

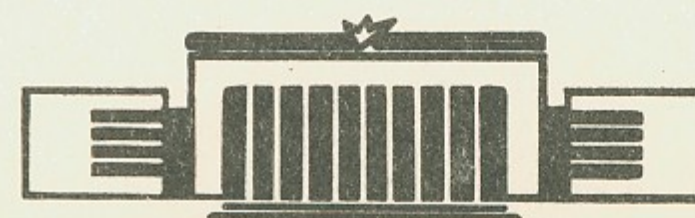
42

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
СО АН СССР

С.Г.Воропаев, Б.А.Князев

МЕТОД АБСОЛЮТНОЙ КАЛИБРОВКИ
РЕГИСТРИРУЮЩЕЙ ЧАСТИ ОПТИЧЕСКИХ
СИСТЕМ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В СХЕМАХ
РАССЕЯНИЯ И РЕЗОНАНСНОЙ
ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ

Препринт №82-141



Новосибирск

Описан новый метод калибровки регистрирующей части оптических систем в широком спектральном интервале. Для проведения калибровки в область, соответствующую исследуемому объему, помещается кювета с раствором красителя, для которого известны квантовый выход и распределение интенсивности флуоресценции по спектру. Возбуждая импульсом лазера с известной энергией флуоресценцию красителя и регистрируя сигнал на выходе монохроматора, можно определить чувствительность системы на данной длине волны. Один краситель может обеспечить такие измерения в диапазоне ~ 100 нм. В качестве примера приведены результаты калибровки в спектральных областях 400-520 нм и 540-620 нм системы для наблюдения резонансной флуоресценции атомов титана, возбуждаемой азотным лазером. Этот же лазер использовался и при калибровке.

S.G.Vogorajev, B.A.Knyasev

METHOD FOR ABSOLUTE CALIBRATION OF
OPTICAL SYSTEMS USED FOR DETECTING
OF THE SCATTERED LIGHT OR
RESONANCE FLUORESCENCE

A B S T R A C T

A technique was developed for the absolute calibration of optical systems on a wide spectral range. A cell with a dye solution is placed at the object plane of the optical system. Fluorescence and absorption spectra and quantum yield of the dye solution must be known. By exciting the dye fluorescence by a laser pulse of the given energy and recording the output signal behind the monochromator one can determine the system sensitivity at a certain wave length. A spectral range of about 100 nm can be calibrated with one dye. As an example, the calibration procedure of an optical system at 400—520 nm and 540—620 nm is described. This system is used for a detection of the resonance fluorescence of Ti atoms. A nitrogen laser was used as an excitation source both for Ti atoms and dye solutions.

Одной из проблем, возникающих при проведении абсолютных измерений плотности электронов или атомов, выполняемых методами рассеяния или резонансной флуоресценции, является проблема абсолютной калибровки оптической системы вместе с регистрирующей аппаратурой. Стандартным способом такой калибровки является калибровка по сигналу рэлеевского рассеяния света на атомах газа с известным сечением рассеяния, которым заполняется рабочий объем [1]. Достоинством этого метода является точное воспроизведение геометрии эксперимента, но калибровка может быть осуществлена только на одной длине волны, равной длине волны генерации возбуждающего лазера. Для калибровки оптических систем в широком спектральном интервале обычно используют стандартные ленточные лампы накаливания. При такой калибровке геометрия эксперимента, естественно, не воспроизводится, кроме того, в некоторых случаях эти лампы могут просто не помещаться в требуемом месте рабочей камеры.

В экспериментах [2] мы измеряли плотность атомов на двух подуровнях основного состояния $Ti(a^3F)$ методом резонансной флуоресценции. Возбуждение осуществлялось излучением азотного лазера вблизи $\lambda = 337,1$ нм, а флуоресценция регистрировалась на переходах с $\lambda = 471; 472,3; 547,4$ и $551,4$ нм. Чтобы избавиться от необходимости использовать для калибровки ленточную лампу (которую невозможно было поместить в нужном месте), мы применили новый метод калибровки, при котором, как и в случае рэлеевского рассеяния, точно воспроизводится геометрия эксперимента. Описанию этого метода и посвящена настоящая работа.

