

Техническое описание и руководство по эксплуатации лазерного спектрометра D2RbLS (#062166)

Лазерный спектрометр D2RbLS с возможностью привязки частоты лазера к резонансам насыщенного поглощения, формируемым в ячейке с парами изотопов рубидия, предназначен для генерации высококогерентного и высокостабильного оптического излучения на длине волны 780,2 нм и используется в спектроскопии и магнитометрии для накачки и детектирования атомов рубидия.

Спектрометр состоит из нескольких функциональных узлов (Рис.1), которые смонтированы на общей оптической плите. Источником оптического излучения является диодный лазер с внешним резонатором (поз.1) ECDL-7820R (S/N 062166). Небольшая

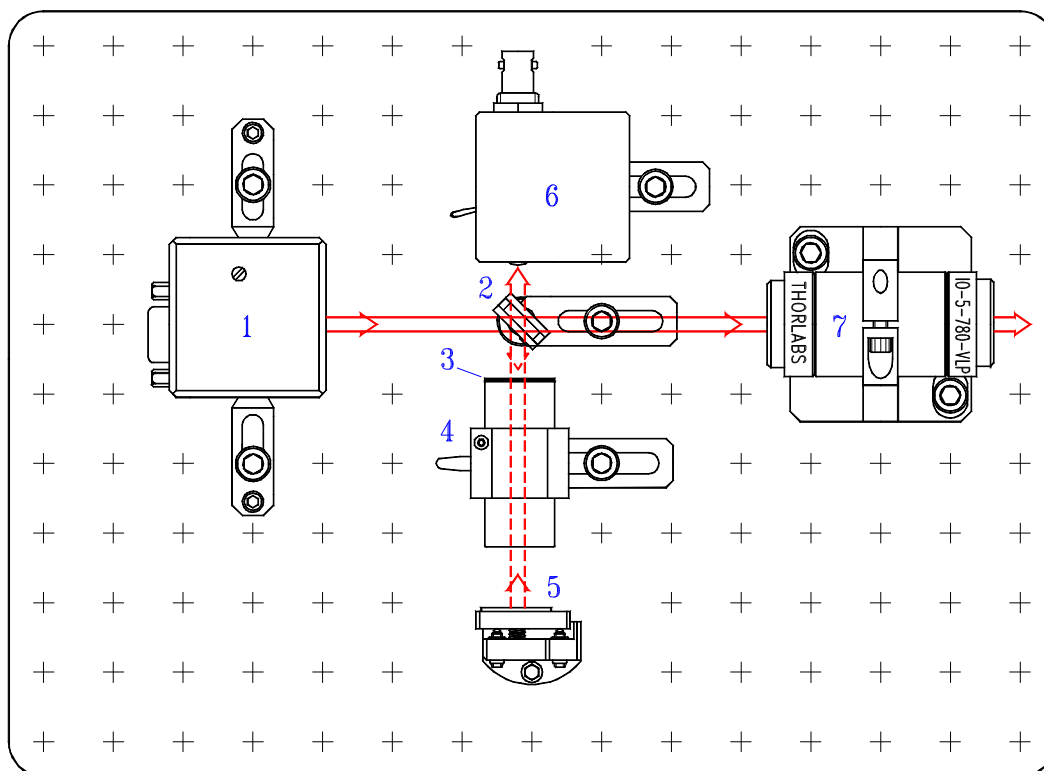


Рис.1. Лазерный спектрометр D2RbLS. 1 – ECDL-7820R; 2 – делительное зеркало; 3 – ослабитель интенсивности; 4 – ячейка с парами естественной смеси изотопов рубидия; 5 – глухое зеркало в юстировочной оправе; 6 – фотоприемник; 7 – оптический изолятор.

часть излучения (менее 10%) отводится делительным зеркалом (поз.2) в ячейку с парами естественной смеси изотопов рубидия (поз.4). Чтобы избежать искажения формы линий поглощения вследствие оптической накачки, интенсивность в ячейке понижается пленочным поляризатором (поз.3), укрепленным на ее входном окошке. Глухое зеркало в юстировочной оправе (поз.5) создает стоячую волну в ячейке и тем самым обеспечивает регистрацию резонансов насыщенного поглощения на фотоприемнике (поз.6). Выходной

фарадеевский изолятор (поз.7) предохраняет перестраиваемый лазер от внешнего паразитного оптического излучения. Лазер управляется собственным контроллером, привязка к атомной линии осуществляется с помощью блока стабилизации частоты LHV160 (S/N 072101).

ECDL-7820R (S/N 062166)

Диодный лазер с внешним резонатором ECDL-7820R является источником перестраиваемого высококогерентного излучения в ближней ИК области оптического спектра. Центральная длина волны рабочего диапазона равна 780.2 нм. При этом возможна ее отстройка на 2 нм, как в коротковолновую, так и в длинноволновую сторону. Лазер может использоваться в метрологии, спектроскопии, интерферометрии.

ECDL-7820R состоит из оптической головки и электронного блока управления, которые соединяются кабелем VGA типа. Стандартная длина кабеля составляет 1,8 м. Блок управления должен подключаться к сети переменного напряжения через розетку, имеющую контакт **независимого заземления**. Оптическая головка при правильном подключении заземлена.

Оптическая головка

В состав оптической головки (Рис.2) входят:

хладопровод (поз.2) с установленным в нем единым модулем (поз.3) просветленного лазерного диода Sanyo DL7140-201S и коллимирующего объектива ($N_A = 0.6$; $f = 4.02$ мм; выходная апертура – 4.8 мм);

два термоэлектрических микрохолодильника (элементы Пельтье);

два термодатчика (термисторы 10 кОм), установленных в хладопроводе и корпусе оптической головки;

дифракционная решетка (поз.4), укрепленная на подвижном рычаге (поз.9);

пьезоэлемент (поз.7), приводящий рычаг в движение.

Корпус лазера (поз.1) служит в качестве каркаса для всех оптических и механических компонентов ECDL. Два контура термостабилизации поддерживают неизменными температуры, как хладопровода, так и всего корпуса оптической головки (поз.1), независимо друг от друга и таким образом, что корпус головки служит в качестве радиатора для внутреннего контура термостабилизации, а основание оптической головки является радиатором для внешнего контура термостабилизации. Основание оптической головки имеет с боков продольные пазы для ее установки на оптический стол. Следует применять такой монтаж оптической головки, при котором обеспечивается хороший

теплоотвод от ее основания. Пластиковая крышка защищает ECDL от пыли, тепловых и акустических возмущений.

Оптический резонатор перестраиваемого лазера формируется задней гранью лазерного диода, имеющей высокий коэффициент отражения (~99%), и дифракционной решеткой (1800 мм^{-1}), установленной в автоколлимационной схеме (схема Литтрова). Решетка укреплена на горизонтальном валу, положение которого и определяет требуемое направление дифракции лазерного пучка. Пьезоэлемент, толкающий рычаг с дифракционной решеткой, изменяет одновременно и угол падения луча на решетку, и длину резонатора. Это позволяет расширить диапазон непрерывной перестройки частоты излучения. Подстроечный прецизионный винт (поз.6) обеспечивает грубую перестройку лазерной длины волны.

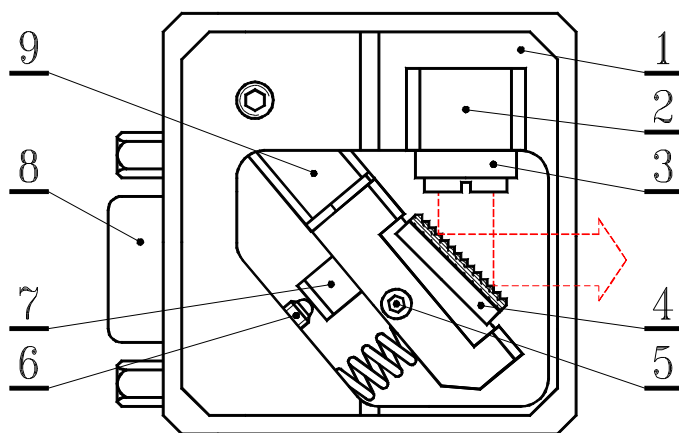


Рис.2. Оптическая головка (вид сверху при снятой крышке). 1 – корпус оптической головки; 2 – хладагент лазерного диода; 3 – единый модуль лазерного диода и коллимирующего объектива; 4 – дифракционная решетка, укрепленная на горизонтальном валу; 5 – вертикальный фиксирующий винт M2; 6 – горизонтальный юстировочный винт M3x0,25; 7 – пьезоэлемент; 8 – разъем DHS-15F; 9 – подвижный рычаг.

Точное пространственное согласование падающей на решетку и дифрагированной волн критически важно для получения высокой когерентности и значительной мощности в выходном излучении лазера. ECDL-7820R не имеет штатных регулировок для настройки взаимного положения лазерного диода и коллимирующего объектива, а также для юстировки лазерного пучка в вертикальном направлении. Эти важные установки требуют серьезного навыка и выполнены предварительно на сборочном стенде. В случае повреждения или деградации лазерного диода модуль диода и коллимирующего объектива должен заменяться целиком.

В отличие от юстировки коллимирующего объектива небольшая подстройка лазерного луча в вертикальной плоскости возможна и после демонтажа оптической головки со сборочного стенда. Горизонтальная ось (горизонтальный вал) дифракционной

решетки установлена в цанговом зажиме. Цанговый зажим фиксируется или отпускается, когда вертикальный винт (поз.5) закручивается или выкручивается соответственно. Слегка асимметричный захват цанги приводит к проворачиванию горизонтального вала при закручивании винта 5 (Рис.2). Закручивание фиксирующего винта приводит к смещению лазерного луча вверх, выкручивание смещает луч вниз. **Не следует вращать фиксирующий винт более чем на четверть оборота!** В противном случае он может быть поврежден, или горизонтальный вал будет полностью ослаблен.

Если требуется значительное смещение лазерного луча в вертикальной плоскости, то следует воспользоваться П-образным шлицевым ключом из ремонтного комплекта (Рис.8). Для установки данного ключа в торце горизонтального вала имеется шлицевой паз с резьбовым отверстием М1,6. При отпущенном фиксирующем винте 5 горизонтальный вал вращается свободно. После установки вала в требуемое положение он может быть вновь зажат с учетом упомянутого выше вращения вала при затяжке фиксирующего винта.

Как правило, выходной пучок лазера астигматичен. Это связано и с его эллиптичностью, и с типом волновода структуры LD. Поэтому иногда наиболее эффективная оптическая обратная связь достигается при слегка сходящемся пучке, т.е. незначительная сходимость ($\sim 2 \times 10^{-3}$) лазерного пучка не означает неправильной юстировки коллиматора ECDL.

Блок управления

Блок управления (ULDC2006D – a universal laser diode controller with dual thermostabilization) устанавливает ток и температуру лазерного диода, температуру корпуса лазера и длину внешней части лазерного резонатора с точностью, достаточной для достижения требуемых характеристик ECDL-7820R. ULDC2006D имеет два контура термостабилизации (LD и CASE) для независимого поддержания температур лазерного диода и корпуса оптической головки.

Аналоговый блок питания обеспечивает все напряжения, требуемые для работы электронных узлов: стабилизированные $\pm 15\text{В}$, $+70\text{В}$, $\pm 5\text{В}$ и нестабилизированные $\pm 6\text{В}$. Под крышкой блока управления рядом с сетевым разъемом расположены три гнезда для плавких сетевых предохранителей. Одно гнездо соответствует переменному напряжению силовой сети 240В, другое – напряжению 220В, третье – напряжению 117В. **Единственный предохранитель номиналом 1А должен быть установлен в соответствующее гнездо!** Дополнительный предохранитель в 100 мА (F1 на Рис.9) защищает выход высоковольтного блока питания от случайного замыкания. Для того

чтобы снять крышку блока управления, следует выкрутить четыре винта с его верхней стороны.

Передняя панель блока управления разделена на несколько функциональных зон, отражающих работу источника тока (CURRENT), контроллеров температуры (THERMO), высоковольтного усилителя (PZT) и шунта лазерного диода (LD) (Рис.3).

