сопротивлении внешней цепи фототок растёт нелинейно с ростом освещённости^{7,8}. Вид характеристики «фототок короткого замыкания — освещённость» в пределах ошибки эксперимента не зависит от спектрального состава излучения⁹, что является ещё одним доводом в пользу выбора измерительных схем с малым сопротивлением нагрузки.

Изложенные выше данные могут рассматриваться лишь как ориентировочные, поскольку селеновые фотоэлементы обладают даже внутри одной и той же марки заметной индивидуальностью. В зависимости от требований к точности измерений может встать вопрос о контроле линейности. Последний, чаще всего, производится на фотометрической скамье с использованием закона «обратных квадратов». Однако этот способ, при его сравнительной сложности, недостаточно надёжен и точен. Более простой и самый точный способ заключается в использовании установки, состоящей из нескольких одновременно горящих ламп, каждая из которых может закрываться

непрозрачным щитком. Используя такую установку, Кемпбелл¹⁰ на нескольких фотоэлементах (разных марок) установил, что режим короткого замыкания не является наилучшим для линейной зависимости «фототок — освещённость». По данным Кемпбелла для каждого фотоэлемента должно быть подобрано наиболее выгодное сопротивление внешней цепи, при котором отклонения от линейности получаются минимальными.

По всей вероятности, результаты этих опытов могут быть объяснены изменениями сопротивления слоя селена (не запорного слоя). Во всяком случае можно сказать с достаточной определённостью, что обычная эквивалентная схема¹ селенового фотоэлемента для полного описания его фотометрических свойств недостаточна.

3. СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

На рис. 3 даны кривые спектральной чувствительности для фотоэлементов, выпущенных разными фирмами, и для сравнения кривая видности. Эти кривые построены в относительных единицах чувствительности на основании литературных данных и измерений, проведённых в ВЭИ.

Обращает на себя внимание разнообразие в спектральной чувствительности для отдельных образцов фотоэлементов. Исследование причин, влекущих за собой различие спектральных чувствительностей^{12, 11}, показало, что оно определяется присутствием в селене примесей. Так, например, примеси серы и нафтиламина (α) сдвигают спектральную характеристику в коротковолновую часть спектра, а примесь теллура — в длинноволновую. На основании отмеченного выше подобия кривой спектральной чувствительности фотоэлемента и кривой видности, в практической фотометрии селеновые фотоэлементы часто применяются для сравнения разносектральных источников. Почти всегда это приводит к весьма заметным, даже для производственных и полевых измерений, ошибкам. Эти ошибки тем больше, чем больше разница в спектральном составе сравниваемых излучений и чем больше отличие кривой спектральной чувствительности фотоэлемента от кривой видности. Для примера на рис. 4 даётся величина ошибки, получаемой при пользовании разными фотоэлементами для сравнения излучений с цветовыми температурами от 1900° К до 2320° К². Рассматривая рис. 4, можно сделать вывод о вероятности получения ошибки при сравнении излучений $T_{цв} = 1900^\circ \text{К}$ и $T_{цв} = 2320^\circ \text{К}$, как большей 20%, так и меньшей 3%, в зависимости от хода кривой спектральной чувствительности фотоэлемента. С другой стороны, проведённые в ВЭИ измерения показали возможность фотометрического сравнения фотоэлементом ГОИ (см. рис. 3) излучения лампы накаливания ($T_{цв} = 2360^\circ \text{К}$) с излучением люминесцентной лампы ($T_{цв} = 6000^\circ \text{К}$) с ошибкой, не превосходящей 13—15%. Это объясняется тем, что спектральная чувствительность этих

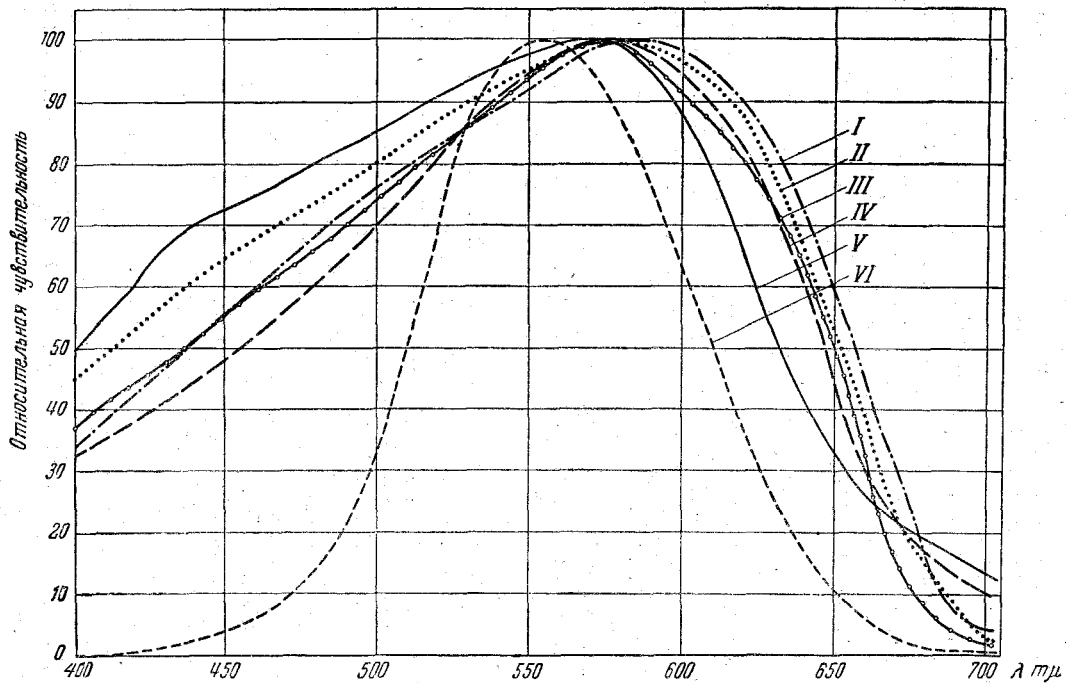


Рис. 3. Спектральная чувствительность фотоэлементов различных марок: I—ФАИ, II—ГОИ, III—ЛЭТИ, IV—Weston и Photronic, V—Tungsram, VI—Глаз.

фотоэлементов подходит ближе к кривой видности среднего глаза, чем у фотоэлементов, выпускаемых другими фирмами. Особенно благоприятным является их сравнительно малая чувствительность в ближней инфракрасной и ультрафиолетовой областях.

