

**ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
МИКРО- И ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ**

УДК621.315.592 : 533.9.082.5

**СВЧ-ДЕТЕКТОР НА ОСНОВЕ КРТ-ФОТОДИОДА
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СУБТЕРМОЯДЕРНОЙ ПЛАЗМЫ*****В. В. Васильев¹, С. А. Дворецкий¹, В. С. Варавин¹, Н. Н. Михайлов¹,
И. В. Марчишин¹, Ю. Г. Сидоров¹, А. О. Сусликов¹, В. Н. Овсяк¹,
В. С. Бурмасов², С. С. Попов², Э. П. Кругляков², А. Л. Асеев¹**¹*Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН, г. Новосибирск
E-mail: vas@thermo.isp.nsc.ru*²*Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск*

Разработан сверхвысокочастотный (СВЧ) детектор на основе одноэлементного инфракрасного (ИК) фотодиода, смонтированного в заливном криостате, с предварительной электронной схемой усиления сигнала. Конструкция ИК-фотодиода типа n^+p создана на базе гетероэпитаксиальных слоев теллурида кадмия и ртути (КРТ), выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Специальный профиль состава слоев КРТ по толщине обеспечивает низкое последовательное сопротивление менее 10 Ом и высокую квантовую эффективность на уровне 0,65 без просветляющего покрытия. Для спектрального диапазона 8–12 мкм ИК-фотодиоды характеризуются низкой пороговой мощностью $3,8 \cdot 10^{-13}$ Вт · Гц^{-1/2} и 10^{-19} Вт · Гц⁻¹ при прямом и гетеродинном режимах соответственно. Заливной криостат сохраняет рабочую температуру ИК-фотодиода в интервале 77–80 К в течение 8 ч. Электронная схема предварительного усиления сигнала обеспечивает частотный диапазон детектора до 1 ГГц. На основе СВЧ-детектора разработана методика регистрации рассеянного излучения от CO₂-лазера на флуктуациях плазмы при разогреве релятивистским электронным пучком (РЭП). Показано, что при больших интенсивностях РЭП наблюдаются провалы сигнала турбулентности длительностью несколько наносекунд, что интерпретируется коллапсом ленгмюровских волн.

Введение. Фотоприемники (ФП) на основе твердых растворов теллурида кадмия и ртути (КРТ) занимают лидирующее место при разработке тепловизионных систем, обеспечивающих регистрацию излучения в широком диапазоне инфракрасного (ИК) спектра. Такие тепловизионные системы обычно используются в режиме прямого детектирования низкочастотного сигнала [1].

* Работа выполнена при частичной поддержке интеграционного проекта СО РАН № 3.20.

ИК ФП на основе КРТ находят также применение в оптических локационных системах (ОЛС) [1, 2]. В отличие от радиолокационных систем ОЛС позволяют не только повысить пространственное, временное и частотное разрешения, т. е. улучшить точность определения местоположения и скорость движения объекта, но и получить новую информацию о форме объекта и отражающих свойствах его поверхности. Наиболее эффективно ОЛС, как и тепловизионные системы, используются в оптических окнах прозрачности атмосферы. Особый интерес представляет окно прозрачности в области 8–14 мкм, так как в данном диапазоне имеется мощный CO_2 -лазер с длиной волны излучения 10,6 мкм. При использовании этого лазера в качестве источника ИК-излучения рассеянный или отраженный сигнал может быть зарегистрирован как прямым видеодетектированием, так и гетеродинным приемом. При гетеродинном приеме сигнальный поток смешивается с сигналом от генератора и регистрируется на промежуточной частоте в диапазоне от единиц мегагерц до нескольких гигагерц. Такой режим регистрации излучения позволяет понизить пороговую мощность ФП на 5–6 порядков, что, в свою очередь, дает возможность регистрировать более слабые сигналы, чем при прямом детектировании. Таким образом, для обеспечения регистрации ИК-излучения на длине волны CO_2 -лазера в гетеродинном режиме необходимы сверхвысокочастотные (СВЧ) ИК ФП.

Эффективность применения детекторов на основе КРТ для гетеродинного детектирования лазерного сигнала в полосе до 40 МГц фоторезистором показана в работе [3] и для детектирования излучения от астрономических объектов в полосе до 2,8 ГГц фотодиодом в окне прозрачности атмосферы 8–14 мкм с помощью интерферометрии [4, 5] и спектрометрии [6].

