

**Конфокальные сканирующие интерферометры
Фабри-Перо типа SCC-7500 и SCC-735.**

**Техническое описание
и инструкция по эксплуатации.**

Москва 2013 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.

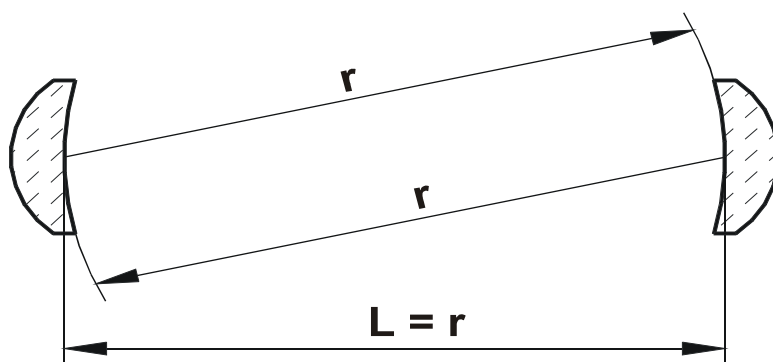


Рис.1. Кривизна и взаимное расположение зеркал в конфокальной схеме.

Эти обстоятельства и обусловили выбор конфокальной схемы для сканирующего интерферометра SCC, 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

интерferирует 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 $4r = 4L$.

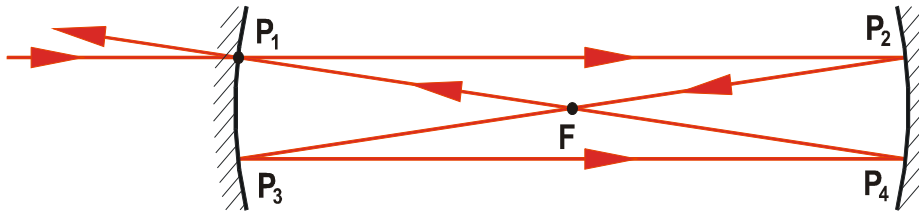


Рис.2. Траектории лучей в конфокальном интерферометре в приближении геометрической оптики.

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 с базой 10 мм имеет $FSR=7,5$ ГГц, с базой 102 мм – $FSR=735$ 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. Оба возможных типа пространственного согласования лазерного пучка с модами интерферометра продемонстрированы для SCC-7500 на рисунках 3а и 3б. Спектр мод интерферометра SCC-735 показан на рисунке 4.

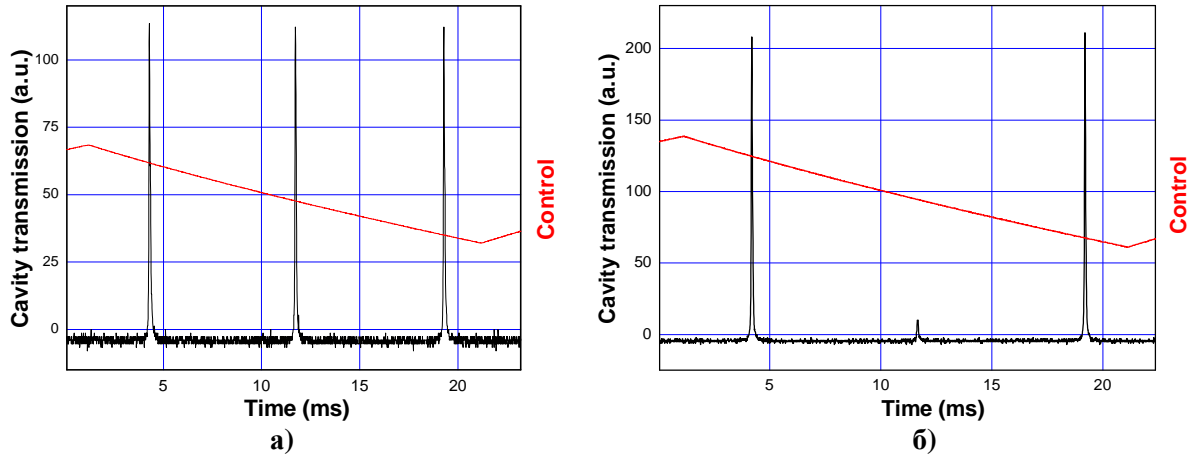


Рис.3. Спектр мод интерферометра SCC-7500:

а) при возбуждении мод с четными и нечетными индексами, б) при преимущественном возбуждении мод с нечетными индексами (четные моды в середине перестроющего диапазона сильно подавлены). Красным цветом указан сигнал управления, подаваемый на вход высоковольтного усилителя и задающий закон, по которому сканируется подвижное зеркало интерферометра.

