



ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

45

В.С. Бурмасов, Э.П. Кругляков,
Е.П. Семенов, А.Д. Хильченко

ДЕВЯТИКАНАЛЬНЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР
С ПЕРЕСТРАИВАЕМОЙ ОБЩЕЙ НАЧАЛЬНОЙ ФАЗОЙ

ПРЕПРИНТ 85-139



НОВОСИБИРСК

В.С.Бурмасов, Э.П.Кругляков, Е.П.Семенов,
А.Д.Хильченко

ДЕВЯТИКАНАЛЬНЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР С
ПЕРЕСТРАИВАЕМОЙ ОБЩЕЙ НАЧАЛЬНОЙ ФАЗОЙ

А Н Н О Т А Ц И Я

Дано описание девятиканального лазерного (гелий-неоновый лазер, $\lambda = 3,39$ мкм) интерферометра Майкельсона, предназначенного для измерения радиальных профилей плотности осе-симметричной плазмы. Устройство интерферометра допускает изменять расстояние между каналами, что позволяет исследовать плазму с радиусом от 3,6 до 15 см. Пространственное разрешение интерферометра - 0,45 см, чувствительность 10^{-3} интерференционной полосы ($\bar{n}_e \ell \sim 10^{13}$ см⁻²), а временное разрешение, определяемое девятиканальным детектором излучения, равно 0,3 мкс.

Как известно, теория предсказывает уменьшение эффективности взаимодействия сильноточных релятивистских электронных пучков (РЭП) с плазмой в присутствии радиальных градиентов [1]. Экспериментально такой эффект наблюдался ранее на установке ГОД-1 [2]. После её модернизации (длительность тока РЭП увеличена более чем вдвое и превосходит 100 нс, максимальная напряженность магнитного поля достигает 5,8 Тл) на установке ГОД-М планируется провести количественные эксперименты по определению инкрементов пучковой неустойчивости в плазме с радиальными градиентами. Для решения этой задачи потребовалось создать методику, способную определять радиальные распределения плотности с достаточно высоким пространственным разрешением. К этому следует добавить, что при работе с сильным магнитным полем существует проблема создания предплазмы с малыми радиальными градиентами (без провала плотности на оси) в поперечном сечении пучка. Трудности приготовления предварительной плазмы усугубляются необходимостью формирования плазмы с малыми градиентами на большой длине (7,5 м). Для решения данной проблемы также требуется многоканальная методика для одновременного определения плотности плазмы на различных радиусах в одном сечении.

В течение ряда лет в Институте ядерной физики СО АН СССР эксплуатировались одноканальные интерферометры Майкельсона, разработанные специально для исследования взаимодействия РЭП с плазмой [3]. Как известно, фактически методы интерферометрии определяют не плотность плазмы n_e , а её среднее значение вдоль направления зондирующего пучка:

$$\bar{n}_e \approx \frac{\int_0^{\ell} [N(x,y,z) - 1] dl}{\ell}$$

где l - размер плазмы в направлении наблюдения, $N(x, y, z)$ - её показатель преломления.

Восстановление пространственного распределения плотности плазмы по интегральным экспериментальным данным относится к классу обратных задач математической физики. В последние годы процедура восстановления распределений плотности довольно часто используется в диагностике высокотемпературной плазмы, особенно в случае осесимметричных объектов (см., например, [4+6]).

В настоящей работе описан многоканальный интерферометр, отличающийся следующими достоинствами:

1. Простой метод управления фазами интерферирующих пучков одновременно во всех каналах.
2. Возможность изменения расстояния между пучками.
3. Линейная связь между приобретенной в плазме разностью фаз $\Delta\varphi$ и плотностью плазмы (при $\Delta\varphi \leq 0,2$).

При разработке многоканального интерферометра максимально использован предыдущий опыт, накопившийся в результате эксплуатации однолучевых устройств. Так, например, без изменения осталась принципиальная схема прибора: многолучевой интерферометр построен по схеме Майкельсона. В качестве источника монохроматического излучения использован гелий-неоновый лазер на длине волны $\lambda = 3,39$ мкм. Основные трудности, которые пришлось преодолеть при создании многоканального интерферометра, связаны с получением девяти достаточно интенсивных (~ 10 мВт) синфазных пучков.

