

БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ ДЕТЕКТОР ИЗЛУЧЕНИЯ СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА НА ЦИКЛОТРОННОМ РЕЗОНАНСЕ В InSb

© 2002 г. Г. Д. Богомолов, В. В. Завьялов, Е. А. Зотова, Е. Ю. Шампаров

Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН

Россия, 117334, Москва, ул. Косыгина, 2

Поступила в редакцию 25.06.2001 г.

Описана конструкция и представлены характеристики детектора на основе кристалла *n*-InSb, охлаждаемого жидким гелием, с перестройкой полосы приема сигналов в диапазоне длин волн 80–250 мкм (частота 3.75–1.2 ТГц). Обнаружительная способность детектора 10^{12} Гц^{1/2}/Вт при частоте 2 ТГц. Представлены также принципиальные схемы и описана работа электронных устройств детектора, в частности, широкополосный усилитель.

Чувствительные и удобные в работе детекторы являются важным средством освоения субмиллиметрового диапазона длин волн ($\approx 0.03 < \lambda < 1$ мм). В последнее время в связи с разработкой перестраиваемых лазеров на свободных электронах (л.с.э.) субмиллиметрового диапазона [1–3] к детекторам дополнительно предъявляются повышенные требования по быстродействию – для регистрации импульсов микросекундной длительности, типичных для л.с.э.

Среди полупроводниковых детекторов излучения субмиллиметрового диапазона можно выделить детектор на циклотронном резонансном поглощении в InSb, охлаждаемом до гелиевых температур [4]. В этом кристалле чувствительность к излучению существенно возрастает вблизи циклотронного резонанса, что позволяет перестраивать детектор по частоте внешним магнитным полем, выделяя участки спектра излучения без дополнительной фильтрации [5]. Время релаксации сопротивления InSb достаточно мало (< 0.1 мкс [6]), и он пригоден для регистрации огибающей макроимпульса излучения импульсных л.с.э. [1, 2].

Для узкополосной регистрации излучения в рабочей области длин волн кристалл InSb должен находиться в перестраиваемом однородном магнитном поле напряженностью 0.6–1.8 Тл [7]. Обычные электромагниты (или соленоиды) с такими полями имеют большие габариты и потребляют значительный ток. Мы разработали для детектора компактный сверхпроводящий электромагнит броневого типа с магнитопроводом из магнитно-мягкой стали (Ст. 3).

Конструкция электромагнита показана на рис. 1. Электромагнит состоит из верхнего 2 и нижнего 8 полюсов, магнитопровода 3 и катушки 4 (800 витков одножильного омедненного и лакированного

NbTi-провода полным диаметром 0.32 мм и с диаметром сверхпроводящей NbTi-жилы 0.25 мм). По оси верхнего полюса проточен конус с полированными стенками для подвода детектируемого

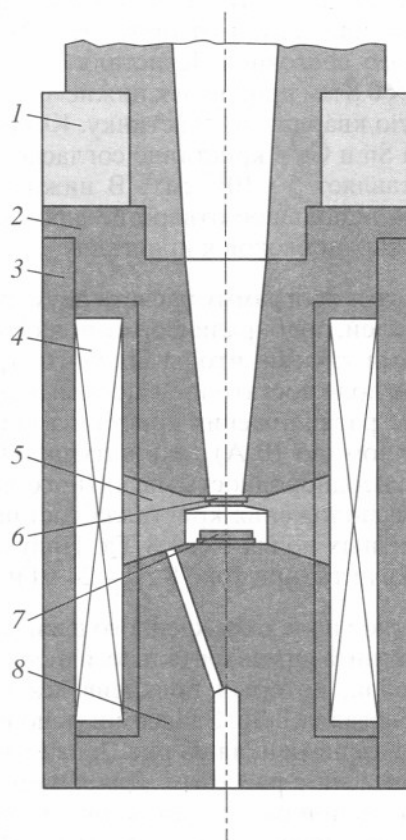


Рис. 1. Конструктивный чертеж электромагнита (в разрезе). 1 – тепловой ключ, 2 – верхний полюс, 3 – обратный магнитопровод, 4 – катушка, 5 – латунная вставка с интегрирующей камерой, 6 – охлаждаемое окно, 7 – кристалл InSb, 8 – нижний полюс.

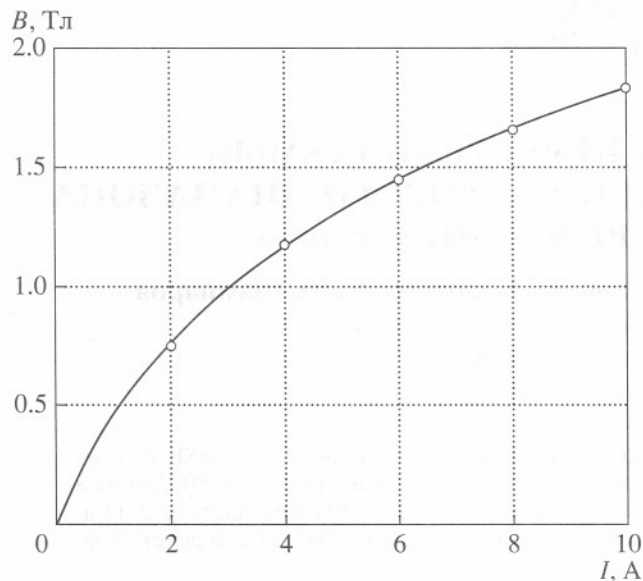


Рис. 2. Магнитное поле в зазоре электромагнита от тока катушки.

