

УДК 53.084

**ДВУХКАНАЛЬНЫЙ ДВУХЧАСТОТНЫЙ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ
ПРИЕМНИК НА ДЛИНАХ ВОЛН 119 И 220 мкм Н₂О-ЛАЗЕРА**

© 2008 г. В. В. Завьялов, Е. А. Зотова, Е. Ю. Шампаров

*Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН**Россия, 119334, Москва, ул. Косыгина, 2*

Поступила в редакцию 27.09.2007 г.

Описана конструкция и приведены характеристики компактного устройства из четырех снабженных предусилителями охлаждаемых фотодетекторов излучения двух частот (2.53 и 1.36 ТГц) на основе двух пар Ge:Sb- и *n*-InSb-монокристаллов. Приемник предназначен для работы в паре с Н₂О-лазером, работающим в режиме генерации ортогонально поляризованных волн, и может найти применение в интерферометрах с низким уровнем стабильности длин оптических путей, например, при исследовании плазмы на мощных импульсных установках. Приемник выполнен в виде вставки в промышленный транспортный гелиевый сосуд Дьюара с диаметром горловины 12 мм.

PACS: 52.70.-m, 07.57.Kp

ВВЕДЕНИЕ

Двухчастотные детекторы терагерцового лазерного излучения могут найти применение, например, при исследовании плазмы на мощных импульсных установках, работа которых сопровождается, как правило, механическими вибрациями установки во время импульса. Это существенно ограничивает возможности лазерной интерферометрии плазмы, поскольку из-за вибрации длина плеч интерферометра неконтролируемым образом изменяется. Особенно сложно проводить измерения, если изменение длины оптического пути превышает длину волны зондирующего излучения. В таких условиях можно существенно повысить точность интерферометрических измерений, если использовать в качестве источника излучения терагерцовый Н₂О-лазер [1], работающий в непрерывном режиме, резонатор которого образован вогнутым зеркалом и тонкой металлической сеткой малого периода (30–60 мкм) с отверстиями квадратного сечения. Если немного растянуть сетку в направлении одной из диагоналей квадрата, то эффективная длина лазерного резонатора оказывается слегка различной для линейно поляризованных ортогональных мод резонатора. Как было показано в [2], такой лазер излучает одну или одновременно несколько пар волн с разной длиной. Каждая пара состоит из ортогонально поляризованных волн, сдвинутых относительно друг друга по частоте, и это обстоятельство позволяет упростить измерения гетеродинного типа.

В качестве примера на рис. 1 приведена одна из возможных схем интерферометра [2, 3], успешно применявшаяся для измерения концентрации электронов в сечении плазменного шнура в экспериментах П.Л. Капицы [4]. Подробный анализ интер-

ферометра (с учетом неидеальности поляризаторов, наличия гармоник в сигнале, биений частот и др.) дан в работе [2], здесь мы ограничимся лишь его упрощенным описанием.

Излучение лазера на каждой из его рабочих длин волн представляет собой две соосные линейно поляризованные волны:

$$E_i^s \sim \sin(\omega_i t); \quad E_i^p \sim \sin(\omega_i t + \Omega_i t),$$

где ω_i – основная (терагерцовая) частота излучения; Ω_i – частота биений (десятки килогерц), определяемая анизотропией резонатора; *s* и *p* – направления поляризации излучения соответственно в плоскости и нормально к плоскости рисунка. Подстройкой длины резонатора Н₂О-лазер устанавливается в режим одновременной генерации двух длин волн $\lambda_{1,2} = 118.6$ и 220 мкм (что соответствует частотам $\omega_{1,2}/2\pi$, равным 2.53 и 1.36 ТГц).

