

## РАДИОТЕХНИКА, ТЕЛЕКОМУНИКАЦИЯ ТА ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.315.592;543.27.08

### ОПТИЧЕСКИЙ МОДУЛЯТОР ДЛЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ГАЗОАНАЛИЗАТОРОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЫБРОСОВ

*Ирха В.И., Викулин И.М.*

*Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова,  
65029, Украина, г. Одесса, ул. Кузнечная, 1.  
[phys@onat.edu.ua](mailto:phys@onat.edu.ua)*

### ОПТИЧНИЙ МОДУЛЯТОР ДЛЯ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ ГАЗОАНАЛІЗАТОРІВ ПРОМИСЛОВИХ ВИКИДІВ

*Ирха В.И. Вікулін І.М*

*Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова,  
65029, Україна, м. Одеса, вул. Кузнечна, 1.  
[phys@onat.edu.ua](mailto:phys@onat.edu.ua)*

### OPTICAL MODULATOR FOR MULTICOMPONENT GAS ANALYZER OF INDUSTRIAL EMISSIONS

*Irkha V.I., Vikulin I.M.*

*O.S. Popov Odessa national academy of telecommunications,  
1 Kuznechna St., Odessa, 65029, Ukraine.  
[phys@onat.edu.ua](mailto:phys@onat.edu.ua)*

**Аннотация.** Разработан германиевый ИК модулятор с глубиной модуляции до 80% в диапазоне длин волн 1,8...20 мкм для многокомпонентных газоанализаторов промышленных выбросов. Приведены его характеристики: зависимость эффективности модуляции от величины тока инжекции и длительности импульсов. Показана перспективность применения данного модулятора в газоанализаторах, а также способы повышения его эффективности и однородности модуляции.

**Ключевые слова:** модулятор, газоанализатор, ИК излучение, коэффициент отражения (поглощения) света, инжекция, эффективность модуляции.

**Анотація.** Розроблено германієвий ІЧ модулятор з глибиною модуляції до 80% в діапазоні довжин хвиль 1,8...20 мкм для багатоконпонентних газоаналізаторів промислових викидів. Надані його характеристики: залежність ефективності модуляції від величини струму інжекції та тривалості імпульсів. Показана перспективність застосування даного модулятора в газоаналізаторах, а також способи підвищення його ефективності та однорідності модуляції.

**Ключові слова:** модулятор, газоаналізатор, ІЧ випромінювання, коефіцієнт відбивання (поглинання) світла, інжекція, ефективність модуляції.

**Abstract.** A germanium infrared modulator with a modulation depth of up to 80% in the wavelength range of 1.8 ... 20 mkm for multi-component gas analyzers of industrial emissions was developed. Its characteristics are: the dependence of the efficiency of the modulation from the injection current and the pulse duration given. The prospect of application of the modulator gas analyzers, as well as ways to improve its efficiency and uniformity of the modulation are shown.

**Key words:** modulator, gas analyzer, infrared radiation, reflection (absorption) coefficient of light, injection, efficiency of modulation.

В настоящее время весьма актуальной задачей является анализ состава парогазовых смесей, содержащихся в выбросах промышленных предприятий. В последние годы сильно

возрос интерес к многокомпонентным газоанализатором. Это, в первую очередь, вызвано необходимостью одновременного получения информации о многих газах, содержащихся в выбросах промышленных предприятий, а также необходимостью автоматического управления сложными технологическими процессами химических производств. Как известно, отходящие газы химических, металлургических, теплоэнергетических и других промышленных предприятий (промышленные выбросы) представляют собой сложные по составу многокомпонентные парогазовые смеси. Систематизация и анализ выбросов типовых производств позволит определить вредные и агрессивные газы, часто встречающиеся в выбросах и подлежащих одновременному измерению и контролю для правильного ведения технологического процесса данного производства. Для этой цели используются газоанализаторы, позволяющие измерять несколько компонентов в течение короткого промежутка времени. Многокомпонентный газоанализатор, построенный на одном физическом принципе, позволяет одновременно измерять 4...8, а может и более, компонент газовой смеси. Но большинство требований к такому газоанализатору противоречивы. Основные из них: необходимость измерения одновременно нескольких компонент газовой пробы за время всего лишь несколько секунд и менее; малые габариты, высокая и равная точность измерения по всем измеряемым компонентам; минимальное влияние параметров окружающей среды и неизмеряемых компонент газовой пробы на показания газоанализатора; сравнительно низкая стоимость прибора (цена, отнесенная к числу каналов измерения).

