

InAs – InAsSb двухспектральные фотодиодные сенсоры для низкотемпературной пирометрии

Сотникова Г.Ю., Александров С.Е., Гаврилов Г.А., Капралов А.А. Матвеев Б.А.,
Ременный М.А.

ФТИ им. А.Ф.Иоффе Российской академии наук, С.-Петербург, РФ

Оптическая спектроскопия в ближней ($0.75 < \lambda < 2.5$ мкм) и средней ($2.5 < \lambda < 40$ мкм) ИК-областях спектра уже давно заняла прочное место среди наиболее надежных и достоверных методов контроля технологических процессов в промышленности, медицинской терапевтической и хирургической практике и системах экологического мониторинга и безопасности, например, для измерения концентрации углекислого газа [1]. Освоение новых областей применения, в частности, пирометрии, связано с обеспечением возможности регистрации слабых потоков теплового излучения с высоким быстродействием. Современные системы пирометрии (бесконтактного измерения температуры) должны, как правило, обладать высоким пространственным (размер исследуемого объекта менее 1 мм), временным (доли мс) и энергетическим (до 16 бит) разрешением, иметь малый уровень собственных шумов и высокую стабильность и воспроизводимость результатов измерений в условиях неизвестных/меняющихся значений излучательной способности объекта, при наличии сильных электромагнитных полей, мощной фоновой засветки и т.п. С учетом вышеприведенных требований наибольший интерес вызывают методы и системы мультиспектральной пирометрии [2, 3]. При этом наиболее перспективными являются системы, в которых выделение рабочих спектральных диапазонов осуществляется непосредственно в фотоприемнике. Это позволяет не только существенно упростить оптико-механическую схему измерительного устройства, заметно уменьшить его габариты, массу и энергопотребление, но и значительно повысить точность и надежность измерений. Для реализации таких систем необходимо существенное увеличение фоточувствительности, и быстродействия чувствительного элемента (сенсора), решения вопросов его оптической и электронной стыковки с измерительными и вычислительными устройствами.

В ФТИ им. А.Ф.Иоффе ведутся работы по созданию и исследованию ряда гетероструктур с фоточувствительными слоями из InAs или InAsSb (спектральная область чувствительности 2-5 мкм), включая структуры с гетеропереходом второго типа InAsSbP/InAs, создающими потенциальный барьер для основных носителей заряда [4]. Повышение фоточувствительности и быстродействия в таких структурах достигается в основном за счет создания плавного p-n перехода, пространственно совмещенного с гетерограницей, и уменьшения количества структурных дефектов, создающих глубокие уровни. Высокая обнаружительная способность (до 10^{11} см $\cdot\sqrt{\text{Гц/Вт}}$, 300 К) ФД на основе указанных структур достигается за счет использования «флип-чип» конфигурации в совокупности с Si-линзой в виде гиперполусферы (сферы Вейерштрасса) диаметром открытой части 3.2 мм (меза 300 мкм), сопряженной с поверхностью полупроводниковой структуры с помощью халькогенидного стекла с показателем преломления $n=2.4$.

Фотодиодные структуры с «флип-чип» конфигурацией отличаются от ФД-аналогов (см., например, www.hamamatsu.com) спектральной узкополосностью (как правило, $\Delta\lambda/\lambda_{\text{макс}} \sim 0.1$), что является дополнительным преимуществом для радиационной пирометрии т.к. позволяет использовать такие ФД без дополнительных спектральных фильтров. Наличие же целой «линейки» фотодиодных структур (Рис.1) позволяет создавать мультиспектральные сенсоры с различной комбинацией спектральных/измерительных каналов. Малая инерционность ФД (десятки наносекунд) позволяет создавать широкополосные измерительные системы с малым временем отклика.

Важно помнить, что малое динамическое сопротивление средневолновых ФД накладывает жесткие ограничения на элементы усилительных схем сенсоров, использующих данные ФД [5]. Для получения значения чувствительности ФД сенсоров, близких к

предельно достижимым при заданных физико-технических свойствах средневолновых структур, используются аналого-цифровые схемы преобразования сигналов фототока, а также температурная стабилизация ФД [6].

