

ФОТОГРАФИЧЕСКАЯ ФОТОМЕТРИЯ*

Орнштейн-Молль-Бургер, Утрехт

1. ФОТОГРАФИЧЕСКИЕ ПЛАСТИНКИ

1. Почернение.

Важнейшие результаты спектрофотометрических измерений получены фотографическим методом. При этом методе фотографическая пластинка является частью измерительной аппаратуры, поэтому желательно дать хотя бы краткое описание ее основных свойств.

Фотографическая пластинка, освещенная и проявленная, обнаруживает почернение. Это почернение является следствием выделения серебра в светочувствительном слое и зависит от интенсивности действовавшего света, времени освещения, длины волны источника света и проявительного процесса. Тот факт, что при прочих равных условиях почернение есть функция интенсивности действующего света, является основой фотографической фотометрии. Мера „почернения“ определяется обычно следующим образом. Пусть свет от постоянного источника падает на обработанную фотографическую пластинку и I обозначает интенсивность света, прошедшего через почерненную часть пластинки, а I_0 — через непочерненную часть ее; за величину почернения принимают.

$$S = \lg I/I_0$$

Из формулы видно, что S может иметь значения от нуля до бесконечности. Выбранная таким образом величина пропорциональна коэффициенту абсорбции слоя серебра и позволяет вычислить

* Настоящая статья представляет перевод некоторых глав книги Ornstein-Moll-Burger „Objektive Spektralphotometrie“, Braunschweig 1932. В ней изложены по преимуществу методы, выработанные или испробованные в руководимой Орнштейном лаборатории Утрехтского университета, и мало затронуты иные приемы. Несмотря на это книга представляет большой практический интерес, ибо заслуги Орнштейна и его сотрудников в разработке методики фотографической фотометрии весьма значительны и ознакомление с опытом Утрехта будет, несомненно, очень полезным для лиц, работающих в данной области.

Статья составлена из перевода с незначительными сокращениями гл. III, V и VI с некоторыми добавлениями из других глав. Кроме того, примечания переводчика в двух-трех местах несколько дополняют оригинальный текст. Перевод Г. С. Ландсберга.

ceteris paribus количество выделившегося вещества в 1 см^2 поверхности; в соответствии с этим она более всего подходит для исследования существа фотографического процесса.

Иногда для характеристики количества выделившегося серебра вводят другую величину „пропускаемость“. Пропускаемость D определяется формулой:

$$D = I/I_0.$$

Принципиально можно пользоваться любой функцией I/I_0 . На практике при фотографическом методе измерения интенсивностей почернение и пропускаемость могут применяться с одинаковым успехом.

В случае сильно почерненной пластинки большой точности при графическом изображении можно достигнуть, пользуясь почернением (S). Из аналогичных соображений пропускаемость (D) следует предпочесть в случае слабо почерненной пластинки. Простоты ради, мы в дальнейшем нашем рассмотрении будем пользоваться только одной из упомянутых величин, выбрав в качестве таковой почернение.

Измерение „почернения“ покоится на определении отношения двух интенсивностей. Аппараты, с помощью которых производятся такие измерения, носят название микрофотометров; подробное их описание можно найти, например, в книге Ornstein-Moll-Burger „Objektive Spektralphotometrie“, Braunschweig 1932. В тех случаях, когда речь идет об измерениях интегрального почернения значительных участков фотографической пластинки, особенно при слабых почернениях, следует предпочесть компенсационный способ, выполняемый с помощью экстинкциометра¹. Для целей же фотографической спектральной фотометрии удовлетворяет всем условиям микрофотометр.

Отношение I/I_0 не является величиной, не зависящей от спектрального состава света, которым пользуются при измерениях. При некоторых исследованиях фотографического процесса, например при изучении величины зерен выделившегося серебра, эта зависимость играет известную роль. Но ее можно, однако, совершенно не принимать в расчет в тех случаях, когда почернение служит мерой света, воздействовавшего на фотографическую пластинку. Так, в микрофотометре Коха (фотоэлектрическом) при определении почернения пользуются светом более короткой длины волны, а в микрофотометре Мёлля (термоэлектрическом) — более длинными волнами. Оба аппарата дают следовательно, разные значения для одного и того же почернения. Однако это различие не будет иметь никакого значения при определении интенсивности источника, воздействовавшего на пластинку. Заметим, что для большинства пластинок указанное различие очень мало; все же следует иметь в виду, что изменение спектрального состава лампы микрофотометра может привести к некоторым ошибкам.

2. Почернение, как функция интенсивности

При заданных источнике и времени освещения почернение будет, *ceteris paribus*, зависеть от интенсивности i света, т. е. энергии, падающей за 1 сек. на единицу поверхности пластинки. Если изменить в одном и том же отношении энергию, излучаемую за 1 сек., и величину освещаемой поверхности, то на 1 см^2 придется то же количество энергии и, следовательно, равное количество выделившегося серебра и равное почернение. Это почти самоочевидное положение перестает, однако, быть верным для поверхности очень малых размеров. Мы вернемся еще к этому явлению, когда будем говорить о дефектах пластинки (стр. 931) и об измерении интенсивности внутри спектральной линии. Кроме того, мы ограничимся в дальнейшем простейшим случаем, когда

интенсивность i за время освещения остается постоянной. Влияние прерываний света мы рассмотрим позднее.

Характерная для пластинки связь между почернением и интенсивностью может быть установлена следующим образом: различные участки исследуемой пластинки освещаются так, что время экспозиции остается одинаковым, а интенсивности

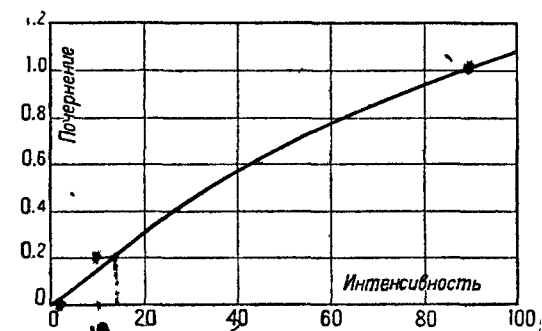


Рис. 1. Почернение как функция интенсивности (пластинка Ilford проявлена родиналом).

меняются в определенных количественных соотношениях. О методах, которыми достигается ослабление света в определенном отношении, мы скажем ниже. Почернение определяется с помощью микрофотометра или, при малых почернениях, посредством экстинкциометра. Таким образом получают ряд значений для интенсивностей и соответствующих им почернений, которые могут быть сопоставлены графически. Рис. 1 дает кривую, полученную таким образом для пластинки Ilford (Special Rapid, H. a. D. 400), проявленной в течение 8 мин. в 0,2%-ном гирамидо-фенолхлориде (родинал). Единица интенсивности выбрана произвольно. Как легко видеть из рисунка, кривая в большей части чрезмерно вогнута по отношению к оси интенсивностей.

Обычно принято связь между почернением и интенсивностью представлять графически в ином виде, а именно — почернение наносится в функции $\log i$, а не просто i . Подобные кривые мы будем называть „кривыми почернения“. Преимущество такого способа графического изображения заключается в том, что

при этом выбор единицы i не отражается на форме кривой, а дает лишь параллельное смещение ее вдоль оси абсцисс.

На рис. 2 изображена кривая почернения, соответствующая данным рис. 1. Для ничтожно малых интенсивностей почернение приближается к значению нуль (для $\log i = -\infty$, S асимптотически равно нулю). Кривая имеет точку перегиба, а ее кривизна вблизи этой точки мала. Для данной пластинки в интервале почернений от 0,5 до 1,5 (соответствующем отношению интенсивностей от 1 до 6) кривая в пределах ошибок, присущих всяким фотографическим измерениям, может считаться прямой. Само собою разумеется, что нет необходимости при измерениях ограничиваться только этой частью

кривой. Так как вид кривой почернения зависит от сорта пластинки, то представляется желательным иметь количественную характеристику сорта пластинки. Для установления таких характеристик можно воспользоваться прямолинейной частью кривой. Аналитически она может быть представлена в виде линейной зависимости между почернением и логарифмом интенсивности:

$$S = c + \gamma \log i.$$

Эта связь между почернением и интенсивностью известна как закон Штарка. Ее можно легко привести к следующему виду:

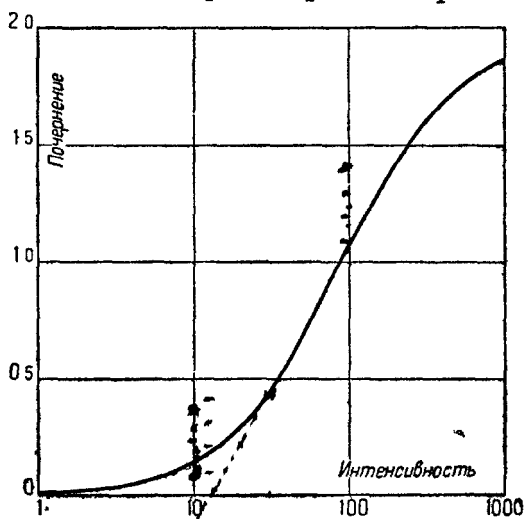


Рис. 2. Кривая почернения (кривая рис. 1, перечисленная на $\log$ интенсивности.

$$S = \gamma \cdot \log \frac{i}{i_0}.$$

Константы i_0 и γ имеют следующее значение. Величина i_0 определяется точкой пересечения прямолинейной части кривой с осью абсцисс и является мерой чувствительности пластинки. Наиболее употребительной мерой чувствительности является величина обратно пропорциональная i_0 (Хертер и Дрифелд, Шейнер). Величина γ определяет наклон прямолинейной части кривой почернения. Если γ для пластинки велико, то данное увеличение $\log i$ ведет к большому приращению S , чем в случае малого γ . Заданному относительному приращению i будет соответствовать тем большее приращение почернения, чем больше γ . Пластика с большим значением γ характеризуется,

следовательно, большей контрастностью, поэтому γ называют фактором контрастности пластинки. Следует отметить, что γ может быть определена из соотношения интенсивностей, тогда как для определения i_0 необходимо знание абсолютного значения интенсивностей.

Формула, дающая аналитическое выражение почернения в функции интенсивности, в практике фотографических измерений применения не имеет, она выведена нами для выяснения понятий чувствительности и фактора контрастности. Связь между интенсивностью и почернением приходится изучать для каждой отдельной фотографической пластинки. Мы подробно укажем далее (гл. 2 и 3), каким путем при помощи кривых почернения можно получить соотношения интенсивностей. λ

3. Почернение как функция времени освещения

По аналогии с другими фотохимическими процессами можно ожидать, что почернение есть функция энергии, падающей на единицу поверхности. Можно было бы на этом основании ждать применимость для этого случая закона Бунзена-Роско, который имел бы вид:

$$S = f(it),$$

где i — интенсивность, t — время освещения.

Если бы это действительно имело место, то исследование зависимости почернения от времени освещения не дало бы нам ничего нового. Однако Шварцшильд показал, что закон Бунзена-Роско в фотографии не применим. Он указал более сложную зависимость

$$S = f(it^p),$$

которая известна как закон Шварцшильда.

По Шварцшильду показатель p есть константа, не зависящая от i и t , характерная для свежочувствительного слоя данной пластинки. Комбинируя закон Шварца и Шварцшильда получаем:

$$S = \gamma \log \frac{it^p}{a}.$$

Согласно этой формуле фактор контрастности γ не зависит от времени освещения. Кривые почернения для разных времен освещения будут, следовательно, идти параллельно, т. е. параллельным смещением по направлению оси абсцисс их можно привести к совпадению.

Детальные измерения, выполненные по предложению Шварцшильда и охватывающие обширную область интенсивностей и времен освещения, обнаружили отступления от закона Шварцшильда. Однако упомянутая выше параллельность кривых почернения — свойство очень важное при измерениях интенсивно-

сти — может сохраниться и в том случае, когда почернение зависит от произведения i на какую-либо иную функцию t .

Измерения, поставленные для проверки этой параллельности, показали, что для хроматических пластинок Ilford при проявлении их родиналом, фактор контрастности γ остается постоянным при соотношении времени освещения 1:1000. Лишь при отношении 1:10 000 наблюдается некоторое отклонение от параллельности. При проявлении глицином уже при соотношении 1:10 имеется заметное отклонение от параллельности. Очень часто почернение пластинок производится при прерывном освещении. В этих случаях почернение зависит не только от интенсивности и времени освещения, но еще и от частоты прерывания света, т. е. от соотношения времени света и темноты. Эти исследования имеют значение для нашего вопроса, ибо они показывают, что наклоны кривых почернения, полученные со сплошным и прерывным освещением, могут сильно отличаться друг от друга. Это всегда приходится иметь в виду при работе с изменяющимся во времени источником света.

4. Почернение как функция длины волны

Чтобы получить кривые почернения для света разной длины волны, можно пользоваться методом, описанным на стр. 923, видоизменив его так, чтобы на пластинке получились спектры разных интенсивностей, отношения которых известны. Измерив почернения для каждой из длин волн, построить затем соответствующие кривые почернения. Можно также подвергнуть сравнительно большие участки пластинки действию света приблизительно монохроматического, выделенного при помощи светофильтров или монохроматора. Как известно, почернение при одинаковых интенсивностях очень сильно зависит от длины волны. Чтобы изучить количественно эту зависимость можно применить источник света с известным спектральным распределением энергии (нормальная лампа, см. стр. 953). Измерения, произведенные подобным образом, показали, что кривые почернения для разных длин волн не параллельны. В качестве примера могут служить изображенные на рис. 3 три кривые почернения для длины волны 4700, 5200 и 7000 Å. Из рисунка видно, что наклон кривых для коротких длин волн меньше, чем для длинных.

При небольшой разнице в длинах волн изменением наклона кривой можно пренебречь. В этом случае можно говорить об „относительной спектральной чувствительности“, независимой от почернений, определив ее как величину, обратную энергии (измеренной в любых единицах), вызывающей одинаковые почернения. В то время как на рис. 3 энергия для разных длин волн измерена в разных единицах, в этом случае она должна быть выражена в одних и тех же единицах. На рис. 4 даны две такие

кривые почернения. Они относятся к длинам волн 4680 и 4811 Å и могут быть рассматриваемы как параллельные. Ясно видно, что пластинки чувствительнее к длине волны 4680, чем к 4811 Å. Для одной и той же интенсивности почернение в первом случае больше, чем во втором. Относительные чувствительности могут быть непосредственно отсчитаны по рисунку. Одинаковые почернения получают для интенсивностей, отношение которых равно 1:1,3. Это отношение не зависит от значения почернения, так как горизонтальное расстояние между кривыми (по оси абсцисс) всюду одинаково. Пользуясь совокупностью параллельных кривых, можно определить спектральную чувствительность как функцию длины волны. При большой

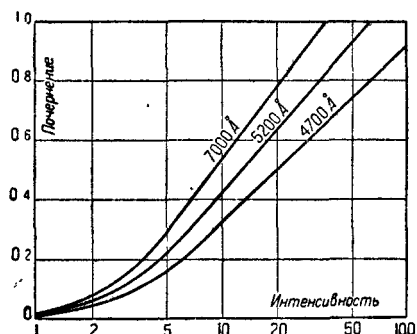


Рис. 3. Отклонение от параллельности кривых почернения для различных длин волн.

