

АНАЛИЗ ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ТРАССОВОГО ГАЗОАНАЛИЗАТОРА С РЕТРОРЕФЛЕКТОРОМ

В. А. Коршунов, канд. физ.-мат. наук

НПО «Тайфун», г. Обнинск, Россия

Аннотация

Проведен анализ фотометрических характеристик трассового газоанализатора с ретрорефлектором, построенного по коаксиальной схеме. Получены зависимости освещенности в плоскости изображения от положения точки относительно центра изображения. Проведен расчет регистрируемого светового потока в зависимости от размера источника и длины трассы. При достаточно больших длинах трасс сигнал убывает обратно пропорционально квадрату длины трассы, при промежуточных значениях сигнал достигает максимума, а при уменьшении длины трассы стремится к нулю. Показано, что имеется оптимальное соотношение между радиусом ретрорефлектора, радиусом источника излучения и группой параметров, характеризующих телескоп и трассу. (Стр. 9, Илл. 5, Библиогр. 1).

* * *

Оптический трассовый газоанализатор, работающий на принципах **дифференциальной оптической абсорбционной спектроскопии (ДОАС)**, является эффективным инструментом для измерения газовых примесей в атмосфере [1]. В настоящее время ДОАС газоанализаторы выпускаются несколькими фирмами на западе. Первый в России коммерческий газоанализатор разработан в НТЦ «Эридан-1» (г. Обнинск). Оптическая схема прибора включает: источник непрерывного излучения, в качестве которого обычно используется ксеноновая лампа высокого давления, дающая непрерывный спектр в широком спектральном диапазоне; прожектор; приемник; спектральный прибор и фотодетектор. При двухпроходной схеме прожектор и приемник объединяются в одном устройстве, а на противоположном конце трассы устанавливается ретрорефлектор. Такая схема является предпочтительной по сравнению с однопроходной, поскольку подведение электропитания и обслуживание требуется только на одном конце трассы измерений, ретрорефлектор же может быть установлен в любой удобной точке – на крыше здания, на кронштейне на стене, на мачте и т.п. Кроме того, проведение фотометрических расчетов, необходимое при проектировании приборов, для двухпроходной схемы является нетривиальной задачей.

В данной работе проведен анализ оптической схемы трассового прибора с ретрорефлектором на примере оптической схемы, использованной в приборе ДОАС-4Р, разработанном в НТЦ «Эридан-1». В результате получены коэффициенты использования апертуры прибора, выявлены оптимальные соотношения между параметрами приемной и передающей апертур и размером ретрорефлектора.

Оптическая схема приемо-передающего устройства приведена на **рис. 1**. Главное сферическое зеркало 4 является общим для передающей (верхняя половина рисунка) и приемной (нижняя половина рисунка) частей устройства. Светящееся тело ксеноновой лампы 1 располагается вблизи фокуса сферического зеркала 4. С помощью плоского поворотного зеркала 2 и сферического зеркала формируется кольцевой слабо расходящийся пучок излучения, направляемый по воздушной атмосферной трассе на ретрорефлектор. Исходящий пучок излучения проходит через внешнее кольцо сферического зеркала. Внутреннее же кольцо этого зеркала используется для приема отраженного ретрорефлектором излучения, которое направляется далее на вторичное плоское зеркало 3 и через центральное отверстие в сферическом зеркале - на входную апертуру оптоволоконного световода 5, расположенную также вблизи фокуса главного сферического зеркала.

