

Г.Г. Долгов-Савельев, А.М. Искольдский,
Э.П. Кругляков, В.К. Малиновский

**Электронно-оптический метод регистрации
томсоновского рассеяния света рубинового
лазера плазмой**

г. Новосибирск 1967

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ АКАДЕМИИ НАУК СССР

Препринт

Г.Г.Долгов-Савельев, А.М.Искольдский, Э.П.Кругляков,
В.К.Малиновский

ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД РЕГИСТРАЦИИ ТОМСОНОВСКОГО
РАССЕЯНИЯ СВЕТА РУБИНОВОГО ЛАЗЕРА ПЛАЗМОЙ

Новосибирск
1967

Большинство методов диагностики, применяемых в настоящее время для определения параметров плазмы (спектроскопия, оптическая и СВЧ-интерферометрия и т.д.), как правило, дают возможность найти усредненные в направлении наблюдения величины плотности и температуры.

Метод томсоновского рассеяния, использующий лазерное излучение, по-существу, единственный метод, позволяющий определять локальные значения температуры и концентрации, не возмущая плазму. Общепринятой системой регистрации рассеянного лазерного излучения является фотоэлектрическая схема с применением одного/1/ или нескольких /2/ фотоумножителей.

Многоканальная система с применением ФЭУ позволяет, в принципе, определять "мгновенное" распределение $n_e(x)$ и $T_e(x)$ в направлении распространения лазерного излучения^{х)}. Однако, одновременное измерение локальных значений концентрации и температуры плазмы подобным методом едва ли возможно в связи с техническими трудностями построения "двухкоординатной" системы регистрации, обладающей достаточным пространственным разрешением.

Указанные трудности можно обойти, используя в качестве оконечного элемента регистрирующей системы электронно-оптические преобразователи с каскадным усилением яркости изображения.

Электронно-оптические преобразователи являются, по-существу, многоканальной системой с числом разрешаемых элементов изображения порядка $10^3 + 10^4$.

В данной работе описаны предварительные эксперименты, в которых произведено одновременное измерение локальных "мгновенных" величин n_e и T_e .

Эксперименты проводились на установке, предназначенной для исследования структуры квазистационарных ударных волн, образующихся при обтекании цилиндра сверхзвуковым потоком плазмы с

$$V_{II} = 1,2 \cdot 10^7 \text{ см/сек}, n_e = 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}, T_e \sim 1 \text{ эВ}.$$

Принципиальная схема эксперимента изображена на рис.1.

х) Имеется в виду случай рассеяния под 90° .

Направление регистрации рассеянного излучения составляло 90° с плоскостью рисунка.

Лазерная система состояла из задающего генератора на рубине ($\phi = 8$ мм, длина 120 мм), управляемого четвертьволновой ячейкой Керра на нитробензоле [3] и усилительного каскада, активным элементом которого являлся рубин с сапфировыми торцами, обработанными под углом Брюстера ($d = 12$ мм, длина активной части 240 мм). Рубиновые стержни и импульсные лампы помещались в двухэллиптические осветители, охлаждаемые водой. Энергия и длительность гигантского импульса составляли соответственно

$$Q \approx 3 + 5 \text{ дж}, \quad \tau \approx 10 + 15 \text{ нсек.}$$

На рис.2 приведена схема регистрации рассеянного лазерного излучения. Отрезок прямой ($l = 100$ мм), вдоль которой проходит лазерный пучок \angle линзой O_1 , проектировался на входную щель S_1 (ширина щели 0,5 мм) дифракционного монохроматора МДР-2 с линейной дисперсией $40 \frac{\text{Å}}{\text{мм}}$ и геометрической светосилой 1:2,5.

Спектрально разложенное изображение рассеянного электронами плазмы лазерного пучка с помощью объектива O_2 переносилось на фотокатод затворного преобразователя K_1 , обеспечивающего регистрацию изображения с экспозицией порядка длительности гигантского импульса. С целью уменьшения фона плазмы между выходной щелью монохроматора S_2 и объективом O_2 установлен поляроид Π , ориентированный на максимум пропускания поляризованного лазерного излучения.

