

УСТАНОВКА КЕРРА – ПЕРВИЧНЫЙ ОПТОЭЛЕКТРОННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

В.В. Тютюник, к.т.н. С.В. Говаленков, к.х.н. Г.В. Тарасова,
д.ф.-м.н. С.А. Тюрин, д.т.н., проф. Н.И. Иванов

Описана электрооптическая установка, реализующая принцип однолучевой компенсации в низкочастотных синусоидальных поляризующих полях с использованием фотоэлектронной регистрации анализируемого луча света и синхронного детектирования фототока.

Анализ современных и инструментально реализованных высокоточных физико-химических аналитических методов анализа веществ в решении задачи обнаружения и восстановления скрытых образов показал [1] перспективность использования электрооптического эффекта Керра, в случае его приборной реализации. Последний, как известно [2], отличается такими приоритетными характеристиками как чувствительность, избирательность, воспроизводимость в реальном масштабе времени измерений.

Наблюдение электрооптических эффектов осуществляется абсолютным и относительным методами [3]. Абсолютный метод измерения основан на зависимости угла поворота α плоскости поляризации светового потока, прошедшего измерительный объем от амплитуды приложенного к электродам ячейки Керра постоянного напряжения и может быть реализован на практике механической системой вращающегося анализатора, расположенного на выходе ячейки Керра. При этом точность измерения величины электрического двулучепреломления (ЭДЛП) вещества определяется из характеристик измерительных приборов, величины поляризующего напряжения и разрешающей способности механической системы, что существенно ограничивает возможности метода.

Относительные методы измерения величины эффекта Керра основаны на компенсации ЭДЛП, возникающего в измерительной ячейке величиной ЭДЛП, либо задаваемой оптическим компенсатором (абсолютный компенсационный метод), либо возникающей в эталонной кювете, заполненной стандартным составом (относительный компенсационный метод). К преимуществам последнего следует отнести:

- уменьшение величины поляризующего электрического поля и времени воздействия этого поля на исследуемую среду;
- увеличение чувствительности путем модуляции светового потока анализируемого среду излучения.

Реализация в данных методах фотоэлектронной регистрации светового потока с последующим фазовым детектированием отличается приоритетными метрологическими показателями и позволяет реализовать нуль - фазовый метод.

Принцип однолучевой компенсации (измерительные ячейки расположены по схеме де Кудра) с использованием фотоэлектронной регистрации анализируемого луча света и положен нами в основу разработанной, теоретически обоснованной (по оптическим и метрологическим показателям) и собранной (на основе стандартных приборов и современной элементной базы) измерительной установки, структурная схема которой представлена на рис. 1.

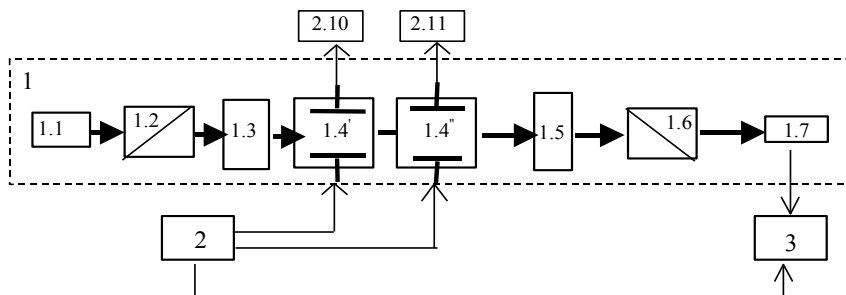


Рис. 1. Структурная схема установки Керра

Предлагаемая установка состоит из оптической части (1), блока формирования напряжения на измерительных кюветах (2), а также блока обработки электрического сигнала (3).

Оптическая часть установки Керра включает последовательно расположенные вдоль оптической оси элементы:

- источник монохроматического излучения (1.1) – ЛГ-75;
- поляризатор (1.2) и скрещенный с ним анализатор (1.6) - призмы Франка-Риттера $10 \times 10 \text{ мм}^2$;
- $\lambda/4$ - слюдяная пластина (некритичной толщины) $10 \times 10 \text{ мм}^2$ (1.5), которая путем вращения в плоскости вертикальной оси позволяет реализовать режим линейной фоторегистрации;
- фото – электронный умножитель ФЭУ-62 – (1.7);
- ячейки Керра – (1.4'), (1.4'') и (1.3) - афокальная система линз (АСЛ – набор диафрагм и линз), расположенная в оптическом промежутке (1.2) - (1.4').