Особый интерес представляет использование СВЧ ИК-детектора на основе КРТ для диагностики высокотемпературной плазмы [7]. К основным методам ИК-диагностики плазмы относятся интерферометрия, спектроскопия и методы рассеяния (ключевые практически для всех исследовательских установок). Здесь, как правило, требуется одновременно высокая чувствительность и временное разрешение детекторов. Для регистрации излучения из плазмы используются два метода: видеодетектирование и гетеродинный прием. Последний метод часто применяется при исследовании спектров разнообразных флуктуаций плазмы. Оптимизация параметров детектора как для существующих, так и для вновь разрабатываемых методов является определяющим моментом в диагностике высокотемпературной плазмы.

Исследования в открытой магнитной системе с многопробочным удержанием плазмы на установке ГОЛ-3 [8] показали, что наблюдается эффективный нагрев ионов плазмы до температуры ~ 2000 эВ, который позволяет рассматривать эту систему как альтернативу токамакам. Для объяснения такого нагрева предложена модель, в которой энергия от мощного релятивистского электронного пучка (РЭП), инжектируемого в плазму, передается ионам плазмы следующим образом. В максимумах гофрированного магнитного поля происходит компрессия электронного пучка, что ведет к увеличению его плотности и, следовательно, к нагреву электронов плазмы. В областях с повышенной электронной температурой возникают пиндеромоторные силы давления, способствующие образованию ускоренных встречных плазменных сгустков. Их столкновение приводит к термализации направленного движения ионов вследствие парных столкновений или, что более вероятно, появлению ионно-звуковой турбулентности. Для проверки предложенной модели необходимо провести измерения широкого спектра параметров. В

первую очередь важным представляется измерение вклада ионно-звуковой турбулентности в процесс нагрева ионов плазмы, длительность которого меньше времени электрон-ионного столкновения, составляющего величину $<10^{-8}$ с. Для этой цели необходимо провести измерения флуктуации плазмы по методике коллективного рассеяния CO_2 -лазерного ИК-излучения ($\lambda = 10,6$ мкм). Одним из ключевых элементов данной методики являются детекторы для регистрации рассеянного ИК-излучения на такой длине волны.

Цель данной работы – создание технологии и оптимальной конструкции фотодиода на основе слоев $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ со специальным профилем состава по глубине для достижения предельных пороговых характеристик на высокой частоте (более 1 ГГц).

СВЧ ИК-фотодиоды. *Пороговая мощность.* В оптическом диапазоне используются два основных метода приема излучения: прямое детектирование с усилением или без усиления и гетеродинное преобразование.

В приемнике прямого детектирования электромагнитное излучение проходит через оптический полосовой фильтр и концентрируется на поверхности фоточувствительного прибора, преобразующего оптический сигнал в электрический. Следует отметить, что отклик ФП не зависит от частоты, фазы и поляризации узкополосного оптического сигнала.

В гетеродинном приемном устройстве принимаемый оптический сигнал с частотой ω_c и сигнал гетеродина с частотой ω_r при помощи светоделителя пространственно совмещаются и направляются на поверхность фоточувствительного элемента. Частоты ω_c и ω_r выбираются таким образом, чтобы их разность (промежуточная частота) $\omega_n = |\omega_c - \omega_r|$ лежала в пределах полосы пропускания ФП.

Гетеродинный режим представляет собой взаимодействие суммарного поля сигнала и гетеродина с материалом фоточувствительной площадки приемника. Если фотоприемники являются квадратичными приборами, т. е. фототок прямо пропорционален интенсивности падающих волн, то суммарный фототок приемника определяется интегрированием по всей площади фотоприемника [2]:

$$I_{\phi}(t) = \frac{\eta q}{\omega \hbar} \left[P_c + P_r + 2 \frac{\eta(\omega_n)}{\eta} \sqrt{P_c P_r} \cos(\omega_c - \omega_r) t \right], \quad (1)$$

где P_c и P_r – мощности сигнальной и гетеродинной волн соответственно; q – заряд электрона; η – квантовая эффективность на постоянном токе; $\eta(\omega_n)$ – квантовая эффективность на промежуточной частоте.

Из выражения (1) следует, что амплитуда фототока (I_c) ФП на промежуточной частоте связана с мощностями сигнальной и гетеродинной волн следующим выражением:

$$I_c = \frac{\eta(\omega_n) q}{\hbar \omega} 2 \sqrt{P_c P_r}. \quad (2)$$

Из соотношения (2) видно, что амплитуда фототока на промежуточной частоте прямо пропорциональна величине $P_r^{1/2}$. Это дает усиление сигнала на данной частоте при увеличении уровня мощности гетеродинного генератора.