Для устранения или, точнее, уменьшения ошибок при фотометрировании селеновым фотоэлементом разноспектральных излучений было предложено несколько методов. К числу наиболее распространённых относятся следующие:

1. Гальванометр, измеряющий фототок, снабжается специально градуированным шунтом, который изменяет долю фототока, идущую через гальванометр в нужное количество раз, при измерениях источников излучения с известным спектральным составом. Практически такой шунт может быть изготовлен лишь для сравнительно небольшого числа источников излучения, как то: ртутные, натриевые, неоновые и т. д. лампы.

Положительной стороной метода является его простота, но всё же широкого распространения он не имеет.

2. Фотоэлемент снабжается таблицей поправочных коэффициентов, дающих отношения чувствительности фотоэлемента для излучений измеряемых источников к его чувствительности для излучения лампы накаливания с определённой цветовой температурой. Метод обладает всеми преимуществами и недостатками вышеописанного способа.

3. Наиболее удобным и самым распространённым на практике методом уменьшения ошибки является приближение кривой чувствительности фотоэлемента к кривой видности с помощью компенсационного светофильтра.

Таким образом, можно сделать вывод, что фотоэлементы с компенсационными фильтрами могут быть использованы весьма эффективно там, где не требуется большой точности, например, для построения «объективных» люксометров. Однако их применение для точных фотометрических измерений, без введения соответствующих поправок, рекомендовано быть не может.

В том случае, если фотоэлемент с компенсационным фильтром употребляется для измерения света, падающего на него под разными углами, например, при измерении освещённости, создаваемой небом, и в других подобных случаях, следует иметь в виду, что компен-

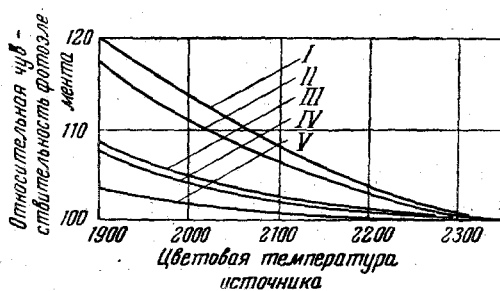


Рис. 4. Ошибка, даваемая различными фотоэлементами при сравнении излучений разного спектрального состава: I—Weston, II—NPL, III—Electrocell, IV—NPL, V—SAF и Tungsram.

сационный фильтр сильно ухудшает косинусную характеристику фотоэлемента.

Использование компенсационного фильтра представляется весьма заманчивым, благодаря простоте и универсальности метода. За последние 10—15 лет было разработано и выпущено на рынок несколько типов фотоэлементов с компенсационными фильтрами. Наибольшее распространение получили фотоэлементы ГОИ¹³, Вестон¹⁴, Дреслер¹⁵ и Рик¹⁶.

В ВЭИ было проведено сравнение фотометрических свойств этих фотоэлементов¹⁷, которое показало, что лучшими являются фотоэлементы ГОИ и Вестон. Однако даже при сравнительно небольших различиях в спектральном составе, как, например, лампа накаливания ($T_{\text{пв}} = 2860^\circ \text{K}$) и люминесцентная лампа ($T_{\text{пв}} = 6500^\circ \text{K}$), ошибки у фотоэлемента Вестон могут достигать 5%, а ГОИ — (1—3)%*).

К числу неприятных для точных измерений свойств селеновых фотоэлементов относится зависимость кривой спектральной чувствительности от сопротивления внешней цепи и тока нагрузки⁴.

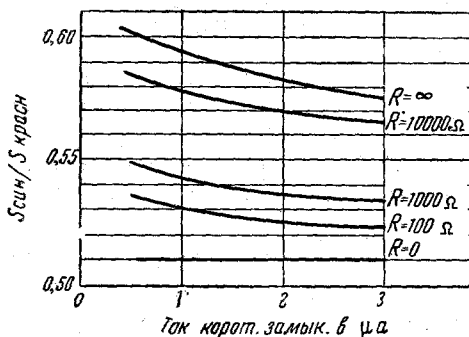


Рис. 5. Изменение отношения чувствительности фотоэлемента в синей части спектра к его чувствительности в красной части спектра в зависимости от внешнего сопротивления и тока нагрузки.

ходящее до 100% от центра к краям. Спектральная чувствительность по поверхности фотоэлемента в пределах точности измерений не меняется¹⁸.

4. НАЧАЛЬНАЯ НЕСТАБИЛЬНОСТЬ

Под начальной нестабильностью понимается изменение фототока в начальный период после включения освещения фотоэлемента при неизменных прочих условиях. Говоря о начальной нестабильности,

*) Знак «минус» означает, что сила света люминесцентной лампы, измеренная фотоэлементом, меньше её истинного значения.

обычно ограничиваются понятием усталости, подразумевая под ним постепенный спад фототока во времени при постоянной освещённости на фотоэлементе. Однако встречаются и другие термины для характеристики различных проявлений начальной нестабильности: крихт-эффект (Kriecheffekt) или эффект роста фототока, а также термины, характеризующие нестабильность вообще, безотносительно к направлению изменения тока, как, например, дрейф-эффект (Drifteffect).

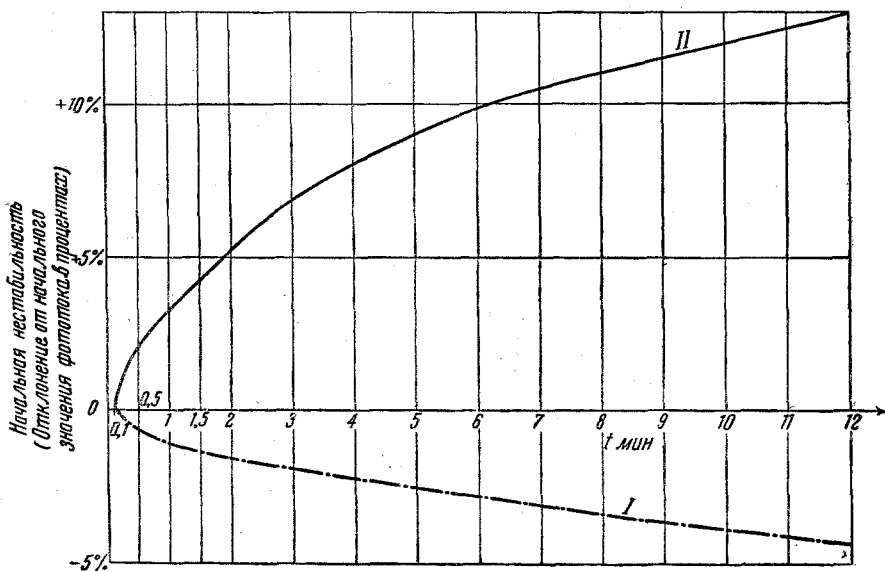


Рис. 6. Начальная нестабильность: I—ГОИ № 1896 1947 г.; II—ГОИ № 1900 1947 г.

