

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ОБ ОПТИЧЕСКИХ ПОСТОЯННЫХ МЕТАЛЛОВ

М. В. Савостьянова, Ленинград

1. Оптические постоянные металлов — показатель преломления n и показатель поглощения k — принадлежат к числу важнейших материальных постоянных в физике: точное их знание позволило бы подойти к одному из основных вопросов строения материи — вопросу о строении кристаллической решетки. Действительно, ведь поведение поглощающего кристалла по отношению к падающим на него световым волнам целиком обусловлено движением электронов внутри решетки, и всякие особенности их взаимодействия с падающими волнами неизбежно должны проявляться и в спектральном ходе поглощения, отражения и преломления.

Действительно, давно уже известно, что спектральный ход оптических постоянных ряда металлов весьма причудлив; достаточно указать на ультрафиолетовый минимум поглощения (и отражения) серебра, непосредственно указывающий на какое-то резкое изменение механизма поглощения при переходе через эту область. За последние годы накопился экспериментальный материал, открывающий в спектральном распределении оптических свойств металлов все новые и новые подробности. Так, всеобщее внимание обратили на себя опыты Вуда над щелочными металлами, подробно описанные им в его „Физической оптике“; область минимального поглощения в этих металлах выражена особенно резко.¹⁾

Далее, Смакула^{59, 60}, занявшийся тщательным измерением поглощения металлов (в тонких слоях), обнаружил, что кривая поглощения идет не плавно, а скачкообразно (рис. 1), причем это обстоятельство особенно резко проявляется в ультрафиолетовой области (около 300 $m\mu$). Этот факт указывает на еще более тонкие

¹⁾ Это открытие Вуда имеет не только теоретическое, но и практическое значение: пленки щелочных металлов, полученные между двумя кварцевыми пластинками, являются превосходными селективными светофильтрами для ультрафиолетовой области. Такие фильтры изготавливаются в ГОИ в лаборатории акад. С. И. Вавилова тов. Свердловым.

особенности в механизме поглощения металлов — особенности, заставляющие вспомнить о дискретных спектральных линиях спектров газов и паров и дающие надежду, что тщательное изучение дисперсии металлов должно, в конце концов, привести к таким же результатам в области изучения внутреннего строения металлов, к каким привело изучение линейчатых спектров атомов и молекул, позволившее выяснить во всех деталях их структуру.

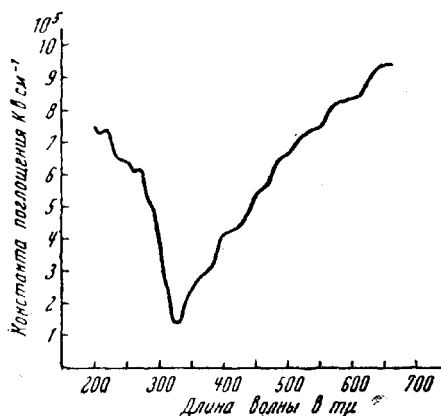


Рис. 1. Поглощение слоя серебра толщиной $d = 3,32 \cdot 10^{-6}$ см.

здесь нельзя говорить об уровне энергии того или другого электрона, а лишь об электронных потенциальных уровнях всей решетки. Это — понятие, введенное в физику квантовой механикой, и лишь при применении ее методов можно надеяться достигнуть в этом направлении ощутительных результатов.

Действительно, попытки связать эти две области — металлооптику и электронную теорию — делались уже давно. Классическая оптика в исследованиях своего наиболее блестящего представителя — Друде — привела к ценным результатам, ныне вошедшим во все учебники, но она оказалась бессильной довести задачу до конца; лишь после того, как в последнее время трудами Блоха², Зоммерфельда⁶¹ и др. была создана электронная теория металлов на квантово-механической основе, явилась возможность делать из нее некоторые выводы оптического характера.

Первой попыткой в этом отношении являются работы Кронига^{34–38}, заинтересовавшегося упомянутыми выше результатами Вуда и Смакулы; после него целый ряд авторов пытался расширить и уточнить его выводы. Так, в 1932–1934 гг. появились работы Фуэжиока¹⁸, Фрелиха¹⁷, Мотта и Ценера⁴⁸ (обращающих особое внимание на физические предпосылки), Сергеева и Черниковского⁵⁴, Писаренко и Хургина²³; критический обзор результатов их работ дан Вильсоном⁷⁰ (см. также статьи Херста^{24, 25}).