Так как ортогонально поляризованные волны соосны, то их пути от лазера к интерферометру и от интерферометра к фотодетекторам одинаковы, и даже большая ($\gg \lambda_i$) нестабильность длины оптического пути не оказывает влияния на взаимную разность их фаз. Лишь на участке между поляризаторами G_3 и G_4 , где волны разводятся по поляризациям на измерительный канал 2 и канал сравнения 3, они приобретают разностный набег фазы Φ , содержащий как вклад от измеряемого объекта (плазмы), так и паразитный вклад от нестабильности разности длин плеч интерферометра. Зная характер частотной зависимости дисперсии плазмы и учитывая бездисперсионный характер нестабильности разности длин плеч интерферометра, можно, используя данные измерений на

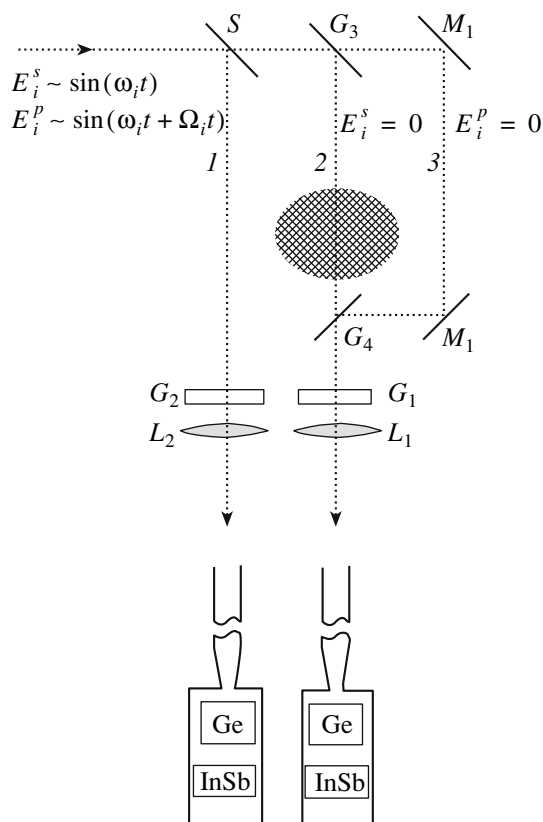


Рис. 1. Одна из возможных схем интерферометра для работы с пучками от диагностического лазера, работающего в режиме генерации линейных ортогональных поляризаций. S – расщепитель пучка, G – проволочный поляризатор, M – зеркало, Ge и InSb – фотоприемники устройства раздельного детектирования, L – фокусирующая линза; 1 – опорный канал, 2 – измерительный канал, 3 – канал сравнения.

разных длинах волн, расчетным путем учесть влияние источника нестабильности.

Сеточный поляризатор G_1 служит для смешения ортогональных поляризаций. Он повернут под углом 45° к направлениям поляризаций волн, и после него на фотодетекторе формируется интерференционный сигнал

$$U \sim \sqrt{\alpha} \cos(\Omega_i t + \Phi),$$

где α – коэффициент прохождения (по мощности) по измерительному каналу.

Канал 1 является опорным. Часть излучения обеих поляризаций ответвляется в него делителем S и смешивается поляризатором G_2 .

Таким образом, в интерферометре распространяются два потока излучения: основной, состоящий из двух соосных гауссовых пучков лазерного излучения с длинами волн 118.6 и 220 мкм, каждый из которых несет информацию о фазе и амплитуде волны, проходящей через плазму, и опорный, позволяющий постоянно контролиро-

вать амплитуду и начальную фазу биений каждой из вышеупомянутых волн.

Поскольку как параметры плазмы импульсного разряда, так и спектр вибраций установки несколько изменяются от импульса к импульсу, то для повышения точности измерений необходимо, чтобы регистрация сигналов на обеих длинах волн в интерферометре происходила одновременно.

Ниже описаны конструкция и характеристики двухканального приемника для одновременной регистрации излучения лазера с биениями ортогональных поляризаций на длинах волн 118.6 и 220 мкм при интерферометрической схеме плазменных измерений.

КОНСТРУКЦИЯ

Информацию об измеряемом объекте можно получить из отношения амплитуд и разности фаз сигналов опорного и измерительного каналов на каждой (118.6 и 220 мкм) из рабочих длин волн интерферометра.

Для чувствительного приема излучения мы использовали полупроводниковые фотосопротивления, охлажденные до температуры 4.2 К. Для регистрации излучения с $\lambda = 118.6$ мкм выбраны кристаллы легированного сурьмой германия (Ge:Sb), а 220 мкм – кристаллы антимида индия n -типа (n -InSb) в магнитном поле.