Схема экспериментальной установки приведена на рис.1. Излучение азотного лазера (1) фокусировалось в вытянутое в вертикальном направлении пятно площадью $11 \times 1,9$ мм² в вакуумной камере экспериментальной установки. Флуоресценция атомов титана, образованных при испарении титановой мишени импульсом мощного лазера на красителе, наблюдалась снизу под углом 90°. Оптической системой (2), состоящей из линз и поворотных зеркал, флуоресцирующий объем с уменьшением 2,2 раза отображался на входную щель монохроматора (3), в

качестве которого использовался спектрограф СП-48 с выходным объективом МТО-1000. Световой импульс на выходе монохроматора регистрировался фотоумножителем ФЭУ-87 (4) и осциллографом С8-12 (5).

Методика калибровки заключается в следующем. В область, соответствующую исследуемому объему помещается прямоугольная кварцевая кювета (7) с раствором красителя концентрации C так, чтобы этот объем находился в центре кюветы вблизи от ее дна. Излучение азотного лазера возбуждает флуоресценцию красителя. Фотоны, излучаемые красителем и прошедшие оптическую систему, попадают на фотоумножитель. Импульс с ФЭУ регистрируется на осциллографе. Если обозначить через E энергию падающего на кювету импульса излучения азотного лазера, то число фотонов флуоресценции красителя N , попадающих за импульс на входную линзу регистрирующей системы определится выражением

$$N = (E/h\nu_0) (10^{-\varepsilon ca} - 10^{-\varepsilon cb}) (\eta \Omega / 4\pi n^2)$$

где $h\nu_0$ — энергия фотонов, излучаемых азотным лазером, c — концентрация красителя, ε — его молярный коэффициент экстинкции на $\lambda = 337,1$ нм (коэффициент поглощения раствора $k = 2,3\varepsilon c$), $l \equiv b-a$ — длина объема рассеяния*) (см. рис. 1), η — квантовый выход флуоресценции красителя, n — коэффициент преломления раствора, Ω — телесный угол, вырезаемый входной линзой оптической системы относительно точки рассеяния.

Поскольку длительность импульса азотного лазера (~ 10 нс), постоянная времени флуоресценции красителей ($1 \div 10$ нс) и исследуемых переходов атома Ti (~ 10 нс) сравнимы между собой, в качестве меры величины сигнала флуоресценции следует брать не амплитуду, а интеграл импульса, регистрируемого на осциллографе, т.е. величину пропорциональную заряду, собираемому с ФЭУ $Q = \int U(t) dt$.

*) Здесь и далее для простоты исследуемый флуоресцирующий объем будем условно называть «объемом рассеяния».

Абсолютную чувствительность $\kappa(\lambda)$ системы для данной длины волны λ определим как отношение величины сигнала Q к полному числу фотонов, испущенных за импульс из исследуемого объема в телесный угол 4π в спектральном интервале, пропускаемом монохроматором. Учитывая, что спектр синглет-синглетного излучения красителей очень широк (~ 100 нм), т.е. при разумной ширине щелей монохроматора может рассматриваться как сплошной, и считая, что потери света при прохождении входной щели отсутствуют, можно записать следующее выражение для вычисления абсолютной чувствительности:

$$\kappa(\lambda) = \frac{\int U(t) dt \cdot h\nu_0 n^2}{\eta E (10^{-\varepsilon ca} - 10^{-\varepsilon cb}) \varphi(\lambda) \Delta\lambda} \quad (1)$$

Здесь $\varphi(\lambda)$ — распределение фотонов флуоресценции по спектру излучения ($\int_0^\infty \varphi(\lambda) d\lambda = 1$), а $\Delta\lambda$ — спектральная ширина выходной щели. Выражение (1) справедливо при отсутствии самопоглощения фотонов флуоресценции самим красителем. Параметры $\varphi(\lambda)$, η и ε , характеризующие красители, могут быть найдены, например, в каталоге [3]. Заметим, что величина квантового выхода η , вообще говоря, зависит от чистоты красителя и растворителя, в связи с чем были бы желательны ее специальные измерения. Однако, такие измерения достаточно сложны, поэтому мы ограничимся рекомендацией использовать только чистые красители и растворители.

Спектральная ширина излучения атомов на диполь-дипольных переходах в газовой фазе обычно составляет доли ангстрема, что существенно уже, чем обычная спектральная ширина щелей монохроматора. Поэтому полное число фотонов, испущенных из объема рассеяния, можно вычислить из соотношения $N = Q^*/\kappa(\lambda)$, где Q^* — сигнал флуоресценции атомов, зарегистрированный в эксперименте.

