

И Н С Т И Т У Т
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СОАН СССР

ИЯФЗ-73

Им Тхек - де, В.П.Кочанов, С.Г.Раутиан,
Э.Г.Сапрыкин, А.М.Шалагин

УШИРЕНИЕ И СДВИГ ЛИНИИ 0,63 мкм НЕОНА
ПОД ДЕЙСТВИЕМ ТОКА РАЗРЯДА

Новосибирск

1973

Им Тхек-де, В.П.Кочанов, С.Г.Раутиан, Э.Г.Сапрыкин,
А.М.Шалагин

УШИРЕНИЕ И СДВИГ ЛИНИИ 0,63 мкм НЕ ОНА ПОД
ДЕЙСТВИЕМ ТОКА РАЗРЯДА

А Н Н О Т А Ц И Я

Экспериментально исследован спектральный состав спонтанного излучения на переходе $3S_2 - 2p_4$ неона в присутствии лазерного поля, резонансного этому же переходу. Зарегистрировано уширение и сдвиг указанной спектральной линии. Эффект связывается со столкновениями возбужденных атомов неона с электронами газоразрядной плазмы.

1. Введение

В настоящее время существует довольно много экспериментальных работ [1-15], посвященных исследованию характеристик одного из важных лазерных переходов неона - $3S_2 - 2p_4$ ($\lambda = 0,63 \text{ мкм}$). В них проводились измерения уширения и сдвига линии $0,63 \text{ мкм}$ от давления, естественной ширины этой линии, а также естественных ширины уровней $3S_2, 2p_4$. Нельзя, однако, не отметить довольно существенный разброс данных по значениям указанных характеристик, приводимых различными авторами. В качестве примера приведем несколько значений для естественной ширины уровня $3S_2$ (Γ_m): взятых из разных источников¹⁾: $\Gamma_m = 8,36 \text{ мгц}$ [3], $6,45 \text{ мгц}$ [6], $6,9 \text{ мгц}$ [5], 20 мгц [2], $12,3 \text{ мгц}$ [7], $7,6 \text{ мгц}$ [1]. Как видно, некоторые значения отличаются друг от друга почти в три раза. Не лучше обстоит дело и в вопросе о сдвиге линии $0,63 \text{ мкм}$ с изменением давления. Здесь в литературных данных нет согласия не только по величине сдвига, но и по его знаку ([12-15]). Указанные несоответствия могут быть обусловлены не только недостаточной точностью того или иного измерения, но и некоторыми неучитываемыми физическими процессами, непосредственно влияющими на значение измеряемой величины. Ниже пойдет речь об одном из таких процессов, а именно, о влиянии столкновений с заряженными частицами разрядной плазмы.

В проводимых нами экспериментах по исследованию спонтанного испускания на переходе $3S_2 - 2p_4$ неона в присутствии лазерного поля, резонансного тому же переходу, были обнаружены заметные изменения в спектре спонтанного испускания с изменением тока разряда, которые мы приписываем столкновениям с электронами. Суть этих изменений состоит в том, что "пики" на доплеровски уширенных линиях спонтанного испускания (см., например [16]) испытывают сдвиг и уширение. Отсюда, в частности, следует, что "однородная" ширина линии $3S_2 - 2p_4$ зависит от тока разряда. Эффект уширения и сдвига линии при столкновениях с электронами по существу не нов, он наблюдался еще в долазерной спектроскопии [17]. Однако исследователи работали с довольно широкими доплеровскими линиями, а для них уширение и сдвиг заметны лишь при достаточно высоких плотностях электронов (например, в условиях дугового разряда). С другой

¹⁾ Для тех случаев, когда в цитированной работе приведена не ширина уровня $3S_2$, а ширина линии для перехода $3S_2 - 2p_4$ (Γ) значение Γ_m получаем по формуле $\Gamma_m = 2\Gamma - \Gamma_n$, где для Γ_n , ширины уровня $2p_4$, использованы данные Беннета и Киндлмана [11] $\Gamma_n = 8,8 \text{ мгц}$.

стороны, эксперименты А.С.Хайкина /18/ по измерению вероятностей неупругих столкновений возбужденных атомов Ne с электронами показывают, что даже в обычных условиях газоразрядной плазмы столкновения с электронами могут создать изменения в спектральных линиях, улавливаемые методами нелинейной спектроскопии. И действительно, ранее в некоторых лазерных экспериментах /10.14/ были замечены токовые изменения в ширинах ^{сдвиг} линий. Однако внимание на этом факте не акцентировалось, явление детально не исследовалось, и причина его оставалась неясной; при обработке же экспериментальных данных влиянием тока разряда, как правило, пренебрегалось.