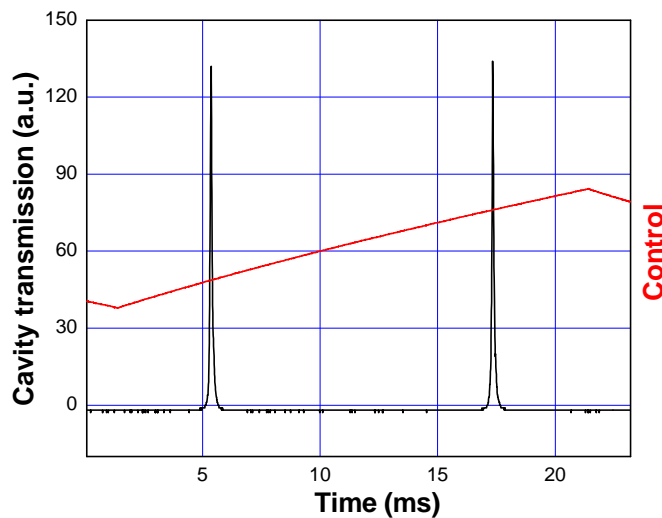


Рис.4. Спектр мод интерферометра SCC-735:

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

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

Для случая плоского интерферометра Фабри-Перо резкость следующим образом

связана с коэффициентом отражения зеркал:

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

где R – коэффициент отражения зеркал.

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

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

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

Резкость SCC-7500 и SCC-735 была измерена с помощью инжекционного лазера с внешним резонатором, имеющего ширину линии не более 1МГц, и составила 120 и 180 соответственно на длине волны 852 нм. Зеркала интерферометров имеют коэффициент отражения около 99,5%, что должно было бы обеспечить резкость около 300. Расхождения между измеренными и расчетными величинами следует отнести к недостаточно хорошему пространственному согласованию лазерного пучка с модами интерферометров, погрешности в определении коэффициента отражения, а также рассеянию 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) w_0 зависит от длины волны излучения λ и радиуса зеркал r и связан с ними следующим соотношением:

$$w_0 = \sqrt{\frac{1}{2} \frac{r}{p}}. \quad (6)$$

Для длины волны 852 нм и радиуса зеркал 10 мм диаметр перетяжки $2w_0$ составляет около 70 мкм.

Наиболее распространенным способом пространственного согласования лазерного излучения и моды интерферометра является использование согласующей линзы. Точный выбор фокального расстояния этой линзы зависит от радиуса кривизны зеркал интерферометра и диаметра лазерного пучка. Однако вполне удовлетворительное пространственное согласование можно получить, руководствуясь простым правилом: фокус линзы должен быть порядка длины интерферометра.

В таблице 1 представлены основные технические параметры интерферометров SCC-7500 и SCC-735.

	SCC-7500	SCC-735
Рабочий диапазон длин волн	760-870 нм	800-900 нм
База интерферометра	10 мм	102 мм
Область свободной дисперсии	7500 МГц	735 МГц
Резкость	>100	>150
Аппаратная ширина	60 МГц	5 МГц
Диапазон смещения подвижного зеркала	1,2 мкм	1,2 мкм
Чувствительность смещения по напряжению	4 нм/В	4 нм/В
Сдвиг частоты собственной моды от напряжения	150 МГц/В	15 МГц/В

Таблица 1. Основные технические параметры интерферометров SCC-7500 и SCC-735.

3. Устройство и работа прибора.

3.1. Оптическая часть. Общий вид оптической части установки для определения спектрального состава или измерения ширины линии генерации (ШЛГ) лазера показан на рисунке 5. На нем цифрами указаны основные узлы установки: конфокальный сканирующий интерферометр SCC (1) со своим разъемом питания (2), оптический изолятор на эффекте Фарадея (3), диафрагма (4), ромб Френеля (5), поворотные зеркала в оправках (6). В случае отсутствия в интерферометре встроенного фотоприемника за его выходным зеркалом следует расположить внешний фотоприемник.

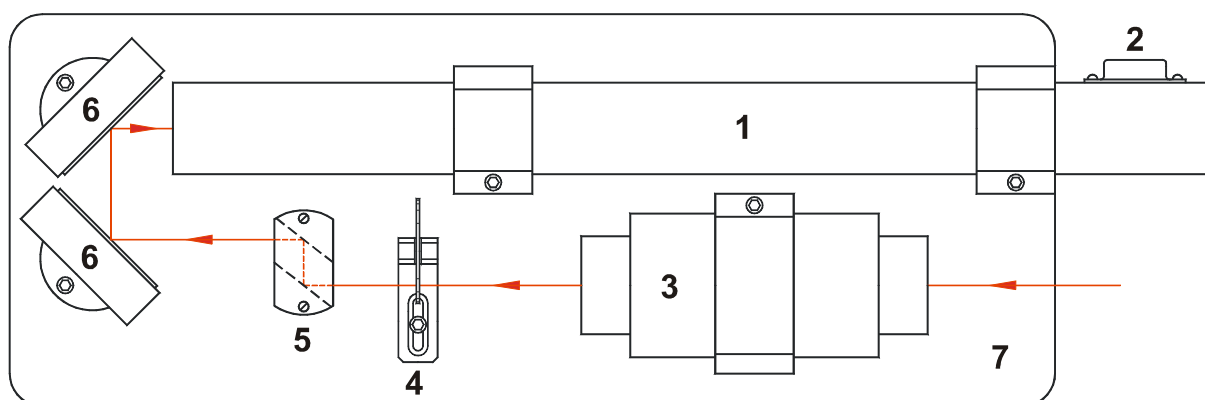


Рис.5. Вид сверху на установку по измерению ширины линии генерации лазера.

