

Трикур Іван Іванович

кандидат фізико-математичних наук, доцент, кафедра твердотільної електроніки та інформаційної безпеки
Ужгородський національний університет, Ужгород, Україна

ORCID: 0000-0002-6095-2500

E-mail: ivan.trikur@uzhnu.edu.ua

Січка Михайло Юрійович

кандидат фізико-математичних наук, доцент, кафедра твердотільної електроніки та інформаційної безпеки
Ужгородський національний університет, Ужгород, Україна

ORCID: 0000-0001-5305-6065

E-mail: mykhaiko.sichka@uzhnu.edu.ua

Різак Михайло Васильович

доктор юридичних наук, старший дослідник, професор кафедри технічних систем кіберзахисту
Навчально-науковий інститут кібербезпеки та захисту інформації

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна

ORCID: 0009-0003-9844-3271

E-mail: advokat.rizak@gmail.com

Боценюк Любомир Русланович

аспірант кафедри твердотільної електроніки та інформаційної безпеки
Ужгородський національний університет, Ужгород, Україна

ORCID: 0000-0001-5339-9762

E-mail: liubomyr.botseniuk@uzhnu.edu.ua

Різак Василь Михайлович

доктор фізико-математичних наук, професор, кафедра твердотільної електроніки та інформаційної безпеки
Ужгородський національний університет, Ужгород, Україна

ORCID: 0000-0002-9177-0662

E-mail: vrizak@uzhnu.edu.ua

БАКТЕРІОРОДОПСИН ТА ХІМІЧНО МОДИФІКОВАНІ ПЛІВКОВІ СТРУКТУРИ НА ЙОГО ОСНОВІ ЯК КОМПОНЕНТ СИСТЕМ ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ

Дана робота пропонує огляд можливостей використання бактеріородопсину у сучасних системах захисту інформації. Основні напрямки використання передбачають способи захисту та маркування друкованих документів, використання в системах автентифікації носіїв і персоналу, оптичний запис та зберігання цифрової інформації з додатковими опціями захисту. Матеріали на основі бактеріородопсину дозволяють створювати швидкодіючі кріогенні запам'ятовуючі пристроїв високої ємності, вся інформація з яких безповоротно стирається при нагріванні носія до кімнатних температур, коли зберігання секретних даних вимагає їх лабільності для запобігання несанкціонованому доступу. Використання плівок бактеріородопсину для поляризаційного запису інформації, крім високої ємності носія, ускладнює несанкціоноване копіювання, дозволяє використовувати надійне шифрування під час запису та легко реалізовувати мультиплексування кількох наборів даних на одному носії. Властивості бактеріородопсину дозволяють проводити прямий лазерний запис індивідуалізованих комп'ютерно-генерованих голограм без використання шаблонів, що полегшує його використання разом з іншими засобами захисту. Фотохромність бактеріородопсину дозволяє отримувати чорнила які змінюють колір при освітленні а модифікація амінокислотної послідовності може бути використана як прихований генетичний маркер для відстеження та автентифікації партій документів. Різні методи захисту можуть бути інтегровані на одному носії, приклади чого теж описані в роботі. В даній роботі продемонстровано значний потенціал нативного бактеріородопсину в системах інформаційної безпеки, наведено аналіз світових літературних даних в даному напрямку, підсумовано результати багаторічних досліджень авторів та окреслено поточні проблеми та варіанти їх вирішення в майбутньому.

Ключові слова: бактеріородопсин, фотоцикл, плівкові структури, фотохромність, поляризаційний запис, інформаційна безпека, захист інформації.

Вступ

Актуальність проблематики вдосконалення систем інформаційної безпеки важко переоцінити. Невід'ємною складовою розвитку таких систем є розробка, створення та

вдосконалення їх матеріальної бази. В останні роки все частіше для цього використовують матеріали біологічного походження, певні властивості яких вже були оптимізовані мільйонами років еволюції. Одним з таких матеріалів є фотохромний трансмембранний білок бактеріородопсин (БР). Даний матеріал можна назвати піонером і найбільш яскравим представником даного напрямку у сучасному матеріалознавстві. Відкритий в 70-х роках минулого століття, він викликав неабиякий інтерес серед науковців. Можливості прикладного використання даного матеріалу охоплюють широкий спектр проблем від медицини до обробки даних і альтернативної енергетики: оптичний запис з надвисокими густинами [1], комутація оптичних сигналів [2], волоконно-оптичні хімічні сенсори [3], оцінка деформації на рівні декількох нанометрів [4], захист інформації [5], альтернативна енергетика [6]. На даний час зареєстровано більше сотні патентів на матеріали та прилади які використовують незвичайні властивості даного матеріалу. Також слід відмітити що даний матеріал може бути отриманий у практично необмежених кількостях за допомогою екологічно чистих методів.

Бактеріородопсин синтезується галофільними бактеріями. Він вбудований у клітинну мембрану *Halobacterium salinarum* [7], де виконує функцію фотоіндукованого трансмембранного переносу іонів водню, енергія градієнту яких в подальшому використовується для забезпечення енергетичних потреб мікроорганізму.

Цілі ділянки цитоплазматичної мембрани містять виключно бактеріородопсин і ліпіди. Під час лізису клітини ці частини мембрани зберігають структурну цілісність та функціональні властивості і можуть бути виділені як окрема фракція [7]. Завдяки кольору їх називають пурпурними мембранами (ПМ). Зазвичай вони мають неправильну форму і діаметр від десятків до кількох сотень нанометрів при товщині 5 нанометрів [1] (рис. 1).

Саме структурна організація молекул бактеріородопсину у ПМ дозволяє білку зберігати свої властивості при нагріванні до 140 °С [8], що позитивно впливає на технологічність матеріалів на його основі. Це пояснюється тим, що у ПМ тримери молекул БР знаходяться у вузлах двовимірної кристалічної решітки з гексагональною симетрією. Крім того основна частина білкової молекули занурена у ліпідну мембрану, тому ПМ демонструють високу стійкість до різного роду рестриктаз та хімічної денатурації [9, 10].