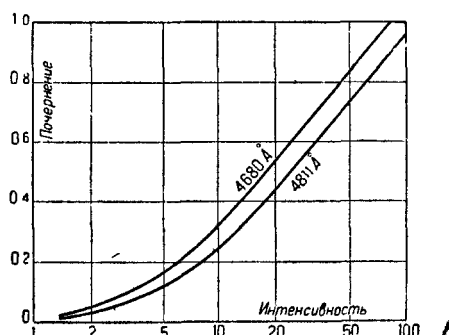


Рис. 4. Параллельные кривые почернения для определения относительной спектральной чувствительности.

разнице длин волн кривые почернения не параллельны и поэтому данное определение спектральной чувствительности теряет смысл.

Но и в этом случае можно аналогичным образом определить спектральную чувствительность; при этом она не будет больше независимой от почернения. На рис. 5 представлена кривая спектральной чувствительности панхроматической пластинки Iford для области от 3500—7000 Å, построенной для значения почернения 0,5. Из трех максимумов кривой — два, соответствуют большим длинам волн, падение же в сторону коротких длин волн объясняется абсорбцией света в желатине.

Из предыдущего ясно, что для такого большого интервала длин волн соответствующая кривая, построенная для другого почернения, будет заметно отличной.

Б. Проявитель

Почернение зависит, при прочих равных условиях, от сорта проявителя, концентрации его и также от температуры про-

живительной ванны. Все эти факторы влияют на контрастность γ , тогда как чувствительность пластинки (а, следовательно, и величина i_0 в выражении закона Шгарка) от них почти не зависят. При сильном проявлении, т. е. при удлинении времени проявления или при увеличении концентрации проявителя почернение растет, при этом для всех точек кривой почернения увеличение происходит в одинаковом отношении. В соответствии с этим абсолютное увеличение почернения оказывается сильнее всего в области наибольшего почернения.

Таким образом при сильном проявлении фактор контрастности возрастает. При достаточно длительном проявлении почернение достигает предела. Время, в течение которого практически достигается предел, тем меньше, чем концентрированнее проявитель и выше его температура.

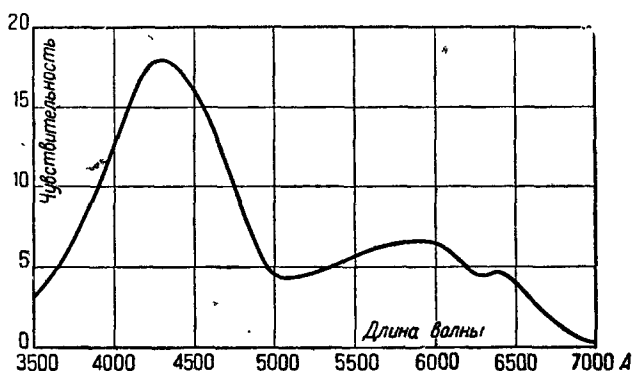


Рис. 5. Кривая чувствительности панхроматической пластинки Ilford для почернения 0,5.

Однако проявителем высокой концентрации пользоваться нельзя, так как при этом он действует неравномерно. Так родинал при разведении 1:5 дает на пластинку пятна, разведение же 1:20 дает очень равномерное почернение. Для фотографической фотометрии очень важным свойством проявления является величина обусловливаемого им фактора контрастности пластинки. В этом отношении разные сорта проявителя обнаруживают весьма значительное различие. Трудно получить большую контрастность, например с глицином, тогда как с параидофенолом (родинал) при подходящих концентрациях и времени проявления без труда получаются хорошие результаты. Для избежания вуали рационально прибавлять к проявителю бромистый калий.

Однако мы настоятельно рекомендуем при измерениях интенсивностей воздерживаться от его применения, так как он делает невозможным измерение малых интенсивностей. На рис. 6 показано действие КВг. Прибавление его изменяет соотношение

между потернением и интенсивностью таким образом, что кривая обнаруживает кажущийся порог. К счастью, в наших измерениях нет необходимости бороться с вуалированием пластинки (см. стр. 953).

6. Выбор пластинки

Само собою разумеется, что при выборе пластинки, предназначенной для измерения интенсивностей, в первую очередь следует иметь в виду длины волн применяемого света. Для интервала длин волн от 2500 до 4700 Å можно пользоваться обычными пластинками, от 4700 до 5700 Å пригодны ортохромати-

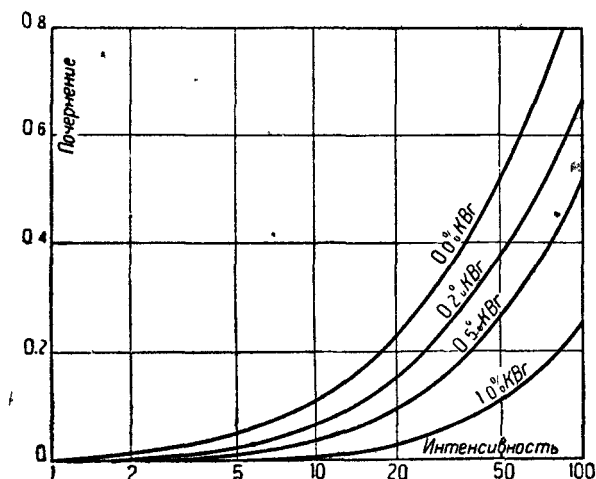


Рис. 6. Влияние бромистого калия на форму кривой почернения.

ческие, а для области 5700—7000 Å следует выбрать панхроматические пластинки. Имеются также пластинки, которые делаются чувствительными для ограниченных спектральных областей. Из них следует упомянуть пластинки, сенсibilизированные для зеленых, крайних красных и ультракрасных лучей (до 10 000 Å). Для крайнего ультрафиолета обычные пластинки непригодны вследствие поглощения ультрафиолетовых лучей в желатине. В этом случае или применяют специальные шумановские пластинки, в состав которых желатина не входит, или же сенсibilизируют обыкновенные пластинки слоем флюоресцирующего вещества. Для измерения интенсивностей, особенно при исследовании спектральных линий, шумановские пластинки мало пригодны вследствие их неравномерности. Поэтому мы рекомендуем сенсibilизацию. Для других спектральных областей, в которых не применимы обычные пластинки, можно поль-

зоваться продажными сенсibilизированными пластинками, которые настолько хороши, что нет необходимости самим заниматься сенсibilизацией.

Для рентгеновых лучей относительно большой длины волны пользуются обыкновенными пластинками, для длин волн в $1 \text{ \AA}$ существуют специальные пластинки.

Фотографические методы измерения интенсивностей особенно важны при изучении слабых источников света. Причина этого лежит в аккумуляции с его действия, отличающей фотографические процессы. Для очень слабых источников света необходимое время экспозиции может оказаться иногда чрезвычайно длинным. Чтобы по возможности сократить это время приходится выбирать наиболее чувствительные пластинки. Однако даже и с чувствительными пластинками при употреблении светосильных аппаратов иногда приходится делать многочасовые экспозиции. Очень чувствительные пластинки обладают, вообще говоря, тем недостатком, что чувствительность их неравномерно распределена по пластинке и что они легко вуалируются.

Как мы подробнее разъясним ниже (см. стр. 948), большие преимущества при измерениях представляют пластинки, фактор контрастности которых не зависит от времени освещения и мало меняется с длиной волны. Кроме того, может сказаться удобным, чтобы различие в факторе контрастности для прерывного и сплошного света было незначительно. На все эти обстоятельства следует обратить внимание при выборе пластинок.

7. Недостатки фотографической пластинки

Рассматривая кривую микрофотограммы какой-нибудь фотографической пластинки, мы замечаем, что она никогда не бывает вполне гладкой, а имеет зигзагообразный вид. Эти зигзаги могут быть двоякого происхождения. В первую очередь, они могут быть вызваны посторонними частицами, включенными в желатинный слой. В неосвещенной пластинке, после проявления и фиксирования ее, они ясно заметны при наблюдении в микроскоп. При микрофотометрировании такая пластинка обнаружит еще большие зигзаги, чем предварительно освещенная пластинка. Это объясняется тем, что выделяющееся при освещении серебро уменьшает отклонения гальванометра и эти вершины делаются менее заметными. Такая оптическая неоднородность желатины обычно тем больше, чем чувствительнее пластинка. Мало чувствительные пластинки, например диапозитивные, почти не обнаруживают указанного недостатка.

Вторая причина зигзагов заключается в выделении зерен серебра при проявлении в виде группок. В то время как единичные зерна серебра, образовавшиеся из кристаллика бромистого серебра, слишком малы, чтобы влиять на ход кривой

микрофотограммы, эти случайно или по каким-либо физико-химическим причинам образовавшиеся группки достаточно велики, чтобы вызвать зигзаги на регистрируемой кривой. И эта причина сказывается на чувствительных пластинках в большей степени, чем на мало чувствительных. Интенсивность, которая может быть замечена на пластинке, обусловлена не только ее чувствительностью, но зависит и от зигзагов кривой. Спектральная линия на микрофотографической кривой отмечается максимумом. Он будет тем меньше, чем слабее линия, и линия будет не обнаружима, если этот максимум меньше, чем средняя амплитуда зигзагов. При измерениях слабой линии следует иметь в виду, что выигрыш в чувствительности при выборе очень светочувствительной пластинки может быть совершенно уничтожен неточностью, вызванной увеличением зигзагов.

Интегрирование по высоте или ширине спектральной линии может уменьшить влияние зигзагов. При спектрах, бедных линиями, и при достаточной дисперсии интеграция по ширине выполняется автоматически, если щель микрофотометра сделана широкой.

Вторым недостатком пластинки является неравномерность ее чувствительности. Даже при совершенно однородном освещении и тщательном длительном проявлении пластинка показывает различие в почернениях, которые могут обусловить ошибки при измерениях интенсивности, достигающих многих процентов. Разные сорта пластинок обладают этим недостатком в разной степени. И в данном случае этот недостаток, в общем, более всего заметен в чувствительных пластинках. О влиянии проявителя мы уже говорили. Точность может быть повышена только многими измерениями, выполняемыми на разных местах пластинки. В связи с этим приходится упомянуть о свойстве пластинки давать больше почернения на краях, чем посередине, точно также и старые пластинки часто обнаруживают вуаль на краях.

Третьим недостатком пластинки является ее неспособность передавать большой градиент интенсивности. Если сильно осветить какой-нибудь резко ограниченный участок фотографической пластинки, то после проявления он будет иметь более или менее размытые края, соседние неосвещенные места оказываются „зараженными“ (эффект Эберггарда). Соответствующим выбором пластинки и проявителя этот эффект может быть значительно уменьшен. Часто для этой цели в качестве проявителя рекомендуют оксалат железа. Из обычных проявителей, по нашим данным, глицин очень плох, парааминофенол (родинал) действует гораздо лучше. Однако всегда следует опасаться указанного эффекта, особенно при фотографировании объектов с очень тонкой структурой, например линейного спектра, где ошибка проявляется в ограничении разрешающей способности пластинки.

Пластинки, предназначенные для микрофотометрирования, должны быть более тщательно обработаны, чем это делается обычно. Само собою разумеется, следует позаботиться о полном фиксировании и тщательном последующем промывании пластинки. Сушка должна быть равномерная, не очень быстрая для того, чтобы сохранить поверхность желатина плоской. Слой этот легко повредить и каждая царапина на нем при микрофотометрировании может быть причиной ошибок. Можно рекомендовать, поэтому, выкупать пластинку после фиксирования в растворе квасцов или формалине в целях упрочнения слоя. Конечно, и таким образом обработанную пластинку надо также сохранять от всяких повреждений; так, следует избегать пыли на пластинке, так как это ведет к ошибкам на кривой микрофотограммы. Для этого при сушке пластинку надо помещать в пространстве, лишенном пыли.

II. Фотографическая фотометрия при малой разнице длин волн

8. Принцип метода

Простейшая задача фотографической фотометрии состоит в сравнении интенсивностей света одинакового спектрального состава. Примером может служить определение интенсивности линии испускания при разных условиях или абсорбционные измерения. Методы, применяемые в этих случаях, вполне пригодны также и для спектральных линий, разность длин волн которых настолько мала, что они, практически, дают идентичные кривые почернения. Совпадение кривых почернения имеет место при сравнительно больших разностях в длине волны, так что существует целый ряд важных проблем, которые могут быть разрешены методами, описываемыми в настоящей главе. В первую очередь сюда относятся измерения интенсивности когерентного зеemanовского и штарковского расщепления и многих мультиплетов.

Связь между почернением пластинки и интенсивностью вызвавшего ее света зависит от очень большого числа факторов. Поэтому, по данным микрофотометра позволяющего судить о величине почернения, еще нельзя делать непосредственных заключений о соотношении интенсивностей. Но еще Гартманом было указано, что при одинаковом спектральном составе света и одинаковой экспозиции на одной и той же пластинке, при идентичных условиях проявления, равные почернения вызываются равными интенсивностями. Поэтому при помощи фотометрирования почернений можно однозначно заключить о равенстве интенсивностей. Это положение и составляет основу фотографической фотометрии. Для сравнения интенсивности двух линий, мало отличающихся по длине волны, следует более

сильную из них ослабить настолько, чтобы соответствующие почернения оказались при соблюдении условий Гартмана одинаковыми. Степень ослабления более сильной линии и будет измерять отношение интенсивностей сравниваемых линий. Измерения производятся таким образом, что на одной пластинке с одинаковой экспозицией снимают более слабую линию и более сильную, ослабленную в известном отношении. При этом, разумеется, не требуется достигнуть при помощи ослабления точного равенства почернений, а можно осуществить несколько ослаблений и, построив кривую почернений, применить графическую интерполяцию, т. е. отыскать ту точку, почернение в которой точно равно почернению более слабой линии. Абсцисса этой точки и позволит определить искомое отношение интенсивностей.

Конечно, можно было произвести вычисление аналитически, выразив кривую почернения формулой. Но так как константы такой формулы могут быть установлены лишь на основании вышеупомянутых измерений, то применение формулы не дает никакого упрощения, а так как точность аналитического метода в общем не большая, то следует предпочесть графико-эмпирический метод, как менее кропотливый.

Вместо того чтобы использовать сравниваемые линии для построения кривой почернения, иногда удобнее строить ее другим путем. На ту же пластинку, на которой снят линейный спектр, фотографируют с помощью вспомогательного источника света „марки почернения“, отношение интенсивностей которых известны. Вспомогательный источник света может обладать линейным или сплошным спектром, существенно лишь, чтобы длина волны марок почернения была близка к длине волны исследуемых линий.

9. Ослабление света

Мы займемся рассмотрением методов, позволяющих ослаблять свет в определенных количественных отношениях. Эти методы можно разделять на две группы. К первой группе относятся те из них, где сравниваемые почернения снимаются последовательно одно за другим, причем, конечно, должно быть обеспечено постоянство источника света (исследуемого или вспомогательного). Методы второй группы позволяют получить при помощи одного снимка различные почернения, при этом возможно применение источника света, изменяющего я во времени.

В этом параграфе мы опишем методы первой группы, при которых на одной и той же пластинке снимаются последовательно несколько спектров *. Перейдем к их рассмотрению.

* Если при фотографировании сплошного спектра нет уверенности в строго параллельном перемещении пластинки в спектрографе, то нужно на сплошной спектр нанести марки длины волны, пользуясь хорошо известными спектральными линиями.