Созданы макеты пирометрических сенсоров с использованием различных оптических схем доставки теплового излучения до ФД с линзовыми, зеркальными и оптоволоконными

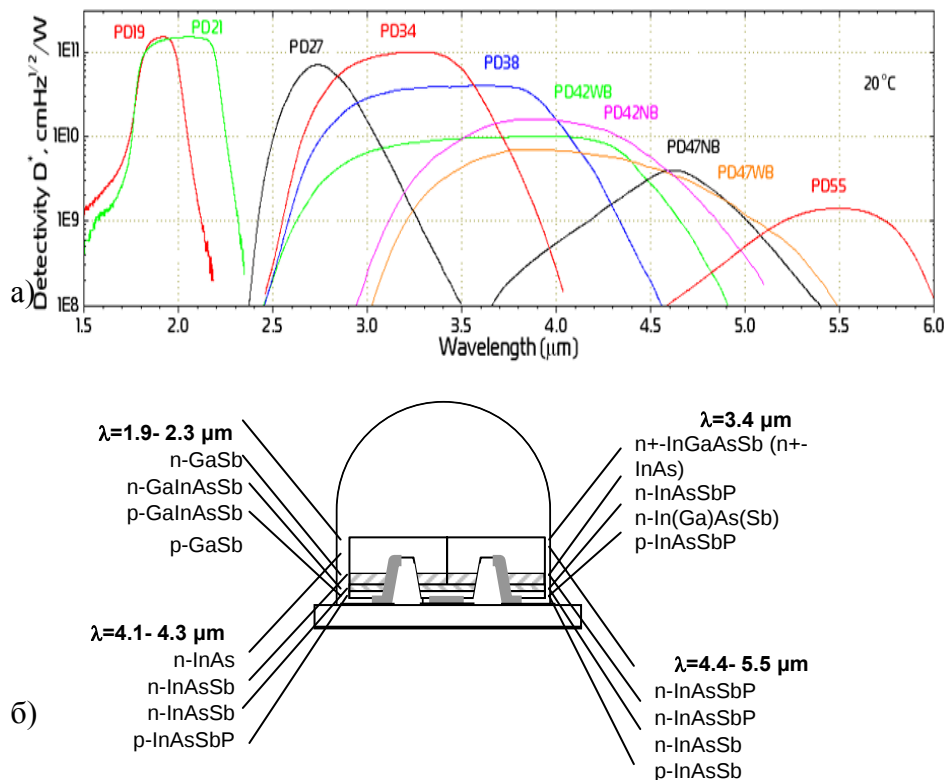


Рис.1 Спектральные характеристики (а) и схематический чертеж чипа (б) односпектральных ФД различного состава с «флип-чип» конфигурацией и кремниевой линзой (по данным ресурса www.ioffeled.com).

элементами [7-8]. Так, приведенные выше преимущества рассматриваемых ФД, позволили разработать уникальную систему контроля температуры торца оптоволоконного, интегрированную в драйверы мощных п/п лазеров с оптоволоконным выводом излучения в составе медицинских лазерных скальпелей [7]. При этом было использовано «фильтрующее» свойство «флип-чип» геометрии, которое в совокупности с кремниевой линзой обеспечивает значительное подавление (не менее 120 дБ) излучения в области ближнего ИК. Это позволяет проводить измерения температуры объектов, нагреваемых внешним излучением, например мощными п/п лазерами, спектральные линии излучения которых обычно лежат в области 0.8-1 мкм. Разработанная система позволяет контролировать температуру на торце кварцевого оптоволоконного диаметром от 400 мкм в диапазоне 500-1100 °С с точностью не хуже 1% при быстродействии 1000 отсчетов/секунду.

