

УДК 535.317 : 681.7.012

С. В. Михляев
(Новосибирск)

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ АБЕРРАЦИИ
КВАЗИПЛОСКОГО СВЕТОПРОВОДА

Рассматриваются геометрические aberrации плоского светопровода, обусловленные непараллельностью ограничивающих его поверхностей. Полученные результаты могут быть использованы для выработки требований к светопроводам, определения их конструктивных параметров, а также для проведения энергетических, поляризационных и других расчетов сложных светопроводящих структур.

Для обеспечения оптических связей между элементами 3-D оптико-электронных устройств используются различные коммуникационные системы, в том числе на основе плоского светопровода, в котором распространяются зигзагообразные световые волны [1]. Такие системы могут содержать оптические элементы для ввода/вывода световых пучков, их мультиплицирования (расщепления), формирования требуемой диаграммы направленности излучения и т. п. [2—6]. Естественно, что характеристики коммуникационной системы в целом существенным образом зависят от параметров составляющих ее элементов и в первую очередь от параметров светопровода, качества его изготовления.

В данной работе представлены результаты исследования геометрических aberrаций светопровода, обусловленных непараллельностью ограничивающих его плоскостей. Полученные результаты могут служить ориентиром при выборе конструктивных параметров светопроводов, а также при проведении энергетических, поляризационных и других расчетов сложных светопроводящих структур.

Пусть светопровод, как показано на рис. 1, представляет собой прозрачную среду, ограниченную двумя плоскостями. Нижняя поверхность светопровода совпадает с плоскостью XY , ось Z направлена вверх по нормали к этой поверхности. Вторая плоскость, ограничивающая светопровод сверху, расположена под некоторым углом к нижней так, что линии ее пересечения с плоскостями ZY и ZX составляют углы α и γ соответственно с осями Y и X . Падающий луч света лежит в плоскости $x = \text{const}$ и составляет угол β с нормалью к нижней поверхности светопровода.

В идеальном случае при $\alpha = \gamma = 0$ луч распространяется вдоль оси Y , а точки пересечений его с нижней плоскостью располагаются эквидистантно и имеют координаты $x_i = \text{const}$, $y_i = 2ihtg(\beta)$, где $i = 1, \dots, N$ — порядковый номер отражения от нижней плоскости, h — толщина светопровода в на-

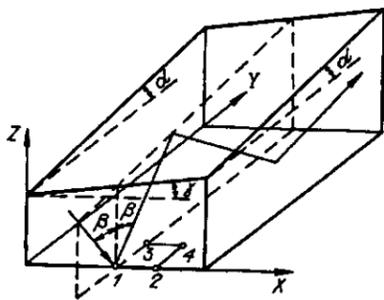


Рис. 1

правлении оси Z . При наличии неплоскостности ($\alpha \neq 0, \gamma \neq 0$) возникают геометрические aberrации — отклонения $\Delta x, \Delta y$ координат точек пересечения луча с нижней плоскостью от их значений, соответствующих идеальному случаю. Расчеты зависимостей $\Delta x, \Delta y$ от количества отражений N при различных значениях параметров α и γ приведены на рис. 2—6. Угол падения β выбран равным 45° , а значения отклонений $\Delta x, \Delta y$ нормированы на толщину световода h в точке первого отражения от нижней плоскости.

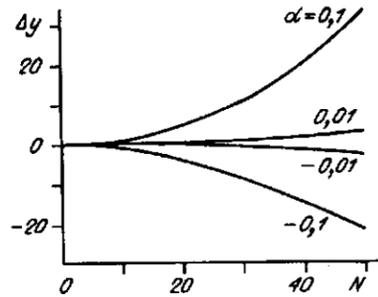


Рис. 2

Рис. 2 соответствует наиболее простому случаю $\gamma = 0$. Распространяющийся световой луч не выходит из плоскости $x = \text{const}$, поэтому отклонений в координатах x , нет: $\Delta x_i = 0$. Изменение угла падения $\Delta\beta$ происходит по линейному закону, и угловая ошибка накапливается с увеличением количества отражений: $\Delta\beta = 2\alpha i$. Происходит также накопление отклонений Δy_i от координат y_i , соответствующих идеальному случаю. Нелинейный характер этой зависимости особенно заметен для больших значений i и α . В частности, для $\alpha = 0,1^\circ$ величина $\Delta y > 30$ при $N = 50$, в то время как для $\alpha = 0,01^\circ$ Δy не превышает 3. Заметим, что показанные зависимости для положительных и отрицательных значений α несимметричны. Погрешности для отрицательных значений α меньше, поэтому использование сужающихся световодов может оказаться предпочтительнее, чем расширяющихся.