Анализ разработок отечественных и зарубежных многоканальных газоанализаторов, предназначенных для контроля промышленных выбросов в реальном масштабе времени и удовлетворяющих вышеприведенным требованиям [1-4] показал, что перспективным методом газового анализа для создания многокомпонентных газоанализаторов является инфракрасный абсорбционный, а реализация требований многокомпонентности прибора и высокой точности измерений возможна только с применением микропроцессорных устройств в газоанализаторах. В основу работы таких приборов положен оптический метод газового анализа, в частности, инфракрасный абсорбционный. Он основан на использовании закона Ламберта-Бера, который устанавливает связь между величинами оптических сигналов определенной длины волны, прошедших через газовую кювету при наличии и отсутствии анализируемого газа в ней. Длина волны света выбирается в соответствии с максимумом оптического поглощения анализируемого газа в инфракрасной области спектра и реально охватывает диапазон от 2,5 до 12 мкм.

**Цель данной статьи** – определить и исследовать свойства оптического модулятора на основе германия, отвечающие основным требованиям к модуляторам для многокомпонентных газоанализаторов, а также найти способы повышения его эффективности.

Многоканальный газоанализатор работает следующим образом. От источника инфракрасного излучения, снабженного стабилизатором излучаемой мощности, излучение через модулятор и узкополосный интерференционный фильтр попадает в многоходовую кювету. Через многоходовую кювету прокачивается анализируемый газ с постоянным расходом и давлением внутри кюветы. Инфракрасное модулированное излучение поглощается на длинах волн, характерных для имеющегося в анализируемой газовой пробе набора компонент и выделяемых набором узкополосных интерференционных фильтров, пропорционально концентрациям компонент газовой пробы (с учетом температуры и давления газовой пробы). Напряжение с приемника после предварительного усиления и фильтрации сигнала подается на вход многокомпонентного аналого-цифрового преобразователя. Информационный сигнал представляет собой последовательность электрических импульсов, период следования которых определяется частотой вращения кассеты с интерференционными фильтрами. Микропроцессорное устройство, встроенное в газоанализатор, обрабатывает информацию и одновременно выдает цифровую и

унифицированную аналоговую информацию о величине концентрации измеряемых компонент газовой пробы.

В рабочем режиме на каждой длине волны, выделяемой соответствующим интерференционным фильтром, проводится измерение интенсивности инфракрасного сигнала и его величина записывается в память. Предварительно при калибровке в память записываются величины интенсивности инфракрасного сигнала, соответствующие «нулевому» газу на каждом фильтре. Далее, используя имеющиеся данные, находится искомая концентрация.

Как было показано ранее, составной частью многоканальных газоанализаторов являются модуляторы инфракрасного (ИК) излучения. Известно много способов модуляции света [5]. Выбор способа определяется требованиями к глубине и частоте модуляции, мощности модулируемого пучка, спектральной полосе модулируемого ИК излучения и т.д. Одним из наиболее распространенных является метод амплитудной модуляции. Широко применяются полупроводниковые оптические модуляторы, имеющие малые габариты, небольшую величину питающего напряжения [6].

В данной статье описываются свойства модулятора на основе германия, который отвечает основным требованиям к модуляторам для многокомпонентных газоанализаторов, а также приводятся некоторые способы повышения его эффективности.

Регулируя концентрацию свободных носителей при поглощении ими заряда в полупроводнике можно изменять прозрачность материала по отношению к ИК излучению [5, 6]. Одним из наиболее эффективных способов управления концентрацией свободных носителей в объеме полупроводника является инжекция из *p-n*-перехода, к которому приложено напряжение в пропускном направлении [6, 7]. Глубина модуляции проходящего через кристалл света определяется уровнем инжекции неосновных носителей заряда. Необходимо отметить, что при этом может наблюдаться не только модуляция проходящего луча, но и отраженного, поскольку коэффициент отражения от границы раздела двух сред является функцией коэффициентов преломления и прозрачности среды. Германиевые модуляторы можно использовать для длин волн света 1,8...20 мкм.

