

УДК 378.147:004

Винник Олександр Федорович

старший викладач

Харківський національний педагогічний університет імені Г.С. Сковороди, Харків, Україна

vinnik7777777@gmail.com

ORCID: 0000-0001-5130-5056

Грановська Тетяна Яківна

кандидат пед. наук, доцент

Харківський національний педагогічний університет імені Г.С. Сковороди, Харків, Україна

tgran@hnpu.edu.ua

ORCID: 0000-0003-2683-839X

Кратенко Роман Іванович

кандидат біологічних наук, доцент

Харківський національний педагогічний університет імені Г.С. Сковороди, Харків, Україна

romankratenko1@gmail.com

ORCID: 0000-0002-5325-0543

ВИСОКОШВИДКІСНИЙ КОМП'ЮТЕРНИЙ ПОЛЯРИМЕТР НА ОСНОВІ CMOS МАТРИЦІ

Анотація. В умовах епідемії COVID-19 та повномасштабної війни в Україні особливо відчувається недостатня кількість комп'ютерного обладнання для проведення онлайн хімічного експерименту. У зв'язку із впровадженням Нової української школи та розвитком STEM-освіти виникла гостра необхідність розробки вітчизняного навчального комп'ютерного обладнання. На кафедрі фізики і хімії Харківського національного педагогічного університету імені Г.С. Сковороди розробляється програмно-методичний комплекс (ПМК) SchoolKit основу якого складають три універсальні програмні засоби (ПЗ): ColorKit, ChemKit, SoundCardScientificKit. При створенні застосунків використовується тільки безкоштовне програмне, що забезпечує низьку вартість, а відповідно і доступність для широкого кола користувачів. На основі ПЗ ColorKit розроблено комп'ютерний поляриметр. Запропоновано новий принцип роботи поляриметра, що ґрунтується на комп'ютерній обробці зображення яке виникає при проходженні поляризованого світла послідовно через розчин який досліджується, прозору пластину із внутрішніми напруженнями та аналізатор. Виготовлено діючу модель високошвидкісного комп'ютерного поляриметра на основі CMOS матриці та апробовано її. Пристрій відрізняється від інших тим, що використовує принципово новий спосіб обробки візуальних даних, не містить жодних механічних компонентів та поляризаційних модуляторів, простий у виготовленні, надійний. Програмне забезпечення поляриметра дозволяє накопичувати дані у вигляді таблиць, відображати у графічній формі та режимі реального часу. Комп'ютерний поляриметр два роки застосовується під час лабораторних занять із курсу механізми органічних реакцій, у тому числі, в онлайн режимі. Зокрема, за допомогою нього експериментально визначалися константи кислотного гідролізу сахарози при різних температурах, концентраціях кислоти та сахарози. Наочне відображення результатів вимірювання, стабільність роботи пристрою та гарна відтворюваність експериментально отриманих даних дозволяє інтенсифікувати та або оптимізувати навчальний процес за рахунок автоматизації вимірювань. Після удосконалення та валідації прилад планується використовувати у науковій роботі.

Ключові слова: комп'ютерний поляриметр; CMOS; SchoolKit; ColorKit

Мета: розробка комп'ютерного поляриметра без механічних компонентів на основі CMOS матриці.

Актуальність. Поляризація світла є результатом взаємодії речовини та світла на атомному рівні, а тому несе інформацію про молекулярну будову речовини та текстуру поверхні. Вимірювання кута обертання площини поляризації (КОПП) застосовується в

багатьох галузях науки й техніки: в хімічному аналізі, медицині, астрономії тощо [1, С.6, 2-5].

Навчання сучасним методам хімічного аналізу неможливе без відповідного обладнання. Облаштування хімічних лабораторій шкіл та університетів є актуальною не тільки в Україні задачею, про що свідчить ряд публікацій в яких наводяться методики створення на базі шкільних лабораторій або домашніх умовах колориметрів, спектрофотометрів, рН-метрів, поляриметрів [6-7], тощо. Крім того, що такі проекти дозволяють розширити матеріальну базу навчальних закладів, сприяють розвитку творчої активності молоді, дозволяють краще зрозуміти принципи роботи сучасного наукового обладнання [8]. В умовах епідемії COVID-19 та повномасштабної війни в Україні особливо відчувається недостатня кількість комп'ютерного обладнання для проведення онлайн хімічного експерименту.

Обладнання: ноутбук Acer 52201G08MI; вебкамера Megapixel 10x Digital Zoom $f=3.85\text{mm}$ із модифікованою оптикою; світлодіод EDSA-1LA3; поляризаційна плівка 6AB2027; кювета для розчину ($l=200\text{ мм}$, $d(\text{внутр.})=10\text{ мм}$, $d(\text{зовн.})=15\text{ мм}$); модуль термометра-термостата HW557; блок живлення LX1206; кроковий двигун 28BYJ-48; модуль драйвера крокового двигуна SBT0811.

Реактиви: стандарт-титри (фіксанали) соляна кислота ТУ 6-09-2540-87; сахароза (ч.д.а.) ГОСТ 5833-75; вода дистильована.

Методика приготування розчинів.

Приготування 4 М HCl: 4 М розчин HCl готували шляхом кількісного перенесення вмісту 2-х стандарт титрів у мірну колбу на 50 мл.

Приготування 0,5 М розчину сахарози: готували безпосередньо перед проведення експерименту, відважували 17,15 г сахарози кількісно переносили в мірну колбу на 100 мл, доводили до мітки дистильованою водою, ретельно перемішували.

Літературний огляд. Поляризаційні прилади вимірюють такі параметри поляризованого світла: 1) для лінійно поляризованого світла – положення площини поляризації в просторі – азимут; 2) для світла з еліптичною поляризацією – положення еліпса в просторі, форму еліпса – відношення півосей еліпса та напрямок вектора світлового потоку; 3) для частково поляризованого світла визначають ступінь поляризації [1, С.10-33]. За призначенням поляриметри можна розділити на дві групи: 1) для вивчення властивостей поляризованого світла; 2) визначення змін у стані поляризації у результаті взаємодії з речовиною (аналітичні прилади). Основна відмінність приладів першої групи від приладів другої, полягає у тому, що прилади першої групи мають тільки аналізатор; другої групи, крім того, ще й поляризатор та часто ще й кювету для розчину. Найбільш широко в хімічній практиці застосовуються прилади другої групи. За способом вимірювання поляриметри можна розділити на три групи – візуальні напівтіньові, автоматичні напівтіньові, модуляційні, на основі поляризаційних масивів.

Візуальні напівтіньові поляриметри. У візуальних пристроях вимірювання КОПП здійснюється шляхом вимірювання кута повороту аналізатора, необхідного для вирівнювання яскравості двох або трьох полів. Такі поляриметри мають напівтіньові поляризатори (більш часто) або аналізатори – поляризуючі пристрої що дають лінійно поляризоване світло дещо під різним кутом ($2-8^\circ$) на різних ділянках видимого поля. У найбільш точних поляриметрах застосовують напівтіньову призму Ліпіха. Як напівтіньовий пристрій з малим постійним кутом півтіні для точних приладів застосовують також пластинку Накамура. В приладах середньої точності використовують призму Корню, в найбільш простих пристроях – напівтіньові пристрої на основі напівхвильових пластинок. Поворот аналізатора відносно напівтіньової рівності викликає затемнення одного поля, в той час, як інше стає світліше. Завдяки

тому, що око людини може з досить високою точністю порівнювати яскравість двох плям, чутливість таких поляриметрів порівняно висока. Також, для порівняння яскравості полів використовують електронні прилади.

У роботі [6] пропонується створення дешевого поляриметра для освітніх цілей на основі двох поляризаторів, один з яких закріплений на круговому транспортірі, а інший – нерухомо; цифрового вольтметра; лазера; фотодіоду та кювети для розчину. Світло від лазера попадає на рухомий поляризатор, проходить через шар розчину, нерухомий поляризатор та попадає на фотодіод. Кут обертання визначають використовуючи транспортир та вольтметр.