В последнее время основное внимание мы уделяем исследованиям систем измерения температуры, работающих в двух или более спектральных диапазонах, что позволяет проводить измерения температуры объектов с неизвестными/изменяющимися линейными размерами и значениями излучательной способности. С этой целью были разработаны двухспектральные ФД на основе односпектральных ФД-структур, чувствительных в областях 3 и 4 мкм. Для первого по ходу лучей ФД (ФД1) чувствительного в области 3 мкм, фоточувствительный слой n-InAs выполняет роль оптического фильтра для второго по ходу лучей ФД (ФД2) с чувствительным слоем InAsSb (см. спектральные характеристики PD34 (InAs) и PD43 (InAsSb) для на Рис.1а). Были изготовлены макеты двухспектральных

пирометров (ИК-термометров), предназначенных для измерений характеристик теплового излучения удаленного объекта с использованием зеркальной оптики (диаметр главного зеркала 60 мм, коэффициент визирования 1:100) и оптоволокну (сапфир, халькогенидное стекло; диаметр жилы 400-600 мкм, $NA \approx 0.2..0.3$). Пирометры обеспечивают детектирование теплового сигнала одновременно в двух спектральных каналах в полосе от 0 до 300 кГц (соответствует максимальному быстродействию пирометрической системы порядка 30 мкс), аналого-цифровое преобразование (14 разрядов) и on-line передачу данных в канал связи для последующей обработки. Для повышения точности измерений в области температур ниже 200 °С в сенсоре предусмотрено сужение полосы детектирования сигнала. На Рис.3 приведены экспериментальные значения передаточной характеристики сенсора - выходных сигналов (токов ФД, I_{FD}) от температуры исследуемого объекта в диапазоне от -10 до 250 °С и значения отношения этих токов, т.е. безразмерной величины “R”, используемой для расчета температуры объекта. Градуировка проводилась на сенсоре без дополнительной оптики (только с Si-линзой, установленной на поверхности ФД, угол сбора излучения порядка 15 град.), при быстродействии сенсора 1 мс и линейных размерах исследуемого объекта 5 мм. Сплошными линиями представлены соответствующие данным спектральным линиям интерполяционные функции, полученные на основе монохроматического закона Планка.

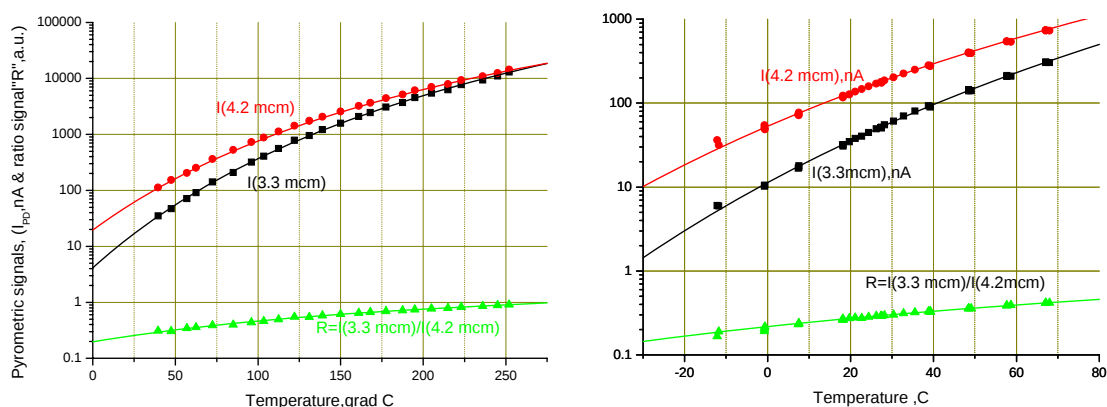


Рис.2. Экспериментальные значения (точки) и монохроматическая интерполяция (сплошные линии) выходных токов InAs – InAsSb двухспектрального пирометрического сенсора в диапазоне температур -10 до 250 °С (полоса детектирования 1 кГц, площадь измеряемого участка $\approx 0,25 \text{ см}^2$).