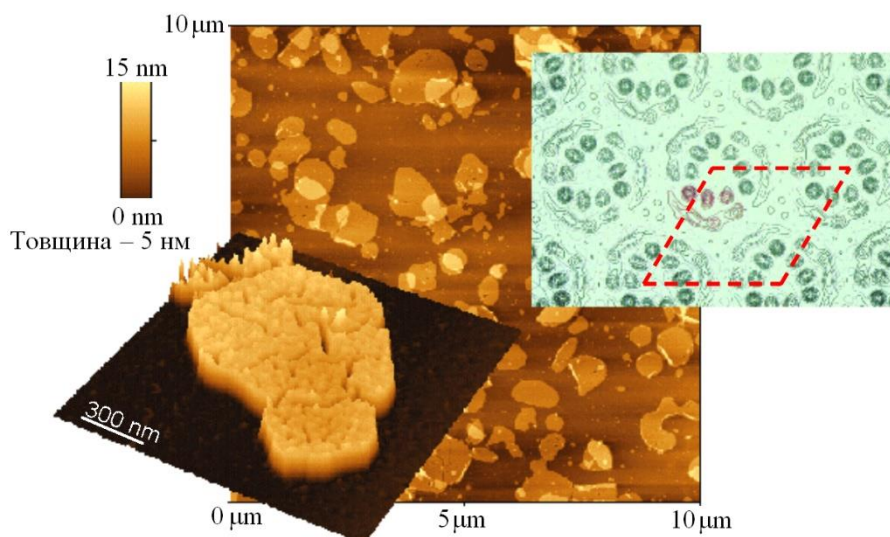


Рис. 1. Вигляд, розміри та структура пурпурної мембрани [11]

Для прикладного використання, в тому числі для обробки та захисту інформації, найбільш цікавими є нелінійні оптичні властивості БР. Поглинання кванту світла приводить до ізомеризації ретиналю, що, в свою чергу, запускає послідовність структурних перебудов у молекулі БР в результаті яких поглинута енергія витрачається на трансмембранний перенос протону, а молекула повертається у вихідний стан. Описаний циклічний процес називають

фотоциклом бактеріородопсину, у природніх умовах його тривалість складає близько 10 мс. Для фотоциклу характерна висока ефективність і практично необмежена кількість повторень. Проміжні стани, через які проходить молекула під час фотоциклу, характеризуються різними часами життя та максимумами поглинання і називаються інтермедіатами. Фотоцикл бактеріородопсину досліджувався багатьма науковими групами, наприклад, [12]. Схематичне зображення фотоциклу, який має місце у природніх умовах, показано на рис. 2, а Латинськими літерами тут вказані назви проміжних станів, а індексами – відповідні їм максимуми поглинання. Фотоіндукованим є перший перехід всі інші переходи є термічними і не потребують зовнішнього освітлення. Кожен інтермедіат має певний час життя і може бути стабілізований пониженням температури - відповідні дані теж наведено на рисунку. Переходи між окремими інтермедіатами теж можуть бути ініційовані опроміненням матеріалу світлом відповідних довжин хвиль.

За певних умов фотоцикл, може проходити відмінним від природнього шляху способом (рис. 2, б). Наприклад для довготривалого оптичного запису інформації перспективними є так званий розгалужений фотоцикл, у якому, за рахунок додаткового оптичного збудження інтермедіату O_{640} , досягається 9-цис ізомеризація ретиналю. В цьому випадку молекула не може термічно перейти у основний стан [13].

При використанні потужного лазерного випромінювання може відбуватися і поглинання одразу двох фотонів. Пряме двофотонне поглинання переводить молекули БР у стани, які не є фотохімічно активними і не повертаються у вихідний стан термічним шляхом. Утворюються термостабільні стани, максимуму поглинання яких зсувається від початкового пурпурного кольору до світло-блакитного. Крім того в результаті даного процесу виникає постійна локальна зміна поляризаційних властивостей БР. Даний ефект можна використати для довготривалого запису інформації, з можливістю шифрування [14, 15].

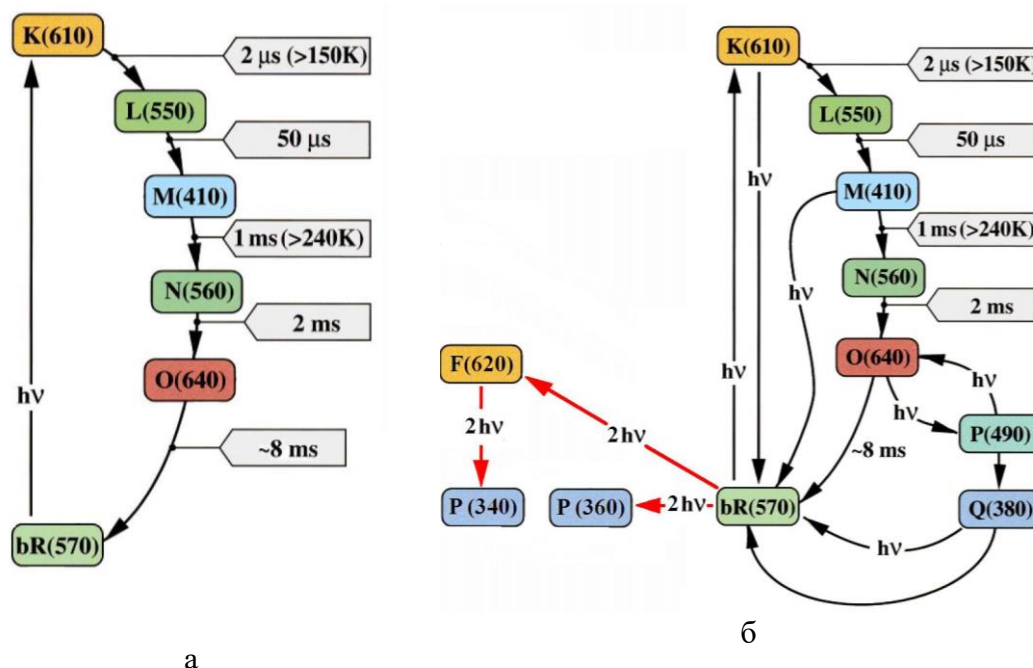


Рис. 2. Фотоцикл бактеріородопсину. а – класичний фотоцикл; б – розгалужена модель з фотоіндукованою 9-цис ізомеризацією ретиналю, що містить Р- і Q-стани та зміни, які відбуваються при двофотонному поглинанні [16, 17]

Матеріали на основі БР володіють високою роздільною здатністю та світлочутливістю, мають практично необмежену апертуру та реверсивність, значний фотохромний зсув та відсоток зміни кольору, великий термін експлуатації. Все це дозволяє успішно конкурувати з

сучасним матеріалам що використовуються для оптичної обробки інформації, відновлюваної енергетики та біосенсорики.

Аналіз останніх досліджень та постановка проблеми

Найбільш перспективним напрямком використання БР є розробка матеріалів для оптичної обробки та зберігання даних, однак активно тривають дослідження, спрямовані на використання БР в біосенсориці [18], біомолекулярній електроніці [19], альтернативній енергетиці [6, 20]. В останньому випадку молекули БР виконують роль барвника, замість високотоксичних сполук на основі рутенію, розширюючи спектральний діапазон поглинутого оптичного випромінювання і підвищуючи ефективність сонячних батарей. У роботі [21] описані мініатюрні біосенсори розроблені на основі бактеріородопсину. Поряд з роботами які присвячені детальному опису окремих процесів фотоциклу [14], способів його модифікації в заданому напрямку [22] чи методам оптимізації процесу отримання самого матеріалу [19, 23] є багато оглядових робіт що стосуються аспектів прикладного застосування матеріалів на основі бактеріородопсину [1, 6, 24, 25].