В зоне CURRENT расположены цифровой индикатор, рукоятки установки уровня тока лазерного диода (LEVEL), амплитуды сканирования тока (SWEEP) и уровня ограничения тока (LIMIT). Белый светодиод, расположенный над рукояткой LEVEL, загорается при достижении уровня ограничения тока. Максимальное значение тока для ULDC2006D составляет 195 мА. Полный размах сканирования тока составляет четверть от максимального значения тока (~50 мА).

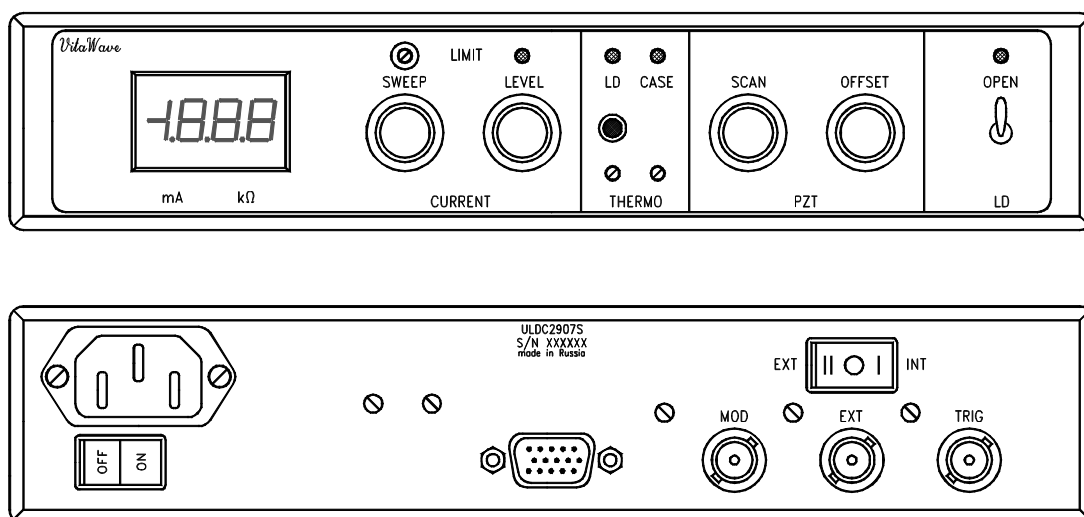


Рис.3. Вид спереди и сзади на блок управления.

Встроенный генератор треугольного сигнала может модулировать ток лазерного диода на сетевой частоте f и ее субгармониках $f/2$, $f/4$, $f/8$. Для установки частоты модуляции один из движков переключателя DIP-8 на печатной плате (SW5) должен быть установлен в положение ON. Принимая во внимание низкочастотный механический отклик лазерного резонатора, частота $f/2$ (т.е. 25 Гц для Европы и 30 Гц для США) предустановлена в ECDL-7820R. Для сканирования лазерной длины волны могут использоваться и более высокие частоты, если скорость сканирования важна, а дополнительными осцилляциями вблизи точек поворота направления сканирования можно пренебречь.

Поскольку треугольный сигнал управления током инжекции и напряжением PZT формируется из переменного напряжения силовой сети, то разность фаз этих двух

переменных сигналов постоянна. Это позволяет минимизировать влияние сетевых наводок при регистрации оптических и электрических сигналов.

Триммер ограничения тока (LIMIT) расположен над рукояткой SWEEP. Установка ограничения тока необходима для предотвращения деградации лазерного диода вследствие случайных перегрузок по току.

В зоне THERMO расположены два подстроечных сопротивления, устанавливающих температуру внутреннего (LD) и внешнего (CASE) контуров термостабилизации. Вращение по часовой стрелке приводит к увеличению температуры контролируемого объекта. Двухцветные светодиоды над триммерами отражают состояние соответствующей термостабилизации. Отсутствие какого-либо света в зоне THERMO свидетельствует об установлении требуемых температур лазерного диода или корпуса оптической головки. Зеленый цвет светодиода информирует об активном охлаждении соответствующего объекта, т.е. внешняя температура выше предустановленной для данного объекта. Красный цвет светодиода индицирует нагрев (внешняя температура ниже предустановленной). Светодиоды в зоне THERMO также горят красным, если оптическая головка разъединена с блоком управления.

Кнопка в зоне THERMO переключает цифровой дисплей из режима измерения тока лазерного диода в режим измерения величины сопротивления, задающего температуру лазерного диода. При нажатии на нее дисплей показывает значение данного сопротивления в килоомах.

В функциональной зоне PZT установлены рукоятки регулировки амплитуды переменного (SCAN) и постоянного (OFFSET) напряжения, подаваемого на пьезоэлемент. Сигнал модуляции, подаваемый на вход высоковольтного усилителя, подобен сигналу, подаваемому на вход источника тока. Относительная фаза этих сигналов выбрана таким образом, чтобы реализовать согласованные изменения тока лазерного диода и длины лазерного резонатора. Это позволяет расширить диапазон непрерывной перестройки частоты выходного излучения лазера. Максимальный размах сканирования пьезоэлемента составляет около 40 вольт. Наибольшая перестройка длины резонатора лазера достигается при полностью введенной рукоятке SCAN и положении рукоятки OFFSET вблизи среднего.

В зоне LD находятся тумблер размыкания шунта лазерного диода и индикатор состояния этого шунта. Рекомендуется держать лазерный диод закороченным (светодиод погашен) в момент включения блока управления и до установления стационарного состояния обоих контуров термостабилизации. Когда тумблер LD переводится в

состояние OPEN, светодиод загорается зеленым, и величина сопротивления, закорачивающего выводы лазерного диода, плавно изменяется с величины порядка 4 Ом до величины в десятки МОм, размыкая лазерный диод и защищая его от бросков тока в переходных процессах. Также шунт защищает от перегрузок лазерный диод при аварийном исчезновении любого из питающих источников тока напряжений ± 15 В.

На задней панели ULDC2006D установлены:

сетевой разъем с выключателем,
разъем подключения оптической головки к блоку управления (DHR-15M),
входной разъем для высокочастотной (до 50 кГц) модуляции тока (MOD),
входной разъем внешнего управляющего сигнала (EXT),
переключатель управляющих сигналов (EXT-INT) и
выходной разъем синхронизации (TRIG).

В положении INT переключателя управляющих сигналов на разъем TRIG подается треугольный сигнал размахом 8 В с выхода встроенного генератора, который может быть использован для синхронизации внешних устройств. Для того чтобы контролировать выходные параметры ECDL-7820R внешним сигналом, переключатель управляющих сигналов должен быть установлен в положение EXT. В этом случае выход встроенного генератора отсоединяется от входов источника тока и высоковольтного усилителя, на которые, как и на разъем TRIG, подается теперь внешний сигнал.

Сигнал с разъема MOD поступает на вход источника тока независимо от положения переключателя EXT-INT. Отклик в изменении тока по входу MOD в 20 раз меньше, чем по входу EXT.

Подготовка к работе ECDL-7820R

1. Соединить кабелем VGA типа оптическую головку и блок управления.
2. Проверить положение рукояток SWEEP и LEVEL. Они должны быть в крайнем левом положении.
3. Подсоединить сетевой шнур к **ЗАЗЕМЛЕННОЙ** розетке. Включить сетевой тумблер, расположенный на задней панели, и подождать до момента установления стационарного температурного режима лазерного диода и корпуса оптической головки (светодиоды в зоне THERMO должны погаснуть).
4. Разомкнуть выводы лазерного диода тумблером LD-OPEN и установить рекомендуемый уровень тока.

Выключение ECDL-7820R

1. Вывести обе рукоятки SWEEP и LEVEL до нуля (в крайнее левое положение).
2. Замкнуть выводы лазера тумблером LD-OPEN (рычажок вниз, индикатор состояния шунта погас).
3. Выключить блок управления сетевым тумблером.

Перестройка частоты ECDL-7820R

Механическая стабильность ECDL-7820R достаточно высока, чтобы сохранять выходные параметры лазера в течение недель. Так что регулировка тока инжекции лазерного диода и напряжения на пьезоэлементе является достаточным средством для точной настройки лазера на желаемую длину волны (например, длину волны атомного перехода). Однако ухудшение характеристик ECDL (увеличение порогового тока, уменьшение выходной мощности и диапазона перестройки частоты, слабое подавление боковых мод, возрастание амплитудного шума) может свидетельствовать о необходимости подъюстировки внешнего резонатора.

Следующие экспериментальные данные описывают работу ECDL-7820R и могут служить в качестве образцовых при его юстировке.

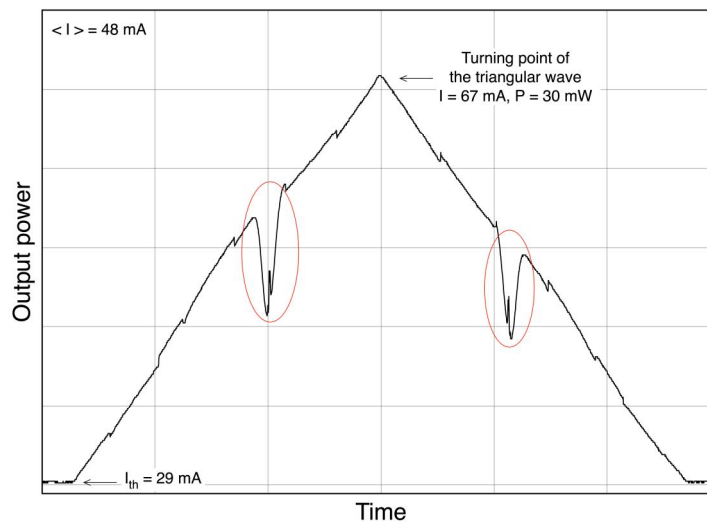


Рис.4. Зависимость выходной мощности лазера от тока инжекции. Ток лазерного диода модулируется симметричным треугольным сигналом. Зависимость снята при постоянном напряжении на пьезоэлементе. Красные эллипсы выделяют зоны поглощения лазерного излучения в парах Rb.

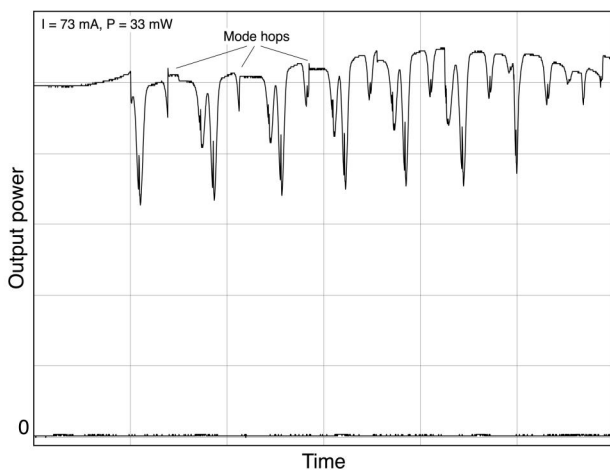
На рисунке 4 показана ватт-амперная характеристика (ВтАХ) ECDL-7820R, т.е. зависимость выходной мощности лазера от тока инжекции. При вращении решетки в плоскости дифракции происходит изменение взаимного расположения по частоте контура

селективности дифракционной решетки, мод лазерного диода (собственных мод) и мод ECDL (внешних мод). Такое изменение наглядно отражается в характере ватт-амперной характеристики, благодаря чему она служит удобным инструментом для выбора оптимального режима работы ECDL.

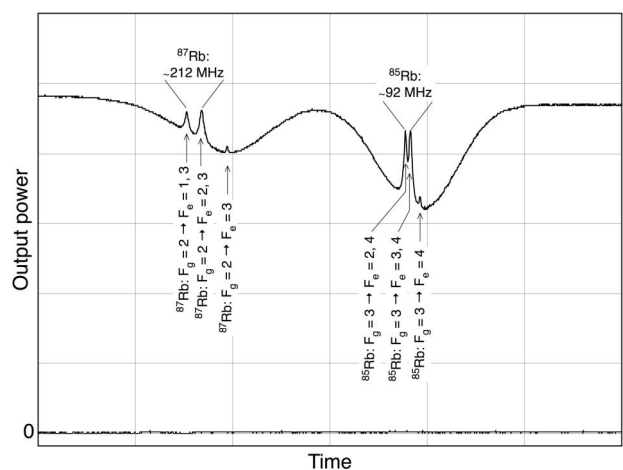
Встроенный генератор треугольного сигнала, по которому также синхронизируется развертка осциллографа, линейно во времени увеличивает и уменьшает ток лазерного диода, а соответствующее изменение выходной мощности лазера регистрируется фотоприемником. Практически горизонтальные участки в основании осциллограммы соответствуют допороговому режиму лазера. С появлением генерации выходная мощность, как правило, монотонно нарастает с ростом тока (исключая зоны переключений мод).

