

К.88

3



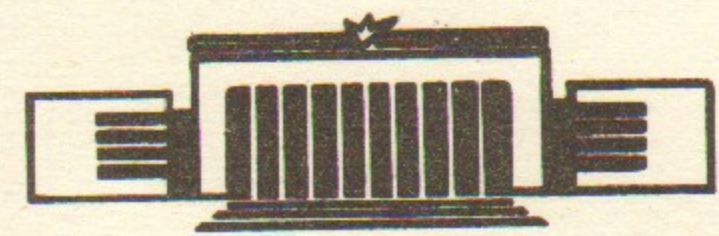
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

В.В.Кубарев

МОЩНЫЙ НСН-ЛАЗЕР ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ
ПЛАЗМЫ

ПРЕПРИНТ 84-09

БИБЛИОТЕКА
Института ядерной
Физики СО АН СССР
ИНВ. № _____



НОВОСИБИРСК

МОЩНЫЙ *HCN*-ЛАЗЕР ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ
ПЛАЗМЫ

В.В.Кубарев

А Н Н О Т А Ц И Я

Описывается мощный субмиллиметровый ($\lambda = 337$ мкм) волно-
водный *HCN* - лазер. Приводятся результаты по оптимизации
газового состава смеси, геометрии резонатора и температурного
режима. Выходная мощность оптимизированного лазера при работе
на EH_{11} моде составляет 190 ± 20 мВт.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время большое распространение получили субмиллиметровые интерферометры для исследования плазмы в термоядерных установках. Наиболее полную информацию дают многоканальные системы, позволяющие проводить одновременное зондирование плазмы по нескольким направлениям. Как правило, доступ к объекту исследования затруднен, что вызывает большие потери при транспортировке пучка. Указанные особенности приводят к потребности в мощных источниках субмиллиметрового диапазона. В работе описывается исследование по оптимизации HCN -лазера, позволившее увеличить его удельную мощность и к.п.д. Лазер предназначен для использования в многоканальном субмиллиметровом интерферометре на установке ПСП-2.

I. Постановка задачи

Наиболее мощная генерация лазера происходит на длине волны 0,337 мм в результате перехода между вращательным уровнем с $J = 10$ колебательного состояния $11^1 0$ и вращательным уровнем с $J = 9$ колебательного состояния $04^0 0$ молекулы HCN [1]. Как установлено экспериментально [2], обычно имеется значительная инверсия населенности колебательного состояния $11^1 0$ относительно колебательного состояния $04^0 0$. Необходимое для генерации увеличение вероятности перехода между вышеуказанными вращательными уровнями происходит в результате частичного Корриолисового взаимодействия нижнего уровня ($J = 9, 04^0 0$) с близким по энергии уровнем ($J = 9, 11^1 0$). Степень смешивания невелика ($\sim 0,7\%$), поэтому время спонтанного перехода с верхнего на нижний уровень оказывается много больше времени жизни нижнего уровня. Тогда населенность верхнего лазерного уровня будет значительно превышать населенность нижнего и для описания работы лазера применима четырехуровневая схема [3]. Мощность четырехуровневого лазера в стационарном режиме записывается как:

$$P_0 = \frac{\hbar \omega V_a}{2 e \tau} \gamma_u \left(\frac{S_2 e \tau}{\gamma_i + \gamma_u} - 1 \right) \quad (1)$$

V_a - модовый объем лазера; l - его длина; d - сечение вынужденного перехода на частоте генерируемой моды; τ - время жизни верхнего лазерного уровня; γ_u, γ_i - логарифмические коэффициенты полезных и внутренних потерь за один проход, S - скорость населения верхнего лазерного уровня. $S \approx N_t W_p$
 N_t - концентрация молекул H_2N в основном состоянии,
 W_p - вероятность возбуждения на верхний уровень.

Выражение (1) можно переписать в виде:

$$P_o = K_1 \gamma_u \left(\frac{K_2 S}{\gamma_u + \gamma_i} - 1 \right) \quad (2)$$

В коэффициентах K_1 и K_2 собраны величины не изменяющиеся в ходе описываемых ниже экспериментов. Как следует из выражения (2) для получения максимальной мощности необходимо:

1) Получить максимальную величину $S \approx N_t W_p$. При заданных параметрах генератора накачки задача состояла в выборе оптимального соотношения компонентов основных (C_2H_4 и N_2) и добавочного (He) газов, определении рабочего давления и оптимальной температуры стенки разрядной трубки.

2) Минимизировать внутренние потери γ_i . Потери мощности складываются из диссипативных потерь в волноводе, потерь на зеркалах и потерь, связанных с согласованием на двух открытых участках резонатора между зеркалами и торцами волновода.