излучения к кристаллу. Угол между образующей и осью конуса 7° . Между полюсами электромагнита помещается латунная вставка 5 с интегрирующей камерой, стенки которой отполированы до зеркального состояния. Кристалл InSb 7 размером $3 \times 3 \times 0.8$ мм приклеен к нижнему полюсу через тонкую кварцевую пластинку. Концентрация примесей Sn и Ge в кристалле согласно сертификату составляет $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. В нижнем полюсе проделано небольшое отверстие для подвода измерительных проводов к кристаллу.

Используя программу расчета двумерных магнитных полей, подбирали форму полюсов и зазор между ними такими, чтобы получить требуемое магнитное поле достаточно высокой однородности в месте расположения кристалла при сравнительно малом (до 10 А) токе катушки. Согласно расчетам, неоднородность магнитного поля $\Delta B/B$ в месте расположения кристалла составила $\leq 2\%$ при магнитных полях 0.6–1.8 Тл. Индуктивность электромагнита (при токе 8 А) – 24 мГн.

Магнитное поле охлажденного в жидком гелии электромагнита предварительно измерялось датчиком Холла, который приклеивался к полюсу вместо кристалла InSb. Зависимость поля от тока в катушке, приведенная на рис. 2, находится в хорошем согласии с расчетом. Для измерений магнитного поля при работе детектора используется дополнительный датчик Холла, который приклеен к нижнему полюсу электромагнита в небольшом углублении рядом с отверстием для вывода измерительных проводов. Показания датчика отградуированы по току электромагнита.

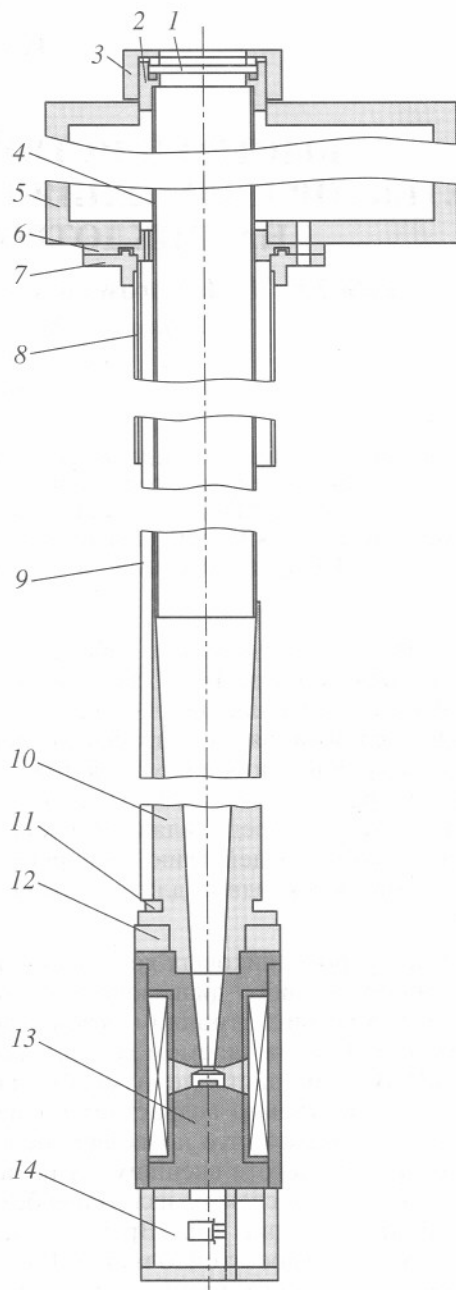


Рис. 3. Конструкция вставки. 1 – входное вакуумное окно (полиэтилен 1 мм и черный полиэтилен 0.25 мм); 2 – фланец и 3 – гайка крепления вакуумного окна (латунь); 4 – волновод (нержавеющая сталь); 5 – корпус (алюминий); 6 – фланец, соединяющий волновод, корпус и внешнюю трубку (латунь); 7 – ответный фланец (латунь); 8 – внешняя трубка (нержавеющая сталь); 9 – две трубки для соединительных проводов (нержавеющая сталь); 10 – собирающий конус (латунь); 11 – датчик температуры; 12 – тепловой ключ; 13 – электромагнит; 14 – охлаждаемый преусилитель.

Малые размеры электромагнита позволили выполнить конструкцию детектора в виде вставки в транспортный гелиевый дюар (25 л) отечественного производства с горловиной $\varnothing 24$ мм. По сравне-

нию с использованием специального дюара для детектора существенно упрощается работа с прибором, сокращается время, требуемое для его охлаждения и отогрева, а также уменьшается расход жидкого гелия. При одной заливке дюара детектор работал не менее двух недель.

Конструкция вставки показана на рис. 3. Механической основой вставки являются две соосные тонкостенные (0.3 мм) трубки из нержавеющей стали. Верхняя часть внешней трубки 8 (Ø22 мм) герметично впаяна в латунный фланец 7. Размер трубки выбран таким, чтобы с помощью O-ринга и поджимающей гайки обеспечить вакуумное соединение с горловиной транспортного гелиевого дюара с регулировкой глубины погружения охлаждаемой части вставки в жидкий гелий. Длина трубки такая, что ее нижний конец при максимальном погружении вставки не доходит до уровня гелия полностью залитого дюара.

