УДК 621.315.593

ОПТОЭЛЕКТРОННЫЙ СЕНСОР НА ОСНОВЕ ИК-СВЕТОДИОДОВ ДЛЯ АНАЛИЗА ГАЗОВ

О.Х. Кулдашов
НИИ Физики полупроводников и микроэлектроники
А.А. Валихонов
Ферганский государственный технический университет
e-mail: vakhon5100@gmail.com
А.А. Алиев
Ферганский государственный технический университет

Аннотация. Активное развитие оптоэлектроники, в частности полупроводниковых источников излучения в ближнем и среднем инфракрасном (ИК) диапазонах, открыло новые перспективы для создания интеллектуальных оптоэлектронных датчиков с высокоточными ИК-светодиодами для контроля состава газовых и парогазовых сред. Приборы на основе GaInAsSb, обладающие высокой селективностью и чувствительностью, способные работать в реальном времени, позволяют создавать компактные, надежные и энергоэффективные системы.

Ключевые слова. оптоэлектроника, полупроводниковая структура, светодиод, фотодиод, газ, контроль, оптоэлектронные устройства.

Abstract. The active development of optoelectronics, in particular semiconductor radiation sources in the near and mid-infrared (IR) ranges, has opened up new prospects for the creation of intelligent optoelectronic sensors with high-precision IR LEDs for monitoring the composition of gas and vapor-gas environments. GaInAsSb-based devices, which have high selectivity and sensitivity and are capable of operating in real time, make it possible to create compact, reliable and energy-efficient systems.

Keywords: optoelectronics, semiconductor structure, light-emitting diode, photodiode, gas, control, optoelectronic devices.

Annotatsiya. Optoelektronikaning, xususan, yaqin va o'rta infraqizil (IQ) diapazondagi yarimo'tkazgichli nurlanish manbalarining faol rivojlanishi gaz va bug ' -gaz muhitlari tarkibini nazorat qilish uchun yuqori aniqlikdagi IQ Ledli aqlli Optoelektronik sensorlarni yaratish uchun yangi istiqbollarni ochdi. Yuqori selektivlik va sezgirlikka ega, Real vaqtda ishlashga qodir GaInAsSb-ga asoslangan qurilmalar ixcham, ishonchli va energiya tejaydigan tizimlarni yaratishga imkon beradi.

Kalit so'zlar. optoelektronika, yarimo'tkazgich tuzilishi, LED, fotodiod, gaz, boshqaruv, Optoelektronik qurilmalar.

ISSN 3030-3907

Введение

Одним из ключевых направлений современной микроэлектроники является оптоэлектроника, развивающаяся особенно интенсивно в связи с необходимостью создания сенсорных систем нового поколения [1]. Инфракрасные полупроводниковые светодиоды, работающие при комнатной температуре, представляют собой перспективные источники излучения для применения в газоанализе, влагометрии и медицинской диагностике. Эти устройства, основанные на твёрдых растворах соединений типа A_3B_5, позволяют реализовать компактные, интеллектуальные системы контроля содержания химических веществ в различных средах [2].

В оптоэлектронных устройствах на полупроводниковых излучателях в качестве носителя информации применяется оптическое излучение, которое не генерирует электромагнитные помехи и не подвергается их воздействию [3]. Эта характеристика в сочетании с простотой приборной реализации обуславливает перспективы исследований и разработки различных оптоэлектронных систем, использующих инфракрасное (ИК) излучение. Преобразование контролируемого параметра в фотоэлектрический сигнал реализуется следующим образом: контролируемый объект облучается потоком излучения заданного спектрального состава, после взаимодействия фиксируется часть излучения, которая преобразуется в фотоэлектрический сигнал.

Несмотря на успехи в развитии химических и адсорбционных сенсоров, оптические приборы обладают существенными преимуществами:

- высокая селективность и чувствительность;
- устойчивость к внешним воздействиям;
- отсутствие химических реактивов;
- продолжительный срок службы.

Многие промышленные сенсоры (Perkin Elmer, Texas Instruments, City Technology, Ion Optics и др.) используют тепловые ИК-источники, излучающие по закону Планка. Однако такие источники требуют применения фильтров для выделения нужных спектральных участков.
Оптоэлектронные устройства, основанные на светодиодах, характеризуются отсутствием электромагнитных помех, а также высокой устойчивостью к воздействию электромагнитных полей. Это обусловлено тем, что оптическое излучение, проходящее через среду, загрязненную электромагнитными полями [4], не подвергается значительным изменениям.

Данные свойства создают благоприятные предпосылки для исследования и разработки новых оптоэлектронных методов и устройств.