1 – конфокальный сканирующий интерферометр SCC, 2 – выходной разъем SCC, 3 – фарадеевский оптический изолятор, 4 – диафрагма, 5 – ромб Френеля, 6 – металлические поворотные зеркала.

Принцип работы установки по измерению ширины линии генерации заключается в следующем. Луч анализируемого излучения (на рис.5 его направление указано стрелками) посылается на интерферометр вдоль его оптической оси. Часть излучения, прошедшая через интерферометр, регистрируется фотоприемником. Положение одного из зеркал (рис.6, позиции 1, 2) модулируется пьезокерамикой (рис.6, поз.3), варьируя тем самым базу интерферометра. Напряжение на пьезокерамике меняется линейно, поэтому линейно меняются и база интерферометра, и частота его собственных мод.

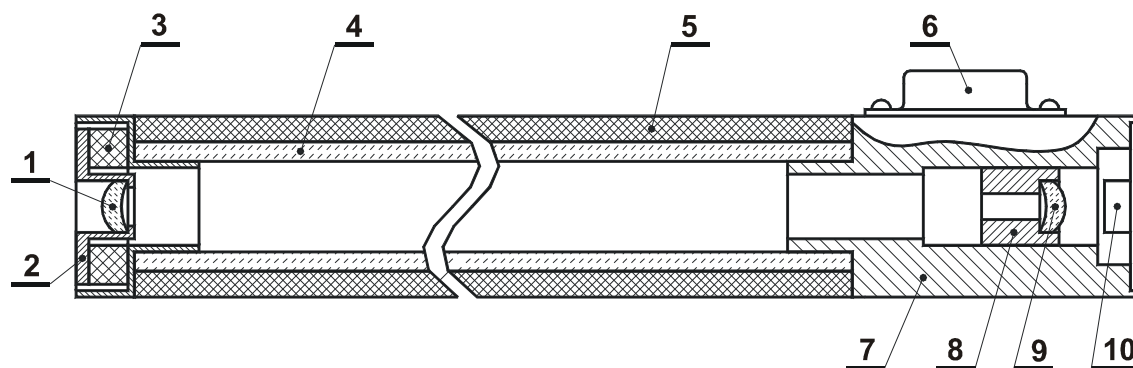


Рис.6. Устройство конфокального сканирующего интерферометра SCC.

1 – сканируемое зеркало, 2 – оправа сканируемого зеркала, 3 – пьезокерамика, 4 – кварцевый промежуток, 5 – теплоизолирующая рубашка, 6 – разъем, 7 – корпус, 8 – оправа юстируемого зеркала, 9 – юстируемое зеркало, 10 – фотоприемник.

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 (рисунки 3, 4, 7). Форма отдельного резонанса является сверткой аппаратной функции интерферометра и 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 ШЛГ необходимо включать оптическую развязку со степенью изоляции не хуже 35 дБ, которая обеспечивается оптическим изолятором на эффекте Фарадея. Принцип его работы основан на том, что плоскость поляризации линейно поляризованного света при прохождении через магнитооптический кристалл, помещенный в магнитное поле, поворачивается в одном и

том же направлении и на один и тот же угол независимо от направления распространения света. Если длина магнитооптического кристалла и величина магнитного поля выбраны так, что плоскость поляризации света за один проход через изолятор поворачивается на 45° , то при проходе в противоположном направлении суммарный угол поворота поляризации составит 90° , и обратный луч может быть блокирован поляризатором. В оптическом изоляторе используются два поляризатора: входной поляризатор отсекает отраженную волну, а выходной обеспечивает эффективную изоляцию, даже если поляризация отраженной волны отличается от линейной.

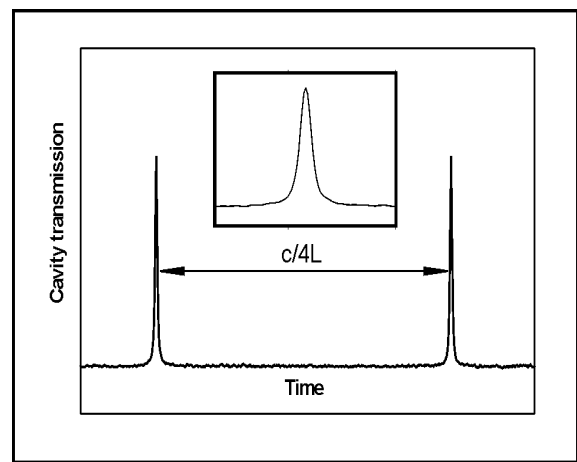


Рис.7. Внешний вид интерферометра SCC-7500, типичные резонансы пропускания сканирующего интерферометра SCC и форма отдельного резонанса (на врезке).

При работе с инжекционными лазерами указанной выше степени изоляции часто оказывается недостаточно, поэтому в установку может быть включена вторая ступень изоляции, которая обеспечивает дополнительно не менее 10 дБ. Ее образуют выходной поляризатор первой ступени и ромб Френеля (рис.5, поз.5). Плоскость поляризации излучения на выходе оптического изолятора ориентирована по отношению к ромбу Френеля таким образом, что он исполняет роль четвертьволновой фазовой пластинки, т.е. излучение после его прохождения оказывается поляризованным по кругу. Отраженная от интерферометра волна, проходя ромб Френеля в обратном направлении, становится вновь линейно поляризованной, но с ортогональной ориентацией плоскости поляризации по отношению к прямой волне, и блокируется выходным поляризатором изолятора на эффекте Фарадея. Недостатком такого способа борьбы с отражениями является его повышенная чувствительность к тому, насколько хорошо в отраженной волне сохраняется циркулярная поляризация. По этой причине в установке допускается

использование только металлических зеркал (рис.5, поз.6), которые меньше диэлектрических нарушают поляризацию.

