

К. ф.-м. н. В. Н. КАБАЦИЙ

Украина, Мукачевский государственный университет
E-mail: vm@msu.edu.ua

Дата поступления в редакцию
17.03 2010 г.

Оппонент д. т. н. В. В. ДАНИЛОВ
(ДонНУ, г. Донецк)

ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ СЕНСОРЫ ГАЗОВ НА ОСНОВЕ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ ИСТОЧНИКОВ ИК-ИЗЛУЧЕНИЯ

Разработанные сенсоры метана и диоксида углерода учитывают особенности спектральных характеристик источников и приемников излучения среднего ИК-диапазона спектра и обладают высокой чувствительностью.

Актуальной задачей в области контроля технологических процессов в промышленном производстве и теплоэнергетике, экологического контроля выбросов загрязняющих газов в атмосферу является измерение концентрации молекулярных компонентов газовой смеси. Загрязняющие атмосферу газы образуются при неполном сгорании топлива в двигателях автомобилей и различных печах, выделяются из современных отделочных материалов и упаковок при их тлении или горении, а также при пиролизе или нестандартных режимах функционирования электрооборудования. Эффективно оценить состояние атмосферы и концентрацию вредных газов в ней можно только при условии объективного контроля инструментальными средствами.

На практике для анализа состава многокомпонентных газовых смесей широко используется метод инфракрасной (ИК) спектроскопии. Наличие узких селективных полос поглощения разной интенсивности в средней ИК-области спектра, характерных для каждого анализируемого компонента, позволяет выбирать оптимальные условия для измерения концентрации паров воды, метана, оксида и диоксида углерода. В последние годы наблюдается переход от традиционных средств анализа газа, в которых используются лампы накаливания, оптические фильтры и механические модуляторы излучения, к multifunctional приборам газового анализа нового поколения, разработанным и изготовленным на современной элементной базе [1, 2]. Учитывая, что основными элементами современного оптоэлектронного сенсора являются полупроводниковые источники и фотоприемники ИК-излучения, для достижения высокого КПД сенсора необходимо, чтобы параметры его составных частей были согласованы по спектральным характеристикам, быстродействию, температурным свойствам и габаритам. Помимо этого, источники ИК-излучения, применяемые в оптоэлектронных сенсорах, должны обладать достаточно узкой направ-

ленностью излучения и работать при сравнительно небольших значениях входного тока. Поэтому совершенствованию полупроводниковых источников ИК-излучения уделяется большое внимание. Не менее важным является и выбор фотоприемника, который должен обладать не только высокой эффективностью преобразования падающего на него излучения в электрический ток, но и требуемым спектральным распределением фоточувствительности и быстродействием [3].

Использование полупроводниковых источников и фотоприемников ИК-излучения существенно повышает чувствительность, селективность, быстродействие, экономичность и надежность спектроабсорбционных приборов анализа состава газовых смесей, значительно уменьшает их габариты и материалоемкость, а также позволяет автоматизировать процесс измерения, применять непрерывный контроль состояния окружающей среды и промышленных процессов [4, 5].

Настоящая работа посвящена разработке оптоэлектронных сенсоров метана и диоксида углерода с использованием многоэлементных полупроводниковых источников излучения и фотоприемников, работающих в спектральном диапазоне 2,5—5,0 мкм.

Многоэлементные полупроводниковые источники ИК-излучения в области спектра 2,5—5,0 мкм

Излучающие активные элементы (АЭ) полупроводниковых источников, работающих при комнатной температуре, с $p-n$ -переходами и высокими коэффициентами инжекции при электролюминесценции, изготовлены на базе твердых растворов InGaAs/InAs и InAsSbP/InAs методом жидкостной эпитаксии [2]. Активные элементы изготавливались в виде правильного треугольника размерами 0,5×0,5×0,5 мм толщиной 250—300 мкм. Торцевые грани АЭ получались скрайбированием структур по плоскостям спайности (100) и не требовали дополнительной механической и химической обработки. Точечный контакт (диаметром около 150 мкм) наносился на грань, через которую выводится излучение, а сплошной контакт — на противоположную грань. Для повышения внешнего квантового выхода на излучающие АЭ наносилось оптическое покрытие, выполняющее одновременно роль защитного, просветляющего и фокусирующего покры-

тия. В качестве материалов для оптического покрытия использовались халькогенидные стеклообразные полупроводники (ХСП) на базе многокомпонентных систем $\text{Ge(Pb)}-\text{Sb(Bi,Ga)}-\text{S(Se)}$ [6]. Оптические покрытия из ХСП наносились путем заливки плоских АЭ и имели вид полусферической или куполовидной поверхности. Изменением химического состава ХСП можно решать проблему согласованности коэффициентов термического расширения активного элемента, корпуса и оптического покрытия.