Все элементы оптической части установки расположены на подвижных рейтерах ОСК-2, с юстировочными столиками (6 степеней свободы).

Ячейки Керра – два последовательно сооснаправленных прямоугольных волновода МЭК-58 [4], с установленным (герметично плотно)

между ними окном и запираемые с торцов крышками с окнами. Волноводы помещены в термостатирующие рубашки с входными и выходными штуцерами. Герметичность соединений достигается наличием уплотняющих шайб, предусматривающих крепление оптических окон. Внутри ячеек располагаются две пары электродов с зазором 2 мм. Для уменьшения краевой неоднородности распределения электрического поля в межэлектродном пространстве, торцы электродов изготовлены по профилю Роговского [5]. Материалом электродов являются титановые пластины (толщиной ~ 2 мм), закрепленные по всей длине в наборе ориентирующе-фиксирующих шайб (фторопласт-4). Параллельность встречающихся поверхностей электродов на уровне $\pm 15 \times 10^{-6}$ м по всей длине ячейки обеспечивается установкой двух стеклянных стержней в межэлектродном пространстве вдоль оптической оси ячейки. Конструкция ячейки предусматривает: систему ввода - вывода измеряемой среды; систему вакуумирования ячеек; токовводы (по одному на каждый электрод) низкочастотного ($f = 15$ кГц) напряжения U синусоидальной формы амплитудой 0...2 кВ, штанги которых изолированы относительно корпуса кюветы фторопластовыми прокладками. На поверхности электродов и внутренние поверхности волноводов электрохимическим методом нанесен защитный слой (Cr) толщиной ~ 10 мкм. Длина жидкофазной ячейки составляет 0,025 м. Термостатирование осуществляется циркулирующей термостатирующей жидкостью. Для регулирования температуры использован термостат ИТ-10 (точность термостатирования $\pm 0,02^{\circ}\text{C}$). Вектора поляризующих электрических полей в ячейках взаимно ортогональны либо коллинеарны (в зависимости от знака ЭДЛП в эталонной и измерительных кюветках) и составляют угол 45° с плоскостью пропускания поляризатора (1.2). Это обеспечивает равенство по величине и противоположность по направлению их проекций на плоскость пропускания анализатора при условии равенности поляризующих напряжений на ячейках и идентичности анализируемых веществ. Следовательно, обеспечивается отсутствие переменной составляющей фотопотока на фото - электронный умножитель (ФЭУ) и реализуется режим нулевой фоторегистрации.

Установка Керра измерения ЭДЛП в газах по набору составных элементов идентична описанной выше. Ее конструктивной особенностью является реализация двухканального некомпенсационного режима измерения величины ЭДЛП с последующим разностным сравнением электрических сигналов с ФЭУ, что предусматривает наличие оптического расщепителя, зеркал, двух – поляризаторов, АСЛ, анализаторов и ФЭУ. Отличием в конструкции ячеек Керра является их длина, которая составила 0,6 м.

Расчет оптической части установки и ее элементов был произведен методом матричной оптики в параксиальном приближении [6] на основе паспортных данных ЛГ-75 и характеристик оптических элементов

(стекло – К8 с показателем преломления $n = 1,5248$ на длине волны лазера $\lambda = 0,6328 \times 10^{-6}$ м). При этом решались следующие задачи:

1) уменьшение диаметра пучка ОКГ до 1 мм без виньетирования (коэффициент увеличения 0,25) и потери мощности путем создания АСЛ;

2) определение "ближней" зоны расходимости (1) и расчет оптического промежутка (ОП), включающих размеры элементов и их взаимное положение.

Полная матрица преобразования лучей в лазере позволяет определить матрицу выходящего пучка как

$$M = \begin{bmatrix} 1 + P_1 P_2 T^2 - P_1 T - 2P_2 T & T(2 - P_1 T) \\ P_1 P_2 T - P_1 - P_2 & 1 - P_1 T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix},$$

где $P_i = 2n_i/R_i$ – оптическая сила отражающей (n_i) поверхности, с радиусом кривизны R_i резонатора; $T_i = L_i - l_i(n_i - 1)/n_i$ – толщина i -го ОП резонатора длиной L_i с активным элементом длиной l_i и показателем преломления n_i .