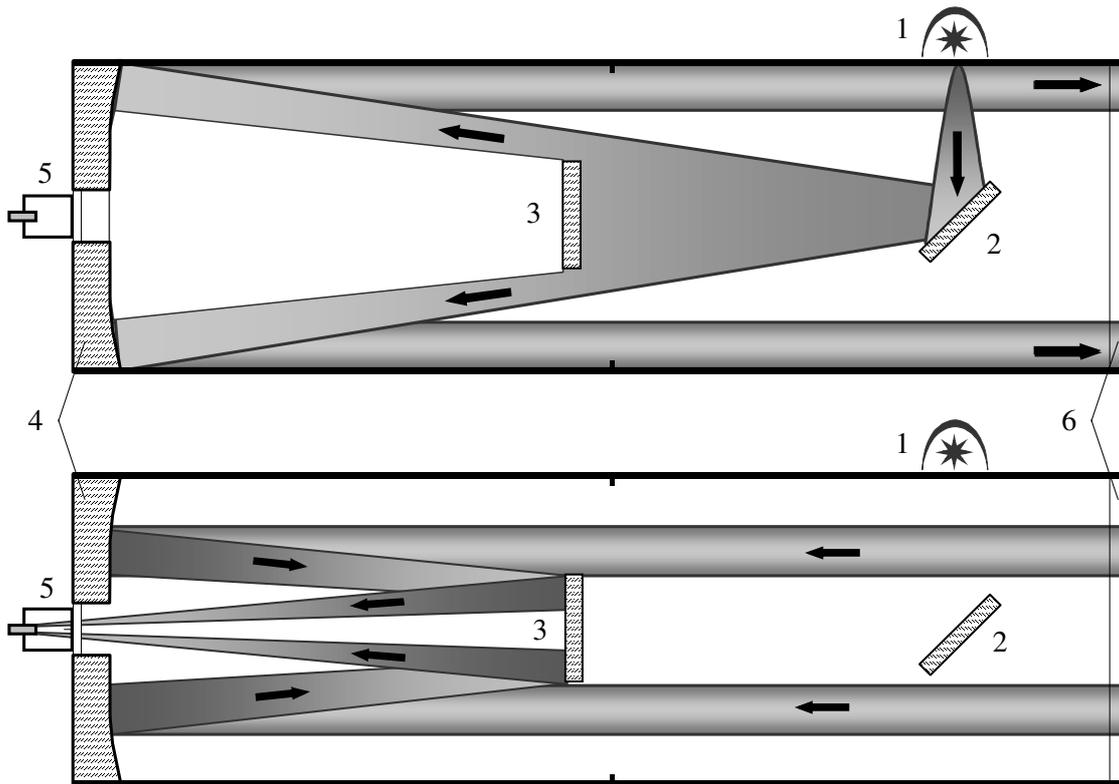


Рис. 1. Оптическая схема приемо-передающего устройства

(вверху – передающий канал, внизу - приемный).

1 – лампа; 2 - плоское поворотное зеркало; 3 - плоское вторичное зеркало;
4 - главное сферическое зеркало; 5 - входное окно световода; 6 - защитное стекло.

Для проведения анализа удобно воспользоваться эквивалентной схемой измерений. На **рис. 2** показана плоскость апертуры приемника.

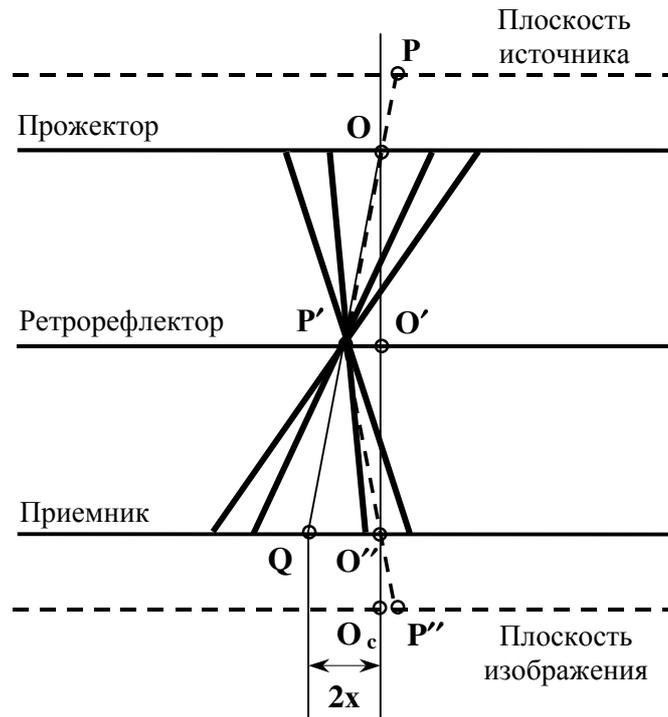


Рис. 2. Эквивалентная оптическая схема ДОАС системы.

