

# СТРУКТУРА И ПАРАМЕТРЫ МАШИННОГО КАТАЛОГА СТЕКЛА

В. Г. РЕЗНИК, С. А. РОДИОНОВ

Рассматриваются вопросы организации и использования каталога оптических материалов (стекол) при проектировании оптических систем на ЦВМ. Обсуждается выбор параметров стекол для хранения информации в каталоге, вывода на печать и использования в расчете. Оценивается точность описания дисперсии стекла этими параметрами. Указываются принципы построения программ, формирующих и использующих каталог. Приводятся результаты проверочных расчетов для всех марок оптического бесцветного стекла на ЦВМ «Минск-22».

При разработке автоматизированного комплекса проектирования оптических систем одним из необходимых элементов является создание машинного каталога оптических материалов, который для краткости будем называть каталогом стекла. Это понятие объединяет в себе некоторый объем информации, хранящийся на каком-либо носителе, чаще всего на магнитной ленте, и программы, его обслуживающие. По своим функциям программы разделяются на две группы: формирующие, пополняющие и изменяющие каталог, а также выводящие его на печать, с одной стороны, и программы-посредники, обеспечивающие использование каталога в процессе автоматизированного проектирования, – с другой. Последние должны быть оформлены на уровне стандартных программ.

Структура каталога определяется теми параметрами стекла, которые в нем используются. Для бесцветного оптического стекла и аналогичных ему материалов основными характеристиками являются функции  $n(\lambda, t)$  показателя преломления  $n$  от длины волны  $\lambda$ , и температуры  $t$ , а также коэффициент линейного расширения  $\alpha$ , т.е. дисперсия и термооптические характеристики. Исходной информацией для большинства оптических стекол служит ГОСТ 13659-68, содержащий значения показателей преломления, относительной частной дисперсии и коэффициентов дисперсии стекол для 34 длин волн в интервале 0,36501-2,6 мкм. Так как информация о термооптических характеристиках указана только для линий  $F$ ,  $D$ ,  $C$ , что вообще говоря, недостаточно, в дальнейшем рассмотрении ограничимся лишь дисперсией  $n(\lambda)$ .

Указанная информация о дисперсии явно избыточна, и использование ее в машинном каталоге стекла в чистом виде нецелесообразно. Для экономии памяти и упрощения работы необходимо в качестве каталожных параметров взять параметры какой-либо дисперсионной формулы, с достаточной точностью описывающей зависимость  $n(\lambda)$  во всем интервале длин волн. При выборе формулы существенное значение имеет требование линейности ее по отношению к параметрам, так как только в этом случае последние достаточно легко определяются, например, методом наименьших квадратов. Исходя из

этого, за основу была принята формула Герцбергера [1, 2], представляющая собой разложение функции  $n(\lambda)$  в ряд Лорана:

$$n(\lambda) = \sum_{-r}^p a_k x^k, \quad (1)$$

где  $x = \lambda^2 - \lambda_0^2$ .

Различные формулы, полученные из (1), могут отличаться выбором степеней  $r$  и  $p$ , а также постоянной  $\lambda_0$ , причем увеличение  $r$  приводит к расширению области применения формулы на коротковолновую часть спектра, а  $p$  - на длинноволновую. Проверка показала, что приемлемую точность во всем интервале длин волн обеспечивает шестипараметрическая формула при  $r = 3$ ,  $p = 2$ ,  $\lambda_0^2 = 0,028 \text{ мкм}^2$ , которая приводится к виду

$$n(\lambda) = \mu_1 + \mu_2 \lambda^2 + \mu_3 \lambda^4 + \mu_4 L + \mu_5 L^2 + \mu_6 L^3, \quad (2)$$

где  $L = x^{-1} = (\lambda^2 - \lambda_0^2)^{-1}$ .