Внешняя диафрагма (рис.5, поз.4) позволяет упростить за счет пространственной фильтрации лазерного излучения его согласование с модой интерферометра. Оптимальным следует считать тот размер диафрагмы, при переходе от которого к меньшему уже не происходит дополнительного сужения резонанса пропускания.

3.2. Блок управления. Работа сканирующего интерферометра обеспечивается блоком управления, в котором формируется высокое напряжение для питания пьезокерамики. 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 – 110 В. **Только один плавкий предохранитель номиналом 0,5 А может быть установлен в соответствующее гнездо!** Еще один плавкий предохранитель (F1, см. монтажную схему) номиналом 160 мА установлен для защиты высоковольтного стабилизатора от замыкания.

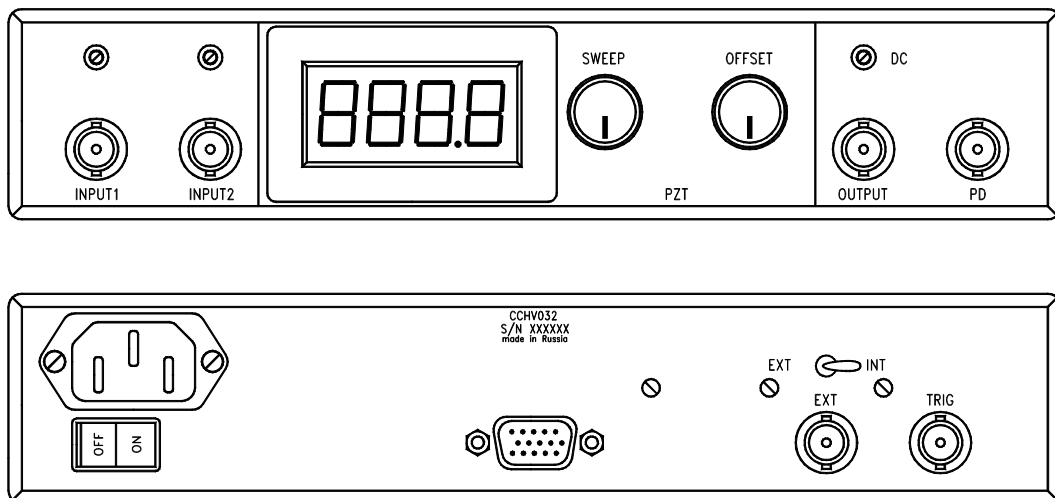


Рис.8. Вид спереди и сзади блока управления.

Вид лицевой и задней панелей прибора показан на рисунке 8. Лицевая панель разделена на несколько функциональных зон. Левая зона входных сигналов содержит два разъема BNC (INPUT1, INPUT2) и два регулировочных резистора, которые позволяют подстраивать амплитуды входных сигналов. Результат вычитания этих сигналов выведен на разъем DIFFER. в правой зоне выходных сигналов. Там же расположен триммер DC, позволяющий менять средний уровень разностного сигнала.

В зоне PZT 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 190 В.

Высоковольтный усилитель имеет два выхода (HV1 и HV2 разъема DRB-9F), противоположных по фазе выходного сигнала, что позволяет при подключении к ним пьезокерамики получать на ней переменный сигнал удвоенной амплитуды: от -190 В до $+190$ В. Максимальная перестройка пьезокерамики достигается при среднем положении рукоятки OFFSET. Показания среднего значения напряжения на пьезокерамике отображаются в вольтах на LCD дисплее в зоне PZT.

Рядом с выходом OUTPUT также расположен выход PD преобразователя фототока в напряжение (используется при наличии в интерферометре встроенного фотоприемника).

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 EXT-INT, расположенным на задней панели электронного блока. В этом случае переключатель устанавливается в положение EXT (external – внешний), а сигнал внешнего управления подается на расположенный рядом разъем EXT.

Кроме того, на задней панели блока управления установлены выключатель питания, сетевой разъем, разъем подключения сканирующего интерферометра (DRB-9F) и выход синхронизации (TRIG). Сигнал треугольной формы с выхода TRIG имеет размах около $10V_{p-p}$ и может быть использован для управления или синхронизации внешних устройств (например, осциллографа или другого высоковольтного усилителя). Все электрические соединения между блоком управления и оптической частью установки должны быть выполнены независимо экранированными проводами.

4. Общие указания по эксплуатации.

Конфокальный интерферометр является точным 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 зеркалах,
- не допускается разборка SCC,
- не допускается подключение SCC 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 200 вольт.

5. Подготовка к работе.

Для измерения ширины линии генерации лазера кроме оптической части и блока управления также требуется осциллограф с полосой регистрации 10 МГц. Предпочтительнее, если осциллограф будет запоминающим, т.к. это упрощает отсчет измеряемых интервалов.