Экран затворного преобразователя K_1 сопрягался с фотокатодом каскадного усилителя яркости (K_2) с помощью сверхсветосильного объектива O_3 ($D:F = 1:0,85$). Усиленное по яркости изображение с экрана K_2 фотографировалось на пленку типа РФ-3.

Эффективный квантовый выход системы регистрации в целом (отношение числа электронов, покидающих фотокатод каскадного преобразователя к числу фотонов, попадающих в линзу O_1)

$$\beta = 5,6 \cdot 10^{-4} \frac{\text{электрон}}{\text{фотон}}.$$

Отметим, что в форсированном режиме работы каскадного усилителя яркости, когда коэффициент усиления прибора по току достигает значения $K \sim 10^7$, становится возможной регистрация на

пленку вспышки от отдельного электрона, выбитого из фотокатода.

Если каскадный преобразователь работает в режиме счета отдельных вспышек, то предельное число элементов, которое может уложиться на размере изображения, равно $\frac{S}{s}$ (здесь S - площадь изображения на экране усилителя яркости (масштаб передачи изображения в каскадах ЭОП $M = 1:1$), s - площадь отдельного элемента изображения; $s \approx 0,02 \text{ мм}^2$).

В условиях эксперимента число рассеянных фотонов, попадающих в систему регистрации, составляло $\sim 10^7$, что соответствует уходу с фотокатода $K_2 \sim 10^4$ электронов, то-есть, если $S \geq 10^4 s$, перекрытие отдельных элементов изображения отсутствует.

На рис.3 приведены изображения фонового лазерного свечения, рассеянного на стенках вакуумной камеры (а), свечения плазмы (б) и суммарная картина, включающая в себя истинное рассеянное на электронах плазмы излучение и помехи (в).

Обработка приведенных фотографий, производившаяся по методу счета отдельных зёрен изображения и на микрофотометре, показала, что истинный сигнал рассеяния в максимуме примерно вдвое больше фонового сигнала.

На рис.4 приведены экспериментальные точки, полученные при регистрации профиля рассеяния лазерной линии $\lambda = 6943 \text{ Å}$ с помощью ЭОП и ФЭУ. Значение электронной температуры ($T_e = 6 \text{ эВ}$) находится в хорошем соответствии с результатами спектроскопических измерений отношения интенсивностей примесных линий CIV с переходами $2^2S-2^2P, 2^2P-3^2S$ ($\lambda_1 = 1549 \text{ Å}, \lambda_2 = 419 \text{ Å}$), согласно которым $T_e = 6,5 \text{ эВ}$. К сожалению, в описываемой геометрии эксперимента нам не удалось проследить переход от низких температур к более высоким из-за малости температурных градиентов в обозреваемой области.

На рис.5 показан ход изменения плотности вдоль направления распространения лазерного луча. Сплошная кривая соответствует измерениям, выполненным с помощью интерферометра Майкельсона [4].

Из экспериментальных данных следует, что использованная система регистрации обеспечивает измерение n_e, T_e при $n_e \sim (2 + 6) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$.

Как показали измерения прозрачности элементов оптической схемы и чувствительности фотокатодов, эффективный квантовый выход системы может быть увеличен до $\sim 1,5 \cdot 10^{-2} \frac{\text{электрон}}{\text{фотон}}$, что позволит проводить температурные измерения при электронной концентрации плазмы вплоть до $n_e \sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$.

Авторы благодарны Р.З.Сагдееву за постоянный интерес к работе и полезные дискуссии, а также В.В.Воробьеву, Л.Н.Вячеславу и И.Ф.Канаеву за помощь в наладке аппаратуры.