У роботі [1] детально проаналізовано властивості бактеріородопсину у контексті запису і зберігання інформації. Детально описані методи 2-D, 3-D та голографічного запису, розглянуто можливість побудови і принципи роботи асоціативної пам'яті з використанням плівок бактеріородопсину. Наведені дані по густині запису, апертурі, фоточутливості матеріалу, потужностях та спектральних характеристиках випромінювання, яке необхідно використовувати для запису та зчитування інформації. Аналогічно описано можливості використання для обробки інформації: нелінійна фільтрація, просторово-світлові модулятори, фазова кон'югація, розпізнавання образів, голографічна інтерферометрія. Описані принципи роботи та параметри вже створених прототипів та діючих установок.

Робота [6] присвячена аналізу останні досягнень в галузі використання БР в альтернативній енергетиці. Оскільки БР має високу стабільність та характеристики вивільнення протонів, він є привабливим кандидатом для використання у виробництві водню шляхом розщеплення води. Виробництво та зберігання сонячного водню за допомогою фотоелектродів на основі БР може відігравати важливу роль у сталому розвитку економіки, що базується на відновлюваній енергії. В роботі підсумовано останні досягнення в галузі гібридних електродів на основі БР для сонячних елементів, пристроїв для розщеплення води та паливних елементів.

В роботі [24] проведено огляд біоелектронних пристроїв на основі бактеріородопсину. У цьому огляді коротко представлені властивості бактеріородопсину та методи отримання плівкових структур на його основі. Далі описано принцип роботи та будова різних пристроїв на основі БР. За принципом роботи автори розділяють їх на фотохімічні та фотоелектричні. Проведений аналіз дозволяє авторам зробити висновки, які надихають на новий дизайн високопродуктивних біогібридних електронних пристроїв на основі БР.

Різні аспекти використання фундаментальних властивостей бактеріородопсину для запису, обробки та зберігання оптичної інформації описані в роботі [25]. Представлено огляд досліджень світлочутливих систем на основі бактеріородопсину. Коротко викладено сучасні уявлення про бактеріородопсин та його молекулярні властивості, фотоцикл та можливість його модифікації. Особлива увага приділяється різним сферам можливого застосування світлочутливих плівок на основі бактеріородопсину та його похідних. Також розглянуто можливості використання полімерних плівок на основі БР не лише як фотохромного матеріалу для багаторазового запису, але й як матеріалу для одноразового запису та постійної пам'яті.

Водночас, відсутні роботи, в яких узагальнено і проаналізовано всі можливі аспекти та приклади застосування бактеріородопсину та хімічно модифікованих плівкових структур на його основі для надзвичайно актуального напрямку сьогодення – інформаційної безпеки. Вирішенню цієї цікавої та актуальної задачі і присвячена дана робота. Зважаючи на обсяг

поставленого завдання, дане дослідження розділене на дві логічні частини. Метою цієї першої частини статті є комплексний аналіз функціонального потенціалу та оптичних властивостей саме нативного бактеріородопсину для застосування в технологіях автентифікації та захисту даних, класифікація методів захисту та виявлення їхніх технологічних обмежень. Натомість технологічні аспекти та можливості покращення цих властивостей шляхом хімічної модифікації плівок БР будуть детально висвітлені у другій частині дослідження (у наступному випуску журналу).

Мета і задачі дослідження

Метою даної роботи є аналіз та узагальнення результатів досліджень можливостей використання плівок нативного бактеріородопсину в системах захисту інформації. Для досягнення поставленої мети необхідно провести аналіз літературних даних, що стосуються використання матеріалів на основі БР для захисту даних та автентифікації носіїв, визначити які властивості плівок найбільш важливі для даного напрямку, виявити наявні проблеми і розглянути можливості їх вирішення.

Основна частина

Функціональний потенціал нативного бактеріородопсину в технологіях захисту інформації та автентифікації даних

У роботах [5, 11, 16, 26-29] описано ряд цікавих досліджень, які ілюструють можливість використання БР у системах безпеки та захисту інформації. Розглянемо на основі яких властивостей матеріалу базуються перспективи його використання у системах інформаційної безпеки.

Технології обробки та захисту конфіденційної інформації на основі БР

Для всіх варіантів практичного використання є два основні питання: по-перше, наскільки критичною є структурованість самого матеріалу і по-друге, яким чином буде відбуватися взаємодія між матеріалом та іншими складовими системи. Технічний рівень складності для обох критеріїв є найнижчим для фотохромного використання. З цих міркувань більшість варіантів практичного використання БР базується на використанні його фотохромних властивостей для зберігання та обробки інформації. Деякі з них можуть бути поєднані із додатковим захисту інформації яка зберігається.

Лабільні криогенні носії

Як вже згадано вище, при поглинанні кванту у молекулі БР запускається циклічна послідовність структурних перебудов які впливають на її оптичні властивості (рис. 2). При охолодженні матеріалу, оскільки всі переходи окрім БР→К є термічними, час життя інтермедиату може бути суттєво збільшений. Одним з таких проміжних станів є інтермедиат К₆₁₀, який стабільний при температурах нижче 150 К.

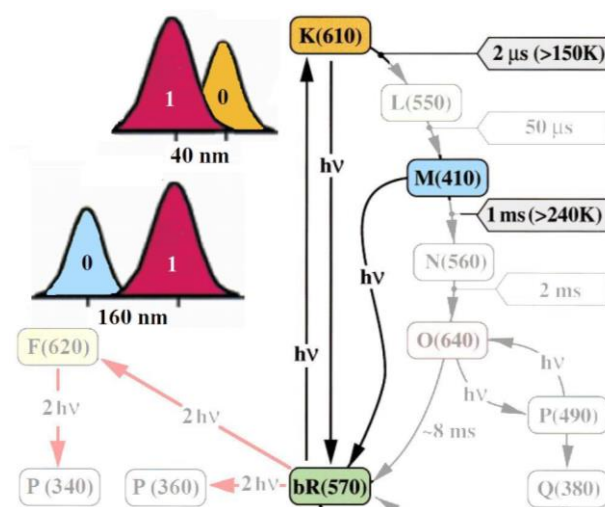


Рис. 3. Використання інтермедиатів К і М для криогенних систем запису інформації з лабільним доступом [16]

Переходи між BP_{570} і K_{610} можуть ініціюватися при опроміненні молекули світлом відповідної довжини, що дозволяє створити бінарну фотохімічну систему на основі даних двох станів (рис. 3) [16].