Наименьшими потерями в волноводе ($\sim 1\%$ за проход) обладает EH_{11} мода [4]. Настройка длины резонатора на резонансную длину этой моды осуществлялась параллельным перемещением непрозрачного зеркала. Потери существенно возрастают, если волновод непрямолинеен [4]. Так в нашем случае потери для EH_{11} моды удваиваются при радиусе кривизны оси волновода равном 3 км. Однако, поскольку (как будет показано ниже) волноводные потери много меньше полезных ($\gamma_{i6} \sim 0,1 \gamma_u$) увеличение потерь в волноводе из-за его кривизны не является определяющим вплоть до $R_g = 2$ км.

Особенностью H_2N лазеров является образование полимерного осадка на зеркалах и стенках разрядной трубки, что сильно увеличивает внутренние потери [5]. Подходящим выбором состава смеси и температуры разрядной трубки можно значительно уменьшить скорость этого процесса.

Потери на согласование теоретически исследовались в работе [6]. Применительно к описываемому лазеру, когда зеркала

расположены вблизи торца волновода (на расстоянии $l+2$ см) теория предсказывает, что минимальными потерями на согласование должен обладать резонатор с плоскими зеркалами ($R_{31} = R_{32} = \infty$). Однако, в [6] не учитывается расхождение пучка, которое возникает из-за рефракции при распространении электромагнитной волны в неоднородной по сечению плазме разряда. Возникающее при этом искривление волнового фронта должно быть скомпенсировано подходящим выбором радиусов кривизны зеркал.

3) Оптимизировать коэффициент полезных потерь γ_u .

Из уравнения (2) можно получить:

$$\gamma_{u \text{ out}} = \sqrt{K_2 S} \gamma_i - \gamma_i \quad (3)$$

Выходная мощность будет максимальной при $S = S_{\text{max}}$ и $\gamma_i = \gamma_{i \text{ min}}$
 И окончательно:

$$\gamma_{u \text{ out}} = \sqrt{K_2 S_{\text{max}} \gamma_{i \text{ min}}} - \gamma_{i \text{ min}}$$

2. Описание установки

Схематический чертеж лазера показан на рис. 1. Каркас из четырех инваровых стержней служит несущим элементом конструкции. Резонатор лазера образован диэлектрическим волноводом (стеклянная труба $l = 2,3$ м, $\phi = 56$ мм), напыленным алюминием непрозрачным стеклянным зеркалом и двумерной медно-никелевой сеткой. Излучение лазера выводится через окно из кристаллического кварца. Для уменьшения паразитной обратной связи толщина окна равна целому числу длин полуволн излучения. Помимо юстировки по углам конструкция допускает продольное перемещение непрозрачного зеркала с точностью ~ 2 мкм и параллельностью $3' \div 5'$ для настройки модовой частоты резонатора на частоту лазерного перехода.

Накачка лазера осуществляется высокочастотным разрядом ($f = 27,5$ МГц, $P = 800$ Вт). ВЧ - разряд поджигается в волноводе при помощи резонансных контуров, состоящих из цилиндрических электродов и подстроечных индуктивностей. После ВЧ-пробоя разрядных промежутков мощность в разряд передается через емкостные связи между электродами и плазмой. Электроды отрезками полуволновых кабелей соединяются в две группы, которые подключаются к противоположным полюсам ВЧ - генератора, собран-

ного по двухтактной схеме. Для предотвращения попадания разряда на зеркала крайние электроды заземлены.

Газовая смесь готовится заранее в ресивере и во время работы прокачивается форвакуумным насосом через отрегулированные натекатели.

3. Результаты эксперимента

В качестве рабочих газов в описываемом лазере применяется этилен (C_2H_4) и азот. Оптимальное соотношение компонентов $C_2H_4 : N_2 = 19 : 10$.

Мощность лазера увеличивается при добавлении в рабочую смесь ксенона (рис.2). Чрезмерное количество ксенона, однако, неблагоприятно ввиду уменьшения доли рабочих газов (а следовательно и уменьшения концентрации образующихся в разряде молекул HCN) при примерно постоянном рабочем давлении смеси. Относительное увеличение мощности при добавлении ксенона порядка 30%. Для уменьшения скорости образования полимерной пленки на стенках разрядной трубки выгодно работать при минимальном давлении рабочих газов в смеси, т.е. при максимальном содержании ксенона (точка А). В этой точке мощность увеличивается вдвое по сравнению со смесью, в которой ксенон отсутствует. Эффективность добавления ксенона по-видимому связана с большими сечениями возбуждения колебательно-вращательных уровней молекул HCN при столкновении с тяжелыми молекулами. Добавление легких газов (например N_2, He) не приводило к увеличению выходной мощности лазера, хотя мощность поглощаемая разрядом при этом увеличивалась. Окончательно, в качестве рабочей смеси выбрана смесь $C_2H_4 : N_2 : Xe = 19 : 10 : 15$ при рабочем давлении 0,5 тор.