Начальная нестабильность селеновых фотоэлементов в первую очередь представляет интерес со следующих точек зрения:

1) Влияние её на измерения излучений ламп накаливания, особенно с цветной температурой, соответствующей наиболее ходовым эталонным лампам (примерно 2200°K — 2600°K).

2) Влияние её на точность спектральных измерений, когда селеновый фотоэлемент помещён в качестве приёмника у входной щели монохроматора.

Определение начальной нестабильности производилось при освещении фотоэлементов светом лампы накаливания с $T_{\text{лив}} = 2360^{\circ}\text{K}$, а также при облучении монохроматическими потоками ($\lambda = 460 \text{ м}\mu$, $550 \text{ м}\mu$ и $680 \text{ м}\mu$). Нестабильность фототока для большинства фотоэлементов заметна в течение 10—15 минут. В случае освещения фотоэлемента светом лампы накаливания начальная нестабильность

может заключаться в 1) первоначальном росте, а затем спаде тока, 2) постепенном росте или 3) постепенном спаде тока.

Характерные кривые начальной нестабильности для этих случаев изображены на рис. 6 и 7. Встречаются также фотоэлементы, не обладающие в этих условиях освещения начальной нестабильностью.

При освещении фотоэлементов синим и жёлто-зелёным светом наблюдается или постоянство или рост тока, в то время как облущ-

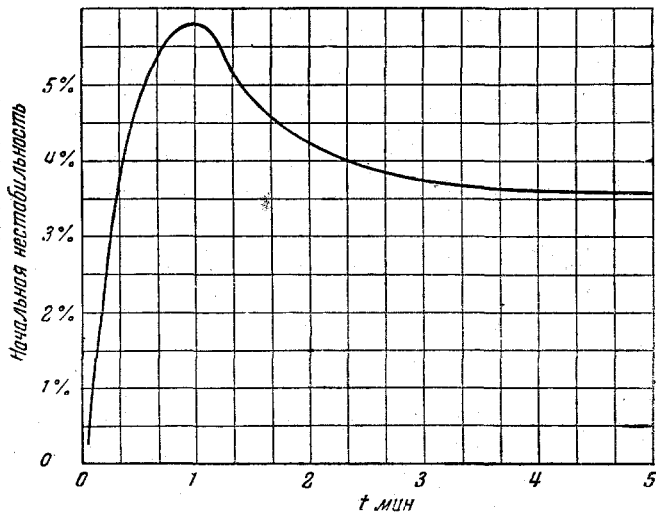


Рис. 7. Начальная нестабильность фотоэлементов NBS.

чение красным светом всегда вызывает сравнительно быстрый спад тока. При освещении фотоэлементов глубоко красным светом с $\lambda = 700$ м μ спад тока происходит ещё быстрее.

Результаты эксперимента сведены в таблицу II.

Начальная нестабильность оценивалась по наибольшей разности фототоков за 10 минут испытания и выражалась в процентах от начального значения фототока. Освещённость фотоэлементов при разном спектральном составе падающего излучения менялась таким образом, чтобы генерируемый фототок оставался приблизительно постоянным. Таким образом, не следует считать данные таблицы II для $\lambda = 460, 550$ и 680 м μ противоречащими результатам, полученным при облучении светом со спектральным составом, соответствующим $T_{\text{цв}} = 2360^\circ \text{K}$, так как энергетические освещённости на фотоэлементе в этих случаях (при одинаковом фототоке) весьма отличны.

Исследование начальной нестабильности тока при освещении фотоэлементов светом ламп накаливания производилось Берброу¹⁹ и Престоном². Берброу даёт зависимость фототока от времени,

Таблица II

Начальная нестабильность в процентах от начального значения тока

Фотоэлемент	$\lambda = 460 \text{ м}\mu$	$\lambda = 550 \text{ м}\mu$	$\lambda = 680 \text{ м}\mu$	$T_{\text{нв}} = 2360^\circ \text{ К}$
ГОИ № 390 К	—	0	-10,5	0
ГОИ № 1896	+0,4	+0,25	-15	-3
ГОИ № 1900	+0,5	+7,5	-8	+12,4
ЛЭТИ № 140	0	0	-7,5	0
ЛЭТИ № 159	+2,2	0	-3,6	0
ФАИ № 418	0	0	-3,6	-6
ФАИ № 799	0	0	-10	0
СВ № 89	0	0	-7,8	-3
СВ № 96	+2,2	+1,5	-4,5	-2
Вестон № 694 К	—	+1	-1	+2
Дреслер № 921 К	—	+0,7	-5	+4,5
Дреслер № 995 К	—	0	-8	+3
Тунгсрам S-44	+4	+0,5	-22,5	+2,5

аналогичную большинству кривых, полученных в ВЭИ. Для получения воспроизводимых результатов измерений он рекомендует пользоваться графиком, изображённым на рис. 8 и представляющем собой результат обработки серии зависимостей, аналогичных изображённым на рис. 7. По оси ординат отложено время наступления максимума фототока, по оси абсцисс — освещённость фотоэлемента. Работа, проведённая Престоном с фотоэлементами различных фирм, дала результаты, по отношению к которым данные Берброу являются частным случаем. Престон также наблюдал у отдельных фотоэлементов рост и спад тока.

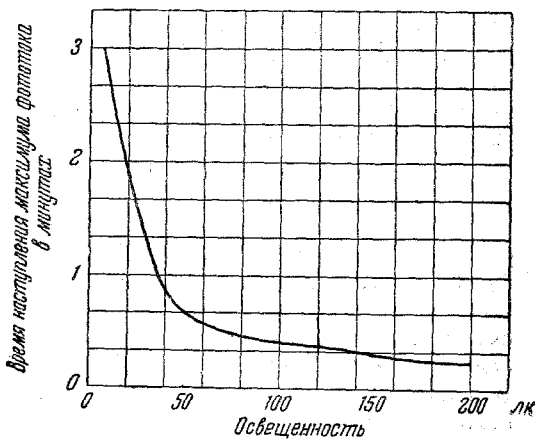


Рис. 8. Время наступления максимума фототока в зависимости от освещённости ($T_{\text{нв}} = 2360^\circ \text{ К}$).

