

Квант

117296 Москва, Ленинский проспект, 64-А, «Квант»
тел. : [095] 930-56-48
e-mail: bquantum@sovam.com (с пометкой “Квант”).

№ 1 - 2000 г. / Из истории науки

А. Васильев

Эрнст Аббе и «Карл Цейсс, Иена»

© “Квант”

*Использование или распространение этого материала
в коммерческих целях
возможно лишь с разрешения редакции*



Образовательный сетевой выпуск
VIVOS VOCO! - ЗОВУ ЖИВЫХ!

<http://www.accessnet.ru/vivovoco>

<http://www.ibmh.msk.su/vivovoco>

<http://vivovoco.rsl.ru>

Эрнст Аббе и «Карл Цейс Йена»

ИМЯ НЕМЕЦКОГО УЧЕНОГО Эрнста Аббе (1840–1905) известно любому оптику независимо от того, в какой конкретной области естествознания он работает и в какой стране живет. Благодаря трудам Аббе, а также деятельности блестящего инженера и организатора оптического производства Карла Цейса (1816–1888) инструментальный арсенал оптики вышел на тот уровень, который знаком нам и сегодня.

Период с середины XIX до начала XX века – это период революционных открытий в различных областях естествознания, обогативших науку новыми методами исследования. Требования науки и техники к созданию приборов, обеспечивающих наблюдения различных объектов, привели к бурному развитию прикладной оптики и оптического приборостроения. Претерпел существенную реорганизацию и сам процесс изготовления научных приборов. На смену небольшим мастерским пришли предприятия промышленного типа – такие, например, как оптическая фирма «Карл Цейс Йена» (это – современное название). Участие Аббе в делах этой фирмы способствовало ее успеху и позволило производить продукцию высочайшего качества.

Эрнст Аббе родился в 1840 году в Айзенахе, а школу и гимназию окончил в Йене. Здесь же он поступил в местный университет, откуда впоследствии перевелся в Геттинген. В Геттингене в те годы работали Вебер, Риман и другие знаменитые математики, общение с которыми очень способствовало развитию незаурядных математических способностей Аббе. В 1861 году он защитил докторскую диссертацию, а в 1863 году получил должность приват-до-

цента в Йенском университете. В Йене Аббе прожил 35 лет, принеся этому городу мировую славу. Будучи профессором Йенского университета, Аббе все свое внимание уделял курсу оптики – теории оптических устройств, аналитической и математической оптике, технике оптического эксперимента.

Период жизни Аббе с 1866 по 1888 год был тесно связан с деятельностью известного немецкого оптика-механика Карла Цейса. В 1846 году Цейс организовал в Йене оптико-механическую мастерскую, выпускавшую вначале лупы и простые микроскопы. Вскоре, благодаря высокому качеству шлифовки и изготовления линз, микроскопы Цейса получили признание и распространение в широких кругах специалистов. С 1858 года фирма Цейса начала выпускать сложные микроскопы, а затем и другие оптические приборы. Карл Цейс всегда старался «основывать практическое конструирование микроскопов целиком на научной теории» и поэтому пригласил для работы в своей фирме ряд крупных специалистов по прикладной оптике и прежде всего – Эрнста Аббе.

К тому времени европейская традиция создания оптических инструментов насчитывала около трех веков, однако базировалась она в основном на интуитивных соображениях. Одним из изобретателей микроскопа, состоявшего из двух линз – двояковыпуклого объектива и двояковогнутого окуляра, был великий итальянский ученый Галилео Галилей. Родоначальником современных микроскопов стал Дреббель, изготовивший микроскоп из двояковыпуклого объектива и плосковыпуклого окуляра, а принципиальное изменение в его конструкцию внес Гук, который в 1663 году установил тре-

тью линзу – коллектив – между объективом и окуляром. Наконец, важное усовершенствование микроскопа было сделано в 1716 году Гертелем, который ввел в конструкцию вращающийся предметный столик и помещенное под ним зеркало подсветки. Это привело к значительному улучшению освещения объекта и получению более качественного изображения. По сути, именно в таком виде микроскопы дошли до наших дней.