Для данной смеси получена зависимость выходной мощности лазера от температуры разрядной трубки (рис.3). Зависимость имеет слабо выраженный максимум при $T_{гр} = 90^\circ C$ и начиная со $120^\circ C$ снова является растущей. Такой ход зависимости весьма благоприятен, т.к. при $T_{гр} \geq 130^\circ C$ на трубе не образуется полимерного осадка. Изобары 1 и 2 отличаются только начальной температурой разрядной трубки. Для температур меньше $150^\circ C$ мощность лазера больше для предварительно разогретой трубки. По-видимому, это связано с более интенсивным осаждением полимера при низких температурах. При повышении температуры поли-

мер разрушается, внутренние потери уменьшаются и при $T_{гр} = 150^\circ C$ кривая 1 выходит на тот же уровень, что и кривая 2. В качестве рабочей температуры лазера выбрана $T_{гр} = 140^\circ C$ с применением предварительного разогрева трубы в кислородном разряде. Во время разогрева одновременно происходит очистка зеркал от осадочного полимера.

Оптимизация геометрии резонатора производилась испытанием непрозрачных зеркал различных радиусов кривизны. Грубая оценка необходимой кривизны зеркала может быть получена из расчета искривления волнового фронта вследствие рефракции. Если предположить, что распределение плотности плазмы по сечению волновода параболическое, а плотность на оси $n_e = (3 + 5) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ (оценка по поглощаемой разрядом мощности), то для компенсации искривления волнового фронта потребуется сферическое зеркало с радиусом кривизны (рис.4):

$$R_3 [\text{см}] = 1,11 \cdot 10^{13} \frac{a^2}{\lambda^2 n_e \ell}$$

Для $\lambda = 3,37 \cdot 10^{-2} \text{ см}$; $n_e = (3 + 5) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$; $\ell = 2,5 \cdot 10^2 \text{ см}$;
 $a = 2,8 \text{ см}$ $R_3 = (9 + 15) \cdot 10^2 \text{ см}$.

Полученная оценка достаточно хорошо согласуется с экспериментом. Для радиусов зеркал $R_3 = 5; 10; \infty$ метров мощность лазера равнялась соответственно 29,60,30 отн.ед. Максимальная мощность получена для зеркала с радиусом 10 метров. Как оказалось, резонатор, состоящий из такого зеркала и плоской полупрозрачной сетки близок к оптимальному, т.е. обладает малыми потерями на согласование. Для измерения этих потерь была проведена следующая серия экспериментов с различными полупрозрачными зеркалами. Как нетрудно видеть из выражения (2), измеряя выходную мощность лазера для трех различных коэффициентов полезных потерь γ_u можно определить остальные три неизвестные величины $K_1, K_2 S, \gamma_i$. Результаты эксперимента представлены в табл. I.

Табл. I.

Шаг сетки [мкм]	γ_u	P [отн.ед.]
30	0,01	0,53
60	0,067	1,0
100	0,11	1,0

Используя данные этой таблицы и уравнение (2) получаем:

$$\gamma_{u2} \left(\frac{K_2 S}{\gamma_{u2} + \gamma_i} - 1 \right) = \gamma_{u3} \left(\frac{K_2 S}{\gamma_{u3} + \gamma_i} - 1 \right) \quad (4)$$

$$\gamma_{u1} \left(\frac{K_2 S}{\gamma_{u1} + \gamma_i} - 1 \right) = 0,53 \gamma_{u3} \left(\frac{K_2 S}{\gamma_{u3} + \gamma_i} - 1 \right) \quad (5)$$

γ_{u1} , γ_{u2} , γ_{u3} - коэффициенты полезных потерь для сеток с шагом 30, 60, 100 мкм соответственно.

Из уравнения (4):

$$K_2 S = \frac{(\gamma_{u2} + \gamma_i)(\gamma_{u3} + \gamma_i)}{\gamma_i}$$

Подставляя это значение $K_2 S$ в (5) получаем уравнение для γ_i :

$$\frac{\gamma_i^2 (\gamma_{u1} \gamma_{u3} + \gamma_{u1} \gamma_{u2} - \gamma_{u1}^2) + \gamma_i (2 \gamma_{u1} \gamma_{u2} \gamma_{u3} + \gamma_{u1} \gamma_{u3}^2 - \gamma_{u1}^2 \gamma_{u3}) + \gamma_{u1} \gamma_{u2} \gamma_{u3}^2}{\gamma_i^2 \gamma_{u2} \gamma_{u3} + \gamma_i (\gamma_{u1} \gamma_{u2} \gamma_{u3} + \gamma_{u2} \gamma_{u3}^2) + \gamma_{u1} \gamma_{u2} \gamma_{u3}^2} = 0,53$$