Висока квантова ефективність ($BP \rightarrow K=65\%$, $K \rightarrow BP=80\%$) та малі часи фотопереходів відкривають можливість створення кріогенних запам'ятовуючих пристроїв, які володіють високою швидкістю та ефективністю. Аналогічну систему можна реалізувати на основі переходу $BP_{570} \leftrightarrow M_{412}$. Для даної фотореакції характерний більший спектральний зсув між станами і також високі квантові ефективності ($BP \rightarrow M=65\%$, $M \rightarrow BP=65\%$). При температурах вище 240 К інтермедіат M_{412} термічно нестабільний і молекула переходить в основний стан протягом кількох мілісекунд. Носії на інтермедіатах K_{610} та M_{412} можуть знайти застосування коли зберігання секретних даних вимагає їх лабільності для запобігання несанкціонованому доступу. Остання можливість пов'язана з тим фактом, що всі дані, які зберігаються в інтермедіатах К або М, будуть безповоротно втрачені при нагріванні носія вище ніж 150 та 240 К відповідно.

Поляризаційний двофотонний захист

Інший спосіб використання БР для зберігання та захисту інформації пов'язаний з високим перерізом двофотонного поглинання, притаманним даному матеріалу. Ще раніше повідомлялося про можливість 3D запису на об'ємних зразках БР за рахунок даного ефекту [1].

Також було виявлено, що при освітленні БР потужними лазерними імпульсами спостерігається термостабільний оптичний зсув до світло-блакитного кольору. Ця фотоіндукована зміна вперше спостерігалася для суспензій [30]. Аналогічні зміни при високоінтенсивному освітленні виникають і в плівках БР [11]. У даному випадку відбувається пряме двофотонне поглинання в стані В, яке приводить до утворення одного або кількох фотопродуктів, які не є фотохімічно активними і не повертаються у вихідний стан термічним шляхом (рис. 2, б). Крім того дія потужного лазерного імпульсу викликає постійну локальну зміну поляризаційно-залежних властивостей частини молекул БР, які орієнтовані відповідним чином до лазерного променя. Оскільки молекули вбудовані в ПМ, а самі пурпурні мембрани зафіксовані всередині полімерної матриці, в плівці індукується статичне просторово-модульоване подвійне променезаломлення [5, 26]. Останнє дає можливість здійснювати запис «0» і «1» у вигляді різних орієнтації поляризаційних властивостей молекул БР (рис. 4.).

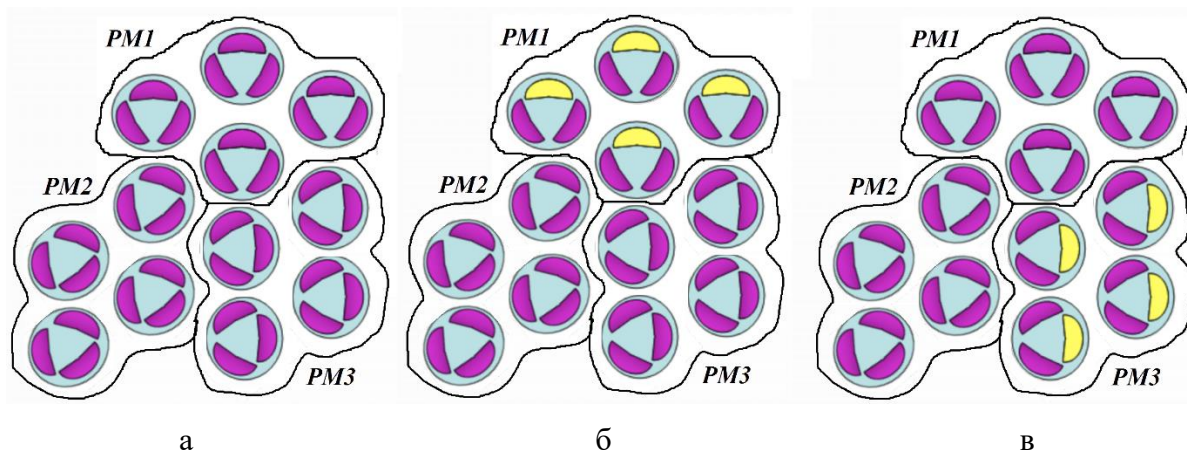


Рис. 4. а) схематичне зображення розміщення тримерів БР у ПМ. б) двофотонне поглинання лінійно поляризованого світла з кутом 0° індує постійну оптичну анізотропію у частини молекул - "0". в - двофотонне поглинання з кутом 90° - "1" [17]

Доволі жорстка фіксація окремих молекул в плівкових структурах запобігає деградації фотоіндукованої анізотропії. На відміну від багатьох інших матеріалів, які використовуються для запису по принципу CD-R, БР має не два, а мінімум три стани запису середовища. Цифрові «1» і цифровий «0» записуються як різні стани поляризації певної області плівки. Місце, де

інформація не записана, легко ідентифікується і не може бути переплутано ні з «0» ні з «1». Це значно спрощує багаторазове зчитування і запис даних. Не потрібне форматування, а механічні допуски, необхідні для терміналів, менші, ніж в системах, які використовують тільки два стани [29].

У роботі [28] описано успішний запис і зчитування інформації за описаною методикою з використанням середовища на основі БР. Об'єм записаної таким чином інформації лімітується можливостями систем запису/зчитування, а не матеріалом [29]. Також слід відмітити, що запис інформації, як різниці поляризаційних властивостей, а не різниці оптичної густини, суттєво утруднює її несанкціоноване зчитування та копіювання.

Апаратне шифрування та мультимплексування

Крім інших переваг, поляризаційний спосіб запису дозволяє здійснювати одночасно і запис, і шифрування даних (табл. 1) [5, 26]. Для цього один набір даних перезаписують іншим, який виконує роль ключа. Сумарна анізотропія в кожній точці буде залежати від результату накладання обох наборів даних. У випадках, коли біт даних і криптобіт ідентичні, наприклад, обидва рівні «0» або «1», результуючий біт даних буде зчитаний також як «0» або «1». У випадках, коли інформаційний біт і криптобіт відрізняються, фотоіндукована анізотропія в позиції біта стирається. Неможливо визначити, який з бітів, інформаційний чи криптобіт, був записаний першим. Накладення двох незалежних потоків даних приводить до появи статистичних позицій з різними бітами, в яких анізотропія буде стиратися, і відновити біт даних, не знаючи ключа, буде неможливо.

Таблиця 1

Приклад апаратного оптичного шифрування даних у плівках БР [5]

Інформаційний потік даних	2	9	0	6	7	3
	0010	1001	0000	0110	0111	0011
Кодуючий потік даних	1	3	0	2	0	2
	0001	0011	0000	0010	0000	0010
Закодована інформація	00??	?0?1	0000	0?10	0???	001?