Внутренняя трубка 4 (Ø16 мм) зеркально отполирована изнутри и служит сверхразмерным волноводом, по которому излучение направляется к приемному кристаллу. Для ввода излучения на верхнем конце внутренней трубки имеется круговой фланец 2, в котором гайкой 3 герметично зажато двухслойное входное окно 1 из полиэтилена толщиной 1 мм и черного полиэтилена толщиной 0.25 мм, не пропускающее излучения с длиной волны <math>< 25 \text{ мкм}</math>. К нижней части трубки припаян полированный внутри латунный конус 10 (угол между образующей и осью конуса 4°). Снизу к латунному конусу крепится электромагнит 13. На внешней поверхности латунного конуса в двух выемках расположены тепловой ключ 12 и угольный резистор 11, служащий датчиком температуры. При этом нижний торец латунного конуса 10 внутри гладко состыкован с верхним торцом второго полированного конуса, выполненного в верхнем полюсе электромагнита (см. рис. 1). Оба конуса формируют диаграмму приема излучения, расчетный угол которой составляет 12° . Измеренная диаграмма приема с достаточной точностью совпадает с расчетом.

Через второй конус излучение попадает в интегрирующую камеру, которая предназначена как для увеличения освещенности кристалла, так и для равномерности его освещения по площади. Входным окном интегрирующей камеры служит отверстие Ø2 мм, закрытое диском из монокристаллического кварца толщиной 1 мм (6 на рис. 1). Холодное кварцевое окно в паре с входным окном из черного полиэтилена практически не пропускают излучения с длиной волны <math>< 60 \text{ мкм}</math> [8]. При больших длинах волн поглощение в кристаллическом кварце резко уменьшается. Согласно оценкам, в рабочем диапазоне длин волн доля излучения, отраженного от интегрирующей камеры

с кристаллом, составляет от 0.25 в длинноволновой части диапазона до 0.6 при $\lambda = 80 \text{ мкм}$.

Тонкие медные проводники, по которым передаются сигналы и подается напряжение питания, пропущены в дюар через две трубки 9 из нержавеющей стали Ø3 мм и толщиной стенок 0.1 мм. Трубки припаяны к внешней поверхности внутренней трубки и латунного конуса и через фазор между внутренней и внешней несущими трубками проведены к латунному фланцу 6, герметично припаянному поверх внутренней трубки. Проводники выпущены наружу через два отверстия в этом фланце. Для вакуумной изоляции эти отверстия залиты плицеином и сверху для механической защиты плицеина и проводов нанесен эластичный плавящийся клей. Снизу к фланцу 6 через вакуумный разъем прикреплен ответный фланец 7, к которому припаяна внешняя трубка. Сверху к фланцу 6 крепится алюминиевый корпус 5 размером $140 \times 85 \times 45 \text{ мм}$, внутри которого помещены электронные схемы детектора и аккумуляторная батарея питания. На поверхности корпуса укреплены разъемы и элементы управления электронными схемами. Внутренняя нержавеющая трубка проходит через корпус до его верхней поверхности, где к ней крепится входное вакуумное окно 1.

Сопротивление кристалла InSb сильно зависит от индукции магнитного поля. Если для питания электромагнита использовать внешний источник тока, то шумовая компонента тока заметно снижает обнаружительную способность детектора. Поэтому измерения детектором проводятся в короткозамкнутом режиме сверхпроводящей катушки электромагнита. Ток вводится и выводится из электромагнита при помощи теплового ключа (1 на рис. 1), в котором отрезок NbTi-провода переводится в нормальное состояние. Для получения сверхпроводящего контакта в ключе концы проводов, выведенных из электромагнита, защищались, стравливался слой меди и затем провода сваривались электрической дугой. Этот контакт помещен внутрь нагревателя из тонкой константановой проволоки сопротивлением 75 Ом. Нагреватель крепится к корпусу несколько выше электромагнита, для тепловой изоляции нагревателя от жидкого гелия и от корпуса вставки используется тонкий слой пенополиэтилена.

Для защиты теплового ключа от разрушения при переходе из сверхпроводящего в нормальное состояние он шунтирован медным проводом длиной 5 см и Ø0.3 мм. Ток от внешнего источника подается по двум лакированным медным проводам Ø0.5 мм к соединенным параллельно катушке электромагнита тепловому ключу и шунту. При выключенном нагревателе тепловой ключ накоротко замыкает сверхпроводящую обмотку электромагнита. При подаче на нагреватель напряжения 5 В (мощность нагрева 0.33 Вт) сверх-