Не тільки вітчизняна освіта має недостатню кількість промислового фізико-хімічного навчального обладнання, про це свідчить ряд публікацій у яких пропонуються методики створення простих візуальних поляриметрів для застосування у навчальному процесі [7, 9]. Застосування саморобних поляриметрів формує пізнавальну активність студентів, дозволяє більш глибоко розібратися в теоретичних аспектах роботи приладу та його конструкції, набути навичок роботи з ним [8].

Автоматичні напівтіньові поляриметри. Такого типу поляриметри виконують автоматичну компенсацію обертання площини поляризації. Принцип дії їх суттєво не відрізняється від засад на яких ґрунтується робота візуальних пристроїв вимірювання КОПП. Найбільш проблемною частиною таких пристроїв є механічний привід аналізатора або поляризатора. Застосування прецизійних поляризаційних модуляторів, багатошвидкісних безлюфтових редукторів і датчиків кута робить такі прилади складними у виробництві й експлуатації, знижує надійність й значно підвищує їх вартість. Але навіть застосування таких технічних рішень не дозволяє знизити час вимірювання і виключити зриви процедури стеження за зміною кута поляризації в умовах значного розсіювання й поглинання світла середовищем. Тому, вище перелічені фактори, не дозволяють суттєво підвищити точність таких пристроїв навіть при застосуванні алгоритмів статистичної обробки великої кількості проміжних вимірювань.

Поляриметри модуляційного типу. Робота такого типу поляриметрів ґрунтується на вимірювання різниці фаз двох синусоїдальних сигналів [10, 11]. В таких поляриметрах на вхід оптичної системи подається лінійно поляризоване випромінювання, площина поляризації якого безупинно обертається навколо оптичної осі. Це досягається тим, що неполяризоване світло проходить через лінійний поляризатор, що механічно обертається з постійною швидкістю, або використовуються активні перетворювачі поляризації: магнітооптичні (робота яких ґрунтується на ефектах Фарадея та Погкельса), акустооптичні, електрооптичні [1, С.42, 47-49,]. Далі випромінювання ділиться на два промені. Один промінь проходить через нерухомий аналізатор і попадає на перший фотоприймач, формуючи опорний електричний сигнал. Другий промінь проходить через кювету з досліджуваною речовиною потім аналізатор та попадає на другий фотоприймач. Якщо речовина обертає поляризоване світло то виникає синусоїдальний електричний сигнал зміщений по фазі. Обидва сигнали математично обробляються, часто з використанням швидкого перетворення Фур'є, знаходиться зміщення фаз. На основі отриманих даних визначають КОПП. Метод вимірювання КОПП за різницею фаз двох синусоїдальних сигналів зазнавав різноманітних модифікацій та удосконалень. Застосування модуляційного методу вимірювання дозволяє суттєво підвищити швидкість роботи пристроїв та їх надійність, спростити конструкцію механічного приводу [1, С.50-51].

Поляриметри на основі поляризаційних масивів. Порівняно недавно було налагоджено промислове виробництво мікрополяризаційних матриць (microgrid polarizer arrays (MPAs)) [13] які здатні визначати кут та ступінь поляризації світла лише

за одним знімком. Усі сенсори (субпікселі) матриці розбиті на групи (2x2) – пікселі. У стандартній фотоматриці субпікселі покриті світлофільтрами: один – червоним, один – синім, два – зеленим (рис. 2, А). У мікрополяризаційних матрицях кожен субпіксель покритий поляризатором, напрямком поляризації кожного з них зміщений на кут в 45°, відповідно 0°, 45°, 90°, 135 (рис. 1, Б).



Рис.1. Фотоматриці: А) із RGB фільтрами; Б) із поляризаційним фільтрами [13].

Відповідно, потік поляризованого світла, що попадає на кожен субпіксель МРАs буде залежати від величини φ (рис.2).

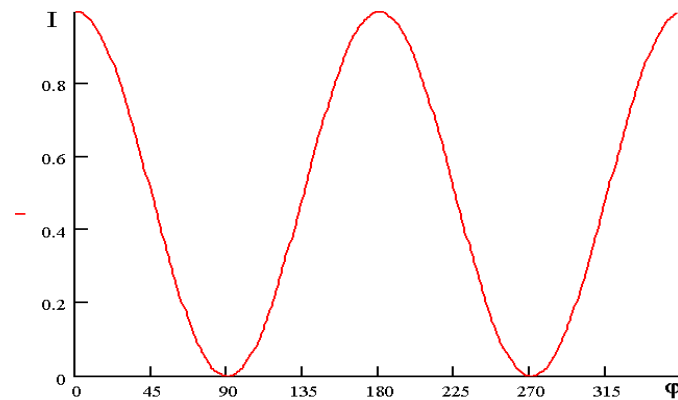


Рис. 2. Зміна інтенсивності світлового потоку в залежності від кута обертання аналізатора.

На основі отриманих даних можна розрахувати ступінь поляризації – *DOP* (degree of polarization) (3), кут лінійної поляризації – ψ_{linear} (4) ступінь лінійної поляризації – *DOLP* (degree of linear polarization) (5), ступінь кругової поляризації – *DOCP* (degree of circular polarization) (6), кутову висоту у сфері Пуанкаре – χ (7) [1-С.29-49, 13, 14].

$$\vec{S}(x, y) = \begin{bmatrix} S_0(x, y) \\ S_1(x, y) \\ S_2(x, y) \\ S_3(x, y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{0^\circ}(x, y) + I_{90^\circ}(x, y) \\ I_{0^\circ}(x, y) - I_{90^\circ}(x, y) \\ I_{45^\circ}(x, y) - I_{135^\circ}(x, y) \\ I_{LH}(x, y) - I_{RH}(x, y) \end{bmatrix} \quad (2)$$

Де $I_{0^\circ}(x, y)$, $I_{45^\circ}(x, y)$, $I_{90^\circ}(x, y)$, $I_{135^\circ}(x, y)$ – інтенсивності світлових потоків на виході із світлофільтрів розміщених відповідно під кутами 0°, 45°, 90°, 135°. $I_{LH}(x, y)$, та $I_{RH}(x, y)$ – відповідно величини правостороннього та лівостороннього циклічно поляризованого світла.

$$DOP = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0} \quad (3)$$

$$\psi_{linear} = \frac{1}{2} \arctan \frac{S_2}{S_1} \quad (4)$$

$$DOLP = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0} \quad (5)$$

$$DOCP = \frac{S_3}{S_0}$$

$$\chi = \frac{\arctan \frac{S_3}{2 \cdot \sqrt{S_1^2 + S_2^2}}}{2} \quad (6) \quad (7)$$

Технологія виготовлення MPAs складна, потребує дороговартісного обладнання. У джерелі [15] пропонується більш проста конструкція зображувального поляриметра з чотирьох плівкових поляризаторів з позиційними кутами 0° , 45° , 90° , 135° .

Більшість пристроїв на основі мікрополяризаційних масивів чутливі лише до лінійно поляризованого світла, а деякі – і до циклічно поляризованого, а відповідно можуть визначати всі чотири параметри Стокса [13, 14], і навіть одночасно виконувати спектральний аналіз [16].

У роботі японських вчених пропонується оптична схема фотополяриметра на основі модифікованих пластин Саварта (MSP) [17].

Для вивчення кінетики хімічних реакцій було розроблено поляриметр робота якого ґрунтується фотонному спіновому ефекті Холла [18]. Поляриметр дуже чутливий, має високу роздільну здатність $1.25 \times 10^{-4}^\circ$, не містить механічних компонентів. Джерелом світла є He-Ne лазер ($\lambda = 632.8$ нм). У поляриметрі застосовують кювети малої довжини, тому на основі цієї оптичної схеми можуть бути розроблені компактні поляриметри, а при застосування стандартних кювет – дуже чутливі пристрої. Пристрій дозволяє вимірювати зміщення кута обертання лише у невеликих межах.