Большинство этих работ касается наиболее простых — теорети-

На этом пути стоят, однако, серьезные затруднения, приводящие к тому, что в настоящее время оптическое изучение свойств твердых тел находится еще в зачаточной стадии. Первое из этих затруднений — теоретического характера и заключается в том, что в твердых телах явления испускания и поглощения света, связываемые, по современным представлениям, с переходом из одного энергетического состояния в другое, чрезвычайно усложнены взаимодействием отдельных атомов или ионов друг с другом;

чески — щелочных металлов; Кронигу, а также Хургину и Писаренко удалось притти к выражениям, позволяющим вычислить оптические постоянные (n и nk); как увидим далее (рис. 4), вычисленные значения близки к экспериментальным, но — для nk — лишь в пределах точности эксперимента; для n расхождения гораздо сильнее. Это — чрезвычайно важное обстоятельство: всякая теория может успешно развиваться лишь в том случае, если она опирается на данные опыта и сопровождается ими.

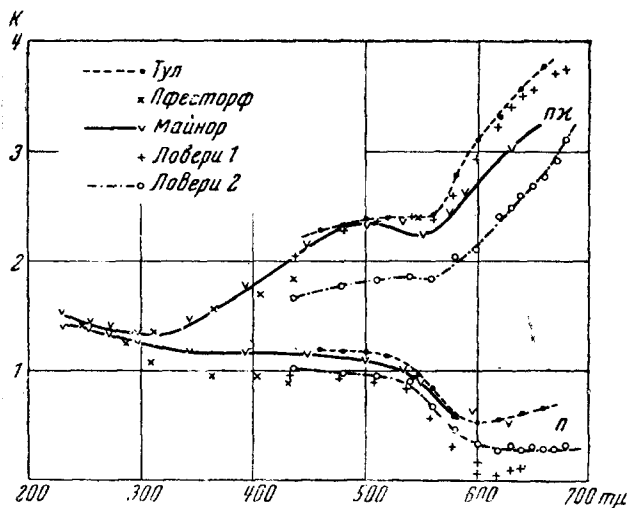


Рис. 2. Кривые дисперсии для меди

Но тут мы стоим перед вторым затруднением, тормозящим дальнейший прогресс новейшей металлооптики: оптические постоянные в огромном большинстве случаев определены с настолько малой точностью, что она является недостаточной даже для приблизительного сравнения теории с опытом. Очень часто имеют место разногласия не только между данными различных авторов, но также и при различных измерениях в одной и той же лаборатории; о характере этих разногласий можно судить по рис. 2 и 3, где начерчен спектральный ход оптических постоянных для меди и серебра по данным различных авторов.

Экспериментальное искусство этих авторов не оставляет никаких сомнений; напрашивается естественный вывод, — к которому и приходит большинство авторов, — что эти разногласия объясняются не погрешностями измерений, а более глубокими причинами, обусловленными физическим состоянием тех образцов металлов, с которыми производились измерения.

Автор настоящего обзора и поставил себе целью осветить современное положение вопроса о влиянии физической природы образ-

цов металла (главным образом их поверхностных свойств) на оптические постоянные; за описанием методов исследования и работ до 1926 г. отсылаем к подробным обзорам, например в *Handbuch der Experimentalphysik* (статья Яффе³⁰).

2. Для определения оптических постоянных металлов в основном применяются два метода, смотря по тому, имеем ли мы дело с прозрачным слоем или с поверхностью массивного зеркала.

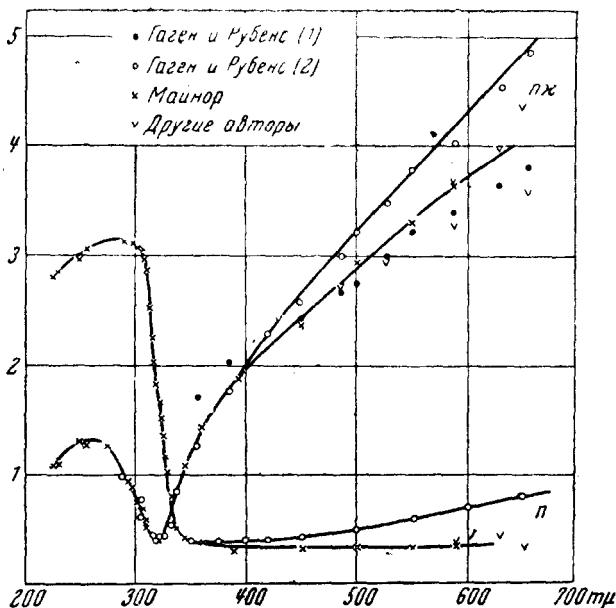


Рис. 3. Кривые дисперсии для серебра

В первом случае n_x определяется непосредственно путем измерения пропускания, а n должно быть вычислено из коэффициента отражения по известной формуле:

$$R = \frac{(n-1)^2 + n^2 x^2}{(n+1)^2 + n^2 x^2}$$

или определено особо.

