

**Конфокальный сканирующий интерферометр
Фабри-Перо типа SCC-750.**

**Техническое описание
и инструкция по эксплуатации.**

Москва 2024 г.

1. Назначение.

Конфокальный интерферометр, иногда называемый сферическим интерферометром Фабри-Перо, является высокодобротным оптическим резонатором и представляет собой два зеркала одинаковой кривизны, отстоящие друг от друга на расстоянии L , равном радиусу кривизны r (рис.1). Сферические интерферометры Фабри-Перо играют исключительную роль в лазерной физике: во-первых, как анализаторы спектра высокого разрешения для детектирования модовой структуры и ширины линии генерации лазеров, а во-вторых, в форме, приближенной к конфокальной, как лазерные резонаторы. Как правило, конфокальные интерферометры обеспечивают более высокое спектральное разрешение по сравнению с плоскими интерферометрами Фабри-Перо. Это связано с тем, что разъюстировка сферических зеркал, в отличие от плоских, не приводит в первом порядке к изменению оптического пути, равного $4r$ (рис.2). Кроме того, сферические зеркала могут быть отполированы с более высоким качеством, т.е. отклонения таких зеркал от идеальной сферы меньше, чем отклонения зеркал плоских от идеальной плоскости.

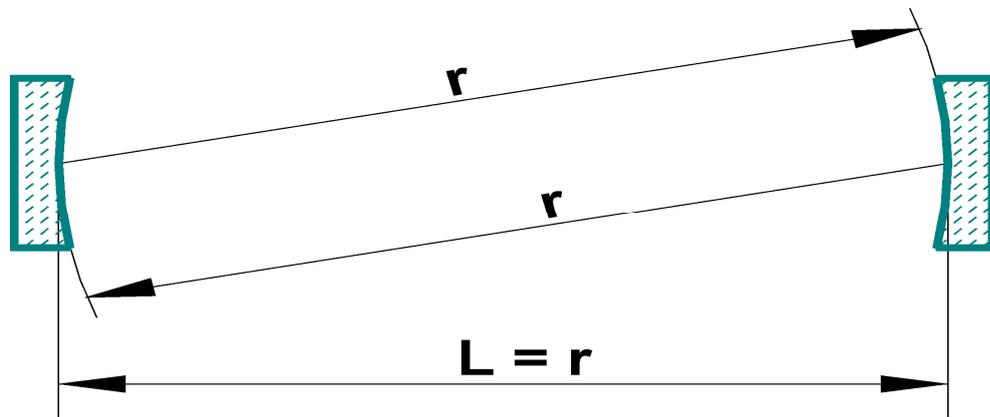


Рис.1. Кривизна и взаимное расположение зеркал в конфокальной схеме.

Эти обстоятельства и обусловили выбор конфокальной схемы для сканирующего интерферометра SCC-750, который предназначен для исследования тонкой структуры спектра оптического излучения и измерения ширины линии генерации лазера.

2. Основные понятия и технические данные.

На рисунке 2 дана в приближении геометрической оптики интерпретация формирования сигнала пропускания в конфокальном интерферометре. Лазерный луч, входящий в интерферометр параллельно оптической оси в точке P_1 , последовательно

отражается в точках P_2 , P_3 и P_4 , дважды проходя через фокальную точку F , и интерферирует с собой в P_1 . Чем выше коэффициент отражения зеркал, тем большее количество парциальных волн участвует в интерференции и, следовательно, тем выше спектральное разрешение прибора. Из рисунка видно, что полный обход резонатора (т.е. минимальный путь, по прохождении которого, возможна многолучевая интерференция) совершается на длине $4r = 4L$.

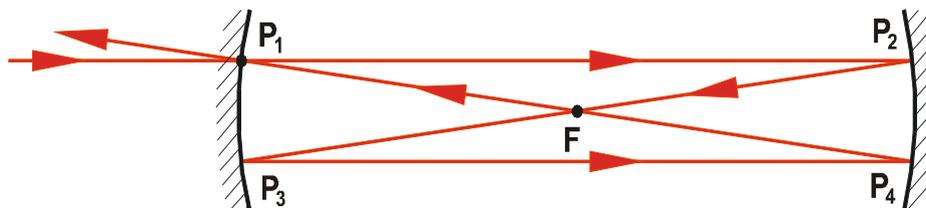


Рис.2. Траектории лучей в конфокальном интерферометре в приближении геометрической оптики.

Таким образом, область свободной дисперсии FSR (частотный интервал между соседними пиками конструктивной интерференции, free spectrum range) такого интерферометра составляет:

$$FSR = \frac{c}{4L}, \quad (1)$$

где c – скорость света, L – расстояние между зеркалами. Конфокальный интерферометр Фабри-Перо SCC-750 (Scanning Confocal Cavity) имеет базу 25 мм, что соответствует $FSR=3000$ МГц. Точки P_i являются портами вывода излучения из резонатора. Следует отметить, что при точном пространственном согласовании входного излучения с основной поперечной модой сферического интерферометра полный обход резонатора совершается на длине $2L$ (пары точек $P_1 - P_3$ и $P_2 - P_4$ вырождаются в одну точку. В этом случае область свободной дисперсии описывается той же формулой, что и для плоского интерферометра Фабри-Перо:

$$FSR = \frac{c}{2L}. \quad (2)$$

Это означает, что в наблюдаемом оптическом сигнале резонансы пропускания, соответствующие пространственным модам с нечетными индексами (например, TEM_{01} или TEM_{11}), отсутствуют или сильно подавлены. На практике реализовать этот случай достаточно сложно, поскольку он чрезвычайно чувствителен к настройке входного пучка (его направлению и диаметру), зато его легко отделить от случая, описываемого формулой (1), тончайшим отклонением анализируемого пучка от оптической оси.