Эльвегард²⁰ и Кноль⁹ производили исследование зависимости начальной нестабильности от длины волны падающего излучения. Эльвегард работал с фотоэлементами производства фирмы Цирольд

и САФ и получил результаты, близкие с полученными в ВЭИ. Расхождение существует лишь для случая освещения фотоэлементов монохроматическим синим светом, при котором Эльвегард наблюдал спад фототока. Кноль снял зависимость усталости и роста тока от длины волны по спектру и получил результаты, изображённые на

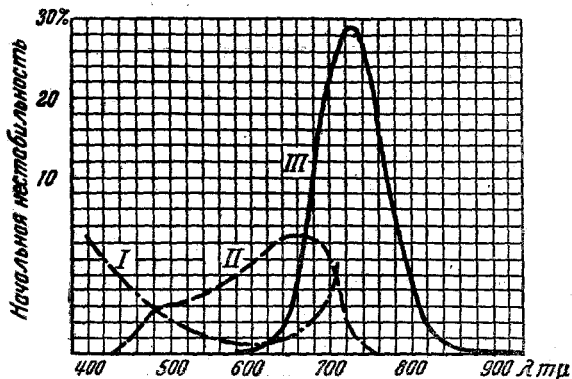


Рис. 9. Изменение начальной нестабильности по спектру: I — рост тока (Вестон); II — спад тока (Тунгерман); III — спад тока (САФ.)

рис. 9. Общий ход кривых усталости совпадает с данными ВЭИ и результатами Эльвегарда. В тех случаях, когда от фотоэлемента не требуется определённой спектральной чувствительности, для уменьшения начальной нестабильности следует уменьшать чувствительность в красной части спектра введением соответствующего светофильтра. При спектральных измерениях с фотоэлементами (особенно в красной части спектра) для уменьшения ошибки из-за начальной нестабильности нужно брать отсчёт по шкале гальванометра через фиксируемый промежуток времени с начала облучения. Практика показывает, что такая методика заметно повышает воспроизводимость результатов измерений.

5. СТАБИЛЬНОСТЬ ФОТОЭЛЕМЕНТОВ

Постоянство чувствительности селенового фотоэлемента зависит от метода его изготовления. Это является причиной противоречивости данных, относящихся к стабильности селеновых фотоэлементов разных фирм. Одной из основных причин изменения чувствительности считается изменение сопротивления запорного слоя^{5, 2, 21}. Однако если для фотоэлементов ГОИ Фрейверт указывает на спад чувствительности со временем, вызванный уменьшением сопротивления запорного слоя, то Бергманн, а также Пельц и Ланге сообщают о росте тока и повышении сопротивления запорного слоя в результате старения. Наиболее постоянными являются менее чувствительные фотоэлементы³ при условии малого сопротивления нагрузки. Так, из двух малочувствительных фотоэлементов САФ, освещавшихся ~150 часов при 6000 мк, короткозамкнутый обнаружил прекрасное постоянство, в то время как такой же фотоэлемент, замыкаемый на гальванометр, лишь во время измерений, показал к концу срока испытания спад чувствительности на 5%.

Высокочувствительные фотоэлементы САФ при тех же условиях дают спад тока в 20—40%. При меньших освещенностях (100 лк) эти фотоэлементы обладают высоким постоянством чувствительности. Фирма Вестон, имея в виду использование селеновых фотоэлементов для метеорологических измерений, изготовила по рецепту Бергманна фотоэлемент, отличающийся особо высоким постоянством²².

Этот фотоэлемент может быть выставлен под открытое небо на месяц без изменения чувствительности. Ход восстановления чувствительности селенового фотоэлемента после засветки при пребывании последнего в темноте изображен для примера на рис. 10. Полное восстановление чувствительности наблюдалось лишь через 10 часов⁹.

Резюмируя, можно сказать, что, выбрав фотоэлемент с невысокой чувствительностью и поставив его в измерительную схему, обеспечивающую малое сопротивление нагрузки, можно ожидать значительного постоянства чувствительности селенового фотоэлемента.

6. ИНЕРЦИОННОСТЬ

В первые секунды после включения освещения на фотоэлемент ток возрастает постепенно. Таким образом, инерционность селенового фотоэлемента легко заметна. Нарастание тока фотоэлемента после включения освещения изучали с помощью осциллографа Бергманн и Пельц⁹. Для отдельных фотоэлементов они наблюдали различие в инерционности, превышающее 100%. Характерный ход изменения тока представлен на рис. 11.

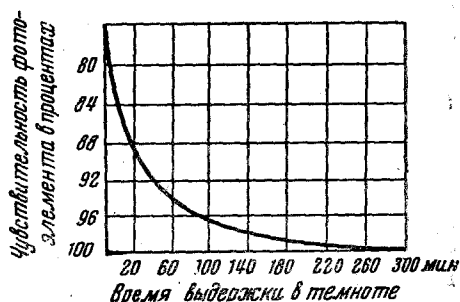


Рис. 10. Установление чувствительности фотоэлемента после засветки.

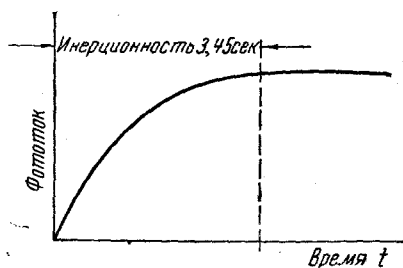


Рис. 11. Осциллограмма фототока после включения освещения.

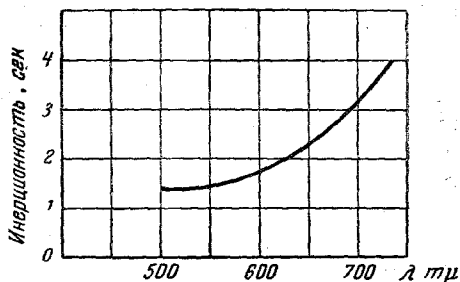


Рис. 12. Инерционность фотоэлемента при облучении монохроматическим излучением.

Инерционность фотоэлемента зависит от спектрального состава падающего на него излучения (рис. 12) и, как правило, тем больше, чем меньше освещённость. При очень малых освещённостях (порядка $0,01 \text{ лк}$) инерционность настолько возрастает²³, что фотоэлемент становится непригодным для измерительных целей.

7. ПРИМЕНИМОСТЬ ЗАКОНА ТАЛЬБОТА

Если селеновый фотоэлемент освещать прерывистым светом, то показания присоединённого к фотоэлементу гальванометра в первом приближении получаются такими же, как при постоянном освещении с той же эффективной освещённостью, что и прерывистая. Однако при более детальном рассмотрении можно поставить три вопроса:

1. С какой точностью отдельные фотоэлементы подчиняются закону Тальбота?