При достаточно большой мощности гетеродинного сигнала $P_r \gg \gg (P_c, 2\sqrt{P_r P_c})$, когда шум ФП превышает шумы входного усилителя, квадрат шумового тока ФП определяется следующим соотношением [1, 2]:

$$I_{\text{ш}}^2 = 2 \frac{\eta q^2}{\hbar \omega} P_r \Delta f, \quad (3)$$

где Δf – ширина полосы промежуточной частоты последующего тракта детектора.

Отсюда соотношение сигнал/шум $(S/N)_p$ в полосе частот Δf можно записать в виде

$$(S/N)_p = I_c^2 / I_{\text{ш}}^2 = \frac{\eta^2 (\omega_n) P_c}{\eta \hbar \omega \Delta f} \quad (4)$$

и пороговую мощность $P_{\text{пор}}$ ФП определить из выражения

$$P_{\text{пор}} = \frac{\eta}{\eta^2 (\omega_n)} \hbar \omega \Delta f. \quad (5)$$

Таким образом, в случае большой мощности сигнала гетеродина предельная пороговая мощность ФП определяется только квантовым выходом на промежуточной частоте и не зависит от других параметров ФП. При дальнейшем повышении мощности сигнала гетеродина излучение влияет на параметры ФП вплоть до его физического разрушения. В связи с этим для каждого типа ФП существует некоторая предельная мощность гетеродинного излучения, зависящая от материала, геометрии, размеров и условий применения, выше которой пороговые характеристики ухудшаются. Для фотодиодов площадью $\sim (10^{-4} - 10^{-3}) \text{ см}^2$ на основе КРТ в спектральном диапазоне 8–14 мкм при температуре $\sim 80 \text{ К}$ такая предельная мощность гетеродинного излучения составляет $\sim 1 \text{ мВт}$. С учетом реальных параметров фотодиодов выражение (5) преобразуется в [1]

$$P_{\text{пор}} = \left[\frac{P_{\text{пр}}^2}{2P_r} + \frac{\hbar \omega}{\eta (\omega_n)} \right] \Delta f, \quad (6)$$

где $P_{\text{пр}}$ – пороговая мощность при прямом детектировании. Расчет зависимостей $P_{\text{пор}}$ от P_r из соотношения (6) для ФП с различными значениями $P_{\text{пр}}$ приведен на рис. 1.

Видно, что более высококачественные ФП с минимальными значениями $P_{\text{пр}}$ обеспечивают предельные параметры при гетеродинном режиме детектирования для значительно меньших мощностей гетеродинного сигнала. Так, при уменьшении $P_{\text{пр}}$ на один порядок (сравним кривые 1 и 2) для достижения предельных характеристик ФП в гетеродинном режиме детектирования мощность гетеродинного генератора уменьшается на два порядка. Это обеспечивает работу ФП в оптимальных условиях с точки зрения времени эксплуатации и использования в многоканальных системах гетеродинного излучения с ограниченной мощностью.

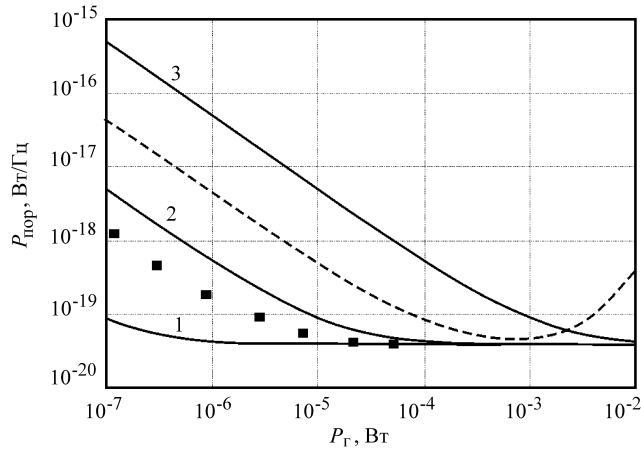


Рис. 1. Зависимости $P_{\text{пор}}$ от мощности P_r для фотоприемников с различными значениями $P_{\text{пр}}$ на длине волны 10,6 мкм при $\eta(\omega_{\text{п}}) = 0,5$, рассчитанные по формуле (6): $P_{\text{пр}} = 10^{-13}$ (кривая 1), 10^{-12} (кривая 2), 10^{-11} Вт/Гц^{1/2} (кривая 3). Пунктирная линия – типичный вид зависимости $P_{\text{пор}}$ от мощности P_r для реальных приемников на основе КРТ; квадраты – расчет зависимости $P_{\text{пор}}$ от P_r для экспериментального фотодиода на основе гетероэпитаксиальных слоев (ГЭС) КРТ, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), с $P_{\text{пр}} = 3,8 \times 10^{-13}$ Вт/Гц^{1/2}