Полученное уравнение имеет единственное решение в области значений $\gamma_i > 0$:

$$\gamma_i = 0,016 \begin{matrix} + 0,008 \\ - 0,005 \end{matrix}$$

Разброс значений γ_i соответствует 10% точности измерений мощности и коэффициентов пропускания сеток. Внутренние потери складываются из потерь в волноводе, потерь на зеркалах и потерь на согласование:

$$\gamma_i = \gamma_{i6} + \gamma_{i3} + \gamma_{ic}$$

Минимальные потери мощности в волноводе для $E_{H_{11}}$ моды согласно [4]:

$$\gamma_{i6} = 2 \alpha_p \ell \quad \alpha_p = \left(\frac{u_{11}}{2a} \right)^2 \frac{\lambda^2}{a^3} \frac{(\eta^2 + 1)}{(\eta^2 - 1)^{1/2}}$$

η - показатель преломления материала трубки при $\lambda = 337$ мкм, u_{11} - первый корень J_0 -и Бесселя нулевого порядка, ℓ , a - длина и радиус волновода. Для $\eta \approx 2,55$, $u_{11} = 2,405$, $a = 2,8$ см, $\ell = 2,3 \cdot 10^2$ см, $\gamma_{i6} = 0,011$.

Таким образом, сумма потерь $\gamma_{i3} + \gamma_{ic} \leq 0,013$ и можно утверждать, что потери на согласование для резонатора состоящего из

плоской сетки и сферического зеркала с $R_3 = 10$ м близки к нулю.

Оптимальный коэффициент полезных потерь равен:

$\gamma_{i \text{ опт}} = \sqrt{K_2 S \gamma_i} - \gamma_i = \sqrt{(\gamma_{u2} + \gamma_i)(\gamma_{u3} + \gamma_i)} - \gamma_i$
 Для 10% точности измеряемых величин (и следовательно при изменении коэффициента внутренних потерь в пределах $\gamma_i = 0,012 + 0,024$) величина оптимального коэффициента полезных потерь меняется в интервале $\gamma_{i \text{ опт}} = 0,086 \pm 0,017$.

При использовании в качестве полупрозрачного зеркала сетки с шагом 60 или 100 мкм с коэффициентами полезных потерь $\gamma_{u2} = 0,067$; $\gamma_{u3} = 0,11$ выходная мощность лазера составляет 90% от максимальной величины при $\gamma_i = \gamma_{i \text{ опт}}$.

На рис.5 показано распределение интенсивности излучения $E_{H_{11}}$ моды, снятое пиродетектором на расстоянии 50 см от выходного окна оптимизированного лазера. Там же сплошной линией изображено наиболее близкое к экспериментальным точкам Гауссовское распределение $\exp - (r/1,3)^2$.

Поляризация излучения измерялась анализатором, состоящим из одномерной проволочной сетки и пиродетектора. В соответствии с теорией [4] излучение $E_{H_{11}}$ моды линейно поляризовано. Измерение абсолютной мощности лазера производилось стандартным измерителем мощности ИМО-2, в измерительную головку которого помещался специальный поглотитель из тонкой вольфрамовой проволоки. Максимальное значение мощности лазера равняется 190 ± 20 мВт.

В таблице 2 приводятся основные параметры лазера. Там же для сравнения выписаны характеристики наиболее мощных из описанных в литературе HCN лазеров.

Таблица 2.

Параметр	Лазер	Описыв.	[5]	[7]
	1	2	3	4
Выходная мощность в $E_{H_{11}}$ моде [мВт]		190	100	110
Удельная мощность (на един. модового объема) [мкВт·см ³]		114	83	60
Накачка		ВЧ-разряд (27,5 МГц, 0,8 кВт)	Разряд постоянного тока (P ≈ 3 кВт)	ВЧ-разряд (7 МГц, 1,5 кВт)

	1	2	3	4
Состав смеси	$C_2H_4 : N_2 : He =$ =19:10:15	$CH_4 : N_2 : He =$ =8:3:36	$NH_3 : Бензин =$ = 2 : 1	
Газовое давление [тор]	0,5	1,5	1,2 + 1,5	
Газовый расход [см ³ ·мин ⁻¹]	200	100	-	

Автор благодарит Бехтенева А.А. и Волосова В.И. за помощь в работе и полезные обсуждения, Завадского Н.И. за предварительную конструкторскую разработку.