Конструктивное исполнение опорного и измерительного каналов одинаковое, в каждом из каналов используется своя пара приемных кристаллов. Раздельная по длинам волн регистрация излучения в каждом канале достигается благодаря различию селективных характеристик кристаллов.

Энергия активации E_a примесей сурьмы в германии составляет 9.6 мэВ [5]. Примесное поглощение велико при длинах волн до

$$\lambda_r = hc/(E_a + k_B T),$$

что составляет 125 мкм для Ge:Sb при 4.2 К. Для германия с другими мелкими примесями граница примесного поглощения λ_r проходит при меньших длинах волн (118 мкм для Ge:Al, 115 мкм для Ge:V и т.д.), и излучение с $\lambda = 118.6$ мкм H_2O -лазера поглощается в них менее эффективно. В то же время, излучение с длиной волны 220 мкм в Ge:Sb практически не поглощается, так как лежит существенно дальше красной границы фотоэффекта.

В антимида индия прием излучения узкополосный, обусловленный циклотронным резонансным поглощением в магнитном поле. На рис. 2 показаны кривые отклика n -InSb на излучение H_2O -лазера с $\lambda = 118.6$ мкм (кривая 2) и с $\lambda = 220$ мкм (кривая 1) в зависимости от магнитного поля, измеренные с помощью приемника, описанного в [6].

По этим кривым мы нашли оптимальную для селективного приема величину магнитного поля $B = 0.55$ Тл, при которой n -InSb имеет высокую чувствительность на длине волны 220 мкм при большом отношении сигналов на 220 и 118.6 мкм.

Кристаллы Ge:Sb и n -InSb имеют достаточно сходные оптические характеристики. У германия коэффициент преломления $n = 4.0$, а глубина проникновения на $\lambda = 118.6$ мкм составляет ~ 1 см. У антимонида индия коэффициент преломления $n = 4.1$, а глубина проникновения на $\lambda = 220$ мкм – 1.5 см [6]. Это позволяет одновременно и эффективно использовать их в одной оптической системе.

В каждом из каналов используются одинаковые (симметричные) интегрирующие камеры. Такая камера – почти замкнутая полость с хорошо отражающими стенками и небольшим отверстием для ввода излучения – позволяет существенно увеличить поглощение благодаря большому числу проходов излучения сквозь приемный кристалл. Каждая камера имеет поперечное сечение 20 мм^2 и отверстие для ввода излучения площадью 0.8 мм^2 . В каждой камере помещены монокристалл n -InSb толщиной 3 мм и монокристалл Ge:Sb толщиной 2 мм и сечением $\sim 15 \text{ мм}^2$. Первым на пути излучения расположен кристалл Ge:Sb, практически не поглощающий излучение с $\lambda = 220$ мкм, при этом до кристалла n -InSb доходит меньше излучения с $\lambda = 118.6$ мкм, что дополнительно улучшает селективность приема.

Весь приемник выполнен в виде вставки (рис. 3) в 10-литровый гелиевый транспортный дьюар отечественного производства (внутренний диаметр горловины дьюара 12 мм). Низкотемпературный блок (рис. 4), включающий в себя собирающие конусы 1, интегрирующие камеры 2, 3, магнитную систему 7 и плату с предусилителями 9, опускается в дьюар и охлаждается до температуры 4.2 К. Охлаждаемая часть крепится к верху вставки (см. рис. 3) двумя трубками 2 $\varnothing 4$ мм из нержавеющей стали. Трубки одновременно служат лучеводами, по которым к приемным кристаллам поступает излучение. Кроме того, к низкотемпературной части подведены четыре трубки $\varnothing 1$ мм с пропущенными внутри них проводами, по которым подводится питание и выводятся сигналы с приемных кристаллов. Все трубки заключены во внешнюю трубку $\varnothing 11$ мм (15), согласующуюся с вакуумным уплотнением вверху транспортного дьюара. Внизу внешняя трубка доходит только до верха гелиевой камеры дьюара. Вверху она вакуумно-плотно впаяна во фланец 14, прикрепленный к алюминиевому корпусу прибора 8, внутри которого расположены аккумуляторные батареи и электронные платы, а на поверхность выведены разъемы, элементы управления и индикации.

