

11. В. Г. Фастовский. Теплоэнергетика, № 2, 1958.
12. С. С. Кутателадзе. Основы теории теплообмена, Машгиз, 1957.
13. Э. Р. Эккерт, Р. М. Дрейк. Теория тепло- и массообмена, Госэнергоиздат, 1961.
14. В. М. Боришанский. Ж. техн. физ., XXVI, в. 2, 1956.
15. В. М. Боришанский. Энергомашиностроение, № 11, 1963.
16. Вильям Х. Мак-Адамс. Теплопередача, Металлургияиздат, 1961.
17. Г. Н. Кружилин. Изв. АН СССР, № 5, 1949.
18. Г. Н. Кружилин, В. И. Субботин. Тр. II Международной конференции по мирному использованию атомной энергии, доклад № 2144, 1953.
19. Л. С. Стерман. Ж. техн. физ., 23, в. 2, 1953.
20. Д. А. Лабунцов. Теплоэнергетика, № 7, 1960.
21. В. Г. Морозов. Изв. высш. учебн. завед., Энергетика, № 1, 1961.
22. Е. А. Казакова. Докл. АН СССР, 121, № 1, 1950.
23. Е. А. Казакова. Сб. Вопросы теплообмена при изменении агрегатного состояния вещества, Госэнергоиздат, 1953.
24. В. С. Головин, Б. А. Кольчугин, Д. А. Лабунцов. Инж.-физ. ж., № 2, 1963.

УДК 535.853

**ЭЛЕКТРОННЫЙ ПРИБОР  
ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ОПТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ  
И КОНТУРОВ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ ВО ВРЕМЕНИ**

*Э. П. Кругляков, Ю. Е. Нестерихин*

Описан прибор, являющийся разработкой ранее представленного [1] варианта комбинированного устройства, состоящего из электронно-оптического преобразователя и электронного умножителя («двойной преобразователь»). Прибор предназначен для преобразования одномерного оптического изображения в электронное с последующей трансформацией электронного изображения в электрический сигнал во времени; обладает разрешением по времени до 0,1 мсек при коэффициенте усиления  $\sim 5 \cdot 10^6$  и выходном напряжении до 100 в.

Проводящиеся в настоящее время измерения оптических характеристик плазмы с помощью спектрографов с механическими развертками обладают рядом существенных недостатков, таких как недостаточное разрешение во времени, низкая чувствительность, громоздкость. Даже относительно яркие объекты иногда приходится фотографировать многократно, чтобы получить почернения, достаточные для фотометрирования. В этом случае предполагается, что явление повторяется во всех исследуемых стадиях, что в действительности почти никогда не наблюдается. К недостаткам подобных методов следует также отнести необходимость применения фотоматериалов с нелинейной зависимостью степени почернения от интенсивности регистрируемого света и связанные с этим трудности при расшифровке спектрограмм. Применение электронно-оптических преобразователей с временной разверткой [2] существенно повышает разрешение по времени, но не дает непосредственной информации о форме и ширине спектральных линий, поскольку и в этом случае необходимо использование фотоматериалов. Подобные трудности могут быть устранены при фототелеметрической регистрации контура спектральной линии, как это было выполнено в работе [3] с помощью электромеханического смещения пластин интерферометра Фабри-Перо. К сожалению, этот метод не пригоден при исследовании быстрых процессов, с временами релаксации менее 100 мсек.

В 1959 г. был предложен и использован для спектральных целей «двойной преобразователь», позволяющий регистрировать контур спектральной линии за время порядка нескольких микросекунд [1].

В данной работе приводятся описание и характеристики нового прибора подобного типа, разработанного в Институте ядерной физики СО АН СССР на основе электронно-оптического преобразователя и фотоумножителя ФЭУ-14. Новая конструкция позволила существенно улучшить параметры прибора.

Описание и принцип действия «двойного преобразователя». На рис. 1 показана схема прибора, представляющего собой комбинацию электронно-оптического преобразователя (ЭОП) и электронного умножителя (ЭУ).