2. Зависят ли показания гальванометра от частоты вспышек и соотношения между продолжительностью тёмных и светлых частей периода?

3. Изменяется ли точность подчинения закону Тальбота с изменением спектрального состава вспышек?

Имеются данные^{2,24}, говорящие о том, что селеновые фотоэлементы*) подчиняются закону Тальбота с точностью примерно $\pm 1\%$ вплоть до частот в $200\text{—}300 \text{ гц}$. Однако и среди тех фотоэлементов, которые были испытаны, было обнаружено несколько штук, показавших достаточно большие отклонения (до $3,5\%$) от закона Тальбота. Эти отклонения были особенно заметны тогда, когда раскрытия секторного диска были малы. При этом также замечалась весьма определённая зависимость показаний гальванометра, присоединённого к фотоэлементу, от частоты. Так, например, один из фотоэлементов при изменении частоты от 20 гц до 300 гц дал рост фототока на 20% .

Было обнаружено²⁵, что отклонения от закона Тальбота тем меньше, чем меньше внешнее сопротивление цепи селенового фотоэлемента. Этот факт даёт возможность объяснить отклонения от закона Тальбота.

При использовании секторного диска действительная освещённость на фотоэлементе в течение «светлой» части периода больше, чем эквивалентная средняя освещённость. Таким образом, в течение «светлой» части периода фотоэлемент работает на иной точке характеристики «ток — освещённость», чем в случае непрерывного освещения. Отклонение этой характеристики от линейности может привести к отклонениям от закона Тальбота, особенно при секторных дисках с малым раскрытием.

*) В работе Престона² были проверены 5 фотоэлементов, изготовленных в NPL, а также фотоэлементы Вестон, Тунгсрам, САФ и Elektrocell, всего в количестве 13 штук.

При возрастании частоты начинает играть роль ёмкость фотоэлемента, составляющая десятые доли микрофарады.

Проведённая в ВЭИ проверка подчинения селеновых фотоэлементов закону Тальбота касалась как обнаружения зависимости фототока от частоты мельканий, так и соответствия фототока среднему значению прерывистой освещённости.

В интервале частот мельканий от 4 до 100 гц и в пределах «пропускания» вращающимся сектором от 10 до 50% падающего на него излучения для всех фотоэлементов наблюдалась независимость тока от частоты при освещении фотоэлементов белыми и цветными источниками света. Для проверки соответствия фототока среднему значению прерывистой освещённости были про-

Таблица III

Фотоэлемент	Отклонение от закона Тальбота в процентах
ГОИ № 390 1939 г. К*)	0
ГОИ № 1896 1947 г.	0
ГОИ № 1900 1947 г.	0
ЛЭТИ № 845	+2,4
Вестон № 594 К	-0,15
Дреслер № 921 К	-2,2
Дреслер № 995 К	-0,4
Тунгсрам S-44	+0,3

изведены фотоэлектрические измерения «пропускания» секторного диска с раскрытием, равным 30%. Результаты, сведены в табл. III, показывающей отклонение от истинной величины в процентах.

Интересно отметить, что точность подчинения фотоэлементов закону Тальбота может быть различна даже для одной и той же серии фотоэлементов.

8. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

Температурный коэффициент селеновых фотоэлементов различен для разных образцов как по величине, так и по знаку. Обычно^{8,26} фототок падает с ростом температуры, причём направление и скорость изменения зависят от освещённости и внешнего сопротивления.

Результаты измерений температурного коэффициента селеновых фотоэлементов, приводимые отдельными авторами, сильно отличаются друг от друга, что не позволяет усреднить эти данные.

Так, Ланге⁵ для области температур от -25° до $+35^{\circ}$ С даёт для фототока короткого замыкания зависимость $i = i_0 (1 + \alpha t)$, где $\alpha = \pm 0,0003$. Бергманн и Пельц³ для того же интервала температур дают $\alpha = +0,001$, а Пуцейко²⁶ между $+15^{\circ}$ и $+30^{\circ}$ С для фотоэлементов ГОИ даёт α изменяющимся от $\alpha = -0,006$ до $\alpha = -0,03$ и сообщает, что в ГОИ удалось получить фотоэлементы с почти нулевым температурным коэффициентом тока короткого замыкания.

Для фото-э. д. с. температурный коэффициент обычно в 2—3 раза больше, чем для фототока.

*) фотоэлементы со значком «К» имеют компенсационный фильтр.

«Гистерезисный» характер температурного влияния и зависимость температурного коэффициента от сопротивления внешней цепи хорошо видны на рис. 13.

Исследования Бернарда⁴ показали зависимость температурного коэффициента также и от спектрального состава света. По его дан-

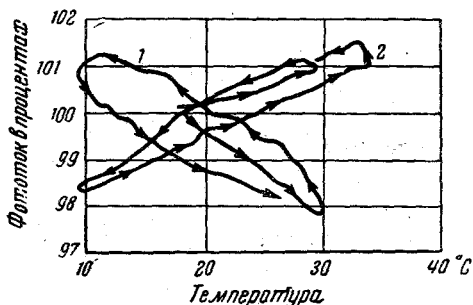


Рис. 13. Влияние внешнего сопротивления на зависимость тока от температуры: I — освещённость 400 лк, $R_{вн} = 1000$ ом; II — освещённость 400 лк, $R_{вн} = 0$.

ным чувствительность к различным цветам обладает следующими

Таблица IV

Цвет	Температурный коэффициент в процентах на 1° С
Красный . . .	+0,5
Оранжевый .	-0,4
Сине-зелёный	-0,6

температурными коэффициентами (табл. IV).

В лабораторных условиях, когда измерения эталонного и испытуемого источника обычно следуют непосредственно друг за другом, и температура остаётся примерно на постоянном уровне, влияние температуры незначительно. Но при проведении точных измерений температурные изменения в 1–2° С уже могут оказать существенное влияние, увеличивая ошибку на 1–1,5%.

Значительно большие ошибки могут получаться в тех случаях, когда фотометр с селеновым фотоэлементом, градуированный в лаборатории, применяется для производственных или полевых измерений, при колебаниях температуры, могущих достигать 20–30° С.

9. ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛЯРИЗОВАННОГО СВЕТА

При измерениях селеновыми фотоэлементами поляризованного света следует иметь в виду, что их показания сильно зависят от угла падения света и ориентации плоскости поляризации по отношению к плоскости падения излучения⁷.