Характеристикой, описывающей качество интерферометра и его зеркал, является резкость *finesse*. Резкость выражается отношением области свободной дисперсии к ширине резонанса пропускания на его полувывоте $\Delta\nu$:

$$finesse = \frac{FSR}{\Delta\nu}. \quad (3)$$

Для случая плоского интерферометра Фабри-Перо резкость следующим образом связана с коэффициентом отражения зеркал:

$$finesse = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R}, \quad (4)$$

где R – коэффициент отражения зеркал.

Для случая, представленного на рис.2 и описываемого формулой (1), резкость видоизменяется:

$$finesse = \frac{\pi R}{1-R^2}, \quad (5)$$

т.е. она практически вдвое меньше, чем по формуле (4).

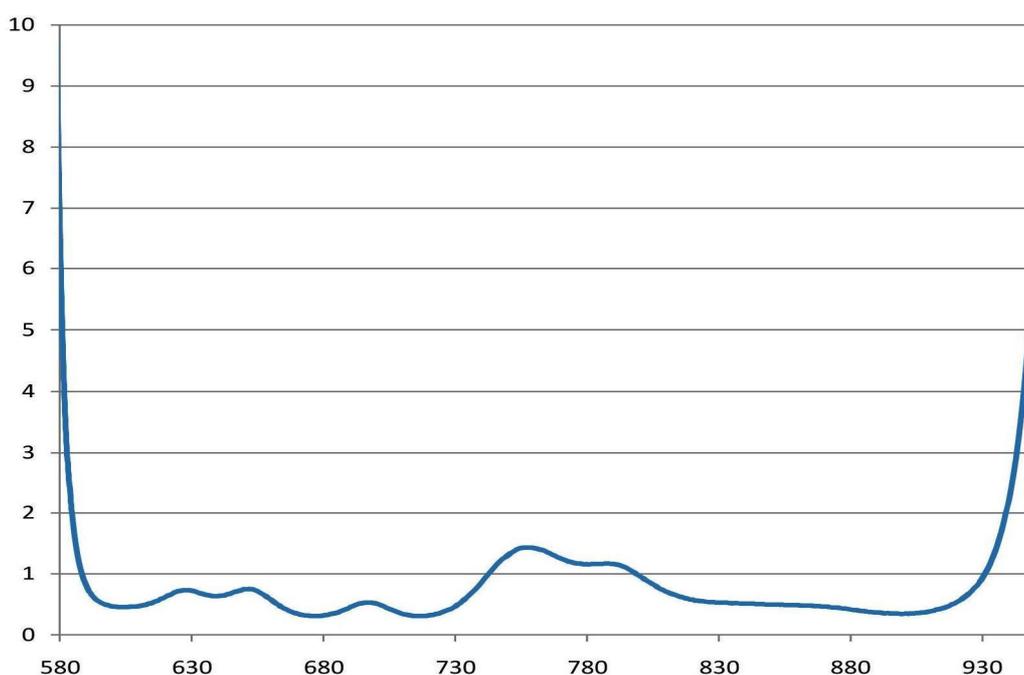


Рис.3. Спектр пропускания зеркал SCC-750.

Резкость SCC-750 была измерена с помощью He-Ne лазера, имеющего ширину линии моды менее 1МГц, и составила 100 на длине волны 633 нм. Это соответствует аппаратной ширине (разрешению) интерферометра около 75 МГц. Спектр пропускания зеркал SCC-750 приведен на рисунке 3. Расхождение между измеренной и расчетной резкостью следует отнести к значительному поглощению в многослойном зеркальном

покрытии и рассеянием на поверхности зеркал с характерным размером дефектов $\sim \lambda/300$.

Для получения оптического сигнала максимальной амплитуды и наименьшей ширины полезно знать диаметр перетяжки моды TEM_{00} конфокального интерферометра, с тем, чтобы облегчить пространственное согласование светового пучка с резонатором или, по крайней мере, упростить выбор размера диафрагмы, ограничивающей количество возбуждаемых в интерферометре пространственных мод. Размер перетяжки (ее радиус) ω_0 зависит от длины волны излучения λ и радиуса зеркал r и связан с ними следующим соотношением:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{\lambda r}{2\pi}}. \quad (6)$$

Для длины волны 633 нм и радиуса зеркал 100 мм диаметр перетяжки $2\omega_0$ составляет 200 мкм.

Поскольку подложки для зеркал интерферометра имеют плоско-вогнутую форму, то они действуют на входящий световой пучок подобно отрицательным линзам с фокусным расстоянием 222 мм (показатель преломления плавленого кварца $n=1.45$). Для компенсации расходимости светового пучка после линзы и для его более точного пространственного согласования с модой интерферометра полезно использовать собирающую линзу с фокусным расстоянием порядка длины интерферометра.

Основные технические параметры SCC-750 представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Рабочий диапазон длин волн	590-930 нм
База интерферометра	100 мм
Область свободной дисперсии	750 МГц
Резкость на 633 нм	100
Аппаратная ширина	7,5 МГц
Диаметр перетяжки моды TEM_{00}	200 мкм
Диаметр входной апертуры	5 мм
Габариты	Ø 27 × 115 мм
Диапазон смещения подвижного зеркала	1 мкм
Чувствительность смещения по напряжению	3 нм/В
Перестройка частоты собственной моды от напряжения	15 МГц/В

3. Устройство и работа прибора.

3.1. Оптическая часть. Устройство конфокального сканирующего

интерферометра показано на рисунке 4.