«Двойной преобразователь» состоит из фотокатода, фокусирующего электрода, пары отклоняющих пластин, позволяющих перемещать электронное изображение, и диодной системы электронного умножителя. Между анодом ЭОП и первым диодом ЭУ расположена регистрирующая щель шириной 0,08 мм. Если на фотокатод прибора спроектировать изображение равномерно освещенной оптической щели, то в плоскости регистрирующей щели образуется электронное изображение. Пока оно не попадает на регистрирующую щель, сигнал на выходе ЭУ отсутствует. С помощью отклоняющих пластин и линейно изменяющегося со временем напряжения электронное изображение щели равномерно перемещается по экрану. При прохождении электронного лучка над регистрирующей щелью на выходе ЭУ возникнет ток. Если предположить, что электронное изображение, соответствующее равномерно освещенной щели, имеет строго П-образную форму шириной  $l$ , а ширина регистрирующей щели равна  $s$ , то при скорости перемещения электронного изображения мимо щели  $v$  сигнал на выходе прибора будет иметь форму трапеции с передним и задним фронтами  $\tau = s/v$  и с длительностью во времени (полушириной)  $\tau_0 = l/v$ . При  $l = s$  сигнал на выходе будет иметь форму равнобедренного треугольника.

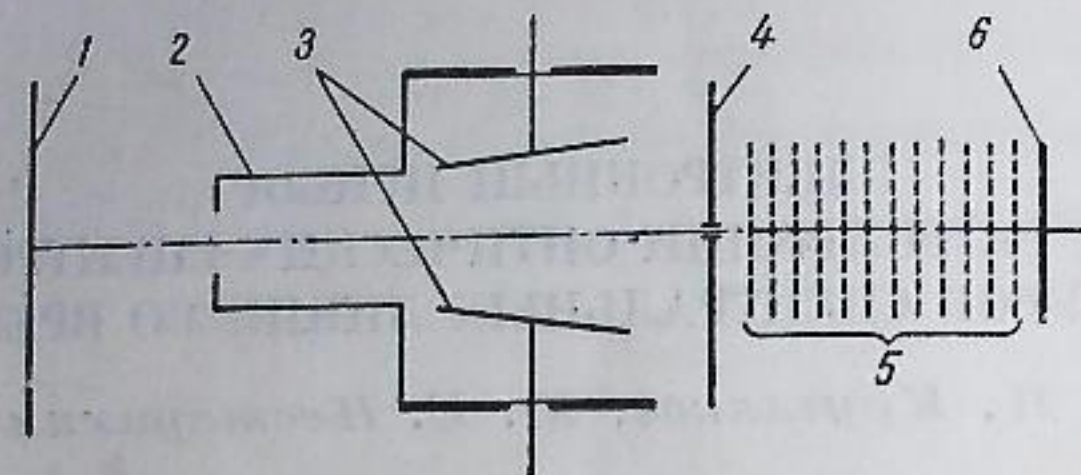


Рис. 1. Принципиальная схема «двойного преобразователя»:

1 — фотокатод; 2 — анод ЭОП; 3 — отклоняющие пластины; 4 — регистрирующая щель; 5 — диодная система ЭУ; 6 — коллектор

Очевидно, что чем меньше размер щели  $s$  по сравнению с  $l$ , тем больше форма трапеции приближается к прямоугольнику. Это может быть достигнуто двумя способами: проектированием на фотокатод прибора исследуемого светового распределения с большим увеличением, либо значительным уменьшением ширины щели в приборе (делать щель уже  $0,05 \div 0,03$  мм не имеет смысла, поскольку разрешающая способность ЭОП обычно составляет  $20 \div 30$  штрихов на миллиметр). Первый способ приводит к уменьшению величины выходного сигнала за счет снижения освещенности на фотокатоде, второй ведет к уменьшению чувствительности прибора. Естественно, что при регистрации плавных световых распределений типа контура спектральных линий требования на ширину приборной щели могут быть ослаблены.

Результаты испытаний «двойного преобразователя». На преобразовательный каскад и умножительную часть прибора напряжения подавались от отдельных выпрямителей. Анод ЭОП и металлический электрод с регистрирующей щелью были заземлены, а первый диод ЭУ имел потенциал от  $-3$  до  $-4$  кВ относительно земли. Потенциал катода ЭОП менялся при испытаниях от  $-4$  до  $-15$  кВ. пилообразное напряжение подавалось на отклоняющие пластины преобразователя от специального генератора, одновременно выдающего сигнал синхронизации для запуска осциллографа. Точность оптической юстировки прибора контролировалась на осциллографе по крутизне склонов трапецеидального сигнала.