Изменение тока накачки лазерного диода вызывает соответствующие вариации температуры и показателя преломления усилительной среды, что ведет к изменению оптической длины диода и в целом длины резонатора ECDL. Регулярные резкие скачки на ВтАХ обусловлены переключениями частоты генерации по модам внешнего резонатора.

Ватт-амперная характеристика регистрируется при постоянном напряжении на пьезоэлементе (рукоятка SCAN установлена в крайнее левое положение), уровень которого может быть выбран таким, чтобы поглощение в рубидии было заметным (области, отмеченные красными эллипсами). При другом положении рукоятки OFFSET частота моды внешнего резонатора сдвигается и выходит из резонанса с атомным переходом.



а)



б)

Рис.5. Зависимость выходной мощности лазера на выходе из Rb ячейки (естественная смесь изотопов) от напряжения на пьезоэлементе. Напряжение меняется линейно со временем (показан только один склон модулирующего сигнала). Ток лазерного диода не меняется. Рис.5а соответствует полному размаху сканирования пьезоэлемента, на Рис.5б область сканирования уменьшена для более детального отражения структуры переходов в рубидии.

Следующие осциллограммы (Рис.5) зарегистрированы при постоянном токе лазерного диода и линейно изменяющемся со временем напряжении на пьезоэлементе. Амплитуда сканирования пьезоэлемента выбрана максимальной для рисунка 5а и уменьшена в несколько раз от максимальной для рисунка 5б. Осциллограммы соответствуют только одному склону модулирующего сигнала.

На кривой 5а хорошо видны скачки, связанные с перескоками мод внешнего резонатора, между которыми выходная частота лазера меняется на несколько ГГц (диапазон, соответствующий области свободной дисперсии ECDL). В области непрерывной перестройки частоты (Рис.5б) наблюдается линейное поглощение, соответствующее переходам $F_g=2 - F_e=1,2,3$ в ^{87}Rb и переходам $F_g=3 - F_e=2,3,4$ в ^{85}Rb , внутри которых стоячая волна формирует узкие нелинейные пики. Оценить интервалы частоты между пиками можно из схем сверхтонкой структуры D2 линии рубидия (Рис.6).

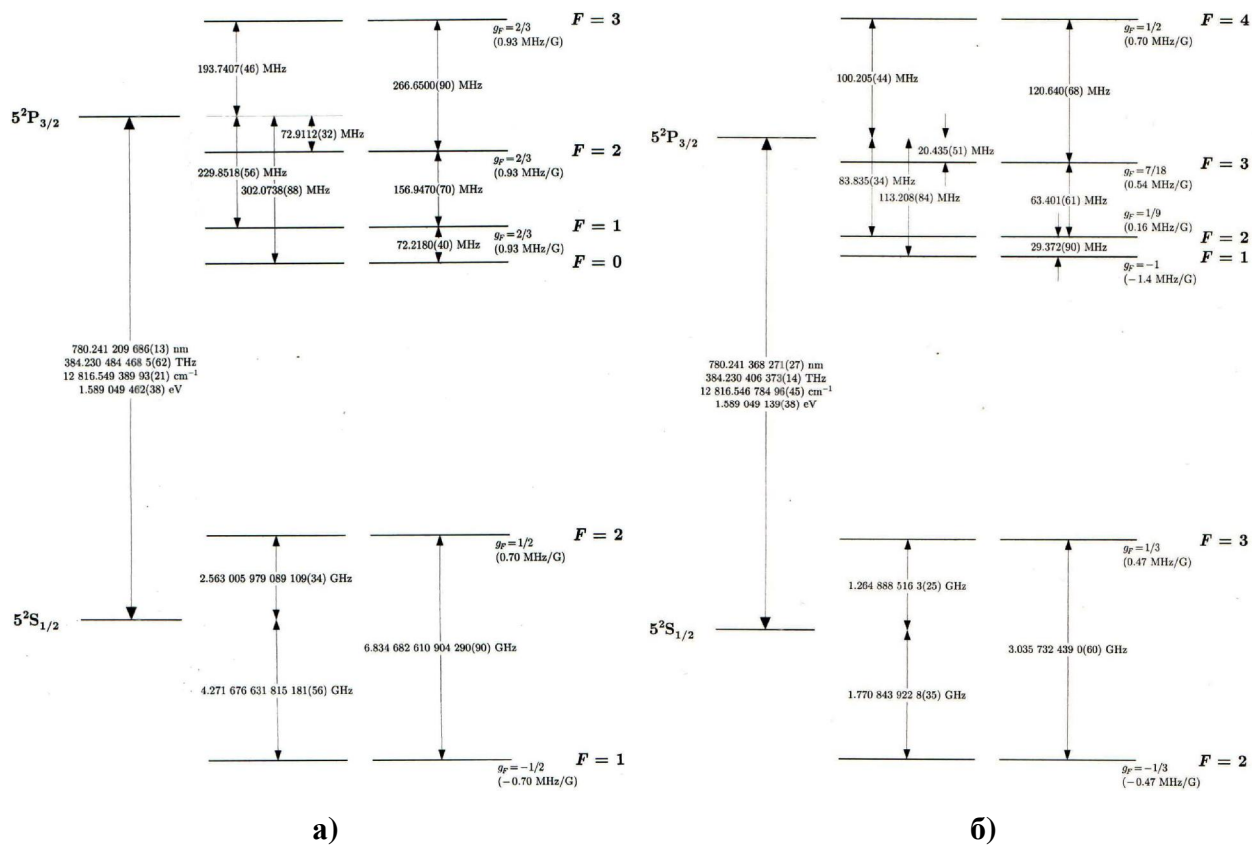


Рис.6. Схемы сверхтонкой структуры D2 линии ^{87}Rb (а) и ^{85}Rb (б) (D.Steck “Rubidium D Line Data”).

Нелинейные пики максимальной амплитуды (Рис.5б) являются перекрестными, т.е. их частоты соответствуют средней величине частот основных резонансов – циклического ($F_g=2 - F_e=3$ для ^{87}Rb , $F_g=3 - F_e=4$ для ^{85}Rb) и соседних (практически не видны на доплеровском контуре). По ним наиболее удобно стабилизировать частоту лазера из-за их хорошего контраста. Однако стабилизация по циклическому переходу обеспечит лучшую

воспроизводимость частоты, поскольку он расположен близко к вершине доплеровского контура и поэтому менее подвержен затягиванию при изменении оптической мощности в ячейке или её температуры.

Изменение тока инжекции приводит к изменению оптической длины собственного резонатора лазерного диода вследствие изменения показателя преломления активной среды и теплового расширения кристалла. Это принципиально позволяет в определенном диапазоне синхронизировать движение собственной и внешней мод составного резонатора лазера и увеличить диапазон непрерывной перестройки длины волны ECDL-7820R. На рисунке 7 показан пример такого согласованного сканирования длины внешнего резонатора и тока инжекции LD.

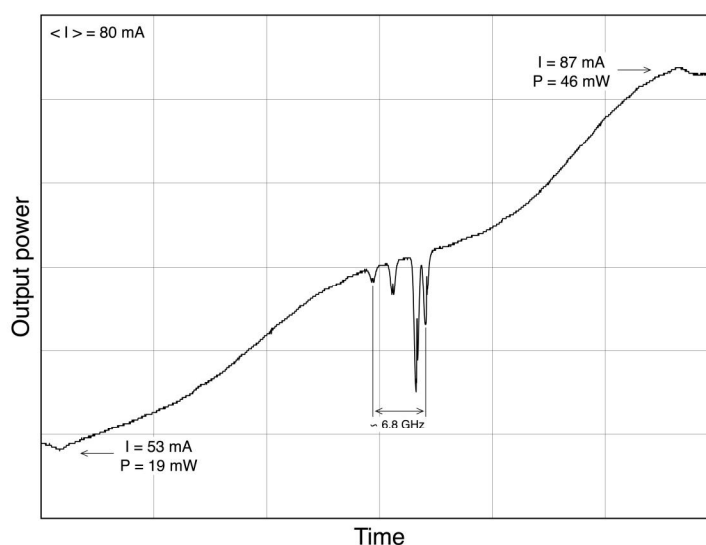


Рис.7. Пропускание ячейки с естественной смесью изотопов рубидия при синхронном сканировании дифракционной решетки и тока ЛД.

Для получения максимального диапазона непрерывной перестройки частоты лазера последовательность действий такова:

- 1) установить рукоятку SCAN на максимум;
- 2) установить рукоятку OFFSET в среднее положение;
- 3) рукоятку SWEEP ввести до уровня, при котором достигается максимальная длина непрерывного участка в выходной мощности лазера. При этом может потребоваться небольшая подстройка тока LD рукояткой LEVEL.

Следует отметить, что из-за определенной задержки пьезоэлемента в отклике на управляющий сигнал по отношению к току (степень задержки зависит от частоты и амплитуды сканирования) и гистерезиса в перестройке лазерных мод, поведение лазера на разных склонах управляющего сигнала может отличаться.

Юстировка ECDL-7820R

Ниже приведена последовательность действий, если выявлено, что требуется дополнительная юстировка лазера.



Рис.8. П-образный шлицевой ключ из ремонтного комплекта.

- 1) Вставить П-образный ключ из ремкомплекта (Рис.8) в шлицевой паз горизонтальной оси дифракционной решетки.
- 2) Определить направление, в котором движение П-образного ключа приводит к уменьшению порогового тока. Для этого мягко понажимать на рычаг вверх и вниз.
- 3) Если движение рычага вниз (т.е. лазерный луч, отраженный от дифракционной решетки движется вверх) приводит к уменьшению порогового тока, то следует вращать фиксирующий винт (Рис.2, поз.5) по часовой стрелке. В противоположном случае фиксирующий винт следует слегка ослабить. Для вращения фиксирующего винта используется усиленный шестигранный (имбусовый) ключ 1.5 из ремкомплекта. Как правило, вращения на несколько градусов достаточно для восстановления режимов работы ECDL-7820R.
- 4) После достижения минимума порога генерации установить, если требуется, необходимую длину волны горизонтальным юстировочным винтом (Рис.2, поз.6), доступ к которому возможен и при закрытой крышке оптической головки. Для вращения горизонтального юстировочного винта используется стандартный шестигранный ключ 1.5 из ремкомплекта.

Приложение. Принципиальные и монтажные схемы ULDC2006D.

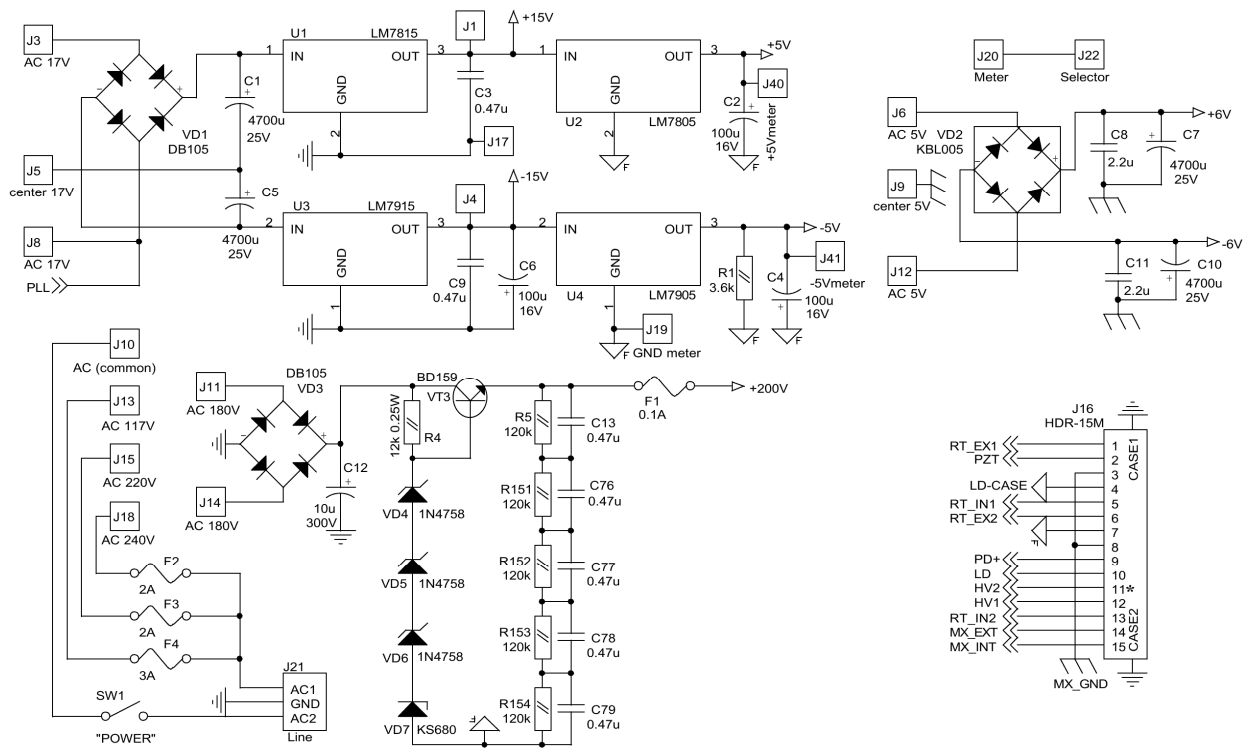


Рис.9. Схема блока питания.