Расчеты для $\alpha = 0$ и различных значений γ представлены на рис. 3. В отличие от предыдущего случая здесь имеют место обе погрешности ($\Delta x \neq 0$ и $\Delta y \neq 0$), хотя отклонения по координате Y существенно меньше, чем по координате X . При $\gamma = 0,1^\circ$ и $N = 50$ отклонение Δx приближается к значению 9, в то время как Δy не превосходит 1.

Что касается изменения угла падения $\Delta\beta$, то в данном случае зависимость этого параметра от номера отражения становится нелинейной.

Поскольку при $\gamma = 0$ имеет место соотношение $\Delta y > \Delta x = 0$, а при $\alpha = 0$ выполняется обратное неравенство $\Delta x > \Delta y$, то отсюда следует, что направление распространения луча может быть оптимизировано для получения минимальных погрешностей как по X -, так и по Y -координате.

В общем случае $\alpha \neq 0, \beta \neq 0$ результирующие отклонения $\Delta x, \Delta y$ имеют еще более сложные зависимости от порядкового номера отражения. Эти

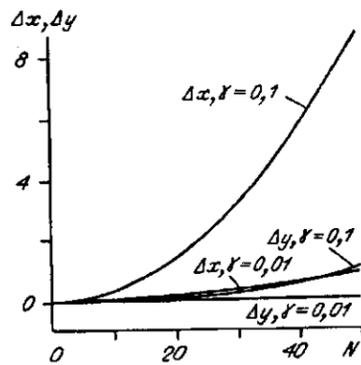


Рис. 3

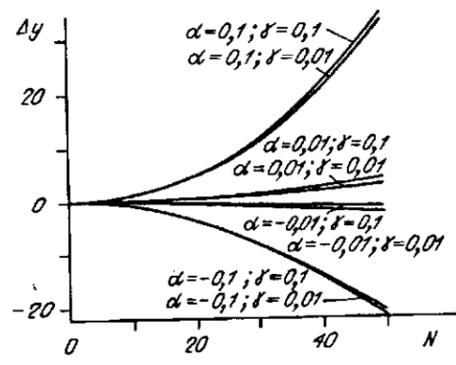


Рис. 4

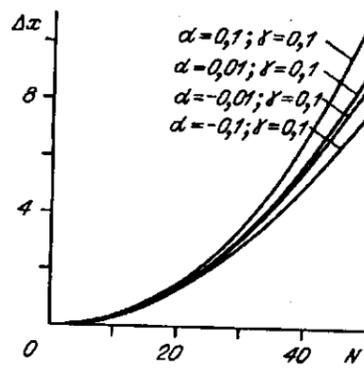


Рис. 5

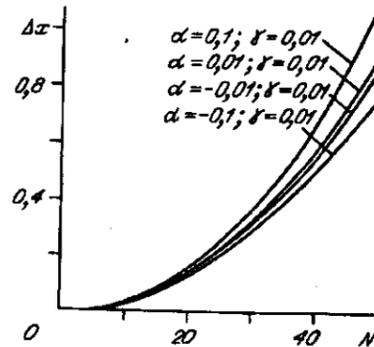


Рис. 6

результаты представлены на рис. 4—6 для $\gamma = 0,01$ и $0,1^\circ$ и различных значений $\alpha = \mp 0,01, \mp 0,1^\circ$. Сравнение этих рисунков с рис. 2, 3 показывает, что общие отклонения в рассматриваемом случае могут существенно превышать аналогичные величины, соответствующие выполнению только одного из условий: $\alpha = 0$ или $\gamma = 0$. Конкретные требования к неплоскостности светопровода могут быть получены из представленных зависимостей для Δy (см. рис. 4) и Δx (см. рис. 5, 6) при заданном количестве отражений и допустимом уровне геометрических aberrаций.

