

ПРИМЕНЕНИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ФОТОПРИЕМНИКОВ В КВАЗИОПТИЧЕСКИХ ИНТЕРФЕРОМЕТРАХ ТЕРАГЕРЦЕВОГО ДИАПАЗОНА

В. К. Киселёв, В. К. Кононенко, Е. М. Кулешов, П. К. Нестеров

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины,
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
E-mail: kiseliiov@ire.kharkov.ua*

Описаны низкотемпературные фотоприемники терагерцевого диапазона частот, предназначенные для использования в квазиоптических интерферометрах, применяемых в исследованиях высокотемпературной термоядерной плазмы. Приведены результаты измерений фазовых сдвигов и углов поворота плоскости поляризации и соответствующие им погрешности измерения электронной концентрации плазмы. Ил. 4. Табл. 2. Библиогр.: 12 назв.

Ключевые слова: терагерцевый диапазон, низкотемпературный фотоприемник, квазиоптический интерферометр, термоядерная плазма.

Широкое применение в исследованиях высокотемпературной плазмы получили гетеродинные и гомодинные интерферометры, работающие в терагерцевом диапазоне частот и использующие в качестве источников электромагнитного излучения газоразрядные лазеры с различным типом рабочей смеси на фиксированные длины волн [1]. Поскольку плазменные установки имеют большие размеры (длинный СВЧ тракт) и большой поперечный размер плазмы (1 - 1,5 м), то для получения сигналов с высоким отношением сигнал/шум на промежуточных частотах интерферометра, вплоть до нескольких мегагерц, необходимо применение высокочувствительных быстродействующих приемников с малым уровнем шумов.

С этой целью был разработан ряд низкотемпературных квазиоптических приёмников на основе фотопроводимости полупроводников InSb и Ge. Они представляют собой фотоэлектрические приёмники на основе внутреннего фотоэффекта, сигнал отклика которых пропорционален интенсивности падающего излучения. Так как фототок пропорционален квадрату амплитуды, то эти приёмники являются квадратичными приборами. Резкое увеличение их чувствительности происходит при детектировании лазерного сигнала с более мощным и отличающимся по частоте гетеродинным сигналом. При этом на выходе приёмника появляется сигнал с разностной частотой и амплитудой, пропорциональной первой степени амплитуды входного сигнала. Для эффективного взаимодействия сигнального и гетеродинного лучей требуется параллельность их плоскостей поляризации и направлений распространения, а также нормальное падение на плоскость чувствительного элемента фотодетектора, т. е. выполнение условий согласования волновых фронтов.

Разработанные приёмники предназначены для работы в составе лазерных гомодинных интерферометров с рабочими длинами волн $\lambda=337, 195$ и 119 мкм. В качестве источников излучения на указанных длинах волн использовались соответственно HCN-, DCN- и H₂O- лазеры. С помощью перечисленных интерферометров измерялись фазовые сдвиги или углы поворота плоскости поляризации волн, прошедших через плазму в измерительном канале, относительно аналогичных параметров в опорном канале. Базовая линия передачи интерферометров – полый диэлектрический лучевод круглого сечения диаметром 20 мм [2]. В приёмниках в качестве линии передачи использовались металлические сверхразмерные волноводы круглого сечения различного диаметра, которые через конические переходы соединялись как с чувствительным элементом приёмника, так и с базовой линией передачи интерферометра. Приёмники имеют рабочую температуру 4,2 К и устанавливаются в транспортные гелиевые криостаты. Достоинством такой конструкции низкотемпературного приёмника является его практически мгновенная готовность к работе на протяжении месяца.

Для оценки предельной (пороговой) чувствительности фотоприёмника в режиме прямого детектирования находилась мощность синусоидально модулированного потока лазерного излучения входного сигнала, приводящая к приращению среднего квадратичного значения напряжения фотосигнала, равному среднему квадратичному значению напряжения шума приемника. Последнее пропорционально $\sqrt{\Delta f}$, где Δf - ширина полосы частот измерительного тракта. При приведении шумов к единичному интервалу частот получаем мощность, эквивалентную шуму (МЭШ) [3]. Она определяется следующим соотношением:

$$MЭШ = \frac{P_C}{\sqrt{\langle u_C^2 \rangle} / \sqrt{\langle u_{ш}^2 \rangle} \cdot \sqrt{\Delta f}}, \frac{Вт}{\sqrt{Гц}}, \quad (1)$$

где P_C – мощность входного сигнала; $\sqrt{\langle u_C^2 \rangle} / \sqrt{\langle u_{ш}^2 \rangle}$ – соответствующее этой мощности отношение сигнал/шум на выходе приёмника.