Последовательное сопротивление растекания. Для высокочастотного приема сигнала предельная частота работы фотодиода характеризуется временем диффузии и дрейфа носителей через базу, временем их пролета через область пространственного заряда и постоянной времени τ , определяемой величиной $R_s C$, где R_s – последовательное сопротивление фотодиода, включающее сопротивление растекания по базовому слою и контактное сопротивление; C – емкость p - n -перехода. Предельная частота ФП будет лимитироваться R_s и C в случае их больших значений. Значительная величина R_s при гетеродинном приеме излучения приведет к изменению параметров работы СВЧ-детектора (напряжения смещения) по сравнению с оптимальными значениями, что вызовет ухудшение предельных параметров фотодиода. Уменьшить величину R_s можно за счет понижения сопротивления базы фотодиода и контактного сопротивления.

Низкая величина R_s характерна как для фотодиодов типа $p^+ - n$, что связано с высокой подвижностью электронов (на два порядка выше подвижности дырок) в поглощающем слое n -типа проводимости, так и для фотодиодов типа $n - p^+$ с высоким уровнем легирования в поглощающем слое p -типа проводимости.

Однако для фотодиодов типа $p^+ - n$ возможны ограничения в работе при гетеродинном режиме, связанные с низкой величиной подвижности дырок, что увеличивает время дрейфа и может ограничить верхнюю частоту, а также с низкой величиной длины диффузии дырок, приводящей к снижению квантовой эффективности. Кроме того, имеются технологические трудности формирования высококачественных $p^+ - n$ -переходов.

Увеличение уровня легирования подложки p -типа до значений $\geq 2 \times 10^{16}$ см⁻³ приводит к ухудшению пороговых характеристик фотодиодов

типа $n-p^+$ при прямом детектировании и уменьшению длины диффузии электронов, что вызывает снижение квантовой эффективности.

Тем не менее на пластинах из объемного КРТ p -типа толщиной ~ 1 мм с концентрацией носителей заряда $\sim 2 \cdot 10^{16}$ см $^{-3}$ разработаны и выпускаются фотодиоды для гетеродинного приема излучения с высокими рабочими частотами (более 1 ГГц) и пороговыми характеристиками, близкими к теоретическому пределу. В данном случае снижение R_s обеспечивается большой толщиной подложки и высоким уровнем ее легирования. Однако для увеличения квантовой эффективности на длине волны 10,6 мкм необходимо использовать материал с длинноволновым краем поглощения более 12 мкм. При прямом детектировании такие диоды характеризуются плохими пороговыми параметрами. Кроме того, они могут работать только при засветке через n -область, что создает проблему изготовления контакта к ней.

Для n^+-p -переходов диаметром 100–200 мкм, изготовленных на эпитаксиальных слоях КРТ p -типа, характерно высокое последовательное сопротивление R_s порядка единиц килоом для спектрального диапазона 8–14 мкм. Это связано с длиной протекания тока от фотодиода к базовому контакту. Емкость диффузионного перехода C составляет величину $\sim (1-10)$ пФ. Следовательно, для таких фотодиодов $R_s C \sim 10^{-9}-10^{-8}$ с, что позволяет обеспечить регистрацию излучений с частотами менее $(1-2) \cdot 10^8$ Гц.

Легирование эпитаксиальных слоев до высоких концентраций носителей заряда приведет к значительному ухудшению пороговых характеристик фотодиодов.

Таким образом, для резкого снижения R_s необходимо значительно уменьшить длину протекания тока. Решение этой проблемы можно достичь выращиванием эпитаксиального слоя КРТ на проводящей подложке или созданием высокопроводящего слоя при эпитаксии КРТ, не приводящего к ухудшению пороговых характеристик фотодиода.

Характеристики фотодиода на основе ГЭС КРТ МЛЭ. Для реализации снижения последовательного сопротивления при разработке СВЧ-фотодиода предложено использовать ГЭС КРТ МЛЭ [9] со специальным профилем распределения состава по толщине. Это достигается выращиванием бесщелевого высокопроводящего слоя на границе с буферным слоем.

Для оценки квантовой эффективности и оптимизации профиля состава КРТ фотодиодов (спектральный диапазон 8–12 мкм, толщина поглощающего слоя 10 мкм) было проведено численное моделирование параметров n^+-p -переходов для различных профилей состава по толщине. Моделирование производилось в диффузионно-дрейфовой модели, включающей уравнение Пуассона и уравнения непрерывности для электронов и дырок, учитывающие рекомбинацию и генерацию носителей заряда и встроенное поле, которое образуется в результате зависимости параметров зонной структуры от координаты [10].