Пристрої створені на основі мікрополяризаційних матриць називають зображувальними або фотополяриметрами. Їх розробка та використання обмежена із-за низької доступності MPAs. Поляриметри такого типу практично не застосовуються в хімічному аналізі. Однак вони є перспективними, в тому числі, і для аналізу оптично активних розчинів та речовин, оскільки не містять механічних компонентів, що суттєво збільшує надійність поляриметрів такого типу.

Джерела світла. В поляриметрах найчастіше застосовують монохроматичні джерела світла з довжиною хвилі 589,3 нм: натрієві лампи, світлодіоди та лазери. Якщо використовується сонячне, або інше джерело не монохромного світла то застосовують світлофільтри; для виділення вузької ділянки спектру, використовують інтерференційні світлофільтри. При вивченні будови хімічних речовин досліджують обертову дисперсію у видимій і ультрафіолетовій областях спектра (185-750 нм), для цього застосовують спектрополяриметри. В них використовуються лампи із рівномірним спектром, світло яких пропускають через монохроматори на основі призм або дифракційних ґраток. Із розвитком комп'ютерної техніки та технологій виробництва фотоматриць було розроблено фотополяриметри [19], які не потребують монохроматорів та не містять механічних компонентів.

Хроматична поляризація. Деякі речовини, мають властивість хроматичної поляризації світла. Це явище широко використовується для аналіз внутрішніх напружень у виробках, властивостей насичених розчинів в умовах, близьких до кристалізації (рис. 3).

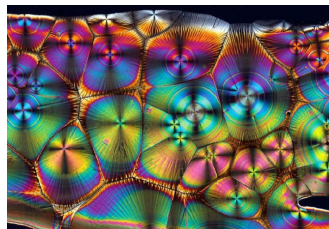


Рис.3. Хроматична поляризація. 1 – розподілення механічних напружень у промисловому виробі; 2 – інтерференційна картина, що виникає при проходженні випромінювання через насичений розчин вітаміну аскорбінової кислоти [20].

Виклад основного матеріалу. З метою розвитку дистанційної освіти та стимулювання STEM-освітніх проєктів та на кафедрі фізики і хімії Харківського національного педагогічного університету імені Г.С.Сковороди розробляється програмно-методичний комплекс (ПМК) SchoolKit, основу якого складають три універсальні програмні засоби: ColorKit, ChemKit, SoundCardScientificKit [21]. При створенні застосунків використовується тільки безкоштовне програмне забезпечення: Microsoft Visual Studio Express Edition, HTML Microsoft Help Workshop, Microsoft Developer Network, SDK OW.NET, що дозволяє суттєво здешевити затрати на його створення. Найбільш потужним застосунком ПМК є ColorKit. Він призначений для обробки фотографій, фільмів, та зображення безпосередньо із відеокамери; є універсальним, гнучким у налаштуванні, має ряд спеціалізованих та універсальних модулів. Його універсальність зумовлена тим, що користувач необмежений у виборі кількості, положень та розмірів фрагментів (пікселів малюнку чи кадрів фільму), містить велику кількість засобів обробки візуальних даних, дозволяє вивчати не тільки параметри окремого об'єкта, а й порівнювати візуальні дані декількох та їх зміни у часі. Результати обробки даних виводяться у вигляді таблиць і графіків в режимі реального часу. Користувач може легко зібрати свою власну систему дослідження шляхом комбінування модулів макросу та їх налаштуванням. Всі інструменти для роботи із візуальними даними поділені на дві категорії:

- функції – неспеціалізовані засоби обробки зображення з науковою метою; призначені для обробки одного фрагменту, дозволяють в повній мірі проявити творчу активність, потребують деяких навичок роботи з додатком; є ефективними засобами при розробці алгоритмів обробки візуальних даних для власного програмного забезпечення користувача.
- інструменти – спеціалізовані засоби, що моделюють роботу таких пристроїв як колориметр, рефрактометр, спектрофотометр, поляриметр; часто обробляють не один, а ряд фрагментів (наприклад, при застосуванні інструменту «Колориметр», спочатку обробляються точки калібрувального графіку, а потім візуальні дані зразків). У класах інструментів застосовуються класи функцій.

Користувач методом drag and drop створює та налаштовує власну систему дослідження.

Завдяки застосунку ColorKit вдалося швидко розробити діючі моделі навчального комп'ютерного колориметра, нефелометра, рефрактометра та розробити новий за принципом дії швидкісний поляриметр. Конструктивна відмінність поляриметра в тому, що він не містить жодного механічного приводу та поляризаційних модуляторів, а відповідно не потребує при виготовленні малодоступних та високовартісних деталей і може бути виготовлений навіть в навчальній лабораторії або домашніх умовах. Відсутність механічних компонентів суттєво збільшує надійність пристрою та відтворюваність результатів. Точність вимірювань достатня не тільки для навчально-наукової роботи, а й для професійної наукової діяльності. Швидкість вимірювання в асинхронному режимі обмежується частотою кадрів вебкамери, а в режимі реального часу, в залежності від продуктивності комп'ютера, від 50 до 300мс, що є унікальним показником навіть для професійних дороговартісних пристроїв.

Розробка комп'ютерного поляриметра. Запропоновано новий принцип визначення кута обертання оптично активними речовинами та речовинами, що ґрунтується на комп'ютерній обробці зображення, яке виникає при пропусканні оптично поляризованого світла послідовно через розчин або речовину, прозору пластину із внутрішніми напруженнями та поляризатор.

Розроблено діючу модель комп'ютерного поляриметра. Монохромне світло випромінюється світлодіодом 1 рис. 4. Проходить через плівковий поляризатор (рис.4, 2), фокусує лінзу (рис.4, 3), кювету з розчином(рис.4, 4); полікарбонатну плівку із

внутрішніми напруженнями (рис.4, 5), ще один плівковий поляризатор (аналізатор) (рис.4, 6), а потім через оптичну систему (рис.4, 7) зображення проєктується на CMOS матрицю вебкамери (рис.4, 8).

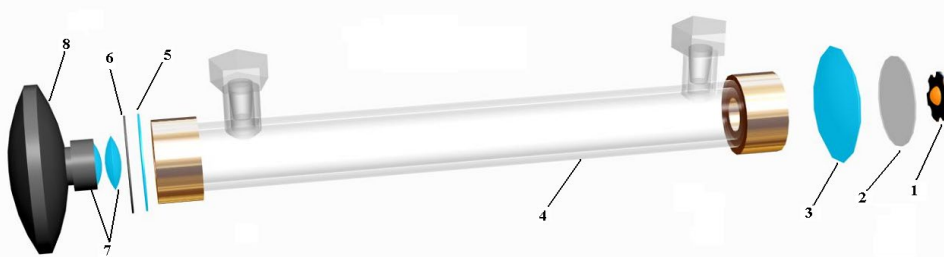


Рис. 4. Оптична схема поляриметра. 1 – світлодіод із випромінюванням в області 589 нм.; 2 – поляризаційна плівка (поляризатор); 3 – фокусуюча лінза; 4 – кювета; 5 – полікарбонатна пластина із внутрішніми напруженнями, 6 – поляризаційна плівка (аналізатор); 7 – оптична система, 8 – CMOS веб-камера Megapixel 10x Digital Zoom $f=3.85\text{mm}$.

Для формування внутрішніх напружень в полікарбонатній пластині, полімерну основу поміщували на силіконову пластину товщиною 2 мм яку було розміщено на металевій підкладці, а потім загострений вольфрамовий стержень вдавлювали в полімерну пластину товщиною 1,1мм з таким розрахунком, щоб сформувалися внутрішні напруження в радіусі 1,5-3 мм.

На основі розробленої оптичної схеми було створено діючу модель комп'ютерного поляриметра (рис.5.)