Следуя правилу "ABCD" определения параметров гауссового пучка лазера (диаметр пучка $\varnothing \approx 4.5 \times 10^{-3}$ м) было установлено, что перетяжка пучка лазерного излучения расположена на поверхности выходного зеркала, конфокальный параметр пучка (половина "ближней зоны") равен ≈ 0.4 м.

Полная матрица, описывающая свойства АСЛ (включающей: две собирающие линзы, входной люк и зрачок) для кардинального луча, распространяющегося слева направо, имеет вид

$$M = \begin{bmatrix} P_1(T_2 + T_4)(T_6 P_2 - 1) - T_6(P_1 + P_2) + 1 & T_2 + T_4 + T_6 - P_2 T_6(T_2 + T_4) \\ P_1 P_2(T_2 + T_4) - P_1 - P_2 & 1 - P_2(T_2 + T_4) \end{bmatrix}$$

где P_i , T_i – связаны с физическими и геометрическими характеристиками i -го элемента и местом расположения его на оси.

По рассчитанной таким образом матрице, коэффициент увеличения АСЛ составил величину, равную 0,25. Заметная же расходимость ЛГ приходится на ОП в интервале между элементами (1.6) и (1.7) – рис. 1.

Качество юстировки оптического канала контролировалось нами методом фотоэлектронной регистрации излучения (1.1) путем сопоставления опытно определенных величин элементов матрицы Джонса на выходе (1.6) с соответствующими величинами расчетной матрицы. Расчетная

матрица строилась как аддитивная величина экспериментально определенных матриц Джонса каждого из элементов (1.2) - (1.6) оптической системы.

Введение четвертьволновой пластины (1.5) реализует режим линейной зависимости между переменной вариацией фазы оптического сигнала, вносимой измерительными кюветами, и переменной слагающей светового потока на ФЭУ. Это существенно улучшает соотношение сигнал/шум в блоке обработке электрического сигнала. Таким образом, световой поток на ФЭУ имеет вид

$$\Phi = \Phi_0 \text{Sin}^2 \left[\frac{1}{4} \left(1 \pm \frac{\Delta_{\text{яч}}}{\Delta_{\text{пл}}} \right) \right],$$

где Φ_0 – световой поток, прошедший через систему в случае компланарности плоскостей пропускания элементов (1.2) и (1.6); $\Delta_{\text{яч}}$ – разность фаз, внесенная ячейками Керра ($\Delta_{\text{яч}} = \Delta_{\text{изм}} - \Delta_{\text{ком}}$); $\Delta_{\text{пл}}$ – изменение фазы, обусловленное четвертьволновой пластиной (1.5, рис.1).

Изменение фазы сигнала в i -й кювете (измерительной или компенсационной) – Δ_i определяет величину ЭДЛП B_i как $\Delta_i = d_{\text{эф}i} \lambda B_i E_i^2$,

где E_i – амплитуда приложенного поляризующего электрического поля ($E_i = U_i/h_i$; U_i – величина напряжения на электродах ячейки, зазор

между которыми h_i), $d_{\text{эф}i} = d_i + \frac{z_i}{\pi} \left[1 + \frac{h_i}{z_i} \ln \left(1 + \frac{z_i}{h_i} \right) \right]$ – эффективная

длина электродов i -й ячейки [7], учитывающая поправку на краевую неоднородность поля E_i ; d_i и z_i – длина и толщина электродов.

Соответственно, фототок определится как

$$I_{\Phi} = \sigma^n K \Phi_0 \text{Sin}^2 \left[\frac{1}{4} \left(1 \pm (c-1) \frac{\Delta_{\text{изм}}}{\Delta_{\text{пл}}} \right) \right],$$

где K – чувствительность фотокатода; σ – коэффициент вторичной эмиссии динодов; n – число динодов.

Блок формирования напряжения на измерительные ячейки показан на рис. 2. Устройство формирования модулирующего напряжения, подаваемого на ячейку Керра, выполнено на базе блока строчной развертки телевизионного приемника.

