

К. 841

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ АН СССР.

препринт 41

Э.П.Кругляков, Ю.Е.Нестерихин

**Система для сверхскоростной
регистрации контуров спектральных
линий**

2

+

НОВОСИБИРСК 1966

При проведении экспериментов с высокотемпературной плазмой, исследовании спектров быстропротекающих химических реакций, а также при изучении других явлений, в которых приходится регистрировать форму спектральных линий за времена меньшие времени длительности исследуемого процесса, крайне необходимы устройства с высоким временным разрешением и большим усилением.

Как известно, по форме спектральных линий в ряде случаев можно определять плотность и температуру плазмы /1,2/. Для этой цели предложен ряд схем (см., например /3,4/), обладающих, однако, либо довольно значительной инерционностью, либо использующих фотоматериалы с их нелинейной зависимостью степени почернения от интенсивности регистрируемого света, что создаёт дополнительные трудности при расшифровке спектрограмм.

В /5/ был предложен электронный прибор (двойной преобразователь), устраняющий, в принципе, указанные сложности и позволяющий регистрировать в линейном масштабе профиль спектральной линии за время $\sim 20 \pm 50$ мксек. В /6/ описан несколько усовершенствованный прибор с большими выходными токами и меньшим временем регистрации. Ниже приведены характеристики модернизированного двойного преобразователя с существенно улучшенными параметрами.

Принцип действия и конструкция двойного преобразователя

На рис. I приведена схема прибора, представляющего собой комбинацию элементов электронно-оптического преобразователя (ЭОП) и электронного умножителя (ЭУ). Световое изображение, спроектированное на фотокатод (1) прибора, с помощью электростатической линзы (2) переносится на диафрагму с регистрирующей щелью (4). Размеры щели: ширина $S = 0,08$ мм, высота $h = 12$ мм. За регистрирующей щелью расположена диодная система фотоумножителя ФЭУ-52(5). Для улучшения разрешения электронно-оптической части прибор снабжен фокусирующим электродом (7).

Спроектируем на фотокатод прибора изображение равномерно освещенной щели. Тогда в плоскости регистрирующей щели образуется электронное изображение, имеющее П-образную форму. Пока оно не пересекает регистрирующую щель, сигнал на выходе ЭУ отсутствует. При подаче на отклоняющие пластины (3) напряжений пилообразной формы электронное изображение будет

перемещаться равномерно по плоскости диафрагмы со скоростью v . При пересечении регистрирующей щели электронным изображением на коллекторе ЭУ (6) возникает ток, форма которого во времени будет трапецеидальной с полушириной $\tau_0 = \ell/v$ (ℓ - поперечный размер электронного изображения). Длительность переднего и заднего фронтов импульса $\tau = S/v$. (Входная и регистрирующая щели параллельны). В качестве иллюстрации на рис. 2 приведены осциллограммы "изображения" равномерно освещенной щели шириной $\ell = 0,4$ мм. Следует отметить, что хотя "изображение" щели искажено довольно существенно (трапеция вместо прямоугольника), при регистрации плавных световых распределений отклонения от истинного профиля оказываются значительно меньше.

Результаты испытаний и основные технические характеристики двойного преобразователя

Прибор испытывался в следующих режимах: ускоряющее напряжение на преобразователе $5 + 12$ кв, фокусирующее напряжение на ЭОП варьировалось в пределах ± 500 в, разность потенциалов на диодной системе ЭУ доводилась при испытаниях до 3 кв, причём для увеличения выходной мощности, снимаемой с коллектора, применялся форсированный режим последних каскадов ЭУ (до 850 в на последнем диоде).

Коэффициент усиления K прибора довольно слабо зависит от величины ускоряющего напряжения на электронно-оптической части прибора (меняется примерно вдвое при изменении $U_{ЭОП}$ от 5 до 12 кв) и имеет пологий максимум при $U_{ЭОП} \approx 8 + 9$ кв. Используя калиброванный источник света, удалось определить интегральную чувствительность фотокатода ($E \approx 40 \frac{\text{мкв}}{\text{лм}}$) и общий коэффициент усиления прибора. Зависимость полного коэффициента усиления от напряжения на диодной системе ЭУ представлена на рис. 3. Там же приведена кривая пороговой чувствительности прибора от $U_{ЭУ}$. Следует отметить, что в равных условиях испытаний величина темнового тока для двойного преобразователя оказывается существенно меньшей, чем для соответствующего фотоумножителя, чего и следовало ожидать, поскольку в описываемом приборе ток темновых фотоэлектронов сильно ослаблен целевой диафрагмой.