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

Выход внешнего фотоприемника соединяется с сигнальным входом 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 и блок управления, нужно вставлять в разъем интерферометра мягко, избегая перекосов и сильного давления, придерживая одной рукой корпус интерферометра. Нельзя допустить деформации корпуса (рис.6, поз.7)

относительно кварцевого промежутка (рис.6, поз.4), т.к. это может привести к поломке последнего.

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.7). 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. 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 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 4) составил 12 мс, т.е. область свободной дисперсии соответствует интервалу 12 мс.

Производим отсчет интервала, соответствующего полуширине резонанса. Для большей точности переходим к меньшим временам регистрации (как на врезке к рисунку 7). Полуширина отдельного резонанса составила 80 мкс.

В результате:

$$\text{ШЛГ} = 735 \text{ МГц} \times \frac{0,08 \text{ мс}}{12 \text{ мс}} = 4,9 \text{ МГц} .$$

После измерения полуширины наблюдаемого резонанса, следует внести поправку на аппаратную ширину интерферометра. В нашем примере ширина линии генерации лазера оказывается существенно меньше аппаратной ширины анализатора.

7. Поверка прибора.

При правильной эксплуатации и отсутствии внешних механических воздействий (удары, вибрация, температурная деформация) прибор способен работать долго и без поверки. Однако при подозрении на необходимость поверки 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 $\pm 190\text{В}$). Во время измерений осциллограф **не должен быть заземлен**, поэтому требуется соблюдение всех мер техники безопасности.

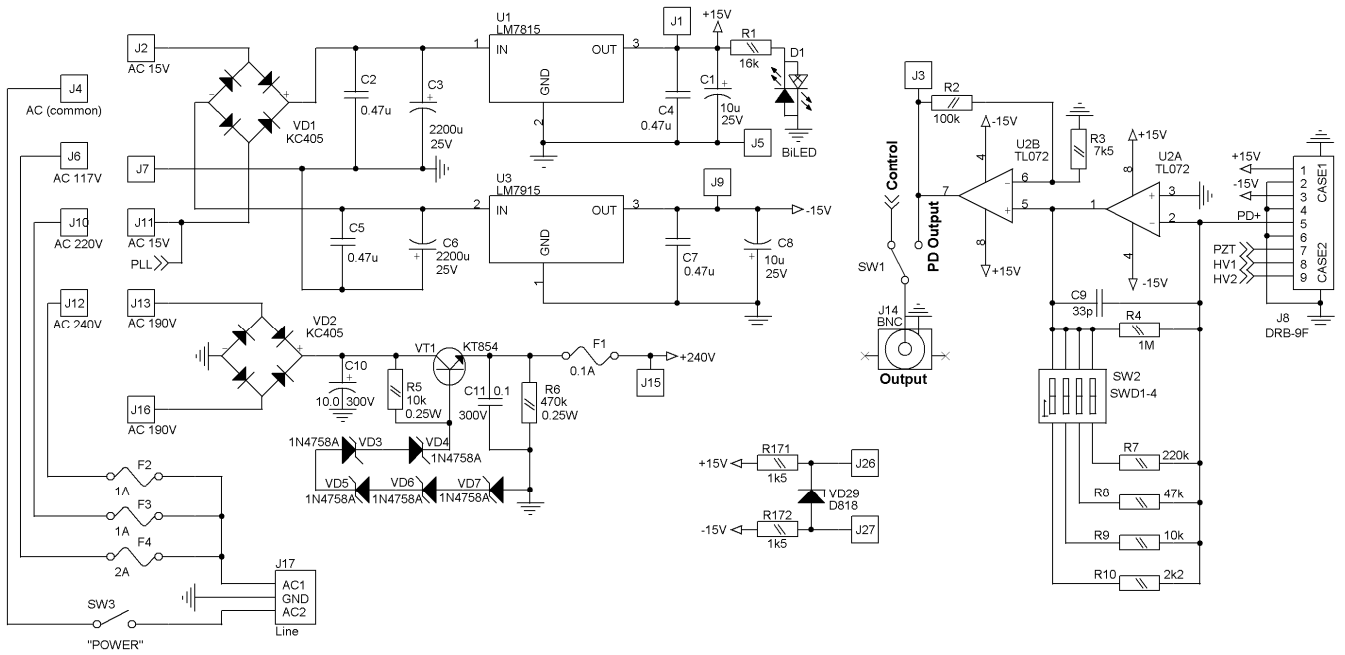
2. Внешним источником лазерного излучения с шириной линии генерации не более 1МГц произвести измерение ширин резонансов пропускания SCC по описанной выше методике. Если ширины резонансов соответствуют спецификации, то прибор работоспособен. Если разрешение оказалось хуже, прибор должен быть возвращен для дальнейшего тестирования производителю.

8. Характерные неисправности и методы их устранения.