По этому методу работали Вернике^{65, 66}, Вин, Ратенау⁵⁰ и, наконец, Гаген и Рубенс²⁰. Однако наибольшее число измерений оптических постоянных было произведено на массивных полированных металлических зеркалах по методу, впервые предложенному Жаменом³³ и затем разработанному Друде^{7, 9, 12}; он основывается на определении эллиптичности света, отраженного от металла. В ультрафиолетовой области измерения этих величин производятся по весьма элегантному методу, предложенному Фогтом⁶⁴; другой способ, тоже позволяющий проникнуть в ультрафиолетовую область, был применен Пфесторфом⁴⁹.

По методу Фогга в период 1910—1913 гг. в Геттингене, а также в других местах, был исследован целый ряд металлов и веществ в области от 226 μ до 668 μ , именно: сталь, кобальт, медь, серебро⁴; сталь, золото, никель, железо, платина, висмут, цинк, селен, ртуть, иод⁴⁴, хром и марганец; ртуть и олово¹⁵; селен медь, никель, железо и кобальт⁶².

Все эти измерения страдают, однако, общим недостатком: они были произведены на полированных поверхностях. При этом мы сталкиваемся с тремя затруднениями — одно из них практического характера, а два других — принципиального. Первое затруднение заключается в том, что лишь в самое последнее время научились изготавливать более или менее совершенные полированные металлические поверхности; все вышеупомянутые исследования произведены при пользовании простыми методами полировки (Schmirgel-*parier*); но даже, если бы мы действительно имели дело с идеальной поверхностью, мы должны иметь в виду, что, как показали новейшие исследования, все металлы, а также и другие вещества (стекло) в воздухе покрываются поверхностной пленкой; процесс полировки заключается в сдирании этой пленки, причем полировальный материал действует химически, растворяя пленку и тем самым облегчая ее отделение от поверхности металла. Полированная поверхность отличается от неполированной только отсутствием грубых шероховатостей; поверхностная пленка при этом остается, образуясь все сызнова. Таким образом следует поставить вопрос, что собственно мы измеряем на таких полированных поверхностях — оптические постоянные самого металла или же только его поверхностной пленки, которая, очевидно, в различных случаях имеет различный химический состав, а потому должна оказывать различное влияние на отраженный свет.

Если же мы возьмем зеркала, получаемые испарением в вакууме или катодным распылением, то здесь мы должны считаться с возможностью наличия пленок окислов, образующихся при недостаточно совершенном вакууме. На такие возможности указывает Лаух⁴³, который показал, что оптические постоянные металлических зеркал, полученных катодным распылением в различных газах (воздух, N_2 , H_2), весьма заметно отличаются друг от друга (см. также^{63, 4а, 6а}). Далее, даже при хорошем вакууме, весьма вероятно, что поверхностный слой зеркала будет иметь иную структуру, чем нижележащий толстый слой: действительно, при испарении (или катодном распылении) удастся получить слои, по оптическим свойствам (цвету, т. е. поглощению, и по отражению) весьма резко отличающиеся от слоев так называемого массивного металла. Так, серебро в толстых слоях всегда синее; но можно, при соблюдении некоторых усилий, получать пленки желтые, оранжевые, фиолетовые. А. Ашеулов¹ показал, что эти оттенки обуславливаются не столько толщиной, как это предполагалось раньше, сколько структурой пленок; по всем вероятностям здесь мы имеем серебро в коллоидальном виде.

Нет никаких оснований считать, что и на „массивном“ слое, полученном вышеуказанными способами, при некоторых условиях

на поверхности не образуется верхнего слоя, не связанного „кристаллически“ с подложкой, а представляющего собой металл в мелкораздробленном виде, обладающий совершенно иными постоянными, чем массивный.

Наконец, в-третьих, мы должны сделать еще одно замечание, относящееся, как к массивным полированным зеркалам, так и к слоям, полученным в вакууме: под оптическими постоянными мы понимаем некоторые материальные постоянные, физический смысл которых связывается с кристаллической структурой металла. Но в упомянутых выше зеркалах и слоях мы заведомо имеем микрокристаллическую структуру; для каждого кристаллика мы имеем в общем случае два значения оптических постоянных, подобно тому, как это имеет место, например, для случая каких-либо анизотропных поглощающих кристаллов. При измерениях на зеркалах, полученных тем или иным путем, мы наблюдаем лишь некоторые средние значения, которые в широкой степени могут зависеть от способа приготовления зеркала.