Схема интерферометра (см. рис.1) состоит из трех основных частей: источника монохроматического излучения, собственно интерферометра и детектора. Формирование девяти монохроматических пучков осуществлялось следующим образом. Излучение однододового

гелий-неонового лазера ЛП-126 направлялось в девятиканальный расщепитель 1, состоящий из восьми юстируемых светоделительных пластин из плавленного кварца, располагавшихся последовательно одна за другой под углом 45° к направлению распространения лазерного излучения, и одного поворотного зеркала. Все девять пучков взаимно параллельны и расположены в одной плоскости. Для увеличения мощности пучков использовалось оптическое усиление. Этот принцип был применен ранее в одноканальном интерферометре [7]. В описываемом случае каждый из девяти пучков пропускаться сквозь оптические усилители, выполненные на основе газоразрядных трубок 2, используемых в гелий-неоновых лазерах. Каждый усилитель состоял из двух последовательно расположенных трубок с общей активной длиной 140 см. Благодаря большому коэффициенту усиления инверсной среды по малому сигналу (коэффициент усиления для $\lambda = 3,39$ мкм равен 80 дБ/м [8]), усилители работали в режиме насыщения. Это обстоятельство приводило к автоматическому выравниванию мощности во всех каналах. Типичный уровень мощности в каждом из пучков после усиления достигал величины 10 мВт.

Специальная система зеркал (3, рис.1) обеспечивала возможность изменения расстояния между соседними пучками в пределах 0,45+1 см. При этом расстояние между крайними пучками варьировалось от 3,6 до 8 см. При необходимости расстояние между пучками и, соответственно, поперечный размер плазмы, доступный для зондирования, может быть увеличен без существенных переделок до 15 см. Принцип, положенный в основу способа изменения расстояний между пучками, ясен из рис.1: перемещение зеркал 3 вдоль направления распространения пучков должно приводить к изменению расстояний между ними. Указанный выше минимальный размер (0,45 см