Оптическое покрытие из ХСП в виде вытянутой полусферы сужает диаграмму направленности излучения вдоль оптической оси от 160° до 40° и повышает мощность излучения АЭ в 2,5—3 раза. При использовании оптического покрытия в виде цилиндрической поверхности с полусферическим куполом удалось сузить диаграмму направленности излучения до 15° и увеличить мощность излучения в 3,5—4 раза [5]. Разработанная нами технология нанесения оптического покрытия на излучающие АЭ обеспечивает удовлетворительную воспроизводимость геометрии стеклянного купола [7].

Конструкции полупроводниковых источников излучения [2, 6—9] разработаны такими, что позволяют разместить несколько АЭ на одном теплопроводном основании или на полупроводниковом микроохладителе, причем АЭ могут излучать волны одной или разной длины, а их питание осуществляется раздельно в непрерывном или импульсном режиме. Комплексные исследования электрофизических и оптических параметров активных элементов позволили определить оптимальные составы твердых растворов для их изготовления, обеспечивающие такое излучение АЭ, длина волны которого была бы согласована с длиной волны собственного поглощения соответствующего газа или компонента газовой смеси (рис. 1). Практический интерес представляют волны длиной 2,9; 3,32; 4,27 и 4,67 мкм, соответствующие селективным полосам поглощения паров воды, метана, углекислого газа, оксида углерода.

Вследствие изменения ширины запрещенной зоны материалов A^3B^5 с повышением температуры внеш-

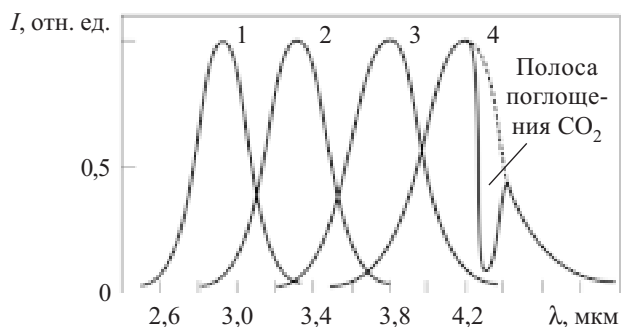


Рис. 1. Зависимость интенсивности излучения p - n -перехода различных АЭ от длины волны излучения λ при $T=300$ К, согласованной с максимумом полосы собственного поглощения различных газов:

1 — $\lambda=2,9$ мкм (пары воды); 2 — $\lambda=3,32$ мкм (метан); 3 — $\lambda=3,9$ мкм (используется для опорного канала в сенсоре); 4 — $\lambda=4,27$ мкм (диоксид углерода)

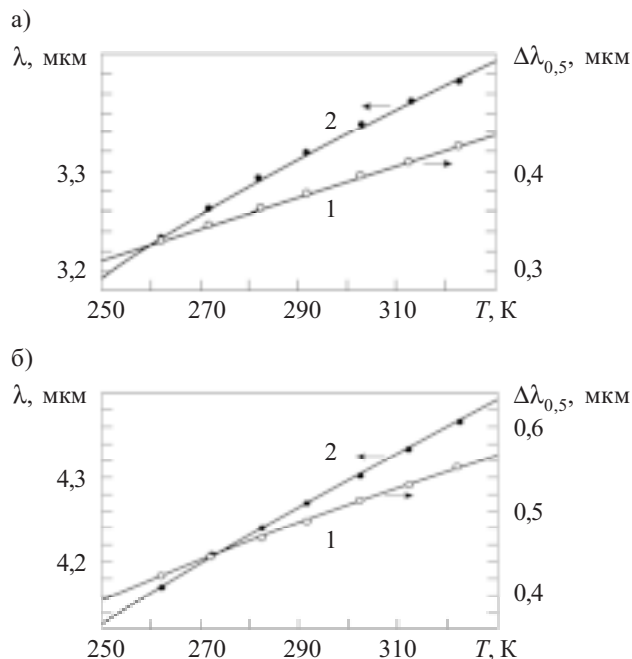


Рис. 2. Температурные зависимости спектрального положения максимума в спектре излучения (1) и полуширины спектра (2) излучения активных элементов, используемых в сенсоре метана (а) и диоксида углерода (б)

ней среды спектральные характеристики излучающих АЭ, изготовленных на их основе, смещаются в длинноволновую область спектра. Изменение температуры АЭ происходит также вследствие разогрева p - n -перехода при увеличении прямого тока через него. Поэтому при проектировании и изготовлении оптоэлектронных сенсоров газа необходимо знать и учитывать температурный коэффициент смещения максимума в спектре излучения АЭ. Спектральные характеристики АЭ измерялись в диапазоне температуры 250—330 К. На основании этих измерений для АЭ, используемых в оптоэлектронных сенсорах метана и диоксида углерода, были определены температурные зависимости спектрального положения максимума в спектре излучения и полуширины спектра при значении прямого тока, проходящего через АЭ, $I=200$ мА, длительности импульсов $\tau=500$ мкс и частоте их следования $\nu=10^3$ Гц (рис. 2).