При гетеродинном приёме электромагнитного излучения напряжение сигнала промежуточной частоты определяется выражением

$$U_{ПЧ} = R \cdot \sqrt{2P_C P_\Gamma}, \quad (2)$$

где R – вольт-ваттная чувствительность; P_C и P_Γ – соответственно мощности входного сигнала и гетеродина. В инфракрасном и видимом диапазонах R – коэффициент пропорциональности, учитывающий квантовую эффективность фотоприёмника. При нахождении предельной чувствительности гетеродинного приёмника $P_{\min} = P_C$, приведенной к полосе 1 Гц, значение $U_{ПЧ}/R$ можно положить равным МЭШ. Тогда из (2) получаем приближённое выражение, определяющее предельную чувствительность при гетеродинном приёме

$$P_{\min} = \frac{MЭШ^2}{2P_\Gamma}, \frac{Вт}{Гц}. \quad (3)$$

Оно связывает характеристики приёмника в гетеродинном режиме и режиме прямого детектирования [3]. Методика измерения P_{\min} остаётся такой же, как и для МЭШ, т. е. соответствует формуле (1), с тем отличием, что в её знаменатель теперь подставляется значение Δf , а не $\sqrt{\Delta f}$.

При определении МЭШ измерялась немодулированная мощность сигнала на выходе лазера P , а величина потока излучения на чувствительном элементе фотодетектора P_C находилась с учётом коэффициента формы модуляции входного сигнала k , т. е. $P_C = kP$. При проведении измерений использовался механический модулятор с частотой 100 Гц и значением коэффициента формы модуляции $k=0,37$.

1. Одноканальный приёмник на основе фотопроводимости n -InSb ($\lambda=337$ мкм). Для приёма излучения с длиной волны $\lambda=337$ мкм, прошедшего через плазму, и обеспечения при этом в интерферометре достаточного отношения сигнал/шум был разработан квазиоптический приёмник, основанный на использовании явления фотопроводимости в антимониде индия электронного типа.

Существует несколько моделей объяснения фотопроводимости в этом материале. Рассматриваемой области частот соответствует

модель фотопроводимости по примесям (прыжковая проводимость) [4]. Время фотоотклика в n -InSb при $T=4,2$ К составляет $\tau \approx 10^{-7}$ с [4].

Устройство приёмника показано на рис. 1. Конструктивно приёмник состоит из трех частей: низкотемпературного детектора; гелиевого криостата 1; электронного блока 2, включающего в себя схему подачи электрического смещения на чувствительный элемент детектора и предварительный низкочастотный усилитель.

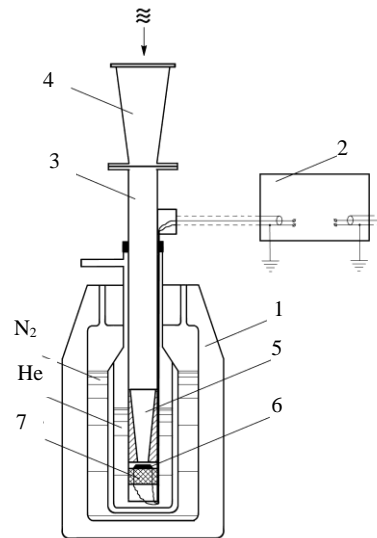


Рис. 1. Одноканальный низкотемпературный приёмник $\lambda = 337$ мкм

Низкотемпературный детектор содержит металлический лучевод 3, ограниченный с двух сторон коническими переходами 4 и 5. На выходе одного из них расположен чувствительный элемент 6, установленный в держателе 7, а другой конический переход образует вход приёмника. Диаметр квазиоптического пучка, поступающего на вход приёмника, после прохождения лучеводного тракта уменьшается с 20 до 5 мм. Большая часть лучевода 3 расположена в транспортном гелиевом криостате 1 типа СТГ-10. Со стороны входа приёмника лучевод и гелиевый объём криостата герметизированы лавсановой плёнкой.