Два лучевода проходят сквозь фланец 14 и корпус прибора. На верхней поверхности корпуса

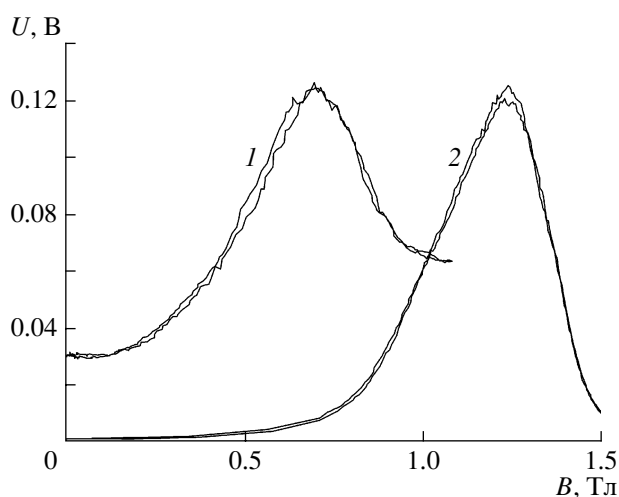


Рис. 2. Отклик InSb-детектора на излучение с длиной волны 220 мкм (1) и 118.6 мкм (2) в зависимости от магнитного поля.

они впаяны во фланец 13, в котором сделаны входные окна 12 из черного полиэтилена. Черный полиэтилен практически не пропускает излучение с $\lambda < 20$ мкм, уменьшая нежелательную засветку приемных кристаллов. Детектируемое излучение через входные окна по лучеводам проходит в низкотемпературный блок, где с помощью двух полированных внутри конусов 1 (см. рис. 4) собирается внутри интегрирующих камер 3, 4. Благодаря конусам, с одной стороны, существенно увеличивается входная площадь (2 входа по 10.3 мм^2), а с другой – уменьшается угол зрения приемника, что ослабляет боковую засветку и способствует измерениям с узконаправленным излучением H_2O -лазера. Измеренный угол зрения составил $\pm 10^\circ$ (телесный угол $\Omega = 0.1 \text{ ср}$).

Магнитное поле, в котором расположен кристалл n -InSb, создается системой с постоянными магнитами, показанной на рис. 4б. При выборе геометрии магнитной системы исходили из требований компактности и простоты. Кроме того, в объеме кристалла n -InSb индукция поля должна быть близкой к оптимальной величине (0.45–0.65 Тл), поле должно иметь приемлемую однородность при достаточно большом разбросе по направлению ($\pm 45^\circ$), обеспечивающем при азимутально избирательном циклотронном резонансе более полное поглощение почти диффузного внутри камеры излучения. В месте расположения кристаллов Ge:Sb 2 индукция поля должна быть мала (< 0.1 Тл).

Пара интегрирующих камер собрана из двух частей. Верхняя часть корпуса 4 интегрирующих камер сделана из магнитомягкой стали (Ст.3) и служит как элементом магнитной цепи для формирования поля на кристаллах InSb, так и экраном для кристаллов Ge:Sb. Нижняя деталь 3 выполнена из меди и задает размер магнитного зазо-