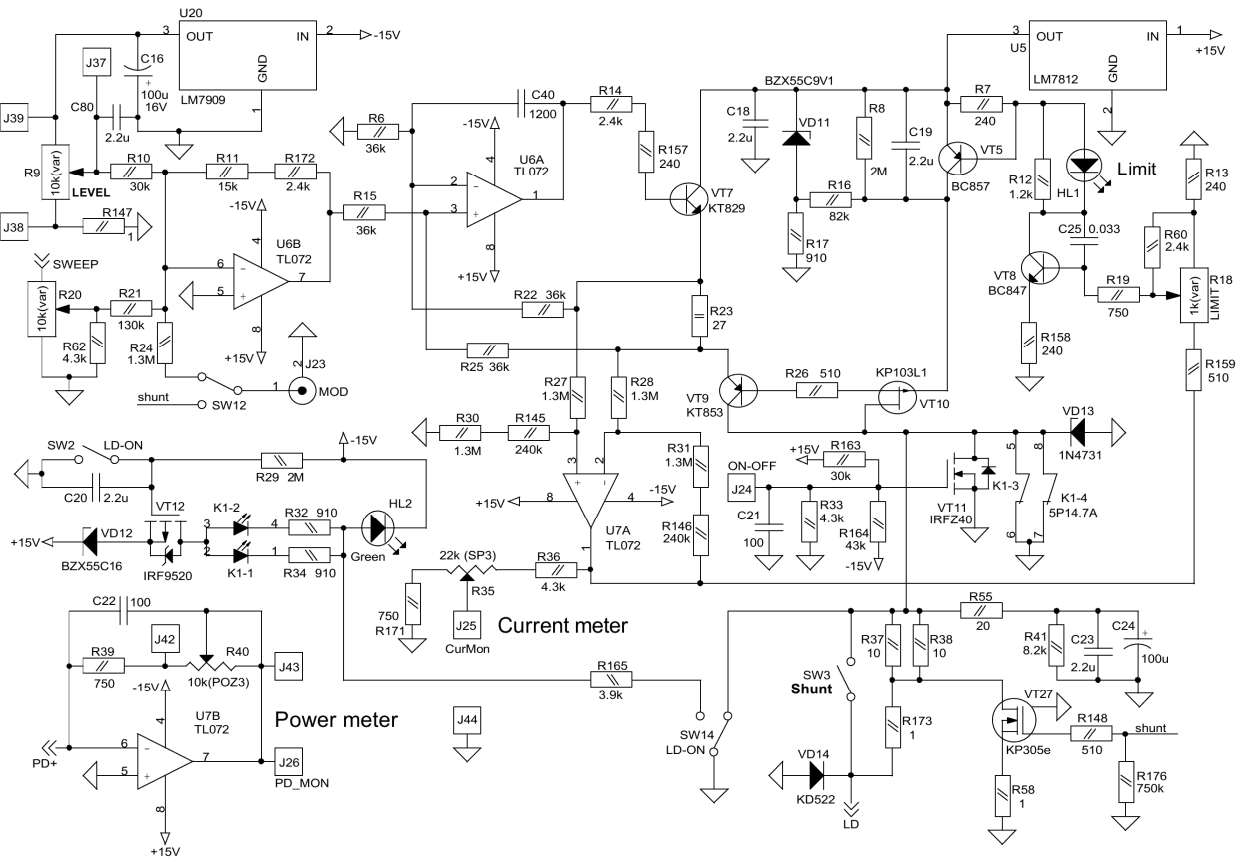


Рис.10. Схема источника тока.

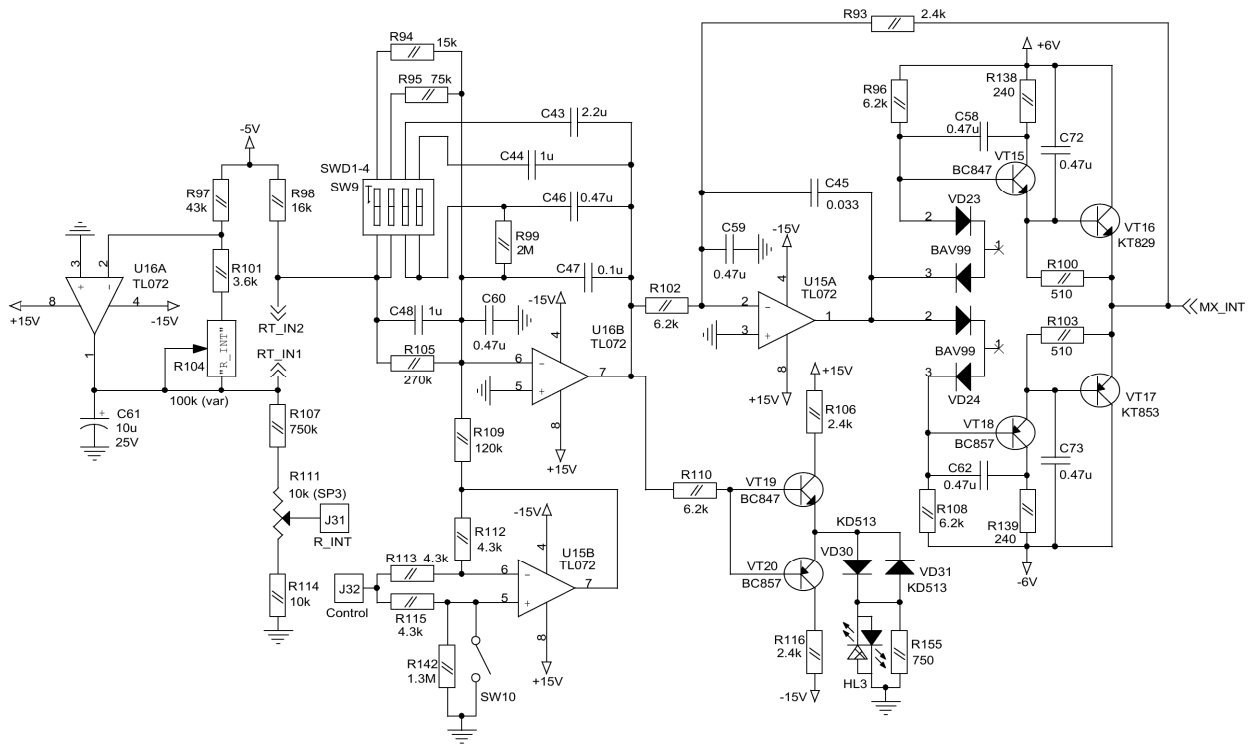


Рис.11. Схема контроллера температуры лазерного диода.

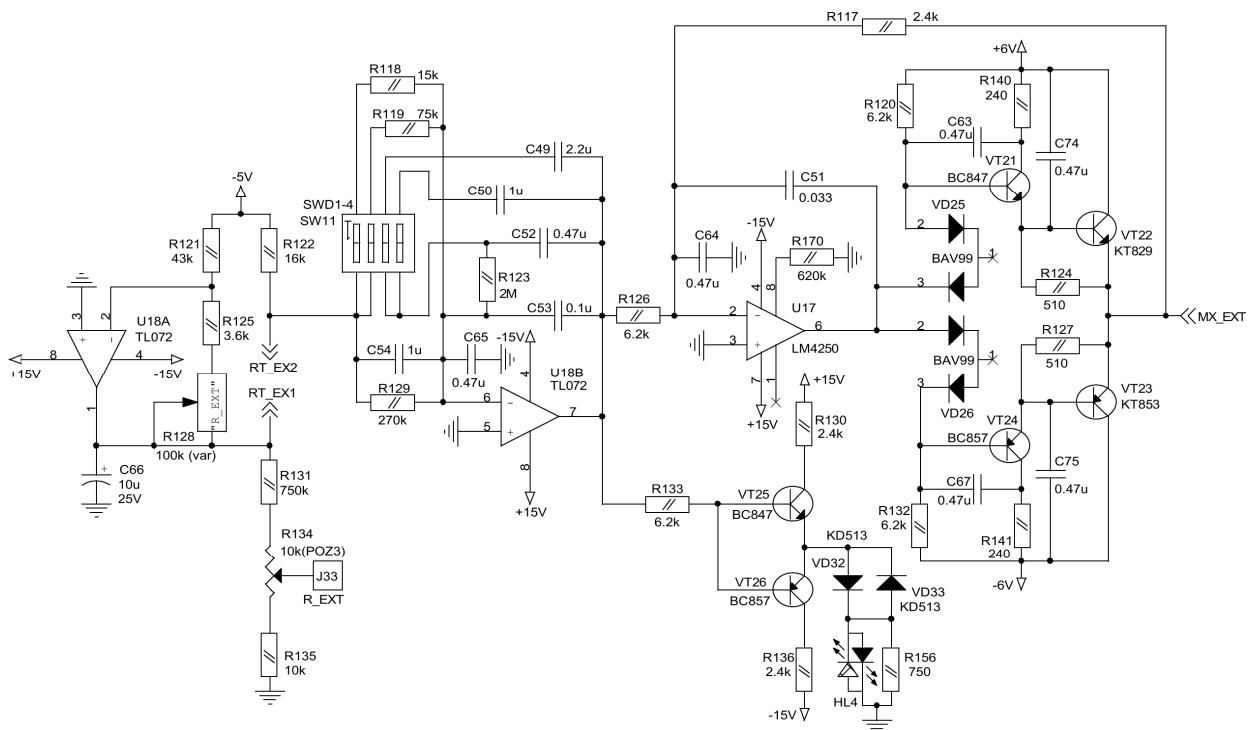


Рис.12. Схема контроллера температуры корпуса оптической головки.

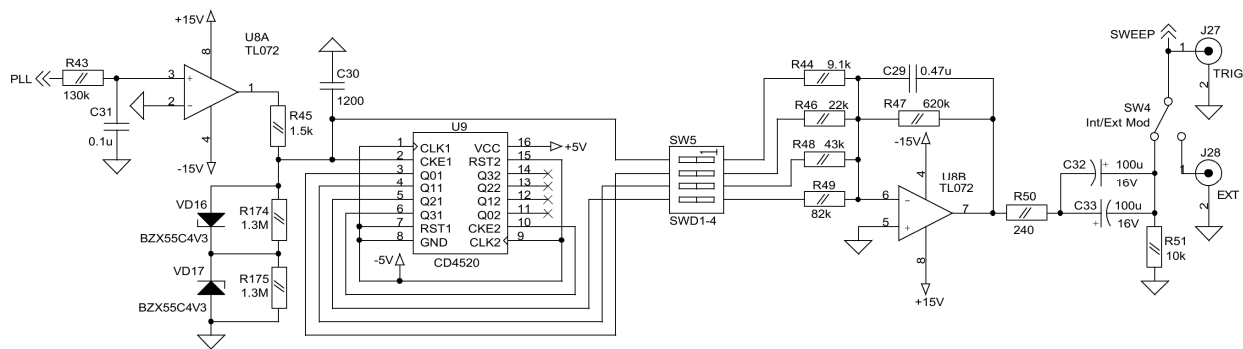


Рис.13. Схема генератора треугольного сигнала.