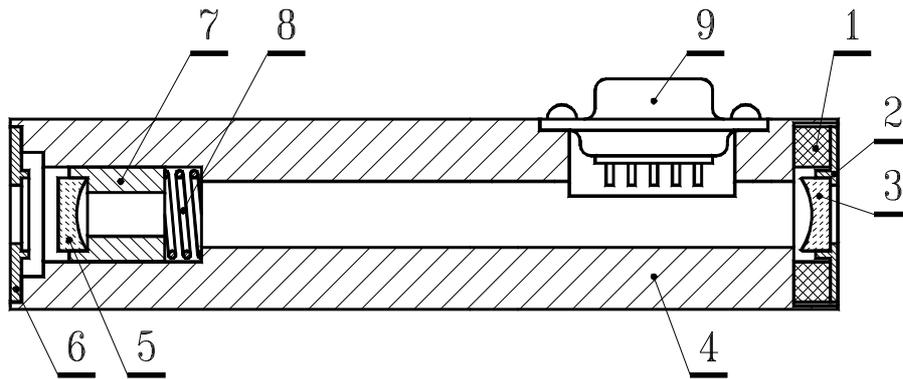


Рис.4. Устройство конфокального сканирующего интерферометра SCC-750.
1 – пьезокерамика, 2 – оправа сканируемого зеркала, 3 – сканируемое зеркало, 4 – корпус, 5 – юстируемое зеркало, 6 – защитный фланец, 7 – оправа юстируемого зеркала, 8 – пружина, 9 – разъем DB-9M.

Принцип измерения спектральной ширины анализируемого излучения заключается в следующем. Луч света посылается на интерферометр вдоль его оптической оси. Часть излучения, прошедшая через интерферометр, регистрируется фотоприемником. Положение одного из зеркал (рис.4, позиции 2, 3) модулируется пьезокерамикой (рис.4, поз.1), варьируя тем самым базу интерферометра. Напряжение на пьезокерамике меняется линейно, поэтому линейно меняются и база интерферометра, и частота его собственных мод.

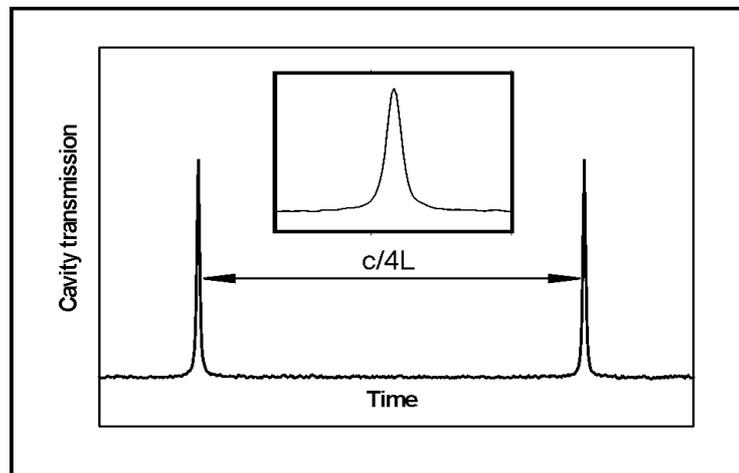


Рис.5. Резонансы пропускания сканирующего интерферометра SCC-750 и форма отдельного резонанса (на врезке).

При совпадении частоты одной из мод интерферометра с частотой анализируемого излучения свет проходит через зеркала и достигает фотоприемника; в режиме сканирования, таким образом, наблюдаются резонансы пропускания (рис.5). Форма отдельного резонанса является сверткой аппаратной функции интерферометра и

спектральной линии анализируемого излучения (например, линии лазера). При лоренцевой форме обеих линий результирующий контур является также лоренцевым с полушириной (полной шириной на полувысоте), равной сумме их полуширин. Это означает, что измерение ширины линии лазера с помощью SCC дает ее оценку сверху и тем точнее, чем меньше аппаратная ширина интерферометра.

Паразитное отражение от интерферометра способно влиять на режим генерации лазера и, как следствие, изменять его спектральные характеристики. Для устранения подобных возмущений спектра в установку по измерению ширины линии генерации должна быть включена оптическая развязка.

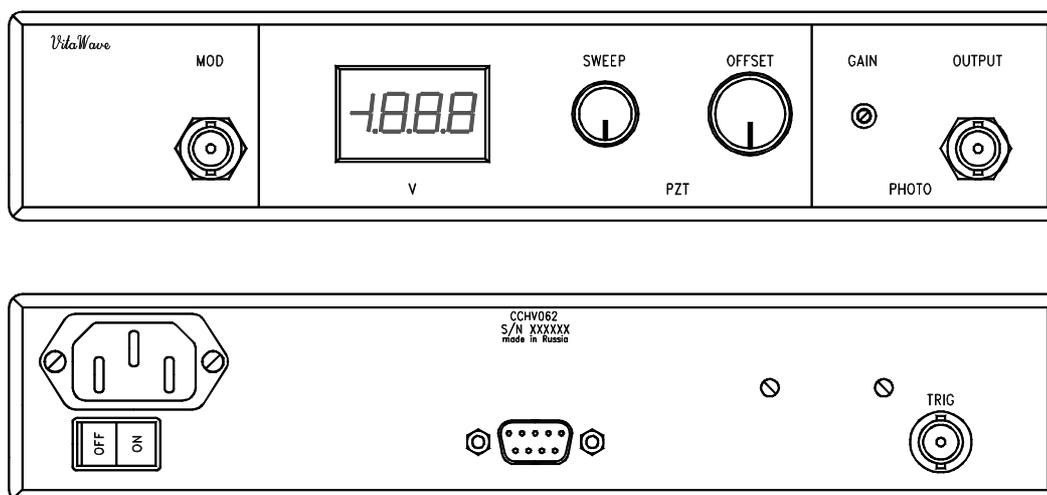


Рис.6. Вид спереди и сзади блока управления.

3.2. Блок управления CCHV062 (Cavity Controller with High-Voltage output).