Литература

1. D.R. Lide, G. Maki. *Applied Phys. Lett.* v 11, N2, 1967, 62.
2. A.G. Maki, L.R. Blaine *J. Mol. Spectry* 12, 45 (1964)
3. О.Звелто "Физика лазеров", М, 1979.
4. Magcatili E. A., Schmeltzer R.A., 1964, *Bell. Syst. Tech. J.*, 43, 1733
5. D. Belland, D. Veron, L. B. Whitbourn *Appl. Phys. Lett.*, vol 8, 1975, 2113
6. R.L. Abrams, *IEEE J. Quant. Electr.*, vol QE-8, N 11, 1978, 838
7. Малых Н.И., Нагорный А.Г., Ямпольский Е.С. *ПТЭ*, 1980, № 5, 200.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис.1. Схематический чертеж лазера.
 1 - инваровый каркас, 2 - волновод, 3 - непрозрачное зеркало, 4 - полупрозрачное зеркало, 5 - выходное окно, 6 - встирочные качалки, 7 - механизм для изменения длины резонатора, 8 - электроды, 9 - подстроечные индуктивности, 10 - ВЧ-генератор питания.
- Рис.2. Зависимость выходной мощности лазера от содержания ксенона в смеси. Давление смеси поддерживалось постоянным и равнялось 0,5 мм.рт.ст.
- Рис.3. Зависимость выходной мощности лазера от температуры наружной стенки волновода для двух различных начальных температур. 1 - $T_{гр.о} = 60^{\circ}\text{C}$, 2 - $T_{гр.о} = 110^{\circ}\text{C}$.
- Рис.4. Схема оптимальной геометрии резонатора.
 1 - плоская двумерная сетка, 2 - сферическое непрозрачное зеркало, 3 - волновод, 4 - положение волнового фронта.
- Рис.5. Распределение интенсивности в пучке для EH_{11} моды. Сплошная кривая - наиболее близкое к экспериментальным точкам Гауссовское распределение $\exp(-r^2/1,3)^2$.

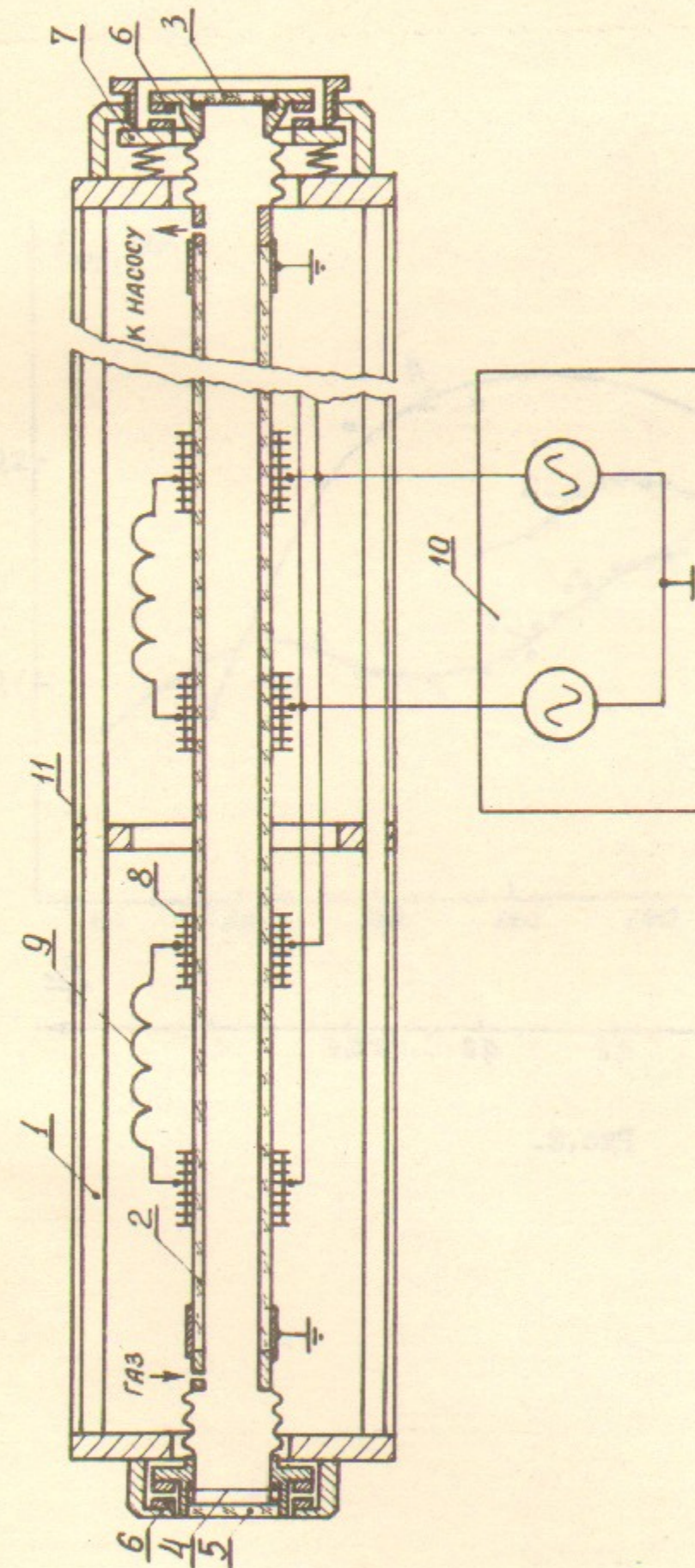


Рис.1.