Немаловажной характеристикой прибора, особенно в наносекундном диапазоне при работе на согласованную нагрузку, является максимальная ве-

личина линейного выходного тока. При $U_{ЭУ} = 3$ кв ток с коллектора оставался линейным по отношению к световому потоку до $J \sim 0,5$ а.

Другим весьма существенным параметром, определяющим минимальное время регистрации исследуемого светового распределения, является инерционность двойного преобразователя.

Представленные на рис. 2 "изображения" равномерно освещенной щели имеют соответственно "полуширины" $\tau_0 = 65 \cdot 10^{-6}$ сек (рис. 2а) и $\tau_0 = 36 \cdot 10^{-6}$ сек (рис. 2б). Обработка осциллограмм показывает, что отношение длительности фронта нарастания (спада) τ_f к длительности по полуширине τ_0 постоянно и равно отношению ширины регистрирующей щели прибора S к ширине ℓ изображения микрометрической щели на фотокатоде: $\tau_f/\tau_0 \approx S/\ell = \frac{1}{5}$.

Искажения изображения щели оказываются заметными при $\tau_0 \approx 10^{-8}$ сек, когда $\tau_f \approx 2 \cdot 10^{-9}$ сек. Таким образом, постоянная времени прибора оказывается порядка $1 + 2 \cdot 10^{-9}$ сек, что позволяет производить записи контуров линий за времена порядка 10^{-8} сек.

Искажения, вносимые регистрирующей щелью прибора при "записи" профилей спектральных линий.

Как уже отмечалось выше, в тех случаях, когда ширина микрометрической щели ℓ сравнима с поперечным размером регистрирующей щели, изображение оказывается достаточно сильно искаженным. Иначе обстоит дело при регистрации плавных световых распределений (например, контура спектральной линии).

Предположим, что спектральная линия имеет гауссовскую или дисперсионную форму.

$$J(\lambda) = J_0 \exp[-\alpha(\lambda - \lambda_0)^2] \quad (I)$$

$$J(\lambda) = J_0 [1 + \beta(\lambda - \lambda_0)^2]^{-1}$$

Полагая дисперсию прибора постоянной в пределах профиля линии, можем перейти к пространственному распределению света (электронов) в фокаль-

ной плоскости:

$$J(x) = J_0 \exp[-(x/x_0)^2 \ln 2] \quad (2)$$
$$J(x) = J_0 [1 + (x/x_0)^2]^{-1}$$

Постоянные при x в выражениях (2) выбраны так, чтобы при $x = x_0$ интенсивность была равна $1/2 J_0$.

При перемещении электронного изображения мимо регистрирующей щели шириной S со скоростью v зависимость потока электронов, проходящих сквозь щель, от времени для случая дисперсионного распределения будет иметь следующий вид:

$$J(t) = J_0 \int_{vt - S/2}^{vt + S/2} \frac{dx}{1 + (x/x_0)^2} \quad (3)$$

Если ввести безразмерные переменные $x/x_0 = X$, $S/x_0 = S'$, $v t/x_0 = T$ и положить для простоты $J_0 = 1$, то выражение для потока электронов сквозь регистрирующую щель примет вид:

$$J_1(T) = \text{arc tg}(T + S'/2) - \text{arc tg}(T - S'/2) \quad (4)$$

Соответственно для гауссовского распределения получаем:

$$\Phi\{(T + S'/2)\sqrt{2 \ln 2}\} + \Phi\{-(T - S'/2)\sqrt{2 \ln 2}\}, T \leq \frac{S'}{2} \quad (5)$$
$$\Phi\{(T + S'/2)\sqrt{2 \ln 2}\} - \Phi\{(T - S'/2)\sqrt{2 \ln 2}\}, T \geq \frac{S'}{2}$$

Здесь Φ - интеграл вероятности.

На рис. 4, 5 представлены профили спектральных линий для случаев гауссовского и дисперсионного распределения (сплошные кривые). Там же изображены профили выходных сигналов, вычисленные из (4) и (5) для различных значений ширины щели прибора. Как следует из приведенных графиков,

даже при ширине щели $S = x_0$ ($S' = 1$) ошибка в определении полуширины линии оказывается порядка 10%. Практически это означает, что в подобного рода приборах не следует стремиться делать слишком узкие регистрирующие щели, поскольку это приведет, главным образом, к потере чувствительности, но не улучшит существенно точность.