Расчет и экспериментальные результаты для фотодиодов на основе ГЭС КРТ МЛЭ с различным распределением состава по толщине показали, что наличие только узкозонного слоя приводит к существенному снижению чувствительности. Введение широкозонного слоя после узкозонного устраняет влияние узкозонного слоя на чувствительность фотодиода, что способствует получению предельных параметров.

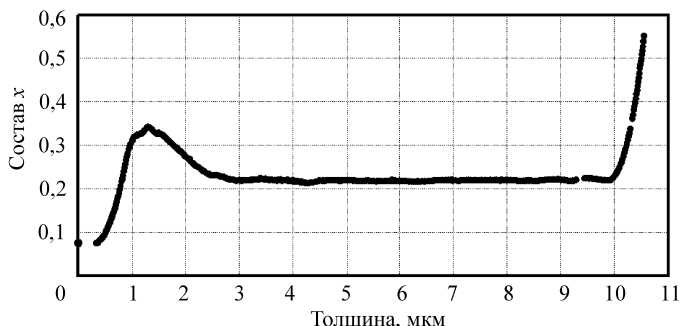


Рис. 2. Типичный профиль распределения состава по толщине ГЭС КРТ МЛЭ, используемых для СВЧ-фотодиодов с низким последовательным сопротивлением

СВЧ-фотодиоды были изготовлены на основе ГЭС КРТ МЛЭ с типичным распределением состава по толщине, показанным на рис. 2. На поверхности был выращен широкозонный варизонный слой [11].

Формирование $n^+ - p$ -перехода проводилось легированием ионами бора (B^+) в ГЭС КРТ МЛЭ p -типа проводимости при температуре 77 К со следующими параметрами: концентрация носителей заряда $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, подвижность $370 \text{ см} \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}$, время жизни неравновесных носителей 5–7 нс.

Измерения показали высокую квантовую эффективность, значение которой в максимуме чувствительности составило величину $\eta \sim 0,65$, что близко к теоретическому пределу для поверхности без антиотражающего покрытия. Типичная спектральная характеристика СВЧ-фотодиода приведена на рис. 3. Максимум чувствительности лежит в области 9,5–10 мкм. Длинноволновая граница чувствительности по уровню 0,5 от максимума равна 11 мкм. Для данного фотодиода зависимости тока и дифференциального сопротивления от напряжения смещения представлены на рис. 4.

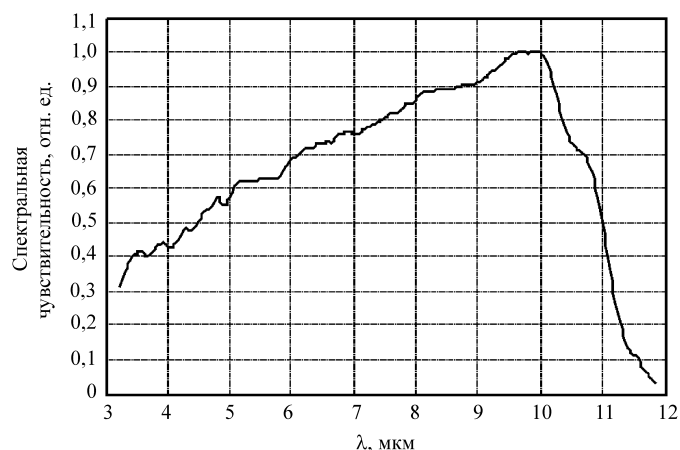


Рис. 3. Спектральная характеристика чувствительности для СВЧ-фотодиода с $\lambda_{0,5} = 11,0 \text{ мкм}$ диаметром 250 мкм (угол зрения $2\theta = 76^\circ$, $T = 295 \text{ К}$)

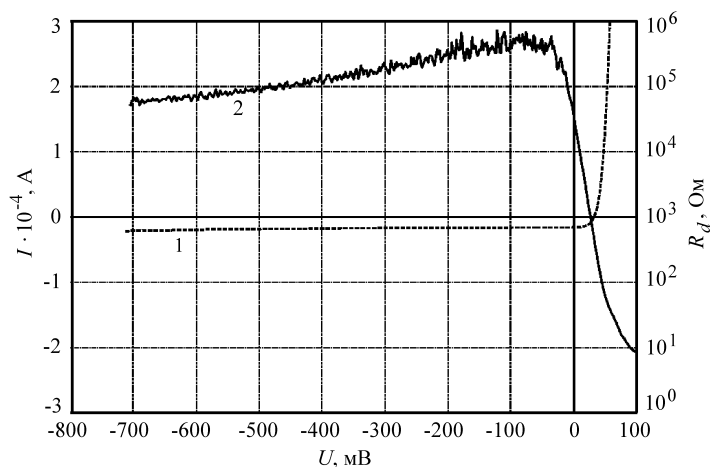


Рис. 4. Типичная вольт-амперная характеристика (кривая 1) и зависимость дифференциального сопротивления от напряжения смещения (кривая 2) для СВЧ-фотодиода с $\lambda_{0,5} = 11,0$ мкм и диаметром 250 мкм (угол зрения $2\theta = 76^\circ$, $T = 295$ К)