ISSN 3030-3907

Оптоэлектронные методы классифицируются на две основные категории:
- методы регистрации излучения, прошедшего через объект,
- методы регистрации излучения, отраженного от объекта.

На основании этих принципов реализуются различные оптоэлектронные устройства на полупроводниковых излучателях [5-7].

Характеристики поглощения и спектральные диапазоны

При проектировании оптоэлектронных устройств на основе светодиодов спектральные характеристики являются фундаментальной основой для выбора длин волн измерительного и опорного излучающих потоков.

Для разработки устройств, функционирующих на принципах оптического излучения, необходимым условием является наличие точных спектральных характеристик контролируемого объекта, включающих спектры отражения и спектры пропускания излучения [8].

Характеристические полосы поглощения многих химически и экологически значимых соединений лежат в среднем ИК-диапазоне. Примеры включают:
- Вода и водяной пар - 1,94 мкм, 2,75–2,85 мкм
- Метан- 1,65 мкм, 2,3 мкм, 3,3 мкм
- Углекислый газ - 2,65 мкм, 4,27 мкм
- Угарный газ - 2,34 мкм, 4,67 мкм
- Ацетон - 3,4 мкм
- Аммиак - 2,25 мкм, 2,94 мкм

Это делает средневолновую ИК-область спектра особенно актуальной для разработки газоанализаторов.

Выбор ИК-светодиодов

В Лаборатории инфракрасной оптики Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе были разработаны ИК-светодиоды на основе материала GaInAsSb [9], значительно превосходящие тепловые источники по ряду параметров:
- Спектральная ширина излучения соответствует полосам поглощения газов- отпадает необходимость в фильтрах.
- Быстродействие в 1000 раз выше по сравнению с тепловыми источниками.
- Сниженное энергопотребление.
- Длительный срок службы — до 100 000 часов.
- Миниатюрные размеры чипов (0,3×0,3 мм) обеспечивают компактность устройств.

ISSN 3030-3907

Четырехкомпонентные твердые растворы A^3B^5 позволяют независимо управлять шириной запрещенной зоны и параметрами решетки (рис.1). Они обеспечивают перекрытие всего диапазона длин волн от 1.8 до 2.2 мкм и создают высококачественную гетерограницу на подложках из GaSb и InAs.

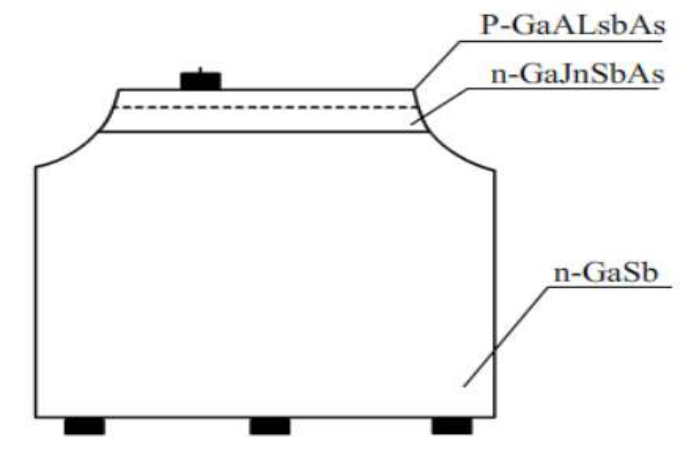


Рис.1. Светодиод на основе GaSb

Для активной области приборов применяются следующие твердые растворы:

GaInAsSb - диапазон длин волн 1.8–2.2 мкм.

InAsSbP - диапазон длин волн 1.5–3.9 мкм.

Использовались монокристаллические пластины антимонида галлия (GaSb), ориентированные в кристаллографических плоскостях (III)A, (III)B и (100)C. Применялись: Нелегированные GaSb p-типа с концентрацией дырок ~$2\cdot10^{17}$ $см^{-3}$, GaSb n-типа, легированные теллуром с концентрацией $7\cdot10^{17}$ – $1\cdot10^{18}$ $см^{-3}$.

Рабочая сторона подложек обрабатывалась химико-динамическим способом, обратная — механическим полированием. Перед загрузкой в реактор проводилась последовательная обработка:

1. Промывка в четырёххлористом углероде
2. Обработка травителем $CrO_3 + H_2SO_4 + H_2O$ (1:1:3)
3. Промывка в дистиллированной воде
4. Промывка в соляной кислоте (HCl)
5. Промывка в плавиковой кислоте (HF)
6. Промывка в изопропиловом спирте и сушка

Толщина подложек после обработки 350-380 мкм.