Наиболее неблагоприятный случай с точки зрения искажения контура спектральной линии щелью конечной ширины имеет место при "записи" линии, имеющей провал интенсивности в центре. На рис. 6 представлен контур линии водорода $H\beta$, вычисленный согласно /1/ (сплошная линия) и соответствующий этому распределению выходной сигнал для щели $S = 0,5 x_0$, $0,75 x_0$ и x_0 . В этом случае только вблизи центра линии отклонение от истинного контура получается значительным, что вообще говоря, несущественно, поскольку наиболее важная информация о параметрах плазмы может быть получена из измерения полуширины линии.

На рис. 7 приведен профиль линии водорода $H\beta$, зарегистрированный с помощью двойного преобразователя. Определение спектральной полуширины линии $\Delta\lambda$ производилось следующим образом: после "записи" линии была получена осциллограмма ширины микрометрической щели при той же скорости развертки. Сравнивая две осциллограммы, можно определить пространственную полуширину спектральной линии, после чего по известной дисперсии монохроматора легко находится полуширина $\Delta\lambda$. Определенное таким способом значение плотности плазмы находится в хорошем соответствии с интерферометрическим измерением электронной концентрации.

Выводы

Испытания прибора показали, что с его помощью можно производить регистрацию контуров спектральных линий за времена вплоть до 10^{-8} сек и менее. С помощью двойного преобразователя можно производить многократную запись как отдельных линий, так и участков спектра в течение одного процесса, что позволяет проследить за изменениями, происходящими в плазме во времени. Прибор может быть использован также для изучения распределения свечения в цилиндрически симметричных объектах. Наконец, двойной преобразователь может быть использован в качестве ФЭУ с улучшенным отношением сигнал-шум при исследованиях слабо светящихся объектов.

В заключение авторы выражают благодарность Л.В.Гивгину и его сотрудникам за помощь в изготовлении прибора, а также Г.Г.Долгову-Савельеву за обсуждение результатов работы.

Л и т е р а т у р а

1. H.R.Griem, A.C.Kolb, K.J.Shen. Phys. Rev., 116, № 4, 1959.
2. С.Ю.Лукьянов, В.И.Синицын. II Международная конференция ООН по применению атомной энергии в мирных целях.
3. И.Ф.Балашов, М.П.Ванюков, В.Р.Муратов, Е.В.Нилов. Оптика и спектроскопия, 10, 540, 1961.
4. В.Г.Колошников, М.А.Мазинг, С.Л.Мандельштам, Ю.П.Марасанов. Оптика и спектроскопия, 11, 556, 1961.
5. М.М.Бутслов, В.С.Комельков, Ю.Е.Нестерихин. Всесоюзная конференция по высокоскоростной фотографии и кинематографии. МГУ, Москва, 1960. Успехи научной фотографии, т. IX, 72 Изд. "Наука". М.-Л., 1964.
6. Э.П.Кругляков, Ю.Е.Нестерихин. Теплофизика высоких температур 3, № 4, 617, 1965.

Подписи к рисункам

- Рис. 1. Схема двойного преобразователя
1 - фотокатод; 2 - анод ЭОП; 3 - отклоняющие пластины;
4 - регистрирующая щель; 5 - диодная система ЭУ;
6 - коллектор; 7 - фокусирующий электрод.
- Рис. 2. Осциллограммы профиля изображения равномерно освещенной щели шириной $\ell = 0,4$ мм.
а) длительность развертки по полуширине, $\tau_0 = 65 \cdot 10^{-6}$ сек.
б) То же, $\tau_0 = 36 \cdot 10^{-9}$ сек.
- Рис. 3. Коэффициент усиления двойного преобразователя, K - пунктирная кривая и пороговая чувствительность прибора, Φ - порог. (сплошная кривая) в зависимости от напряжения на диодной системе $U_{\text{ЭУ}}$. $U_{\text{ЭОП}} = 8,8$ кв.
- Рис. 4. Искажения гауссовского профиля (сплошная линия) при сканировании щелью конечной ширины.
- Рис. 5. Искажения дисперсионного профиля (сплошная линия) при сканировании щелью конечной ширины.
- Рис. 6. Искажения профиля линии H_{β} (сплошная линия, вычислено по /1/) при сканировании щелью конечной ширины.
- Рис. 7. Осциллограмма профиля линии H_{β} , полученная с помощью двойного преобразователя. Время регистрации по полуширине $\tau \approx 10^{-6}$ сек.