Оскільки потік даних шифрування може бути такої ж довжини, як сам потік даних контенту, створюється велика кількість таких позицій. Припускаючи, що в кожному 4-бітному, тобто в кожному шістнадцятковому числі, є один «стертий» біт, набір даних довжиною 1 кБ, що відповідає 2048 шістнадцятковим значенням, матиме 2^{2048} можливих кодів представлення. Відповідно, без доступу до ключа, декодування, таким чином зашифрованої інформації, надзвичайно важка задача. До великих наборів даних можуть застосовуватися кілька різних кодів шифрування для різних областей [5, 26].

Запис даних може проводитися під різними кутами поляризації. Це дозволяє реалізовувати мультимплексування даних на одній плівці. Як мінімум два незалежних набори даних було записано на одній плівці у роботі [27].

У роботі [26] даний прийом було використано для запису графічного зображення і тексту. Їх можна розділити шляхом зчитування в поляризованому світлі різної орієнтації. Крім того, обидва набори даних можна захистити шифруванням. На додаток до своїх властивостей зсуву фази, БР-плівка, яка містить дані записані за допомогою лінійно поляризованого лазерного променя, нагадує лінійний поляризатор. Це дозволяє безпосередньо зчитувати дані поляризації за допомогою тільки одного поляризатора.

У роботі [27] продемонстровано, що дисплей звичайного мобільного телефону може використовуватися як джерело лінійно поляризованого світла для відновлення даних поляризації з плівки БР.

Ця властивість дуже важлива для додатків безпеки, оскільки, в разі потреби, поляризаційні особливості можна візуально перевірити без спеціальної оптики (рис. 5).

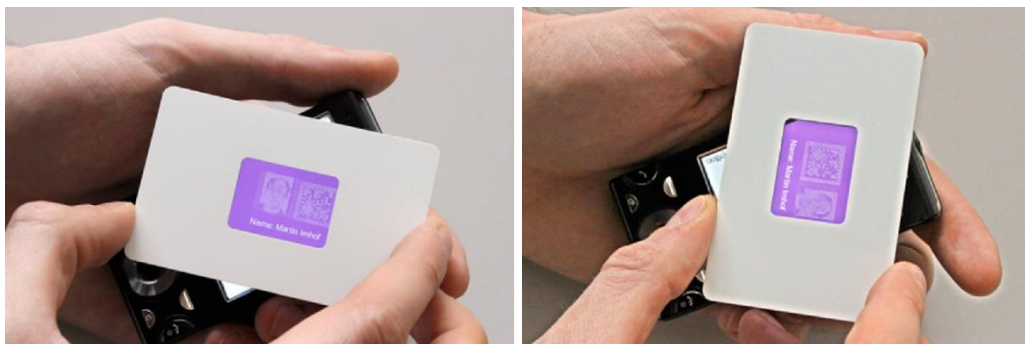


Рис. 5. Зчитування поляризаційно записаних даних з плівки БР з використанням дисплея звичайного мобільного телефону як джерела поляризованого світла [27]

Біомолекулярні методи автентифікації та верифікації носіїв

Окрема задача – захист друкованих матеріалів та захисне маркування продукції. Властивості бактеріородопсину дозволяють ефективно виконувати і такі завдання.

Індивідуалізовані комп'ютерно-генеровані голограми

У даному випадку прямий лазерний запис дозволяє виготовити комп'ютерно-генеровані голограми без використання будь-яких шаблонів [26]. Це суттєво спрощує процес і полегшує його використання разом з іншими засобами захисту. Запис будь-якої інформації про зображення у вигляді комп'ютерно-генерованої голограми паралельно з поляризаційно-записаною інформацією на одній і тій же ділянці плівки БР, легко реалізувати, але важко виявити і скопіювати.

Фотохромні чорнила

Фотохромні чорнила дозволяють ефективно захистити документ від копіювання чи фотографування або по зміні кольору верифікувати маркування продукції. Значний фотохромний зсув максимуму поглинання, висока світлочутливість та виняткова реверсивність роблять БР ідеальним матеріалом для випуску такого роду чорнил. Приклад застосування фотохромних чорнил на основі БР для захисту від копіювання описаний у [28]. Інтенсивне освітлення під час копіювання приводить до зміни кольору таких чорнил і, при використанні їх разом зі звичайними чорнилами, легко виявляється зміна кольору і контрастності на фотокопіях. Крім захисту від копіювання, такі фотохромні області, наприклад на картах доступу чи перепустках, можуть використовуватися для зв'язку з користувачем. Терміналом аутентифікації в таке поле документу, за рахунок різної інтенсивності освітлення окремих ділянок, може бути записане певне повідомлення. Через кілька хвилин інформація зникне і, навіть у випадку втрати документу, не буде доступною для інших. Також його можна використовувати для перевірки справжності картки, оскільки воно реверсивно змінює колір при освітленні.

Тиксотропні та реологічні властивості фотохромних водних чорнил на основі БР практично не відрізняються від характеристик комерційних чорнил, що використовуються для трафаретного друку. Через хороше змочування пігменту, БР не вимагає спеціальних методів диспергування при виробництві чорнила [28]. У природньому стані освітлення приводить до зміни кольору з пурпурного (В-стан) на блідо-жовтий (М-стан). Для практичного використання цікаво мати інші кольори, щоб їх можна було добре інтегрувати в макет будь-якого документа. Широкий спектр фотохромних кольорів на основі БР може бути отриманий шляхом хімічної модифікації БР [11]. В даному випадку запропоновано зв'язати молекули барвника з низькою молекулярною масою в стехіометричному співвідношенні з молекулами БР. Різні молекули барвника можуть бути приєднані до певної аміногрупи БР через один і той же лінкер, що, в результаті, дає повний спектр кольорових відтінків при збереженні фотохромності матеріалу [11]. Отримання і використання таких чорнил полегшується тим фактом, що ПМ стійкі до багатьох розчинників та їх сумішей [29].

Нанесення чорнил на основі БР можливе за допомогою різних технологій друку. Високов'язкі чорнила для трафаретного і тампонного друку описано у роботі [28]. Фотохромна фарба з використанням БР має водну основу, сушиться на повітрі й утворює однорідну плівку. Її можна використовувати для друку на різних видах паперу чи пластику, фользі, склі, тощо. Для друку на неклеючих матеріалах, таких як поліетилен або скло, необхідно додати посередник, що призводить до незначного погіршення чіткості. Для струменевого друку, який широко використовується у практиці, потрібні чорнила з низькою в'язкістю. На основі БР можна отримати чорнила, які можна наносити навіть на настільному друкарському обладнанні. Водночас слід відмітити що, через значне збільшення в'язкості при додаванні ПМ, використанням таких чорнил можливе тільки з низьким вмістом (до 5%) пігменту [29]. Так у роботі [26] описана установка для п'єзоструменевого друку, яка може ефективно використовуватися для дому, офісу, а також для промислового друку та маркування. В даному випадку використовували чорнила, створені на основі води та гліцерину, і пігментовані 5% ПМ. Фотохромні фарби з низькими концентраціями пігменту можуть використовуватися для маркування зі зміною кольору, яка не спостерігається візуально, але легко виявляється відповідним обладнанням.