Для приготовления расплавов использовались высокочистые материалы:

ISSN 3030-3907

галлий (99.9999%), сурьма (99.99999%), индий (99.999%), алюминий марки Al-000, нелегированные и легированные пластины GaSb различных типов. Пластины из арсенида индия и арсенида галлия ($n \sim 1 \cdot 10^{16}$ см$^{-3}$).

В качестве донорных или акцепторных примесей применялись германий и теллур, вводимые через легированные пластины GaSb.

В качестве подложки выбран GaSb, на котором выращиваются эпитаксиальные слои GaInAsSb, изопериодные с GaSb.

Активный слой: донорный GaInAsSb (сниженная вероятность безызлучательной оже-рекомбинации)

Инжектор: акцепторный AlGaAsSb с более широкой запрещённой зоной, чем GaInAsSb.

В оптоэлектронном газоанализаторе используется светодиоды со спектрами излучения 3,2 мкм (опорный) и светодиоды со спектрами излучения 3,39 мкм (рабочий), на рис. 2 показаны спектры излучения светодиодов LED39, LED32, фотодиода PD36 и спектр поглощения метана.

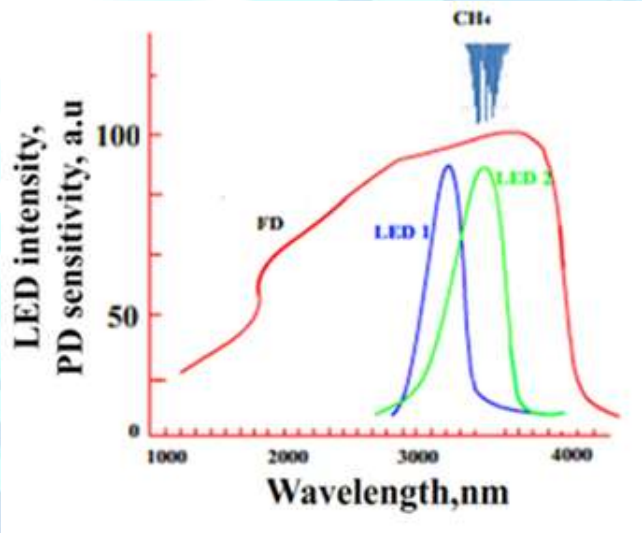


Рис. 2. Спектры излучения светодиодов LED1, LED2, фотодиода PD36 и спектр поглощения метана.

На таблице - 1 приведены основные параметры светодиодов и фотодиода.

Таблица 1.

Основные параметры светодиодов

№	Светодиод	Длина волны в максимуме излучения, мкм	Ширина спектра на полувысоте, нм	Мощность в квазинепрерывном режиме при I= 200 мА
1	LED39, измерительный	3,39	130	1,1

ISSN 3030-3907

2	LED32, опорный	3,20	130	1,1
№	Фотодиод	Граничная длина волны, мкм	Чувствитель-ность, A/W	Обнаружительная способность, $cm/Hz^{1/2}/W$
1	PD36	3,6	1,0-3,8	(3-8) 10^{10}

Применение интеллектуальных сенсоров

В рамках проведённых исследований было разработано оптоэлектронное устройство, предназначенное для дистанционного обнаружения и контроля взрывоопасных концентраций углеводородов, накапливающихся в атмосфере [10]. Блок-схема оптоэлектронного устройства, реализующего дистанционный контроль концентраций горючих газов, представлена на рис.3.

Принцип двухволнового оптоэлектронного метода контроля концентрации газов заключается в следующем:

Контролируемый объект облучается двумя противофазными прямоугольными последовательностями импульсов с различными длинами волн: измерительная длина волны - соответствует максимуму поглощения контролируемого газового компонента, опорная длина волны — лежит вне максимума поглощения данного компонента.

Излучение, создаваемое светодиодами, проходит через контролируемую среду и преобразуется фотоприемником в электрический сигнал. Полученные сигналы (от измерительной и опорной волн) сравниваются для определения концентрации газа на основе разности их амплитуд.