Образцы изготавливались на основе монокристаллов германия *n*-типа проводимости, легированного сурьмой с удельным сопротивлением  $\rho = 4...50 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ . Кристаллы в виде параллелепипедов размером  $5 \times 5 \times 7 \text{ мм}^3$  шлифовались, полировались и обезжировались в четыреххлористом углероде. Химическое травление проводили в полирующем травителе СР4 при  $T = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ . При изготовлении модулятора ИК излучения таких размеров одной из проблем является создание однородного инжектирующего контакта по всей площади одной из плоскостей кристалла и омического контакта на противоположной плоскости. Вплавление *p-n*-переходов и омических контактов производили в вакууме  $\sim 10^{-5} \text{ мм рт.ст.}$  в графитовых кассетах под давлением с целью предотвращения образования капель при нагреве. Для создания *p-n*-переходов были подобраны сплавы  $\text{In} - 1\% \text{ Zn}$  и  $\text{In} - 24\% \text{ Cd}$ , для омических контактов –  $\text{Sn} - 1\% \text{ Sb}$ . Для достижения хорошей воспроизводимости результатов вплавление *p-n*-переходов и омических контактов проводили в одном цикле. Наиболее оптимальным является температурный режим вплавления, при котором нагрев производится со скоростью 8...10 град/мин, затем следует выдержка при  $T = 520...570 \text{ }^\circ\text{C}$  в течение 25...30 мин и охлаждение со скоростью 10...12 град/мин.

Изучение вольтамперных характеристик диодных структур показало, что в данном случае имеет место генерационно-рекомбинационный механизм протекания тока. На рис. 1 представлена зависимость эффективности модуляции ИК излучения от величины тока, протекающего через структуру при приложении прямого смещения

$$m = \frac{I_0 - I}{I_0} \cdot 100\%,$$

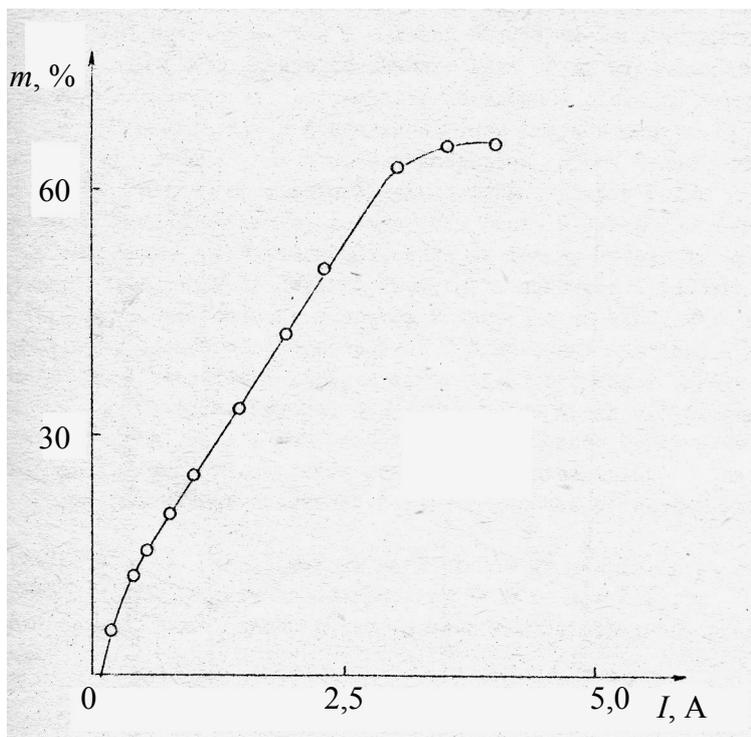


Рисунок 1 – Зависимость эффективности модуляции от величины тока инжекции (удельное сопротивление базового материала 5 Ом·см, длительность импульса 2000 мкс, частота 30 Гц)

сопротивление кристалла, тем при меньших значениях  $t$  наступает это уравнивание. Кроме того, при меньших величинах  $\rho$  эффективность  $m$  будет ниже из-за меньшей эффективности инжекции неосновных носителей заряда в объем полупроводника.