Дальнейшее улучшение изображения было связано с устранением погрешностей оптических систем – прежде всего сферической и хроматической aberrаций. При наличии сферической aberrации парааксиальные, т.е. близкие к оси лучи, падающие на линзу, после прохождения через ее различные участки пересекают оптическую ось в разных точках, в силу чего изображение точки получается в виде диска с неоднородным распределением освещенности. Из-за хроматической aberrации луч белого света после прохождения через линзу распадается на ряд лучей разных цветов, которые пересекают оптическую ось в разных точках – за счет зависимости фокусного расстояния линзы от длины волны падающего света, обусловленной дисперсией света.

Помимо повышения качества изображения, задачей оптиков XVII – XIX веков было создание микроскопов с максимально большим увеличением. Известно, что увеличение микроскопа возрастает с уменьшением фокусного расстояния его объектива, поэтому оптики перешли к использованию короткофокусных объективов. Кроме того, разрешающая способность микроскопа зависит от его апертуры, т.е. угла между крайними лучами, идущими от объек-

та к краям объектива. Почти 180-градусная апертура была достигнута уже к середине XIX века. Однако в короткофокусных объективах и объективах с большой апертурой aberrации достигают особенно больших величин.

Попытки повысить качество микроскопов и рассчитать их увеличение по законам геометрической оптики показали, что она не может полностью объяснить образование изображения в микроскопе. Этот вывод натолкнул Аббе на необходимость привлечения физической оптики.

Свои исследования в области конструкции микроскопов Аббе опубликовал в 1873 году. Он показал, какую роль в образовании изображения играют объектив и окуляр микроскопа, дал классификацию aberrаций. Но самой большой заслугой Аббе стало установление тех пределов, которые ставит перед конструкторами оптических систем волновая природа света.

Аббе объяснил, как именно строится изображение предмета линзой. Сначала в плоскости, перпендикулярной оси линзы, возникает интерференционная картина – система чередующихся максимумов и минимумов освещенности, которая играет роль своеобразной дифракционной решетки. Световой поток, проходящий от линзы через эту решетку, взаимодействует с решеткой и только после этого на небольшом расстоянии от плоскости решетки появляется изображение, которое можно увидеть на матовом стекле или сфотографировать. Так создается изображение одной линзой. В микроскопе же, согласно теории Аббе, изображение получается двумя последовательными этапами, схематически показанными на рисунке 1.

На первом этапе свет, освещающий объект P_1P_1 , попадает на линзу микроскопа, претерпев рассеяние (дифракцию) на деталях объекта, так что структура светового пучка оказывается зависящей от этого объекта. Пройдя через объектив микроскопа, световой пучок образует в его фокальной плоскости FF дифракционную картину – систему максимумов, угловые размеры которых зависят от деталей структуры объекта. Направление на эти максимумы определяется условием $nd \sin \varphi = k\lambda$, где n – показатель преломле-

ния среды, d – характерный размер деталей объекта, φ – угол дифракции, $k = 0, 1, 2, \dots$ – номер максимума, λ – длина волны света.

На втором этапе максимумы освещенности рассматриваются как источники, испускающие когерентные лучи. За фокальной плоскостью объектива эти лучи, встречаясь, интерферируют между собой, давая в плоскости P_2P_2 изображение предмета. Аббе назвал картину в фокальной плоскости объектива первичным изображением, а картину в сопряженной плоскости – вторичным.

Для получения правильного изображения предмета необходимо, чтобы вторичное изображение образовывалось в результате взаимодействия лучей от всех максимумов первичного изображения. Особое значение имеют максимумы первых порядков, расположенные под малыми углами и обусловленные более крупными и обычно более важными деталями реального объекта. Максимумы, соответствующие большим углам, определяются более мелкими деталями предмета. Очень мелкие детали – меньше длины световой волны – вообще не могут быть наблюдаемы, так как волны, дифрагировавшие на таких деталях, не доходят до экрана даже при максимально возможной апертуре объектива. Это соображение устанавливает предел разрешения деталей: $d \geq \lambda = \lambda_0/n$, где λ_0 – длина волны света в вакууме. Обычно внутри микроскопа нет никаких препятствий, и поэтому число дифракционных максимумов,

проникающих через объектив, ограничивается только его оправой. Чем меньше предмет или его деталь, тем большие углы дифракции он обуславливает – величина этого угла носит название апертуры u – и тем шире должно быть отверстие объектива. Если апертура меньше угла дифракции φ_1 , соответствующего спектрам первого порядка, т.е. если $\sin u < \sin \varphi_1 = \lambda_0/d$, то в микроскоп проникнут только лучи от центрального максимума и мы не увидим изображения, соответствующего деталям с размером порядка d . Чем больше $\sin u$ по сравнению с λ_0/d , тем больше спектров высших порядков участвует в построении изображения, т.е. тем точнее передается наблюдаемый объект.