Для измерения мощности излучения АЭ в области спектра 2,5—5,0 мкм использовалась интегрирующая сфера и калибровочный охлаждаемый PbSe-фотоприемник. Внутренняя поверхность сферы диаметром 80 мм покрывалась деформированной алюминиевой фольгой с коэффициентом диффузного отражения 0,9—0,92. Источник ИК-излучения и фотоприемник (ФП) расположены на противоположных сторонах сферы и разделены между собой диффузно рассеивающим экраном. Мощность излучения рассчитывалась с учетом свойств интегрирующей сферы по формуле

$$P = \frac{4D^2(1-\beta)U}{d^2S_p},$$

где D — внутренний диаметр сферы;
 β — коэффициент диффузного отражения поверхности сферы;
 U — электрический сигнал на выходе ФП;
 d — диаметр чувствительной площадки ФП;
 S_p — интегральная чувствительность ФП по отношению к исследуемому источнику излучения.

До начала измерений интегрирующая сфера про-
 дувалась осушенным азотом, объем которого в де-
 сять раз превышал объем сферы. Мощность излу-
 чения АЭ измерялась с погрешностью не более 15% в
 диапазоне температуры 250—330 К при плотности J пря-
 мого тока I , проходящего через АЭ, от 1 до 10^3 А/см².
 Длительность τ прямоугольных импульсов тока из-
 менялась от 25 до 500 мкс при частоте ν их следова-
 ния от 10 до 10^6 Гц. Результаты исследования АЭ при
 $\nu=10^3$ Гц, $\tau=500$ мкс представлены на рис. 3. Как
 видно, для всех исследуемых АЭ мощность излу-
 чения при $I=200$ мА уменьшается с повышением тем-
 пературы (рис. 3, а).

Зависимость мощности излучения АЭ от величи-
 ны прямого тока через p - n -переход измерялась при
 $T=293$ К (рис. 3, б).

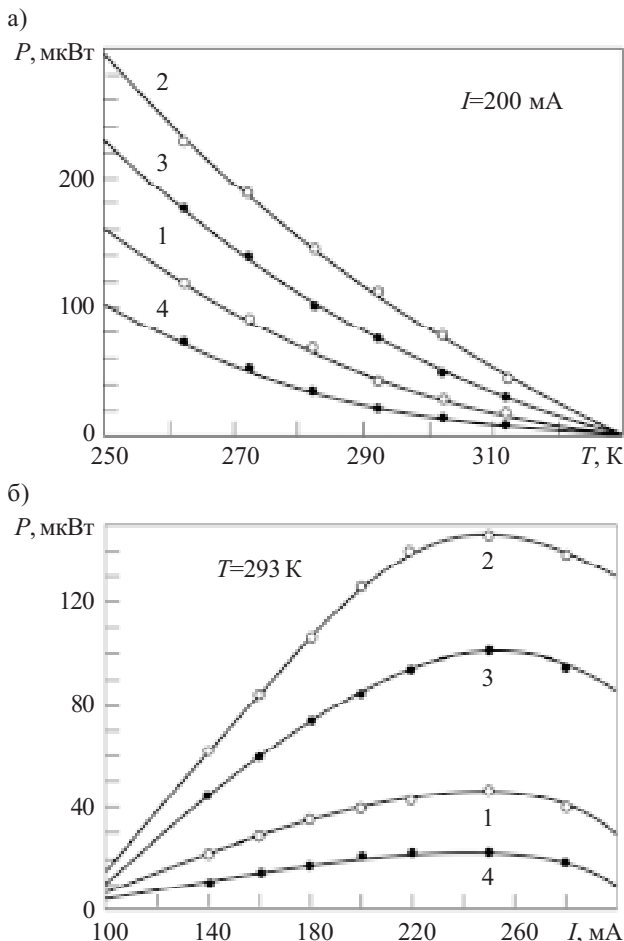


Рис. 3. Зависимость мощности излучения от температу-
 ры (а) и от прямого тока через p - n -переход (б) активных
 элементов, имеющих различную длину волны макси-
 мального излучения $\lambda_{\max}$ (в мкм):
 1 — 2,9; 2 — 3,32; 3 — 3,9; 4 — 4,27