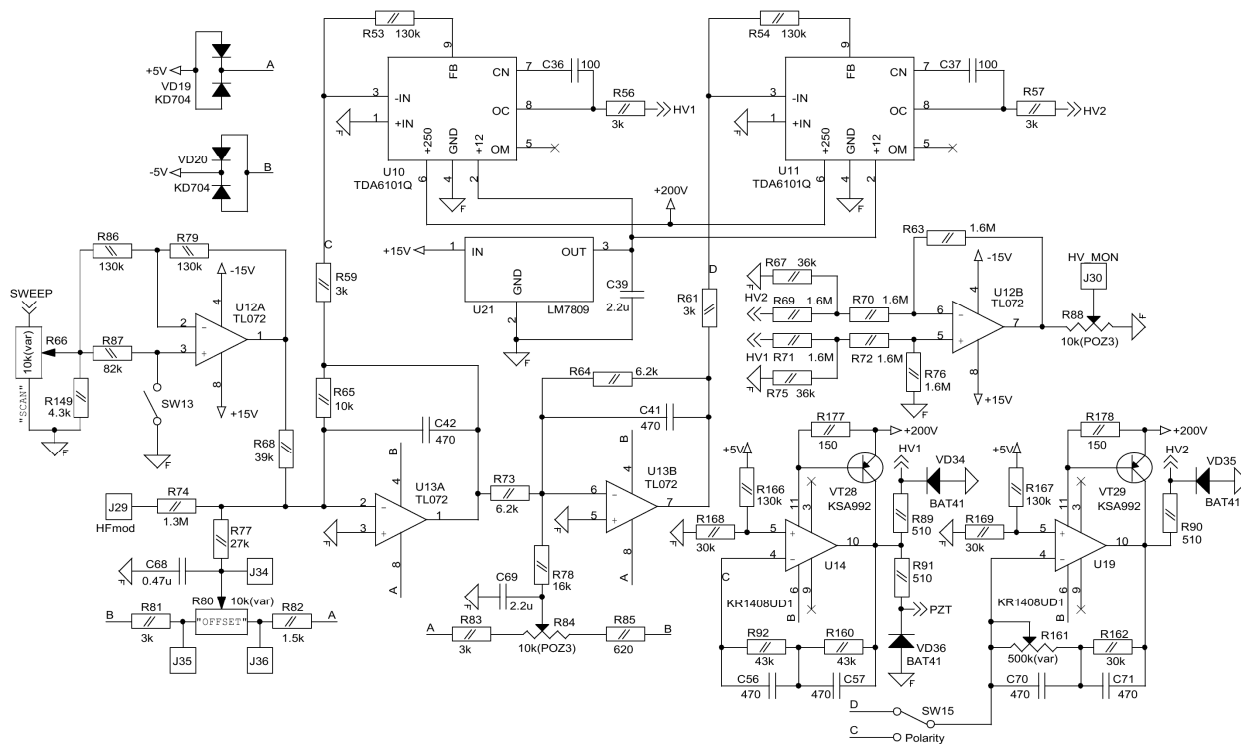


Рис.14. Схема высоковольтного усилителя.

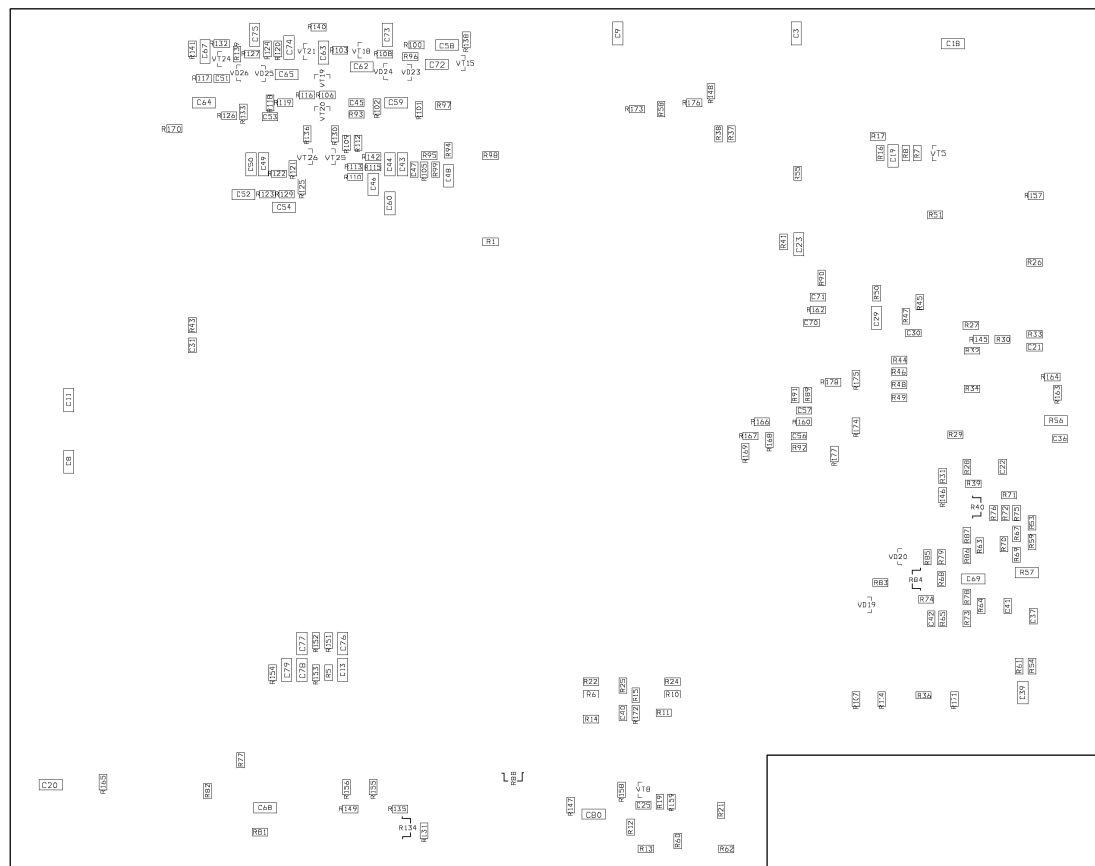
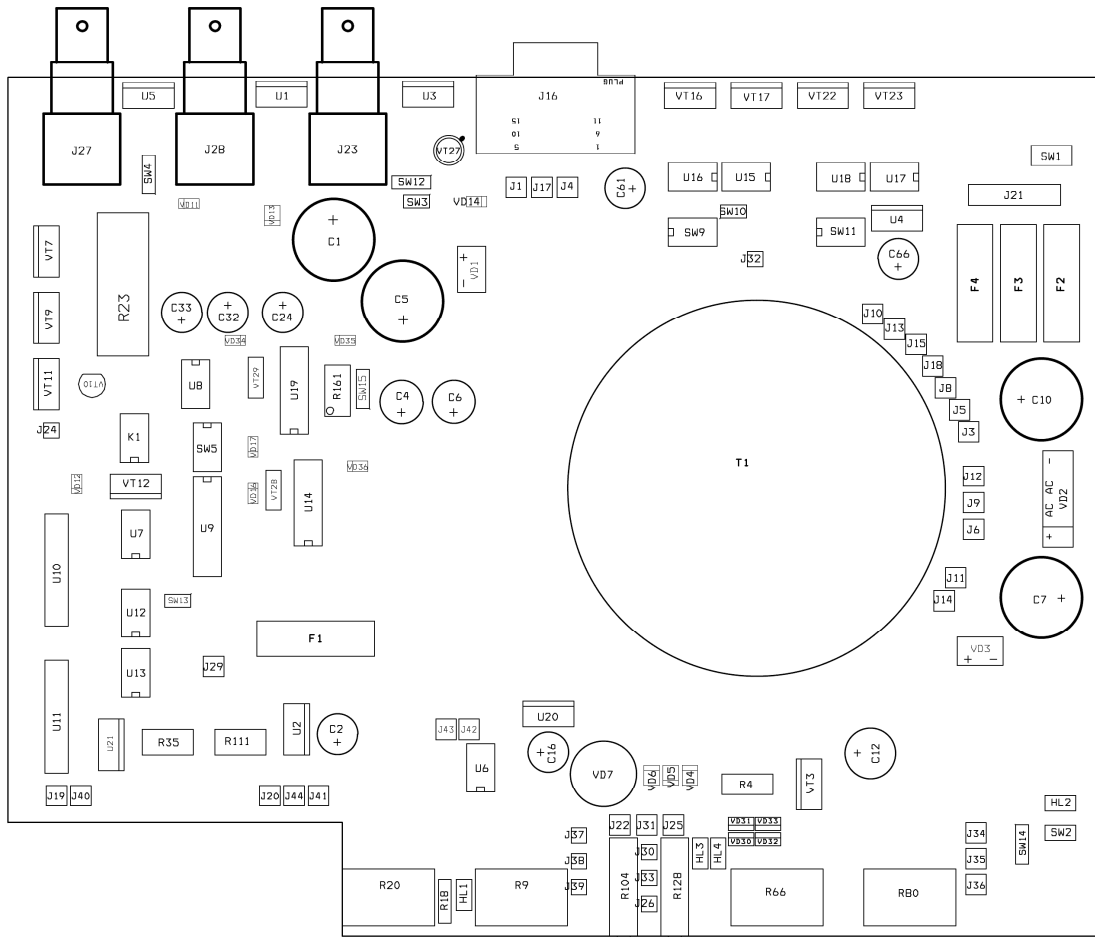


Рис.15. Монтажные схемы ULDC2006D.

Общие рекомендации по эксплуатации ECDL-7820R.

1. Не пытайтесь изменить настройку выходного объектива. В случае деградации лазерного диода единый модуль диода и объектива должен заменяться целиком.

2. Не нарушайте последовательность включения и выключения лазера.

3. Не понижайте температуру лазерного диода ниже точки росы, это может привести к деградации лазерного диода. Температура лазерного диода может быть оценена из ТКС (температурный коэффициент сопротивления) термистора:

$$\text{ТКС} = - 4 \text{ \%}/^{\circ}\text{C} .$$

4. Используйте оптический изолятор для устранения паразитных отражений обратно в лазер.

5. Следуйте **золотому правилу**: ECDL как часть экспериментальной установки должен включаться последним и выключаться первым.

Спецификация.

1. Длина волны	780.2 нм
2. Выходная мощность	
@ 51 mA	16 мВт
@ 73 mA	33 мВт
@ 92 mA	47 мВт
3. Диапазон непрерывной перестройки	
by PZT only	7 ГГц
by PZT+LD current	70 ГГц
4. Диапазон грубой перестройки	± 2 нм
5. Поляризация	линейная вертикальная
6. Пучок	эллиптический 5×1.5 мм ²
7. Пороговый ток	29 mA
8. Рабочий ток	73 mA
9. Максимальный ток	100 mA
10. Величина термосопротивления	11.5 кОм
11. Размеры оптической головки	$51 \times 46 \times 35$ мм ³
12. Вес оптической головки	120 г
13. Размеры блока управления	$245 \times 200 \times 55$ мм ³
14. Вес блока управления	1.2 кг

Блок стабилизации частоты LHV160

Блок стабилизации частоты LHV160 предназначен для привязки частоты перестраиваемого лазера к резонансам, формируемым поглощающей средой или внешним оптическим резонатором. В его состав входят блок питания, генератор треугольного сигнала, синусоидальный генератор, фазовращатель, аналоговый перемножитель и ПИД контроллер с регулируемыми полосами усиления. Опционально блок стабилизации частоты может иметь высоковольтный выход для управления пьезоэлементами (модель LHV162). Блок-диаграмма (Рис.16) отражает назначение и взаимосвязь электронных узлов.

Принцип действия блока стабилизации частоты основывается на том, что величина произведения двух синусоидальных сигналов одинаковой частоты пропорциональна разности фаз этих сигналов:

$$\sin(\omega t + a)\sin(\omega t) = \frac{1}{2} \cos a - \frac{1}{2} \cos(2\omega t + a).$$

В точке экстремума детектируемый сигнал модуляции меняет знак, и это становится возможным зарегистрировать. Высокочастотная компонента $\cos(2\omega t + a)$ отфильтровывается и остается дисперсионный сигнал, удобный для взаимной привязки лазера и источника опорного резонанса.