10. ИЗМЕРЕНИЕ ОСВЕЩЁННОСТИ, СОЗДАВАЕМОЙ КОСЫМИ ПУЧКАМИ СВЕТА

Люксметры, в которых приёмником света является селеновый фотоэлемент, градуируются обычно с помощью эталонной лампы, нормально освещающей поверхность фотоэлемента. Применяются же эти люксметры зачастую для измерения освещённости, создаваемой косыми пучками или рассеянным светом*). Однако ток, даваемый фотоэлементом при косом падении света, уменьшается не пропорционально косинусу угла падения, что иной раз приводит к весьма значительным ошибкам. Отклонения от косинусной зависимости возникают по следующим причинам:

1. Корпус фотоэлемента экранирует пучок падающего на него света.
2. Френелевские отражения от прозрачных материалов, закрывающих светочувствительный слой (защитные стёкла и лаковые покрытия

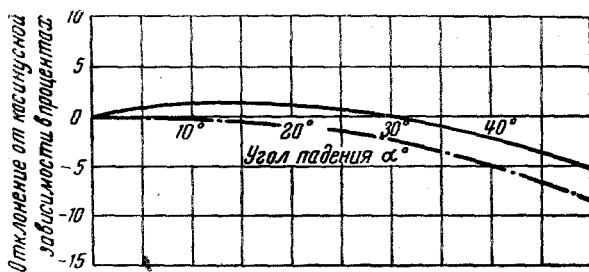


Рис. 14. Отклонения от косинусной зависимости для разных фотоэлементов при малых углах падения излучения.

тия, компенсационные фильтры), увеличиваются по мере увеличения угла падения света.

3. При косом падении свет, попадающий на светочувствительный слой, оказывается частично поляризованным.

При малых углах падения наблюдались как положительные²⁹, так и отрицательные² отклонения фототока от косинусной кривой (см. рис. 14). Для больших углов (рис. 15) наблюдается отрицательное отклонение, тем большее, чем больше угол падения.

Для уменьшения отклонения фототока при наклонном падении излучения от косинусной зависимости часто помещают перед фотоэлементом пластинку из диффузно пропускающего материала, в качестве которого обычно используется матированное глушёное стекло^{2,30}. Однако, как это показывают проведённые в ВЭИ измерения (см. рис. 15а), применение таких пластинок (испытания были произведены для матированного с одной и двух сторон стекла, а также для матированного глушёного стекла) не только не уменьшает отклонений от

*) Например, при измерениях уличного освещения или освещённости, создаваемой небом.

косинусной зависимости, но, наоборот, увеличивает их по сравнению с отклонениями, наблюдаемыми у фотоэлемента без дополнительных стёкол или даже с прозрачным защитным стеклом. Из рис. 15а видно, что, например, для угла падения света, равного 60° , отклонение от косинусной зависимости составляет для фотоэлемента без защитного стекла 7%, с прозрачным защитным стеклом 15%, с глушённым матированным стеклом 20% и с двусторонним матированным стеклом 35%.

Для приближения к косинусной зависимости применяются также разного рода приспособления^{28, 32}, которые при падении света под большими углами искусственно увеличивают попадающий на фото-

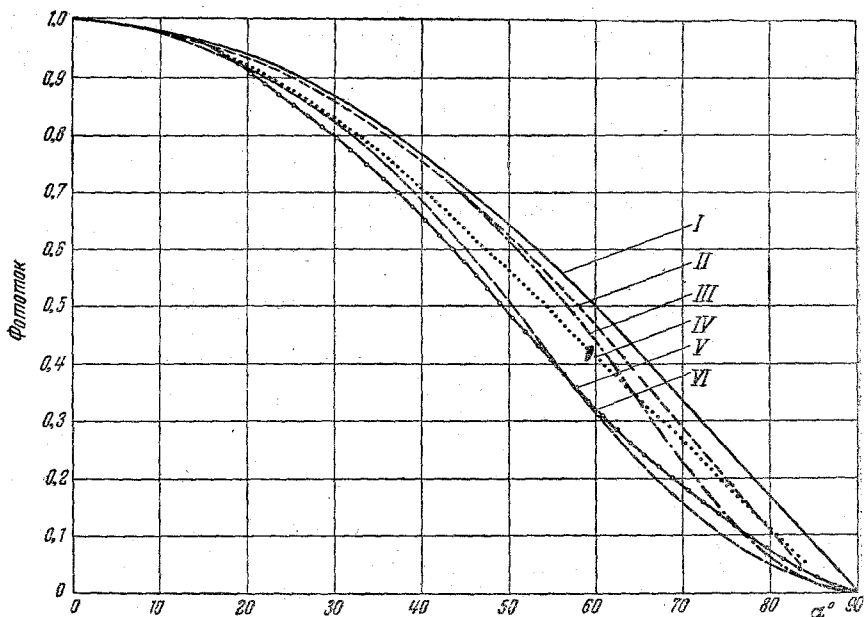


Рис. 15а. Зависимость тока фотоэлемента от угла освещения α : I — $\cos \alpha$; II — фотоэлемент без защитного стекла; III — фотоэлемент с прозрачным защитным стеклом; IV — фотоэлемент с глушённым матированным стеклом; V — фотоэлемент с двусторонне матированным стеклом; VI — фотоэлемент с матированным стеклом матировкой к осветителю.

элемент световой поток. Эти устройства сильно снижают чувствительность и в практической фотометрии не привились.

Для фотоэлементов с компенсационным фильтром зависимость тока от угла падения света в значительной степени определяется спектральным составом падающего излучения. Влияние спектрального состава излучения объясняется тем, что при наклонном падении света возрастает путь луча через светофильтр, что эквивалентно возра-

станции оптической плотности последнего. Чем больше плотность фильтра для некоторой длины волны излучения, тем заметнее вызванное наклонным падением света уменьшение спектрального пропускания для этой длины волны. Отсюда следует, что отклонение от кривой $\cos \alpha$ для фотоэлемента с компенсационным фильтром будет большим для синей и красной областей спектра, где оптическая плотность компенсационного фильтра больше, и меньшим для зелёной части спектра.