Чувствительным элементом приёмника является кристалл n -InSb, имеющий форму пластины с размером $3,6 \times 3,6 \times 1$ мм. Подача напряжения смещения и съём сигнала производится с контактов, нанесенных на две противоположные боковые грани кристалла. Использовались монокристаллы компенсированного n -InSb с концентрацией основных носителей заряда $n_e = n_d - n_a = (5 \div 50) \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ и подвижностью $\mu_e \geq 10^5 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ ($T=77$ К). Такие параметры материала соответствуют антимониду индия марки ИСЭ-4.

Разработанный приемник использовался в составе интерферометра, предназначенного для измерения фазовых сдвигов волны, прошедшей через плазму, на установке Токамак Т-10. В режиме прямого детектирования измеренное значение МЭШ такого приемника составляло $1,1 \times 10^{-10}$ Вт Гц^{-1/2}. При этом в качестве оконечного усилителя использовался усилитель типа У2-6 с шириной полосы 10 Гц. В гетеродинном режиме работы на установке Токамак Т-10 приёмник преобразовывал электромагнитную волну в колебания с промежуточной частотой $F_{пр} = 26$ кГц.

С целью определения погрешности в измерении фазовых сдвигов интерферометром, использующим такой приемник, сопоставлялся сдвиг фаз, вводимый в измерительный канал интерферометра эталонным высокочастотным фазовращателем, с разностью фаз сигналов промежуточной частоты опорного и измерительного каналов, измеряемой с помощью низкочастотного фазометра Ф2-13. При этом сдвиг фаз, вводимый эталонным высокочастотным фазовращателем в диапазоне $\pm 160^\circ$, принимался за истинную величину. При таком методе определения погрешности переноса измерения фазы с высокой частоты на промежуточную учитывались ее составляющие, обусловленные неидеальностью исполнения доплеровского сдвигателя частоты, разностью длин опорного и измерительного каналов, нестабильностью частоты генератора, вибрациями каналов и пр.

При мощности лазерного генератора ~ 6 мВт погрешность в измерении сдвига фаз, определенная таким интегральным методом, не превышала $\pm 0,03\pi$ при ожидаемых значениях величин измеряемого сдвига фаз $\sim 15\pi$ [5].

2. Многоканальный приемник на основе фотопроводимости $n\text{-InSb}$ ($\lambda = 337$ мкм). При определении профиля концентрации электронов в плазме микроволновое зондирование плазменного шнура ведется по нескольким хордам, а измерение сдвига фаз излучения, проходящего по каждой из хорд, осуществляется с помощью многоканальных интерферометров. Рост числа приемников в таких интерферометрах представляет определенную проблему, связанную с громоздкостью гелиевых криостатов, в которые помещаются охлаждаемые детекторы.

С целью решения этой проблемы для девятиканального лазерного интерферометра с рабочей длиной волны 337 мкм на установке Токамак Т-15 [6] был разработан многоканальный приемник. Он представляет собой блок однотипных низкотемпературных детекторов, помещаемых в гелиевый криостат. Такой приемник позволяет осуществить одновременный и независимый прием волн из четырех каналов интерферометра

при использовании только одного транспортного криостата типа СТГ-25 или СТГ-40, что резко сократило общее число требуемых криостатов. В состав приемника входит блок предварительных усилителей промежуточной частоты с источниками напряжения смещения для приемных элементов детекторов.

Внешний вид четырёхканального низкотемпературного приёмника показан на рис. 2, а его устройство поясняется рис. 3.



Рис. 2. Внешний вид четырёхканального низкотемпературного приёмника (отмечен окружностью) в составе многоканального интерферометра ($\lambda = 337$ мкм)

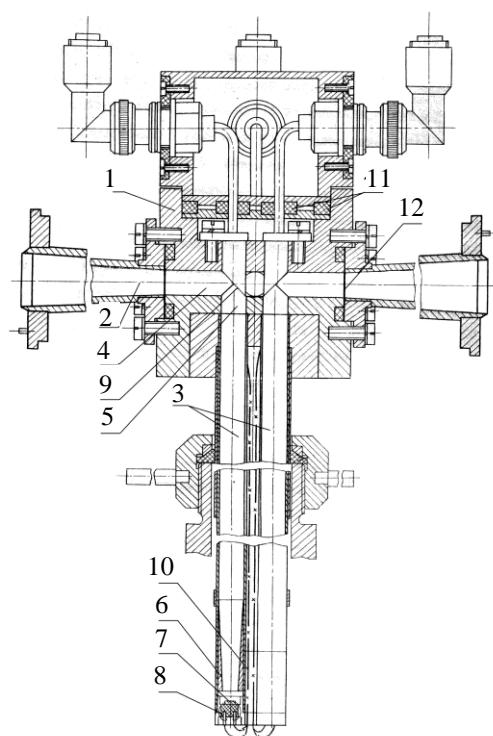


Рис. 3. Четырёхканальный блок низкотемпературных детекторов ($\lambda = 337$ мкм)

