

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ЗРАЧКА НА ОБЫЧНЫЙ АСТИГМАТИЗМ

С. В. Трубко

В пространстве изображений осесимметричной или двоякосимметричной оптической системы плоскость $Y'Z'$ прямоугольной системы координат совместим с плоскостью параксиального изображения (ППИ), а ось X' направим по оптической оси. Координаты точек на плоскости выходного зрачка обозначим через y', z' и все линейные величины приведем к расстоянию от этой плоскости до ППИ.

Обычный астигматизм как aberrация характеризуется тем, что его составляющие $\epsilon'_{ay}, \epsilon'_{az}$ по осям Y', Z' на ППИ пропорциональны соответствующим координатам на плоскости выходного зрачка

$$\epsilon'_{ay} = \alpha y', \quad \epsilon'_{az} = \gamma z', \quad (1)$$

где коэффициенты пропорциональности α и γ зависят от координат точки поля зрения Y', Z' и от коэффициентов эйконала, определяемых конструктивными параметрами оптической системы и степенью ее симметрии. Такой астигматизм встречается в осесимметричных [1-4] и двоякосимметричных [5] оптических системах. В системах с меньшей степенью симметрии, кроме обычного астигматизма, присутствует еще 45-градусный астигматизм, который в сумме с обычным образует смешанный астигматизм [6]. Влияние формы зрачка на смешанный астигматизм рассмотрено в работе [7].

При обычном астигматизме луч пересекает плоскость выходного зрачка в точке $(-1, y', z')$, а плоскость параксиального изображения в точке $(0, \epsilon'_{ay}, \epsilon'_{az})$. Координаты луча в произвольной приемной плоскости, отстоящей от ППИ на расстоянии X' по оси X' , определяются по формулам

$$Y' = \alpha y', \quad Z' = \gamma z', \quad (2)$$

где $\alpha = (1 - \alpha) X', c = \gamma - (1 - \gamma) X'$.

Запишем уравнение контура выходного зрачка в параметрическом виде

$$y' = \varphi(t, \epsilon, S), \quad z' = \psi(t, \epsilon, S), \quad (3)$$

здесь t — функциональный параметр; ϵ — параметр формы зрачка, при изменении которого от 0 до ∞ форма зрачка меняется от узкой горизонтальной до узкой вертикальной щели без изменения его площади; S — параметр размера зрачка, численно равный площади, ограниченной замкнутой кривой (3). Фиксируя параметр ϵ , выбираем зрачок определенной формы, а фиксируя параметр S , выделяем из всей совокупности лучей зрачка те из них, которые образуют замкнутую кривую, эквидистантную контуру зрачка, при этом определенному значению t соответствует конкретный луч из совокупности лучей этой кривой. Меняя S от 0 до некоторого максимального значения S_0 , равного площади зрачка, получаем полное заполнение зрачка лучами. Соответствующая совокупность замкнутых кривых в приемной плоскости X' образует некоторое пятно рассеяния. Таким образом, уравнения (2) с учетом (3) определяют в пространстве изображений двухпараметрическое семейство лучей (параметры t и S при фиксированном ϵ), т. е. конгруэнцию лучей при обычном астигматизме для зрачка заданной формы.

Напишем уравнение (3) для эллиптического контура зрачка

$$y' = a_0 \cos t, \quad z' = b_0 \sin t, \quad (4)$$

где a_0, b_0 — полуоси эллипса, его площадь $S = \pi a_0 b_0$, а параметр формы $\epsilon = a_0/b_0$. Отсюда

$$a_0 = \sqrt{\frac{S}{\pi} \epsilon}, \quad b_0 = \sqrt{\frac{S}{\pi \epsilon}}. \quad (5)$$

Далее (5) подставляем в (4), а затем в (2) и в результате получаем параметрические уравнения конгруэнции лучей при обычном астигматизме в случае эллиптического зрачка с параметром формы ϵ

$$Y' = p \cos t, \quad Z' = q \sin t, \quad (6)$$

где

$$p = a \sqrt{\frac{S}{\pi} \epsilon}, \quad q = \sqrt{\frac{S}{\pi \epsilon}} c.$$

Исключая функциональный параметр t , получаем уравнение конгруэнции в неявном виде в системе координат $X'Y'Z'$

$$\frac{Y'^2}{p^2} + \frac{Z'^2}{q^2} = 1. \quad (7)$$

При $S = S_0$ это уравнение определяет линейчатую поверхность, которая образована лучами, идущими по контуру зрачка. Форма этой поверхности характеризует структуру