Эти три обстоятельства не могут не оказывать влияния на результаты. Действительно, как было указано, между данными не только различных авторов, но и одного и того же автора на различных зеркалах получаются значительные разногласия; напротив, свежие поверхности, даже при измерении различными методами, дают воспроизводимые и сходящиеся результаты⁶⁷.

На это обстоятельство обращали внимание различные исследователи; так, уже Конрой⁴ объяснял, по указанию Стокса, некоторые невязки в своих измерениях недостаточно совершенной полировкой своих зеркал.

Однако только Друде¹⁰ вплотную подошел к выяснению влияния полировки и поверхностных слоев; в своей классической работе, результаты которой не потеряли своей свежести и до настоящего времени, он выставляет на основании теоретических соображений то положение, что переходные слои, имеющиеся на зеркале, при достаточной толщине сильно уменьшают главный угол падения φ ; главный азимут ψ при этом остается почти неизменным. Что касается влияния несовершенной полировки, то оказывается, что при отражении от зеркала, которое покрыто царапинами равномерно по всем направлениям, азимут меньше, чем при отражении от гладкого зеркала. Друде пытался установить понятие „нормального состояния“, т. е. такого, при котором можно было бы получить правильные значения оптических постоянных. Такое зеркало должно удовлетворять трем условиям: 1) быть свободным от поверхностных пленок, 2) быть свободным от царапин и 3) быть плоским. Трудности при изготовлении применимых на практике зеркал заключаются в одновременном выполнении двух первых условий.

Экспериментальные данные Друде, полученные, к сожалению, только для одной длины волны ($\lambda = 589 \text{ м}\mu$), относятся к этому редко достижимому нормальному состоянию.

Однако его данные во многих случаях оказываются гораздо более достоверными, чем более новые, так как Друде был очень

внимателен к физическому состоянию поверхности своих зеркал. Так, он производил измерения возможно быстро после изготовления зеркал; равным образом он следил за тем, чтобы его возогнанные слои были достаточно сплошные; его замечание, что „система металлических частичек, находящихся друг от друга на расстояниях, соизмеримых с длиной волны, может иметь существенно иные оптические свойства, чем сплошной слой“ — есть не что иное, как новейшее представление о коллоидальной (гранулярной) природе тонких металлических слоев.

В перечисленных выше работах геттингенской школы Фогта экспериментальное искусство при наблюдениях возведено на большую высоту; что касается физической природы поверхности, то на нее внимания обращалось гораздо меньше; во многих случаях в употреблении были зеркала, которые полировались в другом месте (у фирмы Винкель или Шмидт и Генш) и за большой промежуток времени до измерений. Как указано, это не могло не сказываться на абсолютных значениях постоянных. Действительно, по новейшим данным (Ловери)⁴², показатель преломления для медного зеркала изменяется за 30 час. на 16%, а величина n — на 22%.

Лишь в последние 10—15 лет начали обращать серьезное внимание на состояние поверхности. К сожалению, однако, и до сих пор мы имеем лишь разрозненные работы.

Вопрос об изучении поверхностных слоев и их влияния на оптические постоянные серьезно был впервые поставлен Гаусшильдом²¹ в лаборатории Винера в 1912—1914 гг. Гаусшильд разработал теорию влияния поверхностных слоев на состояние поляризации отраженного света и дал на основании ее метод подхода к „истинным“ значениям при постоянном изменении толщины слоя. Экспериментальных результатов, однако, получено не было, так как работа была прервана в 1914 г. и, повидимому, не возобновлена; в диссертации Лауха⁴³, вышедшей несколькими годами позже (1923) из той же Лейпцигской лаборатории, вопрос о состоянии поверхности зеркал (полученных катодным распылением) рассматривается с иной точки зрения и не составляет главного содержания работы.

Значительный сдвиг в области изучения состояния поверхности, приведший также к уточнению измерений, был вызван успехами техники полировки.

В 1926 г. появляется обстоятельное исследование Пфесторфа⁴⁹ с тщательными измерениями оптических постоянных ряда металлов, произведенное в лаборатории Ферстерлинга в Иене.