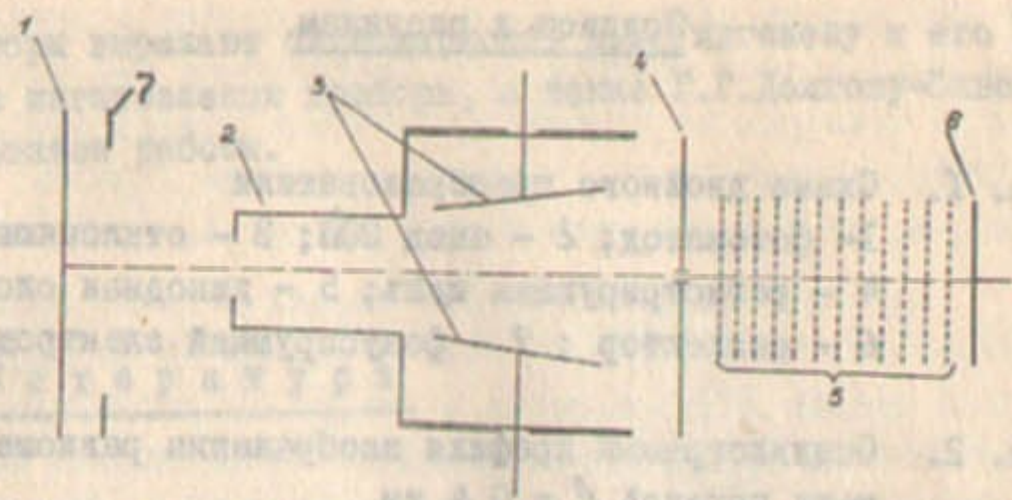
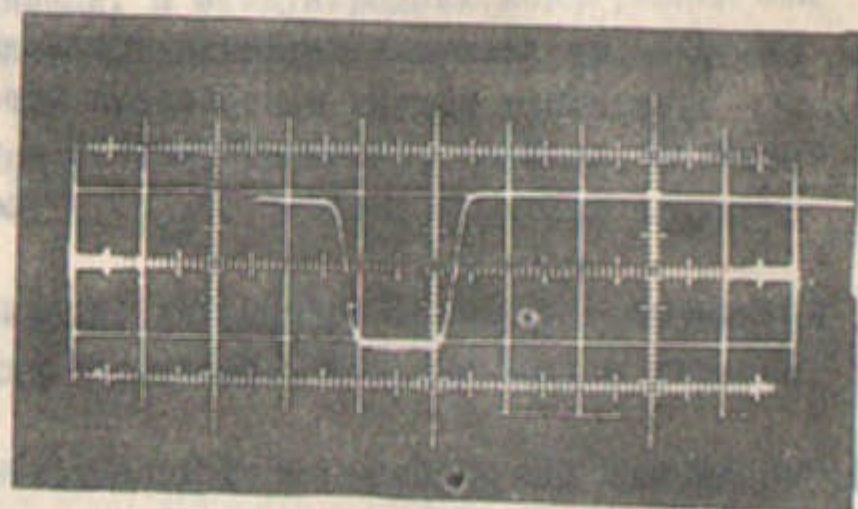
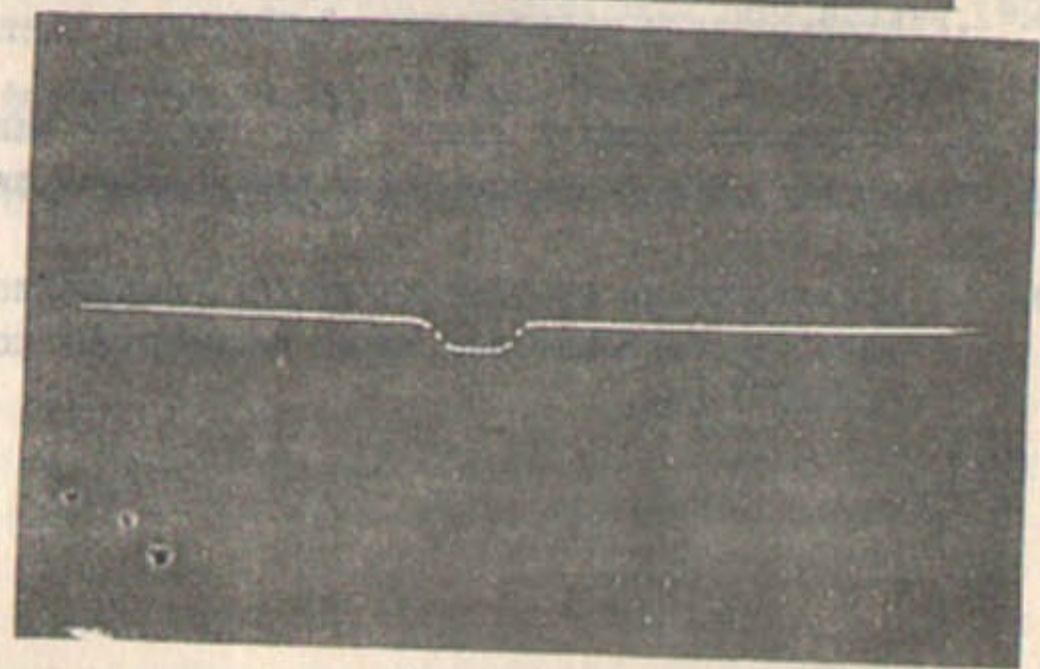