Блок 2 состоит из задающего генератора (2.1) – ГЗ-33, формирующего напряжение синусоидальной формы ($f_0 = 15$ кГц); усилителей мощно-

сти (2.5; 2.6) собранные на лампах 6П45С, обеспечивающих мощность выходного сигнала порядка 3,5 Вт; а также повышающих трансформаторов строчной развертки ТВС - 110ЛА (2.8; 2.9). Сигналы от ТВС подаются на измерительные кюветы (выходы 1, 2) и регистрируются цифровыми вольтметрами В7-36 (2.10 и 2.11, рис. 1).

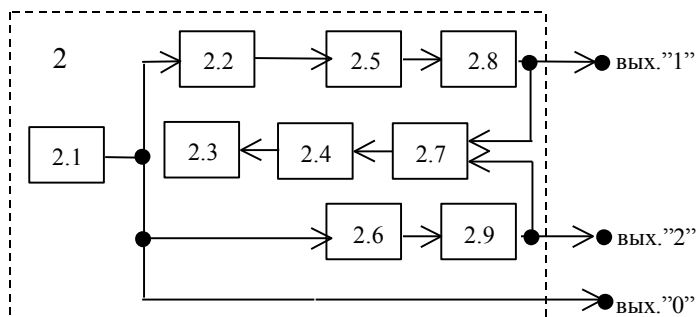


Рис.2. Функциональная схема блока формирования напряжения на измерительные ячейки

Величина разности фазы поляризующих напряжений на измерительных кюветах контролируется синхронным детектором (2.7), выполненным на микросхеме К174ПС1 с использованием ограничителя амплитуды анализируемого сигнала. Сигнал управления от порогового устройства (2.4), управляемого детектором (2.7), поступает на исполнительное устройство (2.3) – блок питания. Изменение же фазы напряжения на измерительной ячейке осуществляется фазовращателем (2.2) в ручном режиме.

Блок обработки электрического сигнала с ФЭУ показан на рис.3.

С целью распознавания информационного сигнала на фоне сильной оптической засветки и достижения оптимального соотношения с/ш $\sim 5/1$, в блоке 3 использован метод синхронного детектирования и накопления электрического сигнала с ФЭУ в режиме нуль - фазовой индикации.

Блок обработки информационного электрического сигнала состоит из предварительного усилителя (3.1), синхронного детектора (3.2), интегратора (3.3) и усилителя постоянного тока (3.4). Предварительный усилитель выполнен на базе мал шумящего операционного усилителя ОР113, коэффициент усиления блока (3.1) порядка $\sim 20\text{дБ}$. Детектор (3.2), опорный сигнал на который от задающего генератора (выход – “0”, рис. 2) подается на вход – “2”, выполнен на базе микросхемы К174ПС4. Время накопления интегратора $\sim (10 \div 100)\text{сек}$. Блок (3.4) – К157УД1 с коэффициентом усиления блока $\sim 40\text{дБ}$. Усилители охвачены отрица-

тельными обратными связями, позволяющими получить необходимые частотные характеристики и требуемую стабильность при постоянном коэффициенте усиления. Регистрация сигнала осуществляется с помощью нуля - индикатора М2001 (3.5).

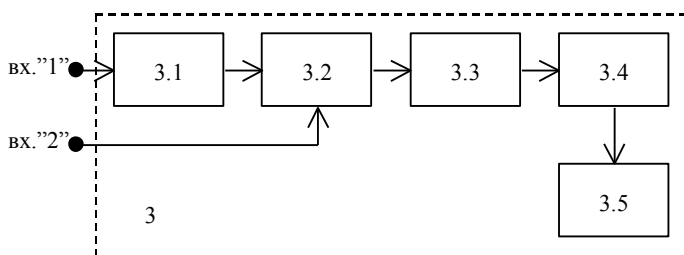


Рис.3. Функциональная схема блока обработки электрического сигнала

Рассмотрим *метрологические характеристики установки*. Погрешности, определяющие точность метода измерения константы ЭДЛП ($\pm \Delta B_{\text{изм}}$), согласно принципу, положенному в основу работы описанной выше электрооптической установки Керра, подразделяются на три группы.