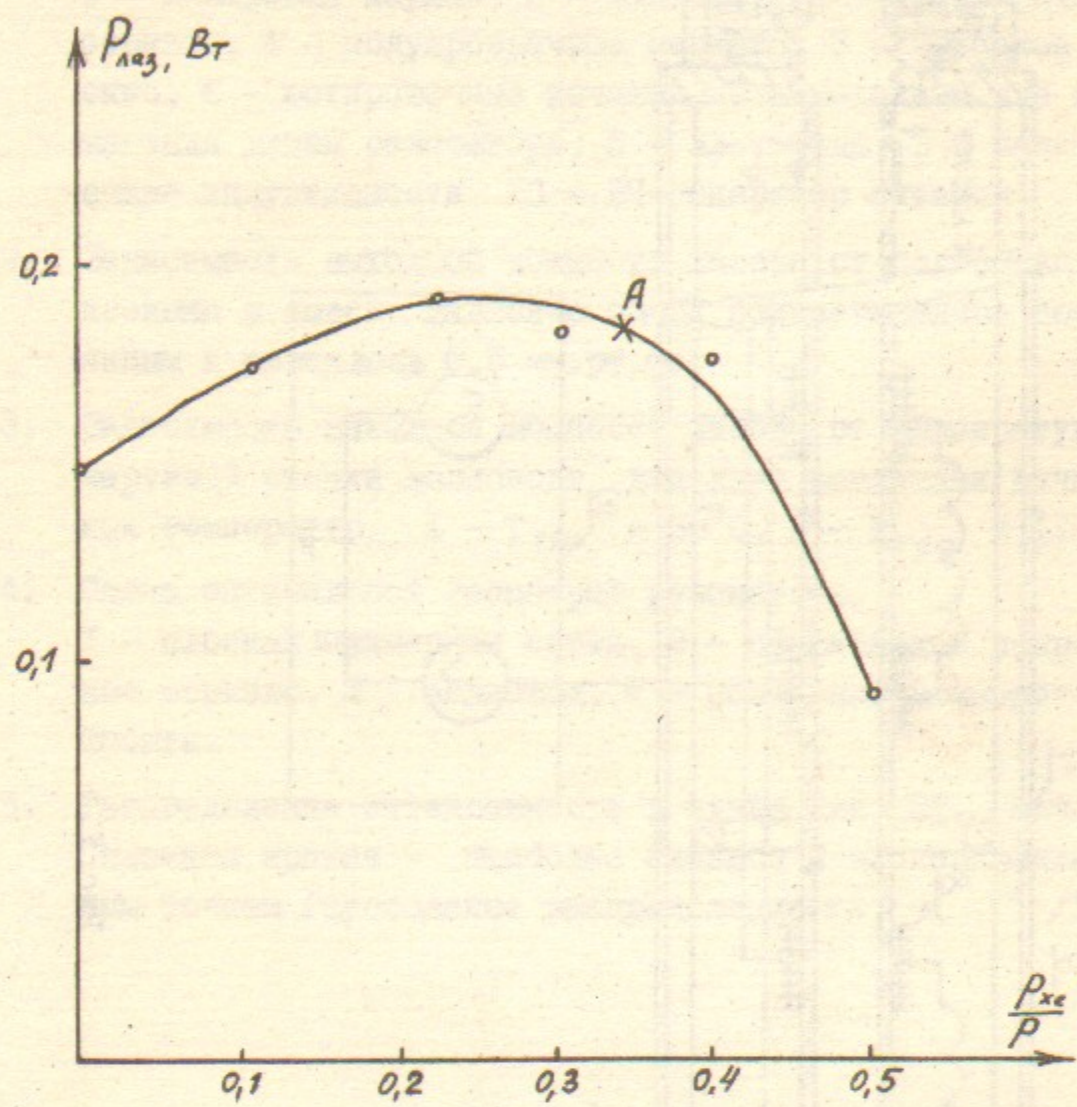


Рис.2.