Л и т е р а т у р а

1. E. Fünfer, B. Kronast, H. J. Kunze,
Phys. Z., 5, №2, 125 (1963)
2. D. E. Evans, M. J. Forrest, G. I. Kachen, J. Katzenstein,
VII Int. Conf. on Phenomena in Ionized Gases, Beograd, 1965
3. Mc. Clung F. J., Hellwarth R. W., *Journ. Appl. Phys.* 33, 3139 (1962)
4. Э.П.Кругляков, В.К.Малиновский, Ю.Е.Нестерихин.
Магнитная гидродинамика I, № 2, 1965.

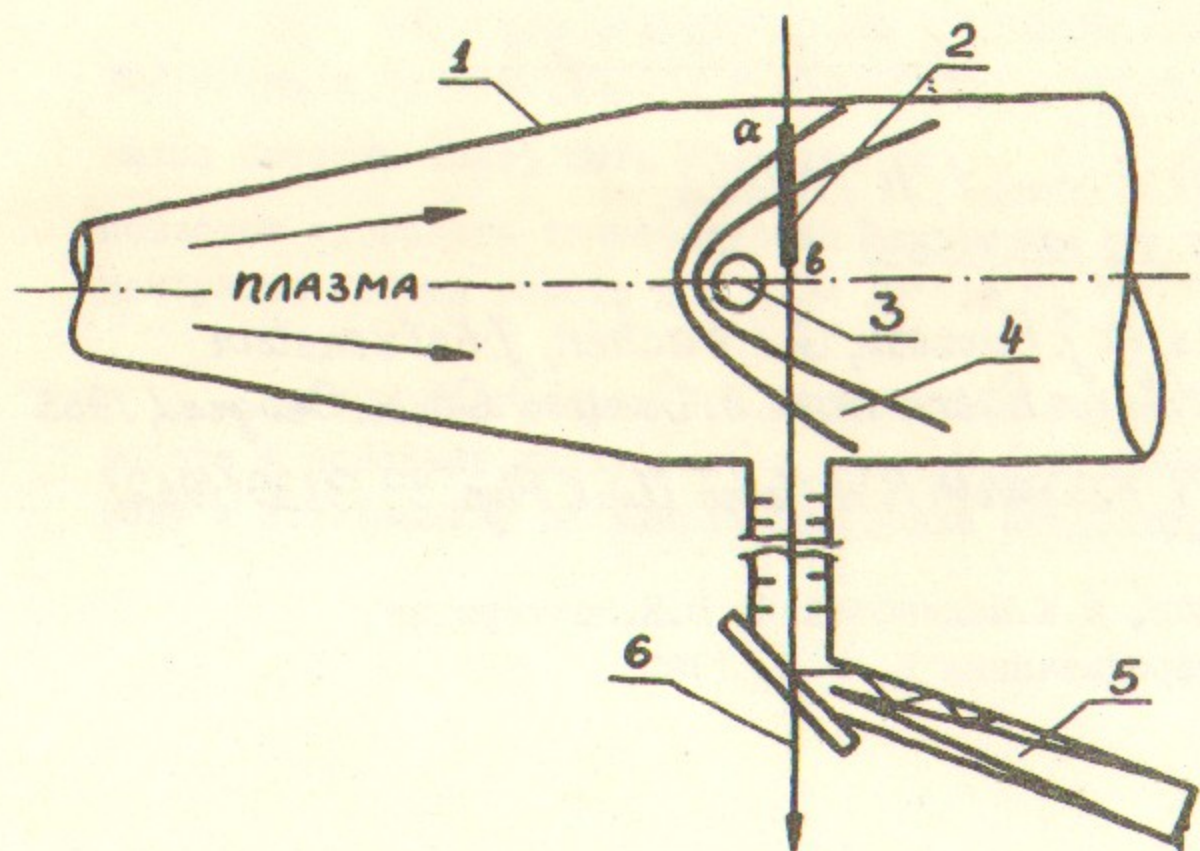


Рис.1. Схема эксперимента.

1 - вакуумная камера, 2 - исследуемый участок ударной волны, 3 - цилиндр, 4 - ударная волна, 5 - световая ловушка, 6 - лазерный пучок.