Рис. 1



а)



б)

Рис. 2

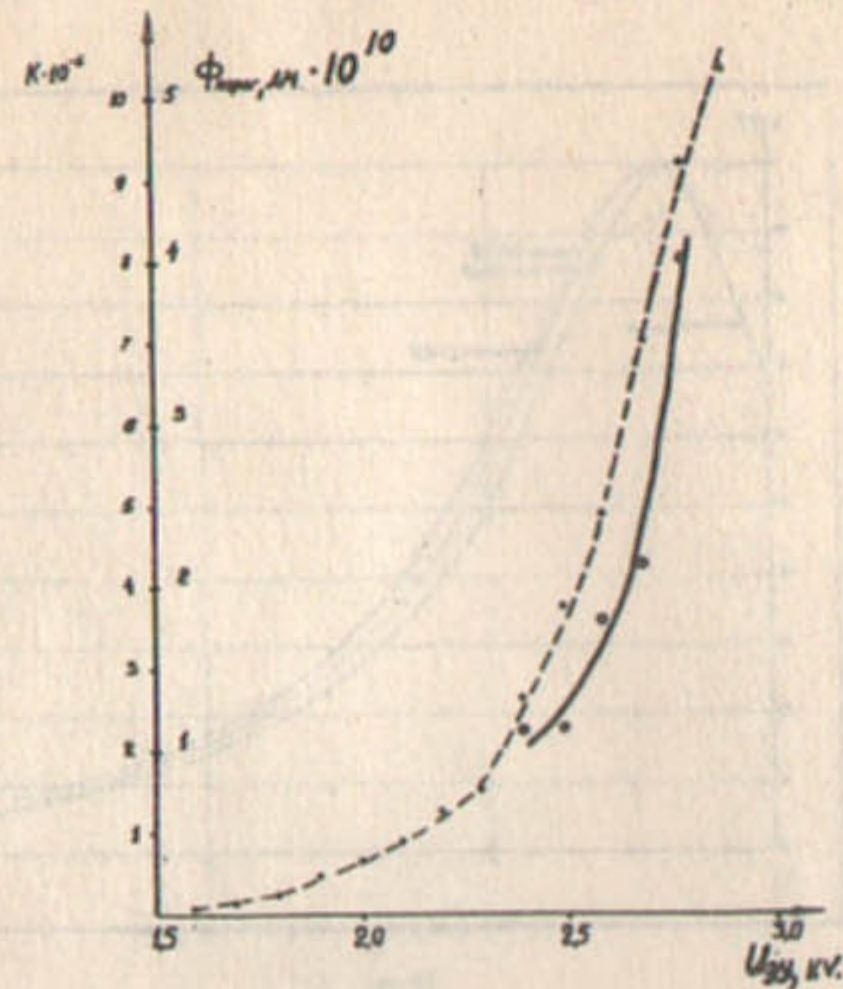


Рис. 3

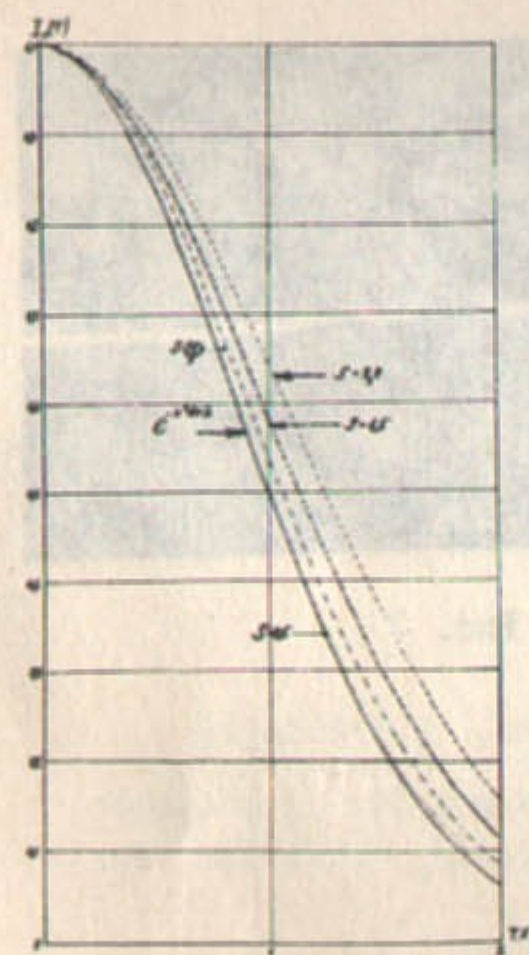


Рис. 4