Отметим, наконец, что ввиду важности линии $0,63\mu m$ для лазерной физики, бесспорно интересным является детальное исследование всех процессов, влияющих на характеристики перехода $3S_2 - 2p4$ неона. Это относится и к вопросу об уширении и сдвиге указанной линии электронами в характерных для лазерных исследований условиях.

2. Описание установки и экспериментальные результаты

В основу экспериментальной установки положен метод двойной модуляции, позволяющий существенно уменьшить влияние шумов и рассеянного лазерного света. В качестве меры, позволяющей избавиться от рассеянного лазерного излучения, служила модуляция тока разряда в поглощающей кювете, которая осуществлялась прямоугольными импульсами (с частотой следования 600 гц). В комплексе с другими мерами это позволило вести наблюдение спонтанного излучения на переходе, где действует лазерное поле (переход $3S_2 - 2p4$ неона).

Лазерное излучение, проходящее через газоразрядную кювету, предварительно модулировалось низкой частотой /18 гц/; при этом, как следствие, модулировалась и интенсивность спонтанного испускания с уровня $3S_2$. Таким образом, мы имели возможность непосредственно наблюдать изменения в спектре спонтанного испускания, обусловленные лазерным полем.

Схема экспериментальной установки приведена на рис.1. Источником сильного поля служил одномодовый стабилизированный по частоте $He-Ne$ лазер 1 с селекцией мод давлением /19/ (максимальная мощность 20 мвт).

Модулированное прерывателем 2 излучение лазера фокусировалось зеркалами 3 в охлаждаемую водой кювету 4 с неоном. Внутренний диаметр кюветы 1 мм, длина 40 см. Спонтанное излучение регистрировалось в направлении, обратном направлению распространению лазерной волны. Для уменьшения влияния рассеянного лазерного света наблюдение велось в поляризации, перпендикулярной лазерной. Фильтрация поляризаций осуществлялась поляридом 5, установленным перед входной щелью монохроматора 6. Дополнительным фильтром служило диэлектрическое зеркало 7, направляющее спонтанное излучение в монохроматор и обладающее селективными поляризационными свойствами. За кюветой находилась хорошо поглощающая свет пластинка 8.

В качестве монохроматора использовался призмный спектрограф ИСП-51, перед входной щелью которого устанавливалась полуволновая пластинка 9, поворачивающая поляризацию падающего излучения в плоскость максимального пропускания спектрографа. За монохроматором предварительной дисперсии находился интерферометр Фабри-Перо с фотоэлектрической записью спектра.

Сигнал с фотоумножителя 11 подавался на селективный усилитель (У2-6) 12, настроенный на частоту 600 гц, затем поступал через диодный детектор на такой же усилитель 13, настроенный на частоту 18 гц, детектировался синхротронным детектором (КЗ-2) 14 и записывался самопишущим прибором (SP-J2) 15.

Область дисперсии интерферометра составляла 2000 мгц, сканирование осуществлялось изменением давления. Спектрограммы представляли собой серии из 5-6 "пиков" типа приведенных на рис.2. Время записи одного порядка интерференции при постоянной времени синхронного детектора $\tau = 2$ сек, составляло 3 мик. Обработка спектрограмм производилась по методу, предложенному в /20/.

Если несколько ослабить меры по подавлению рассеянного лазерного света, то на спектрограмме, в точке, соответствующей частоте лазерного поля, возникает небольшой "провал" (кривая 2 рис. 2). Смещение центров "провала" и "пика" обусловлено рас-

ройкой частоты лазера относительно частоты перехода $3S_2 - 2p_4$.
Изменение этого смещения при изменении тока разряда и послужило основой для определения сдвига линии.

В наших экспериментах интенсивность лазерного поля выбиралась такой, чтобы сказывались лишь первые нелинейные поправки. В этом случае спектральная плотность спонтанного испускания $J(\Omega_m)$ в направлении, обратном направлению распространения лазерной волны, дается выражением:

$$J(\Omega_m) \propto e^{-\left(\frac{\Omega_m}{k\bar{v}}\right)^2} \left\{ 1 + A \left[\frac{1}{1 + (\Omega_m + \Omega)^2 / 4\Gamma^2} + a e^{-\left(\frac{\Omega}{k\bar{v}}\right)^2} \right] \right\};$$

$$\Omega_m = \omega_m - \omega_{mn}; \quad \Omega = \omega - \omega_{mn}; \quad (1)$$