Пользуясь новым (засекреченным) полировальным материалом Цейсса, который он характеризует как „превосходный“, Пфесторф оказывается уже в состоянии отделить влияние поверхностных слоев, — получающихся, например, при воздействии воды, — от влияния полировки: а) поверхностные слои начинают заметно сказываться лишь при более или менее длительном воздействии внешних агентов и б) их влияние вообще гораздо слабее, чем влияние несовершенства полировки. Отсюда — весьма важный практический вывод: можно получать надежные значения оптических постоянных,

если пользоваться хорошо отполированными зеркалами и производить измерения возможно быстро.

Такие же в основном результаты были получены в самое последнее время (1932—1936) Ловери^{40—42} и его сотрудниками.

Они также пользовались первоклассными зеркалами, полученными двумя новыми методами: а) способом „электролитической полировки“ Жаке^{31, 32}, при котором металл служит анодом в электролитической ванне (ортофосфорная кислота); вследствие этого с его поверхности снимаются все пленки и обнажается чистый металл, и б) способом испарения металлов в пустоте, разработанным фирмой Викакса. И здесь проявляются основные факторы, отмеченные и другими авторами: влияние промежутка времени между изготовлением зеркала и началом измерений и, в особенности, влияние степени полировки. Они обнаружили еще один фактор, оказывающий весьма сильное влияние на оптические постоянные: изменения в поверхностном слое металла, возникающие, повидимому, при предшествующей электролитическому полированию механической обработке поверхности (натяжения). Эти изменения простираются на значительную глубину — до 0,03 мм. Электролитическая полировка могла бы устранить и этот слой, но все же всегда оста-

нется неуверенность, насколько наши данные характеризуют действительно неискаженную решетку металла. Совершенно естественно, мы должны поэтому прийти к мысли — разработать такую методику, которая позволила бы обходиться без полировки. Здесь мы стоим перед двумя путями: или работать в высоком вакууме, или пользоваться естественными плоскостями спайности монокристаллов.

Первая попытка вести измерения в вакууме была произведена Гаусшильдом²¹; как указано, она не получила развития. Такой способ является, однако, неизбежным для щелочных и щелочноземельных металлов.

Здесь на первом месте следует поставить новейшие исследования Айвса и Бриггса^{26, 27, 27а}, произведенные по методу Фогта. Главная ценность их результатов по сравнению с некоторыми предыдущими

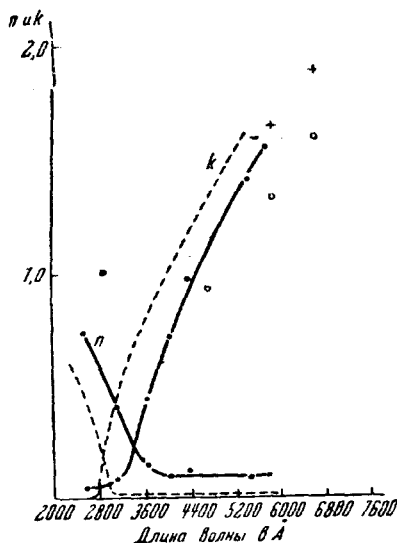


Рис. 4. Оптические постоянные калия: — данные Айвса и Бриггса, о — данные Денкен, 1-е зеркало, + — данные Денкен, 2-е зеркало, — — — вычислено по Кронгу

(Денкен¹⁴) заключается в том, что они получены и для ультрафиолетовой области, по упомянутым выше данным Вуда являющейся для щелочных металлов наиболее интересной.

Кривые для калия приведены на рис. 4, где отмечены также данные других авторов (Денкен¹⁴), а также (пунктирная кривая) данные, вычисленные по Кронигу³⁶. Как это ни странно, в этом случае щелочного металла, столь чувствительного к окислению, совпадение между числами Айвса и Бриггса, с одной стороны, и Денкен (для одного из зеркал), с другой, гораздо лучше, чем между данными различных авторов, например, для меди или серебра (рис. 2 и 3). Это указывает на то, что, действительно, метод получения неполированных слоев имеет свои преимущества — даже при имеющей свои слабые места методике Айвса и Бриггса, у которых, — как и у Денкен, — щелочной металл был зажат между двумя пластинками (одна из них кварцевая, а другая стеклянная), и отражающая поверхность, следовательно, неизбежно была „отравлена“ соприкосновением с кварцем.