пучка лучей при астигматизме, а ее поперечные сечения плоскостями $X' = \text{const}$ представляют собой пятна рассеяния в произвольной приемной плоскости X' . Легко видеть, что в общем случае пятно рассеяния является эллиптическим с полуосями p , q , а его форма ($\varepsilon_n = p/q$) равна

$$\varepsilon_n = \left| \frac{a}{c} \right| \varepsilon. \quad (8)$$

При

$$X' = a/(1 - \alpha) \text{ и } X' = \gamma/(1 - \gamma) \quad (9)$$

пятно рассеяния (6) вырождается в меридиональную и сагиттальную фокальные линии. Если в уравнениях (9) вместо α и γ подставить их функциональные зависимости от координат Y' , Z' , то эти уравнения определяют фокальные поверхности при обычном астигматизме. Вид функций α и γ определяется степенью симметрии системы и порядком астигматизма. Уравнения (9) показывают, что положения фокальных линий, а следовательно, и форма фокальной поверхности не зависят от формы зрачка [6, 7]. Как видно из уравнений (6), изменения формы зрачка приводят лишь к перераспределению длины фокальных линий. Подставив (9) в уравнения (6), определим длины меридиональной и сагиттальной фокальных линий соответственно

$$l_m = 2 \left| \frac{\alpha - \gamma}{1 - \gamma} \right| \sqrt{\frac{S}{\pi \varepsilon}}, \quad l_s = 2 \left| \frac{\alpha - \gamma}{1 - \alpha} \right| \sqrt{\frac{\varepsilon S}{\pi}}. \quad (10)$$

Из этих выражений видно, что $l_s = 0$ при $\varepsilon = 0$, а $l_m = 0$ при $\varepsilon = \infty$, т. е. в пределе, когда зрачок принимает форму узкой горизонтальной или вертикальной щели, вместо сагиттальной или меридиональной линии получаем точечное изображение. При любой другой форме зрачка стигматическое изображение получить нельзя.

Кроме рассмотренных двух характерных сечений, когда пятно рассеяния вырождается в прямолинейный отрезок, существует еще одна пара характерных сечений поверхности (7). Это те сечения, в которых пятно рассеяния является круглым. Полагая в формуле (8) $\varepsilon_n = 1$, найдем координаты круглых пятен рассеяния

$$\hat{X}_{1,2}' = \frac{\gamma \pm \varepsilon \alpha}{(1 - \gamma) \pm (1 - \alpha) \varepsilon}. \quad (11)$$

Отсюда следует, что, строго говоря, только два сечения линейчатой поверхности (7) являются круглыми, а не три [3]. Анализируя формулу (11), можно проследить перемещения этих двух круглых пятен рассеяния при изменении формы зрачка. При $\varepsilon = 0$ первое и второе круглые пятна вырождаются в точку и совпадают по положению с сагиттальной фокальной линией. При изменении ε от 0 до $(1 - \gamma)/(1 - \alpha)$ эти пятна расходятся — второе уходит на бесконечность, а первое доходит примерно до середины промежутка между фокальными линиями. При дальнейшем увеличении ε эти пятна двигаются навстречу друг другу и при $\varepsilon = \infty$ совпадают с меридиональной фокальной линией, вырождаясь в точку.

Диаметры первого и второго круглых пятен рассеяния равны

$$d_{1,2} = \frac{2 |\alpha - \gamma|}{|(1 - \gamma) \pm (1 - \alpha) \varepsilon|} \sqrt{\frac{\varepsilon S}{\pi}}, \quad (12)$$

причем диаметр первого круглого пятна максимален при $\varepsilon = (1 - \gamma)/(1 - \alpha)$ или приблизительно при $\varepsilon = 1$, т. е. круглая форма зрачка является наиболее невыгодной с точки зрения стигматичности изображения.

Воспользуемся тем фактом, что первое круглое пятно рассеяния при любой форме зрачка расположено между фокальными линиями и с помощью формул (9), (11) определим расстояния от сагиттальной фокальной линии до 1-го круглого пятна $\Delta X_{s1}'$, от 1-го круглого пятна до меридиональной фокальной линии $\Delta X_{1m}'$ и между фокальными линиями $\Delta X_{sm}'$, а затем найдем отношение $(\Delta X_{s1}'/\Delta X_{1m}') = \varepsilon [1 - (\alpha - \gamma)]$, отсюда следует, что

$$\varepsilon = \frac{\Delta X_{s1}'}{\Delta X_{1m}'} (1 + \Delta X_{sm}'), \quad (13)$$

где $\Delta X_{sm}' \approx \alpha - \gamma$. Величину $\Delta X_{sm}'$ следует брать со знаком плюс, если меридиональная фокальная линия расположена правее сагиттальной и минус в противном случае. Таким образом, снимая три отсчета по главному лучу и вычисляя $\Delta X_{s1}'$, $\Delta X_{1m}'$, $\Delta X_{sm}'$, по формуле (13) определяем параметр формы зрачка ε .