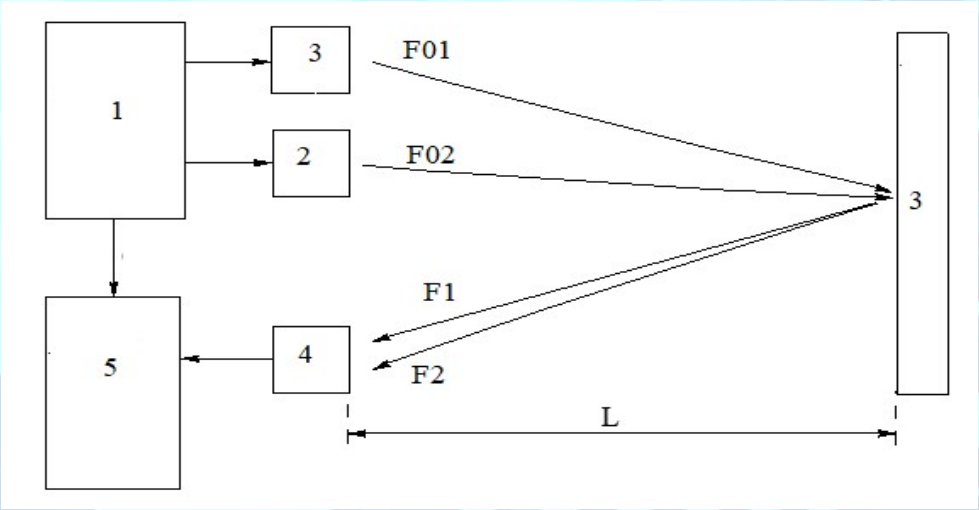


Рис.3. Блок схема оптоэлектронного устройства, где 1-светодиодный драйвер, 2 и 3- светодиоды со спектрами излучения 3,2 мкм и светодиоды со спектрами излучения 3,39 мкм, 4- фотодиод, 5-усилитель.

ISSN 3030-3907

Разработанные оптоэлектронные сенсоры с интегрированными ИК-светодиодами находят применение в следующих направлениях:

1. Контроль содержания углекислого газа (CO_2). Использование сенсоров в жилых и промышленных зонах, а также в экологическом мониторинге. В ряде стран установка таких приборов регламентирована на законодательном уровне.

2. Контроль утечек метана (CH_4). Актуально для бытовых систем на природном газе, магистральных трубопроводов и шахт.

3. Измерение влажности и содержания воды. Применимо в нефтяной промышленности, сельском хозяйстве, производстве бумаги и других технологических процессах.

4. Медицинская диагностика. Оптические методы позволяют определять концентрации ацетона, CO_2 и других веществ в выдыхаемом воздухе, что используется при диагностике сахарного диабета и других заболеваний.

5. Неинвазивный биохимический контроль. Разрабатываются системы для мониторинга содержания глюкозы и других органических соединений в биологических жидкостях без прокола кожи.

Заключение

ИК-светодиоды на основе GaInAsSb открывают новые горизонты в области разработки интеллектуальных оптоэлектронных сенсоров. Их уникальные характеристики позволяют создавать компактные, энергоэффективные и долговечные системы для экологического мониторинга, промышленного контроля и медицинской диагностики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлова М.П., Моисеев К.Д., Яковлев Ю.П. Открытие полупроводников AIIIBV: физические свойства и применение // Физика и техника полупроводников. 2019, вып.53, том 3, С.291-302.

2. Филачёв А.М., Таубкин И.И., Тришенков М.А. Достижения твёрдотельной фотоэлектроники (обзор) // Успехи прикладной физики. 2015, №2, С.162-164.

3. Башкатов А.С., Мещерова Д.Н. Основные тенденции развития оптоэлектронной техники до 2030 года // Тезисы докладов Российской конференции и школы молодых ученых по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники «Фотоника-2019». 2019, С.25-26.

4. Иванов И.И., Петров П.П. Исследование эффективности светодиодов в среднем ИК-диапазоне // Журнал оптоэлектроники. 2019.Т. 35, № 4. С. 57–65.

ISSN 3030-3907

5. Сидоров А.А., Кузнецова М.В. Влияние температуры на характеристики InAsSb гетероструктур // Физика полупроводников. 2020. Т. 54, № 3. С. 691–694.
6. Беляев В.В., Михайлова Н.Н. Методы стабилизации ИК-светодиодов в газоанализаторах // Приборы и техника эксперимента. 2021. № 2.С. 42–44.
7. Ковалев Ю.С., Новиков Д.Д. Терморегулирование в оптоэлектронных устройствах // Электроника и связь. 2020.Т. 45, № 1. С. 58–60.
8. Смирнов В.И., Орлов С.С. Коэффициент полезного действия ИК-светодиодов // Техническая физика. 2018. Т. 63, № 7. С. 112–113.
9. Захаров А.Н., Федорова Е.А. Анализ деградационных процессов в полупроводниковых светодиодах // Вестник науки и техники. - 2017. Т. 29, № 5. С. 69–72.
10. Kuldashov O.Kh., Kuldashov G.O., Mamasodikova Z.Y. Infrared sensor for remote monitoring of moisture content in raw cotton // J. Opt. Technol. 2019. № 6. P. 77 - 80.

ISSN 3030-3907