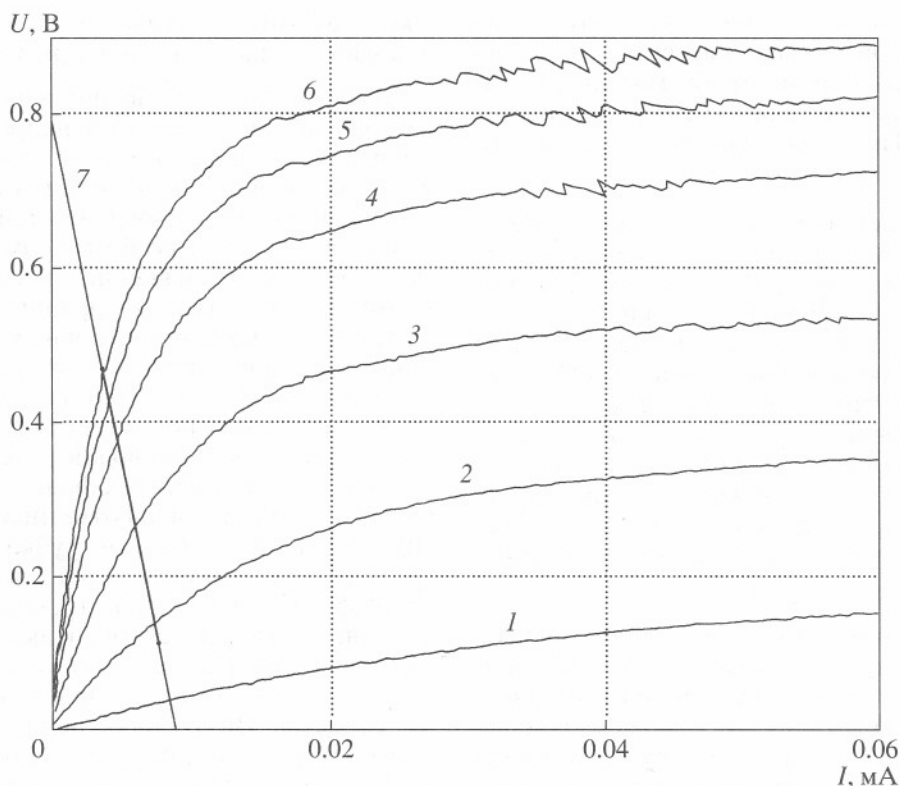


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики кристалла InSb в различных магнитных полях. 1 – $B = 0$ Тл; 2 – 0.75 Тл; 3 – 1.16 Тл; 4 – 1.45 Тл; 5 – 1.66 Тл; 6 – 1.83 Тл; 7 – режим питания кристалла по постоянному току в схеме детектора с выделенным участком, соответствующим рабочему диапазону детектора.

проводимость в ключе исчезает, и в электромагнит можно ввести ток от внешнего источника. Постоянная времени изменения тока в электромагните с разомкнутым тепловым ключом составляет ~ 2 мин. По достижении заданного тока в электромагните нагреватель выключается, а через 5 с можно выключить и источник тока. Во время работы электромагнита в короткозамкнутом режиме изменений магнитного поля за сутки не замечено.

Измерения показали, что в короткозамкнутом режиме электромагнита шумовая компонента сигнала детектора уменьшается в 20 раз по сравнению с работой при питании электромагнита стабилизатором постоянного тока П138 (при токе 4 А).

Характеристики детектора существенно зависят от режима питания кристалла по постоянному току, для выбора которого были измерены его вольт-амперные характеристики при различных значениях магнитного поля и с фоновым излучением комнатной температуры при открытом входном окне детектора.

Результаты измерений представлены на рис. 4. На вольт-амперных характеристиках видны локальные нерегулярности хода кривых с резким изменением производной (наиболее отчетливо нерегулярности видны на кривых 4–6), наиболее веро-

ятной причиной чего является ударная активация носителей с глубоких примесных уровней, сопровождаемая пробойными явлениями, что характерно для полупроводников в охлажденном состоянии (см., например, [5]). При перестройке детектора по частоте изменением магнитного поля рабочая точка кристалла (в координатах “ток–напряжение”) перемещается по нагрузочной прямой, определяемой напряжением питания и номиналом резистора, последовательно соединенного с кристаллом. Опыты показали, что если нагрузочная прямая проходит через область, где наблюдаются нерегулярности на вольт-амперных характеристиках, то при детектировании излучения появляются резкие нелинейности, а также увеличивается шумовая компонента сигнала вплоть до возникновения автогенерации. Приемлемой для работы является начальная область вольт-амперных характеристик (до перегиба на кривых), где такие нерегулярности отсутствуют.

Согласно болометрическому расчету, проведенному по стандартной методике [4], вольт-ваттная чувствительность dU/dW кристалла максимальна в этой же области.

В магнитном поле кристалл InSb имеет достаточно большое сопротивление (до ~ 150 кОм). Чтобы исключить емкость сигнальных проводов

и тем самым увеличить быстродействие, а также улучшить помехоустойчивость и шумовые характеристики детектора, сигнал с кристалла InSb усиливается охлаждаемым предусилителем на полевом транзисторе КП350А, расположенном в непосредственной близости от приемного кристалла в небольшом корпусе, прикрепленном снизу к электромагниту (14 на рис. 3).

Принципиальная схема предусилителя показана на рис. 5. Для расчета схемы использовались как вольт-амперные характеристики кристалла InSb (рис. 4), так и измеренные отдельно усилительные и частотные характеристики полевого транзистора, помещенного в жидкий гелий. Схема рассчитана [9] так, чтобы режимы работы кристалла и транзистора были близки к оптимальным в рабочей области длин волн, а верхняя частота выходного сигнала была ~1 МГц. Окончательные номиналы резисторов ($R_1 = 4$ кОм и $R_2 = 1$ кОм) подобраны экспериментально по максимуму отношения сигнал/шум на выходе детектора в центральной части рабочего диапазона длин волн. Для этого магнитное поле выставлялось на уровне 1.3 Тл, источником излучения служил H₂O-лазер, а на вход делителя напряжения, образованного резисторами R_1 и R_2 , подавалось внешнее напряжение питания и измерялись зависимости сигнала с детектора и интегрального шума на выходе детектора от этого напряжения. Коэффициент усиления (по напряжению) предусилителя зависит от сопротивления приемного кристалла и меняется от 1.6 при отсутствии магнитного поля до 0.8 при $B = 1.8$ Тл. Верхняя частота предусилителя уменьшается с ростом сопротивления кристалла InSb и составляет от 1.5 МГц без магнитного поля до 0.5 МГц при поле 1.8 Тл. Сигнал с предусилителя выводится наружу и дополнительно усиливается в 100 раз малошумящим усилителем на базе микросхемы КР1407УД1 [10]. Полоса пропускания усилителя 10 Гц–2 МГц.

Для питания всех электронных схем детектора используется батарея из шести Ni–Cd-аккумуляторов с низким выходным сопротивлением (по ~1 Ом) и емкостью 0.8 А · ч. При этом практически исключаются как сетевые помехи и шумы, так и помехи от других приборов, что особенно существенно при использовании детектора для регистрации импульсного излучения л.с.э. Питание схем – двухполярное напряжением ±3.9 В. Чтобы исключить контактные шумы, соединительные провода припаяны к выводам аккумуляторов. По мере необходимости аккумуляторы заряжают от отдельного источника стабильного тока 80 мА со схемой защиты аккумуляторов от перегрузки по напряжению при полной зарядке.