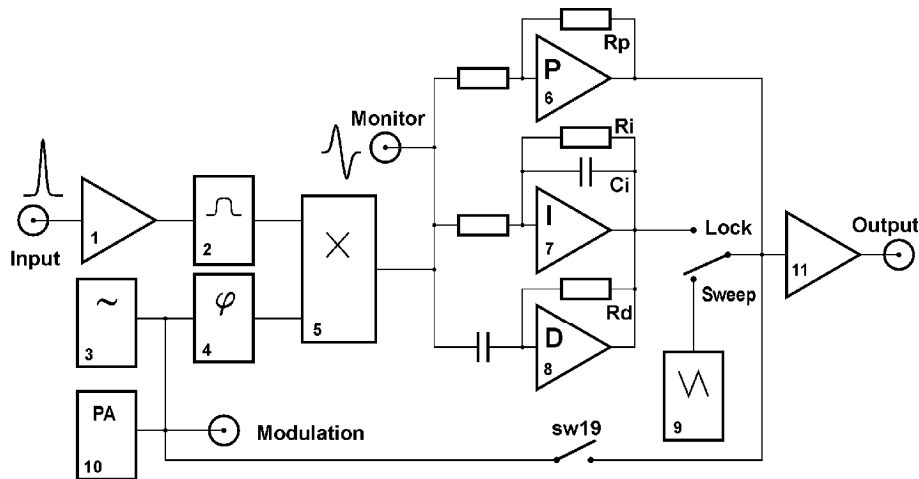


Рис.16. Блок-диаграмма LHV160. 1 – входной усилитель; 2 – полосовой фильтр; 3 – генератор синусоидального сигнала; 4 – фазовращатель; 5 – перемножитель; 6 – пропорциональный усилитель; 7 – интегральный усилитель; 8 – дифференциальный усилитель; 9 – генератор треугольного сигнала; 10 – усилитель мощности; 11 – суммирующий усилитель.

На Рис.17 показан вид спереди и сзади на блок стабилизации частоты LHV160. Передняя панель LHV160 разделена на несколько функциональных зон, назначение

которых приводится ниже. Также в описании LHV160 будут ссылки на электронные и монтажные схемы, представленные на рисунках 18 – 23.

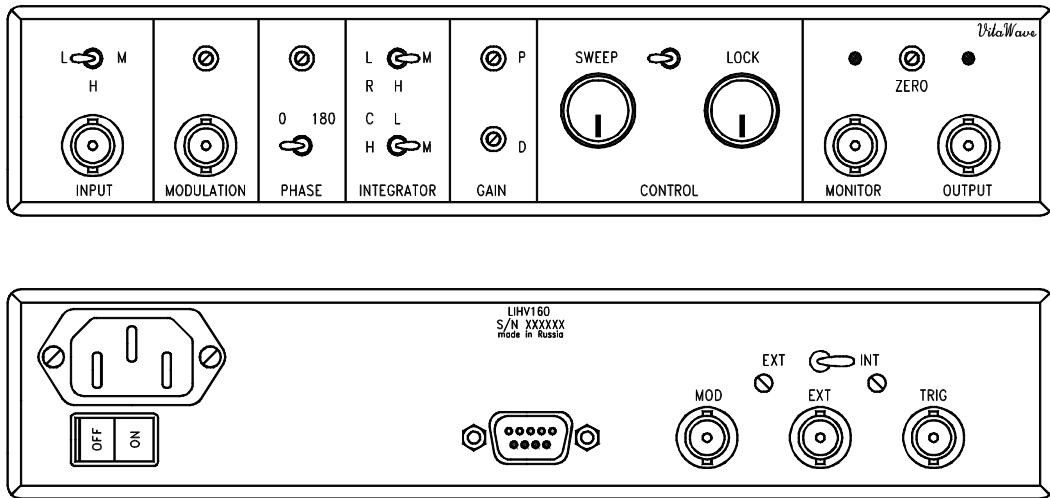


Рис.17. Вид спереди и сзади на блок стабилизации частоты LHV160.

Аналоговый блок питания (Рис.18) обеспечивает блок стабилизации частоты всеми необходимыми для его корректной работы напряжениями: $\pm 15V$ и $+200V$ (только для LHV162). Под крышкой блока вблизи сетевого разъема питания расположены три гнезда для плавких предохранителей, каждый из которых соответствует одному из возможных сетевых напряжений – 240В, 220В и 117В. **Только один из предохранителей должен быть установлен в соответствующее гнездо!** Еще один предохранитель номиналом 100 мА (F1 на Рис.18) защищает выход высоковольтного усилителя от замыкания.

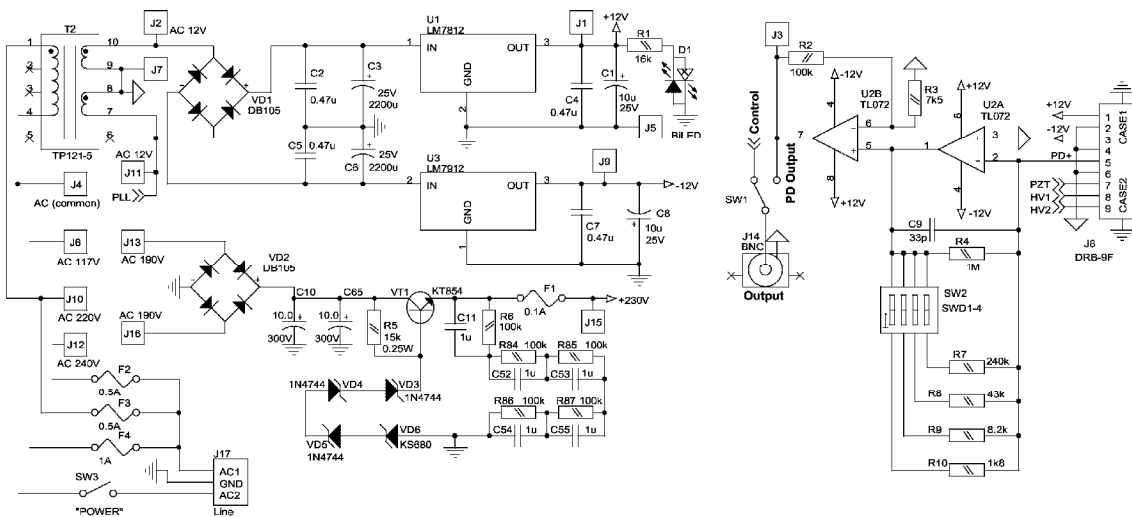


Рис.18. Схемы блока питания и трансимпедансного усилителя с выходным разъемом DRB-9F.

Встроенный генератор (позиция 3 на Рис.16 и U5 на Рис.19) дает на выходе синусоидальный сигнал частотой около 10 кГц. Фазовращатель (поз.4 на Рис.16 и VT2-

R23 на Рис.19) преобразует его в два, чьи относительные фазы могут изменяться в диапазоне 320° . Один из этих сигналов – опорный (U6, U7a) – прямо поступает на вход аналогового перемножителя (поз.5 на Рис.16 и на Рис. 20), а другой (HFmod, U4, U7b на Рис.19) используется для модуляции частоты лазера или оптического резонанса. Регулировка амплитуды модуляции (R43 на Рис.19) и выход сигнала модуляции расположены в зоне MODULATION на передней панели LHV160. Максимальная амплитуда модуляции составляет $2V_{п-п}$.

Встроенный синусоидальный генератор может быть отключен от фазовращателя джампером SW21 (ExtMod – внешняя модуляция; установлен на плате). Тогда через разъем MOD на задней панели может быть подан сигнал внешнего генератора, например от другого LHV160, который и будет использоваться в качестве опорного для перемножителя частот. Следует помнить, что частота входного полосового фильтра не регулируется, поэтому синусоидальный сигнал внешнего генератора не должен значительно отличаться по частоте от сигнала встроенного генератора.

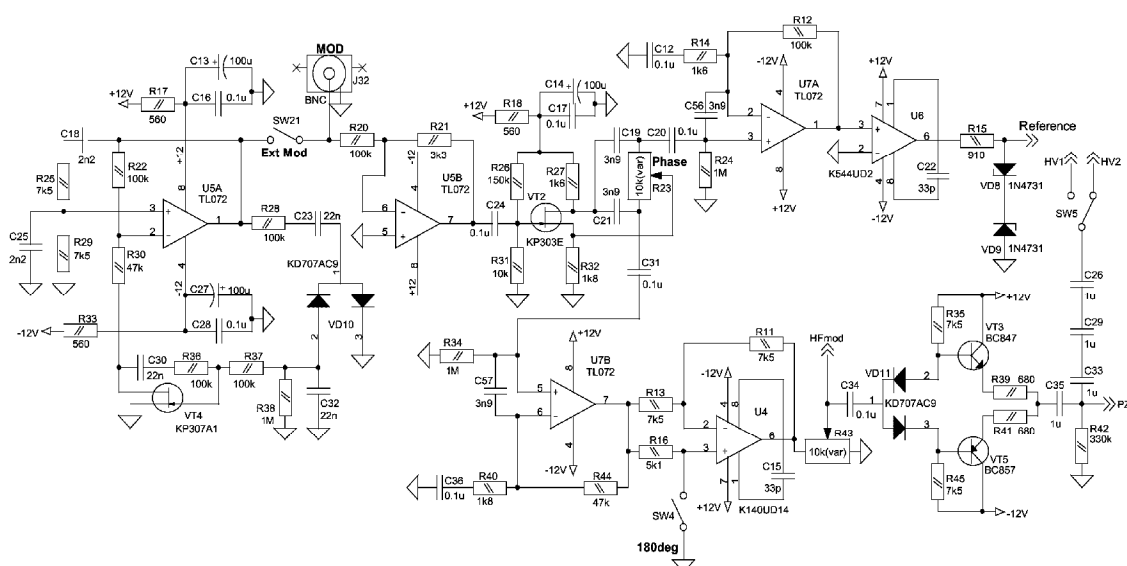


Рис.19. Схемы генератора синусоидального сигнала, фазовращателя и усилителя мощности.

Как правило, сигнал модуляции также подается через переход SW19 на вход суммирующего усилителя (поз.11 на Рис.16 и U25a на Рис.22). В этом случае модулируется и привязывается один и тот же объект (например, частота лазера к атомному резонансу). Чтобы разделить каналы модуляции и управления (скажем, модулируем базу интерферометра, а обратную связь подаем в частоту лазера), нужно снять джампер SW19. Доступ к SW19 открывается при снятой верхней крышке LHV160.

Усилитель мощности (поз.10 на Рис.16) позволяет раскачивать пьезоэлементы повышенной емкости (ножка 7 разъема J8 на Рис.18 и 23).

Усилитель оптически детектированного сигнала (входной усилитель, поз.1 на Рис.16 и U8a на Рис.20) имеет три уровня усиления: L – низкий, Н – высокий, М – средний. Его вход (BNC-разъем) и переключатель усиления расположены в зоне INPUT на передней панели. Средний уровень усиления соответствует уровню входного сигнала приблизительно 100 мВ_{п-п}. Положение L входного переключателя уменьшает входное усиление в пять раз, положение Н – в пять раз увеличивает. Усиленный сигнал затем фильтруется для подавления низкочастотного шума и 2f-компоненты в детектированном сигнале, которая дает подставку на выходе синхронного детектора (аналогового перемножителя). Центральная частота полосового фильтра (поз.2 на Рис.16 и U8b на Рис.20) соответствует частоте модуляции, а его границы находятся вблизи 5 и 15 кГц.

Относительная фаза входного и опорного сигналов может быть плавно подстроена переменным сопротивлением или скачком изменена на π переключателем (R23 и SW4 на Рис.19), расположенными в зоне PHASE на передней панели прибора.