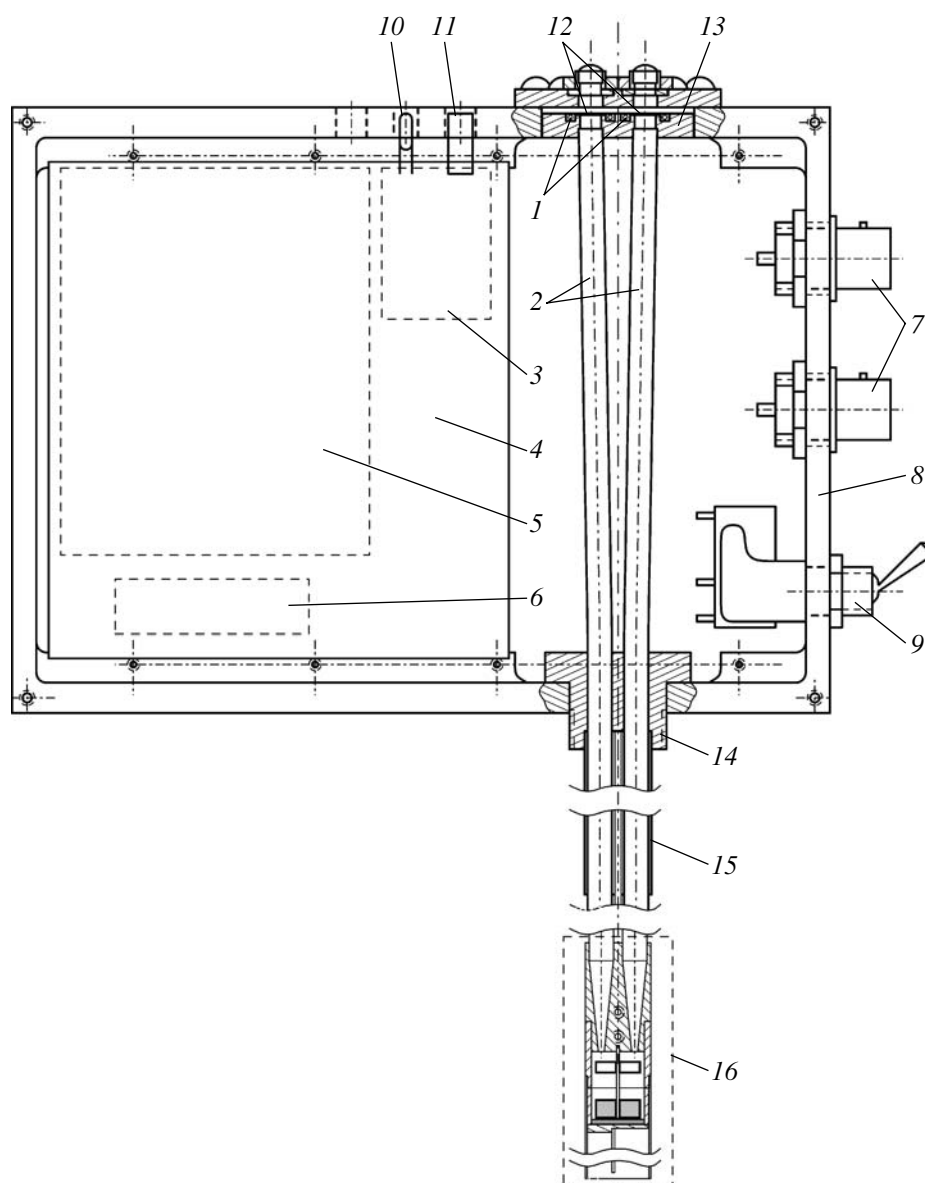


Рис. 3. Конструкция вставки. 1 – вакуумное уплотнение (O-ring); 2 – оптические каналы; 3 – блок зарядки аккумуляторов; 4 – плата; 5 – блок аккумуляторных батарей; 6 – блок подстройки напряжений смещения на кристаллах; 7 – выходы; 8 – корпус; 9 – переключатель; 10 – светодиод для индикации заряда аккумуляторов; 11 – разъем для зарядки аккумуляторов; 12 – входные окна; 13 – верхний фланец; 14 – нижний фланец; 15 – трубка под горловину транспортного дюара ($\varnothing 11$ мм); 16 – низкотемпературная часть.

ра, в котором расположены оба кристалла InSb (5). Полости обеих деталей разделены на две интегрирующие камеры медной, плотно подогнанной к стенкам перегородкой. Источником магнитного поля служит стопка из четырех постоянных магнитов (типа Альнико с остаточной индукцией ~ 1 Тл) 7 толщиной 1 мм каждый, которые плотно подогнаны и вставлены в выемку в нижней детали 3. Сверху стопка магнитов упирается в перегородку между интегрирующими камерами. Отражающая никелированная поверхность верхнего

магнита при этом является нижней стенкой обеих интегрирующих камер. Снизу стопка магнитов подходит точно под обрез нижней детали 3.