1. Ослабление света абсорбцией или рассеянием. Для этой цели пользуются однородным слоем вещества, абсорбирующего или рассеивающего указанную длину волны. На практике чаще всего применяют нейтральные ослабители, т. е. слои, поглощение которых в слабой степени зависит от длины волны: почерненная фотографическая пластинка, тонкий металлический слой или дымчатое стекло.

Преимуществом фотографической пластинки в качестве ослабителя является то обстоятельство, что ее легко приготовить самому для всех желательных градаций почернения. Для этой цели экспонируют фотографическую пластинку (очень подходят диапозитивные пластинки), подбрав подходящую интенсивность и время освещения так, чтобы получить по всей ее поверхности однородное почернение. Удастся приготовить фотографические ослабители, пропускаемость которых в интервале длин волн от 10 000 до 3500 Å меняется лишь на несколько процентов.

Существенным недостатком фотографического ослабителя является то обстоятельство, что действие его основано частично на рассеянии света, вследствие чего пропускаемость зависит в некоторой степени от всей оптической установки. Поэтому желательно, чтобы градуировка его и дальнейшая работа с таким ослабителем производились по возможности в одинаковых условиях.

Тонкие металлические слои можно при помощи термического или катодного распыления изготовить любой толщины, т. е. любой пропускающей способности. Такие слои наносят на стеклянную или кварцевую пластинку, в зависимости от того, для какой области длин волн видимого или ультрафиолетового света они предназначены.

В металлических слоях свет ослабляется абсорбцией и отражением и их пропускаемость, следовательно, не зависит от оптической установки. При выборе металла руководствуются требованиями прочности слоя, легкости изготовления и возможно малой селективности. Чаще всего применяется платина. Она легко может быть напылена слоем любой толщины на стеклянную или кварцевую пластинку, хорошо сохраняется на воздухе и мало селективна. Так как тонкие слои легко повредить механическим прикосновением, то нужно покрывать их второй пластинкой.

Дымчатые стекла имеются в продаже и преимущество их заключается в том, что они не портятся со временем. Обычные сорта таких стекол обладают, однако, весьма отчетливо выраженной селективностью, хотя на-глаз кажутся неокрашенными (серыми). Пропускаемость таких стекол наибольшая для больших и малых длин волн, для средней области между желтым и синим она дает несколько максимумов. Это обстоятельство делает их для наших целей мало пригодными. При выборе осла-

бителя следует обратить внимание на его селективность. Степень ослабления должна быть спектрально определена. Для этой цели можно принципиально воспользоваться любым методом измерения интенсивности. Определение ослабляющей способности заключается в сравнении двух интенсивностей — без ослабителя и с ослабителем. Такие измерения могут быть произведены при помощи термоэлемента или фотоэлемента, соединенного с монохроматором. Если градуировка производится для ультрафиолетовой области, то можно при отсутствии достаточно постоянного и сильного источника света обратиться к фотографическому способу измерения интенсивностей.

2. Ослабление света изменением тока. Вместо того чтобы ослабить свет, испущенный источником, можно влиять на интенсивность самого испускания. Для ламп с электрическим питанием это достигается путем уменьшения тока лампы. Предварительно необходимо исследовать связь между силой тока и интенсивностью испускаемого ею света для разных длин волн, ибо само собою разумеется, связь эта чрезвычайно зависит от длины волны. Подобную градуировку можно произвести различными способами.

Обратимся теперь к методам заведомо не селективным.

3. Ослабление света изменением расстояния от источника. При соблюдении некоторых предосторожностей интенсивность света убывает обратно пропорционально квадрату расстояния. Применение этого закона предполагает, во-первых, что минимальное расстояние до источника значительно больше (по крайней мере в 10 раз) размеров источника, во-вторых, при этом необходимо полностью освободиться от света, рассеиваемого окружающими предметами; в-третьих, при любом расстоянии падающий на щель спектрографа свет должен одинаковым образом ее покрыть. Последнее условие трудно выполнимо, если размеры источника малы по сравнению с величиной щели.

Лучше всего менять расстояние источника от неподвижно установленной небольшой диффузно рассеивающей поверхности, которая и будет служить для освещения щели спектрографа. Так как этот метод связан с большой потерей света, то для его осуществления требуется интенсивный источник света. У нас мало опыта в применении этого метода, он кажется нам особенно многообещающим для короткой ультрафиолетовой области².

4. Ослабление света диафрагмированием. Можно ослабить в известном отношении свет диафрагмированием пучка в подходящем месте, например у линзы, проектирующей источник на щель спектрографа. Если вся линза равномерно освещена, можно по размерам диафрагмы прямо определить степень ослабления света. На практике бывает трудно добиться равномерности освещения линзы, поэтому с успехом применяют следующую

установку. Непосредственно впереди (или позади) фокусирующей линзы помещают вращающийся сектор, центр которого лежит приблизительно на оптической оси системы. Вращение сектора исправляет неровности освещения и изменением угла сектора достигают любой степени ослабления. Скорость вращения должна быть достаточно велика, так чтобы за время освещения сектор успевал сделать много оборотов. Так как в данном случае речь идет лишь о малых неравномерностях освещения — эффект колебания интенсивности дает лишь ошибку второго порядка. Для ослабления света можно также применять металлическую сетку. Ее следует помещать таким образом, чтобы на фотографической пластинке не получалось ее изображения. Лучше всего расположить ее за фокусирующей линзой. Чтобы избежать отражений и дифракций от волосков сетки, следует сетку тщательно почернить и выбрать с таким расчетом, чтобы ячейки были не слишком малы. Пропускаемость сетки довольно трудно вычислить из ее геометрических размеров, ее следует экспериментально проградуйровать.

5. Ослабление света изменением ширины щели. Другим заслуживающим внимание методом ослабления света, который можно применить лишь в случае сплошного спектра, является изменение ширины щели спектрографа. Если щель равномерно освещена по всей ширине, то интенсивность сплошного спектра прямо пропорциональна ширине щели. Правда, при этом на каждом участке фотографической пластинки налагается свет нескольких длин волн, но так как чувствительность пластинки в таком малом спектральном интервале остается постоянной, то результат действия света будет таков, как будто свет оставался строго монохроматичен.

В большинстве спектрографов винт, раздвигающий щечки щели, настолько точен, что по его отсчету можно прямо определить ширину щели. При этом следует точно установить деление, при котором щель еще закрыта. В случае необходимости можно проградуйровать деления винта. При этом предпочтительно работать не с очень узкой щелью, так как при этом неточность в нулевом отчете дает относительно большую ошибку в измерении интенсивности. Кроме того, благодаря дифракции часть света не попадает на коллиматорную линзу и интенсивность будет меньше, чем это следовало ожидать по отсчету ширины щели. Максимальная ширина щели задается, с одной стороны, указанным нами выше явлением наложения цветов, с другой, — трудностью добиться совершенно равномерного освещения щели при большой ее ширине. Несимметричность щели вносит систематическую ошибку. Само собою разумеется, что все, сделанные по этому методу, снимки должны быть произведены с равной экспозицией. Чтобы устранить ошибку, вызванную неточностью времени экспозиции, его следует выбрать не слишком коротким, т. е. освещение не должно быть очень интенсивным.

6. Ослабление света с помощью николя. Пропуская свет последовательно через два николя можно поворотом одного из них добиться любого ослабления света и, зная положения николей, точно его вычислить. Основным недостатком этого метода является присутствие фальшивого света. Для хорошей установки интенсивность такого света, проходящего при скрещенных николях, конечно, очень мала по сравнению с интенсивностью, пропускаемой параллельно стоящими николями, но при большом ослаблении оно может вызвать весьма заметную ошибку. Необходимо иметь в виду, что при обычных размерах николей этот метод ослабления весьма мало светосилен. Кроме того, он не вполне удовлетворяет требованию нейтральности, ибо нередко система николей обнаруживает поглощение в крайнем фиолете и ультрафиолете вследствие легкой окраски исландского шпата и слоя канадского бальзама.

7. Ослабление при помощи вращающегося сектора. Для фотометрических целей иногда применяют вращающийся сектор, расположенный в отличие от упомянутого в п. 4 так, что он то открывает, то закрывает полностью путь световому потоку. При таком расположении сектор по существу изменяет время экспозиции, а не интенсивность светового пучка. Даже при очень большой скорости вращения для оценки его действия необходимо учитывать эффект прерывания, что вносит большие осложнения. Поэтому надо категорически отказаться от применения вращающегося сектора в указанном расположении.

Точно так же метод изменения продолжительности экспозиции, которым иногда пользуются в фотографической фотометрии (см. например, В. Анри³), не может быть рекомендован, ибо для его применения необходимо исследование коэффициента rb законе Шварцшильда, а это по существу требует дополнительного нанесения марок интенсивности.

10. Одновременное ослабление (ступенчатое ослабление)

При пользовании источником света, меняющимся с течением времени, все перечисленные в предыдущем параграфе методы неприменимы, так как они предполагают ряд снимков, сделанных последовательно во времени. При меняющемся источнике необходимо всю совокупность спектров разной интенсивности снимать одновременно. Подобный метод, кроме того, дает большую экономию во времени, так как позволяет ограничиться вместо ряда снимков одним единственным. Для осуществления этого метода служат специальные приемы „ступенчатого ослабления“, описываемые ниже.

1. Ступенчатое ослабление света абсорбцией или рассеянием. Для изготовления ступенчатого ослабителя требуется приготовить целую серию светоослабляющих нейтраль-

ных фильтров разных градаций (фотографическую пластинку, тонкий металлический слой или дымчатое стекло, см. стр. 934) и расположить их одно над другим, как указано на рис. 7. Порядок их расположения может быть произвольным, что позволяет избежать систематической ошибки, которая могла вызывать неоднородность в освещении ослабителя. Для того чтобы иметь возможность убедиться, не имеет ли место такая неоднородность, рационально сделать по крайней мере две ступеньки ослабителя одинаковыми. Так, на рис. 7 верхняя и нижняя ступеньки соответствуют минимальному ослаблению.

Изготовленный таким путем ослабитель следует затем проградировать экспериментально. Указанный ослабитель можно применять различными способами.

а) Непосредственное наложение ослабителя на экспонируемую фотографическую пластинку. В случае, когда измерение производится для большого интервала длины волны, т. е. спектр на пластинке занимает довольно большое протяжение, ступенчатый ослабитель при таком расположении должен быть больших размеров. Изготовление подобного ослабителя сопряжено со значи-

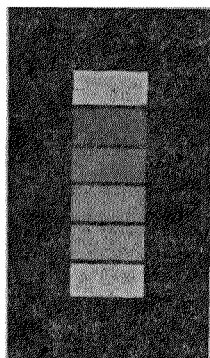


Рис. 7. Ступенчатый ослабитель.

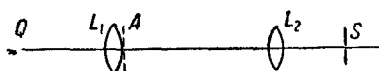


Рис. 8. Схема установки со ступенчатым ослабителем, расположенным позади линзы.

тельными трудностями, так что подобное расположение нельзя рекомендовать.

б) Расположение ступенчатого ослабителя непосредственно перед щелью спектрографа. Так как высота щели спектрографа обычно не велика, то при таком способе было бы очень трудно осуществить ослабитель с достаточным числом ступенек. Мы никогда не применяли такого в принципе простого расположения, отдавая всегда предпочтение методу „с“, введенному ван-Читтертом.

с) Расположение ступенчатого ослабителя в комбинации со вспомогательной линзой. Это расположение схематически изображено на рис. 8. Источник света Q равномерно освещает линзу L_1 . Ослабитель помещается сзади линзы и посредством линзы L_2 проектируется на щель спектрографа S . Линза L_1 сводит пучок настолько, чтобы он полностью попадал на линзу L_2 . Спектральные линии на фотографической пластинке являются изображением щели и если в спектральном аппарате изображение астигматическое, то каждая линия будет представлять ряд резко ограниченных участков разного почернения, соответствующи-

ших ступеням ослабителя. Для того чтобы отношения интенсивностей отдельных участков сфотографированных линий действительно отвечали заданным градициям ослабителя, необходимо, чтобы в отсутствии ослабителя линии по всей длине обнаруживали бы одинаковое почернение. Для этого необходимо, чтобы свет, вступающий в спектограф, для всех точек щели был задифрагмирован в одинаковой степени или совсем не задифрагмирован.

Следует тщательно испытать, отвечает ли наша оптическая установка указанному требованию. Для этой цели лучше всего произвести фотометрирование вдоль спектральной линии, заснятой с широкой щелью. Необходимым, но недостаточным контролем, является проверка равенства освещения, даваемого одинаковыми ступенями ослабителя. Линза L_1 должна быть очень хорошо очищена и не иметь царапин, ибо всякая неравномерность на ее поверхности ведет к неконтролируемому уменьшению ее пропускания. Если линза ахроматична, то следует иметь в виду, что вследствие отражения между составляющими ее частями может возникнуть интерференция, которая дает на спектральной линии ряд светлых и темных участков, что может быть причиной грубых ошибок. Явление интерференции может иметь место в самом ослабителе, если он заклеен снаружи стеклом. Этот прекрасный метод, к сожалению, обладает существенным недостатком, состоящим в малой светосиле его. В самом деле, на щель спектрографа проектируется линза L_1 и из этого кругообразного светового пятна щель вырезает лишь незначительную долю. Светосила может быть значительно выше, если бы можно было отобразить на щель источник света небольшого размера. Однако в нашем методе это не применимо. Если источник света значительных размеров, то указанный недостаток сказывается не так значительно. Точно так же в случае небольшого подвижного источника (например искры) установка в смысле светосилы достаточно рациональна; действительно, несмотря на движение источника световой поток, прошедший через линзу L , легко может оставаться в пределах, ограниченных линзой L_1 , так что средняя интенсивность, приходящаяся на щель, остается постоянной; в случае же прямого отображения источника на щель, свет от подвижного источника то попадает на щель, то выходит за ее пределы.

Вместо ступенчатого ослабителя раньше нередко пользовались ослабителем в виде клина. Измеряя длину спектральных линий, полученных при фотографировании с таким клином, можно получить оценку интенсивности линии, ибо чем интенсивнее линия, тем длиннее наблюдаемое на пластинке изображение. Для точных количественных измерений этот метод, однако, мало пригоден*.

* Впрочем, Шайбе полагает, что подобная оценка по длине изображения линии может быть довольно надежна. В методе Шайбе клинообразный ослабитель заменен вращающимся сектором с логарифмическим вырезом, так что различные участки щели подвергаются экспозиции разной длительности, что такж

Методы „b“ и „с“ применимы только при работе со спектрографом, дающим стигматическое изображение, ибо в основе их лежит предположение, что каждая точка щели изображается соответствующей точкой на пластинке.

д) Установка с роуландовской решеткой.