Центр апертуры приемника совпадает с центром апертуры прожектора и находится в точке O'' . Предполагается, что используется ретрорефлектор с тремя взаимно перпендикулярными отражающими гранями. Поместим систему координат в точку пересечения граней кубического ретрорефлектора O' . Тогда для любого падающего на ретрорефлектор луча, проходящего через точку R в направлении Ω , отраженный луч пройдет через точку $-R$ в направлении $-\Omega$. Поэтому источник излучения с прожектором на эквивалентной схеме можно заменить эквивалентным источником и прожектором, которые располагаются центрально симметрично по отношению к исходному источнику с центром симметрии в вершине ретрорефлектора O' . Очевидно, что центральная точка апертуры эквивалентного прожектора O находится на прямой $O'O''$. Отметим, что оптические оси источника и эквивалентного прожектора могут быть наклонены по отношению к линии $O'O''$. Для краткости будем опускать ниже слово «эквивалентный» по отношению к прожектору и источнику.

Рассмотрим далее схему измерений, когда источник излучения - светящееся тело дуги ксеноновой лампы - отображается на ретрорефлектор, и выделим некоторую точку источника P . Она отображается оптической системой источника в точку P' в плоскости ретрорефлектора, а затем оптической системой приемника - в точку P'' в плоскости изображения приемника. Рассматриваемой точке соответствует кольцевой пучок с осью $OP'Q$, где Q - точка пересечения оси пучка с

плоскостью апертуры приемника. Если расстояние $O'P'$ обозначить через x , то, очевидно, $QO'' = 2x$. Максимальное смещение оси пучка x ограничено апертурой ретрорефлектора, имеющей радиус R_{rf} . Пусть Q_c есть точка пересечения центральной линии $O'O''$ с плоскостью изображения. Обозначим вектор $Q_cP'' = l$. Тогда $|l| = l = xF/L$, где F – фокусное расстояние сферического зеркала, L – расстояние между приемником и ретрорефлектором, причем считается, что $F \ll L$.

На приемнике кольцевой пучок лучей накладывается на внутреннее кольцо сферического зеркала, являющееся приемной апертурой (рис. 3).

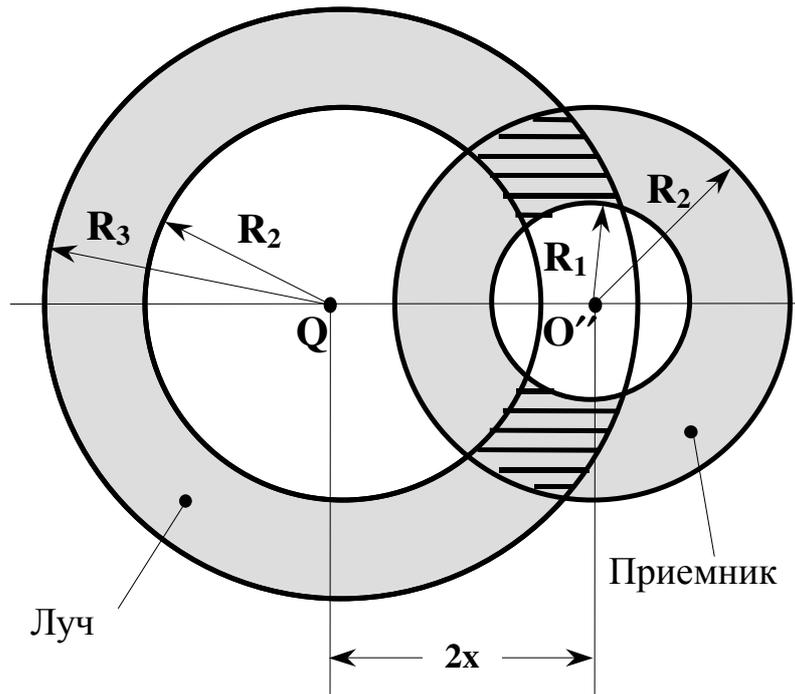


Рис. 3. Наложение кольцевого пучка отраженного излучения на апертуру приемника.