Практически, калибровка системы, изображенной на рис. 1, осуществлялась следующим образом. Энергия импульса излучения азотного лазера (0.5 мДж) измерялась измерителем ИМО-2. Так как чувствительность ИМО-2 была недостаточна,

энергия набиралась за несколько импульсов, при этом N_2 - лазер работал в частотном режиме (~ 1 Гц). Интенсивность излучения лазера, необходимая для проведения экспериментов по резонансной флуоресценции, велика, поэтому при калибровке требовалось ослабить ее до уровня, при котором интенсивность флуоресценции красителя линейно зависит от интенсивности излучения лазера. Ослабление осуществлялось калиброванными светофильтрами [(8) на рис.1.]. Полный коэффициент ослабления был равен 160. Для контроля энергии излучения азотного лазера использовался фотозащитный элемент ФЭК-14.

Коэффициент поглощения растворов красителей на длине волны генерации азотного лазера измерялся с помощью спектрофотометров UV-360-Shimadzu и СФ-26. Длина $l=b-a$ (см. рис.1) определялась высотой входной щели монохроматора и коэффициентом уменьшения оптической системы. Линейная зависимость интенсивности флуоресценции от высоты входной щели монохроматора сохранялась до значения 3,2 мм, что соответствует длине объема рассеяния $l=7$ мм (см. рис.1).

Для калибровки в интересующих нас спектральных диапазонах были использованы два соединения. Для калибровки в диапазоне 400-520 нм использовался раствор 1,4-ди-(5-фенил-1,3-оксазол-2-ил)-бензола (РОРОР) в толуоле марки «х.ч. для спектроскопии» ($C=9,9 \times 10^{-6}$ моль/л), а в диапазоне 540-620 нм^{*} — флуоресцеин Na в абсолютном спирте ($C=1,9 \times 10^{-5}$ моль/л). Спектры поглощения растворов, снятые на спектрофотометрах точно совпали со спектрами поглощения этих соединений, приведенными в каталоге [3], из которого мы и брали значения $\varphi(\lambda)$ и η , необходимые при вычислении $\kappa(\lambda)$ (см.рис.2а). Перестраивая монохроматор в пределах спектра флуоресценции растворов, мы регистрировали на осциллографе импульс флуоресценции и с помощью выражения (1) вычисляли абсолютную чувствительность κ . Заметим, что в коротковолновой области спектр флуоресценции каждого красителя перекрывается с его спектром поглощения, что следует учитывать при измерениях.

^{*} При работе в этих двух спектральных диапазонах в монохроматоре использовались две разные дифракционные решетки.

Результаты калибровки приведены на рис.2б. Спад κ к $\lambda=600$ нм определяется, видимо, снижением чувствительности фотокатода ФЭУ-87. Для некоторых точек приведены статистические ошибки с учетом ошибок вычислений. Увеличение ошибок вблизи 510 нм связано с неточностью определения по графику величины $\varphi(\lambda)$ при малых значениях последней.

Проведенная калибровка позволила в экспериментах по импульсному лазерному испарению титановой мишени найти абсолютные значения плотности атомов Ti. Нижний предел измеряемой плотности, составивший $\sim 10^9$ атомов Ti в см^3 , в данном случае определялся уровнем электрических наводок.

В заключение обсудим вопрос о применимости калибровки, выполненной с кюветой наполненной жидкостью, к измерениям в газе. Изменение телесного угла, под которым видна первая линза из флуоресцирующего объема, учтено в (1) множителем $1/p^2$. Что же касается изменения фокусирующих свойств оптической системы, то например, при фокусном расстоянии первой линзы, равном 15 см, толщине раствора 1 см и увеличении равном 1, увеличение системы и положение плоскости изображений меняется лишь на 1%, что практически не вносит ошибки в результаты калибровки.

Таким образом, результаты настоящей работы свидетельствуют о том, что описанный метод может широко применяться при калибровке оптических систем в широком спектральном диапазоне. Особым преимуществом в случае систем, служащих для исследования рассеяния или резонансной флуоресценции, является точное воспроизведение геометрии эксперимента. Нетрудно однако видеть, что подобным способом можно калибровать также любые оптические системы вне зависимости от их назначения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Х.Кунце. В кн.: Методы исследования плазмы, под ред. В.Лохте-Хольгрена, М., Мир, 1971, с.398.
2. Б.А.Князев, С.В.Лебедев. Труды XV Межд.конф.по явл. в иониз. газах., Минск, 1981, с.809;
3. Каталог активных лазерных сред на основе растворов органических красителей и родственных соединений, под ред. Б.И.Степанова. Издат. Институт физики АН БССР, Минск, 1977.

Подписи к рисункам.

Рис.1 Схема экспериментальной установки. Слева внизу показан в увеличенном виде объем, излучение из которого попадает в щель спектрографа.