Для определения неизвестных параметров  $\mu_1, \dots, \mu_6$  достаточно шести значений показателя преломления для каждого стекла. Но так как измеренные значения показателей обладают погрешностью, рационально использовать как можно большее их количество, чтобы за счет использования избыточности информации повысить точность вычисления параметров. Составим систему уравнений для  $m$  показателей ( $m \geq 6$ ):

$$\Lambda M = N; \quad (3)$$

здесь матрицы  $\Lambda, M$  и  $N$  имеют вид

$$\Lambda = \begin{pmatrix} 1 & \lambda_1^2 & \lambda_1^4 & L_1 & L_1^2 & L_1^3 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & \lambda_m^2 & \lambda_m^4 & L_m & L_m^2 & L_m^3 \end{pmatrix}, M = \begin{pmatrix} \mu_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \mu_0 \end{pmatrix}, N = \begin{pmatrix} n_{\lambda_1} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ n_{\lambda_m} \end{pmatrix},$$

где

$$L_i = (\lambda_i^2 - \lambda_0^2)^{-1}, n_{\lambda_i} = n(\lambda_i). \quad (4)$$

Чтобы учесть погрешность в известных значениях  $n_{\lambda_i}$  для различных длин волн, необходимо обе части системы (3) умножить на диагональную матрицу весов  $Q$ , элементы которой обратно пропорциональны корню квадратному из погрешностей соответствующих показателей  $\delta n_{\lambda_i}$  [3]:

$$Q \Lambda M = Q N, \quad (4)$$



$$P_\lambda = \frac{n_\lambda - n_F}{n_F - n_C}.$$

есть линейная функция  $\nu_D$  [1]:

$$P_\lambda = A_1(\lambda)\nu_D + A_2(\lambda), \quad (6)$$

где  $A_1(\lambda)$  и  $A_2(\lambda)$  - универсальные функции длины волны, одинаковые для всех стекол.

При известных  $n_D, \nu_D, P_\lambda$  и  $P_D$  легко находятся показатели для любой длины волны:

$$n_\lambda = n_D + \frac{n_D - 1}{\nu_D}(P_\lambda - P_D). \quad (7)$$

Чтобы выражение (6) сделать применимым для всех стекол, Герцбергер дополнил параметры  $n_D$  и  $\nu_D$  двумя поправками:  $\pi_{A'}$  и  $\pi_h$

$$P_\lambda = A_1(\lambda)\nu_D + A_2(\lambda) + A_3(\lambda)\pi_h + A_4(\lambda)\pi_{A'}, \quad (8)$$

где  $A_3(\lambda)$  и  $A_4(\lambda)$  - также универсальные функции.

По Герцбергеру, универсальные функции  $A_i(\lambda)$  имеют вид, аналогичный (1), при  $r = 2, p = 1, \lambda_0^2 = 0,035$ , т.е. каждая из них определяется четырьмя параметрами:

$$A_i(\lambda) = a_1^{(i)} + a_2^{(i)}\lambda^2 + a_3^{(i)}L + a_4^{(i)}L^2, \quad (9)$$

которые могут быть найдены, если известны значения  $A_i(\lambda)$  для четырех длин волн. Так как из (8) непосредственно следует

$$A_3(A') = A_3(F) = A_3(C) = A_4(F) = A_4(C) = A_4(h) = 0,$$

$$A_3(h) = A_4(A') = 1; A_1(F) = A_1(C) = A_2(F) = 0;$$

$$A_2(C) = -1,$$

то универсальные функции  $A_3(\lambda)$  и  $A_4(\lambda)$  полностью определены. Значения  $A_1(h), A_1(A'), A_2(h), A_2(A')$  неизвестны. Для их определения методом наименьших квадратов необходимо большое количество обычных стекол. Для разделения стекол на обычные и необычные можно воспользоваться тем, что на графике зависимости  $P_\lambda$  от  $\nu_D$  (рис. 1) обычные стекла образуют узкий шнур, осью которого является линия, описываемая уравнением (6). Необычные стекла образуют облако вокруг этого шнура. Для определения положения шнура сначала его параметры находятся при помощи метода наименьших квадратов с учетом всех стекол, затем отбрасываются стекла, расстояния которых до линии (6) превышают среднеквадратичное. Этот процесс повторяется до тех пор, пока не останется 40% всех стекол, так как опыт показывает, что именно такую часть в среднем составляют обычные стекла. Таким образом были найдены наглядные параметры  $n_D, \nu_D, \pi_{A'}, \pi_h$  для всех стекол по ГОСТ 13659-68, а также параметры универсальных функций. При таком разделении стекол на обычные и необычные все стекла, отмеченные в ГОСТе как имеющие особый ход