$$k = \omega/c; \quad \bar{v} = \sqrt{2k_B T/m}.$$

Здесь ω, k - частота и волновое число лазерной волны; $\omega_{mn}, 2\Gamma$ - частота и "однородная" ширина линии перехода $m-n$ (в данном случае $3S_2 - 2p_4$). Член, пропорциональный A , в фигурных скобках (1) обусловлен влиянием сильного внешнего поля. Как функция Ω_m он имеет вид "пика" на частоте $\Omega_m = -\Omega$ с полушириной 2Γ и однородной полосы с доплеровским параметром $k\bar{v}$. Последняя связана с пленением резонансного излучения, резонансным обменом возбуждения и сильными упругими столкновениями. Коэффициент A пропорционален интенсивности внешнего поля и, кроме того, зависит от атомных констант релаксации и полных моментов уровней m, n , а также от поляризации падающего излучения. В соответствии с описанным выше модуляционным методом, на самописце регистрировался сигнал, пропорциональный второму члену в фигурных скобках (1) (см. рис. 2, кривая 2).

В величину Γ входят: константа спонтанной релаксации (естественная полуширина линии) Γ_{sp} , ударная константа Γ_{ud} , обусловленная сбоем фазы атомного осциллятора, неупругими процессами и упругим рассеянием на большие углы при столкновениях

с атомами газа и, в нашем случае, константа Γ_i , ответственная за уширение током разряда. Регистрируемый контур линии дополнительно уширен за счет аппаратной ширины интерферометра (30 ± 70 МГц), за счет ненулевой интенсивности внешнего поля (5 ± 8 мгц) и его некогерентности (1 мгц) и, наконец, из-за апертурных эффектов (8 ± 20 мгц).

Измерения проводились при давлениях 0,9 и 2 тор в интервале токов 10 ма \pm 75 ма. Экспериментальные результаты приведены на рис. 3. Как уширение Γ_i , так и сдвиг Δ_i с изменением тока ведут себя примерно по линейному закону. При $P = 0,9$ тор $\Gamma_i = 0,5 \pm 0,15$ МГц/ма; $\Delta_i = 0,2 \pm 0,1$ МГц/ма; при $P = 2$ тор $\Gamma_i = 0,9 \pm 0,25$ мгц/ма; $\Delta_i = 0,5 \pm 0,15$ МГц/ма, так что в интервале токов $i = 50 \pm 75$ ма и уширение, и сдвиг могут достигать довольно больших значений. Отметим, что сдвиг линии с увеличением тока происходит в красную сторону, т.е. отвечает эффективному уменьшению ω_{mn} .

3. Обсуждение результатов

Кроме столкновений с заряженными частицами, плотность которых зависит от тока, в качестве причин, вызывающих токовые изменения в контуре линии, можно назвать следующие: 1) изменение термодинамических условий (температуры и плотности) с изменением тока разряда, 2) влияние макроскопических полей (электрического и магнитного) разряда.

Изменение термодинамических условий влияет на величину $\Gamma_{ud} = n \langle v \sigma_{ud} \rangle \sim n \bar{v} \langle \sigma_{ud} \rangle$, где n - плотность неона, σ_{ud} - сечение столкновений, приводящих к уширению линии. В наших условиях поглощающая ячейка непосредственно связана с объемом, в котором помещен подогретый катод и который примерно в 200 раз больше объема ячейки. В отличие от поглощающей ячейки, охлаждаемой проточной водой, этот объем имеет естественное воздушное охлаждение. Измерения проводились после напуска в систему определенной порции газа, поэтому, как трудно показать:

$$n \bar{v} \langle \sigma_{ud} \rangle = n' \frac{T'}{\sqrt{T}} \sqrt{\frac{2k_B}{m}} \langle \sigma_{ud} \rangle; \quad (n = n' \frac{T'}{T}), \quad (2)$$

где n' , T' - плотность и температура в прикатодной области. Плотность n' от тока не зависит, температура T' определяется температурой катода, которая слабо меняется с изменением тока разряда; незначительно также изменение температуры T поглощающей ячейки. В результате величина (2) при изменении тока от нуля до 75 ма может увеличиваться не более, чем на 10% своего значения, которое при $P=2$ тор равно примерно $70 \rightarrow 80$ мгц /8/. Таким образом, наблюдаемое токовое уширение линии не связано с изменением термодинамических условий.

Действие электрического поля разряда легко оценить, исходя из оценки штарковского сдвига уровня $3S_2$. В предположении, что уровень $3S_2$ возмущается, в основном, за счет состояния $4p$ имеем /17/:

$$\Delta \Gamma \sim \frac{C_4}{e^2} E^2; \quad C_4 = \frac{3}{16\pi^2} z_0 c \alpha \frac{gf}{\Delta \omega};$$

$$z_0 = 2,8 \cdot 10^{-13} \text{ см}, \quad \alpha = 1/137, \quad \Delta \omega = 1900 \text{ см}^{-1} \quad (3)$$

Здесь E - амплитуда электрического поля, g - статистический вес, $\Delta \omega$, f - частота и сила осциллятора для перехода $4p-3S_2$. При $gf \sim 1$ для $\Delta \Gamma \sim 10^2$ Мгц необходимо иметь $E \sim 2 \cdot 10^3$ в/см, что заведомо больше реального поля в разряде. О незначительности влияния электрического поля говорит и тот факт, что его напряженность слабо меняется с изменением тока.