Нижняя деталь 3 крепится к верхней с помощью стального винта 6 через стальную шайбу 8. Винт и шайба также служат элементами магнитной цепи. К выступу на шайбе припаяна плата 9 с двумя охлаждаемыми предусилителями, по одному для каждого приемного кристалла Ge:Sb. К верхней детали 4 снизу соосно припаяна тонкостенная трубка $\varnothing 11$ мм (на рисунке не показана)

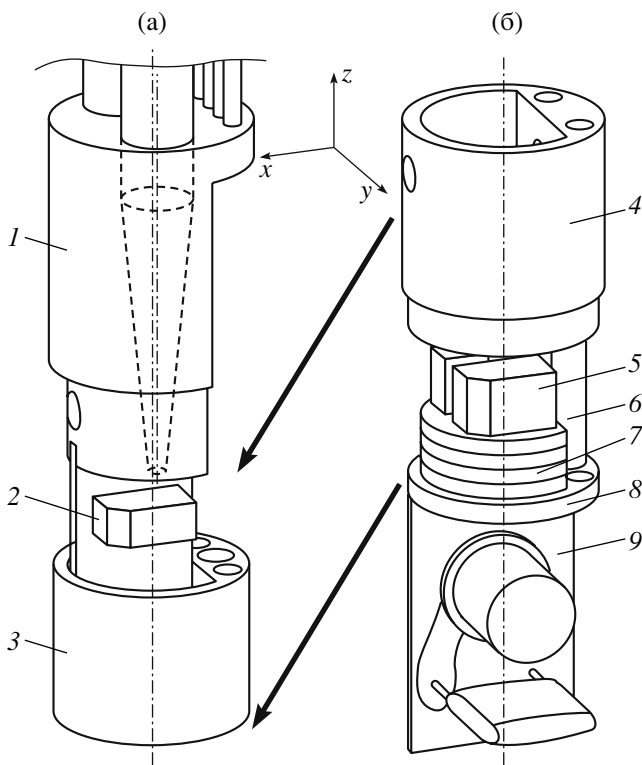


Рис. 4. Низкотемпературная часть: детали, не входящие в магнитную цепь, (а) и детали магнитной цепи (б). 1 – верхняя деталь с собирающими конусами; 2 – кристаллы Ge:Sb; 3 – нижняя часть интегрирующей камеры с перегородкой, на которой прикреплены приемные кристаллы; 4 – верхняя часть интегрирующей камеры и верхний полюс магнитной цепи; 5 – кристаллы InSb; 6 – соединительный винт, обратный магнитопровод; 7 – стопка из четырех постоянных магнитов; 8 – шайба для крепления деталей, элемент магнитопровода; 9 – плата с предусилителями.

из нержавеющей стали. Нижняя деталь 3, шайба 8, соединительный винт 6 и плата 9 с предусилителями плотно вставлены внутрь этой трубки, что обеспечивает точное расположение деталей и механическую защиту элементов от внешних воздействий.

Индукция поля постоянных магнитов была измерена с помощью измерителя магнитной индукции Ш1-8. Размеры элементов магнитной системы и величина индукции магнитного поля были рассчитаны на компьютере.

Частоты биений излучения H₂O-лазера лежат в диапазоне от 10 до 100 кГц, поэтому в качестве верхней граничной частоты приемника достаточно выбрать величину $f_b = 200$ кГц. Сопротивление кристаллов Ge:Sb в рабочей точке составляет ~300 кОм, а емкость C_l линии передачи от охлаждаемой к высокотемпературной части приемника ~0.1 нФ, что давало бы верхнюю граничную частоту измерений $1/(2\pi R_g C_l) = 10$ кГц. Чтобы расширить диапазон до 200 кГц, в схему обработ-