Для астигматической роуландовской установки с вогнутой решеткой Фрерикс разработал метод, позволяющий с помощью ступенчатого ослабителя фотографировать спектральные линии с определенными соотношениями интенсивностей. Схема метода изображена на рис. 9. На роуландовском круге помещается решетка G , S — щель, P — фотографическая пластинка. Каждая точка щели S изображается на пластинке в виде вертикальной прямой. Поэтому горизонтальные ступени ослабителя, находящегося или спроектированного в S , не могут дать на пластинке резкого изображения. Но, как известно, точка B пересечения прямой GS и касательной к кругу в точке P обладает свойством отображаться на пластинке в виде горизонтальной прямой. Итак, если поместить горизонтальный ступенчатый ослабитель в точке B , то сфотографированные линии будут обладать резкой ступенчатой структурой. Совершенно так же как и в методе „с“ нет необходимости помещать ослабитель непосредственно у щели аппарата, так и в данном случае ослабитель не должен находиться в точке B . Можно и здесь воспользоваться системой вспомогательных линз. Линза L , фокусирует свет источника Q на линзу L_2 , которая проектирует ослабитель, расположенный в точке A , в точку B . И в данном случае следует принять все предосторожности, о которых уже упоминалось выше. В подобной установке Фрерикс вместо поглощающего или рассеивающего ослабителя употребил ослабитель в виде диафрагмы, изображенной на рис. 10. Белые места представляют отверстия в непрозрачной пластинке. Общая площадь отверстий относится как 1:2:3:4:5. Благодаря астигматизму ступени ослабителя дают равные по величине изображения, так что „пропускаемость“ каждой ступени ослабителя окажется пропорциональной его площади. Каждая спектральная линия разделится на пять резко ограниченных участков, интенсивности которых относятся как 1:2:3:4:5.

Большое преимущество такого ослабителя заключается в том, что его пропускная способность совершенно не зависит от длины волны и что она легко может быть вычислена из геометрических

ведет к получению изображений с постепенно уменьшающимся почернением. По утверждению Шайбе длина изображения может быть определена надежно с ошибкой, не превышающей 0,2 м.м., что ведет к довольно точному определению интенсивности. Очевидно, результаты зависят от градиента спадания почернения. Кроме того, для подобных измерений требуются очень хорошие (в смысле однородности светочувствительного слоя) фотографические пластинки. *Прим. перев.*

размеров отверстий. Таким образом оптическая градуировка для него становится излишней.

2. Ступенчатое ослабление при помощи диафрагмирования. Этот метод характеризуется тем же преимуществом независимости пропускаемости от длины волны.

а) Ступенчатая щель. Для одновременного ступенчатого ослабления сплошного спектра может быть применена щель, ширина которой меняется ступеньками в определенных соотношениях вдоль ее длины. Во избежание систематической ошибки, вследствие неоднородности пластинки и неравномерности освещения щели, участки щели разной ширины располагаются произвольно. Рационально сделать верхнюю и нижнюю ступеньки одинаковой максимальной ширины. При равномерном освещении такой щели получаем совокупность сплошных спектров, интенсивности которых пропорциональны ширине соответствующей ступеньки (см. стр. 936), и в этом случае диафрагмирование света,

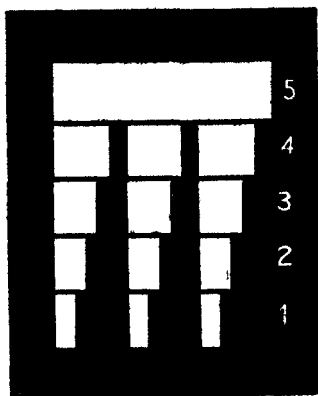


Рис. 10. Ступенчатый ослабитель по Фрериксу, применявшийся в роуландовской установке.

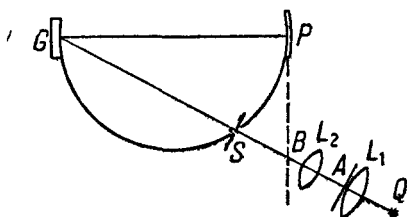


Рис. 9. Схема расположения ступенчатого ослабителя в роуландовской установке по Фрериксу.

идущего от разных частей щели, в спектрографе должно быть одинаковым. При сравнении спектров верхний и нижний участки должны дать одинаковое почернение, что может служить контролем правильности установки. Удобная форма ступенчатой щели была предложена Элио¹.

Ступенчатое ослабление сплошного спектра находит себе практическое применение при сравнении интенсивности по методу нанесения марок почернения при помощи вспомогательного источника. Для интервала длин волн, где таким источником крайне постоянным может служить лампа накаливания, удобнее применить метод последовательных снимков с изменяющейся шириной щели, чем пользоваться ступенчатой щелью. И только для длин волн меньше $2400 \text{ \AA}$, область, где интенсивность лампы накаливания мала и в качестве источника света применяется дуга, приходится работать со ступенчатой щелью, так как горение дуги весьма непостоянно.

б) Метод диафрагмирования по Гансену². Гансен предложил метод диафрагмирования, пригодный и для линейных спектров. Диафрагма, сходная со ступенчатой щелью, с помощью оптической системы, заключающей в себе цилиндрическую линзу, проектируется на фотографическую пластинку, так что границы ступеней резки, а интенсивность линий пропорциональна ширине щели. Линии, даваемые по этому методу, сходны с линиями, получающимися по методу „а“ (стр. 938). При работе по этому методу надо иметь в виду те же меры предосторожности, касающиеся диафрагмирования пучков в спектрографе, о которых неоднократно упоминалось выше.

3. Надо упомянуть еще об одном методе ступенчатого ослабления линейных спектров, идея которого принадлежит Шварцшильду, о котором сообщает Герцшпрунг. На фотографическую пластинку отбрасывают монохроматические изображения тени непрозрачного объекта, так чтобы распределение интенсивности легко можно было вычислить из геометрических условий установки. В качестве такого экранирующего объекта может служить проволока подходящей толщины.

11. Измерение интенсивности без применения вспомогательного источника света

Вернемся к основной теме настоящей главы об измерениях интенсивностей при малой разнице в длинах волн. В качестве примера рассмотрим измерения в линейном спектре. Та же схема применима и для близких участков сплошного спектра. Для того чтобы по почернениям сфотографированных линий сделать заключения об их интенсивностях, необходимо знать зависимость между почернением и интенсивностью, т. е. надо построить кривую почернения нашей пластинки для данных длин волн. Для этой цели, как уже указывалось в предыдущем параграфе, можно воспользоваться или самой исследуемой линией или же нанести марки почернения с помощью вспомогательного источника света. В этом параграфе мы подробно рассмотрим первый способ. На втором же способе мы остановимся в следующем параграфе. В качестве примера возьмем триплетную линию цинка с компонентами в 4680, 4722, 4811 Å и поставим себе целью определить соотношение интенсивностей этих компонент. На рис. 11 воспроизведен этот триплет цинка, причем каждая из линий разбита с помощью ступенчатого ослабителя на шесть участков разной интенсивности, находящихся в определенных количественных соотношениях. Отношение интенсивностей, идя по рисунку снизу вверх, соответственно равны 100 : 72 : 61 : 34 : 16 : 100. Как легко видеть по рисунку, линии на снимке достаточно широкие. Это достигнуто преднамеренным расширением щели с тем, чтобы по возможности скомпенсировать ошибку, вызываемую неоднородностью эмульсии пластинки (см. стр. 930). Пластинку за-

крепляют на столике микрофотометра в таком положении, чтобы линии были вертикальны и три нижние участка последовательно попадали в пучок лучей микрофотометра. Затем столик смещают вниз, переводят назад и фотометрируют соседние участки (72°) и т. д. Само собою разумеется, что нулевая линия также записывается каждый раз.

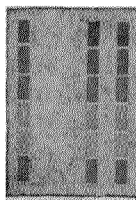


Рис. 11. Цинковый триплет 4680, 4722, 4811 Å, снятый со ступенчатым ослабителем.

Таким образом получают кривую микрофотограммы в том виде, как они изображены на рис. 12. Три линии 4680, 4722, 4811 Å шести-кратно регистрируются соответственно шести ступеням ослабителя. Так как линии широкие, то и максимумы достаточно широки, чтобы сгладить ошибку на случайные „пики“ кривой, связанные с неоднородностью эмульсии. Можно, например, пользуясь данными для наиболее интенсивной линии, построить кривую почернения и по максимальным почернениям остальных линий определить отношение их интенсивности. При таком способе мы воспользуемся лишь частью кривой микрофотометра; данные почернения ослабленных слабых линий останутся неиспользованными. Очевидно, точность измерений повысится, если привлечь эти данные.

Делается это следующим путем: на логарифмической бумаге наносятся кривые почернения трех линий таким образом, чтобы

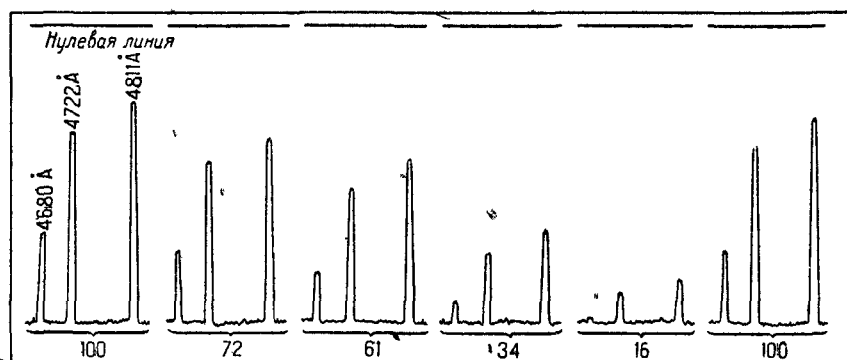


Рис. 12. Микрофотограмма цинкового триплета рис. 11.

абсциссы, соответствующие интенсивности 100 (72, 61, 32, 16), совпадали для всех линий. На рис. 13 даны эти графики. Из практических соображений на рисунке не отмечены логарифмические деления бумаги и точки, соответствующие промерам пластинки. При малой разности в длине кривые почернения практически параллельны, т. е. расстояния между кривыми по горизонтали вдоль всей их длины равны.

Эти расстояния, отсчитанные по шкале $\log i$, дают непосред-

инно искомые отношения интенсивностей. Вследствие случайных ошибок экспериментально полученные кривые могут дать отклонение от параллельности. В таких случаях следует пользоваться средним значением расстояний. Если же расстояние только меняется от верхней к нижней части кривой, то измерения вследствие этой систематической ошибки становятся ненадежными и снимок следует забраковать.

Большое преимущество этого графического метода заключается в двукратном сглаживании ошибок при определении интенсивности, во-первых, при построении кривых почернения (ведение плавных кривых по точкам), во-вторых, при усреднении результатов измерений расстояния между кривыми. Отклонения от полученного в этом двойном выравнивании среднего значения и характеризуют достигнутую точность метода.

Время экспозиции следует брать таким, чтобы область плавных, для которой выполняются промеры расстояний, соответствовала почернениям, обычным для хороших измерений микрофотометром. На рис. 13 расстояния между плавными почернения для надежности обозначены буквами p и q , под графиком они лишь нанесены от 100 влево, что можно непосредственно видеть по отношению интенсивности по их левому краю. Для трех линий 4680, 4722,

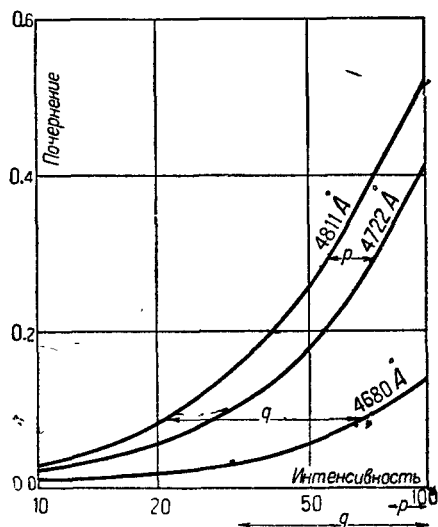


Рис. 13. Кривые почернения цинкового триплета рис. 12. Расстояния p и q дают отношения интенсивностей.

и 4811 Å мы находим эти отношения соответственно равными 71:100.

Мы выбрали в качестве примера три линии, разность длин которых не очень мала, так что чувствительности пластинки в интервале трех длин волны заметно различны. Если бы, например, мы делали измерения для компонент зеемановского расщепления, то введение поправки к полученным цифрам было излишним. Для нашего же случая полученные результаты нельзя считать окончательными и в следующей главе мы на этом примере укажем, как учесть селективность фотографической пластинки. В тех случаях, когда отношение интенсивностей сравниваемых линий очень велико, ступенчатый ослабитель не может удовлетворять высоким требованиям. Если в рассматриваемом спектральном интервале имеется еще одна линия сред-

ней интенсивности, то полезно и ее включить в измерения. Искомое отношение интенсивностей вычислить делением отсчетов интенсивностей вспомогательной линии к исследуемому. Относительная ошибка при измерении интенсивности равна абсолютной ошибке в определении расстояния между кривыми почернения, а эта последняя тем больше, чем больше указано расстояние.

Другая трудность возникает при сравнении интенсивности двух очень близких линий с налагающимися краями. В дальнейшем мы укажем, какой способ следует применить в таком случае.

Описанный метод может быть с успехом применен при решении разнообразных проблем, связанных с измерением интенсивностей. В такой же схеме можно вести определение и по ряду последовательных снимков. Так, при измерении интенсивностей сплошных спектров, например при абсорбционных измерениях, этот путь наиболее употребительный. Действительно, для осуществления абсорбционных измерений требуется постоянный источник света, который может быть использован и для градуировки пластинок, т. е. для получения одной или нескольких кривых почернения. Для нанесения марок в этом случае наиболее простым окажется метод изменения ширины щели. Если источник света достаточно постоянен, то метод последовательных снимков следует предпочесть и для измерений интенсивности линий, ибо при этом отпадает необходимость в однородном освещении щели спектрографа, всегда связанной с известными трудностями.

В случае непостоянства источника света приходится прибегать к ступенчатому ослабителю.

12. Измерение интенсивностей с помощью вспомогательного источника

Как уже было указано выше, связь между почернением и интенсивностью может быть изучена методом нанесения марок почернения с помощью вспомогательного источника света. Для этой цели снимают на одной пластинке при одинаковых экспозициях исследуемый спектр и ряд спектров определенных интенсивностей, служащих „марками“ почернения. Самый простой способ нанесения марок заключается в том, чтобы использовать постоянный источник света (сплошной спектр), меняя определенных количественных соотношениях ширину щели спектрографа. Постоянным источником может служить лампа накаливания, тщательно поддерживаемая при постоянном режиме. Для производства измерений в ультрафиолетовой области можно лампу снабдить кварцевым окошком и слегка ее перегреть, или использовать дугу. При применении дуги приходится прибегать к ступенчатому ослаблению с целью сократить общ

время работы дуги, в этом случае удобнее всего воспользоваться ступенчатой щелью.

Метод расширения щели не дает возможности широко варьировать интервал интенсивностей, так как слишком узкая и слишком широкая щель являются источником ошибок.

Существует, однако, такой простой прием, позволяющий расширить интервал интенсивностей. Именно, снимают два ряда марок почернения при разном накале лампы, т. е. при разной силе тока в ней. Таким образом получают две кривые почернения, при этом нижняя часть одной параллельна верхней части второй. Так как выбор единицы интенсивностей произволен, то обе

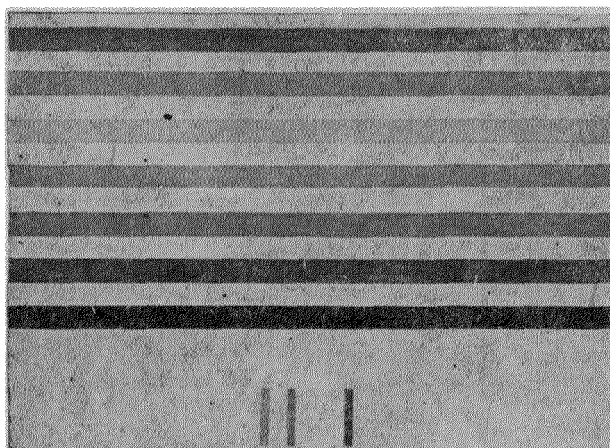


Рис. 14. Внизу — цинковый триплет, сверху — «марки почернения» — сплошные спектры, снятые при равной ширине щели.