Внутренний и внешний радиусы приемной апертуры обозначены как R_1 и R_2 , соответствующие радиусы светового кольца как R_2 и R_3 . Очевидно, что свет проходит только через площадь пересечения двух колец $s(l)$ (заштрихованная зона на рис. 3). Назовем отношение $K_v = s(l)/s_0$, где $s_0 = \pi(R_2^2 - R_1^2)$ – площадь приемной апертуры, коэффициентом заполнения приемной апертуры. Из рис. 2 и 3 следует, что $K_v = 0$ для центральной точки изображения Q_c (при $x = 0$). Иными словами, свет, отраженный строго назад, не попадает в приемник. Коэффициент $K_v = 0$ также для тех точек источника, изображение которых на плоскости ретрорефлектора лежит вне апертуры ретрорефлектора. Вычисление коэффициента K_v необходимо для фотометрических оценок. Действительно, освещенность в точке P'' можно записать в следующем виде:

$$E(l) = \frac{B(l) s_0 K_v(l)}{F^2} \eta, \quad (1)$$

где $B(l)$ – яркость источника излучения в точке, сопряженной с точкой l , η – суммарное пропускание атмосферы и оптических систем источника и приемника.

Для источника с равномерной яркостью $E(l) = \text{const} \cdot K_v(l)$, т.е. освещенность в этом случае зависит только от расстояния l от точки Q_c и описывается функцией $K_v(l)$.

Анализ взаимного расположения колец на **рис. 3** приводит к следующим выводам:

- Распределение $K_v(l)$ имеет внецентральный максимум.
- Полезный внешний радиус кольца источника $R_3 \leq R_{3m} = 2R_{rf} + R_2$; идущие вне радиуса R_{3m} лучи не попадают в приемное кольцо.
- Полезный радиус ретрорефлектора $R_{rf} \leq R_{rfm} = 0,5(R_3 + R_2)$; фокусирующиеся вне радиуса R_{rfm} пучки при возвращении проходят мимо приемного кольца.
- Полное заполнение апертуры происходит при выполнении условий: $R_3 \geq 3R_2$; $R_{rf} \geq R_2$; $R_2 \leq x(l) \leq 0,5 \min(2R_{rf}, R_3 - R_2)$.

С учетом ограничений на габариты и стоимость прибора последние условия обычно не выполняются и реально работа идет всегда в условиях частичного заполнения апертуры ($K_v < 1$). Поэтому представляет интерес расчет коэффициента K_v в зависимости от геометрических параметров прибора и трассы измерений.

На **рис. 4** представлены результаты численного расчета $K_v(l)$ для различных значений параметра $p = R_3/R_2$. Отношение R_2/R_1 не является в данном случае критичным параметром, и оно бралось равным 2. Расчеты приведены для набора параметров $\{R_2, F, L\}$, типичного для трассовых газоанализаторов: $R_2 = 87$ мм, $F = 800$ мм, $L = 200$ м. На самом деле вследствие геометрического подобия K_v является функцией безразмерного параметра l/l_2 , где $l_2 = R_2 F/L$. С использованием этого соотношения подобия данные **рис. 4** можно использовать и при других значениях параметров $\{R_2, F, L\}$.

Тонкими линиями на **рис. 4** представлены данные для ретрорефлектора достаточно больших размеров, не ограничивающего изображения $R_{rf} \geq R_{rfm} = 0,5 R_2 (1 + p)$. При нулевом смещении K_v обращается в нуль. То же самое имеет место при больших смещениях, когда кольцевой пучок смещается за пределы приемного кольца, то есть при $l \geq 0,5 l_2 (1 + p)$. При малых значениях параметра p зависимость $K_v(l)$ имеет двугорбый характер. Первый максимум при малых l наблюдается при $l_p = 0,5 l_2 (p - 1)$ и соответствует наложению правого полукольца пучка на правое же полукольцо приемника (см. **рис. 3**). Второй максимум образуется при наложении правого полукольца пучка на левое полукольцо приемника. При $p \geq 3$ и определенных значениях l приемное кольцо полностью помещается в пространстве между внутренним и внешним радиусами светового пучка, что и дает коэффициент $K_v = 1$.