Модифікація амінокислотної послідовності

Зміну кольору чорнила на основі БР можна перевірити візуально, але на основі даного матеріалу можна реалізувати додаткові функції для безпеки, які дуже складно виявити і підробити. БР складається з 248 амінокислот. Модифікація амінокислотної послідовності є стандартною процедурою і може бути використана для певних амінокислот БР без впливу на його фотохромні властивості. Водночас наявність модифікації може бути виявлена і може слугувати маркером для позначення різних партій документів. Наприклад, в петлях, що з'єднують 7 трансмембранних α -спіральних амінокислотних сегменти, заміна п'яти амінокислот на п'ять інших дозволяють кодувати 3125 різних варіантів молекули БР. Проаналізувати матеріал що містить таким чином модифіковані молекули можна тільки за допомогою високотехнологічного лабораторного обладнання [28]. Можливість успішної реалізації такого маркування різних партій ID-карток на основі БР показано у роботі [26].

Синергетична інтеграція

Всі перераховані вище можливості захисту різними способами записаної чи нанесеної інформації можуть використовуватися окремо або можуть бути поєднані в одному пристрої [29]. На рис. 6 показано тестовий зразок ID-карти другого покоління (розмір ID1), яка має як видимі, так і невидимі захисні елементи реалізовані на основі БР.

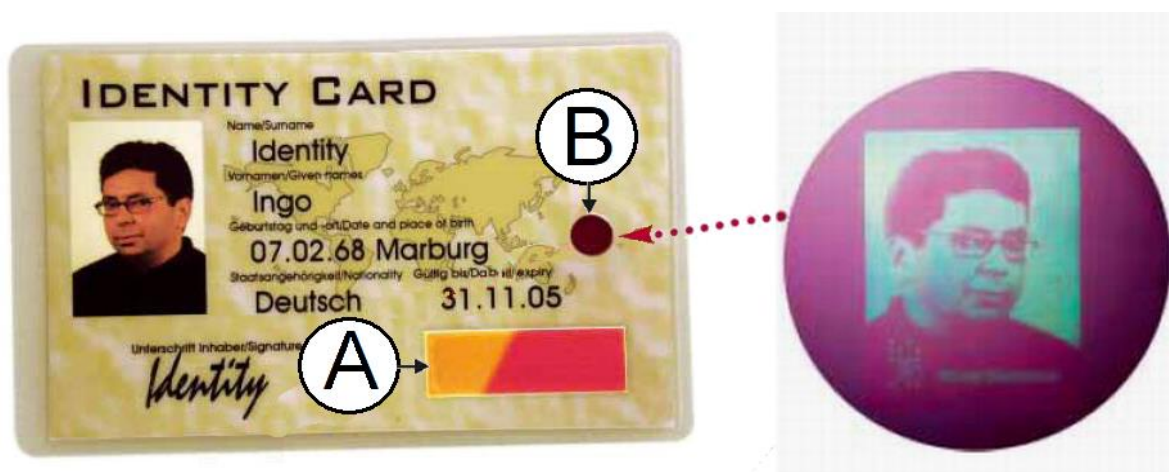


Рис. 6. ID-карта з елементами захисту на основі БР [29]

Під ідентифікаційними даними і зображеннями вся карта покрита тонким шаром БР, який не видно неозброєним оком, але який може бути легко виявлений терміналом. Ця функція

може бути використана в терміналах для перевірки справжності самої картки. Поле, позначене літерою «А», також зроблено з БР за допомогою тамподруку чи трафаретного друку, має інтенсивний колір і служить фотохромним «комунікаційним полем». Зміна кольору може слугувати для візуальної перевірки справжності або може використовуватися терміналом для відображення певної конфіденційної інформації для користувача. Область «В» – місце де може бути записана інформація – фото власника, його дані в цифровому видимому форматі, тощо.

Наведені вище факти переконливо підтверджують факт можливості ефективного використання матеріалів на основі БР у системах контролю доступу та захисту інформації.

Висновки і рекомендації

У роботі зібрано та проаналізовано результати досліджень пов'язаних з можливостями використання бактеріородопсину для захисту інформації. Отримані дані свідчать, що властивості даного матеріалу можуть ефективно використовуватися у сфері інформаційної безпеки. Напрямки практичного застосування можна розділити на дві групи: захист цифрової інформації на носіях на основі БР та біомолекулярні методи автентифікації та верифікації носіїв.

Перша група охоплює швидкодіючі високоємнісні кріогенні носії інформації з функцією безповоротного стирання даних у разі несанкціонованого доступу, а також поляризаційний запис із опціями мультиплексування й одночасного криптографічного захисту. Даний метод одночасно забезпечує високі густини запису, критичну складність копіювання надійне шифрування даних.

До другої групи можна віднести запис індивідуалізованих комп'ютерно-генерованих голограм, фотохромні чорнила та створення прихованих маркерів для відстеження та автентифікації партій документів. Реверсивна зміна кольору матеріалу дозволяє виготовляти фотохромні барвники різних кольорів характеристики яких не поступаються промисловим аналогам. На додаток до зміни кольору, яку можна помітити неозброєним оком, завдяки модифікації амінокислотної послідовності пігменту може бути реалізовано приховане кодування документів, детектувати яке можна лише за допомогою спеціалізованого лабораторного обладнання. Важливо, що різні прийоми захисту можна комбінувати на одному носіїві, що додатково підвищує загальний рівень захисту.

Властивості нативного бактеріородопсину повністю задовольняють вимогам розглянутих прикладних методів захисту інформації. Водночас певні аспекти практичної експлуатації потребують цілеспрямованої модифікації властивостей матеріалу. Зокрема, малий час життя інтермедіату M_{412} у нативній формі вимагає достатньо високих рівнів освітлення для чіткої візуальної фіксації зміни кольору фотохромного барвника. Накопичення цього інтермедіату за рахунок збільшення часу його життя (зокрема, шляхом спрямованої хімічної модифікації плівок) дозволить суттєво підвищити контрастність та ефективність спектральних змін системи навіть за умов низької освітленості носія.