На этом рисунке видно, что при увеличении пря-
 мого тока через p - n -переход вплоть до 250 мА
 (25 А/см²) мощность излучения для всех исследуе-
 мых АЭ увеличивается, достигая насыщения, после
 чего начинает уменьшаться с увеличением тока вслед-
 ствие нагревания p - n -перехода. Изменение режима
 работы АЭ ($\nu=10$ Гц, $\tau=25$ —50 мкс) приводит к тому,
 что p - n -переход не успевает нагреться даже при токе
 7 А (700 А/см²), а мощность излучения возрастает в
 несколько раз.

Увеличение плотности тока через p - n -переход при-
 водит к смещению максимума в спектрах излучения
 АЭ в длинноволновую область и к увеличению полу-
 ширины спектров. Так, для активных элементов, из-
 готовленных на базе твердых растворов (ТР) InGaAs
 (область излучения 2,8—3,6 мкм), смещение макси-
 мума излучения и увеличение полуширины спектров
 излучения наблюдается при плотности тока 25 А/см².
 Для активных элементов, изготовленных на базе ТР
 InAsSbP (область излучения 3,8—5,0 мкм), такие из-
 менения наблюдаются уже при плотности тока 10 А/см².

Таким образом, приведенные результаты указы-
 вают на необходимость температурной стабилизации
 активных элементов при использовании их в оптоэ-
 лектронных сенсорах газов. Применение различных
 типов полупроводниковых микрохолодильников, ра-
 ботающих на эффекте Пельтье, позволяет стабилизи-
 ровать спектральное положение максимума в спек-
 тре излучения АЭ, а также увеличить на 20% мощ-
 ность излучения за счет увеличения прямого тока
 через p - n -переход. Вместе с тем, использование та-
 ких микрохолодильников существенно увеличивает
 потребляемую мощность источника излучения, ус-
 ложняет его конструкцию и уменьшает надежность.
 В то же время, указанное поведение мощности излу-
 чения и спектральных характеристик АЭ позволяет
 управлять этими параметрами с помощью прямого
 тока через p - n -переход [2].

Фотоприемники ИК-излучения в области спектра 2,5—5,0 мкм

Приемники оптического излучения являются
 неотъемлемыми элементами современной аппарату-
 ры для оптической обработки информации. Основ-
 ным условием использования фотоприемников в со-
 ставе сложных оптоэлектронных устройств является
 правильный выбор типа приемника излучения. Спек-
 тральный диапазон чувствительности ФП должен быть
 согласован со спектральным диапазоном источника
 излучения. Интегральная чувствительность и обнару-
 жительная способность используемого ФП также со-
 гласовывается в зависимости от минимального пото-
 ка излучения, попадающего на его чувствительную
 площадку. В нашем случае, учитывая электрические
 и оптические характеристики разработанных источ-
 ников ИК-излучения, для обеспечения надежного при-
 ема и обработки электрического сигнала необходим
 ФП с интегральной вольтовой чувствительностью не
 менее 10^3 В/Вт и обнаружительной способностью не
 менее 10^9 см·Гц^{1/2}/Вт по АЧТ при $T=300$ К. Спек-
 тральные характеристики и основные параметры раз-

Технические характеристики различных ФП в средней ИК-области спектра при $T=293\text{ K}$

Характеристика	ФП-1	ФП-2	ФП-3	ФП-4	ФП-5
Спектральный диапазон, мкм	2,5—4,5	1,0—5,0	2,6—3,5	3,9—4,6	1,0—14,0
Длина волны в максимуме чувствительности, мкм	3,7	3,8	3,3	4,15	—
Размеры чувствительной площадки, мм	2,6×2,6	2,6×2,6	1×1	1×1	1×1
Быстродействие, мкс	<5	<5	0,1	<20	1—10 ³
Интегральная чувствительность, В/Вт	400	450	250—600	30	1000
Обнаружительная способность, Гц ^{1/2} /Вт	10 ⁹	10 ⁹	1,5×10 ⁹	7,0×10 ⁹	10 ⁸

Примечание:

ФП-1 — PbSe-фоторезистор;

ФП-3 — InAs-фотодиод [3];

ФП-5 — пироэлектрический фотоприемник [3].