Влияние магнитного поля также поддается оценке сверху. Максимальное магнитное поле, создаваемое током разряда при $i = 10^2$ ма ($r = 0,5$ см) есть $H_i \sim i/2\pi r \sim 0,3 \cdot 10^2 \text{ а/м} \approx 0,4 \text{ эрст}$, что даёт $\Delta \Gamma \sim egH_i/2m_e c \sim 0,7$ мгц (здесь g - фактор Ланде, m_e - масса электрона; $g \approx 1,3$), т.е. величину, много меньшую измеренной.

Из всех видимых причин уширения и сдвига линии от тока остается лишь одна - столкновения с заряженными частицами (электронами и ионами), причем основной эффект создают электроны, поскольку их температура значительно выше ионной. По существу, возможность экспериментального наблюдения уширения

спектральных линий электронами в обычных условиях разряда постоянного тока еще ранее предсказывалась А.С.Хайкиным /18/. Из данных /18/ следует, что при столкновениях с электронами вероятность неупругих процессов с переходом только по четырем каналам ($3S_2 \rightarrow 4d', 5d', 6d', 4p$) есть

$$\langle v_e \sigma_e \rangle \sim 3 \cdot 10^{-5} \text{ см}^3/\text{сек}. \quad (4)$$

Для оценки уширения линии следует еще учесть возможность перехода по другим каналам ($3S_2 \rightarrow 4s, 5s, 2p$ и т.д.), упругий канал рассеяния, а также возмущение уровня $2p_4$. Если (4) увеличить примерно в 3 раза, то из наших результатов при токе $i = 50$ ма и давлении $P=1$ тор получим $n_e \sim 1,5 \cdot 10^{12}$ 1/см³, т.е. вполне реальную для этих условий плотность электронов. Сдвиг линии в "красную" сторону также свидетельствует в пользу столкновений с электронами. Действительно, если исходить из того, что при столкновениях с электронами возмущается, в основном, уровень $3S_2$, то штарковский сдвиг для него как раз приводит к уменьшению частоты перехода $3S_2-2p_4$ (главный возмущающий уровень $4p$ расположен выше $3S_2$).

Линейная зависимость уширения и сдвига от тока согласуется с примерно линейной зависимостью плотности электронов от тока. С увеличением давления наклон графиков увеличивается, в соответствии с тем, что при равных токах большему давлению отвечает большее n_e . Среднее отношение уширения к сдвигу с изменением тока и давления примерно сохраняется:

$\Gamma_i/|\Delta i| \sim 1,8$ при $P=2$ тор и $\Gamma_i/|\Delta i| \sim 2,5$ при $P=0,9$ тор, что свидетельствует о едином механизме процесса. Средняя величина $\Gamma_i/|\Delta i|$ почти в два раза превосходит максимальное теоретическое значение для столкновений с электронами в приближении одного возмущающего уровня /17/ (величина γ , введенная в /17/, соответствует $2\Gamma_i$ в нашем случае). Причина этого отличия не совсем понятна, впрочем его нельзя гарантировать из-за большого разброса значений $\Gamma_i/|\Delta i|$.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности довольно детального исследования механизма столкновений возбужденных атомов с электронами в условиях слабо ионизированной