Перелік посилань

1. Hampp N. Bacteriorhodopsin as a Photochromic Retinal Protein for Optical Memories. *Chemical Reviews*. 2000. Vol. 100, no. 5. P. 1755-1776. URL: <https://doi.org/10.1021/cr980072x> (date of access: 04.08.2026).
2. High-speed integrated optical logic based on the protein bacteriorhodopsin / A. Mathesz et al. *Biosensors and Bioelectronics*. 2013. Vol. 46. P. 48-52. URL: <https://doi.org/10.1016/j.bios.2013.02.022> (date of access: 04.08.2026).
3. Sensitive elements based on bacteriorhodopsin for fiber-optics sensors of chemical components / Y. P. Sharkany et al. Bruges, Belgium – Deadline Past, Bruges, Belgium. 2005. URL: <https://doi.org/10.1117/12.623662> (date of access: 04.08.2026).
4. Zeisel D., Hampp N. Bacteriorhodopsin Films Containing the Variant D96N as Media for Dynamic Holography and Interferometry. *Molecular Crystals and Liquid Crystals Science and Technology. Section A. Molecular Crystals and Liquid Crystals*. 1994. Vol. 246, no. 1. P. 371-374. URL: <https://doi.org/10.1080/10587259408037846> (date of access: 04.08.2026).
5. Biomolecular optical data storage and data encryption / T. Fischer et al. *IEEE Transactions on Nanobioscience*. 2003. Vol. 2, no. 1. P. 1-5. URL: <https://doi.org/10.1109/tnb.2003.810163> (date of access: 04.08.2026).
6. Recent advances in bacteriorhodopsin-based energy harvesters and sensing devices / P. Singh et al. *Nano Energy*. 2021. Vol. 79. P. 105482. URL: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105482> (date of access: 04.08.2026).

7. Oesterhelt D., Stoeckenius W. [69] Isolation of the cell membrane of *Halobacterium halobium* and its fractionation into red and purple membrane. *Methods in Enzymology*. 1974. P. 667-678. URL: [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(74\)31072-5](https://doi.org/10.1016/0076-6879(74)31072-5) (date of access: 04.08.2026).
8. Stabilization of the membrane protein bacteriorhodopsin to 140 °C in two-dimensional films / Y. Shen et al. *Nature*. 1993. Vol. 366, no. 6450. P. 48-50. URL: <https://doi.org/10.1038/366048a0> (date of access: 04.08.2026).
9. On the role of molecular close packing on the protein thermal stability / V. Erokhin et al. *Thin Solid Films*. 1996. Vol. 284-285. P. 805–808. URL: [https://doi.org/10.1016/s0040-6090\(95\)08451-7](https://doi.org/10.1016/s0040-6090(95)08451-7) (date of access: 04.08.2026).
10. Stability of Purple Membranes from *Halobacterium salinarum* toward Surfactants: Inkjet Printing of a Retinal Protein / M. Imhof et al. *The Journal of Physical Chemistry B*. 2012. Vol. 116, no. 32. P. 9727-9731. URL: <https://doi.org/10.1021/jp3057459> (date of access: 04.08.2026).
11. Hampp N. A., Fischer T., Neebe M. Bacteriorhodopsin-based photochromic pigments for optical security applications. *Electronic Imaging 2002*, San Jose, CA / ed. by R. L. van Renesse. 2002. URL: <https://doi.org/10.1117/12.462703> (date of access: 04.08.2026).
12. Varo G., Lanyi J. K. Kinetic and spectroscopic evidence for an irreversible step between deprotonation and reprotonation of the Schiff base in the bacteriorhodopsin photocycle. *Biochemistry*. 1991. Vol. 30, no. 20. P. 5008-5015. URL: <https://doi.org/10.1021/bi00234a024> (date of access: 04.08.2026).
13. Birge R. R. Protein-Based Computers. *Scientific American*. 1995. Vol. 272, no. 3. P. 90-95. URL: <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0395-90> (date of access: 04.08.2026).
14. Structural Changes in Bacteriorhodopsin Caused by Two-Photon-Induced Photobleaching / D. Rhinow et al. *The Journal of Physical Chemistry B*. 2012. Vol. 116, no. 25. P. 7455-7462. URL: <https://doi.org/10.1021/jp2112846> (date of access: 04.08.2026).
15. Fischer T., Hampp N. A. Two-Photon Absorption of Bacteriorhodopsin: Formation of a Red-Shifted Thermally Stable Photoproduct F620. *Biophysical Journal*. 2005. Vol. 89, no. 2. P. 1175-1182. URL: <https://doi.org/10.1529/biophysj.104.055806> (date of access: 04.08.2026).
16. Biomolecular Electronics: Protein-Based Associative Processors and Volumetric Memories / R. R. Birge et al. *The Journal of Physical Chemistry B*. 1999. Vol. 103, no. 49. P. 10746-10766. URL: <https://doi.org/10.1021/jp991883n> (date of access: 04.08.2026).
17. Structural Changes in Bacteriorhodopsin Caused by Two-Photon-Induced Photobleaching / D. Rhinow et al. *The Journal of Physical Chemistry B*. 2012. Vol. 116, no. 25. P. 7455-7462. URL: <https://doi.org/10.1021/jp2112846> (date of access: 04.08.2026).
18. Extremophilic bacteriorhodopsin from hypersaline salt pan: characterization and photoelectrochemical assessment for potential biosensor applications / S. Joseph et al. *Frontiers in Microbiology*. 2026. Vol. 17. URL: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2026.1805566> (date of access: 04.08.2026).
19. Wilm M. Self-assembled bio-membranes as a new material for biomolecular electronics. *Academia Nano: Science, Materials, Technology*. 2025. Vol. 2, no. 2. URL: <https://doi.org/10.20935/acadnano7761> (date of access: 04.08.2026).
20. Bio-sensitized solar cells built from renewable carbon sources / C. C. Villarreal et al. *Materials Today Energy*. 2022. Vol. 23. P. 100910. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mtener.2021.100910> (date of access: 04.08.2026).
21. A novel light-driven pH-biosensor based on bacteriorhodopsin / Y. Lv et al. *Nano Energy*. 2019. Vol. 66. P. 104129. URL: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.104129> (date of access: 04.08.2026).
22. Design of chemically modified bacteriorhodopsin films for information protection systems / I. Trikur et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. Vol. 5, no. 6 (119). P. 6–14. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.265858> (date of access: 04.08.2026).
23. High-effective cultivation of *Halobacterium salinarum* providing with bacteriorhodopsin production under controlled stress / S. V. Kalenov et al. *Journal of Biotechnology*. 2016. Vol. 233. P. 211-218. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2016.07.014> (date of access: 04.08.2026).
24. A Review on Bacteriorhodopsin-Based Bioelectronic Devices / Y.-T. Li et al. *Sensors*. 2018. Vol. 18, no. 5. P. 1368. URL: <https://doi.org/10.3390/s18051368> (date of access: 04.08.2026).
25. Druzhko A. B. Some Aspects of Using the Fundamental Properties of Bacteriorhodopsin for Recording, Processing, and Storage of Optical Information. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*. 2023. P. 100620. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jphotochemrev.2023.100620> (date of access: 04.08.2026).
26. Hampp N., Neebe M. Bacteriorhodopsin-based multi-level optical security features. *Electronic Imaging 2006*, San Jose, CA / ed. by R. L. van Renesse. 2006. URL: <https://doi.org/10.1117/12.642627> (date of access: 04.08.2026).
27. Imhof M., Rhinow D., Hampp N. Two-photon polarization data storage in bacteriorhodopsin films and its potential use in security applications. *Applied Physics Letters*. 2014. Vol. 104, no. 8. P. 081921. URL: <https://doi.org/10.1063/1.4867164> (date of access: 04.08.2026).
28. Hampp N. A., Neebe M., Seitz A. Printing inks containing the photochromic protein bacteriorhodopsin. *Electronic Imaging*, San Jose, CA / ed. by R. L. van Renesse, W. A. Vliegthart. 2000. URL: <https://doi.org/10.1117/12.382181> (date of access: 04.08.2026).

