

УДК 621.383

Модуляционный метод измерения параметров фотоприемного устройства на длину волны 10,6 мкм в гетеродинном режиме

В. Е. Ложников, А. И. Дирочка

Проведен сравнительный анализ способов измерения параметров ФПУ на длину волны 10,6 мкм в режиме оптического гетеродинирования. Показано, что большими преимуществами обладает модуляционный метод, позволяющий измерять характеристики ФПУ в широком диапазоне частот при значительном упрощении техники измерений. Разработана установка для измерения быстродействующих ФПУ на основе КРТ на длину волны 10,6 мкм в гетеродинном режиме модуляционным методом.

PACS: 85.60-q

Ключевые слова: ФПУ, КРТ, оптическое гетеродинирование, модуляционный метод, диапазон частот, пороговая чувствительность.

Введение

Для регистрации оптического излучения в диапазоне длин волн 10—12 мкм в настоящее время наиболее широко используются фотоприемные устройства (ФПУ) на основе тройного соединения теллурида кадмия и ртути (КРТ), работающие при температуре 80 К и обладающие большим быстродействием и высокой чувствительностью [1—3]. Эти приборы используются в ИК-аппаратуре для измерения скорости быстро движущихся объектов, лазерной доплеровской локации, лазерного зондирования и определения содержания озона в атмосфере, а также в других научных исследованиях.

По физическим принципам регистрации и первичной обработки информации, содержащейся в оптическом сигнале, различают прямой (некогерентный) и гетеродинный (фотосмешение) методы приема оптического излучения. При некогерентном приеме осуществляется выделение информационного сигнала, которым промодулирована по интенсивности оптическая несущая, с учетом внешнего фонового излучения и внутренних шумов ФПУ.

В случае гетеродинного приема сигнальное оптическое излучение суммируется или смешивается с оптическим полем местного гетеродина (СО₂-лазера) на фоточувствительной площадке ФПУ. Использование дополнительного оптического поля гетеродина позволяет увеличить дробовой шум гетеродинного ФПУ до уровня, при котором шумы, вызываемые любыми источниками, кроме гетеродинного излучения, становятся пренебрежимо малыми, что позволяет добиться максимального отношения сигнал/шум и, следовательно, максимальной фоточувствительности [4, 5].

Наибольшее распространение оптическое гетеродинирование получило в дальней ИК-области световых волн, благодаря более низкому уровню квантового шума, более простой регулировке лучей сигнала и гетеродина, более широкому полю зрения, ограничиваемому дифракцией [7]. Кроме того, разработаны и изготавливаются высокостабильные одночастотные оптические квантовые генераторы (СО₂-лазеры) с длиной волны излучения 10,6 мкм, которая перекрывается окном прозрачности атмосферы 8—13 мкм.

В данной статье представлены результаты работ по созданию экспериментальной установки для измерения параметров быстродействующих ФПУ на основе КРТ на длине волны 10,6 мкм гетеродинным способом.

Методы измерения параметров гетеродинных ФПУ

Известно несколько способов гетеродинного детектирования. Фактически первыми экспериментами по фотосмешению были измерения бие-

Ложников Владислав Евгеньевич, главный специалист¹.

Дирочка Александр Иванович, профессор².

¹ АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

Тел. 8 (910) 409-38-14.

E-mail: orion@orion-ir.ru

² Московский физико-технический институт (МФТИ).

Россия, 141700, Московская обл., г. Долгопрудный,

Институтский пер., 9.

Статья поступила в редакцию 2 июня 2016 г.

ний между модами одного и того же лазера [6]. В дальнейшем этот метод был развит для измерения частотных характеристик фотоприемников [8, 9].

Гетеродинный метод применялся для измерения частотных характеристик фотодиодов на основе КРТ [10, 11]. В экспериментах местным гетеродином служил CO_2 -лазер с фиксированной длиной волны 10,6 мкм. В качестве источника сигнала использовался перестраиваемый лазерный диод из $\text{Pb}_{0,88}\text{Sn}_{0,12}\text{Te}$. Частота биений между двумя оптическими источниками менялась в пределах до 1,2 ГГц.

