

Министерство образования и науки Украины
Харьковский национальный университет радиоэлектроники
Академия наук прикладной радиоэлектроники

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

1-й Международной конференции « ЭЛЕКТРОННАЯ КОМПОНЕНТНАЯ БАЗА. СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ »

в рамках 3-го Международного радиоэлектронного форума «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» МРФ-2008

Том III

30 сентября - 3 октября 2008г.

Харьков - Судак
2008

ПРИНЦИПЫ ГЛУБОКОВОДНОЙ ИК СПЕКТРОСКОПИИ МЕТАНА И МЕТАНОГИДРАТОВ

Мачехин Ю.П.¹, Башенко С.М.², Негрійко А.М.², Кухтин С.М.¹

¹Харьковский национальный университет радиоэлектроники, кафедра ФОЭТ

61166, Харьков, пр. Ленина 14, тел. (057)702-14-84

E-mail: yuri_m49@mail.ru

²Институт физики НАН Украины

03680, Киев, пр. Науки 46, тел. (044)525-14-82

E-mail: baschenko@iop.kiev.ua

The presented work accesses the technique that is applied to ascertain the remote estimate of methane concentration dissolved in water at lower depth. The features and advantages relating to the modulation laser spectroscopy for spectral analysis in water medium with high attenuation are shown. Has been developed the mobile detection system that is based on a singlemode fiber optic line in conjunction with tunable laser source, and it allows to perform a remote concentration estimation of gases and matters dissolved in water. The utilization feasibility of laser modulation method with detection system for purpose of analysis has been appraised. The principle of self focusing in reflective ellipsoidal chamber is also discussed in the article.

В работе приведены основные принципы глубоководной ИК спектроскопии. Предложен метод, позволяющий проводить глубоководные спектральные исследования метана и метаногидратов. Была разработана система дистанционного анализа концентрации метана в подводных условиях с использованием волоконно – оптической линии связи. Разработан датчик на основе эллипсоидальной отражательной поверхности, способный эффективно осуществлять фокусировку излучения при максимальном взаимодействии с исследуемой средой.

Дистанционная регистрация и контроль концентрации газов в воздухе на основе спектрального анализа осуществляется при помощи лазерных лидаров, обеспечивающих измерение концентрации газа вдоль пути распространения лазерного луча. Некоторые лидары позволяют производить оценку концентрации газа по рассеянному назад излучению. Основным условием регистрации и оценки концентрации метана в воздухе, является слабое линейное поглощение в воздушной среде.

ИК спектроскопия для водных сред имеет ряд особенностей. Во – первых при реализации метода подводной спектроскопии требуется учитывать сильное поглощение в водной среде, которое может составлять до 1 см^{-1} (рис. 1). Во – вторых возможен сдвиг линий поглощения метана растворенного в воде под большим давлением. В – третьих измерения должны проводится дистанционно.

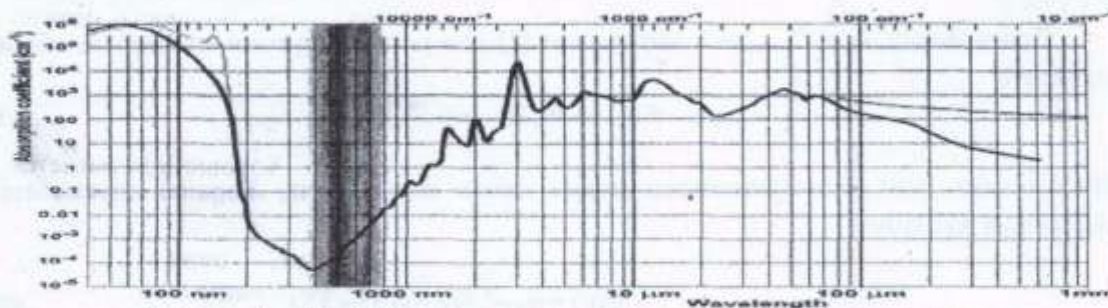


Рисунок 1 – Коэффициент поглощения воды в зависимости от длины волны излучения

Для решения этой задачи в работе предложена методика дистанционного измерения концентрации метана в водной среде с использованием метода

модуляционной лазерной спектроскопии. Сущность метода модуляционной лазерной спектроскопии заключается в использовании монохроматического лазерного источника, частота излучения которого модулируется внешним синусоидальным сигналом, тем самым, позволяя точно настроиться на максимум линии поглощения исследуемого вещества при условии, что ширина линии излучения источника значительно уже ширины линии поглощения.