Работа сканирующего интерферометра обеспечивается блоком управления, в котором формируется высокое напряжение для питания пьезокерамики и происходит преобразование фототока приемника в напряжение. Под крышкой прибора рядом с сетевым разъемом находятся три контактных гнезда для плавкого предохранителя. Одно из гнезд соответствует напряжению силовой сети 240 В, второе – напряжению 220 В, третье – 117 В. **Только один плавкий предохранитель номиналом 0,5 А может быть установлен в соответствующее гнездо!** Еще один плавкий предохранитель (F1, см. монтажную схему) номиналом 100 мА установлен для защиты высоковольтного стабилизатора от замыкания.

Вид лицевой и задней панелей прибора показан на рисунке 6. Лицевая панель разделена на несколько функциональных зон. В левой зоне находится BNC-разъем MOD,

предназначенный для подачи модулирующего сигнала на вход высоковольтного усилителя пьезокерамики.

В центральной зоне PZT установлен дисплей, который отображает напряжение, подаваемое на пьезокерамику, и расположены две рукоятки управления высоковольтным усилителем. Левая рукоятка (SWEEP) регулирует амплитуду сигнала треугольной формы, а правая (OFFSET) устанавливает уровень постоянного напряжения на пьезокерамике. Максимальное выходное напряжение высоковольтного усилителя составляет 150В. Высоковольтный усилитель имеет два выхода (HV1 и HV2 разъема DRB-9F), противоположных по фазе выходного сигнала. Это позволяет при подключении к ним пьезокерамики получать на ней переменный сигнал удвоенной амплитуды: от -150 В до +150 В. Максимальная перестройка пьезокерамики достигается при среднем положении рукоятки OFFSET.

В правой зоне PHOTO расположены выход OUTPUT трансимпедансного усилителя (преобразователя фототока в напряжение) и регулятор его усиления GAIN. Эти выход и регулятор используются в моделях интерферометров со встроенным фотоприемником. Дополнительный ступенчатый регулятор коэффициента преобразования фототока SW2 расположен на печатной плате устройства рядом с выходным разъемом J8.

Блок управления имеет собственный генератор треугольного напряжения. Он позволяет модулировать напряжение, подаваемое на пьезокерамику, на частоте f сетевого напряжения (для России 50 Гц) и ее субгармониках $f/2$, $f/4$, $f/8$. Постоянная разность фаз между частотами внутреннего генератора и силовой сети уменьшает влияние сетевых наводок (электрических и оптических) во время регистрации оптических данных. Чтобы установить нужную частоту сканирования, один из движков переключателя SW15 должен быть установлен в положение ON. Встроенный генератор сканирования может быть отключен от управления высоковольтным усилителем переключателем SW17, который расположен на печатной плате электронного блока. В этом случае переключатель переключателя устанавливается в соседнее положение, а сигнал внешнего управления подается на разъем синхронизации TRIG, расположенный на задней панели. Там же установлены выключатель питания, сетевой разъем и разъем подключения сканирующего интерферометра (DRB-9F). Сигнал треугольной формы с выхода TRIG имеет размах $8 V_{p-p}$ и может быть использован для управления или синхронизации внешних устройств (например, осциллографа, источника тока или другого высоковольтного усилителя). Все электрические соединения между блоком управления и оптической частью установки должны быть выполнены экранированными проводами.

4. Общие указания по эксплуатации.

Конфокальный интерферометр является прецизионным оптическим устройством, требующим аккуратного обращения в процессе эксплуатации, хранения и транспортирования. Поэтому для обеспечения его безотказной работы необходимо выполнять следующие требования:

- избегать ударов и толчков,
- предохранять от резких колебаний температуры, сырости и конденсации влаги на оптических поверхностях,
- не допускается разборка SCC-750,
- не допускается подключение SCC-750 к другим блокам управления,
- не допускается работа блока управления без заземления (осуществляется через центральный контакт сетевого шнура).

При эксплуатации прибора следует помнить, что в блоке управления для питания пьезокерамики используется напряжение до 150 вольт.

5. Подготовка к работе.

Для измерения ширины линии генерации лазера (ШЛГ) кроме оптической части и блока управления также требуется осциллограф. Предпочтительнее, если осциллограф будет запоминающим, т.к. это упрощает отсчет измеряемых интервалов.

Оптическая часть установки по измерению ШЛГ должна быть смонтирована на ровной поверхности, не допускающей колебаний интерферометра. Блок управления подключается к силовой сети с обязательным заземлением среднего контакта сетевого разъема.

Фотоприемник устанавливается за выходным зеркалом интерферометра, сигнал с фотоприемника подается на вход осциллографа. Если осциллограф имеет внутреннюю синхронизацию от сети, то, поскольку частоты генератора блока управления и силовой сети имеют жесткую фазовую связь, синхронизировать развертку осциллографа от генератора треугольного напряжения необязательно. Однако если запуск развертки осциллографа отсутствует, неустойчив или происходит чаще, чем необходимо, то лучше воспользоваться внешней синхронизацией. Для этого на вход синхронизации осциллографа необходимо подать сигнал с выхода TRIG блока управления.

Кабель, соединяющий SCC-750 и блок управления, нужно вставлять в разъем интерферометра мягко, избегая перекосов и сильного давления, придерживая одной рукой корпус интерферометра.

Перед началом измерений лучше дать прибору прогреться в течение 5-10 минут. Это существенно уменьшит дрейф напряжения на пьезокерамике и, как следствие, дрейф базы интерферометра и его собственных частот.

Излучение исследуемого лазера следует направить вдоль оси интерферометра, добиваясь максимальной амплитуды резонансов пропускания. Наблюдаемые резонансы должны быть симметричными и без ступенек, которые могут свидетельствовать о наличии паразитной оптической обратной связи (см. Рис.5). При возникновении такого рода искажений, их можно подавить, установив оптический фильтр на выходе лазера. Фильтр уменьшит наблюдаемый сигнал в соответствии со своим пропусканием. Однако доля отраженной волны упадет, как квадрат пропускания.

6. Порядок работы.