Гетеродинный стенд для измерения характеристик фотоприемников представляет собой два CO_2 -лазера, допускающих плавную перестройку частоты излучения в пределах ± 65 МГц [12]. При совмещении излучений двух ОКГ на фоточувствительной площадке возникают оптические биения, частоту которых можно плавно менять в пределах 0,1–130 МГц. При равенстве интенсивностей потоков излучения удается получать глубину модуляции фототока на разностной частоте, близкую к 100 %, что дает возможность измерять частотные характеристики фотоприемников. Для измерения гетеродинных параметров на пути потока излучения одного ОКГ ставились калиброванные ослабители. При этом излучение малой мощности являлось принимаемым сигналом ФПУ, а другой лазер работал как оптический гетеродин.

Широкое распространение получил гомодинный прием, при котором используется один лазер, а изменение частоты биений достигается либо с помощью доплеровского сдвига частоты при отражении от движущегося отражателя, либо модуляцией сигнального потока излучения.

Для измерения пороговой чувствительности фотодиодов из КРТ в гетеродинном режиме была использована интерференционная установка [13]. В этом гомодинном эксперименте излучение CO_2 -лазера расщеплялось на гетеродинный и сигнальный лучи. Сигнальный поток излучения модулировался с помощью электрооптического модулятора из монокристаллического арсенида галлия. Максимальные биения между сигналом и гетеродином, образующиеся на фотодиоде, достигались согласованием двух оптических путей.

Известен также метод гетеродинного радиометра (некогерентное гетеродинное детектирование) — применение абсолютно черного тела (АЧТ) в сигнальном канале [14]. Этот способ нашел широкое применение для исследования параметров фотоприемников на КРТ на длине волны 10,6 мкм [15–17].

Для измерения гетеродинных характеристик фоторезисторов из Ge:Zn на длине волны 10,6 мкм был предложен модуляционный метод, суть кото-

рого состоит в модулировании по интенсивности излучения CO_2 -лазера с малой глубиной модуляции ($m \sim 0,1$ %) [18]. Как показано в данной работе, спектр монохроматического излучения, промодулированного по интенсивности с частотой ω , при малой глубине модуляции состоит из основной составляющей на несущей частоте ν_0 и двух боковых составляющих на частотах $\nu_0 - \omega$ и $\nu_0 + \omega$. При регистрации такого трехкомпонентного излучения фотоприемником оптический сигнал на частоте ν_0 можно рассматривать в качестве гетеродина со средней мощностью P_0 , а боковые составляющие в качестве принимаемого сигнала с оптической мощностью $P_c = m^2 P_0 / 4$.

Биения основной составляющей с боковыми возникнут на частоте модуляции ω , а соответствующая амплитуда переменной составляющей мощности на частоте биений будет равна $m P_0$. При этом режим работы фотоприемника не отличается от режима оптического гетеродинирования.

В соответствии с этим величина пороговой чувствительности сигнала для гетеродинного фотоприемного устройства определяется по измеренному значению отношения сигнал/шум на выходе фотоприемника, принимающего модулированное излучение, при известных средней мощности и глубине модуляции:

$$P_{\text{пор}} = \frac{m^2 P_0}{4(V_c / V_{\text{ш}})^2 \Delta f}, \quad (1)$$

где $(V_c / V_{\text{ш}})$ — измеренное отношение сигнал/шум по мощности; Δf — ширина полосы пропускания измерительного тракта.

Определение быстродействия фотоприемников производится, в основном, тремя методами:

- измерением собственной постоянной времени [10, 19];
- измерением частотной характеристики дробового шума при засветке фотодиода CO_2 -лазером [20, 21];
- исследованием частотных характеристик напряжения фотосигнала в режиме прямого детектирования при модуляции по интенсивности излучения CO_2 -лазера с помощью электрооптического модулятора [13].