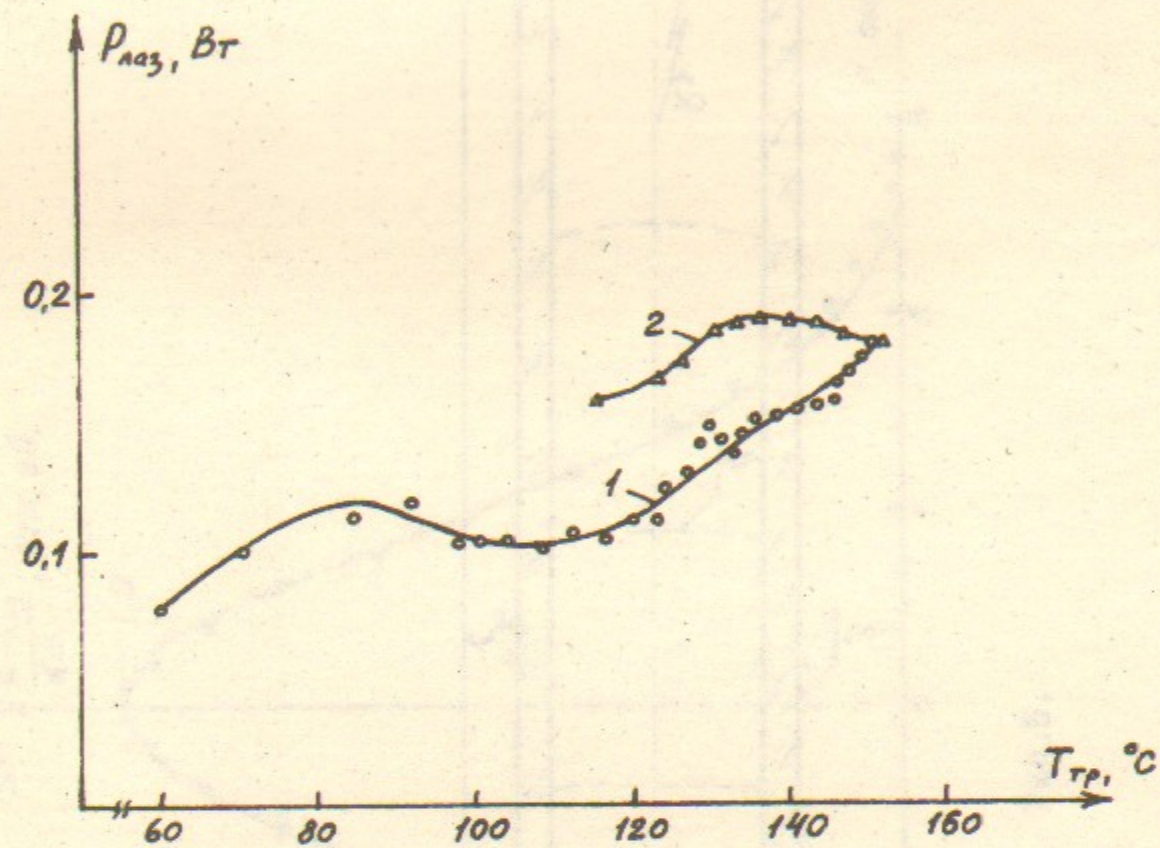


Рис.3.

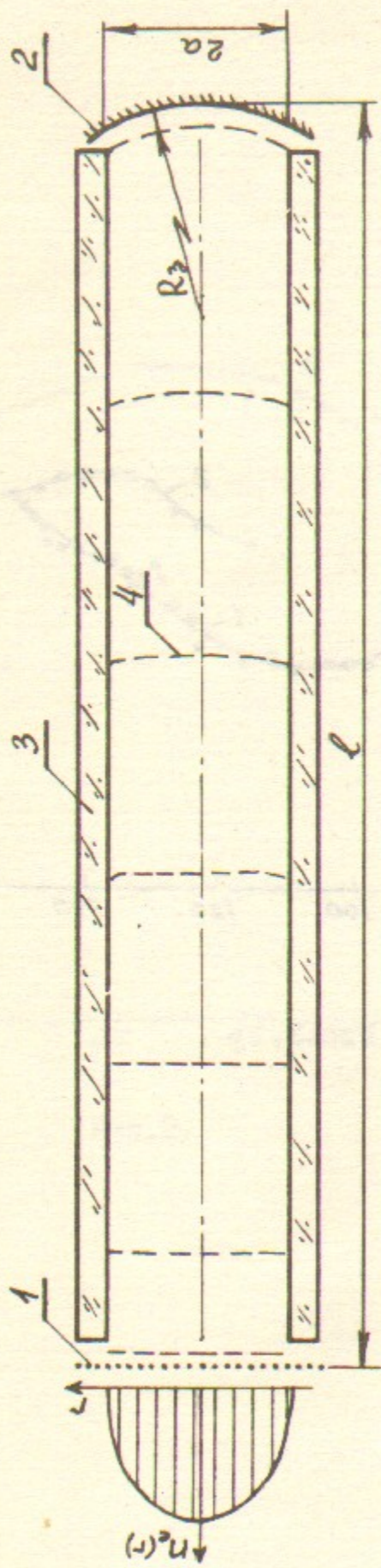


Рис.4.