Для контроля работы детектора используются два дополнительных усилителя, принципиальные схемы которых представлены на рис. 6, рис. 7.

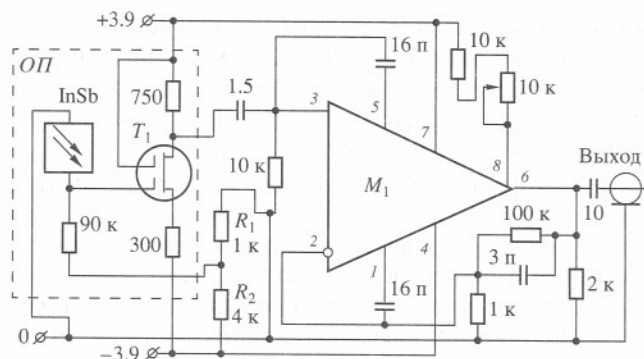


Рис. 5. Усилитель сигнала с кристалла InSb. ОП – охлаждаемый предусилитель; M_1 – КР1407УД1; T_1 – КП350А.

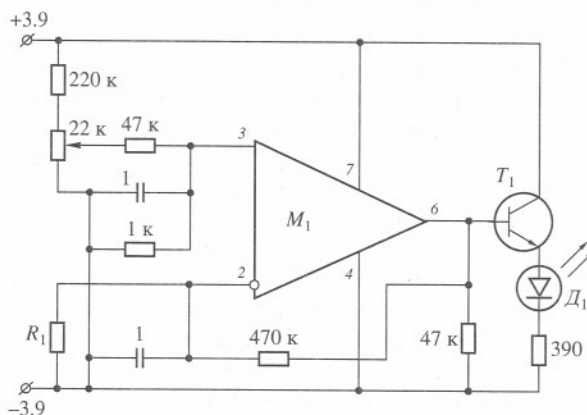


Рис. 6. Датчик температуры. M_1 – LT1077CN8; T_1 – КТ3130Е; D_1 – АЛ307АМ; R_1 – терморезистор.

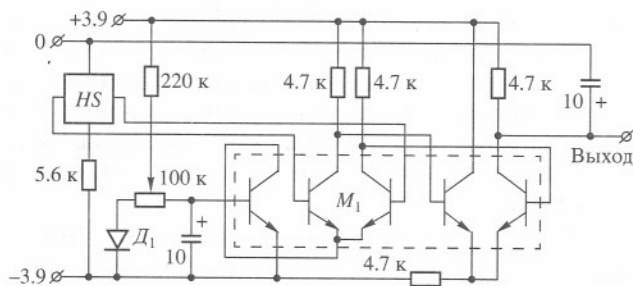


Рис. 7. Усилитель сигнала с датчика Холла. HS – датчик Холла; M_1 – КР198НТ1А; D_1 – КД514А.

Первый – усилитель сигнала с угольного датчика температуры охлаждаемой части детектора. Нагрузкой усилителя является визуальный индикатор температуры на светодиоде, помещенный на корпусе 5 (см. рис. 3). Схема настроена так, что светодиод гаснет при охлаждении детектора до 4.2 К. Такого порогового режима работы индикатора достаточно для определения уровня гелия в дуаре как при погружении вставки, так и при

длительной работе с детектором. Следует заметить, что во втором случае контроль за температурой необходим для предотвращения разрушения сверхпроводящей катушки при работе в короткозамкнутом режиме.

На вход второго усилителя подается сигнал с датчика Холла, измеряющего поле внутри электромагнита и, соответственно, ток в катушке (см. рис. 2) при работе с детектором. Постоянное напряжение с датчика Холла усиливается в 2000 раз, и сигнал преобразуется из дифференциального в однополярный, что существенно упрощает регистрацию.

Измерения вольт-ваттной и спектральной чувствительности детектора проводились при модуляции входного излучения обтюратором с частотой прерывания излучения 200 Гц.

В первой серии опытов для абсолютных измерений характеристик детектора с приемлемой для практики точностью вместо обычно используемых источников, имитирующих "черное тело", оказалось достаточно использовать тепловое излучение из комнаты, попадающее во входное окно детектора. Это излучение можно считать достаточно "черным", поскольку практически все поверхности в комнате, от которых может попадать излучение в поле зрения детектора, а также воздух, имеют высокий коэффициент поглощения в измеряемом диапазоне длин волн. При этом за время измерений (несколько минут) температура в комнате, которую измеряли обычным термометром, оставалась постоянной. Опыты показали, что посторонняя рассеянная засветка детектора коротковолновым излучением (от электрического освещения или из окна) практически не влияла на сигнал при работе с обтюратором. Это, с одной стороны, определяется существенно меньшей чувствительностью кристалла InSb к излучению вне его полосы циклотронного поглощения, и, с другой стороны, подтверждает эффективность спектральной фильтрации в оптическом тракте детектора.

Обтюратор представлял собой плоский алюминиевый диск с прорезями. Его поверхность, обращенная ко входному окну детектора, была зеркально отполирована. Плоскость обтюратора была выставлена перпендикулярно оптической оси детектора и помещена максимально близко к входному окну детектора (на расстоянии 2 мм).