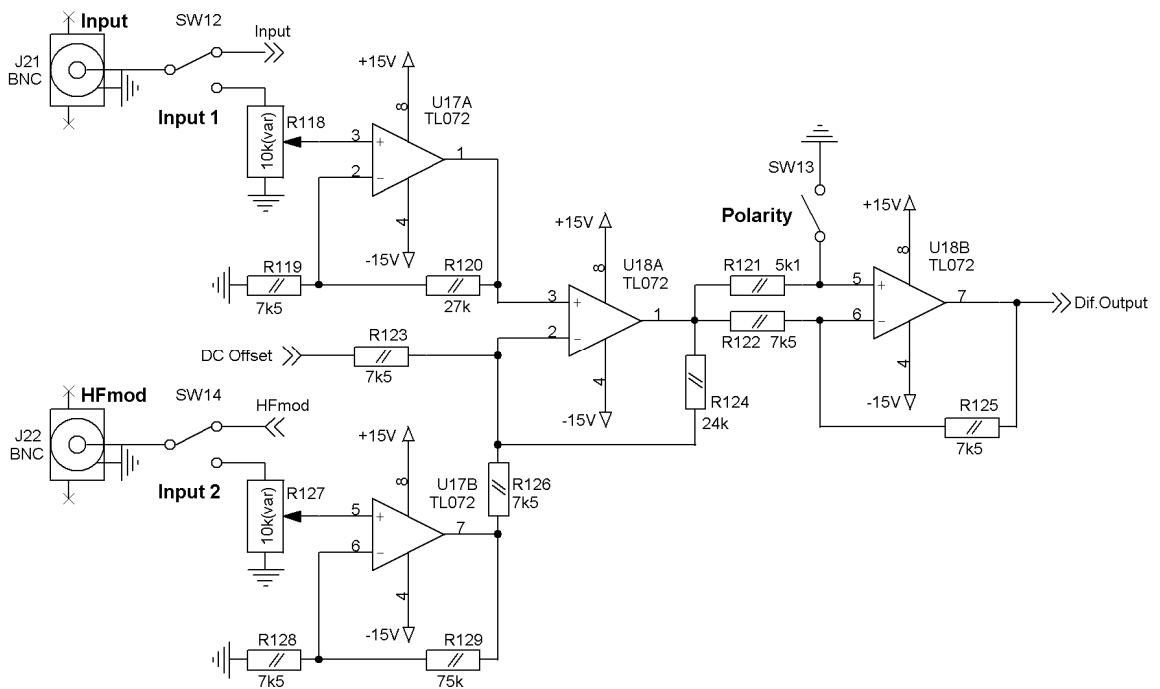
	Характер неисправности	Причина неисправности	Способ устранения
1	При включении блока управления нет индикации на LCD дисплее.	Сгорел сетевой предохранитель.	Заменить предохранитель.

2	Осциллограф подключен к выходу TRIG, но не синхронизируется.	Переключатель EXT-INT установлен в положение EXT.	Переключатель EXT-INT установить в положение INT.
3	LCD дисплей работает, но пьезокерамика не сканируется.	Переключатель EXT-INT установлен в положение EXT.	Переключатель EXT-INT установить в положение INT.
4	LCD 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 (TDA6101Q).	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 PD (выходе внешнего фотоприемника) слабый, неконтрастный, с большой постоянной подставкой.	Исследуемый лазер имеет многомодовую структуру.	Выбраковать лазер по степени одночастотности.

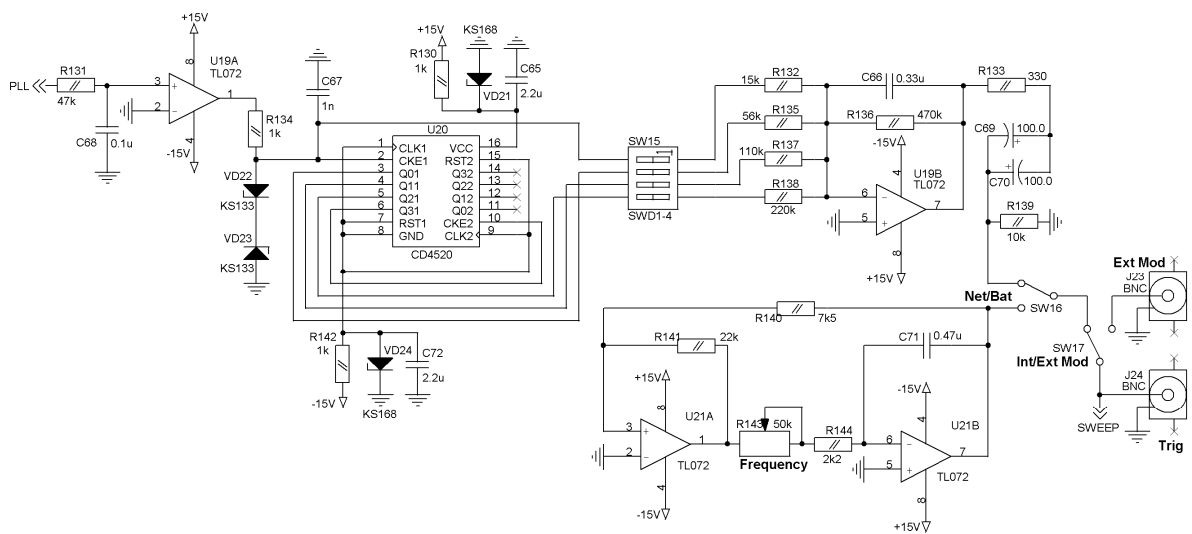
Приложение: принципиальные электрические и монтажные схемы узлов блока управления.