Гребенка собственных мод интерферометра дает нам частотный масштаб для измерения полуширины резонанса пропускания. Разность частот двух соседних при наблюдении мод равна области свободной дисперсии 750 МГц. Линейное сканирование базы интерферометра позволяет при определении ШЛГ заменить измерение интервалов частоты между соседними модами на измерение интервалов времени между моментами наблюдения максимумов пропускания.

Определение ширины линии генерации лазера производится путем измерения ширины резонанса пропускания SCC-750 на половине его интенсивности.

Перед отсчетом интервалов необходимо убедиться, что наблюдаемые резонансы пропускания действительно соседние, т.е. находятся на одном склоне сканирования, а не являются одним и тем же резонансом, прописанным на прямом и обратном ходе пьезокерамики. Если при вращении рукоятки OFFSET резонансы двигаются в одну сторону, то они соседние. Если в противоположные стороны, то это – резонанс, прописанный дважды.

Отсчет интервалов времени для соседних резонансов и для полуширины резонанса должен производиться при одном и том же положении рукоятки SCAN. Допускается смещение резонанса пропускания рукояткой OFFSET для более удобного отсчета.

Пример измерения. Временной интервал между двумя соседними резонансами (как на рисунке 5) составил 5 делений экрана осциллографа при развертке 2 мс/деление.

Таким образом, область свободной дисперсии 750 МГц соответствует временному интервалу 10 мс.

Производим отсчет интервала, соответствующего полуширине резонанса. Для большей точности переходим к меньшим временам регистрации (как на врезке к рисунку 5). На развертке 100 мкс/деление полуширина составила 2 деления, т.е. 0,2 мс.

В результате получаем:

$$\text{ШЛГ} = 750 \text{ МГц} \times \frac{0,2 \text{ мс}}{10 \text{ мс}} = 15 \text{ МГц}.$$

7. Поверка прибора.

При правильной эксплуатации и отсутствии внешних механических воздействий (удары, вибрация, температурная деформация) прибор способен работать долго и без проверки. Однако при подозрении на необходимость проверки следует:

1. С помощью осциллографа проверить линейность сканирования пьезокерамики. Для этого подать сигнал с выходов 8 и 9 разъема DRB-9F на вход осциллографа через измерительный щуп 1:10 (напряжение между контактами 8 и 9 составляет $\pm 150\text{В}$). Во время измерений осциллограф **не должен быть заземлен**, поэтому требуется соблюдение всех мер техники безопасности.

2. Внешним источником лазерного излучения с шириной линии генерации менее 1 МГц произвести измерение ширины резонанса пропускания SCC-750 по описанной выше методике. Если ширина резонанса не превышает 8 МГц, то прибор работоспособен. Если разрешение оказалось хуже, прибор должен быть возвращен для дальнейшего тестирования производителю.

8. Характерные неисправности и методы их устранения.

	Характер неисправности	Причина неисправности	Способ устранения
1	При включении блока управления нет индикации на цифровом дисплее лицевой панели.	Сгорел сетевой предохранитель.	Заменить предохранитель.
2	Осциллограф подключен к выходу TRIG, но не синхронизируется.	Переключатель SW17 находится в неправильном положении.	Переключателем SW17 подключить встроенный генератор сканирования.
3	Цифровой дисплей работает, но пьезокерамика не сканируется.	Переключатель SW17 находится в неправильном положении.	Переключателем SW17 подключить встроенный генератор сканирования.
4	Цифровой дисплей работает, но пьезокерамика не сканируется.	Отсутствует высокое напряжение.	Проверить предохранитель высоковольтного блока питания.
5	Пьезокерамика не сканируется, предохранитель высоковольтного блока питания сгорает сразу после включения.	Сгорела одна из микросхем U22-U23 (TDA6111Q).	При отключенном от сети блоке управления проверить замыкание ножек 7, 8, 9 микросхем TDA6101Q на землю. Заменить микросхему, в которой выявлено замыкание.
6	Случайным образом происходят броски напряжения на выходе генератора треугольного сигнала.	Плохое качество сетевого напряжения.	Перейти на более низкую частоту сканирования переключателем SW15.
7	Броски напряжения на выходе генератора треугольного сигнала происходят часто, и переход на сканирование с пониженной частотой не помогает.	Очень плохое качество сетевого напряжения.	Использовать внешний генератор или питать всю установку через стабилизатор сетевого напряжения.
8	Сигнал на выходе OUTPUT слабый, неконтрастный, с большой постоянной подставкой.	Исследуемый лазер имеет многомодовую структуру.	Выбраковать лазер по степени одночастотности.

Приложение: принципиальные электрические и монтажные схемы узлов блока управления.