Однако в большинстве случаев частотные характеристики фотодетекторов измеряются в гетеродинном режиме, т. е. используются те же методы, что и для измерения пороговой чувствительности, в частности:

- метод биений между двумя модами одного и того же лазера [8, 9];
- детектирование оптических биений между двумя лазерами [10–12];

- метод гетеродинного радиометра [16, 17];
- модуляционный метод [18].

Анализируя изложенные методы измерений гетеродинных характеристик и быстродействия фотоприемников, заметим, что при реализации описанных систем возникает довольно серьезные проблемы.

1. При гетеродинном и гомодинном способах детектирования:

- требуется высокая точность совмещения волновых фронтов оптических полей сигнала и гетеродина в пределах фоточувствительной площади приемника излучения;

- необходима высокая стабильность по частоте и мощности гетеродинного и сигнального лазеров, так как в противном случае возникают большие погрешности измерений, связанные с нестабильностью разностной частоты;

- при определении быстродействия фотоприемника необходимо изменять частоту биений в широком диапазоне, однако ее изменение путем перестройки частоты излучения лазеров или применение доплеровской частоты сдвига весьма затруднительно при разностной частоте более $\sim 10^8$ Гц;

- при измерении пороговой чувствительности возникает необходимость очень сильного, калиброванного ослабления сигнального потока излучения при точном сохранении его волнового фронта.

2. Применение АЧТ в сигнальном канале гетеродинного радиометра и измерение гетеродинного дробового шума позволяют проводить исследования в широкой полосе частот. Однако эти методы требуют высокочувствительных эталонных фотоприемников ($P_{пор} \sim 10^{-19}$ Вт/Гц) и сложной электронной аппаратуры.

3. Определение быстродействия посредством измерения собственной постоянной времени

позволяет просто и надежно определить рабочую полосу частот фотоприемников. Но для проведения исследовательских работ этот способ мало-пригоден, поскольку он не дает полной картины физических процессов, ограничивающих быстродействие фотоприемников, в то время как анализ частотных характеристик фотосигнала позволяет определить механизмы, влияющие на инерционность приборов.

В связи с вышеизложенным, большими достоинствами обладает модуляционный метод [18], позволяющий проводить измерения пороговой чувствительности и частотных характеристик ФПУ на длине волны 10,6 мкм в широком диапазоне частот в режиме оптического гетеродинирования при значительном упрощении техники измерений.

Разработка установки для измерения параметров ФПУ

1. Схема измерительной установки

В основу создания установки был положен модуляционный метод [18], основанный на замене фотосмещения модуляцией интенсивности излучения CO₂-лазера. При этом модулированный с малой глубиной модуляции поток излучения лазера эквивалентен сигналу, а его постоянная составляющая — гетеродину. Изменение частоты модуляции позволяет проводить измерения в широком диапазоне частот, а режим работы фотоприемника, принимающего модулированный поток излучения, не отличается от режима оптического гетеродинирования. Преимущество этого метода перед другими состоит в отсутствии пространственной юстировки сигнального и гетеродинного потоков излучения, наводок на частоте модуляции, а также в относительной простоте.

Структурная схема измерительной установки гетеродинных ФПУ приведена на рис. 1.