газоразрядной плазмы. Для этого одновременно с регистрацией изменения формы спектральной линии следует измерять электронную плотность и температуру. Отметим, что для решения данной задачи метод, основанный на регистрации спектральной плотности спонтанного испускания, по-видимому, не самый лучший из методов нелинейной спектроскопии. Большая точность может быть достигнута при исследовании вынужденного испускания (поглощения), где, как правило, лучше отношение сигнал/шум и, кроме того, нет таких дополнительных источников ошибок, как довольно большая аппаратная ширина и значительные апертурные эффекты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 11/ Р.Н. Lee, M.L. Skolnik. *Appl. Phys. Lett.*, 10, 303, 1967.
- 12/ В.Н. Лисицын, В.П. Чеботаев. *ЖЭТФ*, 54, 419, 1968.
- 13/ B. Decamps, M. Dumont. *IEEE, QE-4*, 916, 1968.
- 14/ О.Н. Компанец, В.С. Летохов, В.В. Никифурин. Препринт ФИАН, № 66, 1968.
- 15/ G.M. Lawrence, H.S. List. *Phys. Rev.* 178, 122, 1969.
- 16/ J.Z. Klose. *Phys. Rev.*, 188, 45, 1969.
- 17/ X.В. Каллас, В.Н. Ребане, М.П. Чайка. Сб. "Физика газовых лазеров", Л. ЛГУ, 1969.
- 18/ P.W. Smith, T. Hänsch. *Phys. Rev. Lett.*, 26, 740, 1971.
- 19/ В.М. Татаренков, А.Н. Титов. *Опт. и спектр.*, 30, 803, 1971.
- 110/ Ю.А. Матюгин, А.С. Проворов, В.П. Чеботаев. Препринт ИФП СО АН СССР, № 20, 1972.
- 111/ W.R. Bennett, P.J. Kindlmann. *Phys. Rev.*, 149, 35, 1966.
- 112/ A.L. Bloom, D.L. Wright. *Appl. Optics*, 5, 1528, 1966.
- 113/ Г.А. Михненко, Е.Д. Проценко и Е.А. Седой. *Опт. и спектр.*, 32, 809, 1972.
- 114/ A.D. White. *Appl. Phys. Lett.*, 10, 24, 1967.
- 115/ С.Н. Загаев, Ю.Д. Коломников, В.П. Чеботаев. Труды СГНИИМ, выпуск 9, 7, 1971.
- 116/ H.K. Holt. *Phys. Rev. Lett.*, 19, 1275, 1967.
- 117/ И.И. Собельман. Введение в теорию атомных спектров. М., Физматгиз, 1963.
- 118/ А.С. Хайкин. Труды ФIAN, 51, 90, 1970.
- 119/ Э.Г. Сапрыкин. Всесоюзный симпозиум по физ. основам управл. частотой вынужд. излучения. Киев, 1972, Тезисы, стр. 95.
- 120/ В.П. Качанов, Э.Г. Сапрыкин. *Опт. и спектр.* (в печати).

Подписи к рисункам

Рис.1. Схема экспериментальной установки: 1 - лазер, 2-прерыватель, 3 - сферические зеркала, 4 - кювета, 5 - поляризатор, 6 - монохроматор, 7 - полупрозрачное зеркало, 8 - светопоглотитель, 9 - полуволновая пластинка, 10 - интерферометр Фабри-Перо, 11 - фотоумножитель /ФЭУ-27/, 12,14 - усилители /У2-6/, 13 - синхронный детектор /СД-1/, 15 - самописец, 16 - модулятор тока разряда, 17 - система стабилизации лазера.

Рис.2. Примеры записи сигнала с полным (1) и неполным (2) подавлением рассеянного лазерного света.

Рис.3. Уширение \sqrt{i} (1,2) и сдвиг Δ_i (3,4) линии 0,63 мкм от тока $1,3 - p = 2$ тор, $2,4 - p = 0,9$ тор.