На рис. 2 приведена осциллограмма контура изображения равномерно освещенной щели, зарегистрированного за 50 мксек. В проведенных измерениях постоянная времени выходной цепи составляла 5 мксек. Развертка

изображения за меньшие времена не производилась, однако нет никаких принципиальных трудностей, мешающих уменьшить время регистрации вплоть до  $10^{-7}$  сек.

Важной характеристикой прибора является его линейность соотношения между амплитудой выходного сигнала и освещенностью на фотокатоде.

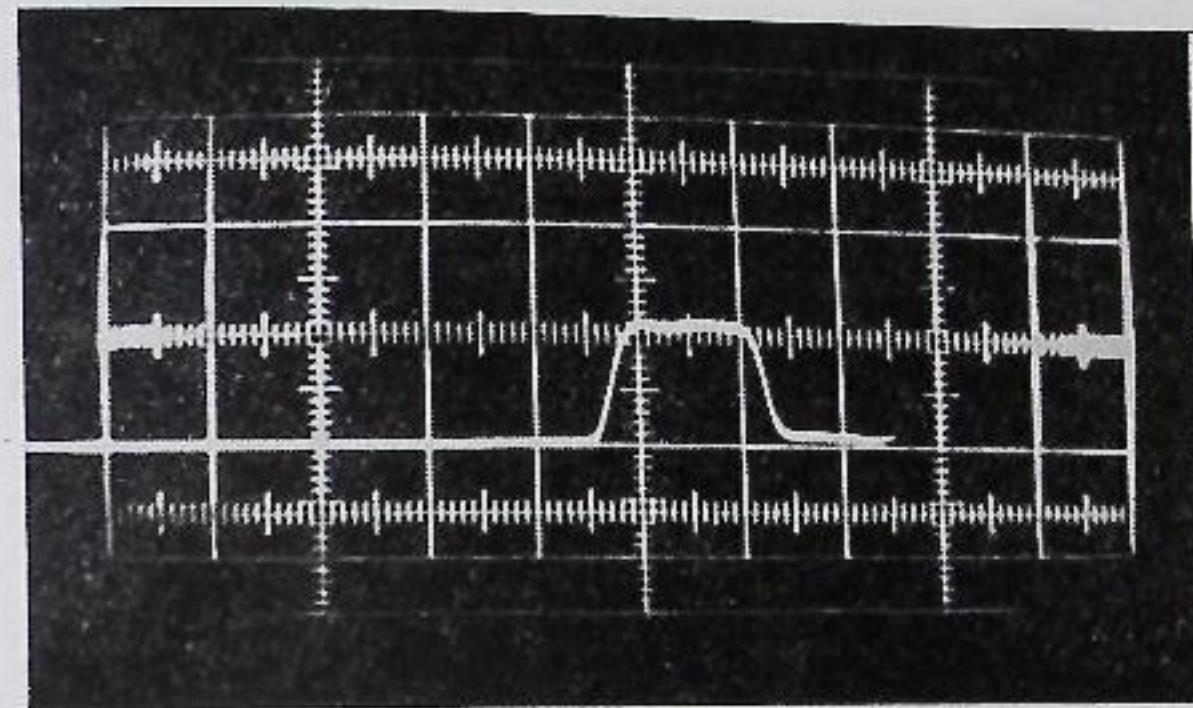


Рис. 2. Осциллограмма контура изображения равномерно освещенной щели

С увеличением освещенности амплитуда выходного сигнала растет пропорционально освещенности, пока не перейдет в нелинейную область токовой характеристики ЭУ. На рис. 3 представлена зависимость выходного сигнала от освещенности на фотокатоде; видно, что при измерениях с данным образцом прибора при нагрузочном сопротивлении 9 ком линейность имеет место до  $U_{\text{вых}} \approx 100$  в.

Измерение шумового напряжения на выходе прибора позволило установить порог чувствительности «двойного преобразователя», который оказался равным  $\Phi_{\text{пор}} \approx 1,5 \cdot 10^{-8}$  лм. С помощью эталонного источника света по известной интегральной чувствительности фотокатода ( $\sim 30$  мкА/лм) и величине выходного тока был определен коэффициент усиления прибора по току. Для данного образца преобразователя полный коэффициент усиления оказался равным  $6 \cdot 10^6$ . Обнаружена слабая зависимость коэффициента усиления «двойного преобразователя» от ускоряющего напряжения на электронно-оптической части прибора.