Блок низкотемпературных детекторов включает в себя корпус 1, конические переходы 2 и лучеводы 3. Внутри металлического корпуса 1

проходят четыре канала круглого сечения, каждый из которых имеет 90° излом, расположенный таким образом, что его плечи 4 и 5 выходят соответственно на боковую грань и нижнее основание корпуса. Продолжением каналов на боковых гранях корпуса являются конические переходы 2. Они образуют четыре входа низкотемпературного приемника, предназначенных для его соединения с лучеводным трактом диаметром 20 мм. Продолжением каналов на нижнем основании корпуса являются металлические лучеводы 3, помещаемые в гелиевый объем криостата и заканчивающиеся коническими переходами 6, подводящими падающее излучение к чувствительным элементам 7, установленным в держателях 8. В вершинах 90°-ных изломов каналов находятся металлические зеркала 9, с помощью которых производится оптическая юстировка лучеводного тракта приемника. Внутренний диаметр лучеводов, равный 7,4 мм, выбран с учетом размеров горловины стандартного транспортного криостата, числа входящих в нее лучеводов и сигнальных кабелей.

Чувствительные элементы детекторов представляют собой пластины с размерами 3,5×3,5×1 мм, выполненные из *n*-InSb с концентрацией электронов $n_e=1,2 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ и подвижностью $\mu_e=1,8 \times 10^5 \text{ см}^2 \cdot \text{в}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$. Подача напряжения смещения на чувствительный элемент и съём с него сигнала промежуточной частоты производится по отдельному для каждого детектора коаксиальному кабелю 10. Гелиевый объем криостата герметизирован уплотнителями 11 и лавсановыми окнами 12.

В табл. 1. приведены измеренные значения МЭШ на рабочей длине волны $\lambda=337 \text{ мкм}$ для одного из четырехканальных блоков низкотемпературных детекторов в режиме прямого детектирования и P_{min} в режиме гетеродинного приема при мощности гетеродина, пересчитанной с учетом затухания в тракте ко входу детектора, 7 мкВт и промежуточной частоте $F_{\text{пр}}=106 \text{ кГц}$.

Таблица 1

Режим работы	Чувствительность	№ канала			
		1	2	3	4
Прямое детектирование	МЭШ, $10^{-11} \text{ Вт}/\sqrt{\text{Гц}}$	3,7	2,6	6,3	4,8
Гетеродинный прием	P_{min} , $10^{-16} \text{ Вт}/\text{Гц}$	5	1	4	8

В реальных условиях работы интерферометра на термоядерной установке Токамак Т-15 с приёмниками такого типа получены удовлетворительные уровни сигнала, превышающие шум от 15 до 200 раз. В стационарных условиях

суммарный «фазовый шум», определяемый спектром преобразователя частоты, отношением сигнал/шум и влиянием механических вибраций на разность длин плеч, не превышал $\pm 10^\circ$. Это соответствует погрешности определения средней концентрации электронов $\delta n_e \sim 10^{17} \text{ м}^{-3}$, что на два порядка ниже средней концентрации плазмы в типичных режимах разряда [6].

Как и в случае одноканального приемника экспериментально определенная погрешность, связанная с переносом измерений сдвига фаз с высокой частоты на промежуточную, составляла не более $\pm 0,03 \pi$ [7]

3. Одноканальный приемник на основе эффекта примесного циклотронного резонанса в *n*-InSb ($\lambda = 195 \text{ мкм}$). Для проведения поляриметрических измерений с целью определения тока плазменного шнура установки Токамак Т-15 был разработан лазерный интерферометр-поляриметр [8], включающий в себя квазиоптический охлаждаемый приемник с рабочей длиной волны 195 мкм.

Максимум чувствительности *n*-InSb-приёмника приходится на $\lambda \approx 1 \text{ мм}$. В субмиллиметровом диапазоне волн коэффициент поглощения в *n*-InSb уменьшается пропорционально квадрату частоты, соответственно снижая и чувствительность приёмника в этом участке спектра. Увеличить чувствительность можно с помощью постоянного магнитного поля, приложенного к образцу, используя явление циклотронного резонанса [9]. Изменением значения магнитного поля можно перестраивать рабочую частоту приёмника в широких пределах.