Передаточная характеристика сенсора для диапазона температур -20-60 °С выделена в отдельный график (Рис.3, правая панель), т.к. представляет наибольший интерес для медицинских применений. Хорошее совпадение экспериментальных данных с теоретическими зависимостями подтверждает достаточно высокую спектральную селективность указанных ФД, что дает возможность аналитического описания их работы в качестве ИК-термометров и открывает пути их калибровки непосредственно на рабочем месте. Экспериментально измеренные значения дисперсии шумов ФД сенсора в полосе 1 кГц (быстродействие 1 мс), составили 1 и 3 нА для спектрального/измерительного канала 3.3 мкм (ФД1) и 4.2 мкм (ФД2) соответственно что позволяет говорить о нижнем температурном пороге детектирования разработанного двухспектрального пирометрического сенсора, близком к 0 °С.

Одним из существенных преимуществ двухспектрального метода измерения температуры является отсутствие зависимости результатов расчетов от площади измеряемого объекта, что существенно повышает точность пирометрических измерений и расширяет область их использования, т.к. позволяет использовать ИК-термометры в условиях, отличных от тех при которых проводилась их градуировка.

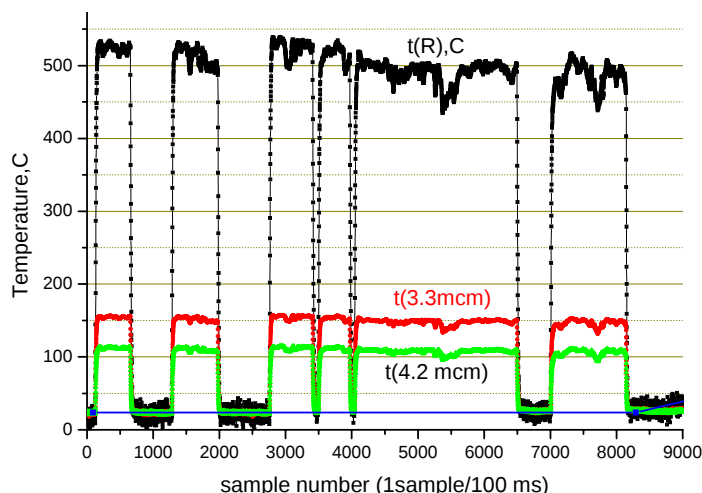


Рис.3. Результаты расчетов температуры проволоки (толщина 200 мкм) при ее импульсном нагреве током: в квазимонохроматическом режиме для каждого из спектральных каналов (нижние кривые) и с использованием «спектрального отношения».

На Рис.3 представлены результаты эксперимента по детектированию температуры нити накаливания (проволока толщиной ≈ 200 мкм) при ее разогреве импульсным током до температур, близких к началу «свечения» макетом пирометра с зеркальной оптической схемой (расстояние до объекта 2 м). Из Рис. 3 видно, что вычисления температуры нити по данным только одного спектрального/измерительного канала приводит к значительным погрешностям по сравнению с вычислениями с использованием переменной «спектрального отношения» “R”.

В результате проведенных исследований показано, что пирометрические сенсоры на основе двухспектральных ФД сенсоров на основе InAs и InAsSb позволяют создавать ИК-термометры, сочетающие в одном измерительном устройстве высокое быстродействие (единицы мс), низкий порог детектирования (до 0 °C) и малые линейные размеры измеряемого объекта (доли-единицы мм) при высокой точности измерений, не зависящей от его размеров и величины излучательной способности, что соответствует предельным параметрам мировых аналогов диапазона температур ниже 300 °C .

