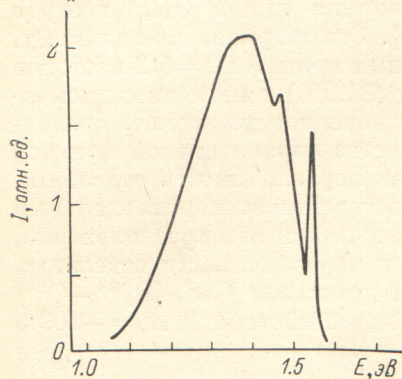


$k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — абсолютная температура), который хорошо выполняется при температуре кипения жидкого азота, безразмерный фактор Хуанга—Риса определяется по формуле

$$S_0 = \ln \frac{I}{I_0} = 3.5,$$

где  $I_0$  и  $I$  — интегральные по частотам интенсивности люминесценции в бесфонной линии и во всем спектре соответственно. Найденное значение фактора говорит о том, что изучаемый центр характеризуется средней величиной электрон-решеточного взаимодействия. Используя это значение, можно вычислить величину модуля относительного смещения минимумов адиабатических потенциалов центра, которая в нормальных координатах составляет  $2.5 \cdot 10^{-24}$  с · Дж<sup>1/2</sup>.



Спектр фотолюминесценции алмаза (80 К).

Иногда центры электрон-фононной люминесценции характеризуют фактором Дебая—Валера, введенном из теории эффекта Мёссбауэра [3]. Величина этого фактора равна  $3.0 \cdot 10^{-2}$ .

Электронные состояния центра, участвующие в переходе, обладают противоположной четностью, поскольку люминесценция имеет электрическую дипольную природу. На это указывает малое значение излучательного времени жизни ( $9.7 \cdot 10^{-8}$  с), найденное по времени затухания люминесценции в соответствующих условиях эксперимента. Если указанное время жизни использовать для расчета модуля матричного элемента дипольного момента электрон-фононных переходов, то оно приводит к значению равному  $4.0 \cdot 10^{-30}$  Кл · м. Чисто электронный переход может характеризоваться собственным матричным элементом, величина которого равна  $5.7 \cdot 10^{-31}$  Кл · м.

Выход и время затухания люминесценции лишь незначительно уменьшается при нагреве кристаллов от азотной температуры до комнатной. Это указывает на хорошую изоляцию уровней центра от кристаллических зон и отсутствие внутрицентрового тушения.

#### Литература

- [1] А. М. Стоунхэм. Теория дефектов в твердых телах, т. 1. «Мир», М., 1978.
- [2] Д. Бирманн. Пространственная симметрия и оптические свойства твердых тел, т. 2. «Мир», М., 1978.
- [3] А. Марадудин. Дефекты и колебательный спектр кристаллов, т. 2. «Мир», М., 1978.

Поступило в Редакцию 3 мая 1979 г.

УДК 535.8

### ОПТИМИЗАЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОРТОГОНАЛЬНЫХ ПОЛИНОМОВ

С. Н. Бездидько

Опыт использования существующих программ автоматической коррекции aberrаций показывает, что получаемое с их помощью решение в значительной степени зависит от выбранной оптиком исходной опти-

ческой системы (локальная ограниченность программ, обусловленная многоэкстремальностью минимизируемой оценочной функции), что делает указанные программы эффективными только на последних стадиях коррекции. Одним из возможных путей расширения локальной ограниченности является использование ортогональных полиномов Цернике при разработке программ автоматической коррекции [1]. В настоящем сообщении описываются принципы построения разработанной нами программы, в которой непосредственно применяются полиномы Цернике.

При построении оценочной функции (ОФ) широко используется среднеквадратичное отклонение волнового фронта  $K_r$  [2-4] для фиксированной точки поля

$$K_r = \frac{1}{S} \iint_S V^2(\mu', \nu') d\mu' d\nu' - \left[ \frac{1}{S} \iint_S V(\mu', \nu') d\mu' d\nu' \right]^2, \quad (1)$$

где  $V(\mu', \nu')$  — волновая aberrация;  $\lambda'$ ,  $\mu'$ ,  $\nu'$  — направляющие косинусы луча в пространстве изображения;  $S$  — область интегрирования, определяемая множеством всех лучей, прошедших через системы, одновременно обозначает и площадь области  $S$ .

Для характеристики качества оптических систем по всему полю нами использована интегральная величина  $K$ , которую можно назвать среднеквадратичным отклонением волнового фронта по полю

$$K = \frac{1}{U} \iint_U K_r dU, \quad (2)$$

где  $U$  — область интегрирования, определяемая множеством всех точек изображения, обозначает одновременно и площадь области  $U$ .

Обозначая через  $r$ ,  $\psi$  приведенные полярные координаты в плоскости изображения и применяя эллиптическую аппроксимацию контура виньетированного зрачка [1,5], из (1) и (2) получаем

$$K = \frac{2}{\pi} \int_0^1 \int_0^{12\pi} \int_0^{12\pi} V^2 r dr \rho d\rho d\varphi - 2 \int_0^1 \left( \frac{1}{\pi} \int_0^{12\pi} \int_0^{12\pi} V \rho d\rho d\varphi \right)^2 r dr, \quad (3)$$

где  $\rho$ ,  $\varphi$  — приведенные полярные координаты в выходном зрачке.