Обычно при освещении объекта используются не только пучки света, идущие вдоль оси, но и наклонные, что улучшает условия разрешения. Если освещающий пучок идет под углом α к оси микроскопа и дифрагирует под углом α_0 , то условие максимумов имеет вид $\sin \alpha_0 - \sin \alpha = k\lambda/d$. Для того чтобы первый спектр полностью попадал в объектив, должны выполняться следующие условия: $\alpha = -u$, $\alpha_0 = u$, $k = 1$. При этом $2 \sin u \geq \lambda_0/(nd)$, или $d \geq \lambda_0/(2n \sin u)$. Величину $A = n \sin u$ Аббе назвал числовой апертурой. Согласно теории Аббе, числовая апертура определяет ряд важнейших свойств микроскопа: яркость изображения, степень сходства изображения с предметом и т.п. Чем больше числовая апертура, тем бо-

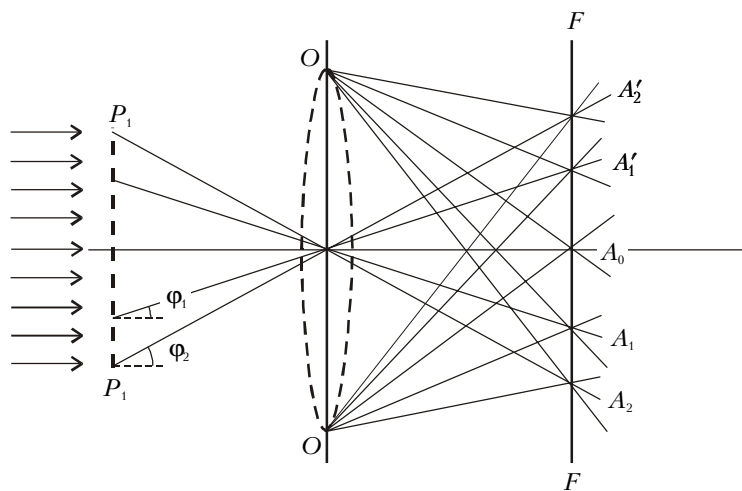


Рис. 1. К дифракционной теории микроскопа Аббе: P_1P_1 – плоскость предмета, FF – фокальная плоскость объектива OO , P_2P_2 – плоскость изображения, φ_k – углы дифракции, A_k – дифракционные максимумы в фокальной плоскости

лее мелкие подробности объекта наблюдения можно рассмотреть в микроскоп. Из теории Аббе следует, однако, что видеть в микроскоп объекты с размерами, меньшими половины длины световой волны, нельзя. Правильность своей теории образования изображений Аббе подтвердил опытами (в которых в качестве объекта наблюдения брались поглощающие решетки), а в 1887 году Аббе сформулировал строгую математическую теорию микроскопа.

Для повышения разрешающей способности микроскопа Аббе стремился увеличить числовую апертуру. Для этого имелось три пути: увеличение собственно апертуры, показателя преломления среды и длины волны светового пучка. Уже на ранних этапах своей деятельности увеличения апертурного угла микроскоп уже достиг предела и дальнейшие успехи в этом направлении невозможны. Для повышения разрешающей способности микроскопа Аббе предложил увеличить показатель преломления n , для чего пространство между наблюдаемым объектом и объективом заполнялось средой с более высоким показателем преломления, чем у воздуха. Так, в 1878 году Аббе совместно со Стефенсоном изготовил микроскоп с применением кедрового масла, что позволило на треть увеличить разрешение микроскопа.

Исключительно интересны идеи Аббе о повышении разрешающей способности микроскопа за счет уменьшения длины волны света, с помощью которого образуется изображение, в частности – идеи о возможности использования ультрафиолетовых лучей. Эти идеи были реализованы незадолго до смерти ученого в одном из микроскопов, созданных сотрудниками фирмы «Карл Цейс». Такие микроскопы впоследствии использовались, например, для изучения состава молекул ДНК и РНК.