ФП-2 — охлаждаемый PbSe-фоторезистор;

ФП-4 — фотодиод PD42Sr фирмы MIRDOD (РФ);

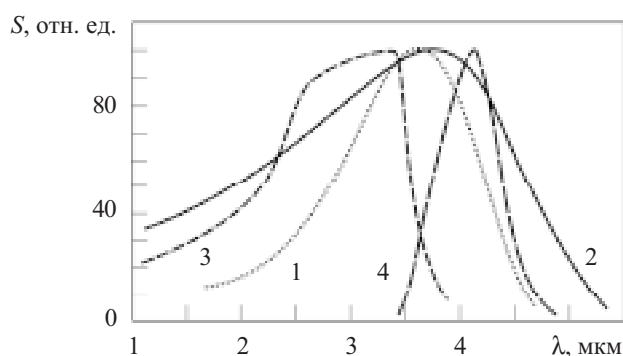


Рис. 4. Спектральные характеристики различных ФП в средней ИК-области спектра:

1 — PbSe-фоторезистор; 2 — охлаждаемый PbSe-фоторезистор; 3 — InAs-фотодиод; 4 — фотодиод PD42Sr

личных типов ФП в области спектра 2,5—5,0 мкм приведены в таблице и на рис. 4.

Важной характеристикой ФП является постоянная времени, определяющая верхнюю границу частоты модуляции излучения, превышение которой приводит к снижению интегральной чувствительности приемника. При выборе ФП необходимо также учитывать размер фоточувствительной площадки, поскольку граничная чувствительность однотипных фотоприемников зависит от ее размеров и ухудшается с ее увеличением. В такой же зависимости от размеров чувствительной площадки находятся и шумы ФП. Однако эти шумы уменьшаются при использовании модулированного сигнала с усреднением. Так, использование модулированного излучения с частотой 500 Гц и временем усреднения больше 1 с может привести к увеличению отношения сигнал/шум до 20 раз, а при 10 с — до 70 раз [3]. Такое время усреднения вполне приемлемо для большинства газоанализаторов, т. к. изменение величины концентрации газа происходит за время, больше 1 с. В приборах анализа концентрации газа наиболее часто используют PbSe-фоторезисторы, поскольку они характеризуются достаточной чувствительностью в области спектра 2,5—5,0 мкм.

С учетом конструктивных и технических особенностей разработанных нами многоэлементных источников ИК-излучения [2, 8, 9] и приведенных в табли-

це характеристик ФП, а также отличия коэффициентов поглощения метана и диоксида углерода [3], были разработаны оптоэлектронные сенсоры для измерения концентрации CO_2 и CH_4 в газовой смеси и предложены способы измерения концентрации этих газов [10].

Оптоэлектронный сенсор метана

Для измерения содержания CH_4 в диапазоне 0—3,0% от объема газовой смеси с максимальными коэффициентами поглощения $\alpha_{\text{max}}=0,1$ и коэффициентом перекрытия спектров поглощения исследуемого газа и излучения источника $\alpha_{\text{eff}}=0,05$ в области спектра 3,3 мкм [3] был изготовлен оптоэлектронный сенсор в виде интегрирующей сферы (рис. 5) [11].

Оптоэлектронный сенсор состоит из оптически связанных источника ИК-излучения 1, интегрирующей сферической кюветы 2, светоотражающего экрана 3 и фотоприемника 4. Внутренняя поверхность кюветы и основание экрана покрыты сильно деформированной алюминиевой фольгой толщиной 0,02 мм, создающей диффузное отражение с коэффициентом

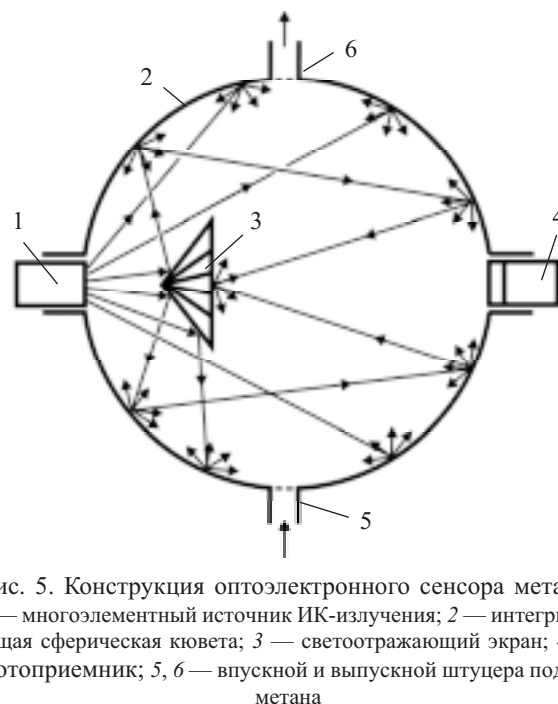


Рис. 5. Конструкция оптоэлектронного сенсора метана: 1 — многоэлементный источник ИК-излучения; 2 — интегрирующая сферическая кювета; 3 — светоотражающий экран; 4 — фотоприемник; 5, 6 — впускной и выпускной штуцера подачи метана