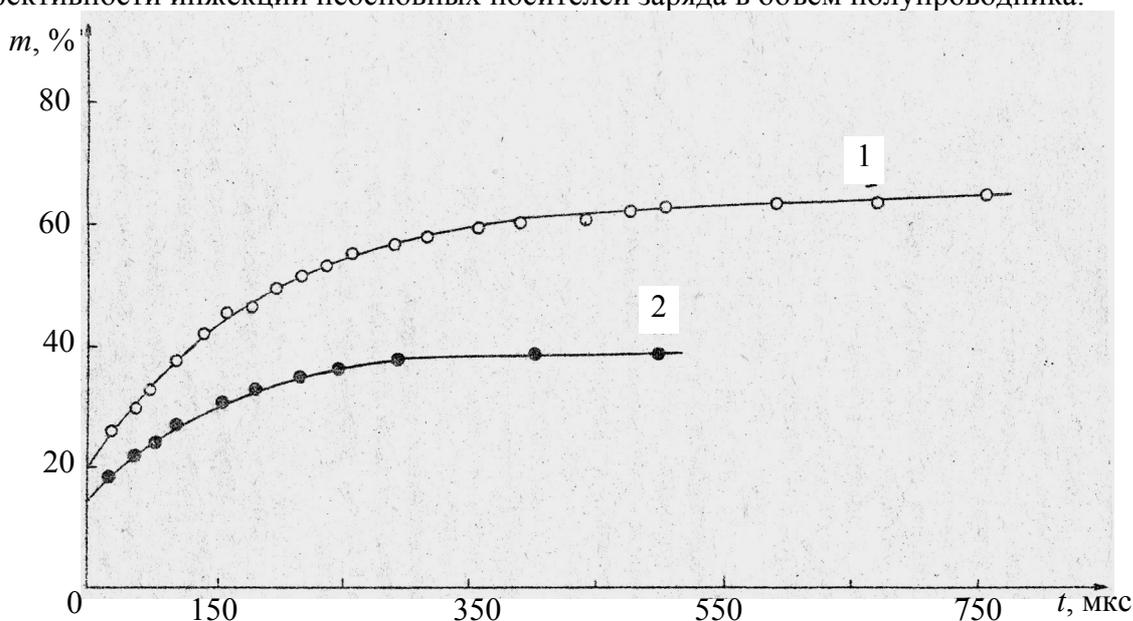


Рисунок 2 – Зависимость эффективности модуляции от длительности импульса тока инжекции (ток 2 А, частота 30 Гц): 1 –  $\rho = 40$  Ом·см; 2 –  $\rho = 14$  Ом·см

где  $I_0$  – интенсивность света на входе модулятора;  $I$  – интенсивность света на выходе модулятора.

При токах  $> 3$  А происходит насыщение параметра  $m$ , т.е. насыщение рабочей области модулятора инжектированными носителями. Одной из причин такого поведения является падение эффективности инжекции носителей из  $p-n$ -перехода при разогреве структуры (большие токи инжекции).

Исследована также зависимость эффективности модуляции от длительности импульсов внешнего напряжения  $t$  (рис. 2). Измерения показали, что величина  $m$  не зависит от частоты следования импульсов в диапазоне 30...3000 Гц, однако зависит от длительности импульса  $t$ . Насыщение зависимости  $m(t)$  определяется предельной величиной «закачиваемого» в рабочую область модулятора заряда, при превышении которой рост концентрации носителей уравнивается рекомбинационными процессами. Чем ниже удельное

Известно, что концентрация инжектированных из  $p$ - $n$ -перехода неравновесных носителей заряда, движущихся к омическому контакту, спадает в объеме полупроводника по экспоненциальному закону. Поэтому при модуляции луча с большой апертурой концентрация носителей заряда в модуляторе по сечению луча будет неодинакова, что приведет к различному коэффициенту поглощения света по этому сечению, а, следовательно, и к неоднородности глубины модуляции в различных участках рабочей области. Для устранения этого недостатка был изготовлен модулятор трапецеидальной формы [6], причем грань с  $p$ - $n$ -переходом имела большую площадь, чем грань с омическим контактом. Такая форма модулятора позволяет не только устранить неоднородность модуляции по сечению луча, но и повысить эффективность модуляции, что связано с ростом напряженности электрического поля в направлении от  $p$ - $n$ -перехода к омическому контакту. При этом происходит увеличение глубины затягивания носителей заряда вглубь базы модулятора. Глубину модуляции можно также существенно повысить, если на грани с  $p$ - $n$ -переходом расположить чередующиеся эксклюзивирующие контакты, которые позволяют дополнительно изменить концентрацию неосновных носителей заряда в рабочей области модулятора. Повысить однородность глубины модуляции по поперечному сечению луча возможно, если кристалл полупроводника будет изготовлен в форме диска с  $p$ - $n$ -переходом по всей площади боковой поверхности и омическим контактом в центре по оси диска [8]. Более однородную модуляцию можно получить, если кристалл взять варизонным, ширина запрещенной зоны которого будет убывать в направлении грани с омическим контактом [7], а также это возможно, если  $p$ - $n$ -переход и омический контакт сделать в виде решетки определенных размеров [9].