Этот недостаток устранен в недавно вышедшей работе О'Брайна³. Существенным в его исследовании является прежде всего то, что он вывел из более чем столетнего забвения очень старый метод определения оптических постоянных — метод Брюстера, гораздо более простой, чем позднейшие поляризметрические методы, в том числе и метод Фогта. Метод Брюстера заключается в том, что создающая эллиптическую поляризацию разность фаз между отраженными от зеркала взаимно перпендикулярными составляющими электрического вектора сильно увеличивается, если пользоваться многократным отражением от двух параллельных зеркал; для ее измерения нет необходимости пользоваться таким прибором, как компенсатор Бабиня, употребляемый в методе Фогта, совершенно достаточен менее громоздкий николю, который вместе с зеркалами может быть помещен в вакууме. Это — чрезвычайно важное обстоя-

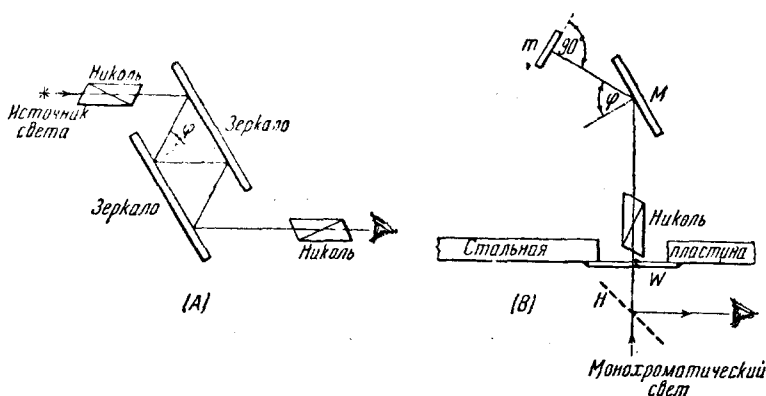


Рис. 5. Методы измерения оптических постоянных. А — метод Брюстера, В — вакуумная модификация метода Брюстера (О'Брайн)

тельство, устраняющее ошибки, которые возникают от натяжения в окошках вакуумного сосуда, от которых не свободны и упомянутые выше данные Айвса и Бриггса.

На рис. 5 изображена схема установки — слева — по Брюстеру, справа — по О'Брайну; введенное последним видоизменение очевидно из чертежа. О'Брайн получил данные для целого ряда металлов, исследование которых методом полированных зеркал затруднялось необходимостью получения их в достаточном количестве, — Be, Mg, Ca, Sr, Ba, Al, Ge, La, Ce, Mn; к сожалению, его данные получены лишь для видимой области; кроме того, здесь также остается в силе третий из указанных выше факторов, сказывающихся на оптических свойствах поверхности, — ее микрокристалличность.

Действительно, мало вероятно, чтобы отдельные кристаллики в поверхностном слое полученного любым путем зеркала были все одинаково ориентированы; вернее предположить, что их оси расположены по всем возможным направлениям. В особенности это должно сказаться при гексагональной системе; здесь мы должны иметь зависимость оптических постоянных от угла падения. На это обстоятельство впервые обратил внимание Тул⁶²; Шульц и Ганнеман^{57, 58} пытались его рассмотреть теоретически. Ряд исследователей, действительно, встречались на опыте с таким явлением; так, Лаух наблюдал на зеркалах, полученных катодным распылением, некоторую анизотропию, проявляющуюся в том, что при различных углах падения получались различные значения показателя преломления, что, очевидно, следует приписать различному положению осей частичек в слое; подобного рода „двойное лучепреломление“ металлических слоев в литературе известно уже давно (Кундт³⁹, Дессау⁵).

Единственный способ избежания этих явлений — работать на сколах монокристаллов. Первые измерения при отражении от плоскостей спайности монокристаллов были произведены (на кристаллах сурьмяного блеска) Друде⁸, который дал также теорию. Более систематические исследования на гранях монокристаллов были произведены в Америке Зигом⁵⁵ (1922) и его сотрудниками; так, Скиннер⁵⁶, Уэльд⁶⁸, Ван-Дике¹³ исследовали постоянные Se, Te, Миллер⁴⁶ — Zn и Bi, наконец, Грэбер¹⁹ — Mg и Zn (и в другой лаборатории — Дикс и Рауз⁶). Эти авторы пользовались в основном методом Фогта, применяя построенный Уэльдом кристаллэллиптометр, позволяющий работать с очень узкими световыми пучками — обстоятельство, чрезвычайно важное ввиду малых размеров применяемых монокристаллов. Оптические постоянные во всех этих случаях для двух главных положений кристалла (главная ось || или $\perp$ плоскости падения) имеют различные значения.