отражения 0,90—0,92 в диапазоне волн длиной 2,5—5,0 мкм. Светоотражающий экран представляет собой многогранную правильную пирамиду с площадью основания в два раза большей площади сечения светового потока, создаваемого источником излучения на входе в кювету. Зеркальные грани пирамиды направлены в сторону источника излучения. Для обеспечения минимальных потерь на рассеивающей поверхности кюветы подачу и отвод метана осуществляют через ряд отдельных отверстий диаметром 1 мм во впускном и выпускном штуцерах.

Многослойный источник ИК-излучения состоит из нескольких АЭ, имеющих рабочую длину волны в полосе поглощения метана $\lambda_{\max 1}=3,32$ мкм ($\Delta\lambda_{0,5}=0,38$ мкм), и АЭ, максимум излучения которого находится за полосой поглощения метана (опорный канал) $\lambda_{\max 2}=3,9$ мкм ($\Delta\lambda_{0,5}=0,42$ мкм). Прямая модуляция световых потоков обеспечивается активацией источников ИК-излучения переменным током $I=250$ мА, частотой $\nu=10^3$ Гц с длительностью импульса $\tau=500$ мкс.

Регистрация ИК-излучения осуществляется PbSe-фоторезистором. Световой поток от источника излучения попадает внутрь кюветы, отражается экраном и, рассеиваясь внутренней поверхностью кюветы, создает некоторый уровень освещенности, который регистрируется ФП.

При подаче метана внутрь кюветы световой поток ослабляется вследствие его частичного поглощения метаном. Изменение освещенности внутри кюветы при наличии в ней метана приводит к соответствующему изменению выходного сигнала ФП. Величина изменения и служит мерой концентрации метана. На рис. 6 приведена зависимость падения напряжения на выходе ФП от содержания метана C_{CH_4} в сферической кювете диаметром 80 мм (кривая 1) и цилиндрической кювете длиной 164 мм (кривая 2).

Учитывая относительно большой объем кюветы, выбирали оптимальную скорость подачи газовой смеси, которая составляет 2—2,5 л/мин, при этом время установления показаний не превышало 20—30 с. Воспроизводимость показаний при проведении измерений была не хуже $\pm 2\%$, а стабильность измерений при 60-минутном пропускании газовой смеси с объемной долей метана 0,3% составляла $\pm 4\%$. Отношение сигнал/шум на выходе ФП достигает не менее 100.

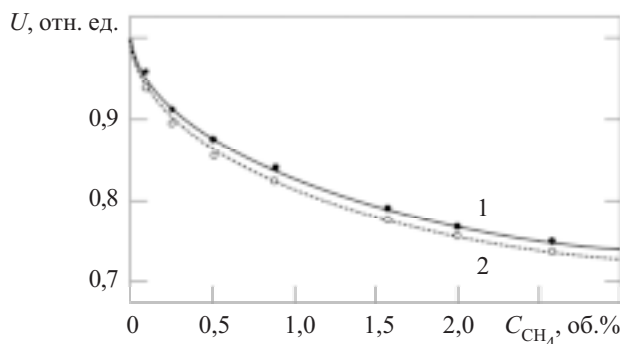


Рис. 6. Зависимость падения напряжения на выходе ФП от содержания метана в газовой смеси для сферической (1) и цилиндрической (2) кюветы

Минимальная объемная доля CH_4 в воздухе, которую можно измерить, составляет 200—250 ppm. При использовании сферической кюветы приведенная погрешность измерений составила 5%. Сравнительные измерения с использованием сферических и цилиндрических кювет показали, что сферические кюветы более перспективны и позволяют уменьшать габариты и массу оптоэлектронного сенсора.

Оптоэлектронный сенсор диоксида углерода

На рис. 7 представлена разработанная в [12] конструкция оптоэлектронного сенсора для измерения содержания CO_2 ($\alpha_{\max}=0,15$ и $\alpha_{\text{eff}}=0,12$ в области спектра 4,3 мкм [3]) в диапазоне 0—3,0% от объема газовой смеси. Многослойный источник ИК-излучения содержит активные элементы, максимально излучающие на длине волны $\lambda_{\max 1}=4,27$ мкм ($\Delta\lambda_{0,5}=0,48$ мкм) (рабочий канал) и на длине волны вне полосы поглощения CO_2 $\lambda_{\max 2}=3,8$ мкм ($\Delta\lambda_{0,5}=0,42$ мкм) (опорный канал). Приемником ИК-излучения служит охлаждаемый PbSe-фоторезистор.