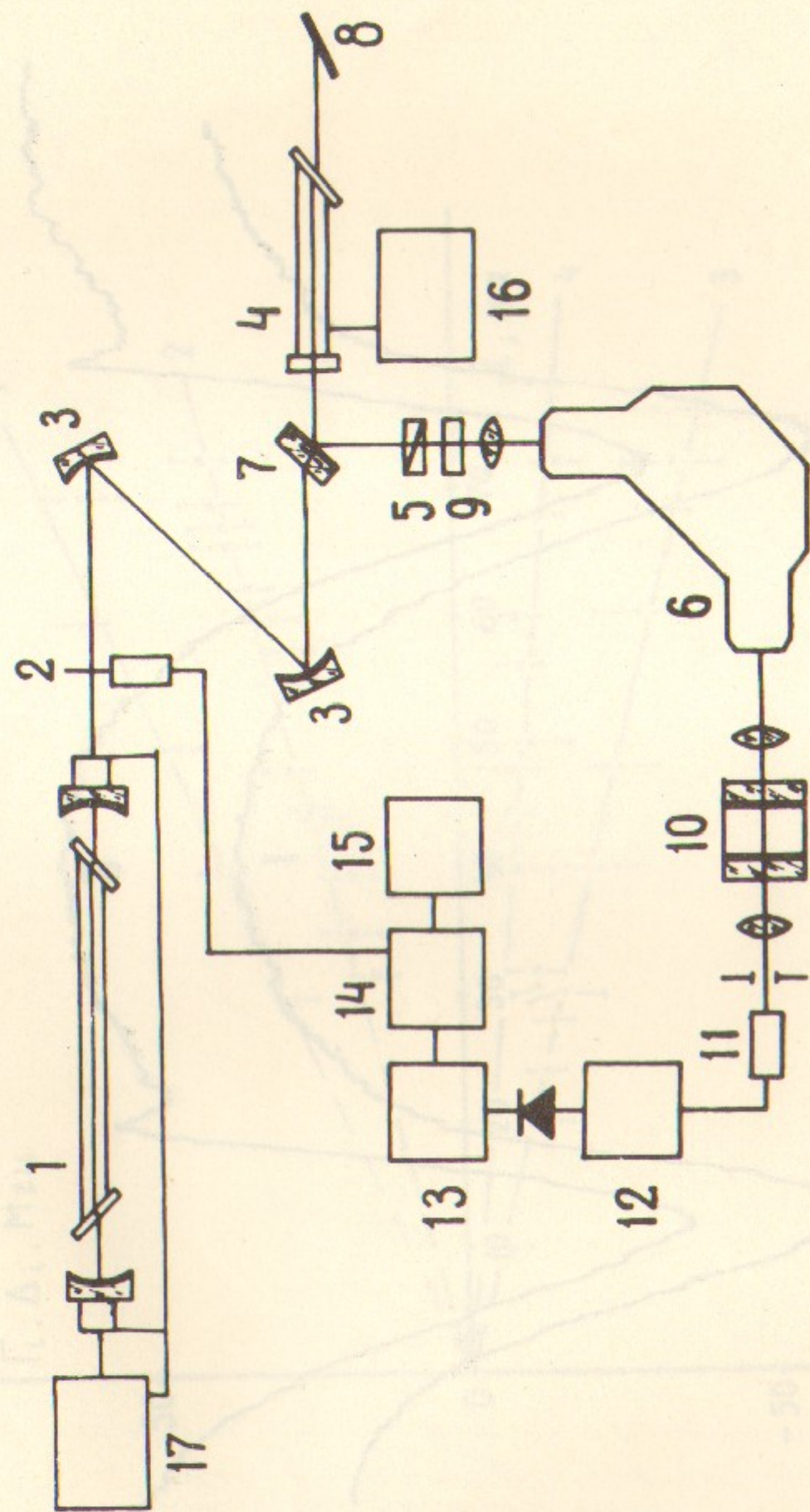


Рис. 1.