В заключение рассмотрим минимаксные свойства пятен рассеяния при обычном астигматизме. Оценка пятен рассеяния производится по величине $f = (p^2 + q^2)/2$ [4]. Если изображение точечное, то $f = 0$. В нашем случае $p^2 = \varepsilon a^2$, $q^2 = c^2/\varepsilon$ (общий множитель S/π для простоты опущен). Фиксируем приемную плоскость $X' = \text{const}$. Изменения формы зрачка приводят к изменению f . Оптимальная форма зрачка будет такой, которая дает круглое пятно рассеяния в этой плоскости, т. е. при $\varepsilon = |c/a|$. Фиксируем ε и перемещаем приемную плоскость. Минимальное пятно рассеяния будет находиться в плоскости $X' = (\gamma + \varepsilon^2 \alpha)/(1 + \varepsilon^2)$, а его форма будет обратной форме зрачка. Если же f рассматривать как функцию двух переменных, т. е. одновременно изменять как ε , так и X' ,

то минимум получается в случае щелевидного зрачка, так как при $\epsilon = \infty$ и $\epsilon = 0$ в плоскостях (9) $f=0$. Вместо эллиптического можно рассмотреть прямоугольный зрачок и провести аналогичное исследование. При этом основные выводы останутся в силе. Разница будет состоять в том, что пятно рассеяния вместо эллиптического будет прямоугольным, а вместо круглого — квадратным.

Литература

- [1] S. Czapski, O. Eppenstein. Grundzüge der Theorie der optischen Instrumente nach Abbe, 21, 3. Aufl. Leipzig, 1924.
- [2] М. М. Русинов. Техническая оптика, 43. Машгиз, М., 1961.
- [3] А. И. Тудоровский. Теория оптических приборов, ч. 1, 10, АН СССР, 1948.
- [4] В. Н. Чуриловский. Теория оптических приборов, 118. «Машиностроение», Л., 1966.
- [5] Л. С. Волохонский. Автореф. канд. дисс., Л., 1941.
- [6] С. В. Трубко. Автореф. канд. дисс., Л., 1976.
- [7] С. В. Трубко. ВИНТИ, № 878—76 деп. 1976.

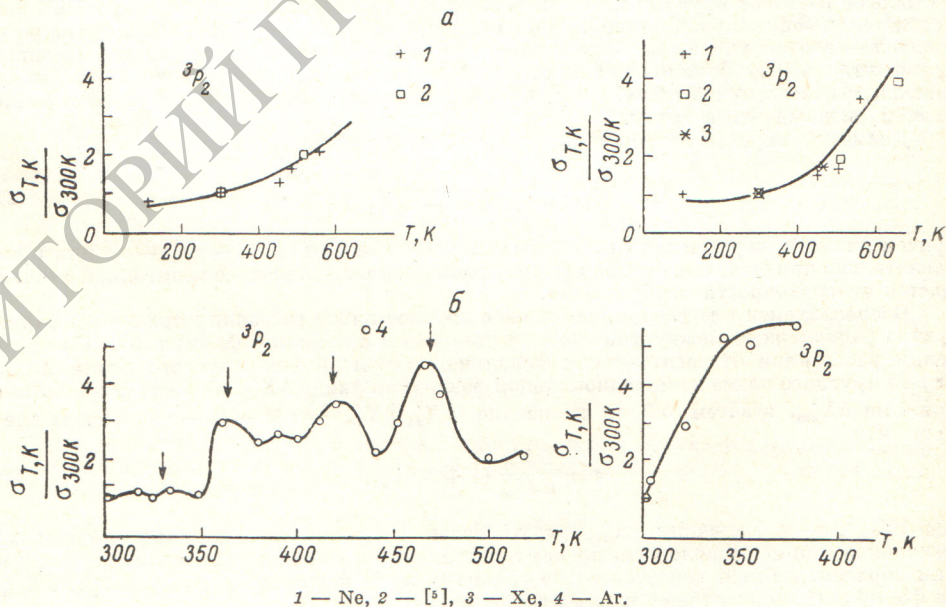
Поступило в Редакцию 27 апреля 1978 г.

УДК 539.186.096

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ СЕЧЕНИЙ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАСТАБИЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ Ne, Ar И Xe МОЛЕКУЛОЙ ВОДОРОДА

О. П. Бочкова и Л. А. Иванова

В стационарном послесвечении разряда постоянного тока в смесях Ne—H₂, Ar—H₂, Xe—H₂ исследована зависимость от температуры сечений разрушения 3P_0 - и 3P_2 -состояний Ne и Ar 3P_2 -состояния ксенона молекулой водорода. Методика измерений и экспериментальная установка аналогичны использованным нами ранее в работах [1, 2]. Температурная зависимость определялась в относительных величинах $\sigma_T/\sigma_{300\text{K}}$ для постоянных условий эксперимента.



В смеси водорода с неоном разрушение 3P_2 -состояний неона происходит в основном в результате ионизации Пеннинга. В условиях отсутствия колебательного возбуждения H₂ роль каналов ассоциативной ионизации и диссоциативного возбуждения и ионизации порядка 10÷15% [3]. Зависимость от температуры сечений разрушения метастабильных уровней неона дана на рисунке, а. Как и в случае гелия [4], наблюдается монотонный рост сечений разрушения в интервале температур 100÷500 К для всех трех уровней. Полученные результаты относительного изменения сечений разрушения 3P_j -уровней Ne водородом с температурой согласуются с измерениями [5].