Оптоэлектронный сенсор на CO_2 состоит из рабочей кюветы 1, содержащей параболические зеркала 2 и 12, источников ИК-излучения 4 и 9 и фотоприемника 7. К основанию сенсора 10 прикреплены фотоприемник 7 и теплопроводящие сферические опоры 5 и 8, обеспечивающие настройку оптической части сенсора, внутри которых размещены идентичные источники ИК-излучения.

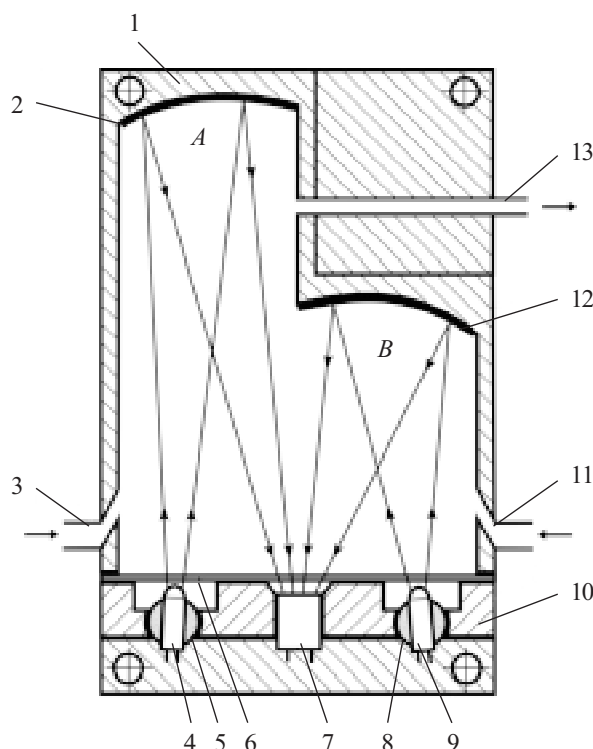


Рис. 7. Конструкция оптоэлектронного сенсора диоксида углерода:

1 — рабочая кювета; 2, 12 — параболическое зеркало; 3, 11 — входное отверстие подачи газа; 4, 9 — источник ИК-излучения; 5, 8 — сферическая опора; 6 — входное сапфировое окно; 7 — фотоприемник; 10 — основание сенсора; 13 — отверстие выхода газа

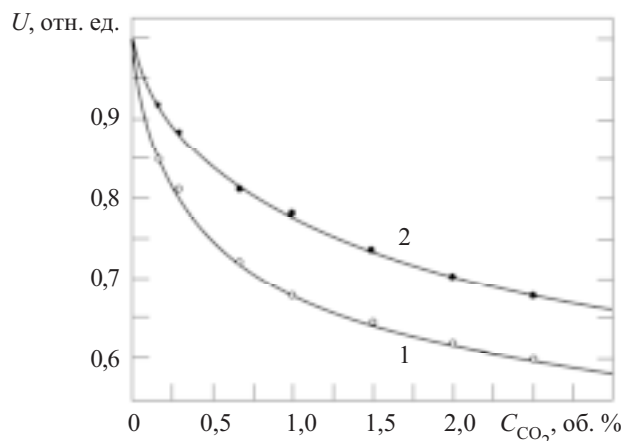


Рис. 8. Зависимость падения напряжения на выходе ФП от содержания CO_2 в рабочей кювете для части А (1) длиной 55 мм и части В (2) длиной 40 мм

Источники размещаются относительно ФП так, чтобы АЭ формировали одинаковые независимые потоки излучения в разные моменты времени для разных частей (А и В) рабочей кюветы. Соотношение длины частей А и В рассчитывается исходя из необходимого диапазона измерения содержания CO_2 оптоэлектронным сенсором. При измерении малой концентрации CO_2 , ввиду слабого поглощения излучения на рабочей длине волны, активной является часть А кюветы, а при большой концентрации — часть В (рис. 7). Входные отверстия для подачи CO_2 изготовлены под углом к оптическим осям источников ИК-излучения. Это обеспечивает равномерное распределение газа по всему объему кюветы, сокращая при этом время и количество CO_2 , необходимое для полной замены газа во внутреннем объеме кюветы газом другой концентрации. В случае увеличения неселективных потерь излучения, связанных с загрязнением входного окна или параболических зеркал сенсора, а также при рассогласовании спектров излучения источника и спектральной чувствительности приемника по отношению к спектру собственного поглощения газа вследствие изменения температуры внешней среды, заданные точность и чувствительность сенсора обеспечиваются использованием опорного канала и одновременной подачей CO_2 в обе части кюветы. В этом случае световые потоки, создаваемые источниками ИК-излучения, не связанные с поглощением CO_2 , изменяются одинаково (рис. 8) и в процессе обработки сигналов от них на выходе ФП взаимокompенсируются.