Произведение $R_0 A$ (R_0 – дифференциальное сопротивление при нулевом смещении, A – площадь фотодиода) достигало значений $100\text{--}130$ Ом · см² для лучших образцов. Последовательное сопротивление не превышало 10 Ом.

Применение ГЭС КРТ МЛЭ со специальным распределением состава по толщине позволило изготовить фотодиоды с высокой квантовой эффективностью и последовательным сопротивлением на два порядка ниже, чем для фотодиодов на основе структур с однородным распределением состава по толщине. Это означает, что для фотодиодов диаметром $100\text{--}200$ мкм следует ожидать возможность регистрации сигнала более 10 ГГц.

В таблице приведены типичные параметры СВЧ-фотодиода на основе ГЭС КРТ МЛЭ со специальным профилем распределения состава по толщине.

№ п/п	Параметры	Значение параметра
1	Длина волны в максимуме чувствительности, мкм	9,9
2	Длинноволновая граница спектральной чувствительности по уровню $0,5\lambda_{0,5}$, мкм	11,0
3	Диаметр фоточувствительной площадки, мкм	250
4	Пороговая мощность в максимуме чувствительности при прямом детектировании, Вт · Гц ^{-1/2}	$3,8 \cdot 10^{-13}$
5	Пороговая мощность в максимуме чувствительности при гетеродинном приеме, Вт · Гц ⁻¹	10^{-19}
6	Рабочая температура, К	77–78

Рис. 5. Общий вид СВЧ-детектора на основе ГЭС КРТ
МЛЭ фотодиода



На рис. 1 приведена расчетная зависимость пороговой мощности в гетеродинном режиме детектирования разработанного СВЧ-фотодиода по измеренной экспериментальной величине пороговой мощности при прямом детектировании (см. строку 4 таблицы). Из рисунка видно, что минимальная пороговая мощность в гетеродинном режиме СВЧ-фотодиода достигается при мощности гетеродинного сигнала на два порядка меньше, чем для выпускаемых типичных промышленных СВЧ-фотодиодов. Это означает, что разработанный нами СВЧ-фотодиод будет иметь более длительный рабочий ресурс.

СВЧ-детектор на основе КРТ-фотодиода. СВЧ-детектор (рис. 5) представляет собой криостат с вмонтированным внутри фотодиодом и схемой предварительного усиления сигнала.

Усилитель сигнала для фотодиода выполнен двухканальным. Низкочастотный канал представляет собой преобразователь ток–напряжение на быстродействующем операционном усилителе ОРА655 с входным каскадом на полевых транзисторах и переключаемыми резисторами в цепи обратной связи. Этот же преобразователь выполняет и функцию стабилизации рабочей точки фотодиода по напряжению при различных уровнях фоновой (сигнальной) засветки. Высокочастотный канал выполнен на малошумящих радиочастотных усилителях AD8350 (Analog Devices) с граничной частотой 1 ГГц. Коэффициент передачи сигнала по низкочастотному (переключаемому) ка-

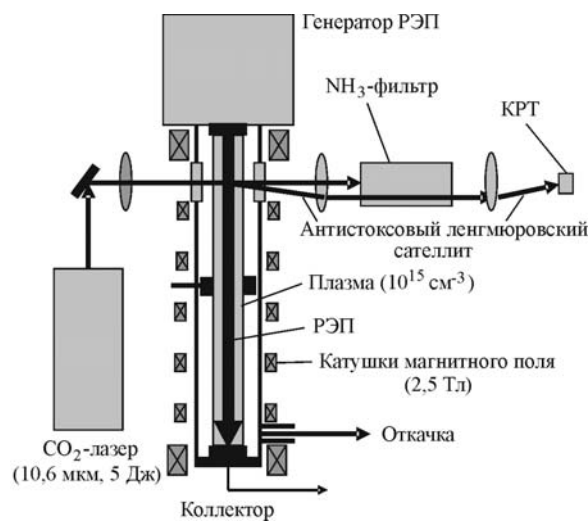


Рис. 6. Схема методики диагностики плазмы с помощью СВЧ-детектора на основе ГЭС КРТ
МЛЭ фотодиода

налу 2–30 В/мА при полосе пропускания от 0 до 8 МГц, по высокочастотному каналу ~ 5 В/мА.