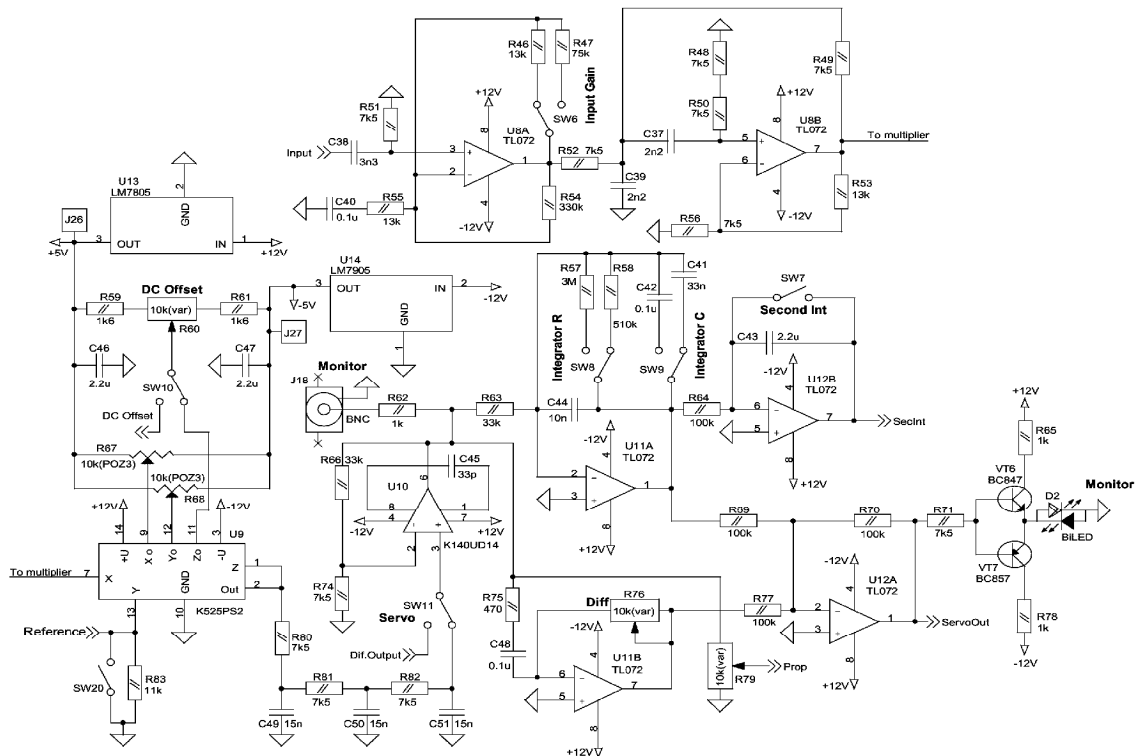


Рис.20. Схемы входного усилителя, полосового фильтра, перемножителя и ПИД регулятора.

Напряжение на выходе аналогового перемножителя (поз.5 на Рис.16 и U9 на Рис.20) пропорционально произведению напряжений детектированного и опорного сигналов. Результат произведения содержит 2f-компоненту (см. выражение на стр.18), которая отрезается (R80-82, C49-51 на Рис.20) для получения дисперсионного сигнала, подобного производной от формы оптического резонанса. Этот сигнал можно наблюдать

на осциллографе с разъема MONITOR в зоне OUTPUT прибора (Рис.17). Потенциометр ZERO, расположенный в той же зоне, меняет DC уровень на выходе перемножителя (R60 на Рис.20), что позволяет в некоторых пределах сдвигать точку привязки оптической частоты по отношению к вершине резонанса.

Для получения надежного и стабильного захвата оптической частоты усиление в петле обратной связи должно быть точно подобрано в соответствии с передаточной характеристикой управляемого объекта (установленное в пьезо-оправу зеркало, ток лазерного диода, гальваническая подвижка и т.д.). Данная задача решается использованием ПИД регулятора, который имеет три канала с разными передаточными характеристиками. Амплитуда выходного сигнала пропорционального усилителя (поз. б на Рис.16 и U10 на Рис.20) не зависит от частоты входного сигнала. Усиление интегрального усилителя (поз.7 на Рис.16 и U11a на Рис.20) достигает максимума при очень низких частотах и стремится к нулю на высоких. Обратный частотный отклик имеет дифференциальный усилитель (поз.8 на Рис.16 и U11b на Рис.20). Усиление или частота единичного усиления U24A каждого канала могут быть подстроены независимо, а их сумма определяет полное усиление ПИД регулятора (поз.11 на Рис.16 и U12a, U25a на Рис.20 и Рис.21).

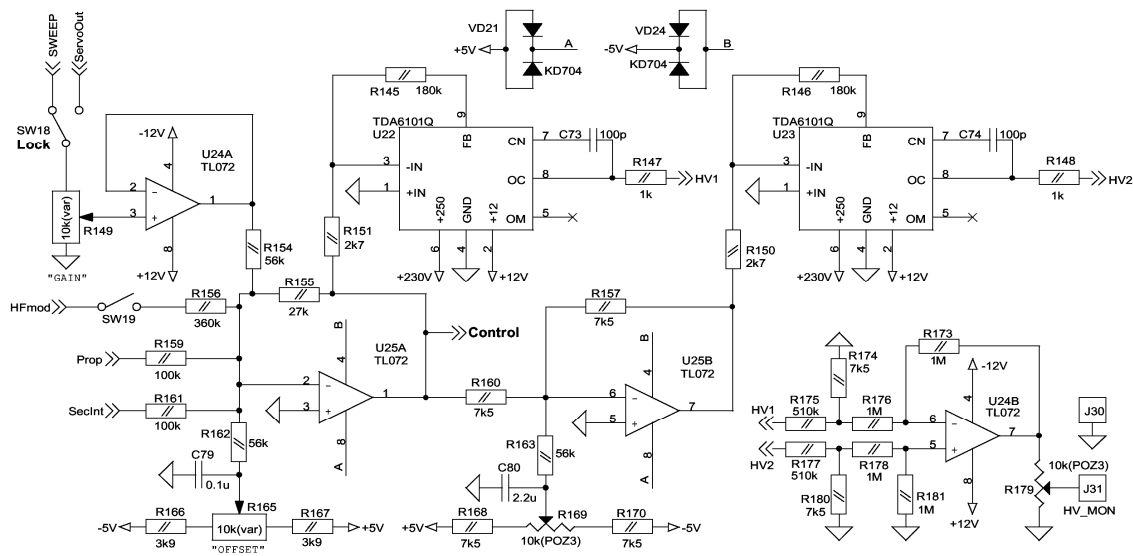


Рис.21. Схемы суммирующего усилителя и высоковольтного усилителя.

Постоянная времени интегратора изменяется переключателем С в зоне INTEGRATOR. Величина конденсатора обратной связи (C_i на Рис.16 и C41, C42, C44 на Рис.20) составляет 10 нФ в положении переключателя L (низкая емкость, высокая частота единичного усиления), 33 нФ – в положении М (средняя емкость) и 100 нФ – в положении Н (высокая емкость, малая частота единичного усиления). Шунтирующий резистор (R_i на Рис.16 и R57, R58 на Рис.20) ограничивает усиление интегратора на очень низких

частотах и способствует разрядке конденсатора C_i , что упрощает старт привязки оптической частоты. Переключатель **R** в зоне INTEGRATOR устанавливает три возможных уровня для R_i : L – 510 кОм, M – 3 МОм и H – резистор отсутствует.

Переменные сопротивления под шлиц **P** (R79 на Рис.20) и **D** (Rd на Рис.16 и R74 на Рис.20) в зоне GAIN устанавливают усиление пропорционального и постоянную времени дифференциального усилителей соответственно. Выход суммирующего усилителя соединен с правым BNC разъемом в зоне OUTPUT, а двухцветный светодиод в той же зоне отражает уровень его сигнала. При напряжении на выходе суммирующего усилителя более 2 В светодиод светит красным, при напряжении менее -2 В – зеленым. Таким образом, отсутствие его свечения в условиях привязки оптической частоты является индикатором ее стабильного удержания, а появление свечения информирует о стремлении системы выйти из области захвата.

Выход пропорционального усилителя подсоединен ко второму каскаду (первый – это U12a) суммирующего усилителя (U25a на Рис.21), минуя переключатель SWEEP-LOCK в зоне CONTROL на передней панели (SW18 на Рис.21). Это позволяет запустить механизм привязки оптической частоты (“затягивание частоты”) еще в условиях сканирования, что облегчает её захват.

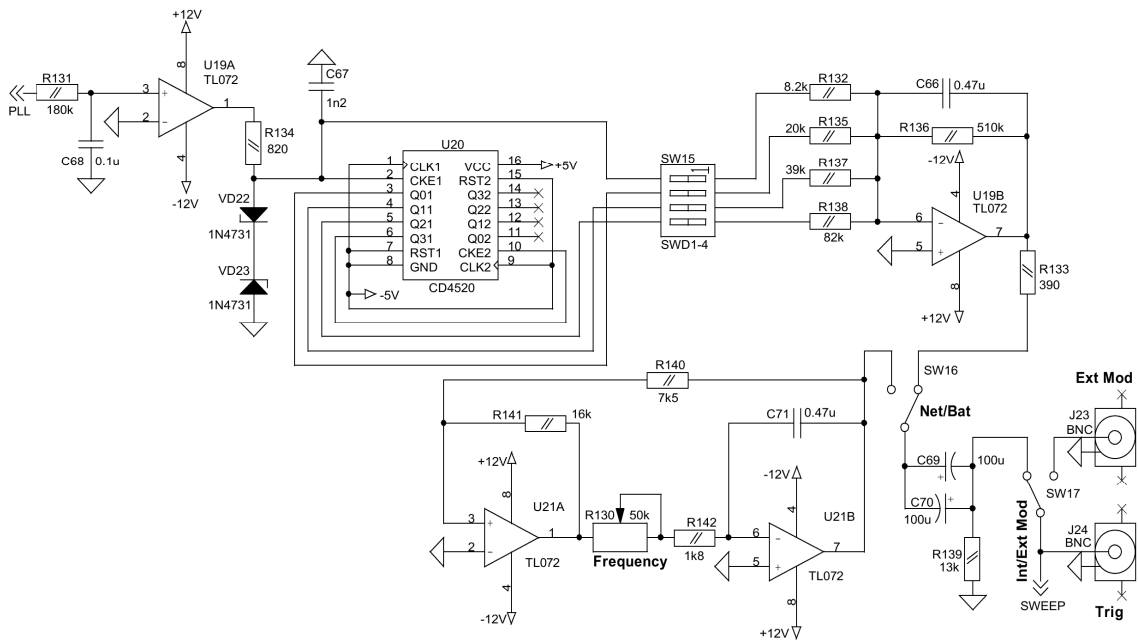


Рис.22. Схема генератора треугольного сигнала.

В состав блока стабилизации частоты входит генератор треугольного сигнала (поз.9 на Рис.16 и схема на Рис.22), который может сканировать выход LHV160 на сетевой частоте или частоте ее субгармоник. Выбор частоты сканирования осуществляется установкой одного из джамперов переключателя SW15 (Рис.22) в