Оптимальное значение ширины щели прибора при регистрации спектральных линий. Предположим, что спектральная линия имеет гауссовскую или дисперсионную форму

$$I(\lambda) = I_0 \exp[-\alpha(\lambda - \lambda_0)^2], \quad I(\lambda) = I_0 / [1 + \beta(\lambda - \lambda_0)^2]. \quad (1)$$

Полагая, что дисперсия спектрального прибора в пределах профиля линии постоянна, можем перейти к пространственному распределению света (электронов) в фокальной плоскости

$$I(x) = I_0 \exp[-(x/x_0)^2 \ln^2], \quad I(x) = I_0 / [1 + (x/x_0)^2]. \quad (2)$$

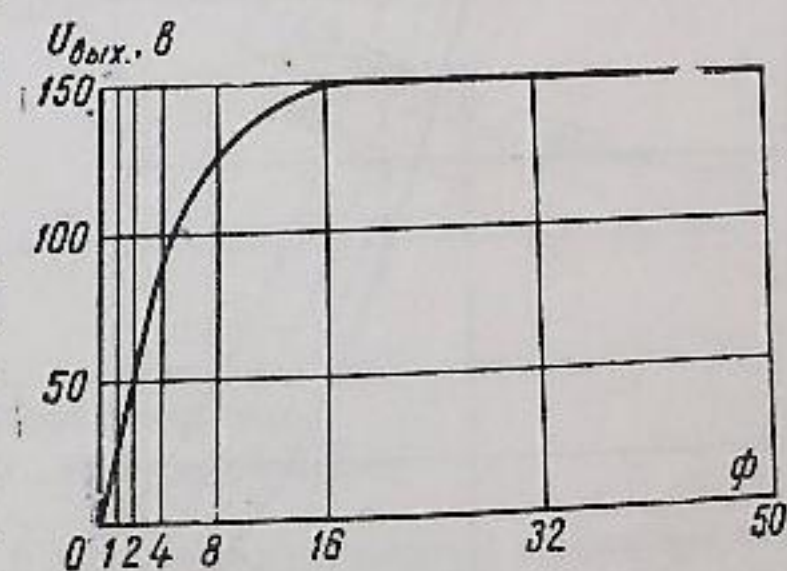


Рис. 3. Зависимость выходного сигнала от освещенности на фотокатоде

Постоянные при  $x$  в выражениях (2) выбраны таким образом, чтобы при  $x = x_0$  интенсивность падала вдвое. Будем перемещать электронное изображение мимо щели  $s$  с постоянной скоростью  $v$ . Тогда для дисперсионного распределения зависимость потока электронов, проходящих сквозь регистрирующую щель, от времени имеет следующий вид:

$$I(t) = I_0 \int_{vt-s/2}^{vt+s/2} \frac{dx}{1 + (x/x_0)^2} \quad (3)$$

Введем безразмерные переменные  $x/x_0 = X$ ,  $s/x_0 = S$ ,  $vt/x_0 = T$  и положим для простоты  $I_0 = 1$ . Тогда выражение для потока электронов