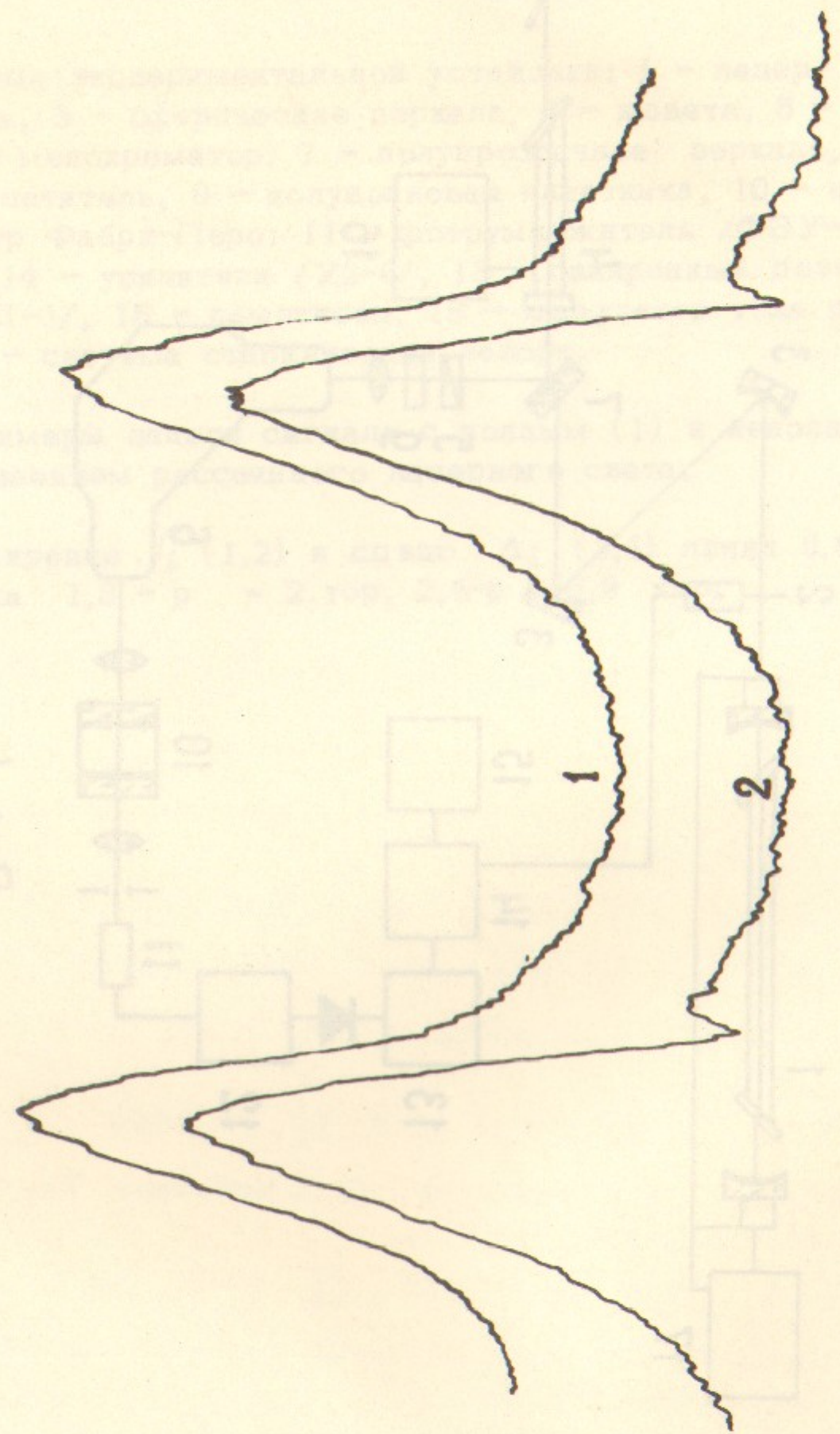


Рис. 2

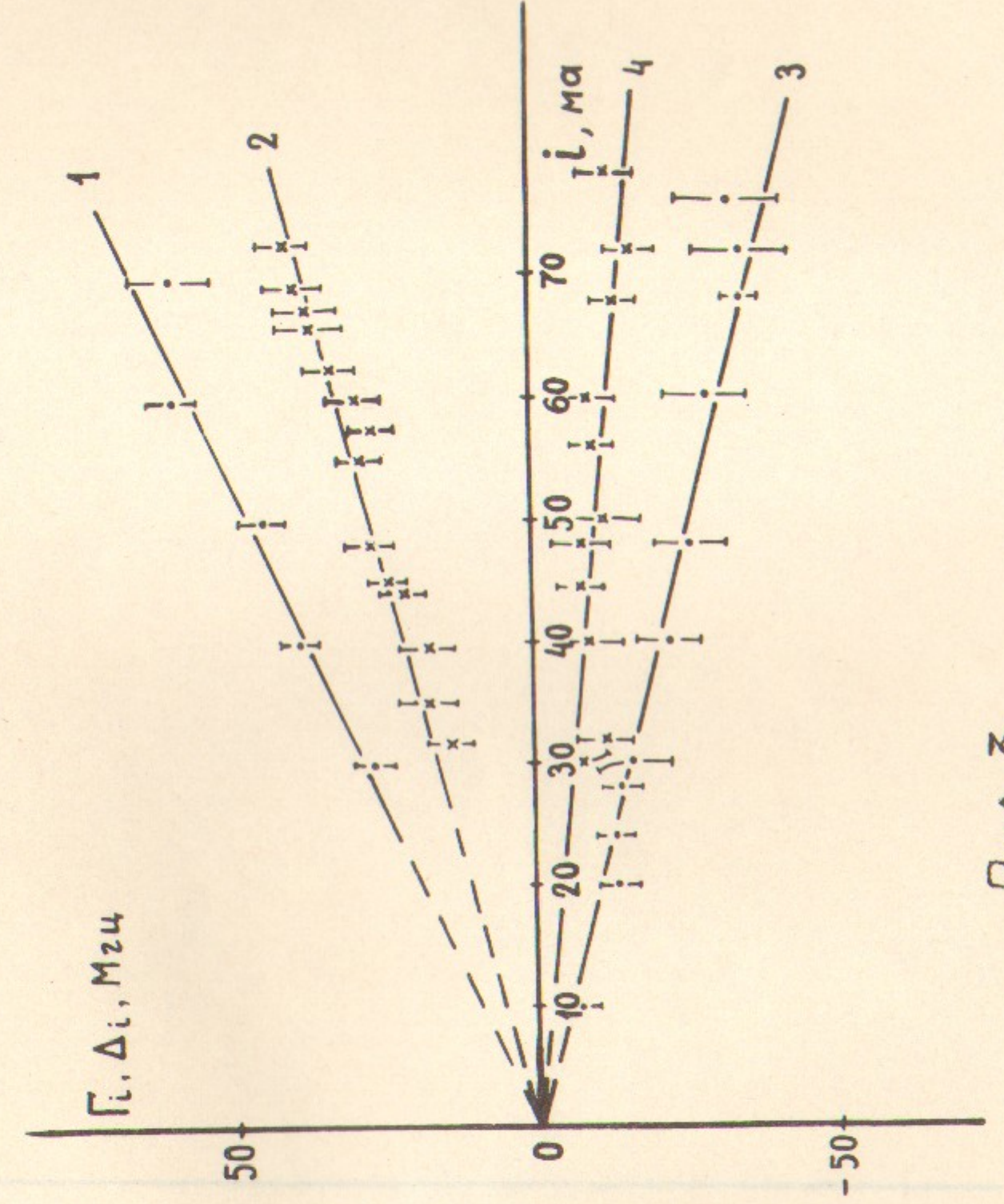
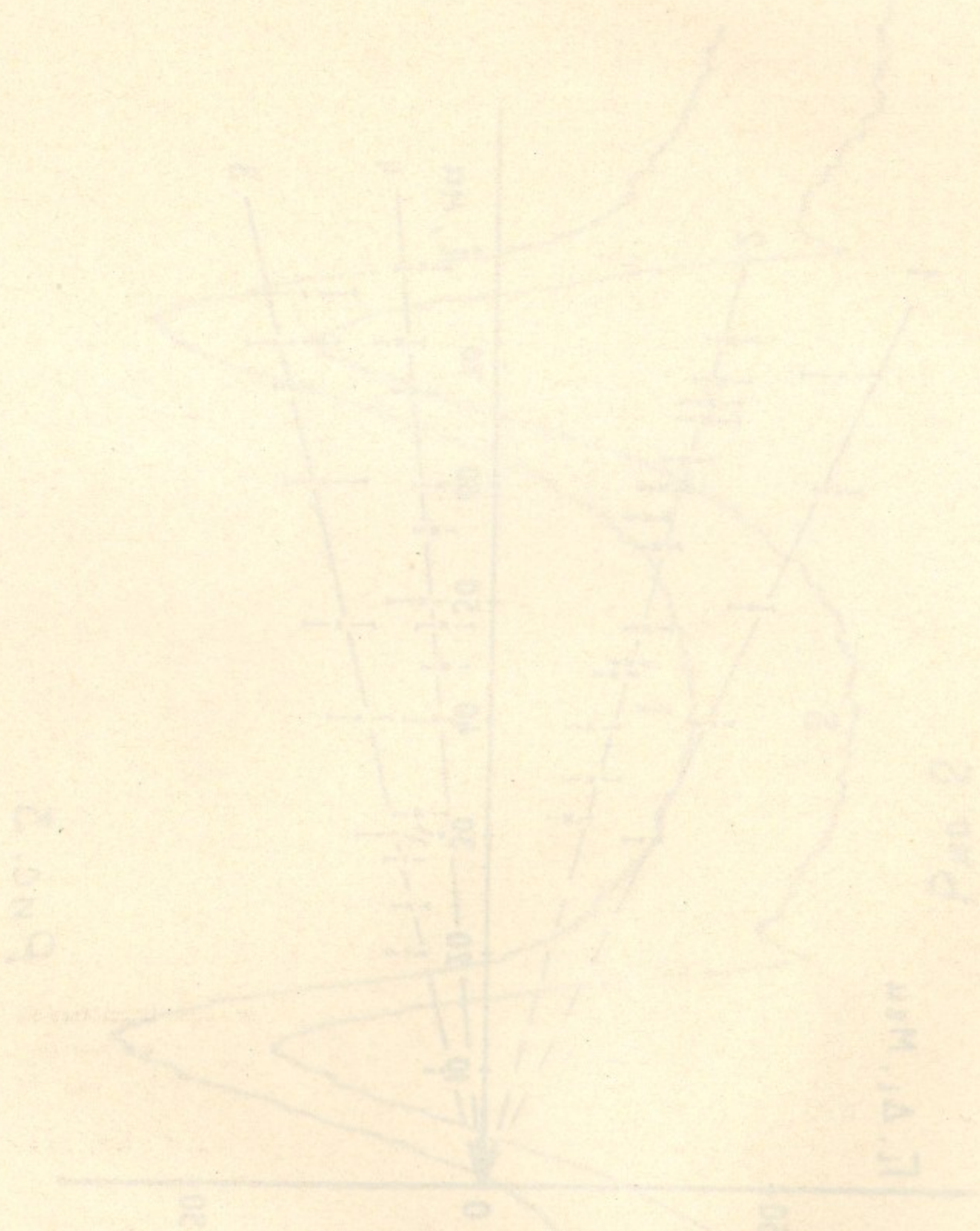


Рис. 3



Ответственный за выпуск А.М.Шалагин
Подписано к печати 1.П.1973г. МН08033
Усл. 0,6 печ.л., тираж 200 экз. Бесплатно
Заказ № 3 . ПРЕПРИНТ , вг

Отпечатано на ротаприте в ИЯФ СО АН СССР