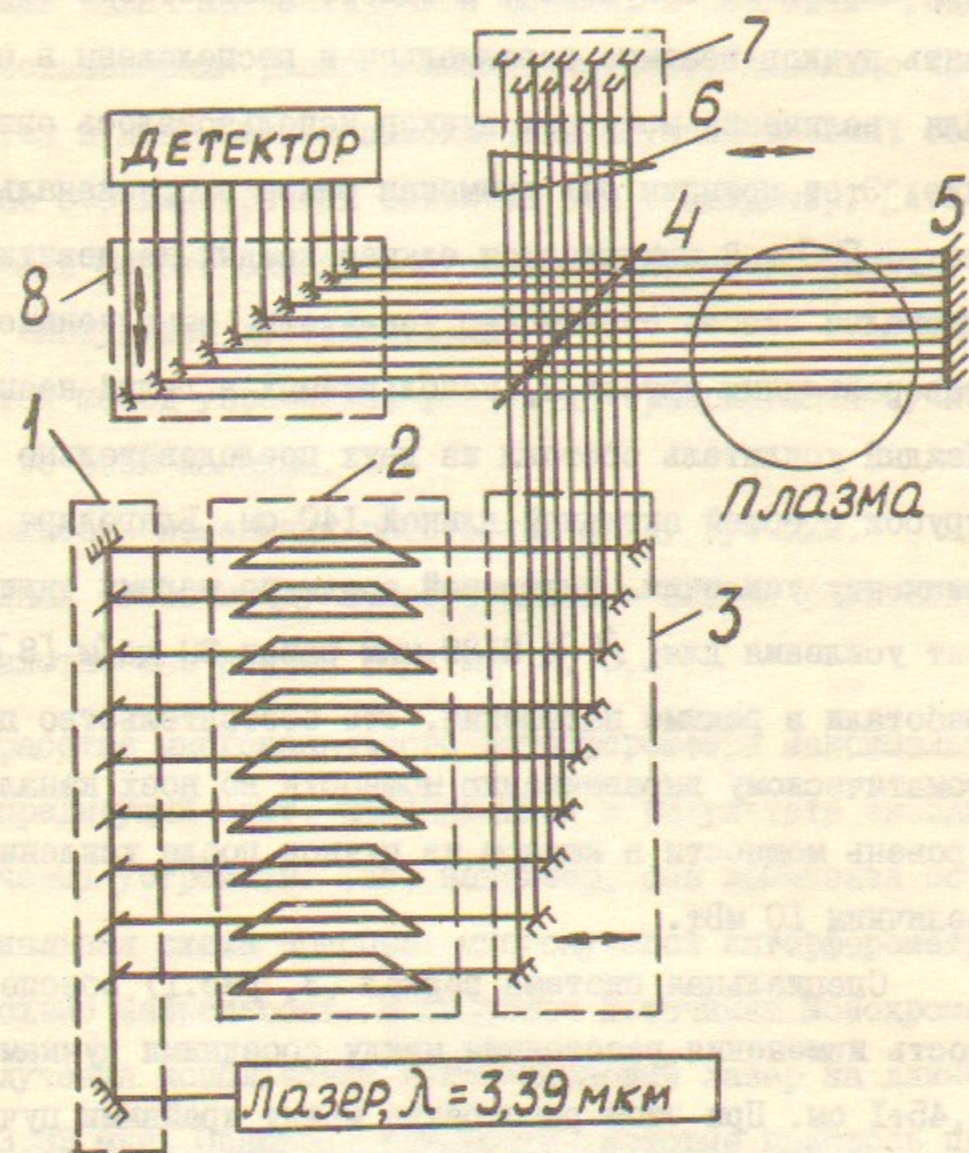


Рис. I. Оптическая схема интерферометра.

между ближайшими и 3,6 см между крайними пучками) объясняется виньетированием излучения на оправах зеркал. После отражения от зеркал 3 пучки лучей направлялись на светоделительную пластину интерферометра 4, общую для всех девяти каналов. Общими в схеме являются также зеркало 5 в плече с плазмой и оптический клин 6 в опорном плече. Длины плеч интерферометра приблизительно одинаковы и равны 70 см. В конце опорного плеча установлено девять независимо настраиваемых зеркал 7.

Одинаковая разность фаз интерферирующих пучков в каждом из каналов достигается индивидуальной регулировкой продольного положения зеркал 7 при первичной юстировке интерферометра. Продольное перемещение зеркала в небольших пределах осуществляется за счет упругих деформаций подложки зеркала при равномерной затяжке юстировочных винтов. По окончании предварительной процедуры юстировки зеркал все пучки оказываются синфазными. В дальнейшем эта синфазность сохраняется. Время от времени требуется лишь подстройка необходимой разности фаз интерферирующих пучков с помощью оптического клина.

Поскольку интерферометр предназначен для работы с плазмой в сильных магнитных полях (до 6 Тл), все его детали, включая массивную замкнутую 0-образную станину, выполнены из диэлектриков. Станина изготовлена из стеклотекстолита в виде прямоугольника со сторонами 105 и 117 см. Размер поперечного сечения брусков $18 \times 20 \text{ см}^2$. У станины имеется съемная перекладка, которая присоединяется к С-образному корпусу капрлоновыми стяжками. Все оптически прозрачные детали: светоделительная пластина, оптический клин и окна плазменной камеры изготовлены из плавленого кварца. Торцевые зеркала выполнены на оскове стеклянных подложек, напыленных алюминием. Одна из поверхностей свето-

делительной пластины имеет многослойное диэлектрическое покрытие, коэффициент отражения которого при длине волны $\lambda = 3,39$ мкм и угле падения 45° близок к 50%.

Принцип калибровки интерферометра основан на использовании оптического клина и не отличается от описанного в работе [9].

С помощью блока зеркал 8, расположенных на выходе системы, интерферирующие пучки направлялись на вход девятиканального детектора. Устройство блока зеркал 8 аналогично устройству блока 3 для изменения расстояний между пучками. Схематический вид детектора изображен на рис.2. В качестве чувствительных элементов I использованы кристаллы германия, легированного золотом ($Ge: Au$). Кристаллы имеют размер фоточувствительной площадки 2×2 мм² и высоту 6 мм. Спектральный диапазон чувствительности фотосопротивления при 77°K простирается от 2 до 7 мкм [10]. Используемая длина волны (3,39 мкм) попадает примерно на максимум вольт-ваттной чувствительности, величина которой в этой точке достигает приблизительно 1000 В/Вт.

Для охлаждения всех девяти кристаллов $Ge: Au$, расположенных вдоль прямой линии с шагом 1,1 см, использован сосуд Дьюара 2, изготовленный из нержавеющей стали. Тепловой контакт между внутренней стенкой сосуда и кристаллами осуществляется с помощью индиевых уплотнений.

Емкость сосуда около 1 л, скорость испарения жидкого азота составляет приблизительно 0,15 л/час. Конструкция сосуда предусматривает возможность применения угольного адсорбента 3 с периодическим прокаливанием при откачке для снижения теплопроводности вакуумного промежутка.