Криостат изготовлен в виде сосуда Дьюара размером 70×90×140 мм, входное окно сменное (Ge с просветляющим покрытием или ZnSe). Фотодиод защищен холодной диафрагмой с апертурным углом 30°. Время работы при одной заливке 8 ч.

Применение СВЧ-детектора для диагностики плазмы. СВЧ-детектор был использован для разработки новых методов диагностики высокотемпературной плазмы. Работоспособность детектора проверялась на крупномасштабной экспериментальной установке ГОЛМ [12] при условиях высокого уровня электромагнитных помех и радиационного излучения для исследования ленгмюровских флуктуаций плазмы в течение длительного периода [13].

Схема методики представлена на рис. 6. Задача диагностики – исследование динамики ленгмюровской турбулентности, возбуждаемой в плазме при

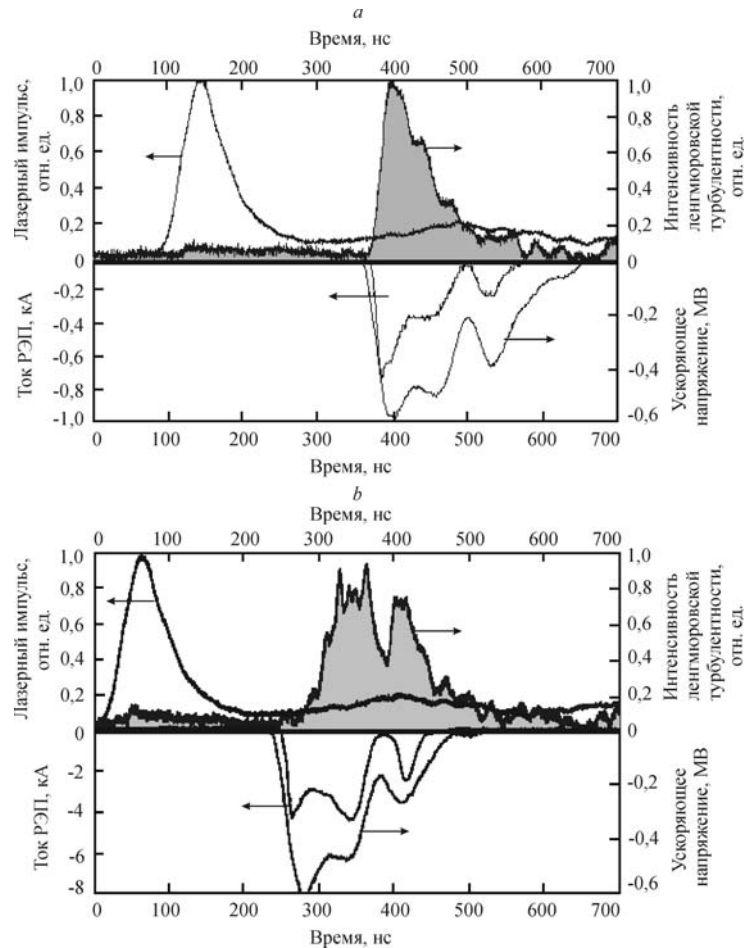


Рис. 7. Типичные осциллограммы коллективного рассеяния излучения CO_2 -лазера на ленгмюровских колебаниях плазмы: *a* – инъекция в плазму килоамперных РЭП, форма сигнала турбулентности хорошо совпадает с формой тока пучка; *b* – инъекция РЭП с токами до 10 кА, сигнал турбулентности задержан относительно тока РЭП

инжекции мощного РЭП, с целью обнаружения корреляций с наблюдаемым ранее коллапсом ленгмюровских волн [14].

Типичные формы регистрируемого сигнала рассеяния CO_2 -излучения на флуктуациях плазмы для двух режимов генерации РЭП представлены на рис. 7, *a, b*. Видно, что с увеличением тока РЭП динамика турбулентности плазмы перестает коррелировать с током пучка (см. рис. 7, *b*) и что своего максимума уровень турбулентности достигает только к концу РЭП.

Время максимума турбулентности при более мощном РЭП хорошо коррелирует со временем регистрации каверн плотности плазмы. Наблюдаемые провалы сигнала турбулентности в районе 350 нс удовлетворительно интерпретируются коллапсом ленгмюровских волн с характерным временем в несколько наносекунд. В ходе экспериментов заметных изменений чувствительности и других параметров СВЧ-детекторов на основе ГЭС КРТ МЛЭ обнаружено не было.