1. Погрешности, связанные с относительным методом однолучевой компенсации разностей фаз, возникающих в первой и второй ячейках Керра и включают:

- амплитудную нестабильность излучения лазера (пренебрежимо мала относительно величины $\pm \Delta B_{\text{изм}}$);
- эллиптичность и коэффициент светорассеивания анализатора и поляризатора, определяемые паспортными данными [8];
- погрешности юстировочных узлов, элементов и блоков;
- светорассеяние отраженных лучей света от поверхности оптических элементов (1.3), (1.5), окон измерительных кювет и исследуемых оптически анизотропных сред;
- погрешность термо- и баростатирования веществ, заполняющих измерительные кюветы;
- инструментально-технологическая неидентичность измерительных ячеек;
- наличие краевых эффектов поляризующих полей в измерительных кюветах;
- неколлинеарность оси ячейки с оптической осью установки;
- некомпланарность встречных поверхностей электродов.

Вышеперечисленные погрешности, входящие в определение величины ЭДЛП, учитываются константой связи измерительных ячеек –

$$\frac{V_{\text{изм}}}{V_{\text{ком}}} = \text{const} \frac{U_{\text{ком}}^2}{U_{\text{изм}}^2} .$$

Ее среднее значение определяется путем измерения мощности светового потока на фотоприемнике при условии, что обе ячейки заполнены единым веществом в дискретном диапазоне поляризующих напряжений (0...2 кВ) подаваемых на кюветы с шагом ~ 200В. Проведенный предварительный анализ исследуемых веществ ($\mu = (0.1 \div 3.5)D$ и $\varepsilon = (5 \div 100)$) показал, что средние значения констант связи находятся в интервале $1.01 \div 1.3$ (так, например, для бензола ($\mu \sim 0.2D$) $\text{const} \sim 1.0313$).

Погрешности данной группы включают также измерения амплитуд напряжений питающих ячейки в момент компенсации ЭДЛП. При этом погрешность вольтметров В7-36 – $\leq 4\%U$ вносит в измерение величины опытно наблюдаемой константы Керра погрешность – $\leq 8.5\%V_{\text{изм}}$.

Таким образом, в данной группе погрешностей определяющей является погрешность, обусловленная характеристиками приборов измеряющих амплитуды поляризующих напряжений.

2. Погрешности, связанные с реализацией в данной установке методики исследования электрооптических эффектов в низкочастотных поляризующих электрических полях, включают:

- фазовую нестабильность поляризующих напряжений на ячейках Керра – $\leq 0.2\%V_{\text{изм}}$;
- частотную нестабильность задающего генератора (составляет $\sim 0.2\%f$ или $\sim 0.18\%V_{\text{изм}}$;
- погрешность обусловленную наличием носителей свободных зарядов в измерительных средах – $\leq 0.2\%V_{\text{изм}}$;
- шум ($K_{\text{шБлок-2}}^y \sim 5\text{дБ}$) и разброс параметров элементов усиленной схемы блока – 2 (до 0,5 % от номинальных значений) – $\leq 0.45\%V_{\text{изм}}$.

Таким образом, приведенные погрешности этой группы по отношению к погрешностям первой группы являются величинами более малого порядка.

3. Погрешности, связанные с методом фоторегистрации информационного оптического сигнала, с синхронным детектированием фототока относительно опорного сигнала ЗГ, включают:

- область спектральной чувствительности ($400 - 1200 \text{ нм}$), чувствительность катода (15 мкА/лм), темновой ток ($3 \times 10^{-8} \text{ А}$), нелинейность и воспроизводимость ФЭУ в момент компенсации [9];

- фазовую нестабильность информационного и опорного сигналов в синхронном детекторе (3.2) – $\leq 0.18\%V_{изм}$;
- частотную нестабильность опорного сигнала на синхронном детекторе – $\leq 0.18\%V_{изм}$;
- коэффициенты шума нелинейных элементов измерительного тракта ($K_{ш}^{Y\sim} \sim 1дБ$; $K_{ш}^{CD} \sim 6дБ$; $K_{ш}^{Y\bar{=}} \sim 3дБ$) – $\leq 0.23\%V_{изм}$;
- погрешности навесных элементов схемы (резисторов и конденсаторов) при определении коэффициентов передачи усилительных блоков (3.1), (3.4) и постоянной времени интегратора (3.3) – до $\pm 0,5\%$ – $\leq 0.45\%V_{изм}$;
- класс точности измерительной головки М2001 – 2,5 – $\leq 1.3\%V_{изм}$;

Погрешность третьей группы зависит от класса точности измерительной головки. Однако и она меньше погрешности первой группы.