Принимая значение эффективной массы электрона m^* в *n*-InSb при $T=4,2 \text{ К}$ равной $m^*=0,0145 m_0$ [8], где m_0 - масса свободного электрона, находим, что для выполнения условия циклотронного резонанса $\omega=eB_0/m^*c$ на длине волны $\lambda=195 \text{ мкм}$ необходимо магнитное поле с индукцией $B_0 \approx 7,5 \text{ кГс}$.

Значение требуемого магнитного поля определило размеры и тип магнита, а следовательно, и устройство чувствительной головки фотоприемника (рис. 4).

Она содержит металлический конический переход 1, сужающий лучеводную линию передачи 2 с диаметра 18 мм до 2 мм. Кристалл *n*-InSb 3 с приемной площадкой 1,5×1,5 мм, закрепленный в держателе образца 4, установлен по оси облучающего его конического перехода 1 между полюсами 5 самарий-кобальтового магнита с направленной кристаллизацией. Камера 6 герметизирует приемную площадку кристалла от непосредственного контакта с жидким гелием. Подача напряжения смещения на образец *n*-InSb и съём принятого

сигнала осуществляется по коаксиальному кабелю 7 через проходные изоляторы 8. Вход лучевода 2 герметизирован лавсановой пленкой. Чувствительная головка с лучеводом, подводящим к ней излучение, размещается в транспортном гелиевом криостате типа СТГ-25 или СТГ-40.

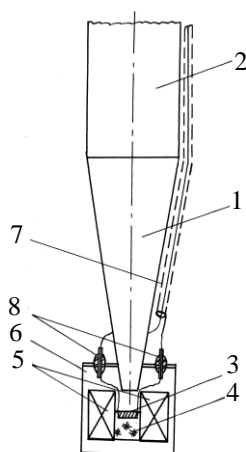


Рис. 4. Чувствительная головка одноканального приемника на основе эффекта примесного циклотронного резонанса в n -InSb

Результаты измерений показали, что МЭШ разработанного низкотемпературного приемника на длине волны 195 мкм в режиме прямого детектирования имеет значение $7,3 \times 10^{-11}$ Вт/Гц^{1/2}. В гетеродинном режиме измерения P_{\min} дали значение $4,6 \times 10^{-16}$ Вт/Гц при мощности гетеродина, пересчитанной ко входу приемника, ~ 38 мкВт и промежуточной частоте $F_{\text{пр}} = 106$ кГц. Стендовые испытания интерферометра-поляриметра, использующего разработанный приемник и DCN-лазер мощностью 5 мВт при длине измерительного канала ~ 7 м и затухании в нём ~ 40 дБ, показали возможность измерения угла поворота плоскости поляризации с точностью $0,1^\circ$. Фазовый шум при этом составил $\sim 15^\circ$, что соответствует погрешности измерения электронной концентрации плазмы $\sim \pm 2 \times 10^{17} \text{ м}^{-3}$ [10]. Погрешность в измерении фазовых сдвигов, обусловленная переносом измерения фазы с высокой частоты на промежуточную, составила $\pm 4^\circ$ [11].

4. Одноканальный приемник на основе фотопроводимости Ge ($\lambda=119$ мкм). При повышении плотности плазмы, получаемой в установках для управляемого термоядерного синтеза, плазменный объем действует на зондирующее излучение подобно рассеивающей линзе, что приводит к искривлению траектории зондирующего пучка. Для ослабления этого эффекта рабочую длину волны микроволновых интерферометров, используемых для диагностики плазмы, переносят в коротковолновую часть субмиллиметрового диапазона волн.

Для гетеродинного приема излучения в лазерном интерферометре для установки Токамак Т-7 с рабочей длиной волны $\lambda=119$ мкм и обеспечения при этом достаточного отношения сигнал/шум был разработан квазиоптический приемник, основанный на использовании явления примесной фотопроводимости в германии при температуре 4,2 К [9]. Фотоотклик вызывается возбуждением электронов в зависимости от типа легирующей примеси либо с донорного уровня в зону проводимости, либо из валентной зоны на акцепторный уровень.