дисперсии, относятся к необычным, что может служить свидетельством верности метода.

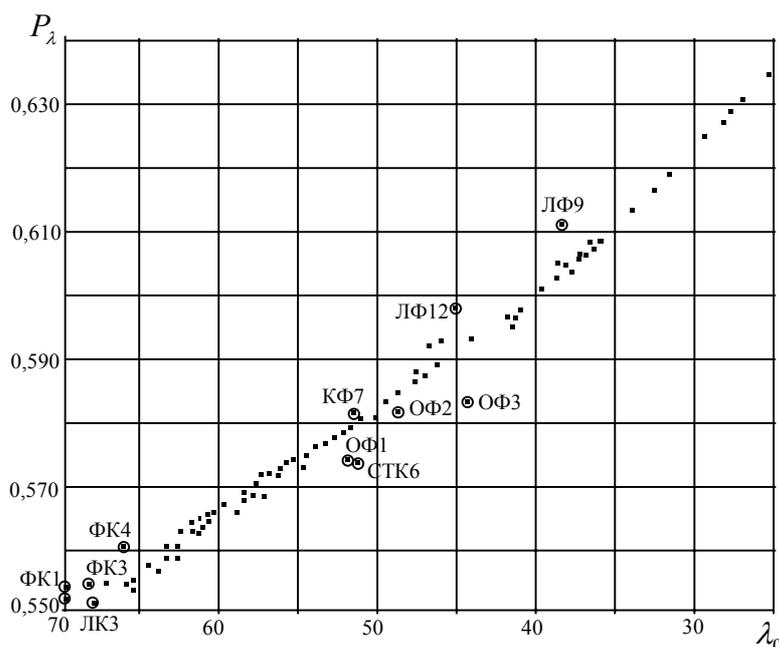


Рис.1. График зависимости  $P_\lambda(v_D)$

Проверка точности описания дисперсионной зависимости четырьмя наглядными параметрами показала, что они обеспечивают отклонение не более  $2 \cdot 10^{-5}$  в видимом диапазоне, но значительное отклонение (до  $5 \cdot 10^{-4}$ ) в ИК- и УФ-диапазонах. Поэтому данные параметры в основном используются при выводе каталога на печать.

При использовании каталога в процессе расчета оптических систем крайне редко возникает необходимость знать показатель преломления во всем диапазоне длин волн от 0,365 до 2,6 мкм. Большинство оптических систем применяется в более ограниченных диапазонах, поэтому представляется интересным описать дисперсию  $n(\lambda)$  в данном диапазоне от  $\lambda_{\min}$  до  $\lambda_{\max}$  более удобными рабочими параметрами, например коэффициентами «хроматизма» стекла [4], представляющими собой разложение в ряд  $n(\lambda)$  по степеням безразмерной координаты

$$\chi = \frac{\lambda - \lambda_0}{\Delta\lambda} :$$

$$n(\lambda) = n_0 (1 + b_1 \chi + b_2 \chi^2 + b_3 \chi^3 + b_4 \chi^4), \quad (10)$$

$$\lambda_0 = \frac{\lambda_{\max} + \lambda_{\min}}{2}, \Delta\lambda = \frac{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}{2}, n_0 = n(\lambda_0),$$

параметры  $b_1, \dots, b_4$  могут быть легко найдены решением линейной системы по значениям показателя преломления для четырех длин волн в рабочем интервале. С целью проверки точности представления дисперсии этими параметрами они были найдены для стекол по ГОСТ 13659-68 в

различных интервалах и затем по формуле (10) рассчитаны показатели, соответствующие промежуточным длинам волн. Отклонения не превышали  $1 \cdot 10^{-5}$  в интервале от  $G'$  до  $A'$  и  $5 \cdot 10^{-6}$  в интервалах от  $F$  до  $C$  и от 1 до 2 мкм.