Используя разложение волновой aberrации по полиномам Цернике

$$V = \sum_{lkm} A_{lkm} \varepsilon_m R_{m+2l}^m(r) R_{m+2k}^m(\rho) \cos m\varphi = \sum_{lkm} A_{lkm} U_{lkm}, \quad (4)$$

где  $A_{lkm}$  — постоянные коэффициенты;  $R_{m+2i}^m(r)$  — радиальные полиномы Цернике, ортогональные на промежутке  $[0, 1]$ ;  $U_{lkm} = \varepsilon_m R_{m+2l}^m(r) R_{m+2k}^m(\rho) \cos m\varphi$  — полиномы Цернике, ортогональные в трехмерной области  $0 \leq r \leq 1$ ,  $0 \leq \rho \leq 1$ ,  $0 \leq \varphi \leq 2\pi$ , для вычисления  $K$  получаем простое и важное соотношение

$$K = \frac{1}{2} \sum_{lkm} \frac{A_{lkm}^2}{(m+2l+1)(m+2k+1)}, \quad (5)$$

причем  $m$  и  $k$  не равны одновременно нулю.

Длина ряда (4) определяется в начале работы программы, исходя из задаваемой оптиком точности вычисления величины  $K$ . Определение коэффициентов  $A_{lkm}$  разложения (4) производится по методике, разработанной в [6], модифицированной на рассматриваемый нами случай.

Соотношение (5) дает возможность построить ОФ в виде

$$\Phi = \mathbf{F}^T \mathbf{F} = \sum_i f_i^2 = \Phi_p + \sum_{\lambda_i} q_{\lambda_i} \Phi_a^{\lambda_i}, \quad (6)$$

где  $\mathbf{F}$  — вектор-столбец, компонентами которого являются функции  $f_i$ ;

$$\Phi_a^{\lambda_i} = \sum_{lkm} \frac{A_{lkm}^2}{(m+2l+1)(m+2k+1)} \quad (7)$$

абберационная часть ОФ для длины волны  $\lambda_i$ ;  $q_{\lambda_i}$  — значения относительного спектрального потока для длины волны  $\lambda_i$ ;  $\Phi_p$  — оставшаяся часть ОФ, в которую входят параксиальные величины, aberrации главного луча, хроматизм положения и т. п.

Использование полиномов Цернике дало возможность представить  $\Phi_a$  в виде

$$\Phi_a = \Phi_{III} + \Phi_V + \dots \Phi_N, \quad (8)$$

где  $\Phi_N$  — вклад aberrаций  $N$ -го порядка в ОФ. Отметим, что aberrации  $N$ -го порядка определяются соотношением  $2(m+l+k)=N+1$ .

Разделение вклада aberrаций различных порядков в ОФ позволяет проводить на некоторых этапах расчета оптических систем минимизацию вклада aberrаций определенных порядков.

Так, например, потенциальные возможности оптических систем в значительной степени обуславливаются наличием небольших aberrаций высших порядков [7-9]. Если же система обладает большими aberrациями высших порядков, то основной становится задача такого видоизменения системы, чтобы aberrации высших порядков были уменьшены. С другой стороны, на последних этапах коррекции необходимо стремиться к достижению оптимальной балансировки aberrаций, в частном случае к взаимобалансировке aberrаций высших порядков aberrациями третьих порядков [1, 2].

Использование полиномов Цернике позволило осуществить в программе ряд различных режимов работы, количество и последовательность которых задаются оптиком в исходных данных и с помощью которых возможно целенаправленное решение указанных выше задач.

Режим 1 — общая минимизация ОФ.

Режим 2 — минимизация вклада aberrаций высших порядков в ОФ.

Режим 3 — минимизация вклада III порядков.

При желании оптик может организовать и ряд других режимов работы программы, задавая в исходных данных соответствующие весовые коэффициенты.

Отметим, что режим 2 и его модификации дают возможность на первых этапах коррекции переходить от неудачно выбранной схемы к более рациональной схеме с уменьшенными aberrациями высших порядков, а режим 3 и его модификации — достигать на этапе тонкой коррекции лучшей балансировки aberrаций и улучшенного качества изображения.

Как показано в литературе [10-12], одним из самых эффективных методов минимизации функций вида (6) оказывается метод наименьших квадратов со сдерживанием величины шага. Нами использована одна из модификаций этого метода, предложенная в работе [12]. В процессе минимизации некоторые переменные (показатели преломления реальных стекол) могут принимать только дискретные значения. Поэтому используемый нами метод минимизации [12] модифицирован на случай дискретного изменения некоторых переменных.

#### Литература

- [1] С. Н. Бездидько. Оптико-механич. промышл., № 4, 22, 1976.
- [2] Н. Н. Hopkins. Opt. Acta, 13, 34, 1966.
- [3] J. Meiron. Appl. Opt., 7, 667, 1968.
- [4] Н. Н. Вильчевская, Н. В. Цено. Опт. и спектр., 33, 339, 1972.
- [5] Н. В. Цено. Ж. научн. и прикл. фотогр. и кинематогр., 18, 360, 1973.
- [6] С. Н. Бездидько. Оптико-механич. промышл., № 7, 75, 1975.
- [7] Д. Ю. Гальперн. Тр. ГОИ, 37, вып. 167, 115. «Машиностроение», Л., 1970.
- [8] Г. Г. Слюсарев. Расчет оптических систем. «Машиностроение», Л., 1975.
- [9] Н. Берек. Основы практической оптики. ГТТИ, М.—Л., 1933.
- [10] K. Levenberg. Quart. Appl. Mathem., 2, 164, 1944.
- [11] D. P. Feder. Appl. Opt., 2, 1209, 1963.
- [12] J. Meiron. J. Opt. Soc. Am., 55, 1105, 1965.

Поступило в Редакцию 20 июня 1979 г.