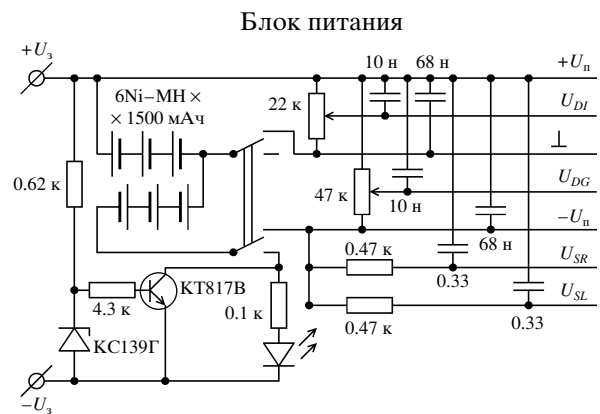
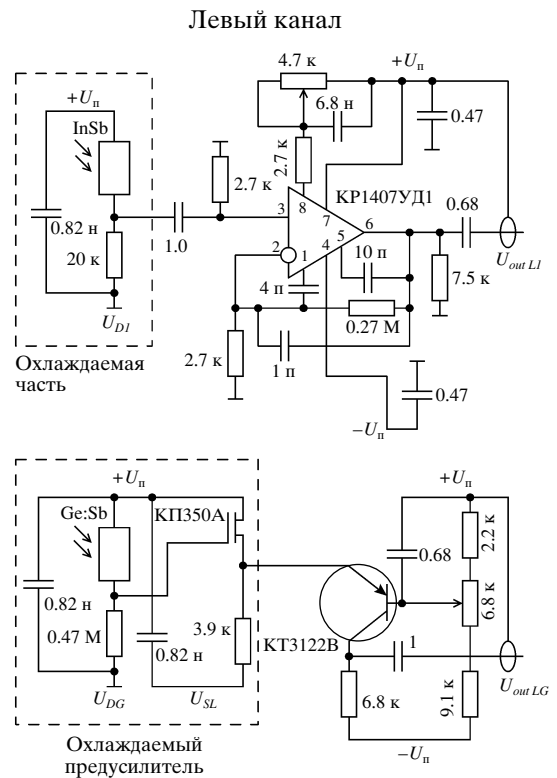


Рис. 5. Принципиальная электрическая схема.

ки сигнала (рис. 5) включены два охлаждаемых предусилителя тока, расположенные максимально близко к кристаллам Ge:Sb. Каждый предусилитель представляет собой истоковый повторитель, собранный на базе кремниевых с изолирующим затвором транзистора КР350А, сохраняющего способность работать в жидком гелии. Повторитель уменьшает выходное сопротивление охлаждаемой части схемы до ~1 кОм, что позволяет передавать без потерь сигналы от Ge:Sb к усилителям, находящимся при комнатной температуре. В качестве последних использованы транзисторные каскады по схеме с общей базой, имеющие широ-

кий динамический диапазон по выходу (± 2 В). Коэффициент усиления сигнала с Ge:Sb-детектора равен 10.

Сопrotивление приемных кристаллов n -InSb в рабочей точке невелико (~ 10 кОм), и необходимости в охлаждаемых предусилителях нет. Для усиления сигнала использован в.ч.-усилитель на базе микросхемы КР1407УД1. Каждая интегральная схема охвачена отрицательной обратной связью, задающей коэффициент усиления по напряжению, равный 40, и элементами частотной коррекции для линейного усиления в заданном частотном диапазоне. Кроме этого, собраны и настроены схемы коррекции нуля, позволяющие получить максимальный выходной сигнал до ± 2.5 В в каждом канале.

Чтобы иметь возможность работать с механическим прерывателем излучения (с частотой ~ 200 Гц), нижняя граничная частота усилителей выбрана равной $f_n = 150$ Гц.

КАЛИБРОВКА И ХАРАКТЕРИСТИКИ

Калибровка приемников излучения с приемными кристаллами InSb проводилась по методике, описанной в [6]. В качестве реперного использовалось равновесное тепловое излучение комнаты, отклик на которое измерялся с помощью зеркального механического прерывателя излучения, помещенного непосредственно перед входным окном приемника. При этом мощность излучения, освещающего кристалл n -InSb, составила:

$$W_b = \frac{k_B T_k A \Omega}{2\pi\lambda^2} \Delta\omega \approx 7.5 \cdot 10^{-8} \text{ Вт},$$