Когда входное окно детектора закрыто зеркальной лопастью обтюратора, на кристалл попадает тепловое излучение (в том числе отраженное обратно лопастью обтюратора) от зеркальной поверхности оптического тракта, большая часть которого находится при температуре, существенно ниже комнатной, а также от входного полиэтиленового окна, находящегося при комнатной температуре, но практически прозрачного в

рабочем диапазоне длин волн. Сигнал от этого излучения минимум на порядок слабее сигнала от теплового излучения из комнаты при открытой щели обтюратора. При регистрации комнатного излучения детектором с частотной полосой приема до 1.5 МГц выходной сигнал в виде меандра наблюдался на экране осциллографа с отношением сигнал/шум не менее 2.

Для повышения точности измерений при записи зависимости напряжения на выходе детектора от магнитного поля $U_b(B)$ с засветкой детектора излучением комнатной температуры использовался режим узкополосного приема. Выходной сигнал подавался на вход синхронного детектора (Stanford Research Systems SR830DSP Lock-in Amplifier). На его вход синхронизации подавался сигнал с датчика вращения обтюратора. Сигнал с усилителя напряжения датчика Холла поступал на вход а.д.п., встроенного в синхронный детектор. Оба оцифрованных сигнала записывались в память компьютера с частотой 1 Гц. Предварительно в электромагнит вводился ток 10 А. Сигнал детектора начинали регистрировать одновременно с включением нагревателя теплового ключа. При включенном нагревателе ток в катушке электромагнита монотонно убывал. Через 5 мин при токе ~ 0.5 А запись прекращали.

Результаты измерения теплового излучения комнатной температуры (292 К) представлены на рис. 8.

Во второй серии опытов были проведены измерения спектральной полосы поглощения InSb, а именно зависимости сигнала на выходе усилителя детектора U_l от магнитного поля B при облучении детектора монохроматической линией газоразрядного лазера на парах воды [11]. Наиболее подробно измерения проводились на линии с длиной волны 118 мкм, находящейся в середине спектрального диапазона детектора. В этих опытах обтюратор располагался достаточно далеко от входного окна детектора под углом 70° к направлению лазерного пучка так, чтобы детектор не регистрировал модуляции фонового излучения из комнаты. Запись сигналов проводили по той же методике, как при опытах с тепловым излучением.

Результаты измерений обрабатывались следующим образом.

При достаточно малой мощности внешнего излучения отклик детектора пропорционален мощности W_a , которую поглощает кристалл InSb.

Кристалл InSb, находящийся в магнитном поле B_0 , эффективно поглощает излучение на циклотронной резонансной частоте [4, 5, 7]

$$\omega_0 = eB_0/m_* \quad (1)$$

в частотной полосе

$$\Delta\omega = -\tau^{-1}, \quad (2)$$

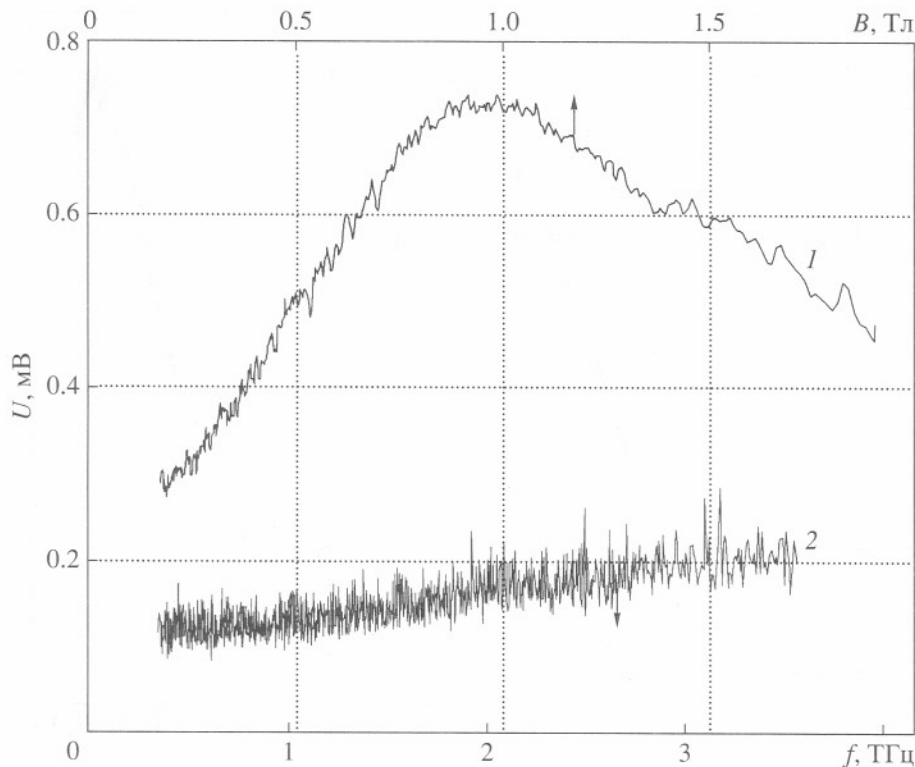


Рис. 8. Отклик детектора на тепловое излучение с $T = 292$ К (1) и интегральный шум на выходе детектора (2).

где τ – время между последовательными рассеяниями электронов [12], которое, как и частотная полоса, практически не зависит от магнитного поля; m_* – эффективная масса носителей заряда.

Поглощение излучения с частотой ω кристаллом, находящимся в поле B_0 , можно представить в виде

$$dW_a = \alpha(\omega)\eta(\omega - \omega_0)dW, \quad (3)$$

где dW – мощность излучения на входе детектора, α – коэффициент, определяемый спектральной прозрачностью оптического тракта детектора и отражением излучения от кристалла, η – эффективность резонансного поглощения излучения (η на резонансной частоте можно принять равной 1).