До начала проведения измерений содержания CO_2 через сенсор пропускают нейтральный газ. При этом сформированные источниками ИК-излучения световые потоки не поглощаются газом, выравниваются по величине, а на выходе ФП образуются электрические сигналы, обеспечивающие коррекцию нуля сенсора.

Прямая модуляция световых потоков обеспечивается активацией источников ИК-излучения переменным током $I=250$ мА, частотой $\nu=10^3$ Гц с длительностью импульса $\tau=500$ мкс. Газовые смеси подаются со скоростью 0,5—1,0 л/мин. Время установления по-

казаний составляет 30—40 с. Воспроизводимость показаний при проведении измерений была не хуже $\pm 0,3\%$, а стабильность нуля $\pm 0,4\%$. Отношение сигнал/шум на выходе ФП составляет не менее 250. Минимальная измеренная доля CO_2 в воздухе — на уровне 50—100 ppm. Приведенная погрешность измерений составляет 1% и ограничивается, в основном, температурной стабильностью работы ФП.

Выводы

Таким образом, установлено, что оптоэлектронные сенсоры газов, созданные на основе светоизлучающих гетероструктур InGaAs/InAs и InAsSbP/InAs и приемников на основе PbS-фоторезисторов, обладают высокими эксплуатационными характеристиками и чувствительностью. Так, минимальное содержание газа в воздухе, фиксируемое с помощью таких оптоэлектронных сенсоров, составляет для метана 200—250 ppm, а для диоксида углерода — 50—100 ppm. Важным условием точности измерения содержания исследуемого газа является температурная стабилизация активных ИК излучающих элементов, которая успешно решается применением термохолодильников и правильным выбором величины прямого тока через p-n-переход активного элемента.

Компактность, малая масса и быстродействие разработанных сенсоров определяют широкий спектр их использования.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Александров С. Е., Гаврилов Г. А., Капралов А. А. и др. Моделирование характеристик оптических газовых сенсоров на основе диодных оптопар среднего ИК-диапазона спектра // Журнал технической физики. — 2009. — Т. 79, № 6. — С. 112—118.
2. Кабаций В. Н. Оптические сенсоры газов на основе полупроводниковых источников ИК-излучения // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2008. — № 4. — С. 30—35.
3. Aleksandrov S., Gavrilov G., Kapralov A. et al. Portable optoelectronic gas sensors operating in the mid-IR spectral range ($\lambda=3\text{—}5\text{ }\mu\text{m}$) // Proc. of Intern. Conf. SPIE. Lasers for Measurements and Information Transfer. — 2002. — Vol. 4680. — P. 188—194.
4. Remennyi M. A., Zotova N. V., Karandashev S. A. et al. Low voltage episide down bonded mid-IR diode optopairs for gas sensing in the 3,3—4,3 μm spectral range // Sensors & Actuators B: Chemical. — 2003. — Vol. 91. N 1—3. — P. 256—261.
5. Зотова Н. В., Ильинская Н. Д., Карандашев С. А. и др. Источники спонтанного излучения на основе арсенида индия // Физика и техника полупроводников. — 2008. — Т. 42, № 4. — С. 641—657.
6. Кабаций В. Н. Объемные оптические покрытия из халькогенидных стекол для полупроводниковых источников ИК-излучения // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2009. — № 4. — С. 38—44.
7. Патент 88565 України. Захисне, просвітлююче та фокусує покриття на основі халькогенідного скла і спосіб його нанесення / Д. І. Блецкан, В. М. Кабаций. — 10.07 2009.
8. Патент 8564 України. Напівпровідникове джерело інфрачервоного випромінювання / В. М. Кабаций. — 10.02 2009.
9. Патент 86900 України. Багатоканальне джерело випромінювання (варіанти) / В. М. Кабаций, Д. І. Блецкан. — 25.05 2009.
10. Патент 88374 України. Спосіб вимірювання концентрації газів (варіанти) / В. М. Кабаций, Ю. В. Мигалина, Д. І. Блецкан, М. М. Кабаций. — 12.10 2009.
11. Патент 81703 України. Газоаналізатор (варіанти) / В. М. Кабаций. — 25.01 2008.
12. Патент 89707 України. Оптичний сенсор газів / В. М. Кабаций, Д. І. Блецкан, В. О. Гасинець. — 25.02 2010.