Устройство чувствительной головки фотоприемника аналогично показанному на рис. 4, но без магнита. Подача напряжения смещения на образец Ge и съем с него сигнала промежуточной частоты производится через контакты на его торцевых гранях по двухпроводной линии, проложенной по наружной поверхности лучевода 2. Для Ge время фотоотклика весьма мало, $\tau \approx 10^{-8}$ с [9]. Но так как типичные значения сопротивления образца превышают 1 МОм, то постоянная времени цепи вывода сигнала из приёмника может оказаться значительной вследствие шунтирующего действия емкости проводников двухпроводной линии. Это отражается на быстродействии системы. С целью снижения шунтирующего действия емкости проводников двухпроводной линии их диаметр был уменьшен до 0,07 мм.

Измеренное значение МЭШ разработанного приёмника составило в режиме прямого детектирования $7,4 \times 10^{-12}$ Вт/ $\sqrt{\text{Гц}}$, а P_{\min} в гетеродинном режиме $\leq 1 \times 10^{-17}$ Вт/Гц при промежуточной частоте 225 кГц и пересчитанном ко входу приёмника значении мощности гетеродина ~ 8 мкВт.

При стендовых испытаниях в условиях, близких к реальным, измеренный фазовый шум интерферометра имел размах в 22° , что соответствует погрешности в измерении средней электронной плотности плазмы $\pm 7 \times 10^{17} \text{ м}^{-3}$. При этом затухание излучения в тракте составляло 33 дБ, а мощность H_2O лазера - 3 мВт. Следовательно, порог реагирования интерферометра, использующего разработанный приемник, был не хуже 0,7% от ожидаемых плотностей плазмы. При этом интегральная погрешность, связанная с переносом измерения фазы с высокой частоты на промежуточную, составила $\pm 5^\circ$ [12].

В сводной табл. 2 даны характеристики разработанных приемников. В последнем столбце таблицы приведены значения P_{\min} , рассчитанные по формуле (3), при подстановке в нее измеренных значений МЭШ приемников и использовавшихся в гомодинных интерферометрах значений P_{Γ} .

Таблица 2

Тип приемника	Прямое детектирование	Мощность гетеродина	Гетеродинный прием	Расчёт по формуле (3)
	МЭШ, 10^{-10} , Вт/ $\sqrt{\text{Гц}}$	P_{Γ} , 10^{-6} , Вт	P_{\min} , 10^{-16} , Вт/Гц	P_{\min} , 10^{-16} , Вт/Гц
Одноканальный приемник на основе фотопроводимости в <i>n</i> -InSb, $\lambda=337$ мкм, $F_{\text{пр}}=26$ кГц	1,1	Не измерялись		
Многоканальный приемник на основе фотопроводимости в <i>n</i> -InSb (средние значения), $\lambda=337$ мкм, $F_{\text{пр}}=106$ кГц	0,43	7	4,5	1,32
Одноканальный приемник на основе эффекта примесного циклотронного резонанса в <i>n</i> -InSb, $\lambda=195$ мкм, $F_{\text{пр}}=106$ кГц, $B_0=7,5$ кГс	0,73	38	4,6	0,70
Одноканальный приемник на основе примесной фотопроводимости в Ge, $\lambda=119$ мкм, $F_{\text{пр}}=225$ кГц	0,074	8	$\leq 0,1$	0,034

Приведенные данные показывают реальную возможность применения таких фотоприёмников в квазиоптических лазерных интерферометрах терагерцевого диапазона.

Выводы. Приведены устройство и характеристики низкотемпературных фотоприемников различного типа, предназначенных для работы в составе квазиоптических интерферометров терагерцевого диапазона с промежуточными частотами в сотни килогерц.

Указаны погрешности измерения фазовых сдвигов и углов поворота плоскости поляризации, полученные в интерферометрах для диагностики высокотемпературной плазмы, а также их взаимосвязь с особенностями измерительных схем установок и погрешностью измерения электронной концентрации плазмы.

Описанные приемники могут также с успехом быть применены и в других измерительных быстродействующих квазиоптических радиосистемах терагерцевого диапазона, использующих гетеродинное или гомодинное преобразование частоты.

Авторы искренне благодарны М. С. Яновскому за ценные консультации и советы по тематике данной работы.