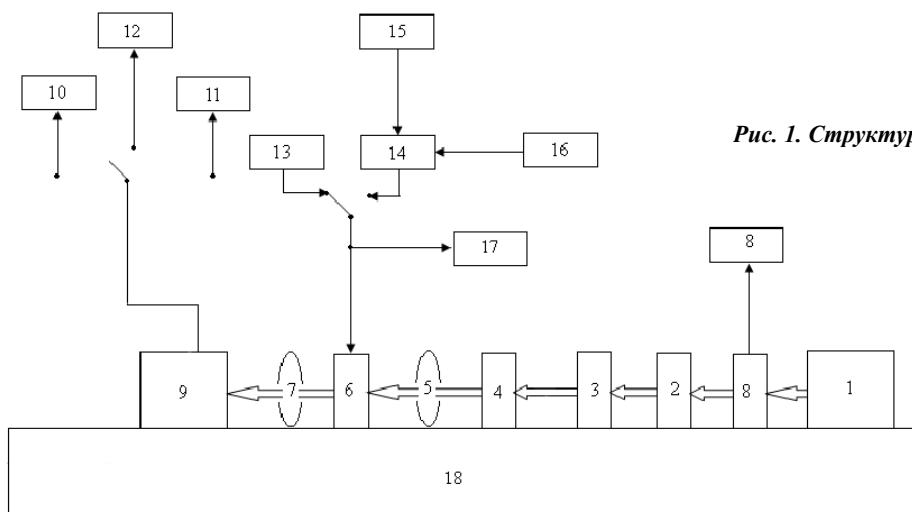


Рис. 1. Структурная схема измерительной установки.

Она состоит из оптической части, расположенной на элементах оптической скамьи ОСК-2 (18), системы модуляции оптического излучения и системы регистрации напряжений фотосигнала и шума исследуемого ФПУ.

Работа установки осуществляется следующим образом. Излучение одночастотного стабилизированного по частоте и мощности CO_2 -лазера (1) с помощью линзы (5) (диаметр линзы — 30 мм, фокусное расстояние — 100 мм) фокусируется на кристалл высокочастотного модулятора (6). Промодулированное на заданной частоте излучение линзой (7) (диаметр линзы — 30 мм, фокусное расстояние — 50 мм) фокусируется на ФПУ (9). Линзы изготовлены из германия с антиотражающим покрытием ZnS с коэффициентом пропускания $\sim 92\%$ на длине волны 10,6 мкм. Для регулировки мощности лазера используется поляризатор (2) типа МЛР-1 и блок фильтров (4), изготовленных из флюорита (CaF_2). Область прозрачности CaF_2 лежит в диапазоне от 0,125 до 9 мкм, он оптически изотропен и обладает большим поглощением на длине волны 10,6 мкм [22]. Показатель преломления пластин CaF_2 на длине волны 10,6 мкм составляет $n = 1,28$ [23]. Это означает, что оптическое излучение, проходящее через ослабители из CaF_2 , практически не уведется от первоначального направления, что существенно облегчает юстировку оптической системы установки. Потери на отражение от поверхности CaF_2 составляют 1,5 % [23] и не вносят существенного вклада в ослабление мощности лазерного излучения. Благодаря своему составу, фтористый кальций может использоваться в агрессивных средах, и детали из него способны функционировать в обычных атмосферных условиях в течение нескольких лет. Уменьшение мощности излучения с длиной волны 10,6 мкм каждого ослабителя толщиной 5 мм составляет ~ 5 раз [22].

Источником рабочего напряжения на модуляторе ($V_{\text{мод}}$) служат высокочастотные генераторы Г4-153 (13) и Г4-102 (15) со специально разработанным усилителем мощности (14). Контроль напряжения, питающего модулятор, осуществляется с помощью широкополосного вольтметра ВУ-15 (17). Высокочастотные напряжения фотосигнала и шума исследуемого ФПУ поступают на селективные микровольтметры SMV11A (10) и SMV8 (11).

Для юстировки оптического тракта установки и проведения низкочастотных измерений применяется механический дисковый модулятор (3) с частотой модуляции 800 Гц. При этом напряжение фотосигнала регистрируется измерительным усилителем У2-8 (12). Мощность CO_2 -лазера через полупрозрачное зеркало контролируется измерителем оптической мощности ИМО-2Н (8).

2. Модулятор оптического излучения

Модулятор осуществляет внешнюю амплитудную модуляцию лазерного излучения с длиной волны 10,6 мкм синусоидальным электрическим сигналом, задаваемым от высокочастотных генераторов.

В установке был применен малоинерционный модулятор на основе германия p -типа. Данный метод модуляции инфракрасного излучения, предложенный в работах [24, 25] и развитый в дальнейшем для исследования быстродействия фоторезисторов из примесного германия [26, 27], заключается в следующем.