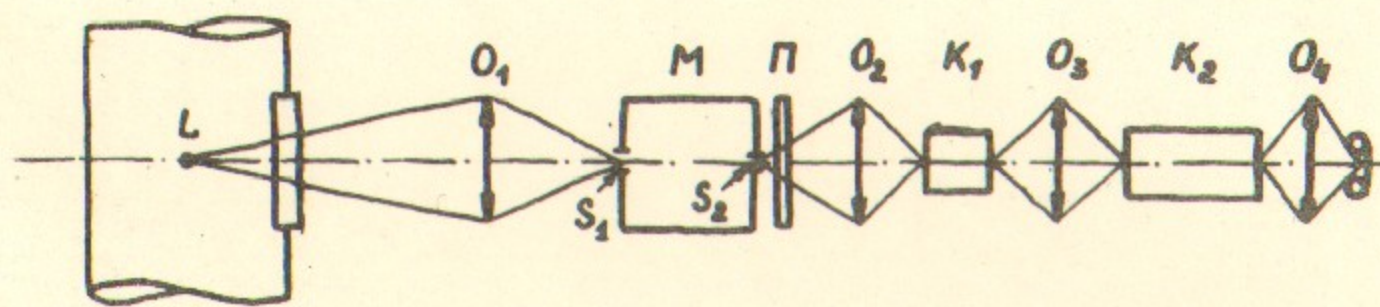


Рис.2. Схема системы регистрации

M - монохроматор
 P - поляризатор
 K_1 - затворный электронно-оптический преобразователь
 K_2 - каскадный усилитель яркости
 $O_1; O_2; O_3; O_4$ - согласующие объективы. Лазерный пучок L перпендикулярен плоскости чертежа.