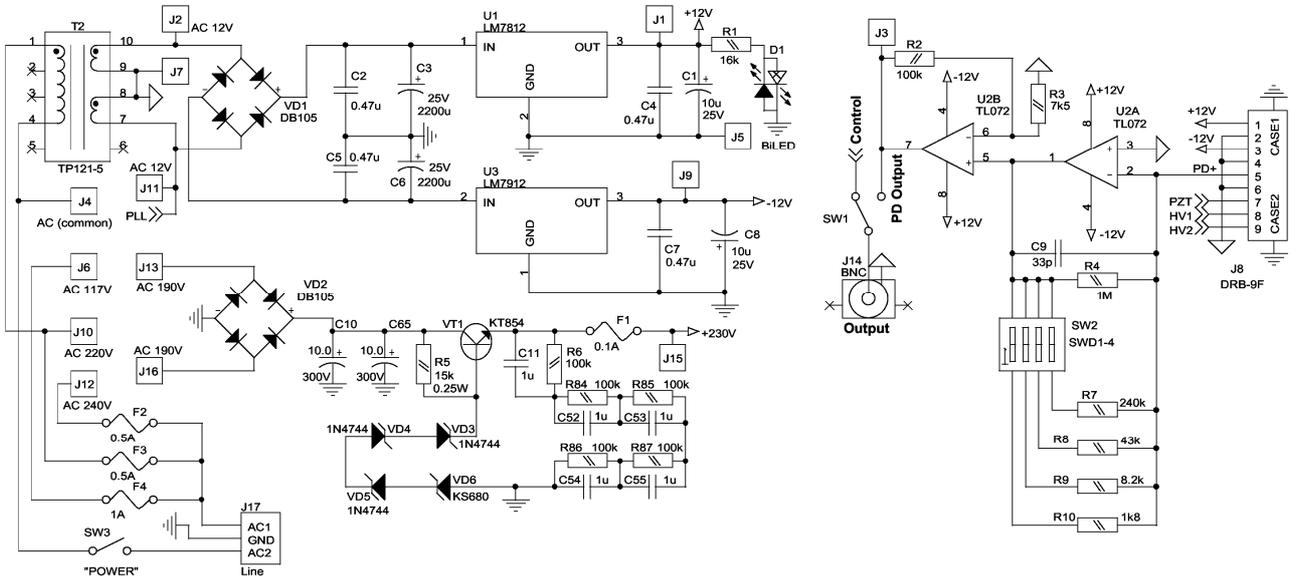


Рис.7. Блок питания.

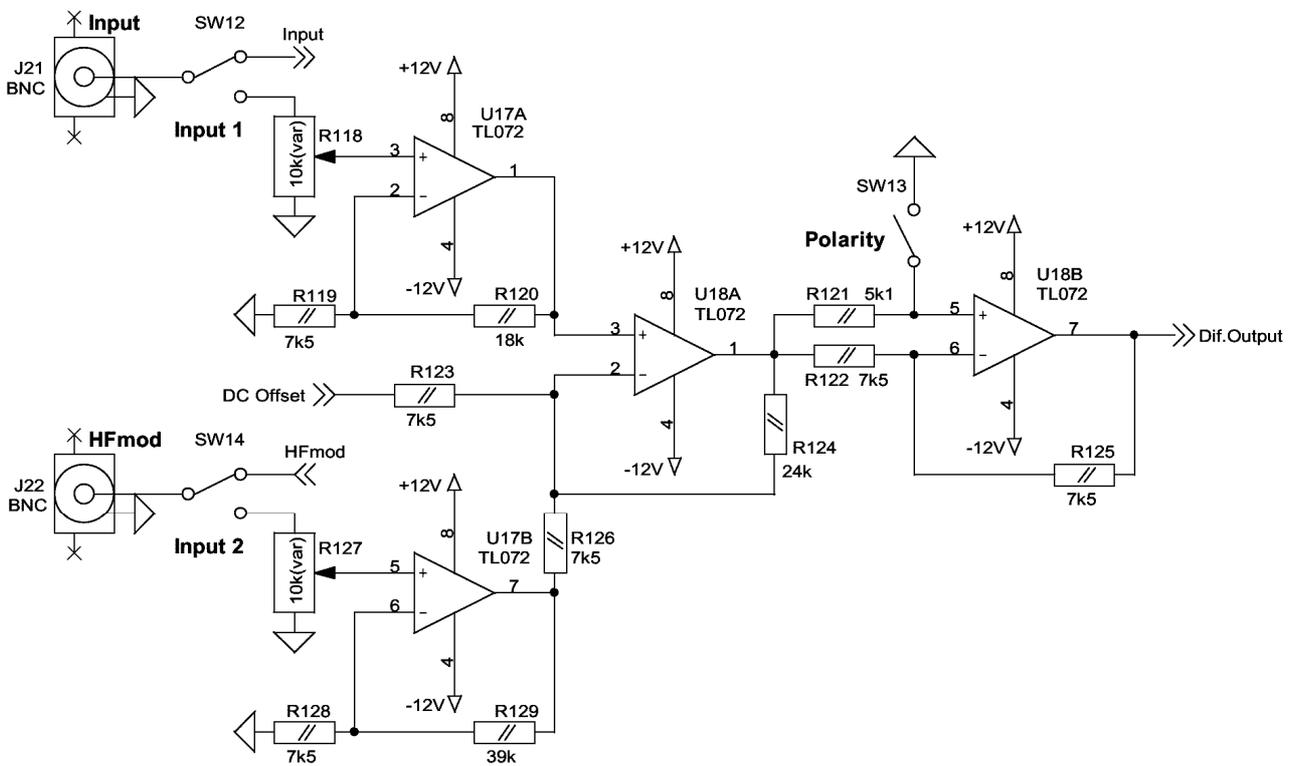


Рис.8. Дифференциальный усилитель.