Валентная зона большинства полупроводников p -типа, в том числе германия, состоит из трех подзон, разделенных за счет спин-орбитального взаимодействия. Пример такой зонной структуры показан на рис. 2 [28]. Расщепление валентной зоны приводит к появлению интенсивного поглощения излучения, связанного с прямыми переходами дырок между различными ветвями валентной зоны, которое зависит от степени легирования и температуры образца. В частности, поглощение излучения с длиной волны вблизи 10,6 мкм сопровождается переходами из зоны легких (V_2) в зону тяжелых (V_1) дырок.

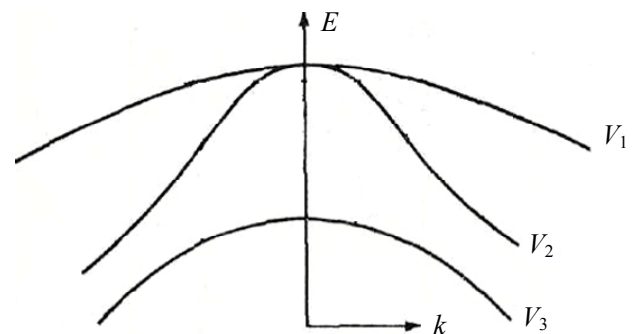


Рис. 2. Структура валентных подзон германия p -типа.

Концентрация носителей в V_2 -зоне с необходимой энергией зависит при данной температуре от концентрации и средней энергии дырок. Электрическое поле, взаимодействуя со свободными дырками, может менять их среднюю энергию и, следовательно, величину коэффициента поглощения. Инерционность или постоянная времени такой модуляции определяется временем рассеяния энергии горячих носителей и для p -германия составляет $\tau_e \approx 5 \times 10^{-11}$ с [25], что позволяет осуществлять модуляцию излучения с помощью переменного электрического поля в широкой области частот.

Данный метод модуляции потока излучения имеет некоторое преимущество перед электрооптическим благодаря тому, что сопротивление модулятора является активным и не зависящим от

частоты во всей рабочей области частот. Кроме того, эффект модуляции света не зависит от полярности приложенного напряжения, и модуляция излучения происходит с удвоенной частотой. В связи с этим отсутствует наводка на частоте измерений.

Кристалл модулятора с размерами $0,8 \times 0,8 \times 15$ мм вырезался из германия p -типа с концентрацией дырок $\sim 6,5 \times 10^{14}$ см⁻³. Для хорошего теплоотвода к боковым сторонам кристалла приклеивались эпоксидной смолой сапфировые пластины, покрытые платиной способом ионно-плазменного распыления и облуженные индием. Геометрические размеры полученной полосковой линии выбирались такими, чтобы ее волновое сопротивление составляло 75 Ом. Направление электрического поля совпадало с направлением лазерного излучения. Отрезок полосковой линии закреплялся на медном хладопроводе высокочастотного металлического азотного оптического криостата.

В качестве высокочастотного тракта служил отрезок вакуумно-плотного коаксиала, теплоизолированного от дна криостата. Плавный переход от полосковой линии к коаксиалу осуществлялся с помощью пластин и трубки из мельхиора. Мельхиор выбирался для уменьшения теплоотвода от внешнего коаксиала, находящегося при комнатной температуре.

Степень согласования модулятора с коаксиальным кабелем определялась величиной коэффициента стоячей волны (КСВ). Измерения, проведенные на измерителе полных сопротивлений типа РЗ-34 в полосе частот 150÷1000 МГц, показали, что КСВ модулятора не превышал 1,6, что свидетельствует об удовлетворительном согласовании. В этом случае коэффициент поглощения электрической мощности кристаллом модулятора был не ниже 0,97. Таким образом, практически все высокочастотное напряжение, подаваемое на модулятор, должно поглощаться без потерь.