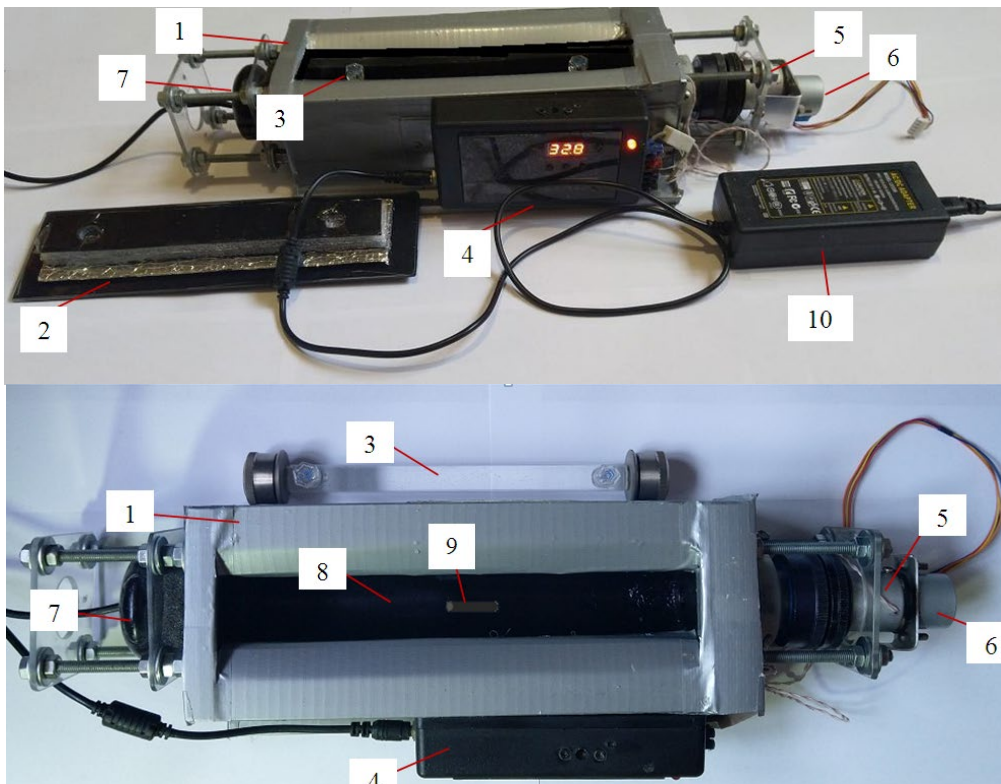


Рис. 5. Діюча модель комп'ютерного поляриметра: 1 – теплоізолюваний корпус із підігрівачем; 2 – кришка; 3 – кювета; 4 – модуль термостата та стабілізатора струму живлення світлодіоду; 5 – модуль джерела світла; 6 – кроковий двигун; 7 – веб-камера; 8 – алюмінієва пластина нагрівача, 9 – датчик температури; 10 – блок живлення.

При проходженні монохромного поляризованого світла через полімерну пластину із внутрішніми напруженнями та поляризаційну плівку аналізатора, утворюється зображення із чіткими темними фрагментами. Для налаштування комп'ютерного поляриметра задаються області фрагменту відбору даних та налаштовується система відбору пікселів на відбір темних точок (рис. 6).

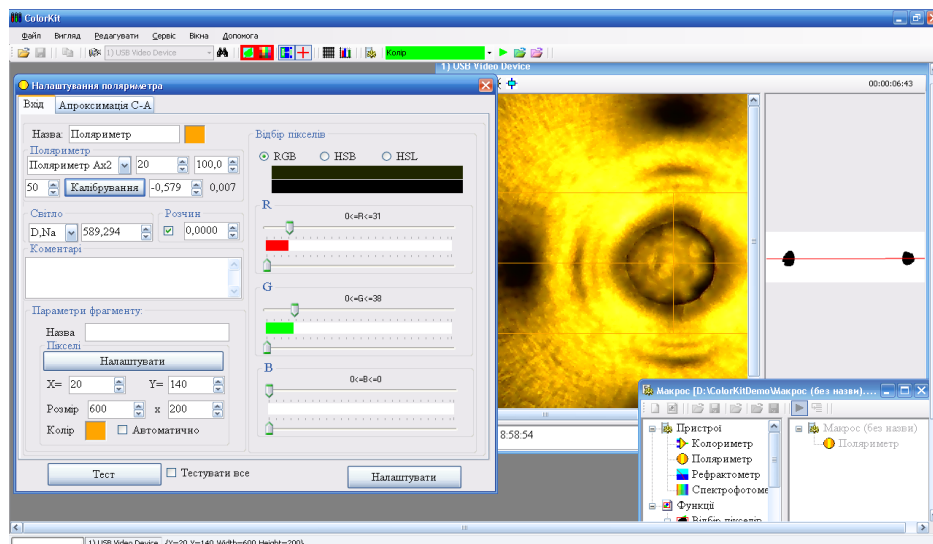


Рис. 6. Інтерфейс програмного засобу ColorKit в режимі «Поляриметр», налаштування.

При комп'ютерному визначенні кута обертання центральні пікселі не обробляються. Для цього, перед обробкою зображення центральні точки програмно замінюються на білі (рис. 7).

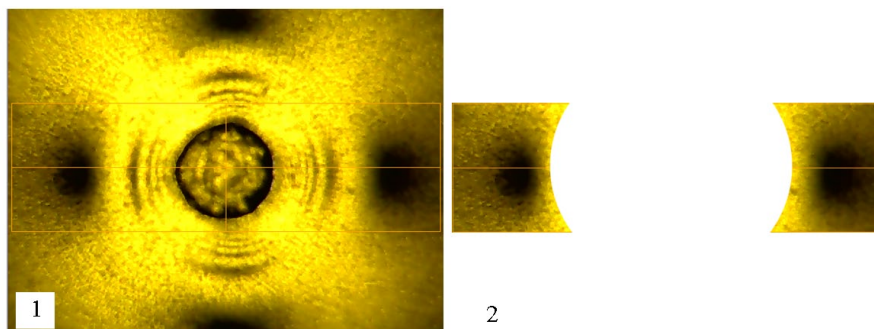


Рис. 7. Комп'ютерна обробка зображення:

1 – вихідний малюнок, 2 – фрагмент підготовлений для відбору пікселів.

Після визначення координат темних пікселів програмним забезпеченням проводиться апроксимація даних лінійною функцією методом найменших квадратів та визначається кут нахилу прямої. У тому разі, коли вимірювання проводиться за декількома кадрами, то відбувається накопичення точок, а потім їх апроксимація.

Для підтримання сталої температури кювета (рис.5, 3) поміщується в теплоізолюваний корпус (рис.5, 1) із нагрівачем, температура якого підтримується термостатом (рис.5, 4).

Виключно з метою вивчення характеристик поляриметра, було передбачено обертання світлодіоду разом із поляризатором світла кроковим двигуном (рис. 5, 5). У стандартному комплектуванні двигун не передбачено.

Для калібрування комп'ютерного поляриметра кювета заповнюється дистильованою водою. Визначається нахил прямої за обробкою певної кількості кадрів (задається користувачем, рекомендується не менше 20). На цю величину кута у подальшому корегуються дані.

Розроблене програмне забезпечення дозволяє вимірювати кут обертання та накопичувати експериментальні дані у таблиці, відображати в графічному вигляді (рис. 8). Табличні дані можна зберегти у форматі *.xml або скопіювати в буфер та перенести до програмного забезпечення для подальшої математичної обробки даних, наприклад у Microsoft Excel.