Результаты Грэбера сильно отличаются от данных других авторов. Следует иметь в виду, что методика этих измерений все же не свободна от недостатков. Так, во-первых, Грэбер работал на изломах больших металлических кусков, выбирая в этих поверхностях случайно расположенные грани (lateral faces) отдельных монокристаллов, в большинстве случаев очень мелких. Еще более крупным недостатком измерений Грэбера является то, что они были произведены в воздухе: совершенно очевидно, что влияние атмосферных условий на свежих сколах должно сказаться гораздо силь-

нее, чем на таких поверхностях, которые уже покрыты пленкой. Возможно, что разногласия Грэбера с другими авторами следует приписать именно этому обстоятельству.

Резюмируя все сказанное выше относительно измерений оптических постоянных, мы приходим к заключению, что: а) значения столь важных для физики материальных постоянных, каковыми являются n и nk , в настоящее время (1937 г.) известны лишь с некоторой, далеко не высокой, степенью приближения; б) задача их определения должна быть поставлена заново, в широком, может быть международном, масштабе; в) измерениям должно предшествовать тщательное изучение физического состояния поверхности испытуемого металла; д) так как наиболее достоверными являются, повидимому, данные, полученные на свежих сколах монокристаллов в самом высоком вакууме, должна быть предварительно разработана методика получения таких монокристаллов, достаточно крупных для данных целей.

Во введении мы указали лишь на ту роль, какую точное знание оптических постоянных металлов должно будет сыграть при дальнейшем развитии квантово-механической металлооптики; есть и другие области физики, где уже теперь настойчиво требуются точные данные: весьма интересная теория селективного фотоэффекта, развитая Айвсом и Фрайем^{28, 29} и объясняющая селективность исключительно оптическим состоянием испускающей электроны поверхности, основывает свои вычисления на оптических постоянных этого слоя. Необходимость иметь в руках данные для щелочных металлов, — которые и обнаруживают, главным образом, селективный фотоэффект, — и заставила Айвса самого заняться их измерением.

Далее, мы имеем обширную область оптики коллоидных растворов металлов: разнообразная окраска (т. е. поглощение) ряда коллоидных растворов (золота, серебра, натрия) может быть, как известно, рассчитана наперед по формулам оптики мутных средин (см. работы Ми⁴⁵, Файка¹⁶, Савостьяновой⁵¹). В некоторых случаях результат — положение и вид полосы поглощения — оказывается весьма чувствительным даже к таким изменениям оптических постоянных, которые, казалось бы, с точки зрения экспериментальной техники являются вполне законными (см. статьи Савостьяновой^{52, 53}). И в этих случаях настойчиво требуется иметь в руках более точные данные.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Ащеулов, Труды конференции ГОИ по поверхностным свойствам.
2. F. Bloch, Z. Physik, 52, 555, 1928.
3. H. M. Bryan, J. O. S. A., 26, 122, 1936.
4. J. Courau, Proc. Roy. Soc., 28, 242, 1878—1879; 31, 486, 1881; 35, 26, 1883; 36, 187, 1884; 37, 36, 1884.
- 4а. L. H. Callendar, Nature, 138, 291, 1936.