Для определения теплового нагрева кристалла модулятора высокочастотным электрическим полем применялась термопара медь-константан, один спай которой припаивался к "земляному" контакту модулятора, а другой помещался на дно азотной ванны криостата и находился при температуре, близкой к температуре жидкого азота. Выход термопары подключался к мультиметру МХД-4660А.

С целью определения абсолютного значения коэффициента модуляции в зависимости от величины высокочастотного напряжения, подаваемого на модулятор, и поддержания постоянной глубины модуляции во всем диапазоне частот измерительной установки проводилась калибровка модулятора.

Зависимость коэффициента модуляции от напряжения на модуляторе измерялась на фиксированной частоте модуляции 500 кГц. Для этого использовались лазер, механический модулятор, генератор Г4-153, селективный микровольтметр SMV11А, осциллограф TDS-210, вольтметры МХД-4660А и ВУ-15, а также фотоприемник, граничная частота которого должна превышать 1 МГц. Измерение глубины модуляции проводилось на линейном участке энергетической характеристики фотоприемника при сопротивлении нагрузки $R_n = 50$ Ом.

Коэффициент модуляции рассчитывается по формуле:

$$m = \frac{\sqrt{2}V_{вч}}{V_{нч}}. \quad (2)$$

Для определения низкочастотной составляющей напряжения фотосигнала $V_{нч}$ включался механический модулятор и записывались показания осциллографа TDS-210. Высокочастотная составляющая напряжения фотосигнала $V_{вч}$ определялась по показанию прибора SMV11А на частоте 1 МГц при отключенном механическом модуляторе и подаче на германиевый модулятор напряжения на частоте 500 кГц. При этом фиксировались напряжение на термопаре V_T и напряжение накачки модулятора $V_{мод}$. Затем амплитуда напряжения на выходе генератора Г4-153 изменялась и определялась зависимость глубины модуляции от величины модулирующего напряжения.

Постоянная глубина модуляции в рабочих точках частотного диапазона обеспечивается постоянством электрической мощности, поглощаемой кристаллом модулятора, и, следовательно, одинаковым его тепловым нагревом, фиксируемым термопарой. Для поддержания постоянного коэффициента модуляции измерялась частотная зависимость напряжения накачки $V_{мод}$ в диапазоне частот 0,25÷50 МГц. При этом на выходе высокочастотных генераторов устанавливалась такая амплитуда напряжения, чтобы нагрев кристалла модулятора по показаниям вольтметра МХД-4660А был одинаковым во всех измеряемых точках частотного диапазона. По полученным результатам строился график зависимости $V_{мод} = f(f)$, из которого следовало, что в диапазоне измеряемых частот модулирующее напряжение практически не меняется. Измеренная глубина модуляции при напряжениях накачки $V_{мод} = 11-12$ В составляет $\sim 0,2\%$.

Поскольку инерционность модулятора не превышает 5×10^{-11} с, то при применении соответствующих высокочастотных источников модули-

рующего напряжения и измерителей напряжений фотосигнала и шума ФПУ рабочая ширина полосы частот разработанной установки может быть продлена до 2 ГГц.

Заключение

Разработана и создана экспериментальная установка для исследования быстродействующих ФПУ на основе КРТ в режиме оптического гетеродина с модуляционным методом со следующими основными параметрами: длина волны — 10,6 мкм; рабочая полоса частот до 10^8 Гц; входное сопротивление - 50 Ом; диапазон изменения мощности излучения гетеродина на входе фотоприемника — $10^{-2} \div 10^{-4}$ Вт; нижний предел измерения синусоидальных напряжений не более $1 \cdot 10^{-6}$ В.

Параметры быстродействующих ФПУ на основе КРТ и их характеристики, измеренные на данной установке, приведены в работах [1—3].