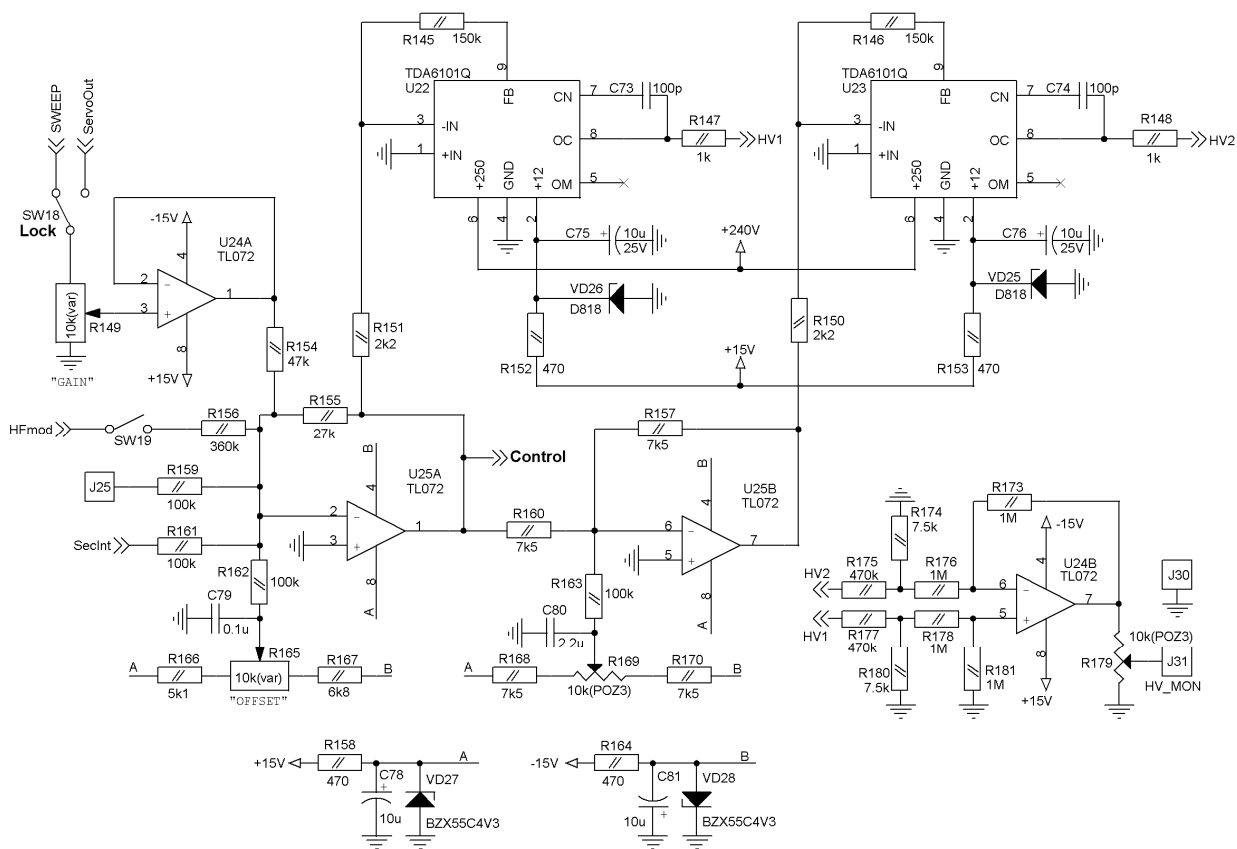
Источник питающих напряжений и трансимпедансный усилитель.