Выражение для регистрируемой мощности с учетом модуляции выглядит следующим образом.

$$W(\nu) \approx W_0 S \exp\left(\frac{\alpha_M \gamma^2}{(\nu_I + \nu_m \cos(2\pi ft) - \nu_0)^2 + \gamma^2} C_{\text{метан}}\right) + \alpha_n(\nu) \quad (1)$$

$W(\nu)$ – мощность лазерного излучения на частоте поглощения ν ;

W_0 – мощность на входе оптической измерительной системы;

S – потери в измерительной системе

ν_0 – центральная частота линии поглощения;

α_M – поглощение метана на центральной частоте;

γ – полуширина линии поглощения.

$C_{\text{метан}}$ – концентрация метана

$\alpha_n(\nu)$ – оптические потери в воде на частоте поглощения ν

ν_I – частота источника излучения;

ν_m – амплитуда девиации частоты излучения;

f – частота модуляции.

В общем случае метод модуляционной лазерной спектроскопии основан на следующих теоретических положениях. При прохождении оптического излучения через газ с метаном, изменение мощности вследствие поглощения можно описать формулой

$$W(\nu) = W_0 S \exp(-C(\nu)) \quad (2)$$

$W(\nu)$ – мощность лазерного излучения на частоте поглощения ν ;

W_0 – мощность на входе оптической измерительной системы;

S – потери в измерительной системе

$C(\nu)$ – оптические потери в метане на частоте поглощения ν

Концентрация метана в воздухе не велика, по этой причине можно считать $C(\nu) \ll 1$.

При условии $\alpha(\nu) C_{\text{метан}} \ll 1$ выражение (2) для регистрируемой мощности, можно упростить

$$W(\nu) \approx W_0 S (1 - \alpha(\nu) C_{\text{метан}}) \quad (3)$$

Коэффициент $\alpha(\nu)$ пропорционален форме линии поглощения, Хорошо описывается лоренцевой функцией

$$\alpha(\nu) = \alpha_0 \gamma^2 / ((\nu - \nu_0)^2 + \gamma^2) \quad (4)$$

ν_0 – центральная частота линии поглощения;

α_0 – поглощение на центральной частоте;

γ – полуширина линии поглощения.

При использовании частотно модулированной спектроскопии излучение источника должно быть промодулировано по синусоидальному закону. Частоту ν с учетом модуляции можно записать, как:

$$\nu = \nu_l + \nu_m \cos(2\pi ft), \quad (5)$$

ν_l – частота источника излучения;

ν_m – амплитуда девиации частоты излучения;

f – частота модуляции.

Концентрация метана под водой в местах газовых месторождений велика. По этой причине предположение $\alpha(\nu)C_{\text{метан}} \ll 1$ не выполняется. Кроме того, присутствует сильное поглощение излучения молекулами воды.

Мощность излучения, после взаимодействия с исследуемой средой можно представить как:

$$W(\nu) = W_0 S \exp(\alpha_m(\nu)C_{\text{метан}} + \alpha_w(\nu)) \quad (6)$$

В работе предложена система, позволяющая производить дистанционную оценку концентрации метана растворенного в воде на больших глубинах. Измерительная система основана на использовании полупроводникового лазера, оптоволоконной линии связи и датчика с эллипсоидальной отражательной поверхностью.

Оптическое волокно имеет сложную зависимость коэффициента поглощения от длины волны. Спектр поглощения оптического волокна показан на рис 2. Целесообразными к применению являются диапазоны длин волн излучения, совпадающие с окнами прозрачности оптического волокна. Одномодовое оптическое волокно, широко применяемое в современных одномодовых линиях связи, имеет минимальное поглощение на уровне 0,19 – 0,21 Дб/км в спектральном диапазоне от 1450 до 1650 нм и в районе 1350 нм.