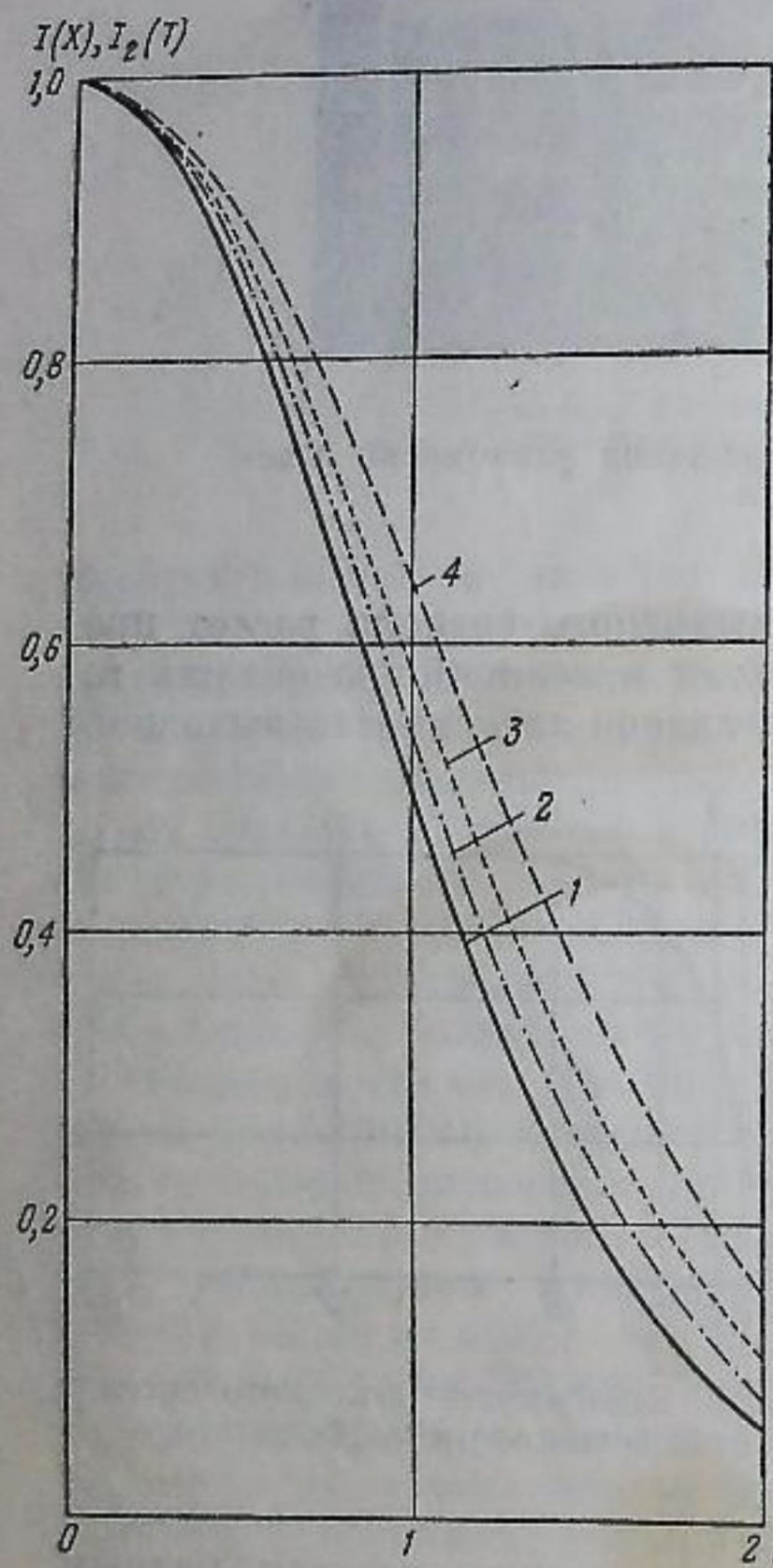


Рис. 4. Искажения гауссовского профиля (сплошная линия) при сканировании щелью конечной ширины. 1 —  $S = 0,5$ ; 2 —  $1,0$ ; 3 —  $1,5$ ; 4 —  $2,0$  (пояснения в тексте)