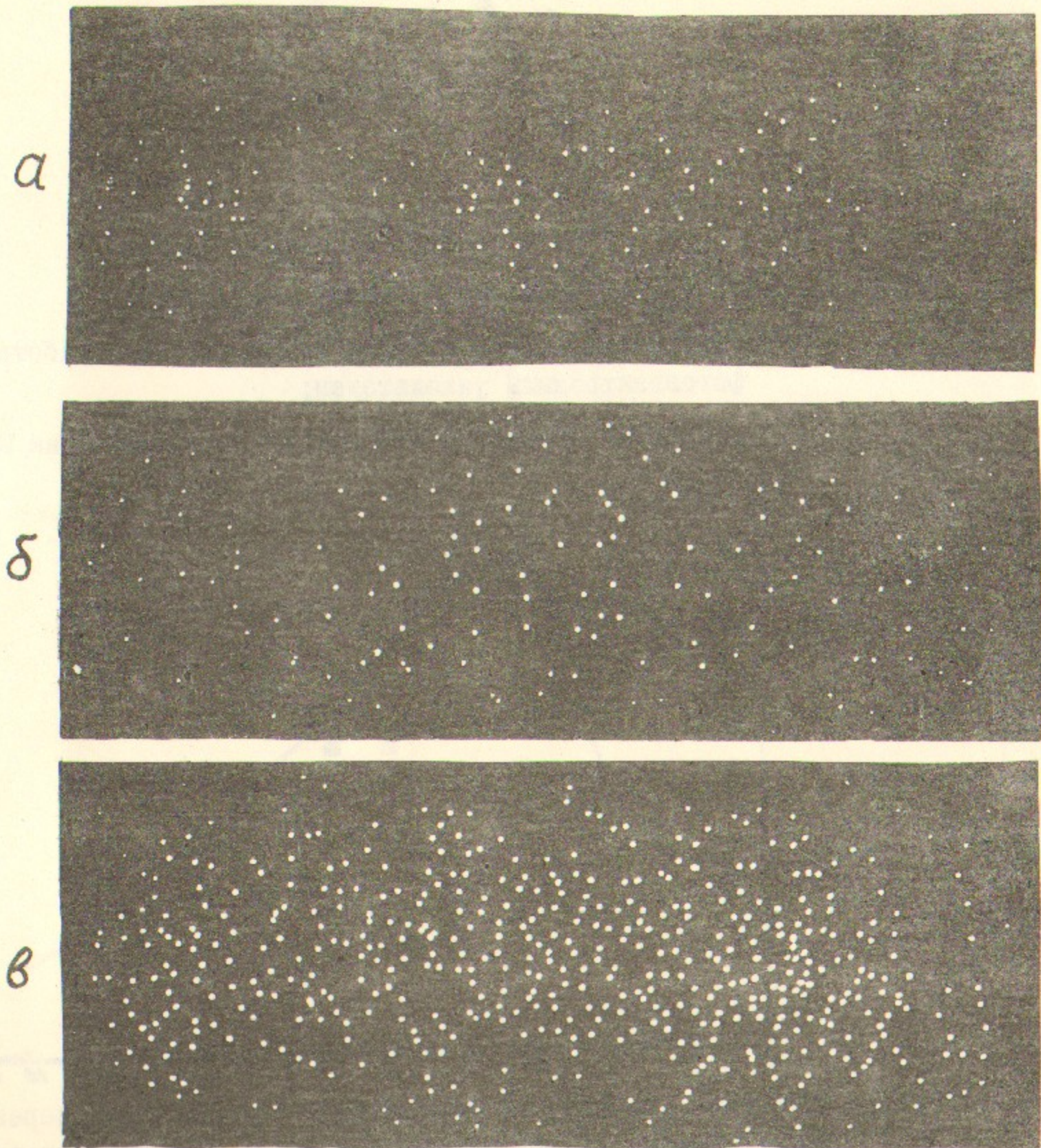


Рис.3. а) фотография лазерного излучения, рассеянного на стенках камеры;
 б) излучение плазмы в исследуемом спектральном интервале;
 в) визуализированное электронное рассеяние совместно с помехами а), б).

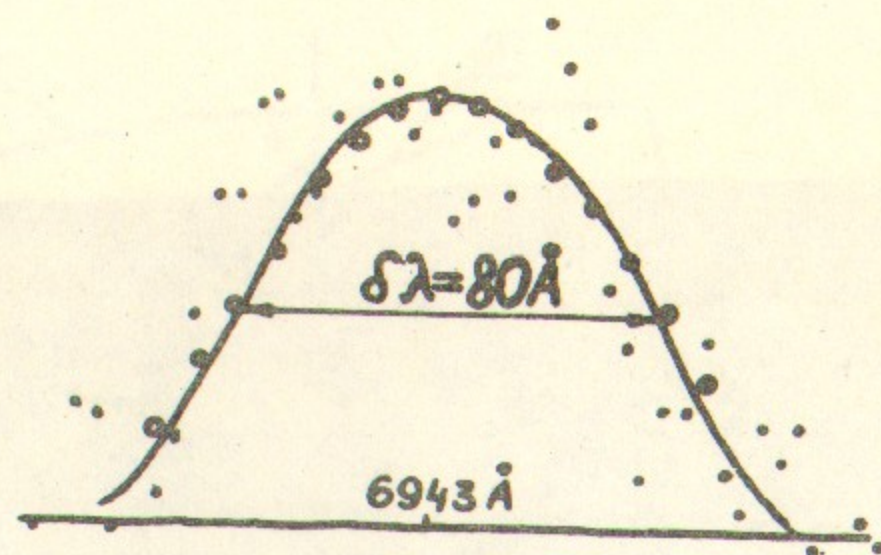


Рис.4. Профиль рассеяния лазерной линии $\lambda = 6943\text{Å}$.

- - экспериментальные данные, полученные при работе с фотоэлектронным умножителем;
- - результат обработки фотографий, полученных на ЭОП.