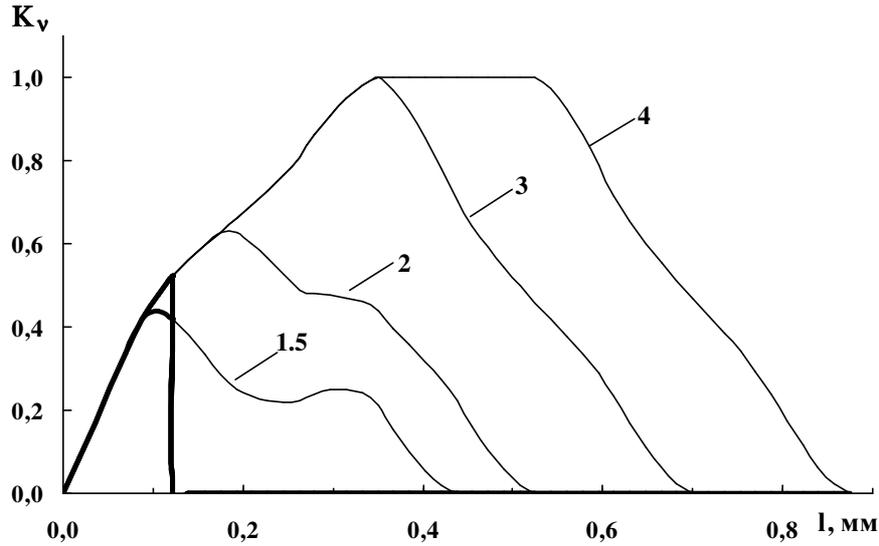


Рис. 4. Коэффициент использования апертуры K_v для точечного источника как функция расстояния от оси l .

Тонкие линии соответствуют ретрорефлектору больших размеров (при $R_{rf} = R_{rfm} = R_2(1 + p)/2$); цифры у тонких кривых обозначают величину параметра $p = R_3/R_2$.

Жирные линии соответствуют ретрорефлектору с радиусом, меньшим R_{rfm} (при $R_{rf}/R_2 = 0,35$).

При радиусе ретрорефлектора, меньшем R_{rfm} , ретрорефлектор виньетировывает изображение, начиная с $l = l_c = R_{rf}F/L$. В качестве примера жирными линиями на **рис. 4** показаны данные расчета для $R_{rf} = 30$ мм ($R_{rf}/R_2 = 0,35$). Как видно из **рис. 4**, при ретрорефлекторе такого размера только малоразмерный ($\sim 0,1$ мм) объект может быть эффективно использован как источник излучения, иначе коэффициенты использования апертуры для большей части источника становятся слишком малыми.

Для светящегося тела конечных размеров световой поток W источника определяется интегралом от освещенности $E(l)$ по поверхности изображения Λ источника:

$$W = \iint_{\Lambda} E(l) d^2l = \frac{s_0 \Omega \langle K_v(l) \rangle}{F^2} \eta, \quad (2)$$

где

$$\Omega = \iint_{\Lambda} B(l) d^2l; \quad (3)$$

$\langle K_v(l) \rangle$ - средний коэффициент заполнения апертуры для данного источника:

$$\langle K_v(l) \rangle = \left(\iint_{\Lambda} B(l) K_v(l) d^2l \right) \left(\iint_{\Lambda} B(l) d^2l \right)^{-1}. \quad (4)$$

Так как в данной схеме источник отображается в отношении 1:1, то интеграл по поверхности изображения совпадает с интегралом по поверхности источника и Ω не зависит от длины трассы и других параметров геометрии прибора.

Результаты расчета $\langle K_v \rangle$ для кругового источника постоянной яркости, центр которого совмещен с центральной точкой Q_c в плоскости изображения, в зависимости от радиуса источника r_s приведены на **рис. 5**. Так же, как и на предыдущем рисунке, тонкими линиями показаны данные для ретрорефлектора большого размера, не ограничивающего изображения. В точках $r_{s0} = 0,5 l_2 (1 + p)$, соответствующих тем значениям l на **рис. 4**, где величины K_v обращаются в нуль, кривые на **рис. 5** имеют излом, после которого происходит убывание $\langle K_v \rangle \sim (r/r_{s0})^{-2}$ из-за возрастания доли площади источника, для которой $K_v = 0$. Жирными линиями показаны данные расчетов для ретрорефлектора с $R_{rf} = 30$ мм. Аналогичным образом, при $r \geq r_{s0}$, где r_{s0} - точка начала виньетирования изображения ретрорефлектором, $\langle K_v \rangle \sim (r/r_{s0})^{-2}$.