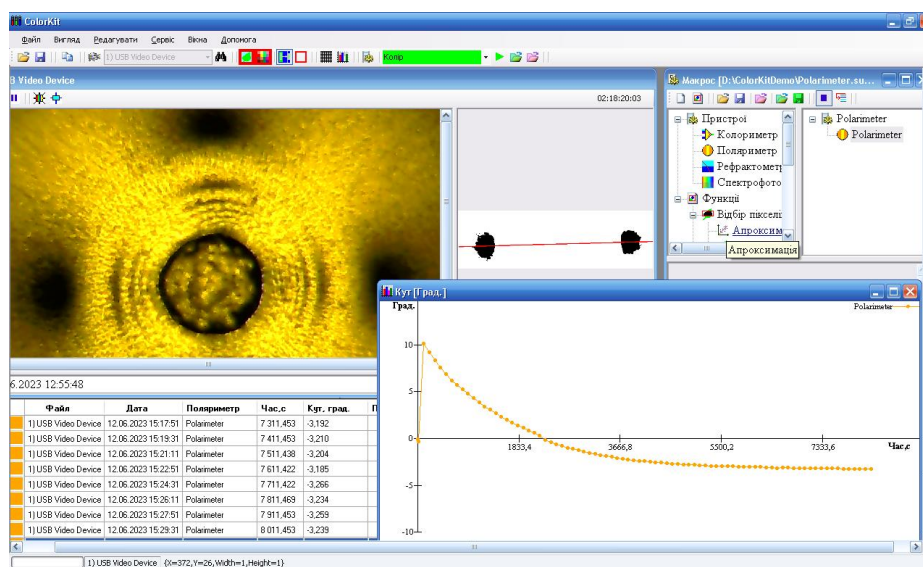


Рис. 8. Інтерфейс програмного засобу ColorKit в режимі «Поляриметр», вимірювання.

Для оцінки впливу фонових струмів матриці на результати вимірювання комп'ютерний поляриметр калібрували на основі 50 знімків та проводили 200 вимірювань через інтервал 3 с. Результати вимірювання при обробці одного кадру відхилялися від середнього значення до 0.14° (рис. 9.).

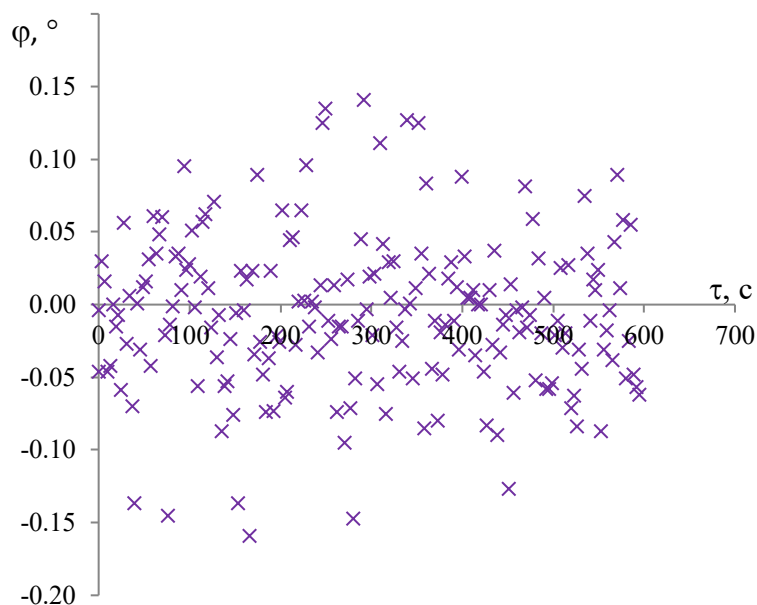


Рис. 9. Дисперсія величини вимірювання кута зумовлена впливом фонових струмів матриці.

Цю похибку можна суттєво зменшити збільшивши кількість кадрів для обробки (табл.1); заміною матриці на більш якісну; удосконаленням технології формування внутрішніх напружень полікарбонатної пластини (рис.5, 5), яка б дозволяла можливість отримати точки з більш чіткими контурами (табл. 1).

Табл. 1

Оцінка впливу фонових струмів матриці на результати вимірювання за 200 вимірюваннями через 3 с

Кількість кадрів	Середнє значення	Довірчі інтервали математичного очікування	Дисперсія	Довірчі інтервали дисперсії	
				Верхня межа	Нижня межа
1	-0.0066	± 0.0074	0.00282	0.00347	0.00234
10	0.0058	± 0.0028	0.00042	0.00051	0.00035
20	-0.0025	± 0.0020	0.00022	0.00027	0.00018
40	0.0042	± 0.0014	0.00010	0.00012	0.00008

Для визначення функції кут обертання – кут повороту темних фрагментів за допомогою крокового двигуна (рис.6, 6) обертали модуль джерела світла що складається із світлодіоду та поляризаційної плівки (рис.4, 1; 2) із прирощенням у один крок – $0,17578125^\circ$ [22]. Залежність кута обертання від нахилу прямої апроксимації з високою достовірністю описується функцією $\varphi_{\text{апрокс.}} = 0,9526\varphi + 0,2064$, індекс детермінації $R^2 = 0,9996$ (рис.10).

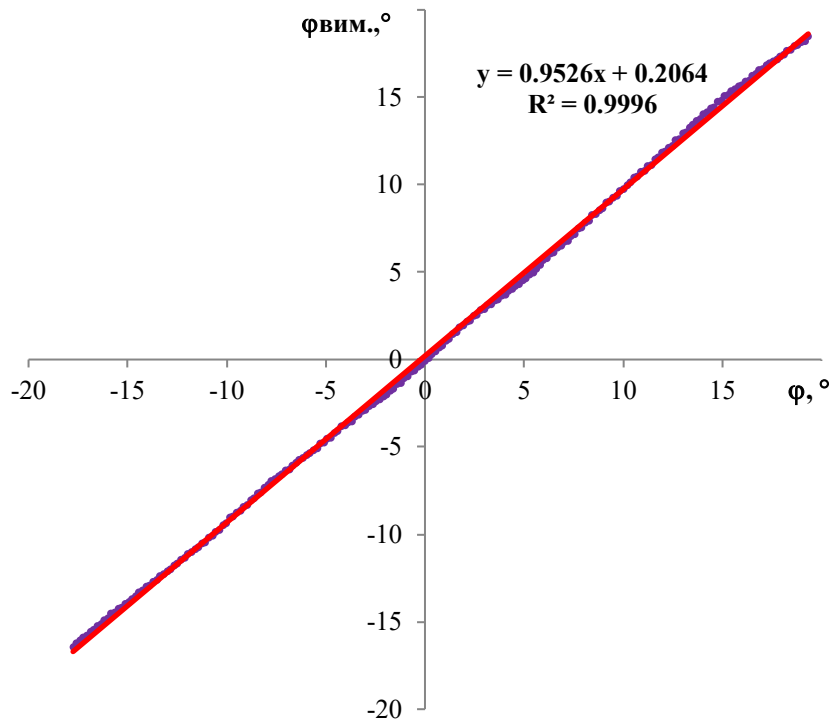


Рис. 10. Залежність кута лінії апроксимації даних від кута обертання поляризатора кроковим двигуном: • - експериментальні дані, – - лінія тренду.

Різниця між кутом обертання кута обертання поляризаційної плівки рис. 5, 2 кроковим двигуном і нахилом прямої отриманої апроксимацією в межах кута обертання $\pm 15^\circ$ не перевищує $0,5^\circ$ (рис. 11). Ця похибка часткова, може бути зумовлена як недосконалістю механічної системи обертання поляризатора, так і похибками, що виникають в результаті комп'ютерної обробки візуальних даних.

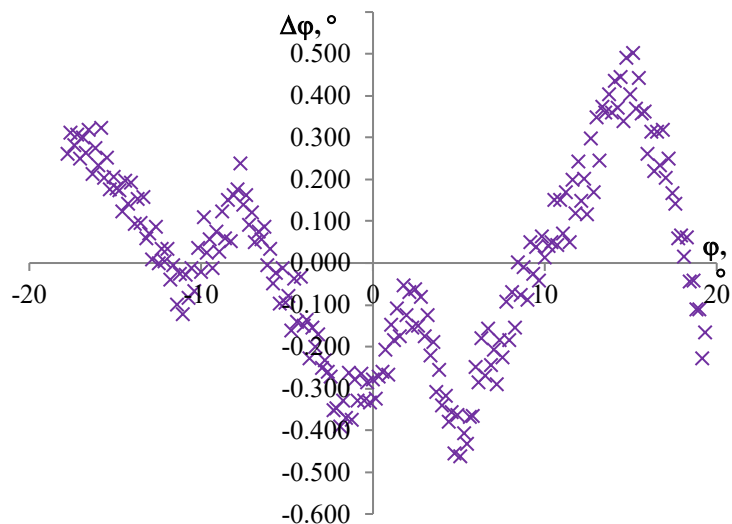


Рис. 11. Різниця між кутом обертання поляризатора і нахилом прямої отриманої апроксимацією пікселів.