где $\Omega = 0.1$ ср; $T_k = 293$ К – температура комнаты; $A = 10.3$ мм² – площадь входного окна; $\lambda = 220$ мкм; $\Delta\omega = 5 \times 10^{12}$ рад/с – ширина полосы поглощения излучения в n -InSb, измеренная нами ранее (см. рис. 2). Амплитуда отклика U_b на тепловое излучение комнаты 1.5 мВ, и вольт-ваттная чувствительность InSb-приемников равна

$$S_I = 2U_b/W_b = 40 \text{ В/мВт}.$$

Обнаружительная способность с учетом того, что измеренное напряжение шума $U_n = 2$ мВ, составила:

$$D_I = S_I \sqrt{f_b} / U_n \approx 1.1 \cdot 10^{10} \sqrt{\text{Гц}}/\text{Вт}.$$

Полученные результаты несколько уступают параметрам InSb-детектора, описанного в [6], но, принимая во внимание его существенно более сложную и не столь оптимальную геометрию, они вполне приемлемы. Вольт-ваттная чувствительность приемников с приемным кристаллом Ge:Sb к излучению с $\lambda = 118.6$ мкм H_2O -лазера

определялась из сравнения их откликов на этой длине волны с откликом n -InSb-приемников на излучение с $\lambda = 220$ мкм. При этом отношение мощностей генерации H_2O -лазера на этих двух длинах волн измерялось при помощи широкополосного пироэлектрического приемника.

Измерения проводились следующим образом. Излучение H_2O -лазера делилось полупрозрачным зеркалом на два луча. Один подавался на пироэлектрический приемник, другой – на вход устройства с InSb- и Ge:Sb-приемниками. H_2O -лазер настраивался на генерацию излучения только с длиной волны 118.6 мкм, и измерялись отклики Ge:Sb-приемника U_G и пироэлектрического приемника U_{118} . Затем H_2O -лазер настраивался на излучение только с длиной волны 220 мкм, и измерялись отклики InSb-приемника U_I и пироэлектрического приемника U_{220} . Вольт-ваттная чувствительность Ge:Sb-приемников рассчитывалась по формуле:

$$S_G = \frac{U_G U_{220}}{U_I U_{118}} S_I \approx 400 \text{ В/мВт}.$$

Напряжение шума для Ge:Sb-приемников составило 3 мВ, и его обнаружительная способность равна $7 \cdot 10^{10}$ Гц^{1/2}/Вт.

Наводки между каналами составили: перекрестные (с Ge:Sb на InSb или InSb на Ge:Sb в другом канале) – не больше 1/100 сигнала; прямые (с Ge:Sb на Ge:Sb или с InSb на InSb в другом канале) – около 1/50 сигнала. Отклик Ge:Sb на излучение с $\lambda = 220$ мкм оказался в 35 раз слабее, чем на излучение с $\lambda = 118.6$ мкм. Отклик InSb на излучение с $\lambda = 118.6$ мкм оказался в 20 раз меньше, чем на излучение с $\lambda = 220$ мкм той же мощности.

Селективность приема излучения с $\lambda = 118.6$ мкм и 220 мкм в каждом из каналов может быть существенно увеличена при узкополосной регистрации сигналов с выхода приемника на частотах биений, различных для каждой из длин волн.

Расход жидкого гелия при непрерывной работе прибора не превышает ~ 1 л/сут.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Завьялов В.В., Богомолов Г.Д. // ПТЭ. 1982. № 3. С. 174.
2. Завьялов В.В. Дисс. ... канд. физ.-мат. наук. М.: ИФП АН СССР, 1976.
3. Tishchenko E.A., Zav'yalov V.V., Zatsepin V.G., Lasarev V.B. // Proc. XIII Int. Conf. on Phen. in Ionized Gases. DDR, Berlin, Sept 12–15 1977. P. 161.
4. Капица П.Л. // ЖЭТФ. 1969. Т. 57. Вып. 6 (12). С. 1801.
5. Зеегер К. Физика полупроводников. М.: Мир, 1977.
6. Богомолов Г.Д., Завьялов В.В., Зотова Е.А., Шампаров Е.Ю. // ПТЭ. 2002. № 1. С. 87.