Эксперимент полностью подтверждает это предположение. Из рис. 156 видно, что для фотоэлемента с компенсационным фильтром

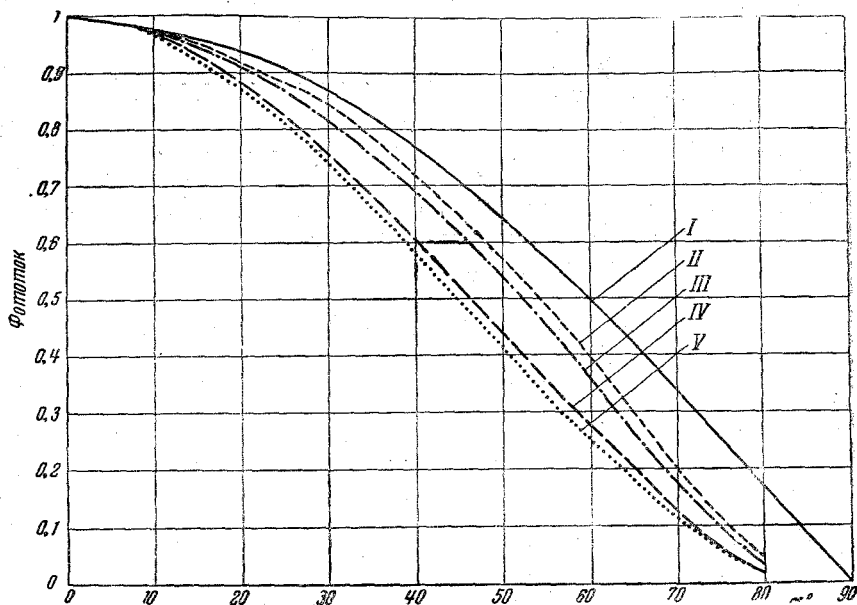


Рис. 156. Зависимость тока фотоэлемента от угла падения света для излучений разного спектрального состава: I — $\cos \alpha$; II — фотоэлемент с компенсационным фильтром при освещении зелёным светом; III — фотоэлемент с компенсационным фильтром для излучения с $T_{\text{пв}} = 2850^\circ \text{K}$; IV — фотоэлемент с компенсационным фильтром при освещении красным светом; V — фотоэлемент с компенсационным фильтром при освещении синим светом.

отклонение от $\cos \alpha$ для $\alpha = 60^\circ$ минимально для зелёного света и составляет 20%, для белого света отклонение равно 30%, для красного света оно возрастает до 45% и для синего это отклонение увеличивается до 50%.

Для измерений освещённости в полевых условиях недавно был предложен прибор следующей конструкции: 6 исправленных спектрально фотоэлементов для получения большей чувствительности соединены электрически и помещены в общую коробку, покрытую

пластинкой матированного плексигласа. Этот прибор, названный «мульти», даёт практически достаточное приближение к косинусу.

С целью примерного определения ошибки, получаемой при измерении рассеянного света разными фотоэлементами, был произведён расчёт для трёх фотоэлементов, кривые зависимости фототока которых от угла падения приведены на рис. 15а и 15б. Отклонения фототока этих приёмников в процентах от тока, даваемого в тех же условиях приёмником, подчиняющимся косинусному закону, определены для случая нахождения фотоэлемента в центре равной полусферы. Результаты расчёта сведены в табл. V.

Таблица V

Фотоэлемент	Ошибки в процентах
С защитным стеклом	-10
С матированным глушённым стеклом	-12
С компенсационным фильтром (для излучения с $T_{\text{цв}} = 2850^\circ \text{K}$)	-22

Данные таблицы V могут быть использованы в качестве поправок к результатам измерения с помощью фотоэлемента освещённости, создаваемой рассеянным светом.

11. СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ СЕЛЕНОВЫХ ФОТОЭЛЕМЕНТОВ

Как отмечалось выше, при уменьшении сопротивления внешней цепи селенового фотоэлемента происходит следующее:

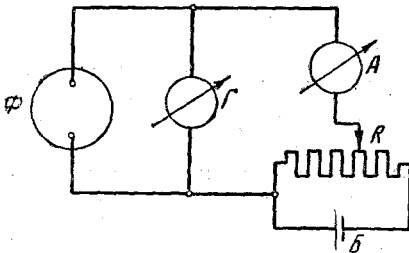


Рис. 16. Схема Кемпбелла-Фриза: Φ — фотоэлемент, Γ — гальванометр, A — микроамперметр, R — делитель напряжения, B — батарея.

1. В большинстве случаев улучшается линейность характеристики «ток — освещённость», во всяком случае, если не требуется точность выше 2—3%.

2. Уменьшается изменение спектральной чувствительности в зависимости от тока нагрузки.

3. Повышается точность измерений при использовании диска Тальбота.

4. Уменьшается влияние температуры на чувствительность.

5. Улучшается стабильность чувствительности при долгосрочном использовании фотоэлемента.

Всё это говорит о желательности применения таких измерительных схем, которые уменьшали бы сопротивление нагрузки фотоэлемента до минимального значения.

В большинстве таких схем падение напряжения на активном сопротивлении нагрузки компенсируется введением во внешнюю цепь

сопротивления нагрузки компенсируется введением во внешнюю цепь

фотоэлемента некоторой дополнительной э. д. с. К числу таких относится схема Кемпбелла и Фриза, изображённая на рис. 16.

Схема состоит из микроамперметра, включённого последовательно с фотоэлементом и делителем напряжения, и гальванометра Γ , подключённого непосредственно к клеммам фотоэлемента.

При работе вводимая разность потенциалов изменяется до тех пор, пока не получится нулевого отклонения гальванометра Γ . При этом режиме работы микроамперметр измеряет ток короткого замыкания фотоэлемента. С целью упрощения описанной схемы, требующей двух измерительных приборов, Вуд³³ предложил аналогичную схему (рис. 17) с одним гальванометром.

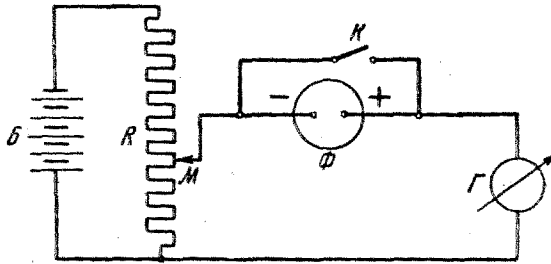


Рис. 17. Схема Вуда: Φ — фотоэлемент, Γ — гальванометр, R — делитель напряжения, M — скользящий контакт, K — ключ, B — батарея.