кривые могут быть смещены, так чтобы одна явилась продолжением другой. Таким приемом получается одна результирующая кривая, простирающаяся на большую область почернения.

Можно также использовать изменение силы тока для того чтобы варьировать в известном отношении излучение лампы накаливания. В этом случае необходимо предварительно для каждой длины волны изучить зависимость интенсивности от силы тока. Эта градуировка может быть проведена разными способами; наиболее пригодной для этой цели является установка с монохроматором и термоэлементом*.

Как уже упоминалось выше при сравнении двух линий, сильно различающихся по интенсивности, можно ввести в качестве вспомогательной какую либо линию промежуточной интенсивности, если в спектре имеется подходящая линия близкой длины волны. По-

* Следует отметить, что искомая связь между интенсивностью и силой тока не может быть вычислена по цветной температуре лампы.

ясним, как мы это делали и раньше, этот метод на примере. В качестве такового можно снова рассмотреть отношение интенсивностей трех цинковых линий. На рис. 14 воспроизведены три линии и ряд сплошных спектров, служащих марками почернения. Линии сняты с широкой щелью, в данном случае не только для того, чтобы избежать ошибки на случайные „пики“ кривой, но и ввиду еще одного осложняющего обстоятельства, возникающего при сравнении линии со сплошным спектром, о котором подробнее будет сказано ниже. Марки почернения получены при следующих относительных значениях ширины щели: 100:59:38:12:18:17. Микрофотограммы линий были получены обычным путем и даны на рис. 15.

При рассмотрении сплошных спектров

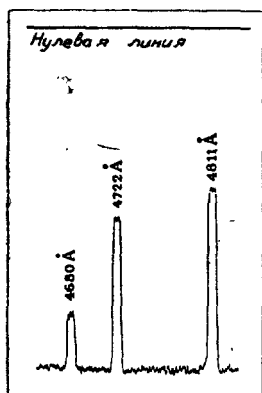


Рис. 15 Микрофотометрическая кривая цинкового триплета рис. 14.

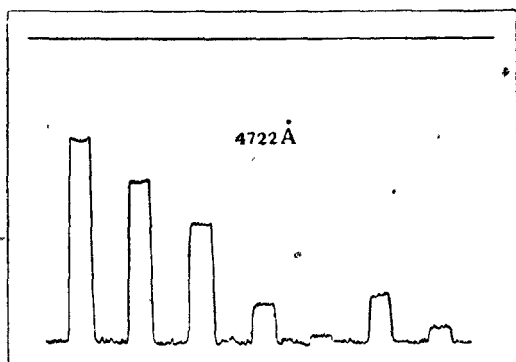


Рис. 16 Микрофотометрические кривые „марок почернения“ рис. 14, соответствующие интенсивностям 100, 59, 38, 12, 18, 17, 7.

нас интересует значение почернения того спектрального участка, в котором расположены линии. Для этой цели снимаем микрофотограмму соответствующего участка, проводя пластинку через микрофотометр перпендикулярно к направлению дисперсии*. На рис. 16 дана полученная таким путем микрофотограмма для длины волны соответствующей средней цинковой линии.

Мы воспользуемся ею для построения кривой почернения пластинки для этой длины волны. На рис. 17 изображена построенная обычным образом кривая почернения. По микрофотограмме (рис. 15) находим следующие значения максимумов почернения для изучаемых линий: 0,086, 0,26, 0,33. По кривой почернения определяем соответствующие им интенсивности: 1,76, 4,6, 5,8.

* Если нет уверенности в том, что соответствующие длины волн на разных спектрах точно расположены одна под другой, особенно, когда рассматриваемая спектральная область характеризуется резким градиентом почернения, следует нанести на сплошной спектр марки длины волны и промерить спектры в интересующем нас участке в направлении дисперсии.

Принимая условно значение интенсивности самой сильной линии за 100, найдем соответственные значения 30,5, 74, 100.

Эти результаты находятся в хорошем согласии с данными, полученными со ступенчатым ослабителем. Как мы уже отмечали и там, в эти результаты следует внести поправку на селективность пластинки. Об этом будет сказано в следующей главе.

Для большинства фотографических пластинок (см. стр. 926) наклон кривой почернения лишь в малой степени зависит от времени освещения. Можно, поэтому, не делая большой ошибки, время экспозиции для линий и для сплошных спектров выбрать различным. Допускаемое отношение времени экспозиции зависит от сорта пластинок и проявителя. Нередко оно доходит до 100.

Часто при фотографировании линий экспозиции оказываются очень длинными и возможность выбрать более короткую экспозицию для марок дает большую экономию времени. Это время можно с большой пользой употребить на повторение этого же снимка, дабы исключить какие-нибудь случайные ошибки. Так как время освещения лишь в слабой степени может менять наклон кривой, можно эти повторные снимки сделать с другой экспозицией. Каждое изменение условий опыта позволяет исключать те или иные случайные ошибки. Вообще следует для данного сорта фотографических пластинок испытать, в какой мере наклон кривой зависит от времени освещения.

Для очень узких линий почернение обусловлено не только количеством энергии, падающей на единицу поверхности. Кривая почернения, построенная по маркам сплошного спектра, не идентична с соответствующей кривой почернения линий. Эта последняя изменена вследствие эффекта „заражения“ (см. стр. 931). Этой ошибки можно избежать только при работе с широкими спектральными линиями или при пользовании ступенчатым ослабителем.

Прерывность в освещении также влияет на наклон кривой почернения. При измерениях интенсивности с прерывным источником света необходимо принять особые меры, если работают со вспомогательным источником света. Помещая соответствующим образом выбранный вращающийся сектор на пути света, по-

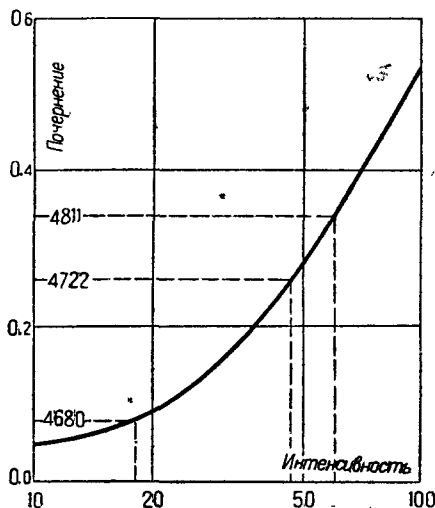


Рис. 17. Кривая почернения, построенная по данным рис. 16, и нахождение искомых отношений интенсивностей.

сылаемого лампы, дающей марки почернения, можно добиться того же самого числа прерываний, какое характеризует изучаемый источник и получить, таким образом, правильные кривые почернения^{6,7}.

13. Марки почернения с помощью мультиплетов эффекта Зеемана, дифракции или интерференции

Наряду с методами, описанными в § 9 и 10, существуют совсем иные возможности, позволяющие построить или конструировать кривые почернения. Правда, описываемые здесь методы имеют ограниченное применение, однако до сих пор лучшие методы неизвестны или требуют контроля. Описанный ниже прием послужил для определения соотношения интенсивностей компонент зеемановского расщепления, заснятых без специальной цели определения их интенсивностей. Для снимков, которые не могут быть повторимы, например при солнечном затмении, этот способ представляет единственную возможность вывести впоследствии соотношения интенсивности, даже в тех случаях, когда примененная пластинка не была проградуирована. Соотношение интенсивностей для многих мультиплетных линий подчиняется, как известно, простым законам, для других же они определены эмпирически. Если на пластинке попадают такого рода мультиплеты или если они специально засняты вместе с исследуемыми линиями, можно из известного нам соотношения интенсивностей по измеренным почернениям построить кривую почернения пластинки. Компоненты зеемановского эффекта тоже могут быть использованы для этой цели и дают в общем верные результаты. Теоретические правила, касающиеся интенсивности зеемановских, лучше известны, чем для мультиплетов, и, кроме того, в компонентах зеемановского расщепления самообращение играет меньшую роль.

Можно проградуировать пластинку, сфотографировав в интересующей нас спектральной области какую-нибудь интерференционную или дифракционную картину с известным теоретически распределением интенсивности. Например, для этой цели была бы пригодна дифракционная картина от щели, так как по волновой теории можно вычислить соответствующее распределение интенсивности. Но так как интенсивность дифракционной картины мала по сравнению с центральной частью (интенсивность 1-го максимума равна 4,5% интенсивности центра), то метод этот пригоден лишь в тех случаях, когда сравниваемые линии сильно разнятся по интенсивности. Можно было бы использовать распределение интенсивностей в центральной части дифракционной картины. В этом виде метод особенно полезен, так как нет необходимости снимать специальную дифракционную картину, ибо каждая спектральная линия сама представляет собой таковую.

Ширина и распределение интенсивности внутри линии обу-

словлены наименьшим отверстием, через которое свет проходит, причем это минимальное отверстие может задаваться самим объективом или призмой (решеткой). Конечно, распределение интенсивностей в линии будет зависеть также и от ширины щели и от способа ее освещения. Но это влияние может быть учтено при расчете. Этот метод может быть использован для контроля пластинки, на которой хотя и имеются марка почернения, однако нет уверенности в их надежности. Так, может случиться, что снятые при разной ширине марки почернения не очень надежны вследствие того, что их экспозиция слишком мала по сравнению с экспозицией линии. В таких случаях распределение интенсивности внутри самой линии может служить для контроля. Но особенно этот метод ценен для исследования сорта пластинок, еще не испытанных для измерений интенсивности. При этом должны быть известны все необходимые данные спектрографа и освещения. При пользовании дифракционной решеткой можно произвести измерение интенсивности основных линий и „духов“ и этим пользоваться в дальнейшем для градуировки пластинки.

14. Затруднения, возникающие при измерениях интенсивностей спектральных линий

В большинстве случаев можно максимальное значение почернения линий считать истинной мерой ее общей интенсивности. Принципиально правильнее в каждом месте внутри линии определить интенсивность по почернению и проинтегрировать найденную таким образом кривую. Это кропотливое исследование почти всегда оказывается излишним, так как кривые распределения интенсивностей двух линий обычно „пропорциональны“, т. е. могут быть сделаны идентичными посредством умножения на некоторый фактор. Форма кривых будет зависеть как от истинного распределения интенсивности внутри линий, так и от свойств спектрографа. Если форма определяется шириной, обусловленной аппаратом, то указанная „пропорциональность“ обеспечена. Но даже в тех случаях, когда это не имеет места, „пропорциональность“ линий имеется иногда налицо: так, например, когда их истинная ширина является следствием теплового движения (Допплер-эффект). Если истинная ширина не мала по сравнению с шириной, обусловленной аппаратом, и распределение интенсивностей линий заметно различны, то необходимо проинтегрировать кривые интенсивности. Обыкновенно для этого достаточно простого приблизительного метода, состоящего в том, что умножается значения максимумов интенсивности на половину ширины линий. Если расстояние между линиями не слишком мало, то предпочтительно увеличить ширину линий, обусловленную аппаратом, расширяя щель, и принять максимальное значение за меру интенсивности.

Исходя из некоторых других соображений, тоже предпочтительно работать по возможности с широкой щелью спектрографа. Как мы уже упоминали, при этом получается более широкий максимум микрофотометрической кривой и это дает возможность элиминировать ошибки, обусловленные наличием зигзагов кривой. Часто обе линии так близки, что они частично накладываются, т. е. местами интенсивности их складываются. Расчленение обеих кривых интенсивностей представляет в таком случае известные трудности. Пусть дана микрофотограмма (рис. 18), на основании которой обычным путем построена кривая интенсивности. Требуется расчленить ее на две отдельные кривые. Для анализа этих кривых сделаем предположение, что они симметричны. Левая сторона левой линии меньше всего изменена вследствие наложения линий. Пренебрегая предварительно этим влиянием, получим приблизительно правильную картину путем зеркального отображения. Положение оси симметрии (на рисунке изображена пунктиром), однако, до известной степени не определена. Вершина линии под влиянием второй линии несколько смещена вправо*. Если из результирующей кривой вычест построенную таким образом кривую, можно получить более слабую линию. Если эта последняя кривая несимметрична, то во всяком случае ее правая сторона известна более точно. Зеркальным изображением этой стороны можно построить второе приближение правой линии, а вычитанием из результирующей получить также второе приближение левой кривой. В общем этот прием приближения дает настолько быстро сходящийся результат, что большей частью можно ограничиться первым приближением. Если есть основание ждать, что обе линии обладают пропорциональным распределением интенсивности, то в нашем распоряжении оказывается возможность контроля конечного результата. Обычно для этого достаточно проверить, равна ли полуширина обеих линий. На рис. 19 это условие не выполнено. В нашем случае соотношение интенсивностей, полученное без подробного анализа данных кривой (рис. 19), равно $100 : 42$, анализ дает поправку $100 : 27$. Но так как распределение интенсивностей данных линий не пропорционально, то истинное отношение интенсивностей линий не определяется значением интенсивностей вершин, а должно быть определено интегрированием кривых. Окончательное значение искомого соотношения интенсивностей будет равно $100 : 35$. Если линии асимметричны вследствие свойств самого аппарата, то анализ оказывается часто вполне однозначным, если определить характеристическое для данной аппаратуры (аппарата и рода

* Расстояние между линиями, определяемое по положению максимумов на микрофотометрической кривой или на кривой интенсивностей, кажется меньше, чем есть в действительности вследствие частичного перекрывания кривых. При визуальных наблюдениях фотографии спектра или даже самих линий точно так же имеет место это кажущееся „притяжение“ линий.

освещения) распределение интенсивности для какой-нибудь простой изолированной линии.

В нашем примере расстояние между линиями так велико, что между их вершинами наблюдается впадина, так что и по обычному обозначению их следует считать расчлененными. В том случае, когда это не имеет места, всё же описанный метод анализа позволяет установить наличие двух линий и выделить их компоненты. Часто приходится иметь дело с простой на вид линией, распределение интенсивности которой, однако, сильно отличается от действительно простой линии. И в этом случае, произведя анализ, можно выделить отдельные компоненты этого комплекса. Конечно, следует помнить, что отклонения от обычной формы могут явиться следствием действительно несимметричного распределения интенсивности.

До сих пор мы считали, что почернение в любом месте вну-

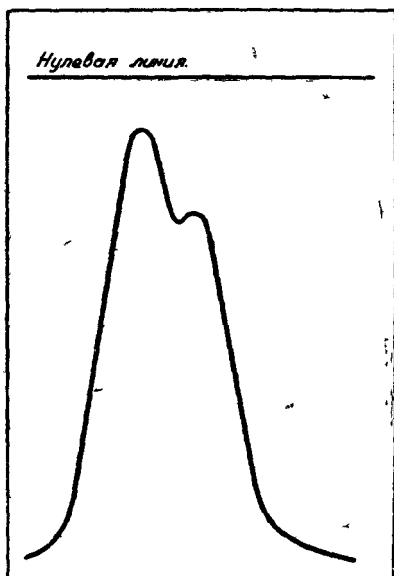


Рис. 18. Микрофотометрическая кривая двух частично перекрывающихся спектральных линий.