Аббе уделял также большое внимание исправлению aberrаций оптических систем. Поскольку разные зоны простой линзы образуют изображение плоского элемента с различными увеличениями, точки отдельных изображений объекта, образованных различными зонами, при наложении друг на друга совпадают лишь на оси оптической

системы, а вне оси резкость изображения соответственно ухудшается. Аббе показал, что для того чтобы все зоны системы давали отдельные изображения объекта одинаковой величины, должно выполняться так называемое условие синусов. Оно состоит в том, что для всех лучей, выходящих из точки на оси оптической системы и направляющихся после преломления к точке изображения, отношение между синусами углов соответствующих лучей с осью должно быть постоянным: $\sin u_1 / \sin u_2 = K n_2 / n_1$, где n_1 и n_2 – показатели преломления сред со стороны объекта и изображения, K – увеличение оптической системы. Две точки, для которых устранена сферическая aberrация и соблюдено условие синусов, называются во времена Аббе апланатическими. Аббе показал, что на оси оптической системы возможна только одна пара апланатических точек, и указал простой способ выяснить, в какой мере выполнено условие синусов. Для этой цели Аббе изготовил показанную на рисунке 2 диаграмму, которая рассматривается сквозь испытываемую систему. Если условие синусов выполнено, то удастся найти такое положение диаграммы, при котором наблюдатель видит ее изображение в виде прямоугольной сетки. Испытав много микрообъективов, сделанных «наугад» старыми мастерами, Аббе обнаружил, что у всех хороших объективов условие синусов выполнено. В настоящее время условие синусов Аббе всегда принимается во внимание при расчетах любых оптических систем.

В плане борьбы с хроматической aberrацией Аббе затратил много усилий, чтобы побудить стекольные мастерские изготавливать новые сорта оптического стекла с определенными свойствами. Для сопоставления свойств различных оптических стекол Аббе предложил выделить в видимом диапазоне спектра ряд опорных точек и пользоваться понятием относительной дисперсии γ , определяемой комбинацией показателей преломления на нескольких выделенных длинах световых волн. Величина γ вошла в прикладную оптику под названием числа Аббе. В 1873 году Аббе впервые удалось сконструировать объектив, у которого ахроматизация достигалась для трех

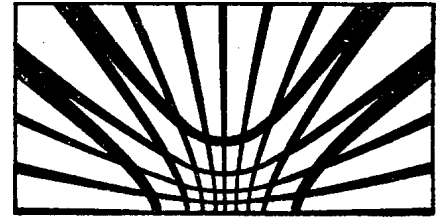


Рис.2. Диаграмма Аббе для проверки условия синусов

цветов. Совмещение фокусов для лучей трех длин волн достигалось благодаря применению разных сортов оптического стекла с разными числами Аббе. Такой объектив Аббе назвал апохроматом. Еще позже, в 1886 году, ему удалось рассчитать и изготовить апохромат, в котором были почти уничтожены и сферическая, и хроматическая aberrации. Он представлял собой триплет, в котором крайние линзы были простыми, а средняя – склеенной из трех линз, изготовленных из стекол с разными числами Аббе.

В своей деятельности Аббе всегда опирался на теоретические представления при конструировании оптических систем. Именно теоретические рассуждения привели его к мысли о необходимости введения в оптическую систему специальных приспособлений – диафрагм, ограничивающих прохождение световых лучей. Он показал, что для образования изображения в системе нужны только те лучи, которые без задержки проходят через прибор до изображения, а лучи, которые проходят лишь через часть системы, задерживаясь, например, оправками линз, не только бесполезны, но и вредны.

Наконец, большой заслугой Аббе стала разработка и создание целого ряда новых оптических инструментов, а также организация научно-исследовательских работ по получению новых сортов оптического стекла. На предприятиях фирмы «Карл Цейс» были спроектированы и начали выпускаться призматические бинокли, фотообъективы новой конструкции, рефрактометры для измерения показателя преломления материалов, инструменты для измерения угловых и линейных величин. Все эти приборы подняли производство оптических инструментов на более высокий уровень.