Изложенные результаты относились к анализу прохождения через светопровод одного светового луча. Представляется целесообразным рассмотреть также случай распространения по квазиплоскому светопроводу светового пучка конечной ширины и оценить возникающие при этом геометрические искажения формы его сечения. Эти искажения являются непосредственным следствием рассмотренных выше эффектов изменения координат луча. Ограничимся рассмотрением случая, когда в светопровод вводится световой пучок квадратного сечения, и проанализируем распространение световых лучей, соответствующих угловым точкам 1—4 этого сечения (см. рис. 1). Об изменении формы пучка при последовательных отражениях от нижней плоскости светопровода можно судить по отклонениям координат этих четырех точек $\Delta x_i, \Delta y_i$ ($i = 1, \dots, 4$) от их идеальных значений, соответствующих случаю $\alpha = \gamma = 0$ при нулевой расходимости светового пучка. Для того чтобы

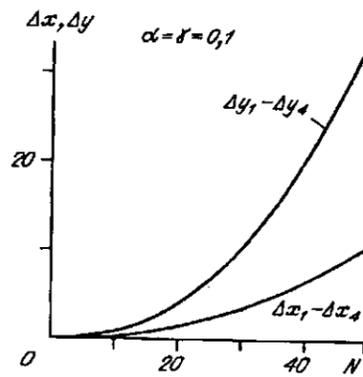


Рис. 7

отделить эффекты изменения координат, обусловленные неплоскостностью светопровода, от эффектов, обусловленных расходимостью пучка, рассмотрим вначале гипотетический случай, соответствующий нулевой расходимости излучения. Во всех последующих расчетах размер пучка выбран равным $0,1$ мм.

На рис. 7, 8 представлены зависимости $\Delta x_i, \Delta y_i$ от количества отражений N для $\alpha = \gamma = 0,1^\circ$ (см. рис. 7) и $\alpha = \gamma = 0,01^\circ$ (см. рис. 8). Эти зависимости носят существенно нелинейный характер и практически вырождаются в две кривые: одна для координат X , другая для координат Y , причем отклонения по координате Y заметно превышают отклонения по координате X . Так, для $\alpha = \gamma = 0,01^\circ$ отклонение Δy достигает

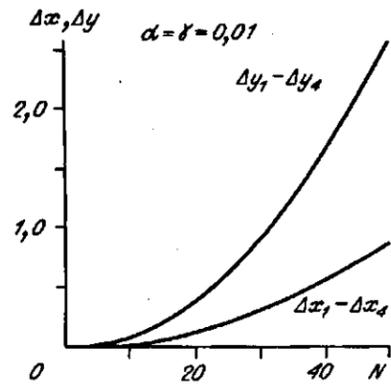


Рис. 8

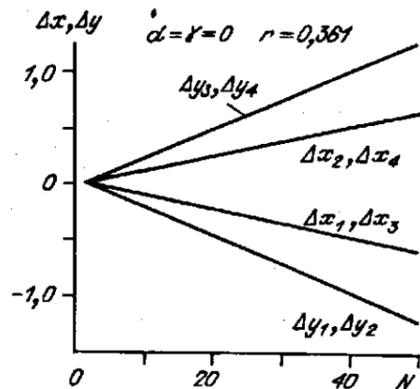


Рис. 9

величины 2,6, в то время как $\Delta x \approx 0,8$ при $N = 50$.

Характер зависимостей отклонений координат $\Delta x, \Delta y$ от N , обусловленных лишь эффектом расходимости светового пучка (при $\alpha = \gamma = 0$), совершенно отличается от только что рассмотренных. На рис. 9 представлены соответствующие графики для расходимости светового пучка $r \approx 0,36^\circ$. Такое значение соответствует дифракционной расходимости пучка размером 0,1 мм при длине волны света 0,63 мкм. Графики демонстрируют линейные зависимости, которые обладают определенной симметрией относительно нулевой отметки (в пределах точности, обеспечиваемой масштабом и разрешением рисунка). Заметим, что хотя эти отклонения могут достигать значительных величин, в ряде случаев они могут быть компенсированы посредством дополнительной фокусировки излучения. Такая фокусировка может быть обеспечена специальными оптическими элементами (голографическими или киноформными линзами и т. п.), располагаемыми в определенных (или всех) областях пересечения пучка с поверхностью световода.