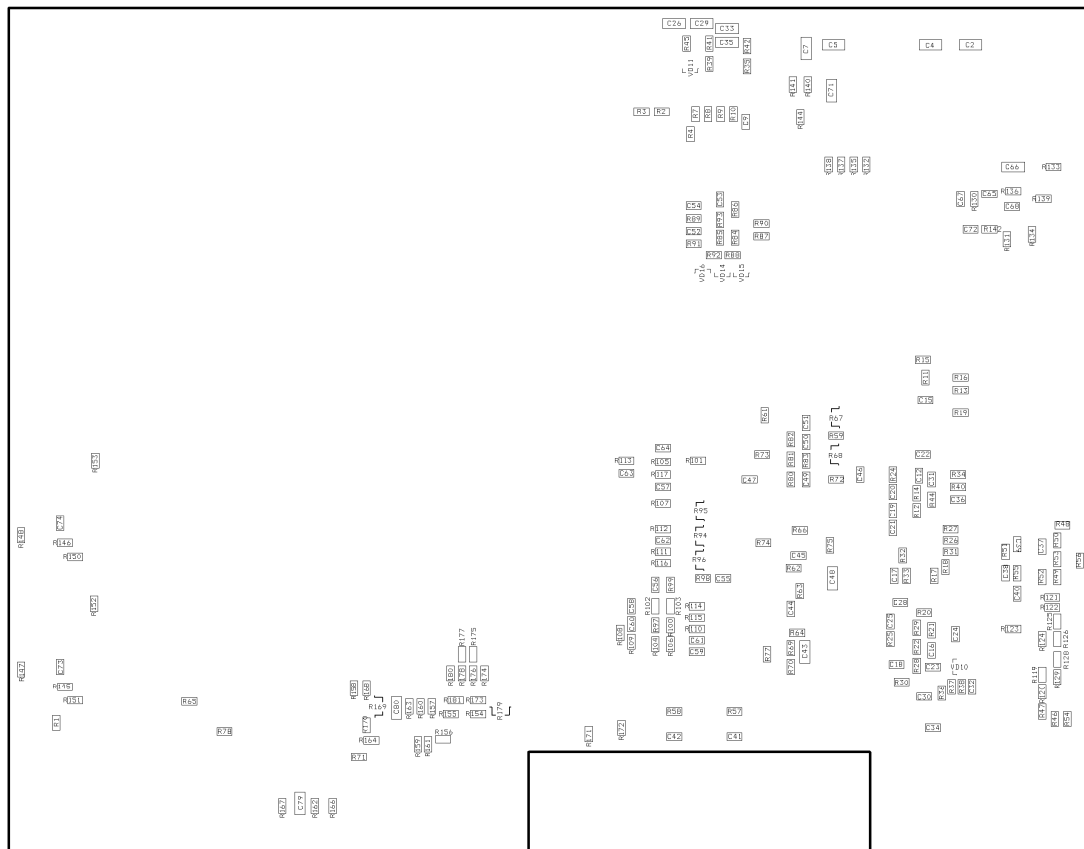
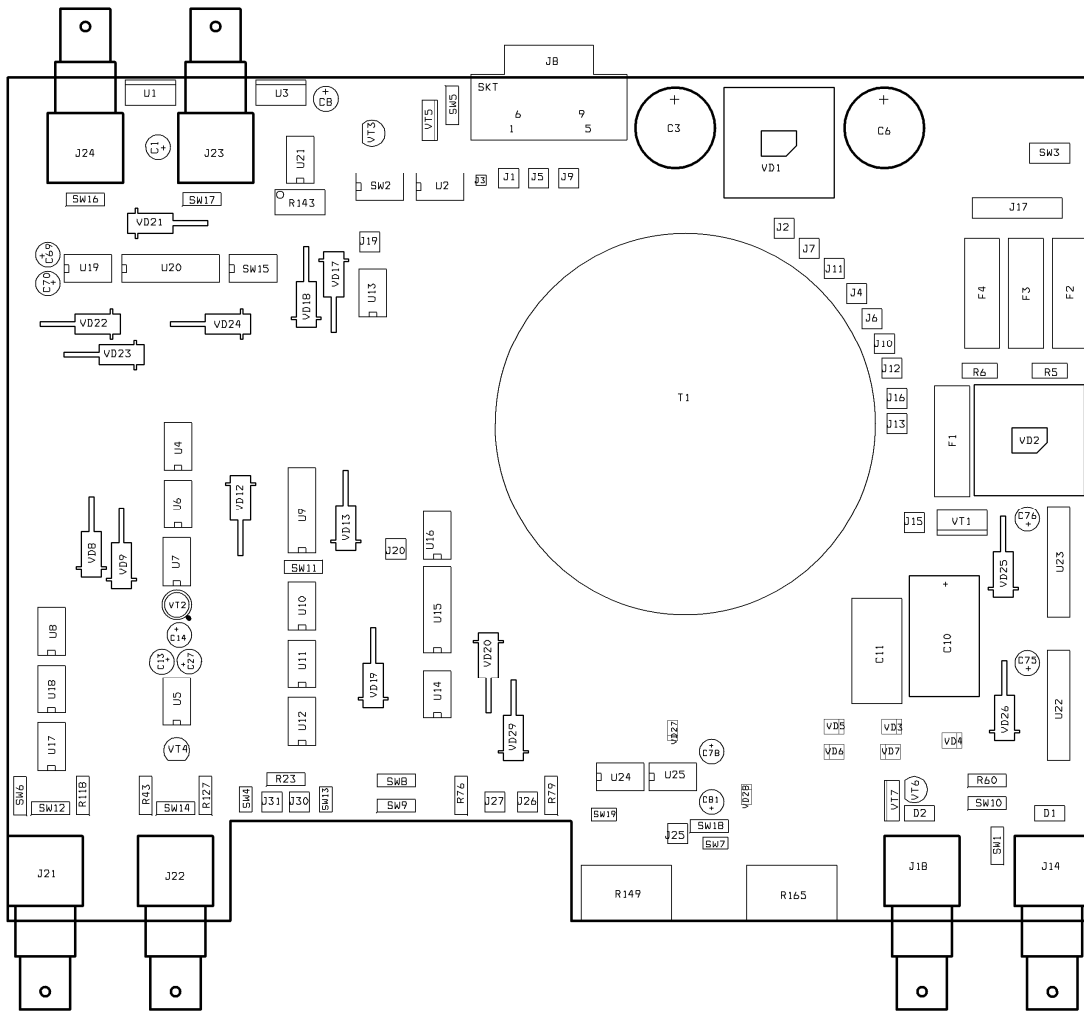
Дифференциальный усилитель.



Генератор сканирования.



Высоковольтный усилитель.



Печатная плата со стороны монтажа и проводников.