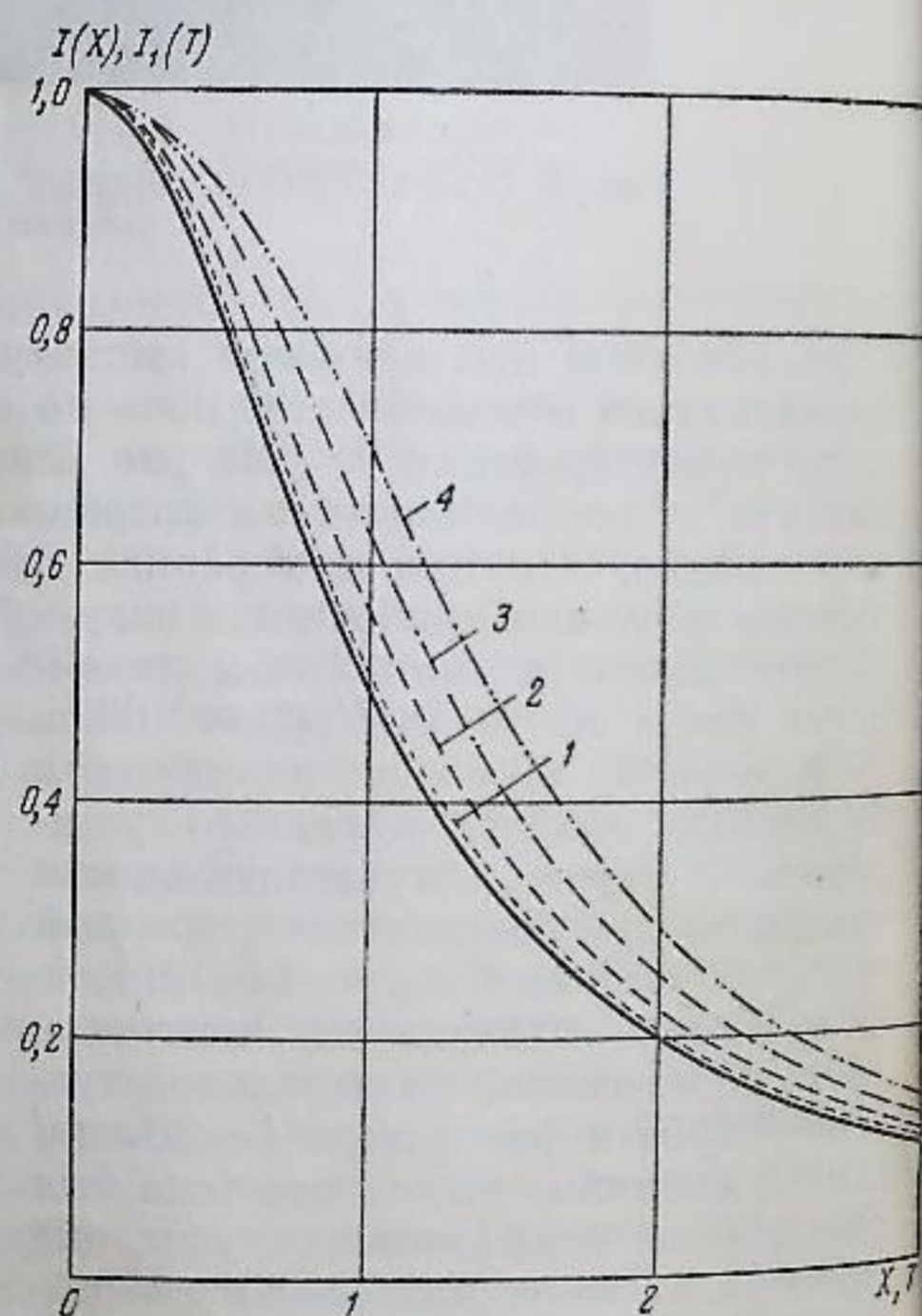


Рис. 5. Искажения дисперсионного профиля (сплошная линия) при сканировании щелью конечной ширины. Обозначения см. рис. 4.

сквозь щель имеет вид

$$I_1(T) = \text{arc tg} \left( T + \frac{S}{2} \right) - \text{arc tg} \left( T - \frac{S}{2} \right) \quad (4)$$

В случае гауссовского распределения получаем

$$I_2(T) = \begin{cases} \Phi \left\{ (T + S/2) \sqrt{2 \ln 2} \right\} + \Phi \left\{ -(T - S/2) \sqrt{2 \ln 2} \right\}, & T \leq S/2; \\ \Phi \left\{ (T + S/2) \sqrt{2 \ln 2} \right\} - \Phi \left\{ (T - S/2) \sqrt{2 \ln 2} \right\}, & T \geq S/2 \end{cases} \quad (5)$$

На рис. 4, 5 представлены профили спектральных линий для случаев гауссовского и дисперсионного распределений. Там же изображены формы выходных сигналов, рассчитанные из (4) и (5) для различных значений ширины щели прибора. Как видно из графиков, даже при ширине щели  $S = 1$  ошибка в определении полуширины линии составляет величину порядка 10%. С точки зрения искажения контура спектральной линии щелью конечной ширины наиболее неблагоприятен случай линии, имеющей про-