Результаты проявления суммарных эффектов, соответствующих наличию как расходимости светового пучка, так и неплоскости световода, представлены на рис. 10, 11. Для больших значений углов $\alpha = \gamma = 0,1^\circ$ (см. рис. 10) определяющим эффектом является неплоскость световода и характер кривых приближается к случаю, изображенному на рис. 7. Из сравнения этих

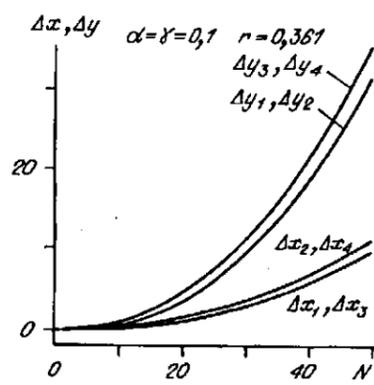


Рис. 10

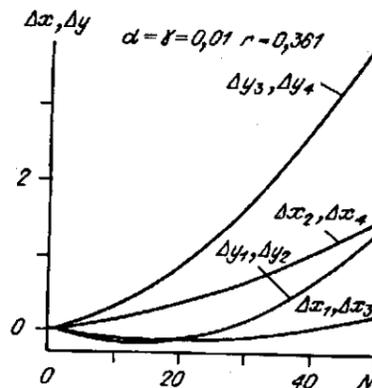


Рис. 11

рисунков следует, что наличие расходимости пучка приводит в первом приближении к «расщеплению» кривых в зависимости от значений координат X и Y исходных точек 1—4 (см. рис. 1). Общий уровень отклонений Δu_i , $i = 1, \dots, 4$, при этом остается существенно больше уровня отклонений Δx_i . При уменьшении углов α и γ общий уровень отклонений снижается, а величина относительного «расщепления» увеличивается и графики приближаются в пределе к линейным зависимостям рис. 9. Промежуточный случай для $\alpha = \gamma = 0,01^\circ$, когда эффекты, обусловленные неплоскостью светопровода и расходимостью светового пучка, сравнимы, представлен на рис. 11. Здесь зависимости более сложные и уже нельзя сделать однозначного вывода о больших величинах отклонений по какой-либо из координат вне зависимости от конкретных значений координат луча на входе светопровода и количества отражений.

В заключение можно сделать следующие выводы.

Геометрические aberrации, обусловленные неплоскостью светопровода, могут быть значительными, особенно при большом количестве отражений, поэтому требования на допустимую неплоскость должны быть согласованы с необходимым количеством отражений.

При изготовлении светопровода для обеспечения минимальных значений геометрических искажений необходимо выбирать оптимальное направление распространения светового пучка. Выбор сужающегося светопровода, в частности, может оказаться более предпочтительным, чем расширяющегося.

При использовании в структурах на основе светопровода фокусирующих элементов их местоположение и параметры должны выбираться с учетом как расходимости светового пучка, так и допустимой неплоскости светопровода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Введение в интегральную оптику /Под ред. М. Барноски.—М.: Мир, 1977.
2. Jahns J., Huang A. Planar integration of free-space optical components // *Appl. Opt.*—1989.—28, N 9.—P. 1602.
3. Kubota T., Takeda M. Integrated-optical array illuminator // *Conference Record of 1990 International Topical Meeting on Optical Computing.*—Kobe, Japan, 1990.
4. Sauer F. Fabrication of diffractive-refractive optical interconnects for infrared operation based on total internal reflection // *Appl. Opt.*—1989.—28, N 2.—P. 386.
5. Haumann H.-J., Kobolla H., Sauer F. et al. Optical bus based on light-guiding-plates // *Conference Record of 1990 International Topical Meeting on Optical Computing.*—Kobe, Japan, 1990.
6. Jahns J., Lee Y. H., Jewell J. L. Optical interconnects using microlasers and planar optics // *Ibid.*

Поступила в редакцию 9 февраля 1993 г.