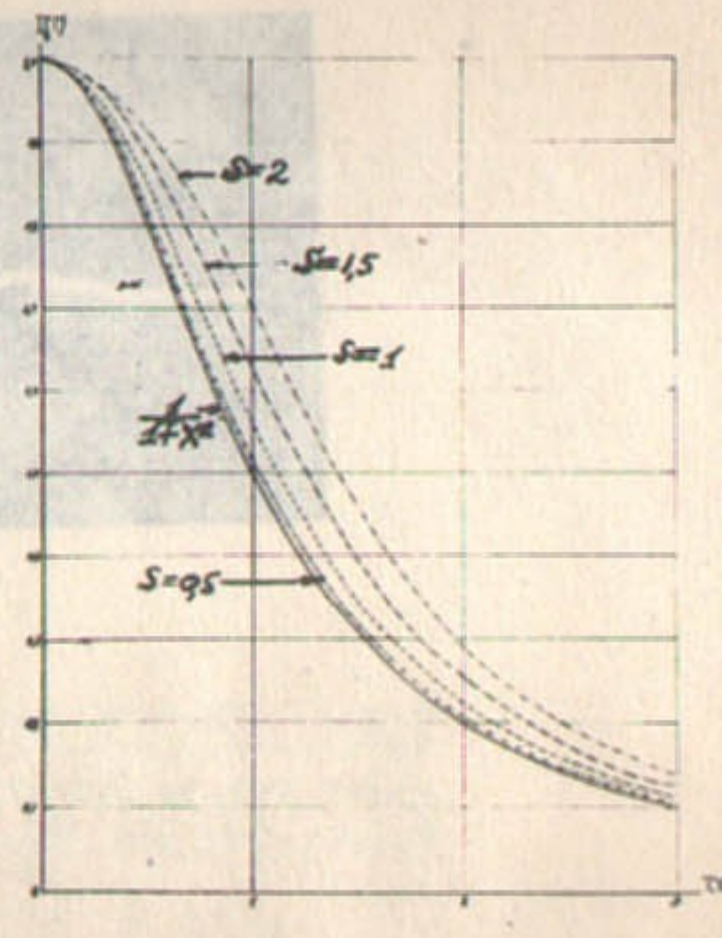


Рис. 5

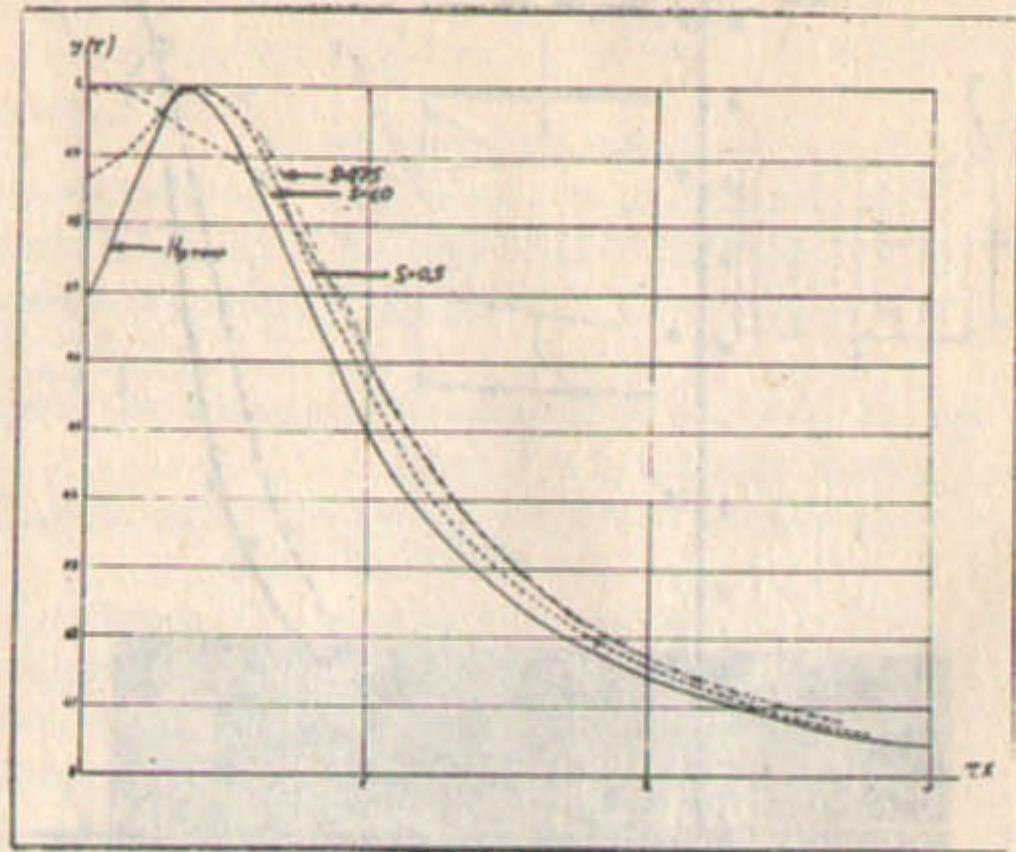


Рис. 6

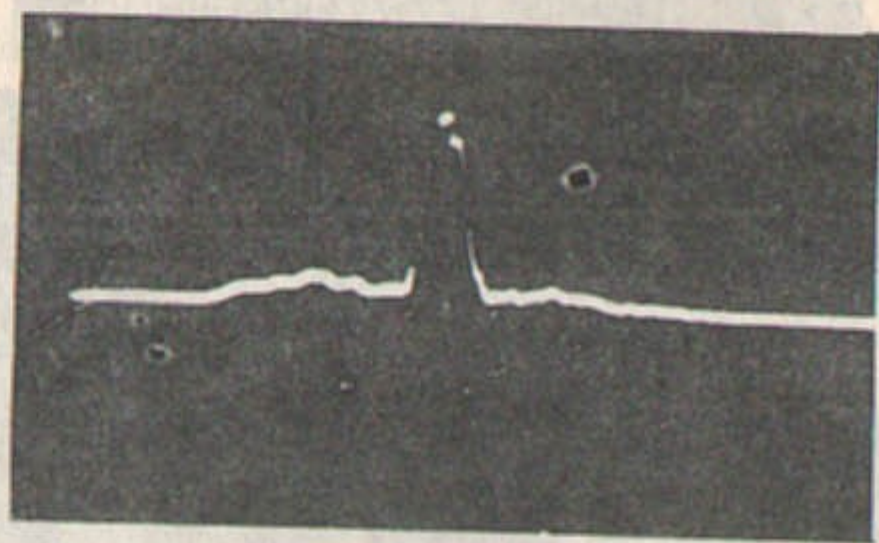


Рис. 7

Ученый секретарь
 Института физики им. Л.Д. Ландау
 Москва - 125 881, Ленинский пр., 10.05.66. к.п.