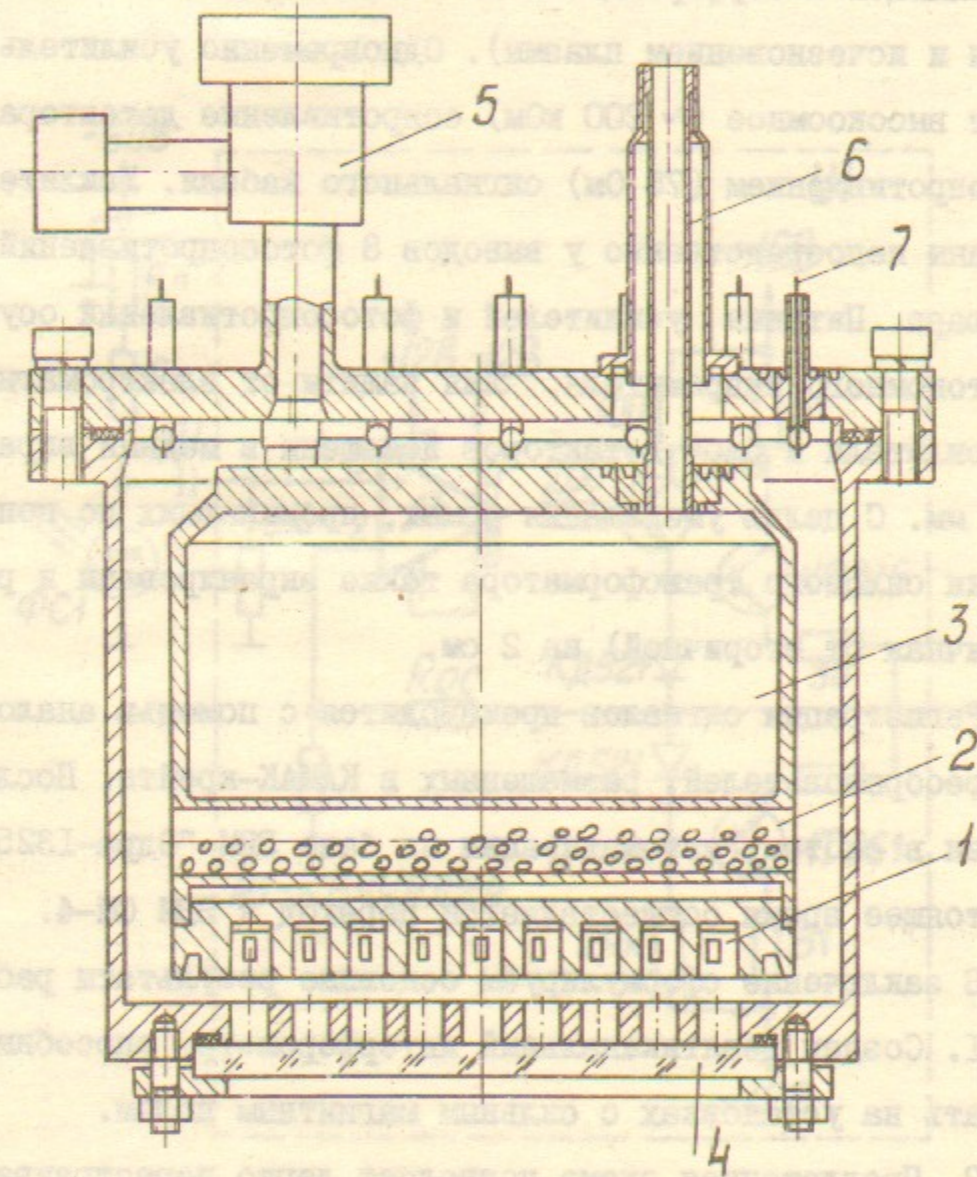


Рис.2. Девятиканальный детектор инфракрасного излучения.

Ввод излучения на кристаллы осуществляется через общее окно 4, изготовленное из плавленого кварца. Сигнал с каждого фотосопротивления подается на соответствующий усилитель (см. рис.3), с помощью которого осуществляется усиление переменной составляющей интерференционного сигнала (связанного с возникновением и исчезновением плазмы). Одновременно усилитель согласовывает высокоомное (~ 200 кОм) сопротивление детектора с волновым сопротивлением (75 Ом) сигнального кабеля. Усилители смонтированы непосредственно у выводов 8 фотосопротивлений из сосуда Дьвара. Питание усилителей и фотосопротивлений осуществлено от автономного выпрямителя. Для защиты от электромагнитных помех усилители и блок детекторов помещены в медный экран толщиной 3 мм. С целью уменьшения помех, проникающих по цепи питания, обмотки силового трансформатора также экранированы и разнесены (первичная от вторичной) на 2 см.