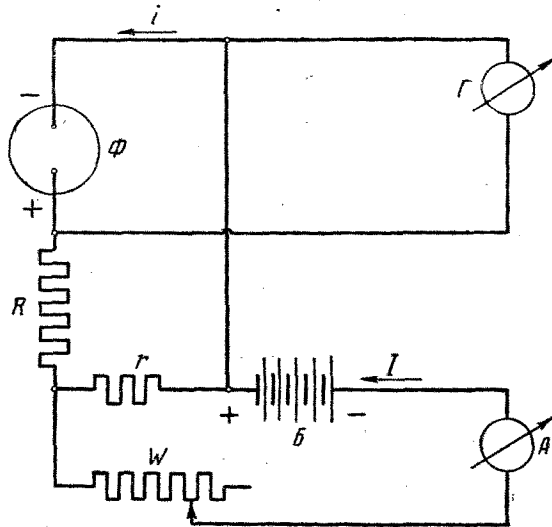


Рис. 18. Схема Фроммера: Φ — фотоэлемент, Γ — гальванометр, A — миллиамперметр, W — реостат, R , r — постоянные сопротивления, B — батарея.

Перемещая движок M , добиваются нулевой разности потенциалов на клеммах фотоэлемента. Это положение легко может быть найдено, ибо замыкание ключа K при этом не вызывает изменения тока через гальванометр.

Линейность характеристики «фототок — освещённость» и стабильность фототока при пользовании данной схемой оказываются весьма удовлетворительными.

Фроммером предложена ещё одна схема (рис. 18).

Сопротивление R берут приблизительно в 1000 раз бóльшим r . Изменяя реостатом W ток во вспомогательной цепи, добиваются

нулевого отклонения гальванометра G . При этом $iR = (I - i)r$, откуда

$$i = I \frac{r}{R + r}, \text{ или, так как } R \gg r,$$

$$i = I \frac{r}{R}. \text{ При отношении } \frac{R}{r}, \text{ дости-}$$

гающем тысячи, для измерения тока можно пользоваться прибором малой чувствительности. В ВЭИ, в лаборатор-

ной практике, когда имеется большой запас чувствительности, с успехом используется схема, изображённая на

рис. 19. Чем выше определяемая фотоэлементом освещённость, тем мень-

шим сопротивлением r можно пользоваться. Сопротивление R служит для

плавного изменения тока в цепи галь-

ванометра G , а также для того, чтобы малое сопротивление r не демпфировало гальванометр.

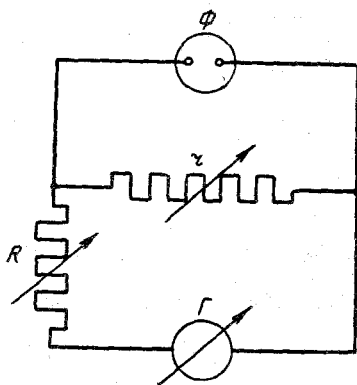


Рис. 19. Φ — фотоэлемент, G — гальванометр.

ванометра G , а также для того, чтобы малое сопротивление r не демпфировало гальванометр.

12. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вышеизложенное может породить мнение о малой пригодности селеновых фотоэлементов для более или менее точных измерений. Это мнение вряд ли можно считать справедливым, поскольку известно³⁴, что с помощью селеновых фотоэлементов можно получить точность фотометрических измерений до $\pm 0,1\%$. Однако для получения высоких точностей необходимо соблюдать ряд условий и предосторожностей, которые определяются как содержанием данной фотометрической задачи, так и индивидуальными свойствами применяемого для её решения фотоэлемента. Авторы надеются, что настоящая статья облегчит выявление тех особенностей фотоэлемента, которые могут снизить точность измерения, и поможет выбрать в отдельных случаях наиболее подходящие условия для производства различных фотометрических измерений.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. С. Ю. Лукьянов, Фотоэлементы, ИАН, М.—Л. (1948); П. Герлих, Фотоэлементы, Гостехиздат, М.—Л. (1948).
2. J. Preston, JIEE 79, 424 (1936).
3. L. Bergmann, R. Pelz, Zeits. techn. Phys. 18, 177 (1937); L. Bergmann, Phys. Zeits. 35, 450 (1934).

4. G. Barnard, Proc. Phys. Soc. **51**, 222 (1939).
 5. B. Lange, Zeits. Instrumentenkunde **53**, 344 (1933).
 6. R. Houston, A. Howatson. Phyl. Mag. **36**, 279 (1945).
 7. R. Sewig, ATM **67**, 62 (1937).
 8. DIN № 5038.
 9. O. Knoll, Licht **5**, 16 (1935).
 10. J. Atkinson, N. Campbell, E. Palmer a. G. Windr, Proc. Phys. Soc. **50**, 934 (1938).
 11. Е. Пуцейко, ЖТФ **8**, 645 (1938).
 12. G. Barnard, Proc. Phys. Soc. **47**, 477 (1935).
 13. Е. Пуцейко, ЖТФ **11**, 485 (1941).
 14. M. Fogle, Trans. Ill. Eng. Soc. **31**, 773 (1936).
 15. A. Dresler, Licht **3**, 41 (1933).
 16. J. Rieck Zeits. techn. Phys. **21**, 184 (1940).
 17. М. Капник, С. Юров, ЖТФ **18**, 573 (1948).
 18. H. Krefft, Licht **2**, 203 (1932).
 19. L. Barbrow, Journ. Res. NBS **25**, 703 (1940).
 20. E. Elvegard, S. Lindroth, E. Larsson, JOSA **28**, 33 (1938).
 21. С. Фрейверт, ЖТФ **6**, 1855 (1936).
 22. H. Poole, W. Atkins, Phil. Trans. Roy. Soc. **A235**, 1 (1935).
 23. H. Hamaker, W. Beezhold, Physica **1**, 119 (1933).
 24. P. Görlich, Zeits. techn. Phys. **14**, 144 (1933); W. Leo, C. Müller, Phys. Zeits. **36**, 113 (1935); B. Schönwald, Ann. d. Phys. **15**, 395 (1932).
 25. P. Gleason, Phys. Rev. **45**, 745 (1934).
 26. Е. Пуцейко, ЖТФ **7**, 10 (1937).
 27. L. Bergmann, Phys. Zeits. **33**, 17 (1932).
 28. R. Sewig, W. Vaillant, Licht **4**, 57 (1934).
 29. C. Dows, Ill. Eng. **37**, 103 (1942).
 30. Bloch, L. u. L. **20**, 179 (1931).
 31. K. Larché, Licht **12**, 90 (1942).
 32. N. Campbell, M. Freeth, Journ. Sc. Instr. **11**, 125 (1934).
 33. L. Wood, Rev. Sc. Instr., **7**, 157 (1934).
 34. H. König, Rev. Sc. Instr. HPA, **8**, 211, 505 (1935).
-