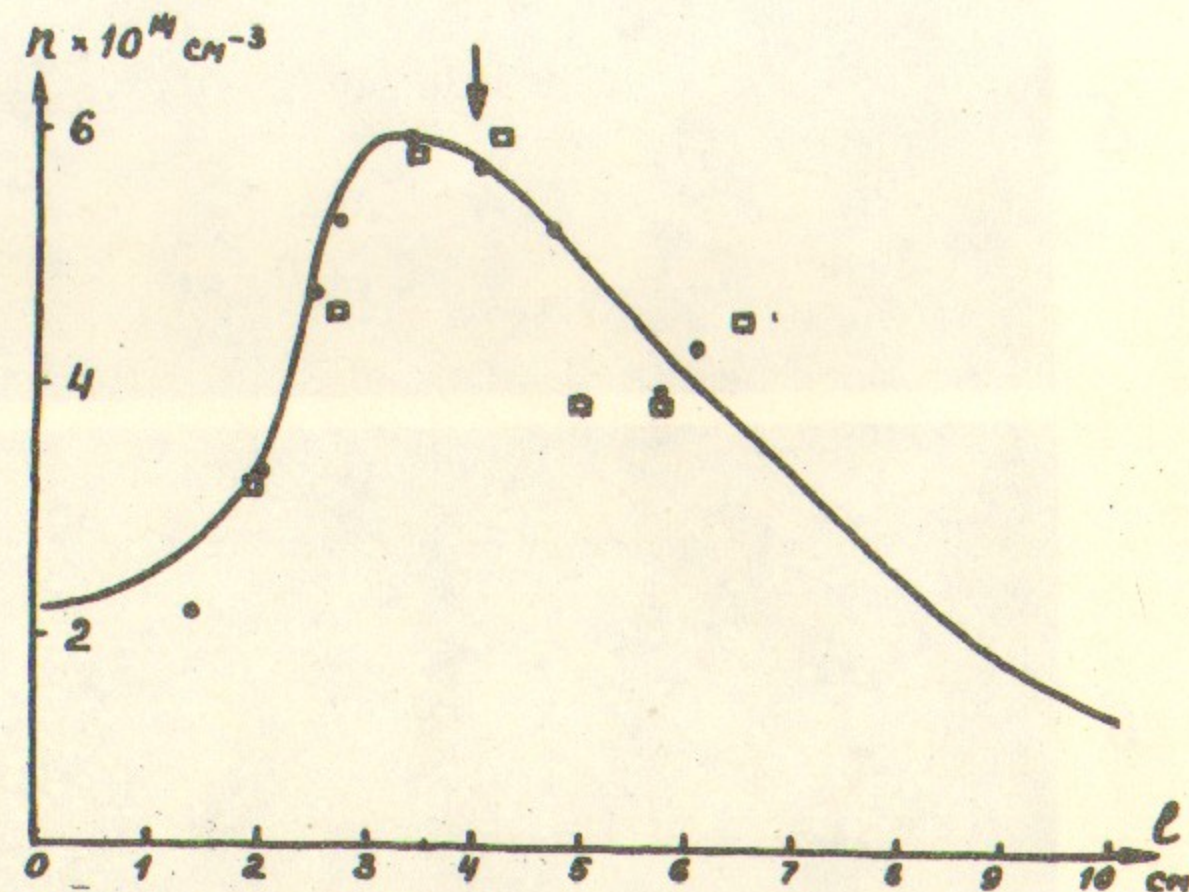


Рис.5. Изменение электронной концентрации при переходе через фронт ударной волны. Начало и конец кривой соответствуют точкам а, в рис.1. Сплошная кривая - результат интерферометрических измерений.

- - обработка фотографий рис.3 методом счета зерен изображения.
- - обработка фотографий рис.3 на микрофотометре. Стрелкой указана область, для которой приведен профиль рассеяния (рис.4).

Ответственный за выпуск А.М.Искольдский
Подписано к печати 26 июня 1967 г.
Усл. 0,3 печ.л., тираж 200 экз. Бесплатно
Заказ № 141

Отпечатано на ротاپринте в ИЯФ СО АН СССР