Рассмотрим теперь программы, формирующие и использующие каталог. Исходная информация для программы-формирователя состоит из общей и индивидуальной частей. Общая информация, необходимая для организации каталога, включает в себя заголовки, значения стандартных длин волн и соответствующие им веса, информацию о разбиении каталога на группы стекол по типам (ГОСТ 3514-67) и т. п. Для каждого стекла указывается номер группы и номер его в группе, марка и показатели преломления для стандартных (или нестандартных указанных здесь же) длин волн, а также признак класса (от нулевого до четвертого), показывающий относительную доступность стекла для применения. Например, к нулевому классу можно отнести стекла по ГОСТ 3514-67; каждый следующий класс включает все стекла предыдущего класса и добавляет к ним еще некоторые. Таким образом, в четвертый класс входят все оптические материалы, имеющиеся в каталоге. Разбиение на классы доступности в значительной мере произвольно и зависит от организации, использующей каталог.

Программа-формирователь определяет для каждого стекла каталожные параметры и помещает их в каталог на магнитную ленту. После набора достаточного количества стекол всех групп происходит определение параметров универсальных функций и наглядных параметров, которые также помещаются в каталог на магнитную ленту. При пополнении или изменении каталога наглядные параметры  $\pi_A$  и  $\pi_h$  новых стекол определяются без совместной обработки каталога, по уже известным универсальным функциям.

Существуют два основных режима использования каталога: определение рабочих параметров стекол по их номерам и поиск в каталоге стекла из данного класса доступности, имеющего ближайшие к заданным рабочие параметры. В программе, решающей первую задачу, по номеру стекла определяется адрес его описания в каталоге, считываются каталожные параметры и по ним для заданных  $\lambda_0$  и  $\Delta\lambda$ , рассчитываются рабочие параметры. При обслуживании массива номеров стекол последний предварительно упорядочивается для сокращения количества обращений к каталогу. Вторая задача возникает при использовании параметров стекол как оптимизирующих при автоматическом расчете оптических систем.

Важным моментом является установление критерия «близости» рабочих параметров стекла к заданным. Проще всего рассматривать близость в среднеквадратичном смысле, т. е. принять в качестве критерия величину

$$\varphi = \left( \frac{n_0 - n_{0зад}}{\delta n} \right)^2 + \left( \sum_{i=1}^4 \frac{b_i - b_{iзад}}{\delta b_i} \right)^2.$$

Масштабы  $\delta n_0$  и  $\delta b_i$  параметров должны устанавливаться обратно пропорционально влиянию соответствующих параметров на оптимизируемые

характеристики системы и определяются каждый раз во внешней оптимизирующей программе.

В заключение следует сказать, что формирующие и использующие каталог программы безразличны к его конкретному содержанию и объему, поэтому они могут обслуживать несколько каталогов, расположенных на одной магнитной ленте и отличающихся номерами, например основные мировые каталоги стекла. Кроме того, в каталоги могут быть включены и термооптические характеристики в виде коэффициента линейного расширения и производных каталожных параметров по температуре. Для этого необходимо знать зависимость показателя преломления от температуры не менее чем для шести длин волн.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. Герцбергер М. Современная геометрическая оптика. Пер. с англ. М., Изд. иностр. лит., 1962.
2. Herzberger M., Calzberg G, JOSA, 1962, 52 № 4, p. 420.
3. Худсон Д. Статистика для физиков. Пер. с англ. М., «Мир», 1970.
4. Родионов С. А., Автореферат диссертации. Л., ЛИТМО, 1971.