Регистрация сигналов производится с помощью аналого-цифровых преобразователей, размещенных в КАМАК-крейте. Последний включен в систему автоматизации на базе ЭВМ "Одра-1325" [11]. В настоящее время осуществляется переход к ЭВМ СМ-4.

В заключение сформулируем основные результаты работы:

1. Создан девятиканальный интерферометр, способный функционировать на установках с сильным магнитным полем.

2. Предложенная схема позволяет легко перестраивать расстояние между соседними пучками, так что характерный поперечный размер плазмы, зондируемой всеми девятью пучками, без каких-либо изменений в схеме может меняться от 3,6 до 8 см. Незначительные переделки позволяют расширить этот размер до 15 см. Пространственное разрешение интерферометра равно 0,45 см.

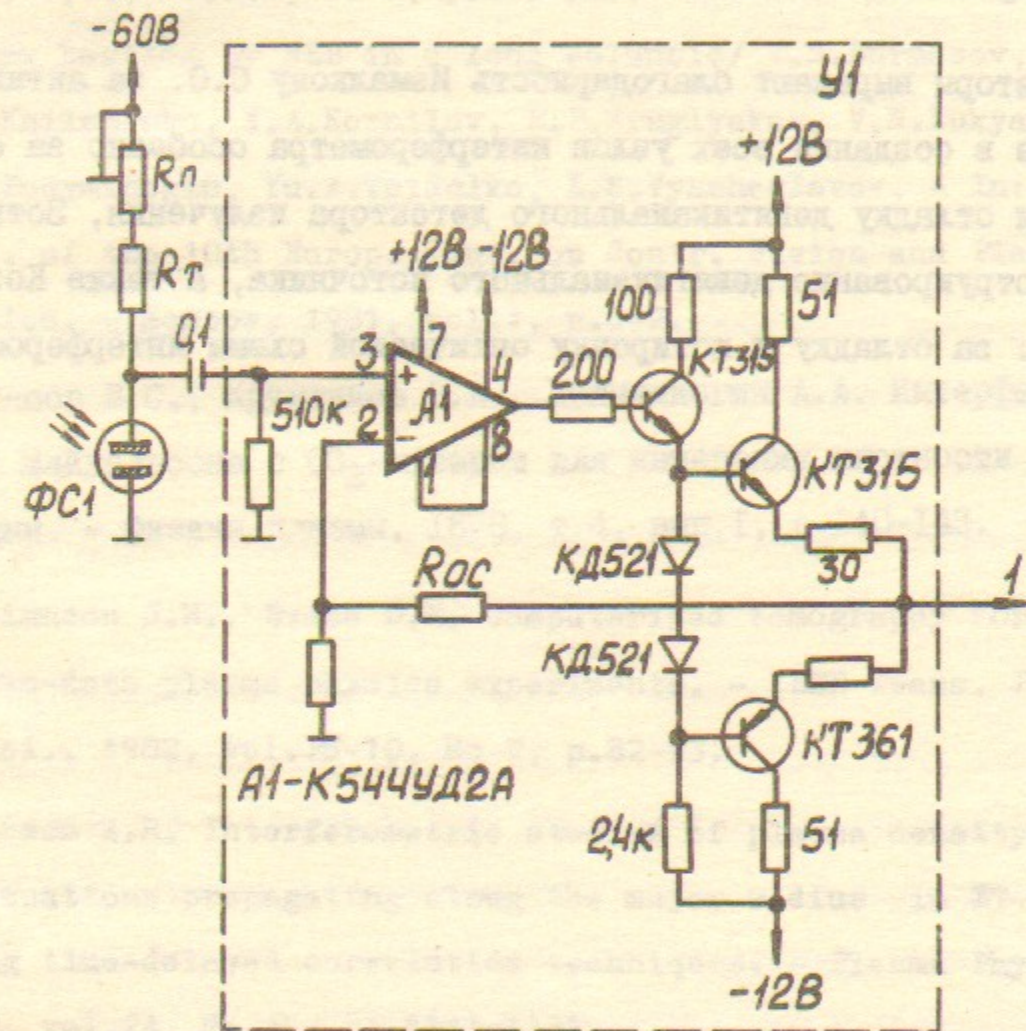


Рис.3. Схема усилителя.