1. Щербов В. А., Кулешов Е. М., Нестеров П. К. Применение субмиллиметровых лазеров в интерферометрах для диагностики высокотемпературной плазмы. - Харьков, 1988. - 11 с. - (Препр. / АН УССР. Ин-т радиофизики и электрон., № 376).
2. Усиков А. Я., Канер Э. А., Трутень И. Д. и др. Электроника и радиофизика миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн / Под ред. А. Я. Усикова. - К.: Наук. думка, 1986. - 368 с.

3. Измерения на миллиметровых и субмиллиметровых волнах. Методы и техника / Под ред. Р. А. Валитова и Б. Н. Макаренко. - М.: Радио и связь, 1984. - 296 с.
4. Гершензон Е. М., Литвак-Горская Л. Б., Филонович С. Р. Механизмы детектирования излучения субмиллиметрового диапазона волн в *n*-InSb // Радиотехника и электроника. - 1985. - 30, № 10. - С. 2045-2053.
5. Кулешов Е. М., Щербов В. А., Каменев Ю. Е. и др. Лазерный интерферометр субмиллиметрового диапазона волн для диагностики плазмы. - Харьков, 1983. - 28 с. - (Препр. / АН УССР. Ин-т радиофизики и электрон., № 227)
6. Горбунов Е. П., Денисов В. Ф., Нестеров П. К. и др. Применение многоканального лазерного интерферометра вертикального зондирования для измерения профиля плотности плазмы на Токамаке Т-15 // Физика плазмы. - 1992. - 18, № 2. - С. 162-165.
7. Кулешов Е. М., Щербов В. А., Каменев Ю. Е. и др. Девятиканальный лазерный интерферометр для измерения концентрации электронов в плазме на установке «Токамак-15» - Харьков, 1988. - 19 с. - (Препр. / АН УССР. Ин-т радиофизики и электрон., № 372).
8. Горбунов Е. П., Кулешов Е. М., Нестеров П. К. и др. Лазерный интерферометр-поляриметр субмиллиметрового диапазона для измерения поперечного поля в Токамаке 15 // Физика плазмы. - 1994. - 20, № 1. - С. 17-19.
9. Мосс Т., Баррел Г., Эллис Б. Полупроводниковая оптоэлектроника. - М.: Мир, 1976. - 431 с.
10. Нестеров П. К. Исследование влияния металлических антенн и рефракции СВЧ излучения на характеристики одноканального субмиллиметрового интерферометра-поляриметра // Научное приборостроение в миллиметровых и субмиллиметровых диапазонах радиоволн. - Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. - 1992. - С. 50-55.
11. Каменев Ю. Е., Киселев В. К., Кулешов Е. М. и др. Субмиллиметровый лазерный интерферометр-поляриметр для диагностики плазмы // Радиофизика и электроника. - 1997. - 2, № 1. - С. 128-133.
12. Kamenev Yu. E., Kiselyev V. K., Kuleshov E. M. and др. Submillimeter laser interferometer for high density plasma diagnostics // Int. Journal on Infrared and Millimeter Waves. - 1995. - 16, No. 6. - P. 99-1007.

APPLICATION OF LOW-TEMPERATURE
PHOTORECEIVERS IN QUASI-OPTICAL
INTERFEROMETERS OF TERAHERTZ RANGE

V. K. Kiseliyov, V. K. Kononenko,
Ye. M. Kuleshov, P. K. Nesterov

Low-temperature photoreceivers of terahertz range designed for quasi-optical interferometers used for research on high-temperature thermonuclear plasma have been described. The results of phase shifts and polarization plane rotary angles measurements with corresponding them errors are provided. Then electron plasma density and its deviation were obtained from that data.

Key words: terahertz range, low-temperature photoreceiver, quasioptical interferometer, thermonuclear plasma.

ТЕРАГЕРЦЕВІ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНІ
ПРИЙМАЧІ ДЛЯ КВАЗІОПТИЧНИХ
ІНТЕРФЕРОМЕТРІВ

В. К. Кісельов, В. К. Кононенко,
Є. М. Кулешов, П. К. Нестеров

Описано низькотемпературні фотоприймачі терагерцевого діапазону частот, що призначені для використання у квазіоптичних інтерферометрах, які застосовуються в дослідженні високотемпературної термоядерної плазми. Наведено результати вимірювань фазових зсувів та кутів оберту площини поляризації і відповідні похибки вимірювання електронної концентрації плазми.

Ключові слова: терагерцевий діапазон, низькотемпературний фотоприймач, квазіоптичний інтерферометр, термоядерна плазма.

Рукопись поступила 31 января 2008 г.