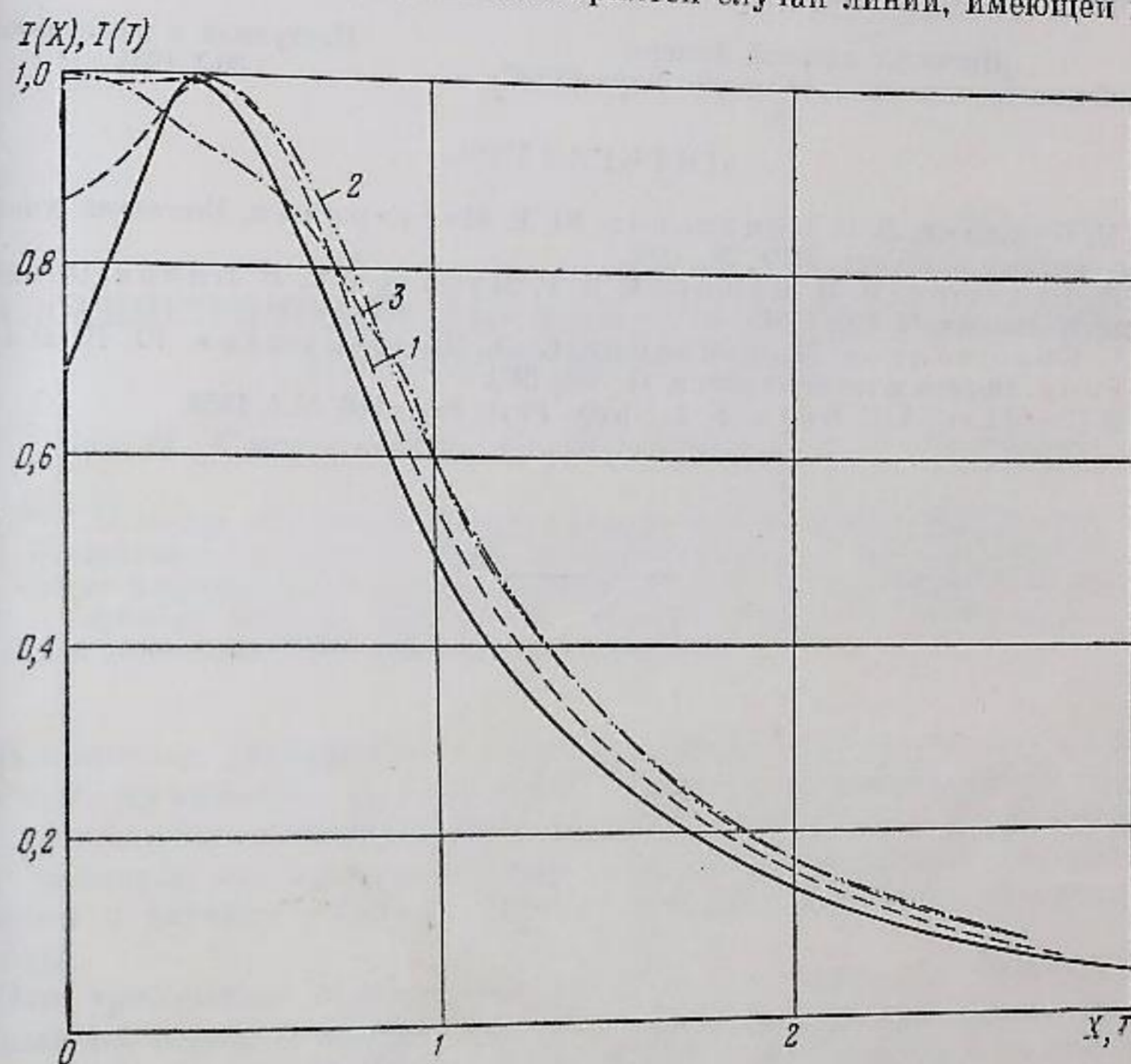


Рис. 6. Искажения контура линии  $H_\beta$  (сплошная линия, вычислено по [4]) щелью конечной ширины: 1 —  $S = 0,5$ ; 2 —  $0,75$ ; 3 —  $1,0$  (пояснения в тексте)

вал интенсивности в центре. На рис. 6 представлен контур линии водорода  $H_\beta$ , вычисленный согласно [4], и соответствующий этому распределению выходной сигнал для щели  $S = 0,5, 0,75$  и  $1$ . 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.