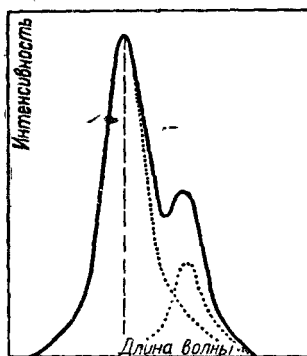


Рис. 19. Кривые интенсивности линий рис. 18 и их анализ.

три линии является однозначной функцией интенсивности в данном месте. В зависимости от сорта пластинки, проявителя и градиента интенсивности это приближение может или лежать в пределах ошибок измерения или выйти из них. Для больших интенсивностей большие отклонения встречаются чаще; они были подробно изучены Эбенгардсом, Кайе и другими. Как мы говорили, можно подходящим выбором пластин и проявителя сильно воздействовать в этом направлении. Эффект этот, главным образом, мешает при измерении интенсивностей внутри узких линий и при анализе близ лежащих линий. Он может внести значительную ошибку в том случае, когда при измерении интенсивности узких линий марками служат сплошные спектры. При при-

менении ступенчатого ослабителя действие эффекта для линий одинаковой ширины полностью исключается.

Часто между измеряемыми линиями простирается сплошной фон. Следует предположить, что на месте линий имеется фон той же интенсивности, как вправо и влево от нее. Истинная интенсивность линий может быть найдена вычитанием интенсивности фона от суммарной интенсивности в этом месте. Ясно, что вычитание ординат соответствующих кривых микрофотограммы дало бы неверные результаты.

Равномерный фон пластинки не влияет на правильность результатов. Принцип метода заключается здесь в том, что равные интенсивности вызывают равное почернение, что сохраняет, разумеется, силу и при наличии фона. Равномерное освещение пластинки, которое часто получается вследствие диффузного отражения в спектрографе, а также при рентгеновских снимках, может сильно исказить результаты, если посторонний свет ослабляется совместно с исследуемым, и так как длина волны постороннего света, вообще говоря, отлична от длины волны измеряемых линий, то эта ошибка никогда не может быть полностью исключена.

О всех трудностях, возникающих вследствие ошибок, обусловленных самой фотографической пластинкой, мы уже говорили выше.

15. Измерение расстояния между спектральными линиями

Измерение расстояния между спектральными линиями, необходимое при определении их длины волны в случае симметричных изолированных линий, не встречает принципиальных затруднений. Даже для не резких линий длина волны определяется однозначно по максимуму почернения и визуальное измерение их расстояний может быть выполнено с помощью, например, компаратора с большой точностью. Для несимметричных линий положение осложняется тем, что искомую длину волны можно идентифицировать или с положением максимальной интенсивности или с центром тяжести кривой интенсивности. Однако вследствие асимметрии эта установка, особенно для широких линий, недостаточно надежна. Можно достигнуть высокой точности только при замене визуальных измерений микрофотометрическими. Если желательно определить не максимум, а центр тяжести кривой, то необходимо измерить распределение интенсивности внутри линий.

Точно так же при измерении расстояния двух соседних линий микрофотометрический метод имеет большое преимущество. Как мы уже отмечали (в примечании к стр. 951), при визуальном определении расстояния между двумя соседними линиями вследствие того, что линии своими размытыми краями частично пере-

криваются, мы получаем приуменьшенные результаты. Микрофотометрическая кривая тоже показывает это кажущееся притяжение линий. Однако из такой кривой можно вывести кривую интенсивности и затем аналитическим способом обе кривые удастся расчленить и найти их истинное расстояние.

16. Фотографическое измерение абсорбции

Так как в данной главе рассматриваются фотографические методы измерения интенсивности при малой разнице в длине волны, то следует здесь упомянуть о фотографическом методе измерения абсорбции, которое относится к измерениям интенсивности одной и той же длины волны. При абсорбционных измерениях в области малых длин волн, особенно когда абсорбция сильно зависит от длины волны, приходится работать с узкой щелью спектрографа. Так как это сильно уменьшает интенсивность сплошного спектра, термические методы оказываются непригодными, им следует предпочесть фотографические.

Выполнение измерения во всех деталях остается таким, каким мы описали его в этой главе для сравнения интенсивностей. Как там, так и здесь при градуировке фотографической пластинки приходится в зависимости от обстоятельств предпочесть тот или иной из названных методов.

Часто пользуясь фотографической методикой, наносят марки почернения при помощи вращающегося сектора, а равенство почернения устанавливают на глаз. Применение перемежающегося света следует принципиально отклонить, а визуальная оценка почернения сопряжена со всеми неприятными последствиями субъективного метода*.

III. ФОТОГРАФИЧЕСКАЯ ФОТОМЕТРИЯ СВЕТА РАЗЛИЧНОЙ ДЛИНЫ ВОЛНЫ

17. Принцип метода

Описанные в предыдущей главе методы пригодны лишь для фотометрии света той же или близкой длины волны. Мы рассмотрим здесь дальнейшее развитие этого метода, делающее возможным сравнение интенсивностей разных длин волн (гетерохромная фотометрия). Основная трудность гетерохромной фотографической фотометрии лежит в специфической чувствительности фотографической пластинки. Как известно, почернение, вызванное одной и той же энергией разных длин волн, оказывается различной. И обратно: для получения одинакового почернения фотографической пластинки при помощи света разных

* В ближайшее время нами будет опубликовано описание очень простой аппаратуры для нанесения марок почернения с помощью ступенчатой щели.

длины волны требуются неравные количества энергии. Это само по себе хорошо известное свойство фотографической пластинки нередко, однако, упускается из виду, вследствие чего недооценивается интенсивность линий, лежащих в спектральных областях малой чувствительности пластинки. Спектральная чувствительность сильно зависит от сорта пластинок и даже в пределах одного сорта она для разных пластинок может заметно отличаться. Нельзя поэтому говорить об определении спектральной чувствительности данного сорта пластинок, каждая пластинка должна быть градуирована отдельно.

Вторая трудность при гетерохромных измерениях интенсивности обусловлена специфической пропускаемостью оптической аппаратуры. Так, вследствие абсорбции в призме из флинтглаза фиолетовые линии ослабляются больше, чем синие; точно так же и отражение вызывает ослабление света, зависящее от длины волны. Это различие для аппаратов с многими призмами или для решетки может быть существенным.

Оба упомянутых эффекта, зависящие от длины волны, могут быть исключены с помощью „нормальной“ лампы постоянного источника с известным спектральным распределением энергии.

Наша задача заключается в сравнении интенсивностей двух линий. Для этой цели на ту же пластинку, на которую сняты линии, снимают и спектр нормальной лампы и сравнивают почернение той и другой линии с почернением, который обнаруживает спектр нормальной лампы для данных длин волн. Так как распределение интенсивностей в этом сплошном спектре известно, то из сравнения почернения можно сделать заключение об искомом соотношении интенсивностей обеих линий.

Монохромное сравнение интенсивности каждой линии с соответствующей частью сплошного спектра можно осуществить по одному из рассмотренных в предыдущей главе методов. Надо для этого линейный или сплошной спектр заснять при определенных соотношениях интенсивностей. Принцип метода предполагает, что исследуемый свет и свет нормальной лампы ослабляется спектральным аппаратом в одинаковой мере. Световые пучки, выходящие из щели по разным направлениям, попадают на различные части призмы или решетки, и вследствие этого они могут быть ослаблены в разной мере. Правильное сравнение может быть осуществлено только, если в обоих случаях лучи одинаковым образом заполняют спектральный аппарат.

18. Нормальная лампа и ее градуировка

В качестве нормальной лампы может быть использовано черное тело, распределение энергии которого при известной температуре вычисляется по закону Планка. Черным телом служит, как обычно, полая оболочка, т. е. печка, температура стенок которой всюду одинакова. Однако для того чтобы интенсивность

излучения в области спектра, действующей на фотографическую пластинку, была достаточна, требуется довести печь до очень высокой температуры, так что применение печи, удовлетворяющей необходимым условиям, и сложно и дорого. Сверх того, измерения такой высокой температуры с точностью, необходимой для вычисления распределения энергии, довольно затруднительны.

Простой метод для осуществления почти черного тела высокой температуры был дан Генингом и Гейзе. Они использовали излучение, выходящее из малого отверстия в сильно нагретом вольфрамовом шарике. При пользовании такого рода нормальной лампой затруднение возникает не только в необходимости точного измерения температуры, но и вследствие того, что это отверстие может лишь приближенно считаться черным. Весьма неудобным является то обстоятельство, что черная излучающая поверхность очень мала, а граничащие с ней части вольфрамового шарика испускают свет другого спектрального состава.

Для этих целей можно пользоваться любой лампой, если только ее распределение интенсивности по спектру вполне воспроизводимо. Это распределение должно быть определено предварительной градуировкой.

Целесообразно применять вольфрамовую лампу с плоской нитью или обычную газонаполненную лампу, на клеммах которой наложено постоянное и не очень высокое напряжение. Требования, предъявляемые к постоянству напряжения, довольно высоки, так как изменение напряжения на 0,1% уже вызывает заметное изменение интенсивности, особенно для малых длин волн. Сверх того, следует обратить внимание, что должно пройти немало минут после зажигания лампы, прежде чем устанавливается стационарное состояние излучения. Напряжение должно быть не слишком высоко с тем, чтобы температура волоска не менялась во время употребления. Пригодные для измерения в ультрафиолетовой области нормальные лампы должны быть изготовлены из кварца или снабжены кварцевым окошком для того, чтобы испускаемая ими интенсивность была не слишком мала.

Мы опишем два метода градуировки лампы.

1. Принцип первого метода следующий. При помощи вспомогательной лампы и монохроматора отбрасывают одноцветные изображения второй щели аппарата. Посредством термоэлемента и гальванометра определяют относительные интенсивности этих изображений. Далее, при помощи какого-нибудь спектрального аппарата, фотографическим или иным способом, сравнивают для разных длин волн интенсивность нормальной лампы с интенсивностью одноцветных изображений. Таким путем селективность спектрального аппарата полностью исключается. Обычно употребляемая в Угрюмском институте установка для градуировки нормальной лампы представлена на рис. 20. Вспомогательная лампа Q посредством линзы L_1 , проектируется на входную щель S_1

двойного монохроматора M . Устанавливая винт H на разные длины волн, можно через выходную щель S_2 выпускать на термостолбик различные спектральные участки и определять соотношение их интенсивностей. Если термостолбик не абсолютно черный, следует внести поправку на его селективное отражение. Двойной монохроматор ван-Чиррерта⁹ состоит из двух идентичных монохроматоров, которые зеркально расположены относительно плоскости щели S_2 , которая является одновременно выходной щелью первого и входной щелью второго монохроматора. Перемещая эту щель в ее плоскости при помощи упомянутого винта H , можно производить установку на любую длину волны. Этот двойной монохроматор имеет целый ряд преимуществ: во-первых, большая спектральная чистота, во-вторых, направление выходящих лучей для всех волн одинаково; кроме того, если удалить щель S_2 , можно из S_3 получить белый свет, спектральное распределение которого известно благодаря вышеупомяну-

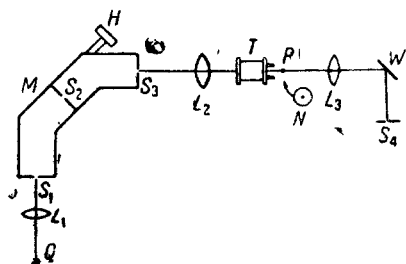


рис. 20. Схема установки для градуировки нормальной лампы.

тым измерениям с помощью термостолбика. Оба последние свойства спектрографа достигаются двумя вспомогательными линзами, расположенными по обе стороны щели S_2 . Линза L_2 отбрасывает в P изображение щели S_3 . Если удалить S_2 , то белое изображение в P можно рассматривать как источник света определенного спектрального состава. Спектр этого источника может быть сфотографирован с помощью любого спектрографа (S_4 изображает его входную щель). Для того чтобы лучи всех длин волн одинаковым образом заполнили отверстие спектрографа, свет, выходящий из P_1 , фокусируется с помощью линзы L_3 на белую диффузно отражающую поверхность W , которая служит для освещения щели S_4 спектрографа.

Таким образом освобождаются от влияния хроматической aberrации линзы L_1 и L_2 . К сожалению, этот метод предъявляет высокие требования к ахроматичности остальных линз, которым трудно удовлетворить полностью. Можно, однако, ценой затраты времени сфотографировать последовательно различные участки спектра, не удаляя щель S_2 , а используя возможность резко устанавливать монохроматор на любую длину волны. Затем нормальную лампу N помещают в P и с помощью того же спектрографа фотографируют спектр. Располагая диафрагму перед белой поверхностью W , можно при желании проградировать отдельные части гити накаливания нормальной лампы.

Одним из указанных в гл. II методов определяют соотношение интенсивностей спектра P и нормальной лампы для целого ряда длин волн. Для определения длин волн в сплошных

спектрах лучше всего на них наложить какой-нибудь известный, например гелиевый, линейный спектр. Так как путь света обоих источников от P до фотографической пластинки одинаков, то свет обоих источников ослабляется при диафрагмировании, абсорбции, отражении для всех длин волн в одинаковом отношении. Отношение интенсивностей данной длины волны спектра нормальной лампы и источника P будет в действительности таким каким оно дается почернением фотографической пластинки. Распределение интенсивностей для спектра P определено термостолбиком. Из фотографических измерений известно отношение интенсивности спектров P и N для разных длин волн. По этим данным можно вычислить распределение интенсивностей для спектра N .

В полученном этим путем распределении интенсивности сказывается еще, однако, дисперсия монохроматора. Простоты ради, мы все время говорили об интенсивности для определенной длины волны, хотя имеет смысл говорить об энергии в определенном интервале длин волн. Где говорится просто о распределении энергии в спектре, следует всегда разуметь энергию на единственный участок длин волн. Энергия же, измеренная термозаэлементом, представляет собою энергию определенной области длин волн, задаваемой шириной щели, дисперсией призмы и фокусными расстояниями линз монохроматора. Эта область может быть или непосредственно измерена или найдена дифференцированием дисперсионной кривой. Измеренная термозаэлементом в каких-нибудь единицах энергия должна быть разделена на эту область длин волн, для того чтобы получить энергию, приходящуюся на единичный участок длин волн.

Вместо фотографического метода можно с успехом воспользоваться термоэлектрическими и фотоэлектрическими измерениями излучения для сравнения P и N , т. е. для градуировки нормальной лампы. Для этого на место фотографической пластинки в спектральном аппарате надо поместить термостолбик или фотоэлемент и с их помощью произвести непосредственные измерения. Можно комбинировать эти методы и применить, например, для измерения инфракрасного и длинноволнового света термозаэлемент, а для коротковолнового — фотоэлемент или фотографическую пластинку. В качестве примера мы в табл. 1 даем градуировку нормальной лампы. Она представляет собой четырехвольтовую газонаполненную лампу, горевшую при напряжении 2,6 V. В первом столбце помещены длины волн в микронах, во втором измеренные интенсивности на единичный участок длин волн в произвольных единицах. На цифрах 3 и 4 столбца мы остановимся подробнее.