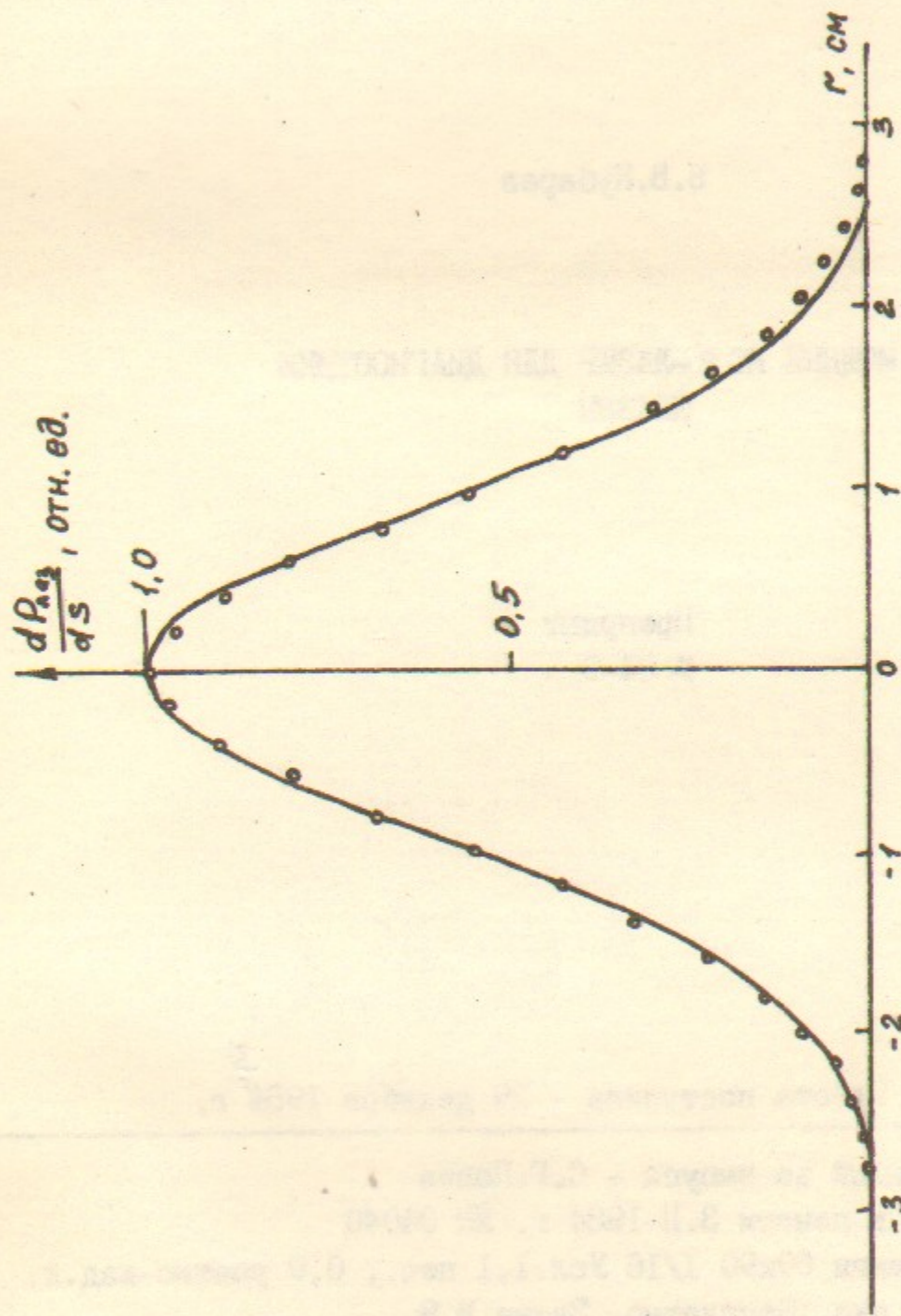


Рис.5.

В.В.Кубарев

МОЩНЫЙ $HC\ N$ -ЛАЗЕР ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ
ПЛАЗМЫ

Препринт
№ 84-9

Работа поступила - 29 декабря 1984³ г.

Ответственный за выпуск - С.Г.Попов
Подписано к печати 3.П-1984 г. МН 04040
Формат бумаги 60x90 I/16 Усл. I, I печ., 0,9 учетно-изд.л.
Тираж 290 экз. Бесплатно. Заказ № 9.

Ротапринт ИЯФ СО АН СССР. г.Новосибирск, 90