ЛИТЕРАТУРА

1. Sotnikova, G.Yu., Gavrilov, G.A., Aleksandrov, S.E., Kapralov, A.A., Karandashev, S.A., Matveev, B.A.; Remennyy, M.A., Low voltage CO₂-gas sensor based on III-V mid-IR immersion lens diode optopairs: Where we are and how far we can go? , IEEE Sensors J., v.10, 2 (2010), pp 225-234
2. T.Fu, J.Liu, M.Duan, and A.Zong , Temperature measurements using multicolor pyrometry in thermal radiation heating environments, Rev.of Scientific Instruments 85,044901 (2014)
3. X.Zhou, M.J. Hobbs, B.S.White, J.P.R.David, J.R.Willmott, and Chee Hing Tan, An InGaAlAs-InGaAs Two-Color Photodetector for Ratio Thermometry, IEEE Trans. on Electron Dev., vol.61, No.3 (2014), pp.838-843
4. P.N. Brunkov, N.D. Il'inskaya, S.A. Karandashev, A.A. Lavrov, B.A. Matveev, M.A. Remennyy, N.M. Stus', A.A. Usikova, “Cooled P-InAsSbP/n-InAs/N-InAsSbP double heterostructure photodiodes», Infrared Physics & Technology 64 (2014) 62–65.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.infrared.2014.01.010>
5. Гаврилов Г.А., Матвеев Б.А., Сотникова Г.Ю., «Предельная чувствительность фотоприёмного устройства на основе фотодиодов А³В⁵ среднего ИК-диапазона спектра», Письма ЖТФ, 37(18), 50-57 (2011)
6. Александров С.Е., Гаврилов Г.А., Сотникова Г.Ю. , Влияние низкочастотных шумов на пороговую чувствительность фотодиодных фотоприёмных устройств среднего ИК-диапазона в широкой полосе частот, Письма в ЖТФ, 2014. том 40, вып. 16, 58-64.
7. С.Е.Александров, Г.А.Гаврилов, Г.Ю.Сотникова, А.Л.Тер-Мартirosян, Система контроля температуры рабочего торца оптоволоконных лазерных модулей с волоконным выводом излучения для медицинской аппаратуры, ФТП, 2014, том 48, вып. 1, 129-135
8. Г.Ю.Сотникова, С.Е.Александров, Г.А.Гаврилов, Быстродействующие оптоволоконные сенсоры на основе АЗВ5 фотодиодов для ИК-фотометрии, Сборник научных трудов IV ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ ПО ФОТОНИКЕ И ИНФОРМАЦИОННОЙ ОПТИКЕ , 28 - 30 января 2015 года, Москва, НИЯУ МИФИ, ISBN 978-5-7262-2053-6, стр. 112-113.

“InAs – InAsSb two-color photodiode sensors for low-temperature pyrometry”

G.Yu.Sotnikova¹, S.E.Aleksandrov¹, G.A.Gavrilov¹, A.A.Kapralov¹, B.A.Matveev^{1,2}, M.A.Remenny^{1,2}

¹ Ioffe Institute, St.Petersburg,Russia

² IoffeLED, Ltd. St.Petersburg,Russia

G.Sotnikova@mail.ioffe.ru

We report on dual-band PD sensors (IR- thermometer) that allow low-temperature radiation thermometry measurements (≤ 300 °C) of objects with unknown/variable linear dimensions and/or emissivity. Two-color pyrometer modeling using a variety of optical systems with mirrors, lenses and fibers has been undertaken. Simulations and experimental verification include dual-band PD sensor utilizing single-band PD heterostructures with InAs absorbing layer and structures with InAsSb absorbing layer, sensitive in 3 and 4 μm bands respectively. The above sensor provides detection of radiation simultaneously in two spectral / measurement channels in a 300 kHz frequency band (operation speed of about 30 μs), analog-to-digital conversion (14 bits) and on-line data transmission through a communication channel for subsequent data processing. The experimental values of the sensor output signals (PD currents together with dimensionless value “R” equal to ratio of these currents) together with the transfer function based on Plank’s law for measuring temperatures from -20 to 250 °C of the object surface of about 0.25 cm^2 are presented and discussed.

It is shown that dual-band spectral sensors based on narrow band gap A3B5 heterostructures allow to create IR thermometers that combine in a single measurement unit fast response (unit-fraction of ms) and low temperature detection threshold (down to 0 °C) with high accuracy, independent of the size and emissivity of the object.