Работа выполнена по гранту Президента Российской Федерации по государственной поддержке ведущих научных школ НШ-2787.2014.9

ЛИТЕРАТУРА

1. Filachev A. M., Ponomarenko V. P., Taubkin I. I., Lozhnikov V. E., et al. // Proceedings of SPIE. 2003. Vol. 5126. P. 206.
2. Lozhnikov V. E., Boltar K. O., Bourlakov I. D., Golovin S. V., Mansvetov N. G. // Proceedings of SPIE. 2000. Vol. 4340. P. 81.
3. Болтарь К. О., Бурлаков И. Д., Головин С. В., Ложников В. Е. и др. // Прикладная физика. 2008. № 3. С. 120.
4. Гальярди Р. М., Карп Ш. Оптическая связь. — М.: Связь, 1978.

5. Teich M. C. // Semiconductors and Semimetals. 1970. Vol. 5. P. 361.
6. Росс М. Лазерные приемники. — М.: Мир, 1969.
7. Унгер Г. Г. Оптическая связь. — М.: Связь, 1979.
8. Lawton R. A., Young M. // Appl. Opt. 1977. Vol. 16. No. 10. P. 2703.
9. Гончуков С. А., Петровский В. Н., Проценко Е. Д. // ПТЭ. 1978. № 6. С. 128.
10. Spears D. L., Melngailis I., Harman T. C. // IEEE J. Quant. Electron. 1975. Vol. QE-11. No. 9. P. 79D.
11. Melngailis I. // J. Luminescence. 1973. Vol. 1. No. 7. P. 501.
12. Бовина Л. А., Быков П. А., Епифанов В. П. и др. // ПТЭ. 1976. № 1. С. 167.
13. Verie C., Siricix M. // IEEE J. Quant. Electron. 1973. Vol. QE-8. No. 2. P. 180.
14. Fujii Y., Yamashita J., Shikata S., Saito S. // Appl. Opt. 1978. Vol. 17. No. 21. P. 3444.
15. Ku R. T., Spears D. L. // Optics Letters. 1977. Vol. 1. No. 3. P. 81.
16. Graaenw Th., Norton P. // Infr. Phys. 1976. Vol. 16. No. 1/2. P. 51.
17. Бирюлин П. В. // ПТЭ. 1980. № 3. С. 193.
18. Курбатов В. А., Пенин Н. А. // Квантовая Электроника. 1976. Т. 3. № 9. С. 1909.
19. Fiorite G., Gasparini G., Svelto F. // Infr. Phys. 1975. Vol. 15. No. 2. P. 287.
20. Spears D. L. // Infr. Phys. 1977. Vol. 17. No. 1. P. 5.
21. Shanley L. F., Perry L. C. In Book: Proc. Int. Electron. Device Meeting. IEEE — Washington. 1978.
22. Ефремов А. А., Сальников Ю. В. Изготовление и контроль оптических деталей. — М.: Высшая школа. 1983.
23. Шредер Г. Техническая оптика. — М.: Техносфера, 2006.
24. Васильева М. А., Воробьев Л. Е., Стафеев В. И. // ФТП. 1967. Т. 1. Вып. 3. С. 333.
25. Васильева М. А., Воробьев Л. Е., Солтамов У. Б. и др. // ФТП. 1967. Т. 1. Вып. 3. С. 439.
26. Пенин Н. А., Болтаев А. П., Курбатов В. А., Соловьев Н. Н. // ФТП. 1972. Т. 6. Вып. 7. С. 1391.
27. Болтаев А. П., Курбатов В. А., Соловьев Н. Н., Пенин Н. А. // ФТП. 1973. Т. 7. Вып. 10. С. 1896.
28. Панков Ж. Оптические процессы в полупроводниках. — М.: Мир, 1973.

Modulation method for measurement of parameters of photodetectors at the wavelength of 10.6 μm for heterodyne applications

V. E. Lozhnikov¹ and A. I. Dirochka²

¹ Orion R&P Association, Inc.
9 Kosinskaya str., Moscow, 111538, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

² Moscow Institute of Physics and Technology
9 Institute al., Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russia
Received June 02, 2016

An experimental system is designed for measurement of heterodyne characteristics of the HgCdTe photodiodes with its preamplifier at the wavelength of 10.6 μm . A method suggested for measurement of parameters utilizes the intensity-modulated laser radiation. The noise equivalent power and wideband of high-speed photodetectors have been measured.