Хотя вольфрамовая нить заведомо не представляет собой черного тела, можно, однако, поставить вопрос, нельзя ли связать интенсивности и длины волны $J(\lambda)$ представить в виде формулы Планка, задавшись подходяще выбранной температурой. Для

рассматриваемого участка длин волн и при обычно встречающихся температурах можно с достаточным приближением при-

Т А Б Л И Ц А 1

Длины волн в микронах	Наблюдаемые значения интенсивности	Вычисленные значения интенсивности	Разность между наблюден и вычислен. значениями интенсивности в %
0,70	386	390	— 1
0,68	311	314	— 1
0,66	272	272	0
0,64	226	225	+ 0,5
0,62	184	183	+ 0,5
0,60	148	147	+ 1
0,58	115	115	0
0,56	88,6	87,0	+ 2
0,54	65,6	64,8	+ 1
0,52	45,9	46,8	— 2
0,50	31,6	32,7	— 3
0,48	21,3	22,0	— 3,5
0,46	14,0	14,1	— 1
0,45	10,9	10,7	+ 2
0,44	8,4	7,9	+ 6
0,43	6,4	6,3	+ 1,5
0,42	4,75	4,97	— 2,5

менить формулу Вина, а именно величину $J(\lambda)$ представить следующей формулой:

$$J(\lambda) = c_1 \lambda^{-5} e^{-c_2/\lambda T}$$

или

$$\log [\lambda^5 J(\lambda)] = \log c_1 - c_2/\lambda T.$$

Для проверки правильности этого соотношения и одновременно для установления значения T наносят на график $\log \lambda^5 J(\lambda)$ как функция $1/\lambda$. В разбираемом нами примере, при этом найдем, что точки лежат почти на прямой линии, как это соответствует уравнению. Из наклона прямой найдем $T = 1980^\circ$. Вычисленные при этой температуре значения $J(\lambda)$ собраны в третьем столбце табл. 1, тогда как в четвертом помещены отклонения в процентах между измеренными и вычисленными значениями интенсивностей. Следует отметить, что температура T в виновской формуле не есть истинная температура нити накаливания. Это фиктивная величина — так называемая цветная температура.

Выражение распределения интенсивности при помощи вышеприведенного уравнения имеет то преимущество, что функция $J(\lambda)$ выражена через единственную константу — цветную температуру. Остальные две константы c_1 и c_2 не требуется определять, так как c_1 при всех сравнительных измерениях выпадает, а c_2 есть известная универсальная постоянная (1,43 см·е). Так как

на практике важно пользоваться нормальной лампой при разных яркостях, то необходимо вышеуказанным образом определить ее цветную температуру для разных значений силы тока и представить соотношение между ними в виде таблицы или графика. Замечательно, что связь между цветной температурой и силой тока в довольно широких пределах линейна.

2. Второй способ градуировки нормальной лампы покоится на применении градуированного оптического пирометра, с помощью которого можно определить черную температуру лампы, для узкого участка длин волн. Черной температурой раскаленного тела мы называем, как известно, температуру, которую должно было бы иметь абсолютно черное тело для того, чтобы в данном спектральном интервале обладать такой же яркостью.

Для лампы с вольфрамовой плоской нитью, где наблюдение ведется в направлении, перпендикулярном к излучающей поверхности, эта задача легко разрешима. Дальнейшая задача заключается в определении цветной температуры нормальной лампы, исходя из ее черной температуры. Связь между черной и цветной температурой можно взять из имеющихся в литературе данных ¹⁰, касающихся излучения вольфрама при разных черных температурах в направлении, перпендикулярном к раскаленной поверхности. Для обыкновенной газонаполненной лампы это соотношение, однако, сложное. Во-первых, мы имеем здесь дело с излучением под разными углами, а во-вторых, с испусканием внутренней стороны спирали еще и отраженного излучения. Связь между силой тока и цветной температурой поэтому зависит не только от материала, но и от геометрической формулы спирали. Однако эти обстоятельства можно учесть при помощи расчета и при заданной форме спирали, и можно хотя бы приближенно, вывести из пирометрически измеренной черной температуры наружной стороны спирали искомую цветную температуру ее суммарного излучения. В результате пирометрической градуировки нормальной лампы мы получаем также линейную связь между силой тока и цветной температурой, из которой, с помощью формулы Вина может быть вычислено искомое распределение интенсивностей. Относительно газонаполненной лампы следует отметить, что получается заметная разница в зависимости от того, принимаются ли в расчет суммарного излучения и края спирали или последние исключаются. Следует поэтому всегда указывать, относятся ли данные цветной температуры ко всей раскаленной поверхности или только к ее центральной части.

Большинство ламп с плоской нитью в этом отношении гораздо удобнее, ибо в них края нити загнуты позади плоской части и таким путем заэкранированы. Как показали пирометрические измерения, при такой конструкции температура всей активной поверхности практически одинакова.

Если задаться вопросом, которому из двух указанных мето-

дов градуировки следует отдать предпочтение, — приходится ответить, что каждый из них имеет свои достоинства и недостатки. Несомненно, что первый метод более прямой, второй же более простой по выполнению. В Утрехтском институте в настоящее время пользуются исключительно пирометрическим методом, после того как очень тщательные измерения по обоим методам привели к совпадающим результатам как для лампы с плоской нитью, так и для газонаполненной. Пирометрическая градуировка основана на визуальных измерениях. Она, поэтому, субъективна и только опытный наблюдатель может достигнуть желательной точности. Столь тщательные результаты следует по возможности широко использовать, применив эталонную лампу для вторичной градуировки других ламп. Это можно сделать объективным сравнением спектров обеих ламп по одному из вышеописанных методов. На практике наиболее применим весьма простой способ с двумя фильтрами, практикуемый в Утрехтском институте.

В основе его лежит предположение, что второй градуируемый источник света обладает цветной температурой в том спектральном интервале, к которому относится и градуировка. Чем выше эта температура, тем богаче будет коротковолновая область. Сравнение интенсивности двух, выделенных фильтрами, участков спектра дает возможность определить цветную температуру источника. С этой целью надо проградировать фильтры, применив эталонированную нормальную лампу, цветную температуру которой можно в определенных границах менять. Таким образом устанавливается зависимость между отношением интенсивностей обоих сортов излучения (выделенных фильтрами) и цветной температурой эталонной нормальной лампы.

Эта зависимость сохраняет силу для всякого источника света, у которого соотношение интенсивностей в указанном спектральном интервале может быть выражено через цветную температуру, следовательно, и для изучаемого источника. Предпочтительно выбрать фильтр из цветных стекол, для того чтобы он с течением времени не менялся и пользоваться спектральными участками, возможно сильно отличающимися по длине волны. Само собою разумеется, что измерения интенсивности могут быть произведены и с помощью селективного аппарата, в частности с фотоэлементом. В последнее время мы применяем в качестве нормальной лампы источник с линейным спектром. Подробнее об этом см. книгу автора¹¹.

19. Измерение интенсивностей с помощью нормальной лампы

Измерение производится таким образом, что на одной и той же пластинке снимается исследуемый спектр и спектр нормальной лампы. Один, по крайней мере, из этих двух спектров должен быть ослаблен в определенных соотношениях. Так как

обычно нормальная лампа постоянна и дает сплошной спектр, то проще всего ослаблять нормальный спектр уменьшением щели. Принципиально желательно, чтобы продолжительность экспозиции для обоих спектров была приблизительно одинаковой, хотя допустимое соотношение экспозиций может выражаться небольшим числом (см. стр. 948). Следует принять во внимание, что кривая почернения для очень узких спектральных линий может быть видоизменена, точно так же и прерывность освещения может повлечь за собой осложнение.

При оценке результатов следует принять в расчет, что градуировка нормальной лампы дает значение интенсивности на единственный участок длин волн, тогда как почернение изучаемых спектров определяют интенсивностями на единицу поверхности. Из кривой градуировки следует поэтому вычислить интенсивность на единицу поверхности, принимая в расчет дисперсию спектрального аппарата. Если λ — длина волны, а x — расстояние на пластинке, то следует определить дисперсию $\frac{dx}{d\lambda}$, что можно выполнить графически или численно и разделить на это дифференциальное отношение значения интенсивностей, даваемые градуировкой. Далее, приходится принять в расчет возможное неахроматическое изображение щели спектрографа. В этом случае изображение щели для одной длины волны больше, чем для другой. Кроме того, для линейного спектра интенсивность на единицу поверхности обратно пропорциональна квадрату линейных размеров изображения, тогда как для сплошного спектра эта величина обратно пропорциональна первой степени. Так как измерение состоит в установлении на равенство почернения, т. е. равенства интенсивности на единицу поверхности, следует полученные числа помножить на первую степень линейного увеличения спектрографа для различных длин волн. Если спектральная линия обладает значительной истинной шириной, то спектр следует снимать с широкой щелью. В этом случае нужно определить только значения максимумов на кривой почернения. Если сравниваемые линии не стоят изолированно, так что приходится работать с узкой щелью, то кривые интенсивности линии следует интегрировать. Обычно можно ограничиться приближенным методом интегрирования, т. е. простым перемножением максимального значения на полуширину линии. Применение нормальной лампы предполагает одинаковое ослабление излучения этой лампы и исследуемого источника при прохождении через спектрограф. Это ослабление частично вызывается дифрактированием пучками щели. Такое ограничение пучков для обоих источников лишь тогда может быть идентичным, когда их изображение ахроматично, т. е. задается ахроматической линзой или зеркалом. Следует, однако, иметь в виду дифракцию. В зависимости от условий можно при обработке измерений почернений поступать различным образом.

Можно различать следующие случаи:

1) кривые почернения нормальной лампы и исследуемого источника идут параллельно, но исследуемая спектральная область настолько велика, что кривые почернения для разных длин волн не параллельны; 2) кривые почернения для разных длин волн и для обоих спектров оказываются параллельными; 3) кривые почернения для обоих спектров, равно как и для разных длин волн, не параллельны.

1. В первом случае следует применить метод, указанный на стр. 955, т. е. сравнить почернение каждой линии с почернением сплошного спектра для той же длины волны. Поясним на примере этот способ измерения. Выберем для этого линии 4047, 4359, 5461 Å триплет ртути, испускаемый обыкновенной ртутной лампой. Разница длин волн в данном случае настолько велика,

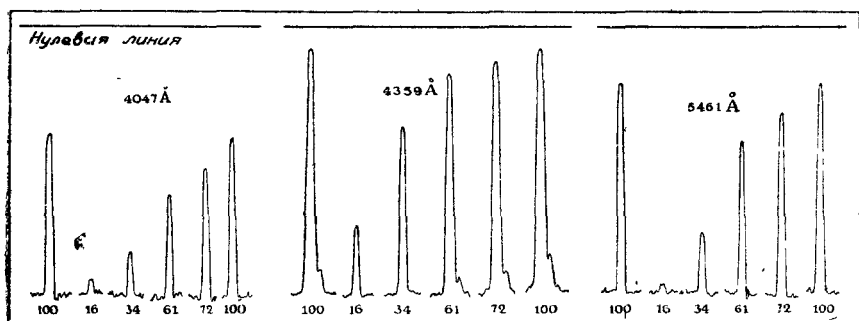


Рис. 21. Микрофотометрические кривые ртутных линий 4047, 4359, 5461 Å (для каждой линии имеются шесть ступеней интенсивности).

что кривые почернения этих трех линий значительно отклоняются от параллельности. Полноты ради, произведем измерения по обоим методам, т. е. один раз с применением ступенчатого ослабителя, а второй раз, пользуясь нормальной лампой в качестве вспомогательного источника и изменяя ее интенсивность по способу расширения щели.

1а. Ступенчатый ослабитель. Пользуясь одним и тем же ступенчатым ослабителем снимают на одной фотографической пластинке с одинаковой экспозицией последовательно линейный спектр и спектр нормальной лампы. Линейный спектр снимают намеренно не с очень узкой щелью. Затем микрофотометрируют пластинку. Кривая микрофотограммы всех трех линий дана на рис. 21. Для каждой из наших трех линий промерены все шесть ступеней, соответствующие относительным интенсивностям 100:16:34:61:74:100. По кривым вычислены почернения и нанесены на кривые, изображенные на рис. 23 (ртутные). Точно так же спектры нормальной лампы, снятые при шести различных интенсивностях, фотометрированы перпендикулярно к на-

правлению дисперсии для длин волн 4047, 4359, 5461 Å. На рис. 22 даны кривые их микрофотограммы и для этого случая выведены значения почернения, построенные по ним кривые почернения изображены на рис. 23 (нормальная лампа).

Так как свет ртутной лампы не прерывистый, экспозиции для нормальной и ртутной лампы были, приблизительно,

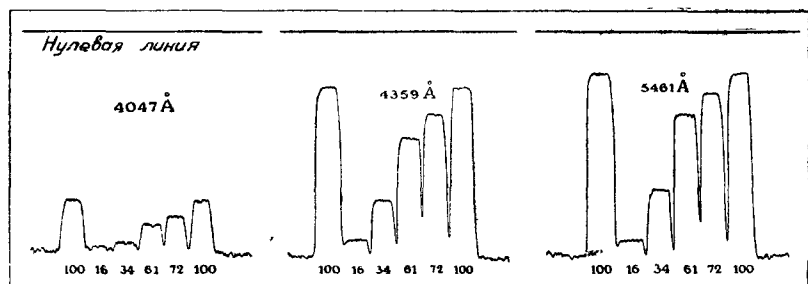


Рис. 22. Микрофотометрическая кривая нормальной лампы для длин волн 4047, 4359, 5461 Å (для каждой длины волн 6 ступеней интенсивности).

одинаковы и линии были засняты с достаточно широкой щелью, можно ожидать, что кривые почернения для обеих ламп при каждой длине волны пойдут параллельно. Действительно, на рис. 23 в этом можно убедиться, точно так же легко заметить непараллельность кривых, относящихся к разным

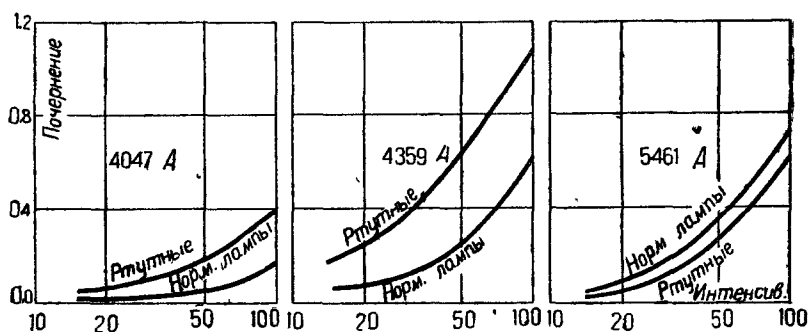


Рис. 23. Кривые почернения ртутных линий 4047, 4359, 5461 Å и нормальной лампы для тех же длин волн.

длинам волн. Из отсчитанных по горизонтальному направлению расстояний между обеими кривыми находятся по шкале $\log i$ отношения интенсивностей. Для линий 4047, 4359, 5491 Å отношения интенсивностей нормальной и ртутной лампы соответственно равны 2,30:2,16:0,90. Эти числа дают и для неослабленных линий ртути и неослабляемой нормальной лампы отношение

интенсивностей на единицу площади пластинки. Цветная температура нормальной лампы была определена в 2910° . Отсюда можно с помощью формулы Вина вычислить для данных длин волн отношения интенсивностей на единичный спектральный участок. Получаем: $21,8:35,6:113$. Само собою разумеется, что здесь играет роль только отношение чисел, их абсолютные значения не имеют никакого смысла. Эти числа должны быть исправлены учетом дисперсии спектрального аппарата (решетки). В нашем случае она равна для трех длин волн $75:74:73:72$. Итак, для нормального спектра, отношение интенсивностей на единицу поверхности равно

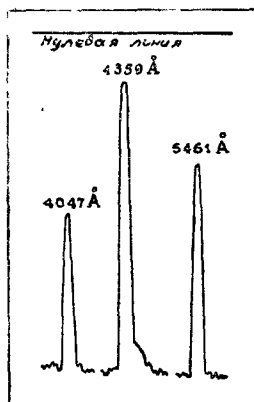


Рис. 21. Микрофотометрические кривые трех ртутных линий 4047, 4359, 5461 Å.

$$\frac{21,8}{74} : \frac{35,6}{73} : \frac{113}{72} = 29,6:48,8:157.$$

Умножая эти числа на вышенайденные отношения, найдем для трех линий $29,6 \cdot 2,30:48,8 \cdot 2,16:157 \cdot 0,90 = 68:105:141$.