Отклик детектора при поле B_0 на тепловое излучение комнатной температуры, согласно формуле Планка (при $\hbar\omega \ll kT$)

$$U_b(B_0) = K(B_0)\beta \int_0^\infty \omega^2 \alpha(\omega)\eta(\omega - \omega_0)d\omega, \quad (4)$$

где $K(B_0)$ – коэффициент, определяемый режимом работы кристалла по постоянному току,

$$\beta = kTA\Omega/4\pi^2 c^2, \quad (5)$$

здесь $A = 1.5$ см² – площадь входного окна детектора, $\Omega = 0.01(15^\circ)$ – измеренный эффективный пространственный угол зрения детектора.

При оценке мощности теплового излучения, поглощаемого кристаллом InSb, реальная полоса поглощения аппроксимировалась прямоугольным распределением – эффективность поглощения в частотной полосе от $\omega_0 - \Delta\omega/2$ до $\omega_0 + \Delta\omega/2$ равна 1, а вне этой полосы равна нулю. Коэффициент $\alpha(\omega)$ – медленно меняющаяся гладкая функция, и при $\omega_0 > \Delta\omega/2$ для оценок достаточной точности можно принять, что

$$\alpha(\omega) = \alpha(\omega_0). \quad (6)$$

В таком приближении (4) сводится к простому виду

$$U_b(B_0) = K(B_0)\beta\omega_0^2\alpha(\omega_0)\Delta\omega. \quad (7)$$

При облучении детектора лазером с частотой ω_l и мощностью W_l отклик детектора

$$U_l(B_0) = K(B_0)\alpha(\omega_0)\eta(\omega_0 - \omega_l)W_l. \quad (8)$$

Разделив (8) на (7) с учетом (1) имеем

$$\eta(\omega_0 - \omega_l) \sim \frac{U_l(B_0)B_0^2}{U_b(B_0)}, \quad (9)$$

что является основанием для определения формы кривой резонансного поглощения $\eta(B_0)$ (или

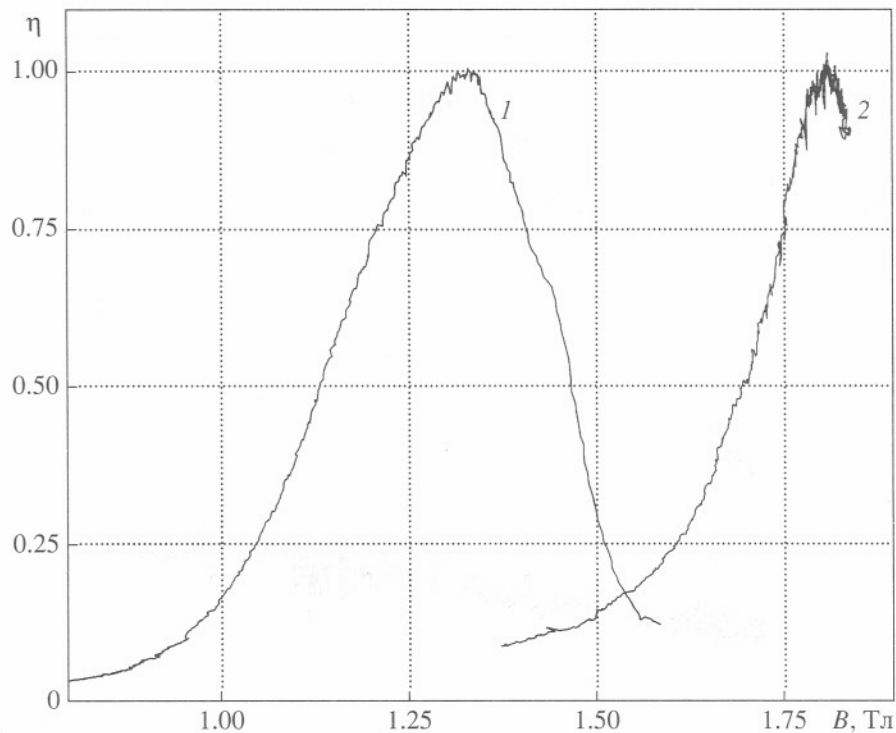


Рис. 9. Кривые резонансного поглощения кристаллом InSb излучения H_2O -лазера с длинами волн 118 мкм (1) и 78 мкм (2).

$\eta(\omega_0)$) по данным измерений, описанных выше. Эта кривая для линии излучения H_2O -лазера с $\lambda = 118$ мкм, прокалиброванная к $\eta_{\max} = 1$, приведена на рис. 9. При этом резонансное поле $B_0 = 1.30$ Тл и, следовательно, эффективная масса носителей заряда в InSb $m_* = 0.0143m_e$, что с хорошей точностью совпадает с табличными данными [13]. Полуширина кривой поглощения $\Delta B = 0.35$ Тл и, следовательно, полоса поглощения $\Delta\omega = 4.4 \cdot 10^{12}$ рад/с ($\Delta f = 0.7$ ТГц). Длина волны резонансного излучения связана с магнитным полем соотношением $\lambda_0, \text{ мкм} = 153/B, \text{ Тл}$. На этом же рисунке приведена нормированная к единице запись другой линии лазера на парах воды с $\lambda = 78$ мкм, находящейся на границе рабочего диапазона детектора.

Вольт-ваттная чувствительность детектора на резонансной частоте

$$S = K(B_0)\alpha(\omega_0), \quad (10)$$

как видно из (7), также рассчитывается по результатам измерений (рис. 10).

Для получения обнаружительной способности было измерено эффективное значение напряжения интегрального шума на выходе детектора в зависимости от магнитного поля (см. рис. 8). Для этого шум с выхода детектора (без обтюлятора) усиливался широкополосным усилителем до необходимого уровня и далее выпрямлялся германиевым диодом. Полученное таким образом амплитудное значение шума подавалось на второй

встроенный в синхронный детектор а.ц.п. и записывалось в компьютер. Изменение и запись поля электромагнита проводили так же, как при опытах с тепловым излучением. По вольт-ваттной чувствительности, измеренному напряжению шума и известному быстродействию детектора была рассчитана обнаружительная способность детектора, показанная на рис. 11.