Отметим, что дополнительные составляющие погрешности, не входящие в погрешностям метода, связаны с методикой очистки измеряемых веществ (при измерении чистых соединений) и с точностью определения концентрации компонент исследуемых веществ (при измерении смеси).

Таким образом, проведенный анализ [10] погрешностей блоков установки при относительных компенсационных (нуль - фазовая индикация) измерений показал, что определяющей является погрешность измерений напряжений на кюветах в момент компенсации величины ЭДЛП. При этом величина опытно наблюдаемой константы Керра исследуемого вещества определится с точностью

$$V_{изм} \pm \Delta V_{изм} = \text{const} V_{ком} \frac{(U_{ком} \pm \Delta U_{ком})^2}{(U_{изм} \pm \Delta U_{изм})^2}.$$

Метрологические измерения постоянных Керра чистых органических веществ – C_6H_{14} и CCl_4 , проведены согласно описанного относительного метода. При этом показатели преломления исследуемых систем измерялись на рефрактометре ИРФ-23 с относительной погрешностью измерения 0,02%, а плотность и диэлектрическая проницаемость – на приборе “Диполь-2М”. Относительная погрешность определения ϵ равна 0,03%, а ρ – 0,05%. Измерения с доверительной вероятностью 0,95 дали значения:

$$V = (0.499 \pm 0.002) \times 10^{-8} \text{ ед. СГСЕ} \quad \text{для } C_6H_{14};$$

$$V = (0.722 \pm 0.001) \times 10^{-8} \text{ ед. СГСЕ} \quad \text{для } CCl_4,$$

что хорошо согласуется с литературными данными измерений в постоянном, в низко- и высокочастотном (с разным видом огибающей) электрических полях [2]. Наименьшая измеренная на установке постоянная

Керра чистого перфтордиметилциклогексана составила $B = (0.286 \pm 0.008) \times 10^{-8}$ ед.СГСЕ .

Минимальная оптическая разность хода лучей, рассчитанная как предел изменения поляризующего напряжения в измерительной ячейке в окрестностях его номинального значения при условии сохранения компенсации светового потока на ФЭУ, составила величину 10^{-3} рад.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тютюник В.В. Молекулярно-оптический мониторинг среды возгорания. Анализ газов и проблемы пожарной безопасности // Проблемы пожарной безопасности. – Харьков: ХИПБ МВС Украины. – 1999. – Вып.5. – С. 196 - 203.
2. Вукс М.Ф. Электрические и оптические свойства молекул и конденсированных сред. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1984. – 334 с.
3. Преждо В.В., Хащина М.В., Замков В.А. Электрооптические исследования в физике и химии. – Харків: Вища школа, 1982. – 152 с.
4. Гуляев Н.А. Радиоволноводы, объемные резонаторы и антенны УКВ. – М.: Связь, 1965. – 181 с.
5. Резвых К.А. Расчет электростатистических полей в аппаратуре высокого напряжения. – М.: Энергия, 1967. – 121 с.
6. Джеррард А., Берч Дж.М. Введение в матричную оптику – М.: Мир, 1978. – 342 с.
7. Chamoumt M.L. Reckerckes experimentales sur le phenomena electrooptique de Kerr et sur les methodes servant a l'etude de la lumiere polarisee elleptiquement // Ann. Chim. Et Phys. – 1915. – V.5. – P. 17 - 78.
8. Ванюрихин А.И., Герчановская В.П. Оптикоэлектронные поляризационные устройства. – К.: Техніка, 1984. – 160 с.
9. Ишанин Г.Г. Приемники излучения оптических и оптико-электронных приборов. – Л.: Машиностроение, 1986. – 175 с.
10. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешности результатов измерения. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 301 с.

Поступила в редколлегию 16.02.2001