Приравнивая интенсивность самой сильной линии к 100, получаем в окончательном результате для искомого отношения интенсивностей трех ртутных линий $48:74:100$.

1б. Ослабление изменением ширины щели. Иллюстрируем этот способ измерения, пользуясь теми же источниками света, спектрографом и нормальной лампой (с цветной температурой 2910°), как и в 1а. На фотোগрафической пластинке линейный спектр снят один раз, а спектр нормальной лампы семь раз при разной ширине щели, но точно с одной и той же экспозицией. Мы не приводим здесь репродукции снимка, который имеет вид, аналогичный приведенному на рис. 14. Линии попрежнему были сняты со щелью достаточной ширины.

На рис. 24 даны микрофотографические кривые трех линий. Область пластинки между интересующими нас линиями при микрофотографировании была пропущена. Для трех максимальных значений получаем почернения $0,26; 0,85; 0,42$.

На рис. 25 приведены три микрофотографические кривые нормального спектра для длин волн $4017, 4359, 5461 \text{ Å}$, измеренные перпендикулярно к направлению дисперсии. Относительные значения ширины щели были $10:20:5:15:40:60:100$. По данным этих кривых были построены кривые почернения для трех длин волн (см. рис. 26). По рисунку легко заметить разный наклон этих кривых. При этом графическом построении 100% значения интенсивности для всех трех длин волн нанесены на одном и том же месте по шкале $\log i$, хотя они заведомо

различны, и как это было выведено раньше по цветной температуре нормальной лампы и дисперсии спектрального аппарата,

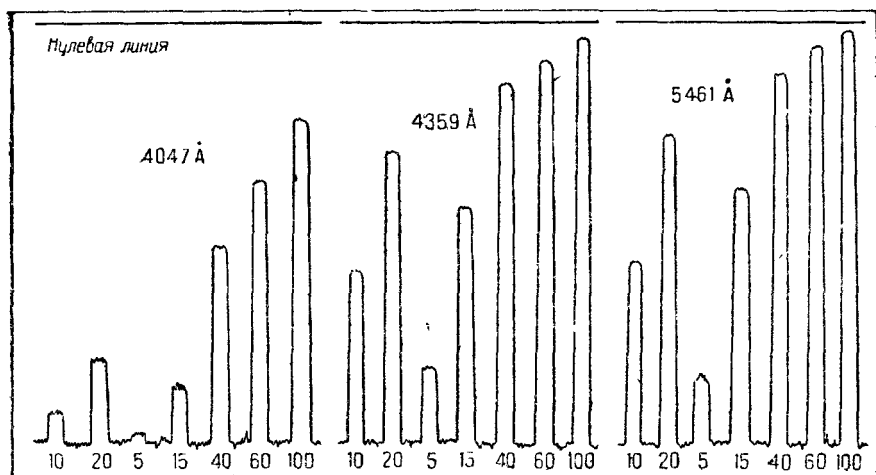


Рис. 25 Микрофотометрические кривые спектров нормальной лампы, снятых при семи различных ширинах щели, 10, 20, 5, 15, 40, 60, 100, фотометрирование производилось перпендикулярно к направлению дисперсии.

относятся как 29,6:48,8:157. Можно было бы параллельным смещением кривых учесть это обстоятельство, но на практике

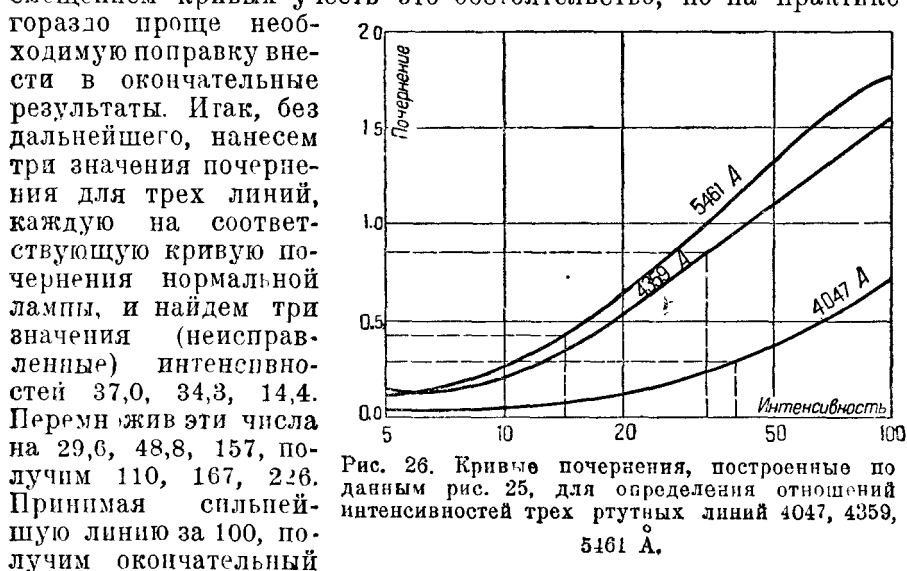


Рис. 26. Кривые почернения, построенные по данным рис. 25, для определения отношений интенсивностей трех ртутных линий 4047, 4359, 5461 Å.

результат для искомого отношения интенсивностей 48 : 74 : 100.

Описанные методы требуют измерения почернения сплошного спектра в стольких местах, сколько имеется изучаемых

линий. Поэтому, если линейный спектр богат линиями, приходится произвести большое количество измерений и вычислений. Часто, однако, имеется возможность их сократить. Нередко случается, что в интересующей нас области длин волн кривая почернения нормального спектра имеет достаточно плавный ход. В этом случае можно ограничиться необходимыми измерениями для немногих длин волн и на основании полученных данных построить кривую простого вида (рис. 27), по которой можно находить почернения для промежуточных длин волн. Даже когда кривая обладает несколькими максимумами и минимумами, так что для построения требуется сравнительно много точек, такая графическая интерполяция дает при большем числе сравниваемых линий значительную экономию времени.

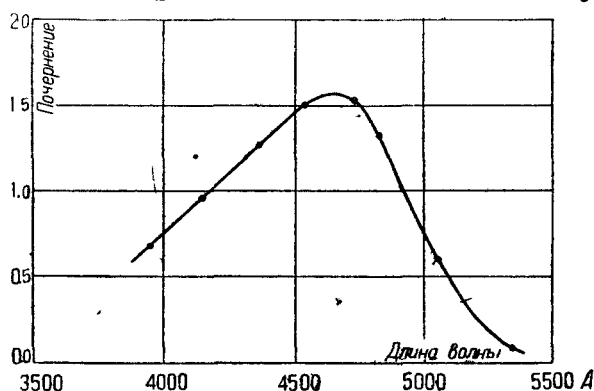


Рис. 27. Почернение как функция длин волн в сплошном спектре.

но таким же образом, как в случае 1 (стр. 963). Параллельность кривых почернения для различных длин волн не вносит никаких изменений в методе. Выполняется ли условие или нет — это не имеет никакого значения для осуществления описанного метода. Этой параллельностью можно, однако, воспользоваться при определении чувствительности пластинки в функции длины волны. Точнее говоря, в данном случае играет роль не чувствительность пластинки, а произведение этой величины на пропускаемость спектрального аппарата. В дальнейшем это произведение назовем „чувствительностью аппаратуры“. Точно так же и во втором случае, когда кривые линейного спектра и нормальной лампы не параллельны, можно действовать по намеченному выше плану.

Определяем чувствительность аппаратуры в функции длины волны для нормальной лампы и принимаем, что то же отношение чувствительности сохраняется и для исследуемых линий, хотя кривые почернения имеют другой наклон, вследствие, например, прерывистости освещения.

2. Если в исследуемом спектральном участке кривые почернения, соответствующие разным длинам волн, параллельны, то можно различать два случая: или кривые почернения линейного спектра параллельны кривым почернения нормальной лампы или они не параллельны. В первом случае можно работать совершенно

В качестве примера такого рода измерения интенсивности остановимся на разобранной задаче, касающейся определения соотношения интенсивностей цинкового триплета 4680, 4722 и 4811 Å. Эти линии испускаются цинковой искрой. Вследствие прерывистости освещения кривые почернения линий имеют несколько иной наклон, чем кривые нормальной лампы. При разборе этого случая мы пренебрегали зависимостью чувствительности аппаратуры от длины волны и отношение интенсивностей было определено сперва со ступенчатым ослабителем, а затем с помощью вспомогательного источника. Первый метод дал отношение 31:79:100; второй — 35,5:79:100. Теперь эти результаты должны быть исправлены.

2а. При пользовании ступенчатым ослабителем снимают на одной пластинке как линейный спектр, так и спектр нормальной лампы; оба спектра ослаблены в определенных соотношениях.

Рис. 28 дает репродукцию этого снимка. Нижняя часть уже была изображена на рис. 11 и служила для получения вышеупомянутых чисел.

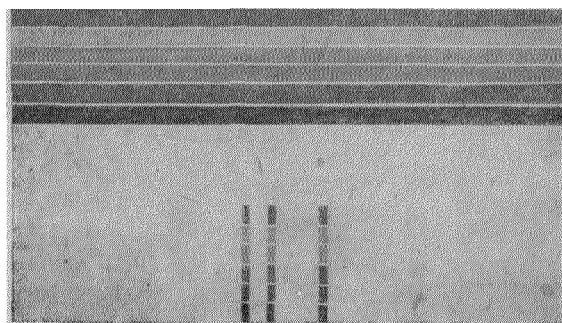


Рис. 28. Цинковый триплет и спектр нормальной лампы, снятые со ступенчатым ослабителем.

По верхней части следует найти значения чувствительности аппаратуры для трех длин волн. Для этого снимают микрофотограммы для трех линий 4680, 4722, 4811 Å перпендикулярно к направлению дисперсии. Мы не приводим здесь микрофотографических кривых, вид их вполне аналогичен кривым рис. 22. Определенные из этих микрофотограмм почернения служат для построения трех кривых почернения, изображенных на рис. 29. Не принимая во внимание зависимости чувствительности от длины волны, находят по расстояниям этих (параллельных) кривых почернения следующие отношения интенсивностей: 100:102:94. Истинное отношение интенсивностей вычисляется по формуле Вина, зная цветную температуру (2675°), они равны 29:31:35. Поправку на дисперсию в данном случае вносить не приходится, так как для этих длин волн дисперсия практически одинакова. Чувствительности аппаратуры для этих длин волн относятся, следовательно, как:

$$\frac{100}{29} : \frac{102}{31} : \frac{94}{35}$$

Окончательные значения соотношений интенсивностей трех линий будут:

$$\frac{31}{3,45} : \frac{79}{3,29} : \frac{100}{2,69}$$

2б. При применении метода с вспомогательным источником мы используем приведенный выше снимок (рис. 14). Вспомогательным источником служила нормальная лампа с известной цветной температурой (2675°), поэтому кривые почернения спектра

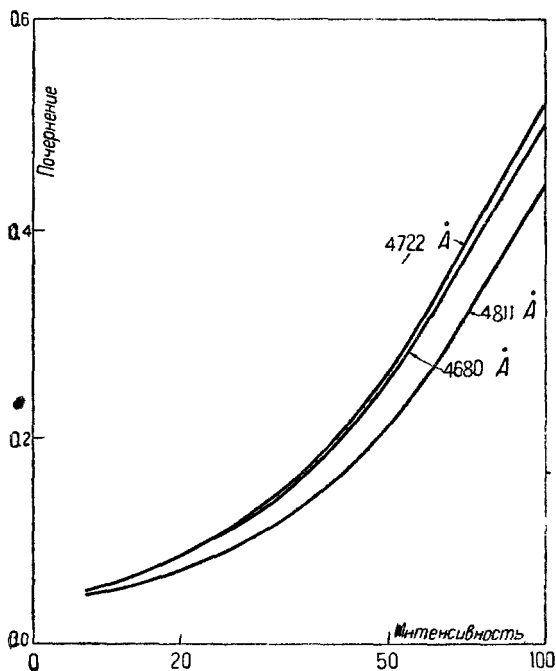


Рис. 29. Кривые почернения спектра нормальной лампы рис. 28.

нормальной лампы могут быть использованы для определения относительной чувствительности аппаратуры. Для этого надо микрофотометрировать кривые перпендикулярно к направлению дисперсии для трех длин волн 4680, 4722 и 4811 Å. Кривые микрофотограммы выглядят подобно изображенным на рис. 25. С помощью этих кривых были построены три кривые почернения, расстояние которых приводит к значениям относительной чувствительности аппаратуры, совершенно так же, как это было описано выше. Таким образом мы получаем результаты, в пределе ошибок из-

мерений совпадающие с вышеприведенными. Если исследуемый спектр богат линиями, можно с большим успехом найти относительную чувствительность для нескольких длин волн, построить кривую чувствительности аппаратуры и по ней определять относительную для любой промежуточной длины волны.

Для спектров, очень богатых линиями, целесообразно применение графического метода не только для определения чувствительности, но и для нахождения ряда других величин, связанных с длиной волны логарифмической зависимостью.

3. В том случае, когда ни кривые почернения, относящиеся к разным длинам волн, ни кривые почернения нормальной лампы и линий не параллельны между собой, фотографический

метод определения интенсивностей вообще не применим. На практике приходится от случая к случаю решать допустимое небольшое отступление от параллельности. Недостаточная параллельность кривых почернения для разных длин волн может быть большой частью устранена при подходящем выборе пластинки или при их сенсibilизации. Непараллельность кривых почернения линейного спектра и нормальной лампы объясняется или малой шириной линии (стр. 931) или прерывностью света. В первом случае можно результаты исправить, увеличив ширину щели, что, однако, при очень близких линиях приводит к их наложению. Можно внести поправку, делая снимок и с узкой и с широкой щелью. Влияние прерывности света можно обезвредить, применяя при фотографировании нормальной лампы вращающийся сектор.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Moll, Kon. Akad. v. Wet. Amsterdam, März 1920.
 2. См. Cabannes, Ann. d. Physik, 1923
 3. Труды съезда физиков, Ленинград 1919.
 4. Elfiot, Disser, Utrecht 1920.
 5. Hansen C., Zeits. f. Phys. **29**, 356, 1924.
 6. Bongers A., Disser Utrecht 1927.
 7. Burger D., Zeits. f. Phys., **54**, 649, 1929.
 8. Henning F. und Heuse W., Zeits. f. Phys. **16**, 63, 1923.
 9. Van Cittert P. H. Rev. Opt. **2**, 57, 1923.
 10. Forsythe W. und Worthing A., Astr. J. **61**, 146, 1925.
 11. Ornstein-Moll-Burger, loc. cit, стр. 128.
-