3. Предложен простой метод, позволяющий управлять фазами одновременно во всех девяти каналах. С учетом синфазности пучков такой метод дает возможность настройки всех каналов на максимум чувствительности. Экспериментально достигнутая величина порога чувствительности $\langle n_e v \rangle \approx 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. При этом временное разрешение составляет 0,3 мкс.

Авторы выражают благодарность Измалкову С.О. за активное участие в создании всех узлов интерферометра особенно за создание и отладку девятиканального детектора излучения, Зоткину Р.П. за конструирование девятиканального источника, а также Козлову В.Г. за отладку и юстировку оптической схемы интерферометра.

Литература

1. Breizman B.N., Ryutov D.D. Powerful relativistic electron beams in a plasma and in a vacuum (theory). - Nuclear Fusion, 1974, vol.14, No 6, p.873-907.
2. Plasma heating by REB in a long solenoid/ V.S.Burmasov, A.D.Khilchenko, Y.A.Kornilov, E.P.Kruglyakov, V.N.Lukyanov, A.A.Podyminogin, Yu.A.Tsidulko, L.N.Vyacheslavov. - In: Proc. of the 10th Europ. Conf. on Contr. Fusion and Plasma Physics. - Moscow, 1981, vol.1, p.C-2.
3. Бурмасов В.С., Кругляков Э.П., Подыминогин А.А. Интерферометр Майкельсона с CO₂-лазером для измерения плотности плазмы. - Физика плазмы, 1978, т.4, вып.1, с.140-143.
4. Williamson J.H., Evans D.E. Computerized tomography for sparse-data plasma physics experiments. - IEEE Trans. Plasma Sci., 1982, vol.PS-10, No 2, p.82-93.
5. Jacobson A.R. Interferometric studies of plasma density fluctuations propagating along the major radius in ZT-40M, using time-delayed correlation techniques. - Plasma Physics, 1982, vol.24, No 9, p.1111-1131.
6. Получение плотного плазменного столба в сильном магнитном поле и диагностика его лазерными методами /А.В.Аржанников, В.С.Бурмасов, Л.Н.Вячеславов, В.С.Койдан. - Физика плазмы, 1984, т.10, вып.1, с.175-182.

7. Измерение плотности плазмы в вакуумном диоде микросекундной длительности /В.С.Бурмасов, С.Г.Воропаев, А.Л.Добривский, С.В.Лебедев, М.А.Щеглов. - Новосибирск: Ин-т ядерн. физики СО АН СССР, 1985. - 12 с. - (Препринт/АН СССР. Сиб. отд-ние. Ин-т ядерн. физики; 85-14).
8. Аллен Л., Джонс Д. Основы физики газовых лазеров. - М: Наука, 1970. - 207 с.
9. Бурмасов В.С., Кругляков Э.П., Цицулко Ю.А. Активная калибровка интерферометра Майкельсона для измерения плотности плазмы. - ПТЭ, 1982, вып.3, с.155-157.
10. Приемники инфракрасного излучения /Ж.Шоль, И.Марфан, М.Минш, П.Торель, П.Комбет. - М: Мир, 1968. - 283 с.
11. Система автоматизации эксперимента на термоядерной установке ГОД-1 /В.М.Аульченко, А.М.Батраков, В.Р.Козак, Э.П.Кругляков, В.И.Нифонтов, А.Д.Хильченко, Ю.А.Цицулко, В.И.Шейнгузихт, В.Я.Сазанский. - В кн.: Автоматизация научных исследований на основе применения ЭВМ: Тез. докл. - Новосибирск: Ин-т автоматизации и электротехники СО АН СССР, 1979, с.37.

В.С.Бурмасов, Э.П.Кругляков, Е.П.Семенов,
А.Д.Хильченко

ДЕВЯТИКАНАЛЬНЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР С
ПЕРЕСТРАИВАЕМОЙ ОБЩЕЙ НАЧАЛЬНОЙ ФАЗОЙ

Препринт
№ 85-139.

Работа поступила - 15 октября 1985 г.

Ответственный за выпуск - С.Г.Попов
Подписано к печати 21.XI-1985 г. МН 06806
Формат бумаги 60x90 1/16 Усл.1,1 печ.л., 0,9 учетно-изд.л.
Тираж 290 экз. Бесплатно. Заказ № 139.

Ротапринт ИЯФ СО АН СССР, г.Новосибирск, 90