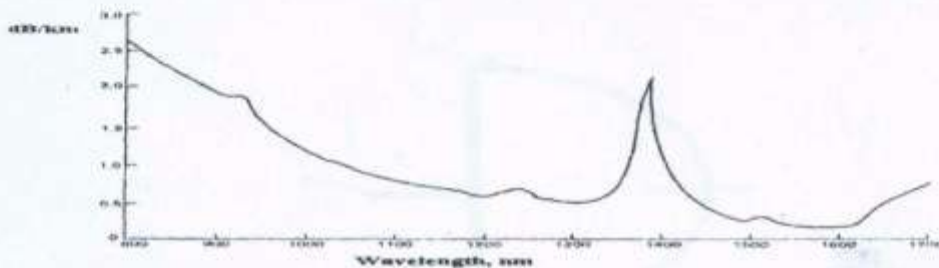


Рисунок 2 – Спектр поглощения оптического волокна

В то же время метан и другие молекулярные газы имеют линии поглощения в этой области.

Волоконно – оптическая линия связи применяемая в составе измерительной системы включает два волокна, обеспечивающих доставку излучения в область проведения исследований и его возврат для дальнейшей обработки и анализа, причем регистрирующая аппаратура и источник излучения находятся на поверхности.

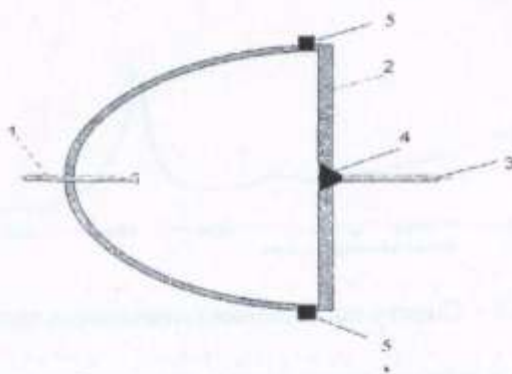
В качестве источника для измерительной системы планируется использование полупроводниковых лазеров с длинами волн 1310 и 1650 нм, что соответствует линиям поглощения метана в нормальных условиях и областям с наименьшим затуханием в оптическом волокне. Эти источники серийно выпускаются для задач спектрального

анализа. Для них возможна перестройка частоты в диапазоне нескольких нанометров, что является необходимым условием при возможном смещении линий поглощения метана растворенного в воде под большим давлением и находящегося в газогидратных соединениях.

Одним из главных элементов волоконно-оптической системы регистрации растворенных газов и веществ является датчик на основе отражательной системы с эллипсоидальной поверхностью. Использование классических устройств с использованием юстировочных узлов и линзовых систем, для фокусировки излучения и обеспечения взаимодействия между излучением и исследуемой средой, в водных условиях с большим давлением невозможно. Как альтернатива элементам с линзовыми системами в работе проводится оценка использования датчика на основе половины эллипсоида вращения с внутренней отражательной поверхностью. Это устройство идеально сочетается с использованием волоконно-оптической линией связи, и обеспечивает ввод излучения из оптического волокна в водную среду с последующей фокусировкой в волокно на выходе, при обеспечении максимального взаимодействия с исследуемой средой.

Датчик включает две отражательные поверхности: полуэллипсоидальную поверхность и плоскую отражательную поверхность. В сумме, полуэллипсоидальная отражательная поверхность с плоской отражательной поверхностью образуют эквивалент полного эллипсоида вращения

Излучение в датчик вводится при помощи волокна, подведенного в фокус, чем обеспечивается эффективная фокусировка излучения в датчике. Плоская отражательная поверхность имеет в центре отверстие, которое служит в качестве выходного окна для излучения после его взаимодействия с исследуемой средой. В выходном окне расположен фокусирующий разъем волокна, обеспечивающий фокусировку излучения в сердцевину волокна. Вышедшее в фокусе из входного волокна излучение, испытывает некоторое число отражений, при этом взаимодействует с поглощающей средой, после чего попадает на фокусирующий разъем и возвращается по выходному волокну для последующей обработки и анализа. Количество отражений и на основании этого длина пробега луча в поглощающей среде могут быть изменены путем изменения формы эллипсоида. Изображение оптического датчика на основе половины эллипсоида вращения представлено на рис.3.



- 1- входное волокно; 2 – отражательная поверхность; 3 – выходное волокно;
4 – фокусирующий элемент; 5 – отверстия для заполнения водой

Рисунок 3 – Конструкция датчика на основе эллипсоидальной отражательной поверхности

Работа выполнена при поддержке государственного фонда фундаментальных исследований. Проект №Ф25/035.