Заключение. Разработаны конструкция и технология изготовления высокочастотных n^+p -фотодиодов на основе гетероэпитаксиальных слоев теллурида кадмия и ртути, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии. ГЭС КРТ МЛЭ имеют узкозонный слой для уменьшения последовательного сопротивления фотодиода, величина которого менее 10 Ом. Введение широкозонного слоя после узкозонного в структуре позволяет получить высокую квантовую эффективность фотодиода 0,65 без просветляющего покрытия. Впервые на эпитаксиальных слоях $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ изготовлен СВЧ-фотодиод с предельными пороговыми характеристиками $3,8 \times 10^{-13} \text{ Вт} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$ и $10^{-19} \text{ Вт} \cdot \text{Гц}^{-1}$ как в гетеродине, так и в прямом режиме приема сигнала соответственно в спектральном диапазоне 8–12 мкм. На основе фотодиодов изготовлен СВЧ-детектор в залидном криостате с широкополосным предусилителем до 1 ГГц. На установке ГОЛ-3 проведены испытания СВЧ-детектора, которые показали надежную регистрацию сигнала рассеяния CO_2 -излучения на флуктуациях плазмы для двух режимов генерации РЭП. В ходе экспериментов заметных изменений чувствительности и других параметров СВЧ-детектора обнаружено не было.

Авторы выражают благодарность Л. Д. Бурдиной, О. И. Малышеву, В. А. Карташову, Р. Н. Смирнову, Д. Г. Икусову за выращивание ГЭС КРТ МЛЭ, Т. И. Захарьяш за изготовление фотодиодов и А. А. Борщеву за разработку и изготовление криостата .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Рогальский А.** Инфракрасные детекторы: Пер. с англ. Новосибирск: Наука, 2003.
2. **Арсеньев В. В., Давыдов Ю. Т.** Приемные устройства оптического диапазона. М.: Изд-во МАИ, 1999.
3. **Горелик Л. И., Куликов К. М., Трошкин Ю. С., Шаронов Ю. П.** Применение фоторезисторов на основе материала $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ для работы в гетеродинном режиме // Прикладная физика. 1999. № 3. С. 54.
4. **Hale D. D. S., Bester M., Danchi W. C. et al.** The Berkeley infrared spatial interferometer: a heterodyne stellar interferometer for the mid-infrared // *Astrophys. Journ.* 2000. **537**. P. 998.
5. **Hale D. D. S., Fitelson W., Monnier J. D. et al.** Techniques for measuring phase closure at 11 microns // *Proc. SPIE.* 2003. **4838**. P. 387.

6. **Betz A., Sutton E. C., McLaren R. A.** Infrared heterodyne spectroscopy in astronomy // Laser Spectroscopy III (Springer Series in Optical Sciences). 1977. 7. P. 31.
7. **Orlinskij D. V., Magyar G.** Plasma diagnostics on large TOKAMAKS // Nucl. Fusion. 1988. 28, N 4. P. 611.
8. **Аржанников А. В., Астрелин В. Т., Бурдаков А. В. и др.** Исследование механизма быстрого нагрева ионов в многопробочной ловушке ГОЛ-3 // Физика плазмы. 2005. 31, вып. 6. С. 506.
9. **Varavin V. S., Dvoretzky S. A., Liberman V. I. et al.** Molecular beam epitaxy quality HgCdTe films control of the composition distribution // Journ. Cryst. Growth. 1996. 159. P. 1161.
10. **Варавин В. С., Васильев В. В., Захарьяш Т. И. и др.** Фотодиоды с низким последовательным сопротивлением на основе варизонных эпитаксиальных слоев CdHgTe // Оптический журнал. 1999. 66, № 12. С. 69.
11. **Сидоров Ю. Г., Дворецкий С. А., Михайлов Н. Н. и др.** Конструирование и выращивание фоточувствительных структур на основе КРТ МЛЭ для ИК-фотоприемников // Прикладная физика. 2000. № 5. С. 121.
12. **Arzhannikov A. V., Astrelin V. T., Avrorov A. P. et al.** Progress in plasma heating with powerful electron beams in open system // Nuclear Fusion. 1987. Supplement Vol. P. 323.
13. **Burmasov V. S., Kandaurov I. V., Kruglyakov E. P., Popov S. S.** Method for studying local dynamics of plasma fluctuations in the formation progress of Langmuir cavities // Trans. of Fusion Technol. 2004. 47, N 1T. P. 294.
14. **Vyacheslavov L. N., Burmasov V. S., Kandaurov I. V. et al.** Strong Langmuir turbulence with and without collapse experimental study // Plasma Phys. Control. Fusion. 2002. 44. P. 1.

Поступила в редакцию 4 мая 2007 г.