К сожалению, из-за отсутствия в нашем распоряжении источников субмиллиметрового излучения микросекундной длительности нам пока не удалось непосредственно измерить быстродействие детектора. Однако известное быстродействие самого кристалла InSb и измеренные частотные характеристики усилителя не вызывают сомнений в получении положительных результатов.

По обнаружительной способности в субмиллиметровом диапазоне описанный в данной статье детектор несколько уступает детекторам на GaAs-эпитаксиальных пленках и сверхпроводящим болометрам, однако он значительно превосходит их по быстродействию. Его обнаружительная способность и быстродействие примерно такие же, как у детектора на основе спрессованного Ge:Ga [2], который использовался для регистрации макроимпульса л.с.э. Но детектор на основе InSb дополнительно обладает частотной избирательностью, что в значительной мере расширяет его область применения. Спектральная характеристика

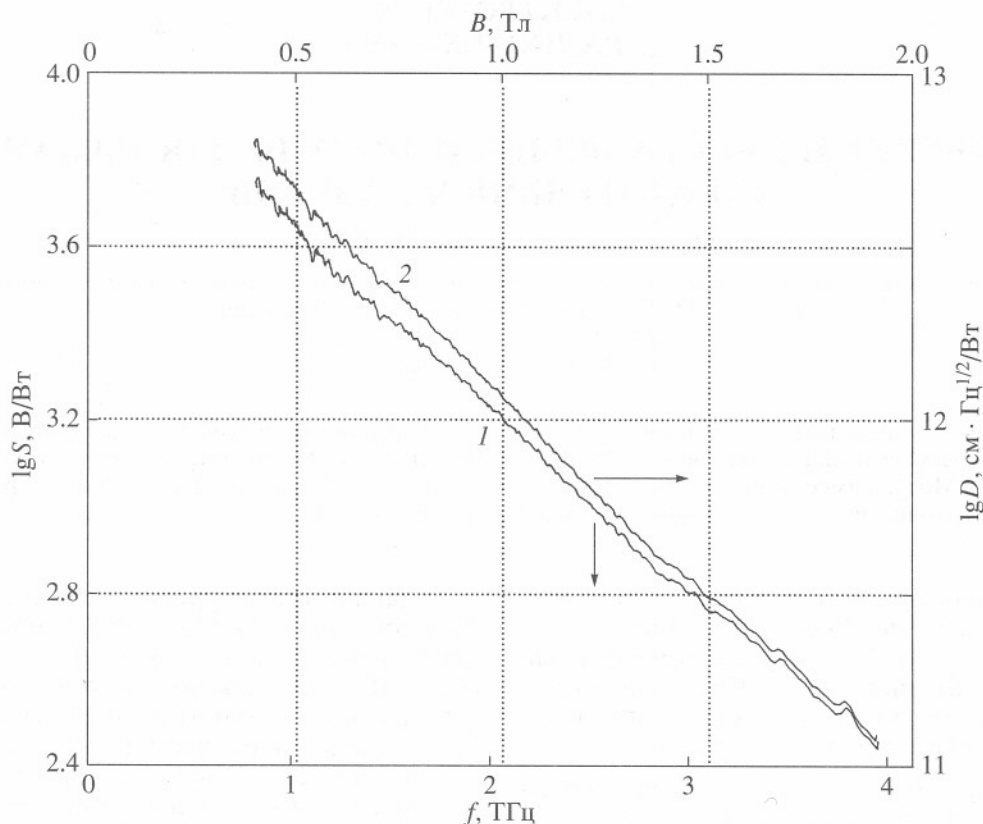


Рис. 10. Вольт-ваттная чувствительность детектора при перестройке по магнитному полю (1) и обнаружительная способность детектора (2).

обнаружительной способности детектора находится в хорошем согласии с данными работы [4].

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 99-02-16012, 01-02-17408).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Young Uk Jeong, Byung Cheol Lee, Sung Oh Cho et al. // Proc. AFEL'99. KAERI. Taejon, Korea, 1999. P. 96.
2. Ryukio Kato, Satoshi Kondo, Tetsuya Igo et al. // Proc. AFEL'99. KAERI. Taejon, Korea, 1999. P. 107.
3. Винокуров Н.А. // Proc. AFEL'99. KAERI. Taejon, Korea, 1999. P. 7.
4. Putley E. // Phys. Stat. Sol. 1964. № 6. P. 571; Длинноволновая инфракрасная спектроскопия: сборник статей. М.: Мир, 1966. С. 177.
5. Зеегер К. Физика полупроводников. М.: Мир, 1977.
6. Yngvesson S. // Proc. I Swedish-Russian-Finnish School for Young Scientists. Chalmersbibliotekets reproservice. Goteborg, Sweden, 2000. P. 77.
7. Куммель Ч. Введение в физику твердого тела. М.: Наука, 1978.
8. Loewenstein E., Smith D., Morgan R. // Applied Optics. 1973. V. 12. № 2. P. 398.
9. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. М.: Мир, 1982.
10. Новаченко И.В., Петухов В.М., Блудов И.П., Юровский А.В. Микросхемы для бытовой радиоаппаратуры: справочник. М.: Радио и связь, 1989.
11. Завьялов В.В., Богомолов Г.Д. // ПТЭ. 1982. № 3. С. 174.
12. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая механика (нерелятивистская теория). М.: Физматгиз, 1963.
13. Физические величины: справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991.