Рис.2. Вверху: спектры поглощения (1) и флуоресценции (2) растворов РОРОР в толуоле (А) и флуоресцеина Na в этаноле (Б) [3]; λ_0 - длина волны генерации азотного лазера. Внизу абсолютная чувствительность регистрирующей системы.

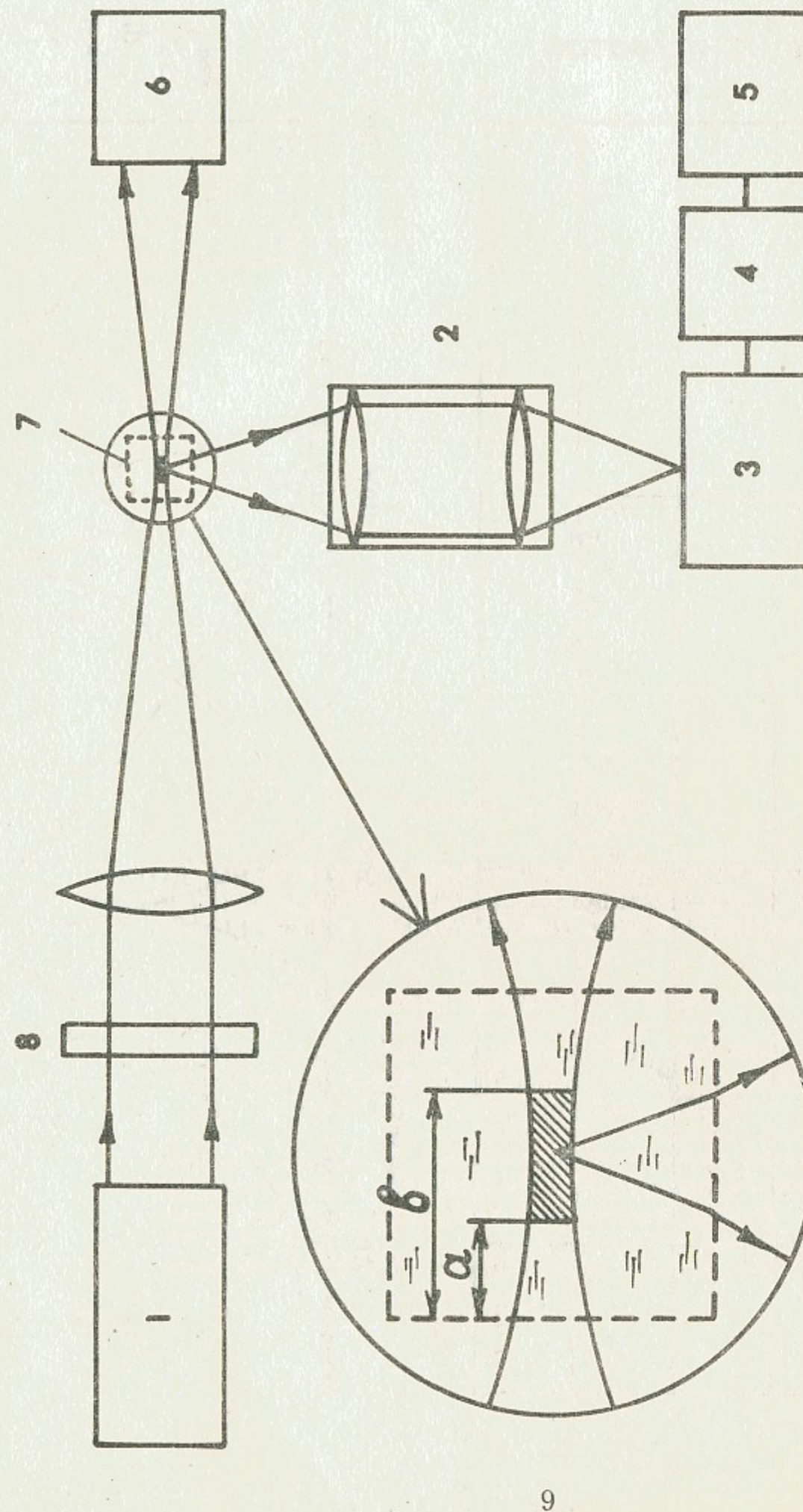


Рис. 1

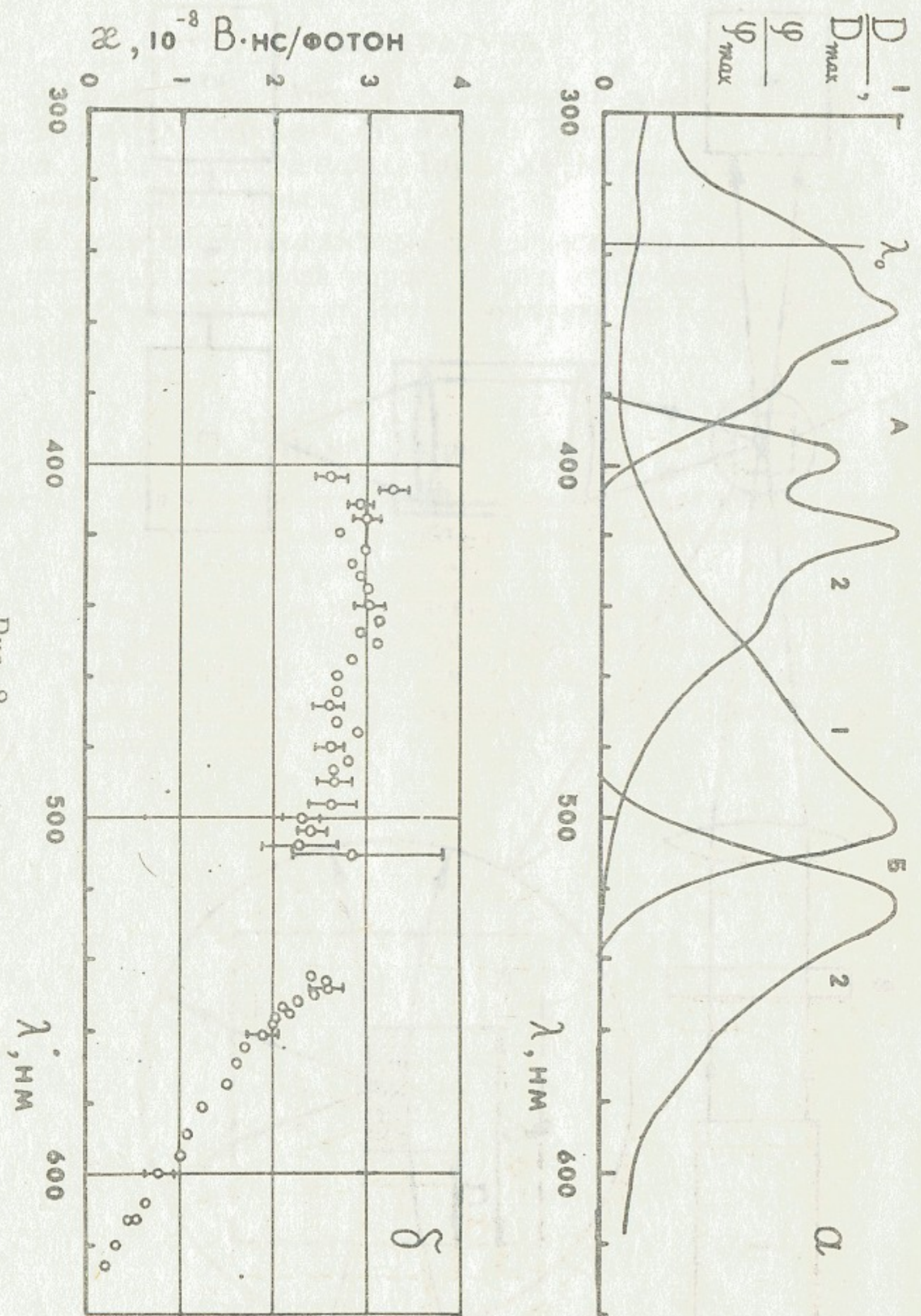


Рис. 2

С.Г.Воропаев, Б.А.Князев

МЕТОД АБСОЛЮТНОЙ КАЛИБРОВКИ РЕГИСТРИРУЮЩЕЙ ЧАСТИ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В СХЕМАХ РАССЕЯНИЯ И РЕЗОНАНСНОЙ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ

Ответственный за выпуск С.Г.Попов

Подписано в печать 26 ноября 1982г. МН 03629
 Формат бумаги 60×90/16 Объем 0,5 печ.л., 0,6 уч.-изд.л.
 Тираж 290 экз. Бесплатно. Заказ № 141

Набрано в автоматизированной системе на базе фотонаборного автомата ФА1000 и ЭВМ «Электроника» и отпечатано на ротапринтере Института ядерной физики СО АН СССР,
 Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.