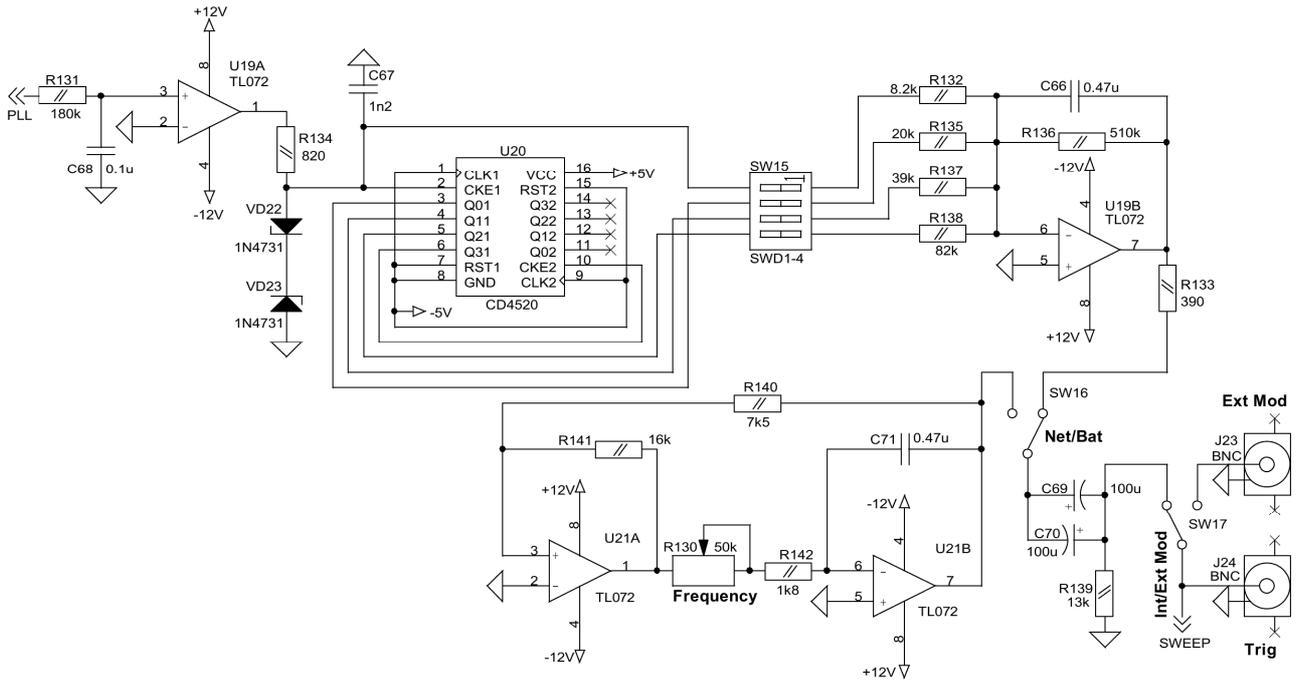


Рис.9. Генератор сканирования.

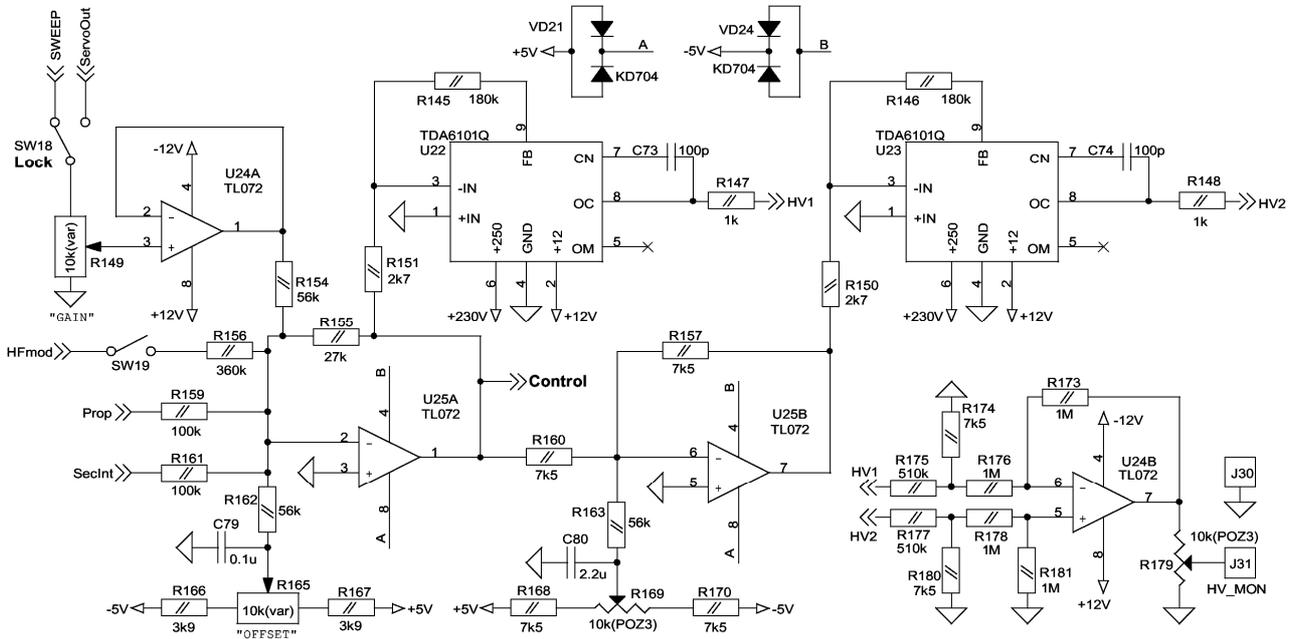


Рис.10. Высоковольтный усилитель.