PACS: 85.60-q

Keywords: ФПУ, КРТ, optical heterodyning, modulation method, frequency band, threshold sensitivity.

REFERENCES

1. A. M. Filachev, V. P. Ponomarenko, I. I. Taubkin, V. E. Lozhnikov, et al., *Proceedings of SPIE* **5126**, 206 (2003).
2. V. E. Lozhnikov, K. O. Boltar, I. D. Burlakov, S. V. Golovin, and N. G. Mansvetov, *Proceedings of SPIE* **4340**, 81 (2000).
3. K. O. Boltar, I. D. Burlakov, S. V. Golovin, V. E. Lozhnikov, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 3, 120 (2008).
4. P. M. Gal'yardi and Sh. Karp, *Optical Communication* (Svyaz', Moscow, 1978) [in Russian].
5. M. C. Teich, *Semiconductors and Semimetals* **5**, 361 (1970).
6. M. Ross, *Laser Detectors* (Mir, Moscow, 1969) [in Russian].
7. G. G. Unger, *Optical Communication* (Svyaz', Moscow, 1979) [in Russian].
8. R. A. Lawton and M. Young, *Appl. Opt.* **16**, 2703 (1977).
9. S. A. Gonchukov, V. N. Petrovsky, and E. D. Protsenko, *Instrum. Exp. Phys.*, No. 6, 128 (1978).
10. D. L. Spears, I. Melngailis, and T. C. Harman, *IEEE J. Quant. Electron.* **QE-11** (9), 79D (1975).
11. I. Melngailis, *J. Luminescence* **1**, 501 (1973).
12. L. A. Bovina, P. A. Bykov, V. P. Epifanov, et al., *Instrum. Exp. Phys.*, No. 1, 167 (1976).
13. C. Verie and M. Siricix, *IEEE J. Quant. Electron.* **QE-8**, 180 (1973).
14. Y. Fujii, J. Yamashiita, S. Shikata, and S. Saito, *Appl. Opt.* **17**, 3444 (1978).
15. R. T. Ku and D. L. Spears, *Optics Letters* **1** (3), 81 (1977).
16. Th. Graanw and P. Norton, *Infr. Phys.* **16** (1/2), 51 (1976).
17. P. V. Biryulin, *Instrum. Exp. Phys.*, No. 3, 193 (1980).
18. V. A. Kurbatov and N. A. Penin, *Quantum Electronics* **3**, 1909 (1976).
19. G. Fiorite, G. Gasparini, and F. Svelto, *Infr. Phys.* **15**, 287 (1975).
20. D. L. Spears, *Infr. Phys.* **17**, 5 (1977).
21. L. F. Shanley and L. C. Perry, In *Book: Proc. Int. Electron. Device Meeting.* (IEEE — Washington, 1978).
22. A. A. Efremov and Yu. V. Sal'nikov, *Fabrication and Check of Optical Details.* (Vyssh. Shkola, Moscow, 1983) [in Russian].
23. G. Shreder, *Technical Optics* (Technosfera, Moscow, 2006) [in Russian].
24. M. A. Vasil'eva, L. E. Vorob'ev, and V. I. Stafeev, *Semiconductors* **1**, 333 (1967).
25. M. A. Vasil'eva, L. E. Vorob'ev, U. B. Soltamov, et al., *Semiconductors* **1**, 439 (1967).
26. N. A. Penin, A. P. Boltaev, V. A. Kurbatov, and N. N. Solov'ev, *Semiconductors* **6**, 1391 (1972).
27. A. P. Boltaev, V. A. Kurbatov, and N. N. Solov'ev, and N. A. Penin, *Semiconductors* **7**, 1896 (1973).
28. J. Pankov, *Optical Processes in Semiconductors* (Mir, Moscow, 1973) [in Russian].