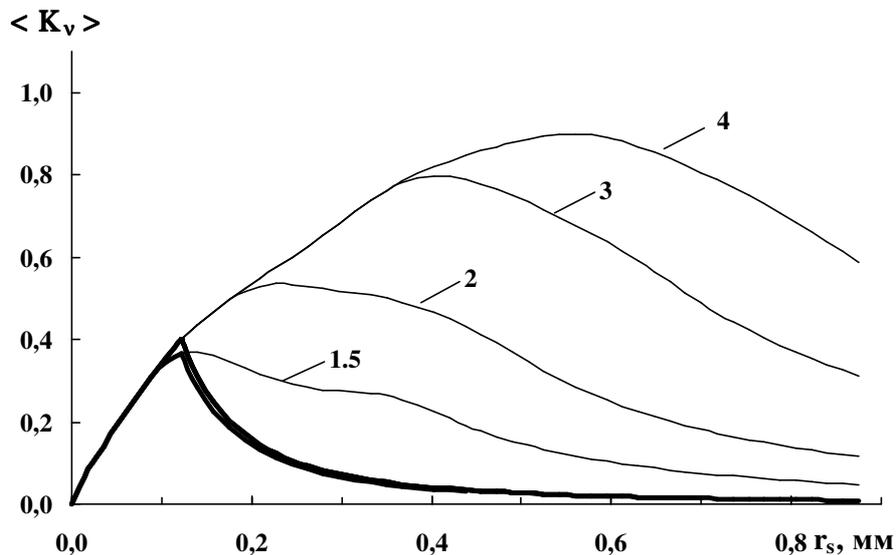


Рис. 5. Коэффициент использования апертуры $\langle K_v \rangle$ для кругового источника как функция радиуса источника r_s .

Обозначения кривых соответствуют обозначениям на **рис. 4**.

Приведенные выше данные позволяют сделать некоторые выводы об оптимальном выборе параметров геометрии прибора, обеспечивающем максимальные величины $\langle K_v \rangle$. Очевидно, близким к оптимальному будет такой выбор параметров, когда $l_p = l_c = r_s$. В этом случае размер источника соответствует максимально возможным величинам $\langle K_v \rangle$ для данного выбора параметров геометрии $\{ R_2, R_3, F, L \}$, а ретрорефлектор не виньетирует изображение источника.

Для ксеноновой лампы наиболее яркая часть дуги, которая является источником ультрафиолетового излучения, имеет радиус $r_s \sim 0,1$ мм. Как видно из **рис. 5**, при выбранных параметрах геометрии прибора получается приемлемое значение $\langle K_v \rangle \approx 0,3$, близкое к максимуму.

Как уже отмечалось выше, в силу геометрического подобия $K_v = K_v(l/l_2)$, поэтому при фиксированных параметрах прибора и источника сплошные кривые на **рис. 4 и 5** можно рассматривать и как зависимости сигнала от расстояния, обусловленные чисто геометрическими факторами без учета пропускания атмосферы и размытия изображения за счет турбулентности. Отметим, что убывание сигнала $\sim L^{-2}$ происходит либо после начала виньетирования изображения источника ретрорефлектором, либо после смещения светового кольца за пределы апертуры приемного кольца. На малых расстояниях с уменьшением расстояния сигнал приближается к нулю, так как приемная апертура используется все более неэффективно. Это является следствием отображения центра кругового источника на центр ретрорефлектора. В то же время, как следует из **рис. 4**, для малых расстояний смещение изображения источника с центральной точки Q_c приведет к увеличению $\langle K_v \rangle$. Однако этот вариант в данной работе подробно не рассматривался.

В некоторых случаях вместо одного ретрорефлектора используется набор ретрорефлекторов, расположенных в одной плоскости. В этом случае каждый ретрорефлектор дает собственное изображение, центральная точка которого Q_{ci} находится как пересечение линии $O'_i O''$, где O'_i - центр i -го ретрорефлектора, с плоскостью изображения. Нетрудно убедиться, что смещение двух изображений относительно друг друга составляет $2\Delta F/L$, где Δ - расстояние между ретрорефлекторами в плоскости их расположения. С учетом того, что l есть расстояние от центральной точки изображения, приведенные выше результаты могут быть использованы и для этого более сложного случая для каждого отдельного изображения.

В заключение автор выражает благодарность Д.И. Бусыгиной за помощь в оформлении работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Platt U. Differential optical absorption spectroscopy (DOAS) // in Air Monitoring by Spectroscopic Techniques, M. W. Sigrist, ed., Chemical Analyses Series. – 1994. - Vol. 127. - P. 27-84.