Таким образом, разработанный германиевый ИК модулятор прост в изготовлении и обладает параметрами ( $m \sim 80\%$ ,  $\lambda = 1,8...20$  мкм), позволяющими применять его в многокомпонентных газоанализаторах промышленных выбросов.

В заключение можно сказать следующее: в работе представлены материалы по изготовлению и дальнейшему использованию оптического модулятора ИК излучения на основе германия для многокомпонентных газоанализаторов. Показаны способы повышения его эффективности. Применение данных модуляторов позволит более оперативно создать модификации многокомпонентных газоанализаторов промышленных выбросов изменяя измеряемые компоненты и их диапазоны в широких пределах не изменяя существенно конструкцию прибора.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Окоси Т. Волоконно-оптические датчики / Окоси Т., Окомото К., Оцу. – М.-Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
2. Ирха В.И. Полупроводниковые газовые сенсоры / Ирха В.И. – Одесса, 1996. – 92 с.
3. Ирха В.И. Процессы, происходящие в полупроводниках при взаимодействии с газовой средой / В.И.Ирха // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2012. – № 2. – С. 49-54.
4. Ирха В.И. Акусто- и оптоэлектронные газовые датчики / В.И. Ирха, П.Ю. Марколенко, А.А. Назаренко // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2015. – № 1. – С. 12-19.
5. Васильев А.А. Пространственные модуляторы света / [А.А. Васильев, Д. Касасент, И.Н. Компанец, А.В. Парфенов]. – М.: Радио и связь, 1987. – 320 с.
6. А.с. СССР №1730931 МКИ G 02 F 1/015,1/03. Оптический модулятор / В.И. Ирха, И.М. Викулин. – № 4722892, заявлено 14.06.1989; опубл. 03.01.1992. Бюл. № 1 дсп.
7. А.с. СССР №1745062 МКИ G 02 F 1/015. Полупроводниковый оптический модулятор / В.И. Ирха, Ш.Д. Курмашев, И.М. Викулин. – № 4729325, заявлено 11.08.1989; опубл.01.03.1992. Бюл. № 2 дсп.
8. А.с. СССР №1795778 МКИ G 02 F 1/015, 1/03. Оптический модулятор / В.И. Ирха, Ш.Д. Курмашев, И.М. Викулин. – № 4793548, заявлено 21.02.1990; опубл.08.10.1992. Бюл. № 2 дсп.
9. Патент 26020 Україна. МПК G 02 F 1/00. Оптичний модулятор / І.М. Вікулін, В.І. Ирха, М.І. Панфілов, власник Одес. нац. акад. зв'язку ім. О.С. Попова. – 200705531, заявл. 21.05.2007; опубл. 27.08.2007. Бюл.№13.

REFERENCES:

1. Okose T., Okomoto K., Motsu. Fiber – optical detectors. – L.: Energy – Atom-Publisher. Is. 1990. – 256 p.
2. Irkha V.I. Semiconductors gas sensors. – Odessa, 1996. – 92p.
3. Irkha V.I. The processes happening in semiconductors of interaction with a gas medium / V.I. Irkha // Naukovi pratsi ONAZ im. O.S.Popova. – 2012. – N2. – P.49-54.
4. Irkha V.I. Acoustoelectronic and optoelectronic gas-sensitivity detectors / V.I. Irkha, P.Yu. Markolenko, A.A. Nazarenko // Naukovi pratsi ONAZ O.S.Popova. – 2015. – N1. – P.12-19.
5. Vasiljev A.A. Space modulators of light / A.A. Vasiljev, D. Kasasent, I.N. Companetz, A.V. Parfenov. – M.: Radio i sviaz, 1987. – 320 p.
6. A. s. of USSR N1730931 MKI G 02 F 1/015,1/03. Optical modulator / V.I. Irkha, I.M.Vikulin. – № 4722892. Announce 14.06.1989. Publ. 03.01.1992. Bul. N1.
7. A. s. of USSR N1745062 MKI G 02 F 1/015. Semiconductor optical modulator / V.I. Irkha, Sh.D. Kurmashev, I.M. Vikulin.– N4729325. Announce 11.08.1989. Publ. 01.03.1992. Bul. N2.
8. A. s. of USSR N 1795778 MKI G 02 F 1/015,1/03. Optical modulator / V.I. Irkha, Sh.D. Kurmashev , I.M. Vikulin. – № 4793548. Announce 21.02.1990. Publ. 08.10.1992. Bul. N2.
9. Pat. 26020 Ukraine. MPK G 02F 1/00 (2007. 08). Optical modulator. – 2007. Bul. N13.