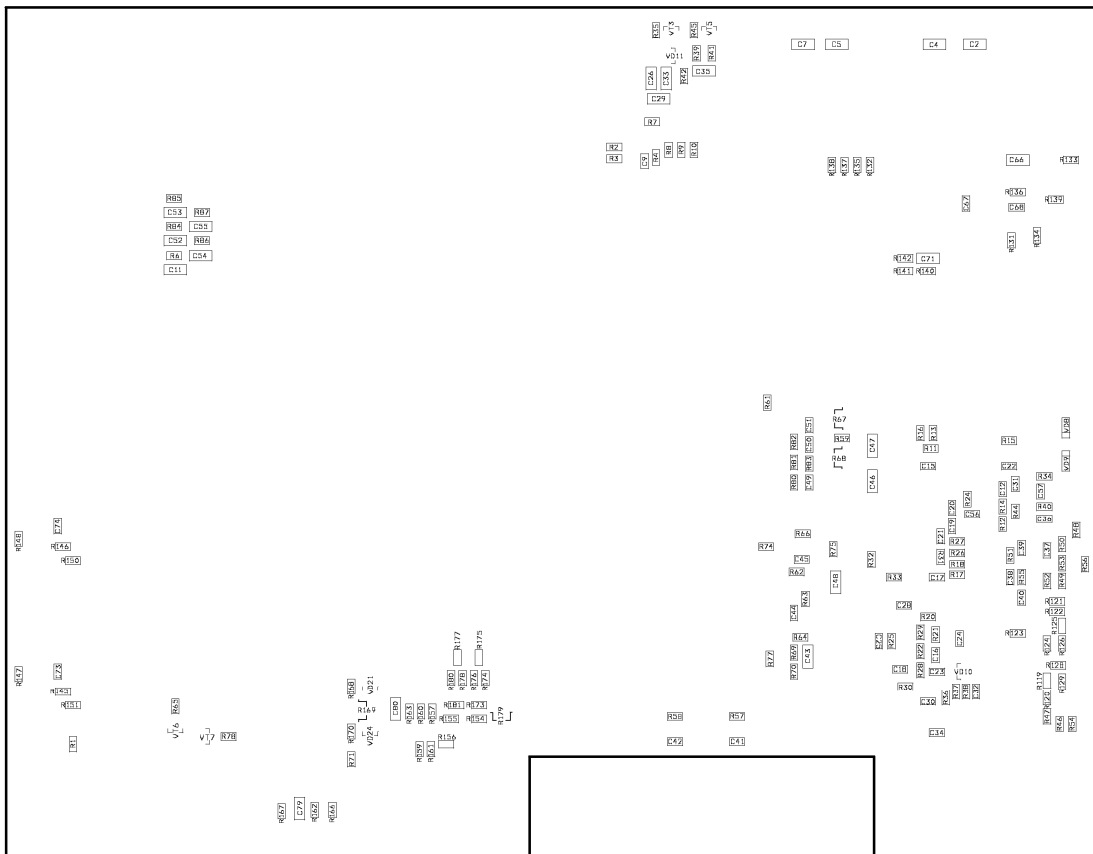
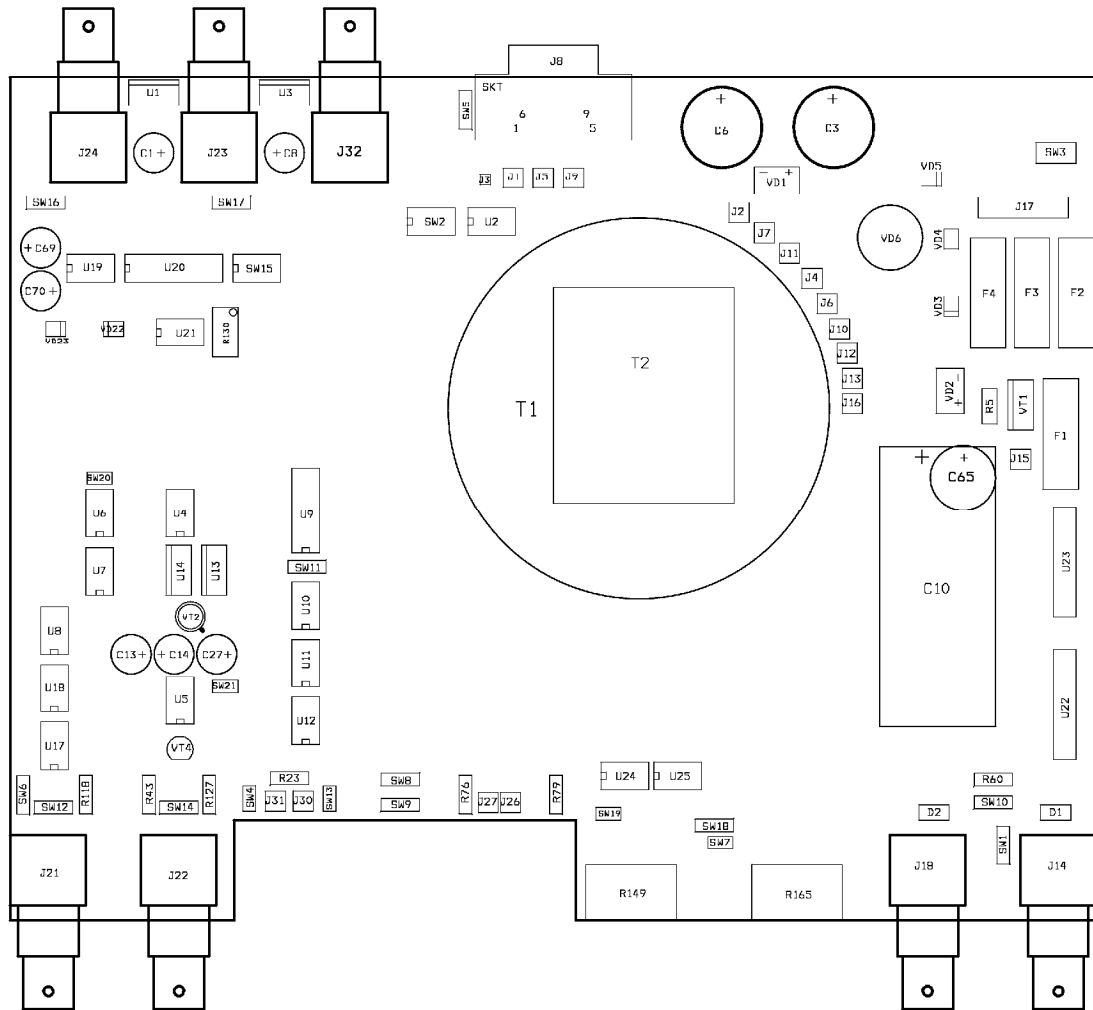


Рис.23. Монтажные схемы LHV160.

положение ON. Переключатель расположен на монтажной плате (Рис.23). Как правило, в приборе предустановлена частота сканирования 25 Гц. Выход генератора сканирования размахом $8V_{п-п}$ соединен с разъемом TRIG на задней панели прибора и может использоваться для управления или синхронизации внешних устройств.

Через разъем EXT можно подключить к LHV160 внешний генератор сканирования. Переключатель EXT-INT на задней панели отключает в положении EXT внутренний генератор от управления, при этом выход TRIG дублирует сигнал по входу EXT (синхронизация с осциллографом, например, сохраняется).

Рукоятки управления прибора (регулировки выходного сигнала) расположены в зоне CONTROL (Рис.17). Левая рукоятка GAIN регулирует амплитуду сканирования в режиме SWEEP или усиление в петле обратной связи в режиме LOCK. Правая рукоятка OFFSET устанавливает DC уровень на выходе LHV160 независимо от выбранного режима его работы.

Переключатель SWEEP–LOCK, расположенный над рукоятками управления переключает режимы работы (сканирование частоты или ее стабилизация) блока стабилизации частоты.

Размеры прибора LHV160 $245 \times 200 \times 55$ мм³, вес – 0.9 кг.

Процедура привязки частоты лазера к резонансу нелинейного поглощения в парах рубидия

Для того чтобы привязать частоту ECDL-7820R к резонансу нелинейного поглощения в парах рубидия, необходимо выполнить следующую последовательность действий.

1. Выход фотоприемника соединить через тройник с входом INPUT блока стабилизации частоты LHV160 (длинный кабель) и подать его же на вход осциллографа (средний кабель).

2. Перевести ULDC2006D в режим управления внешним сигналом – установить его переключатель на задней панели в режим EXT и соединить его вход EXT с выходом OUTPUT блока стабилизации частоты (короткий кабель).

3. Подать на осциллограф сигналы от блока стабилизации: синхронизации с разъема TRIG и выход синхронного детектора с разъема MONITOR (длинные кабели).

4. Проверить начальное положение рукояток управления, тумблеров и триммеров на панелях всех приборов:

ULDC2006D:

SCAN – первая треть оборота;

- SWEEP – соответствует максимальной перестройке лазера при выбранном диапазоне SCAN;
 тумблер EXT-INT – EXT;
 LHV160:
 INPUT – M (среднее усиление);
 MODULATION – среднее положение;
 PHASE – предустановлен;
 INTEGRATOR R – L (минимальное значение);
 INTEGRATOR C – M (среднее значение);
 GAIN P – крайнее левое положение (против часовой стрелки);
 GAIN D – крайнее левое положение (против часовой стрелки);
 переключатель CONTROL – положение SWEEP;
 рукоятка GAIN – среднее положение;
 рукоятка OFFSET – среднее положение;
 ZERO – предустановлен;
 тумблер EXT-INT – INT.

5. Подстроить частоту лазера таким образом, чтобы резонанс нелинейного поглощения, к вершине которого она будет привязываться, при сканировании находился в середине диапазона сканирования. Пример приведен на рисунке 24а.

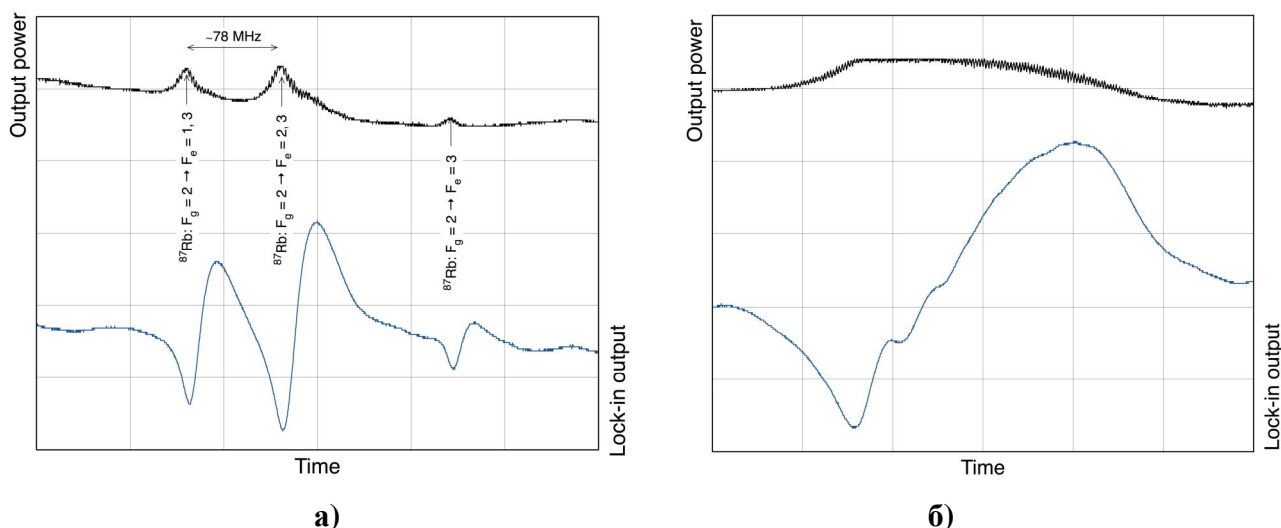


Рис.24. Типовые сигналы при работе D2RbLS. Блок стабилизации частоты LHV160 работает в режиме сканирования. Верхняя (черная) кривая – выход фотоприемника (сигнал на входе INPUT), нижняя (синяя) кривая – сигнал на выходе MONITOR.

6. Триммером MODULATION устанавливается амплитуда модуляции, которая обеспечивает размах сигнала дисперсионной формы с выхода MONITOR около 200 мВ.

7. Рукояткой SWEEP на передней панели LHV160 выбирается такой диапазон сканирования, чтобы в него попадал единственный резонанс, к которому может быть привязана лазерная частота (Рис.24б).

8. Для проверки фазы сигнала обратной связи увеличить значение GAIN P (поворачивать по часовой стрелке). Фаза обратной связи выбрана правильно, если

вершина опорного резонанса уплощается. Именно это наблюдается на Рис.24б. Если она обостряется, то перекинуть тумблер 0–180 в зоне PHASE.

9. Перекинуть тумблер в зоне CONTROL в положение LOCK. Уровень оптического сигнала должен подтянуться к вершине опорного резонанса. Уход с вершины резонанса может быть обусловлен неверно выбранной фазой или избыточным усилением в петле обратной связи.

10. Ввести рукоятку управления GAIN до положения, предшествующего возникновению осцилляций на выходе MONITOR.

11. Триммер D (зона GAIN) должен быть в положении, обеспечивающем максимально эффективное подавление осцилляций, вызываемых завышенной постоянной времени интегратора (избыточным усилением интегратора). Триммер P в оптимальном положении минимизирует ширину шумовой дорожки в сигнале ошибки (выход MONITOR) в режиме захвата.

12. После результативного захвата частоты можно перевести тумблер R из зоны INTEGRATOR в положение H.

Для того чтобы восстановить захват вышедшего из него лазера, достаточно вернуть к исходному положению все элементы из зоны CONTROL и тумблер INTEGRATOR R, а затем повторить пункты 7, 9, 10, 12 из представленной последовательности действий.