Відмінність величини коефіцієнту $a=0,9526$ від одиниці зумовлена тим, що при обертанні не тільки змінюється положення затемнених пікселів, а й форма зображення (рис. 12).

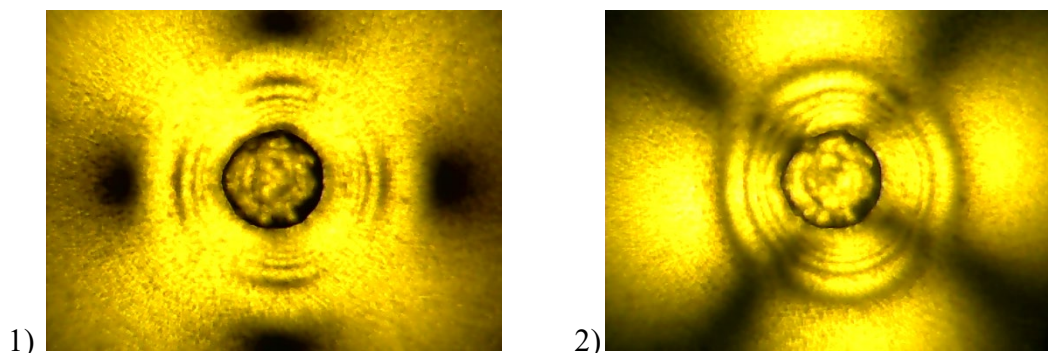


Рис. 12. Зображення, що виникає внаслідок хроматичної поляризації при різних кутах зміщення поляризатора відносно аналізатора
кут обертання 1 – $\approx 0^\circ$; 2 – $\approx 45^\circ$.

Точність вимірювань прототипом комп'ютерного поляриметра достатня для навчального процесу. Так, наприклад, компанія Vernier пропонує навальний комп'ютерний поляриметр із максимально допустимою похибкою вимірювання в 1° за \$559. Для полегшення впровадження цього пристрою для студентів і викладачів розроблено ряд методичних рекомендацій до лабораторних робіт [23, 24].

Комп'ютерний поляриметр розроблений у ХНПУ імені Г.С. Сковороди 2 роки використовується під час лабораторних занять із курсу «Механізми органічних реакцій», у тому числі в онлайн режимі. Апробування показало, що прилад є надійним і достатньо точним.

Реакція інверсії сахарози є бімолекулярною, але в водних розчинах, коли можна знехтувати зміною концентрації води, швидкість її описується рівнянням реакції першого (псевдопершого) порядку:

$$k = \frac{1}{\tau} \cdot \ln \frac{C_0}{C_\tau} \quad (8)$$

де k – константа швидкості реакції, τ – час від початку досліду, C_0 – початкова концентрація сахарози і C_τ – концентрація сахарози в момент часу τ .

Кут обертання сахарози пропорційний концентрації сахарози, тому рівняння для розрахунку константи швидкості k можна записати наступним чином:

$$k = \frac{1}{\tau} \cdot \ln \frac{\alpha_\tau - \alpha_\infty}{\alpha_0 - \alpha_\infty} \quad (9)$$

де α_0 – кут обертання до початку гідролізу; α_∞ – кут обертання при повному гідролізі; α_τ – кут обертання в даний момент часу.

У роботі Ruisi Wang та ін. встановлювалися константи швидкості гідролізу сахарози (0.04 г/мл) в розчинах із різною концентрацією HCl моль/л: 0, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5; 4 – експериментально визначені константи 0.114×10^{-2} , 0.496×10^{-2} , 0.659×10^{-2} , 1.019×10^{-2} , 1.533×10^{-2} та 2.12×10^{-2} хв⁻¹моль⁻¹ відповідно [18]. У публікації Laura Brazuelo та Hong Winkelman зібрано результати вимірювань константи швидкості хімічної реакції інверсії сахарози в 2 М HCl при 20°C 12-ма вченими [25]. Експериментально встановлені значення цієї величини коливаються в межах 0.85×10^{-2} - 2.02×10^{-2} хв⁻¹моль⁻¹.

За допомогою комп'ютерного поляриметра експериментально визначалися константи кислотного гідролізу сахарози при різних температурах, концентраціях кислоти та сахарози. Для цього розчин 4 М HCl та розчин 0,5 М сахарози підігрівали до відповідної температури. Змішували 10 мл розчину хлоридної кислоти із 10 мл розчину сахарози. Вмикали комп'ютерний поляриметр – тому перші точки на графіку рис. 8 показують значення за відсутності кювети. Заливали отриманий розчин у кювету

поляриметра, та помішували її у вимірювальний пристрій. На рис.13 наведено типовий графік зміни кута обертання поляризованого світла з часом при інверсії 0,25 моль/л сахарози у 2 моль/л HCl, інтервал між вимірюваннями 100 с. При $t=25^{\circ}\text{C}$, визначені константи швидкості реакції при $t=25^{\circ}\text{C}$ $k_{25}=4,5 \times 10^{-2} \text{ хв}^{-1} \cdot \text{моль}^{-1}$; при $t=35^{\circ}\text{C}$ $k_{35}=1,1 \times 10^{-1} \text{ хв}^{-1} \cdot \text{моль}^{-1}$.

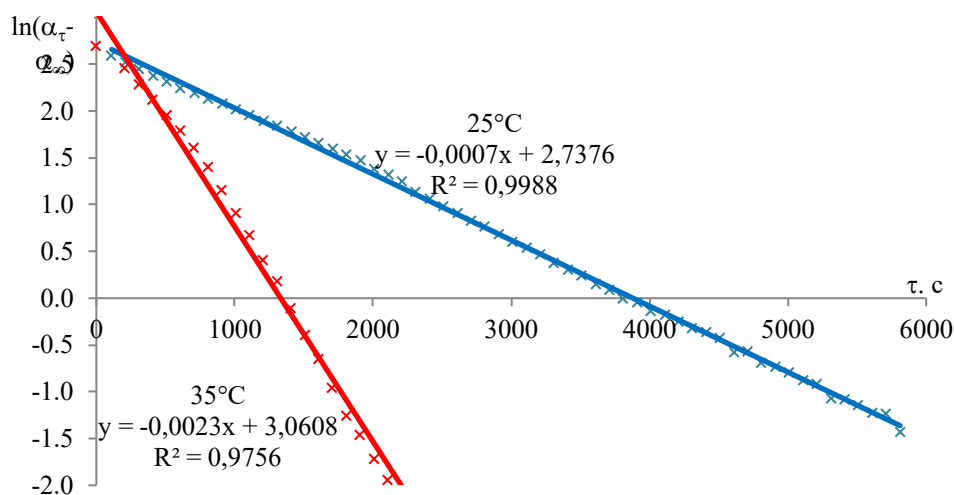


Рис. 13. Визначення константи гідролізу 0,25 М сахарози в 2 М HCl при температурі 25°C : x - експериментальні дані та — лінія тренду при 25°C ; x - експериментальні дані та — лінія тренду при 35°C

Залежності $\tau - \ln(\alpha_{\tau} - \alpha_{\infty})$ гарно апроксимуються лінійним функціями $R^2 > 0,97$.
Із отриманих даних розраховуємо температурний коефіцієнт:

$$\frac{k_{35}}{k_{25}} = \gamma^{\frac{35-25}{10}} \Rightarrow \gamma = 2,4 \quad (10)$$

та енергію активації реакції:

$$k = k_0 e^{-\frac{E_0}{RT}} \Rightarrow E = R \frac{\ln \frac{k_{35}}{k_{25}}}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}} \Rightarrow 68,2 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}} \quad (11)$$

де R – газова постійна.