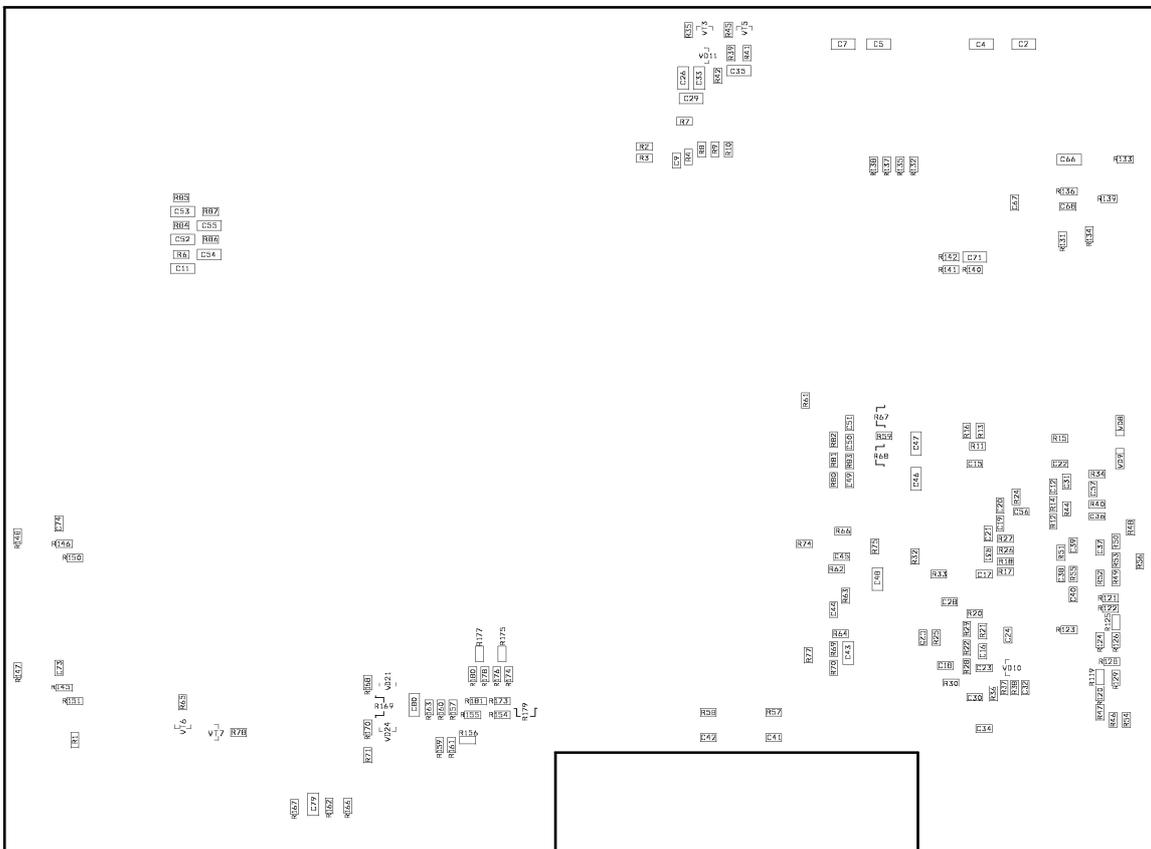
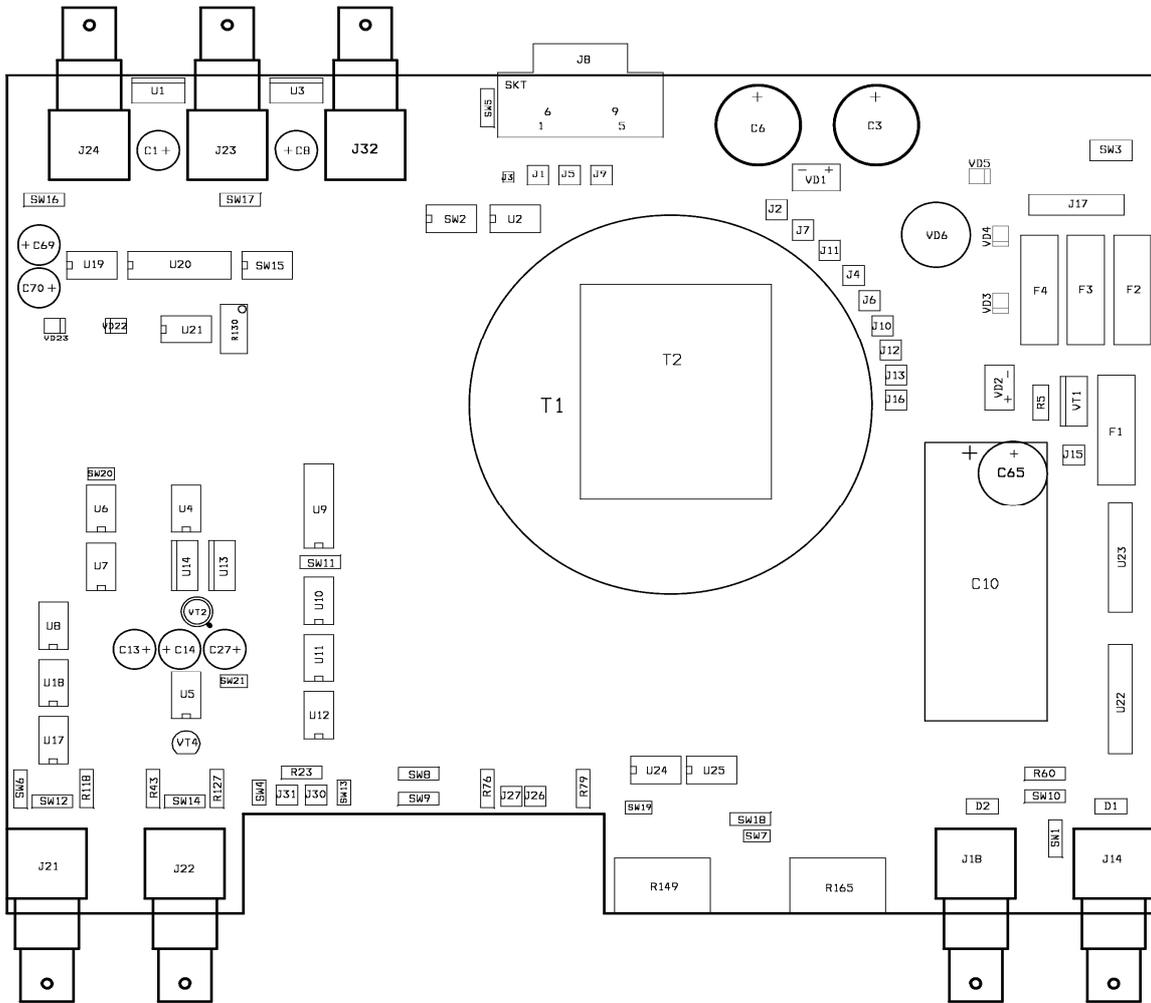


Рис.11. Монтажные платы.