**Выводы.** Проведенные эксперименты показали, что с помощью подобного прибора можно осуществить регистрацию полуширины спектральной линии при условии, что поперечный размер электронного изображения контура линии не менее  $0,15 \div 0,2$  мм. Измерение полуширины и интенсивности линии может быть проведено многократно в течение одного процесса. На отклоняющие пластины в этом случае может быть подано синусоидальное напряжение (используется его линейная часть). В подобном варианте значительно упрощается схема управления. Следует обратить внимание на то, что прибор хорошо реагирует на слабые неоднородности освещенности на фотокатоде и, следовательно, может быть использован для изучения распределения свечения в линейных объектах (дуга, канал, искры и т. д.). Двойной преобразователь может найти применение в качестве генератора напряжений произвольной формы, которую можно задать

распределением освещенности по фотокатоду или формой вырезающей диафрагмы.

Результаты исследования данного образца преобразователя подтверждают правильность принципиальной схемы прибора, а также указывают на возможность создания прибора с лучшими параметрами.

В заключение авторы выражают благодарность Ю. М. Золотареву и его сотрудниками за помощь в изготовлении прибора.

Институт ядерной физики  
Сибирского отделения Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
20 X 1964

#### ЛИТЕРАТУРА

1. М. М. Бутслов, В. С. Комельков, Ю. Е. Нестерихин. Всесоюзн. конфер. по быстрым явлениям. МГУ. М., 1960.
2. И. Ф. Балашов, М. П. Ванюков, В. Р. Муратов, Е. В. Нплов. Оптика и спектроскопия, 10, 540, 1961.
3. В. Г. Колошников, М. А. Мазинг, С. Л. Мандельштам, Ю. П. Марсанов. Оптика и спектроскопия, 11, 556, 1961.
4. H. R. Griem, A. C. Kolb, K. I. Shen. Phys. Rev., 116, № 4, 1959.

УДК 536.621:53.08

### КАЛОРИМЕТРИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭНЕРГИИ ИОНИЗИРОВАННОГО ПУЧКА

Л. И. Сметанина, И. И. Матвеева, З. В. Брук

В статье излагаются принцип работы и конструкция калориметра, основанного на передаче тепла теплопроводностью в стационарном режиме и примененного в качестве датчика энергии ионизированного пучка в глубоком вакууме. Приводится таблица материалов, рекомендуемых для изготовления калориметрического датчика.

В практике теплофизических исследований встречается задача об измерении суммарной и локальной энергии ионизированного потока частиц в глубоком вакууме. Плотность энергии пучка и его геометрические размеры, как правило, бывают невелики. Отсюда складываются требования к датчику энергии: высокая чувствительность и небольшие габариты.

Эти требования удовлетворяются, если применить калориметр, основанный на передаче тепла теплопроводностью в стационарном режиме. Измерение энергии ионизированного пучка производится в таком калориметре по тепловому эффекту торможения движущихся заряженных частиц пучка на приемной поверхности калориметрического датчика. Образуемое тепло перетекает по теплопроводу с известным тепловым сопротивлением к интенсивно охлаждаемому холодильнику.

Количество тепла, прошедшее через теплопровод в стационарном процессе, рассчитывается по разности температур на участке теплопровода с линейным изменением температуры по длине.

Линейность изменения температуры по длине стержня-теплопровода описываемой конструкции калориметра была проверена экспериментально. Отклонения от линейного закона зафиксированы только на участках в 3 ÷ 5 мм вблизи холодильника. Защита теплопровода от потерь тепла излучением осуществляется благодаря установке экрана (см. рисунок), температура которого близка к температуре теплопровода.

Если преобразование энергии в тепло произошло без потерь, никакого теплообмена калориметра с окружающей средой нет и температура холодильника постоянна, то рассчитанное таким образом количество тепла равно энергии ионизированного пучка, приходящейся на всю площадь приемной поверхности калориметра. Если принять, что тепловые потери с поверхности теплопровода в окружающую среду отсутствуют, то формула для расчета энергии имеет вид (см., например, [1]):

$$P = \frac{Q}{\tau} = -\lambda \frac{S}{l} \Delta t, \quad (1)$$