Для обробки експериментальних даних здобувачі самі обирають найбільш зручне для них програмне забезпечення, найчастіше використовується безкоштовний застосунок із українським інтерфейсом SMATH Studio.

Наочне відображення результатів вимірювання, стабільність роботи пристрою, висока відтворюваність експериментально отриманих даних та легкість переносу даних для подальшої обробки в Excel дозволяє інтенсифікувати навчальний процес.

Шляхи удосконалення комп'ютерного поляриметра: удосконалення оптичної системи; застосування CMOS матриць із малими шумами; удосконалення методики формування внутрішніх напружень у полімерній пластині; заміна полімерної пластини із внутрішніми напруженнями на двозаломлюючий кристал, наприклад, ісландського шпату; удосконалення алгоритму обробки зображення.

Висновки. Запропоновано новий принцип роботи поляриметра, що ґрунтується на комп'ютерній обробці зображення що виникає при пропусканні оптично поляризованого світла послідовно через розчин який вивчається, прозору пластину із внутрішніми напруженнями та аналізатор. Розроблено високошвидкісний комп'ютерний поляриметр на основі CMOS матриці. Пристрій відрізняється від інших тим, що використовує принципово новий спосіб обробки візуальних даних, не містить

жодних механічних компонентів і поляризаційних модуляторів, простий у виготовленні, надійний; дозволяє проводити вимірювання каламутних розчинів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Лінчевський І.В., Пономаренко Л.П., Чурсанова М.В. Модуляційна поляриметрия. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 116 с.
2. Заболотна Н. І., Шолота В. В., Колівошко А. І. Аналіз методів та систем лазерної поляриметрії для відтворення анізотропних параметрів біологічних шарів. Біомедичні оптико-електронні системи та прилади, 2018. С. 60-71.
3. Ровира Р. У., Тужанский С. Е., Савенков С. Н., Павлов С. В., Чунихина Е. И., Коломиец И. С., Климов А. С., Метод и поляриметрическая система локальной дифференциации патологий анизотропных биотканей. Фотобиология та фотомедицина. 2014. №. 3,4, С. 113-119.
4. Hough J., Polarimetry: a powerful diagnostic tool in astronomy. Astronomy & Geographiks. 2006. vol. 47. P. 31-35. <https://doi.org/10.1111/j.1468-4004.2006.47331.x>
5. Stam D. M., Hovenier J. W., Waters L. B. F. M. Using polarimetry to detect and characterize Jupiter-like extrasolar planets. Astronomy & Astrophysics. 2004, vol. 428, P. 663-672. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20041578>
6. Camara C. A. G. d. Construction of a Low-Cost Polarimeter For Educational Purposes. Quimica nova. 2021. vol. 44. №3. P. 361-365. <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170661>
7. Mehta A., Greenbowe T. J. A Shoebox Polarimeter: An Inexpensive Analytical Tool for Teachers and Students. Journal of chemical education. 2011. vol. 88. P. 1194-1197. <https://doi.org/10.1021/ed1011635>
8. Crisp M. G., Kable S. H., Read J. R., Buntine M. A. A disconnect between staff and student perceptions of learning: an ACELL educational analysis of the first year undergraduate chemistry experiment 'investigating sugar using a home made polarimeter'. Chemistry education. Research practice. 2011. vol. 12. P. 469-477. <https://doi.org/10.1039/C0RP90015J>
9. Shavitz R., Easily Constructed Student Polarimeter. Journal of chemical education. 1978. vol. 55. P. 682. <https://doi.org/10.1021/ed055p682>
10. Тумерман Л.А.. СССР Patent № 374972. 1974.
11. Utkin G. I. Compact turbopolarimeter. Lightmetry: Metrology, Spectroscopy, and testing Techniques using light. 2001. P. 153-157. <https://doi.org/10.1117/12.435966>
12. Кудрявцев В. И. СССР Patent № 65654. 1946.
13. Vorobiev D., Ninkov Z. Gartley M. Polarization in a snap: imaging polarimetry with micropolarizer arrays. Polarization: Measurement, Analysis, and remote sensing. Proc. of SPIE. 2014. Vol. 9099, 909904. P. 1-15. <https://doi.org/10.1117/12.2053164>
14. Myhre G., Hsu W.-L., Peinado A., LaCasse C., Brock N., Chipman R. A., Pau S.. Liquid crystal polymer full-stokes division of focal plane polarimeter. Optics express. 2012. vol. 20. P. 27393-27409. <https://doi.org/10.1364/OE.20.027393>
15. Відьмаченко А. П., Іванов Ю. С., Синявський І. І. Розробка поляризатора зображувального поляриметра на основі поляризаційних плівок. Космічна наука і технологія. 2015. Вип. 21. №. 4. С. 19-23.
16. Dereniak E. L. Novel imaging spectrometers and polarimeters. Eleventh international conference on correlation optics. 2013. <https://doi.org/10.1117/12.2049315>
17. Saito N., Odate S., Otaki K., Kubota M., Kitahara R., Oka K. Wide field snapshot imaging polarimeter using modified Savart plates. Proc. of SPIE Vol. 8873. 88730M. 2013. 8 p. <https://doi.org/10.1117/12.2022829>

18. Wang R., Zhou J., Zeng K., Chen S., Ling X., Shu W., Luo H., Wen S. Ultrasensitive and real-time detection of chemical reaction rate based on the photonic spin Hall effect. *APL Photonics* 5. 016105. 2020. vol. 5. Issue 1. 016105. 7p. <https://doi.org/10.1063/1.5131183>
19. Dereniak E. L. From the outside looking in: developing snapshot imaging spectro-polarimeters. Proc. SPIE 9186, Fifty Years of Optical Sciences at The University of Arizona. 2014. <https://doi.org/10.1117/12.2063979>
20. Маслов, М. О. Розробка стенда з дослідження поляризаційних ефектів. 2020. URL: <https://openarchive.nure.ua/items/32ae9a2f-2d3b-4423-9d73-d319737c8ed2> (дата звернення: 25.06.2023 р.)
21. Винник О.Ф., Комісова Т.Є., Кратенко Р.І. Розробка програмно-методичного комплексу SchoolKit. Електронне наукове фахове видання «Відкрите освітнє е-середовище сучасного університету». 2021. №11. С. 32–48. <https://doi.org/10.28925/2414-0325.2021.113>
22. 28BYJ-48 – 5V Stepper Motor. Welten Holdings Ltd. 2023. URL: <https://www.electronicoscaldas.com/datasheet/28BYJ-48.pdf> (дата звернення: 25.06.2023 р.)
23. Vernier, Chemical Polarimeter (Order Code CHEM-POL). Vernier Software & Technology, Beaverton. 2012. URL: <https://www.vernier.com/files/manuals/chem-pol.pdf> (дата звернення: 25.06.2023 р.)
24. Vernier, Polarimeter (Chemical). Vernier, 2023. URL: <https://www.vernier.com/product/polarimeter-chemical> (дата звернення: 25.06.2023 р.)
25. Brazuelo L., Hong W. Kinetics of sucrose inversion at 20°C by polarimetry. 2020. URL: https://www.researchgate.net/publication/343970485_KINETICS_OF_SUCROSE_INVERSION (дата звернення: 25.06.2023 р.)

Матеріал надіслано до редакції 15.08.2023 р.