5. B. Dessau, Wied. Ann., **29**, 353, 1886.
6. T. E. Dix a. L. H. Rouse, J. O. S. A., **14**, 304, 1927.
- 6a. S. Dobinsky, Nature, **138**, 31, 1936.
7. P. Drude, Ann. d. Phys., **32**, 584, 1887.
8. P. Drude, Ann. d. Phys., **34**, 489, 1888.
9. P. Drude, Ann. d. Phys., **35**, 408, 1888.
10. P. Drude, Ann. d. Phys., **36**, 532, 865, 1889.
11. P. Drude, Ann. d. Phys., **38**, 265, 1889.
12. P. Drude, Ann. d. Phys., **39**, 481, 1890.
13. G. D. Van Dyke, J. O. S. A., **6**, 917, 1922.
14. R. W. a. R. C. Duncan, Phys. Rev., **1**, 294, 1913.
15. P. Erochin, Ann. d. Phys., **39**, 213, 1912.
16. R. Feick, Ann. d. Phys., **77**, 673, 1922.
17. H. Fröhlich, Z. Physik, **81**, 297, 1933.
18. Y. Fujioka, Z. Physik, **76**, 37, 1932.
19. M. Graber, Phys. Rev. **26**, 380, 1925.
20. E. Hagen u. H. Rubens, Ann. d. Phys., **8**, 1, 1902.
21. H. Hausschild, Ann. d. Phys., **63**, 816, 1920.
22. E. Hagen u. H. Rubens, Ann. d. Phys., **8**, 432, 1902.
23. J. Hurgin a. N. Pisarenko, Nature, **133**, 690, 1934.
24. V. Hurst, Proc. Roy. Soc., **A 132**, 466, 1933.
25. V. Hurst, Proc. Roy. Soc., **144**, 877, 1934.
26. H. Ives a. H. B. Briggs, J. O. S. A. **26**, 238, 1936.
27. H. Ives a. H. B. Briggs, J. O. S. A., **27**, 181, 1937.
- 27a. H. E. Ives a. H. B. Briggs, J. O. S. A., **27**, 395, 1937 (константы для Rb и Cs).
28. Ф. Айвси Г. Фрай, Успехи физич. наук, **14**, 104, 1934.
29. F. Ives a. H. Briggs, J. O. S. A., **26**, 247, 1936.
30. G. Jaffe, Handb. Experimentalphysik, **19**, 201, 1928.
31. P. Jacquet, C. R., **201**, 1473, 1935.
32. P. Jacquet, C. R. **202**, 402, 1936.
33. J. C. Jamin, Ann. d. chim. et de phys., **22**, 311, 1848; Pogg. Ann. **74**, 528, 1848.
34. R. de L. Kronig, Proc. Roy. Soc., **A 124**, 409, 1929; **133**, 255, 1931.
35. R. de L. Kronig, Handb. d. Physik, **24**, 312, 1933.
36. R. de L. Kronig, Naturwiss. **22**, 11, 1934.
37. R. de Kronig, Nature, **133**, 211, 1934.
38. R. de L. Kronig, Proc. Roy. Soc., **A 152**, 16, 1935.
39. A. Kundt, Wied. Ann, **27**, 59, 1886.
40. H. Lowery a. R. L. Moore, Phil. Mag., **13**, 938, 1932.
41. H. Lowery a. J. Bor, P. M., **20**, 390, 1935.
42. H. Lowery, H. Wilkinson a. D. L. Smare, Phil. Mag., **22**, 769, 1936.
43. Lauch, Ann. d. Phys., **74**, 55, 1924.
44. W. Meir, Diss. Göttingen, 1909; Ann. d. Phys., **31**, 1017, 1910.
45. G. Mie, Ann. d. Phys., **25**, 377, 1908.
46. R. F. Miller, J. O. S. A., **10**, 621, 1925.
47. R. S. Minor, Diss. Göttingen, 1902; Ann. d. Phys., **10**, 581, 1903.
48. N. F. Moot a. Zener, Proc. Cambr. Phil. Soc., **30**, 249, 1934.
49. G. P. Pfestorf, Ann. d. Phys., **81**, 906, 1906.
50. W. Rathenau, Diss. Berlin, 1889.
51. М. Савостьянова, Изв. ФМИ АН СССР, **64**, 262, 1930.
52. М. Савостьянова, Труды ГОИ, 1938.
53. М. Савостьянова, Труды ГОИ, 1938.
54. M. Sergeiew u. M. Tchernikowsky, Phys. Z. Sow. Un., **5**, 106, 1934.
55. L. P. Sieg, J. O. S. A., **6**, 449, 1922.
56. Ch. H. Skinner, Phys. Rev., **9**, 148, 1917.
57. H. Schulz u. H. Hanneman, Z. Physik, **22**, 222, 1924.
58. H. Schulz u. H. Hanneman, Z. Physik, **16**, 200, 1923.
59. A. Smakula, Z. Physik, **86**, 185, 1933.

- 60. A. Smakula, Z. Physik, **88**, 114, 1934.
 - 61. A. Sommerfeld u. H. Bethe, Handb. Physik, **24**, 333, 1933.
 - 62. A. Q. Tool Phys. Rev., **31**, 1, 1910.
 - 63. Л. Тронстадт, Успехи физич. наук. **14**, 371, 1934.
 - 64. W. Voigt, Physik. Z. **2**, 303, 1901.
 - 65. W. Wernicke, Ann. d. Phys. (Pogg. Ann.) Erg., **8**, 65, 1878.
 - 66. W. Wernicke, Pogg. Ann., **159**, 198, 1876.
 - 67. L. Wheeler, Am. Journ. Sci., **186**, 491, 1913.
 - 68. Roy D. Werld, A. J., **6**, 67, 1922.
 - 69. A. H. Wilson, Proc. Roy. Soc., **A 151**, 274, 1935.
-