HIGH-SPEED COMPUTER POLARIMETER BASED ON CMOS MATRIX

Oleksandr Vynnyk

Senior Lecturer

H.S. Skovoroda Kharkiv National Pedagogical University, Kharkiv, Ukraine

vinnik7777777@gmail.com

ORCID: 0000-0001-5130-5056

Tatyana Granovska

Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor

H.S. Skovoroda Kharkiv National Pedagogical University, Kharkiv, Ukraine

tgran@hnpu.edu.ua

ORCID: 0000-0003-2683-839X

Roman Kratenko

candidate of biological sciences, Associate professor

H.S. Skovoroda Kharkiv National Pedagogical University, Kharkiv, Ukraine

romankratenko1@gmail.com

ORCID: 0000-0002-5325-0543

Abstract. Under the conditions of the COVID-19 pandemic and a full-scale war in Ukraine, the lack of computer equipment for conducting online chemical experiments is experienced. In connection with the implementation of the New Ukrainian School and the development of STEM education, there was an urgent need to develop domestic educational computer equipment. The

Department of Physics and Chemistry of H.S. Skovoroda Kharkiv National Pedagogical University is developing the SchoolKit software-methodological complex (PMK), which is based on three universal software tools: ColorKit, ChemKit, SoundCardScientificKit. When creating applications, only free software is used, which ensures low cost and, accordingly, accessibility for a wide range of users. A computer polarimeter was developed based on the ColorKit software. A new principle of polarimeter operation is proposed, which is based on computer processing of the image that occurs when optically polarized light is passed sequentially through an optically active solution, a transparent plate with internal tension, and an analyzer. A high-speed computer polarimeter based on a CMOS matrix was developed, a working model was manufactured and tested. The device differs from others since it uses a fundamentally new way of processing visual data and does not contain any mechanical components and polarization modulators. It is also easy to manufacture, and quite reliable. The polarimeter software allows data to be accumulated in the form of tables and displayed in real-time graphical form. The computer polarimeter was used for two years during laboratory classes in the "Mechanisms of Organic Reactions" subject, including online mode. In particular, it was used to experimentally determine the constants of acid hydrolysis of sucrose at different temperatures, concentrations of acid and sucrose. Visual display of measurement results, stability of device operation and good reproducibility of experimentally obtained data allow intensification and/or optimisation of the education process due to the automation of polarimetric measurements. After some improvements and validation, the device is planned to be used in scientific research.

Keywords: computer polarimeter; CMOS; SchoolKit; ColorKit

REFERENCES (TRANSLATED AND TRANSLITERATED)

1. Linchevsjkyj, I. V., Ponomarenko, L. P., & Chursanova, M. V. (2023). Moduljacija poljarymetrija (yzd. KPI im. Ighorja Sikorsjkogho). Kyjiv.
2. Zabolotna, N. I., Sholota, V. V., & Kolivoshko, A. I. (2018). Analiz metodiv ta system lazernoji poljarymetriji dlja vidtvorennja anizotropnykh parametriv biologhichnykh shariv. *Biomedychni Optyko-Elektronni Systemy Ta Prylady*, 60-71.
3. Rovyra, R. U., Tuzhanskyj, S. E., Savenkov, S. N., Pavlov, S. V., Chunykhyna, E. Y., Kolomyec, Y. S., & Klymov, A. S. (2014). Metod y poljarymetrycheskaja systema lokalnoj dyfferencyacyy patologhyj anyzotropnykh byotkaney. *Fotobiologhija ta fotomedycyna* (3,4), 113-119.
4. Hough, J. (2006, June). Polarimetry: a powerful diagnostic tool in astronomy. *Astronomy & Geophysics*, 47, 31-35. <https://doi.org/10.1111/j.1468-4004.2006.47331.x>
5. Stam, D. M., Hovenier, J. W., & Waters, L. B. (2004, December). Using polarimetry to detect and characterize Jupiter-like extrasolar planets. *Astronomy & Astrophysics*, 428, 663-672. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20041578>
6. Camara, C. A. (2021). Construction of a Low-Cost Polarimeter For Educational Purposes. *Quimica Nova*, 44(3), 361-365. <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170661>
7. Mehta, A., & Greenbowe, T. J. (2011, August). A Shoebox Polarimeter: An Inexpensive Analytical Tool for Teachers and Students. *Journal of Chemical Education*, 88, 1194-1197. <https://doi.org/10.1021/ed1011635>
8. Crisp, M. G., Kable, S. H., Read, J. R., & Buntine, M. A. (2011). A disconnect between staff and student perceptions of learning: an ACELL educational analysis of the first year undergraduate chemistry experiment 'investigating sugar using a home made polarimeter'. *Chemistry education research and practice*, 12, 469-477. <https://doi.org/10.1039/C0RP90015J>
9. Shavitz, R. (1978). Easily Constructed Student Polarimeter. *Journal of chemical education*, 55, 682. <https://doi.org/10.1021/ed055p682>
10. Tumerman L.A. (1974). Patent No. #374972. SSSR.

11. Utkin, G. I. (2001). Compact turbopolarimeter. In M. Pluta (Ed.), *Lightmetry: metrology, spectroscopy, and testing techniques using light*, 4517, pp. 153-157. <https://doi.org/10.1117/12.435966>
12. Kudrjavcev, V. Y. (1946). Patent No. #65654. SSSR.
13. Vorobiev, D., Ninkov, Z., & Gartley, M. (2014). Polarization in a snap: imaging polarimetry with micropolarizer arrays. In D. B. Chenault, & D. H. Goldstein (Ed.), *Polarization: measurement, analysis, and remote sensing xi*, 9099. <https://doi.org/10.1117/12.2053164>
14. Myhre, G., Hsu, W.-L., Peinado, A., LaCasse, C., Brock, N., Chipman, R. A., & Pau, S. (2012, December). Liquid crystal polymer full-stokes division of focal plane polarimeter. *Optics express*, 20, 27393-27409. <https://doi.org/10.1364/OE.20.027393>
15. Vidjmachenko, A. P., Ivanov, Ju. S., & Synjavsikyj, I. I. (2015). Rozrobka poljaryzatora zobrazhuvaljnogho poljarymetra na osnovi poljaryzacijnykh plivok. *Kosmichna nauka i tekhnologhija*, 21(4), 19-23.
16. Dereniak, E. L. (2013). Novel imaging spectrometers and polarimeters. In O. V. Angelsky (Ed.), *Eleventh international conference on correlation optics*, 9066. <https://doi.org/10.1117/12.2049315>
17. Saito, N., Odate, S., Otaki, K., Kubota, M., Kitahara, R., & Oka, K. (2013). Proceedings of spie. Wide field snapshot imaging polarimeter using modified Savart plates, 8873. San Diego. <https://doi.org/10.1117/12.2022829>
18. Wang, R., Zhou, J., Zeng, K., Chen, S., Ling, X., Shu, W., . Wen, S. (2020, January). Ultrasensitive and real-time detection of chemical reaction rate based on the photonic spin Hall effect. *Apl photonics*, 5, 016105, 7p. <https://doi.org/10.1063/1.5131183>
19. Dereniak, E. L. (2014). Proceedings of spie. From the outside looking in: Developing snapshot imaging spectro-polarimeters, 9186. San Diego. <https://doi.org/10.1117/12.2063979>
20. Rozrobka stenda z doslidzhennja poljaryzacijnykh effektiv (2020). (M. O. Maslov, Trans.) <https://openarchive.nure.ua/items/32ae9a2f-2d3b-4423-9d73-d319737c8ed2>
21. Vinnik, A., Komisova, T., & Kratenko, R. (2021). Development of schoolkit software. *Electronic Scientific Professional Journal "Open Educational E-Environment of Modern University"*, (11), 32–48. <https://doi.org/10.28925/2414-0325.2021.113>
22. Kiatronics (2012). 28BYJ-48 – 5V Stepper Motor. Cherrywood Tauranga New Zealand: Welten Holdings Ltd - Specifications subject to change without further notice. From <https://www.vernier.com/files/manuals/chem-pol.pdf>
23. Vernier. (Beaverton). *Chemical Polarimeter (Order Code CHEM-POL)* (2012). Vernier Software & Technology. <https://www.vernier.com/files/manuals/chem-pol.pdf>
24. Vernier. (2023). *Polarimeter (Chemical)*. (Vernier). <https://www.vernier.com/product/polarimeter-chemical>
25. Brazuelo, L., & Hong, W. (2020). Kinetics of sucrose inversion at 20°C by polarimetry. https://www.researchgate.net/profile/Laura-Brazuelo/publication/343970485_KINETICS_OF_SUCROSE_INVERSION/links/6115993f1ca20f6f861b574b/KINETICS-OF-SUCROSE-INVERSION.