29. Multifunctional optical security features based on bacteriorhodopsin / N. A. Hampp et al. Electronic Imaging 2004, San Jose, CA / ed. by R. L. van Renesse. 2004. URL: <https://doi.org/10.1117/12.522279> (date of access: 04.08.2026).

30. Czéagéa J., Reinisch L. Photodestruction of bacteriorhodopsin. Photochemistry and Photobiology. 1991. Vol. 53, no. 5. P. 659–666. URL: <https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.1991.tb08494.x> (date of access: 04.08.2026).

Ivan Trikur

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor
Department of Solid-State Electronics and Information Security
Uzhhorod National University, Uzhhorod, Ukraine
ORCID: 0000-0002-6095-2500
E-mail: ivan.trikur@uzhnu.edu.ua

Mykhaylo Sichka

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor
Department of Solid-State Electronics and Information Security
Uzhhorod National University, Uzhhorod, Ukraine
ORCID: 0000-0001-5305-6065
E-mail: mykhaylo.sichka@uzhnu.edu.ua

Mykhailo Rizak

Doctor of Sciences in Law, Senior Researcher, Professor of the Department of Technical Systems of Cyber Defence
Educational and Scientific Institute of Cybersecurity and Information Protection
State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine
ORCID: 0009-0003-9844-3271
E-mail: advokat.rizak@gmail.com

Liubomyr Botseniuk

PhD Student of the Department of Solid-State Electronics and Information Security
Uzhhorod National University, Uzhhorod, Ukraine
ORCID: 0000-0001-5339-9762
E-mail: liubomyr.botseniuk@uzhnu.edu.ua

Vasyl Rizak

Doctor of Sciences in Physics and Mathematics, Professor, Head of the Department of Solid-State Electronics and Information Security
Uzhhorod National University, Uzhhorod, Ukraine
ORCID: 0000-0002-9177-0662
E-mail: vrizak@uzhnu.edu.ua

BACTERIORHODOPSIN AND CHEMICALLY MODIFIED FILM STRUCTURES BASED ON IT AS COMPONENTS OF INFORMATION SECURITY

This work offers an overview of the possibilities of using bacteriorhodopsin in modern information security systems. The main areas of application include methods of protecting and marking printed documents, use in data and personnel authentication systems, optical recording and storage of digital information with additional protection options. Bacteriorhodopsin-based materials allow the creation of high-speed cryogenic high-capacity storage devices. All information on these devices is irreversibly erased when the media is heated to room temperature, when secret data requires lability to prevent unauthorized access. The use of bacteriorhodopsin films for polarization recording of information, in addition to the high capacity of the medium, complicates unauthorized copying, allows the use of reliable encryption during recording and easy implementation of multiplexing of several data sets on one medium. The properties of bacteriorhodopsin allow direct laser recording of individualized computer-generated holograms without the use of templates, which facilitates its use together with other means of protection. The photochromic properties of bacteriorhodopsin can be exploited to develop inks that undergo color changes upon light irradiation, while modification of its amino acid sequence may serve as a hidden genetic marker for tracking and authenticating batches of documents. Various protection methods can be integrated on one carrier, examples of which are also described in the work. This work demonstrates the significant potential of native bacteriorhodopsin in information security systems, provides an analysis

of world literature in this area, summarizes the results of many years of research by the authors, and outlines current problems and options for their solution in the future.

Keywords: bacteriorhodopsin, photocycle, film structures, photochromism, polarization recording, information security, information protection.

Надійшла до редакції (Received): 16.08.2026

Прийнята до друку (Accepted): 08.09.2026

Опубліковано онлайн (Available online): 15.09.2026

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

This work is licensed under Creative Commons Attribution-noncommercial-sharealike 4.0 International License

UDC 004.75:004.62

DOI: 10.31673/2409-7292.2026.032817

Denys Chernousov

PhD student of the Department of Software Engineering in Energy

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

ORCID: 0009-0003-1968-860X

E-mail: chernousov.d.i.-tv51f@edu.kpi.ua

REAL-TIME SPATIO-TEMPORAL DEDUPLICATION IN DISTRIBUTED MULTI-TARGET TRACKING VIA A BOUNDED-DEGRADATION ARCHITECTURE

Distributed multi-target tracking systems tend to fall apart under heavy load: processing delays grow, tracks merge into each other, and the root cause is usually unbounded algorithmic complexity combined with unpredictable memory access patterns. This paper focuses on state estimation and spatio-temporal track deduplication across decentralized processing nodes. The goal is to keep frame execution time deterministic and prevent identity swaps between tracks, even during dense swarm engagements. To accomplish this, the study uses maneuvering target models reaching 10g acceleration and simulated telemetry streams pushed to an $11\times$ clutter saturation limit. The approach combines lock-free ring buffering, structure-of-arrays memory layouts, flat prime-product spatial hash-grids with linear probing, and localized joint probabilistic data association. The results show that a sub-10 ms processing budget holds at 5,500 clutter points per frame, with a peak projected latency of 4.6 ms when all eight crossing locks are active simultaneously. Across 1,000 simulated trials of symmetric high-g crossings, the framework produced zero label swaps and maintained consistent tracking through packet loss rates of up to 30%. The core scientific contribution is the formalization of the cache-hot paradox: under heavy clutter, a bounded full-rank Cholesky factorization running entirely in L1 cache outperforms the nominally cheaper Sherman-Morrison-Woodbury low-rank approximation, which gets bottlenecked by global memory latency. A second contribution is an additive correction term for the NEES selection rule that absorbs the innovation inflation caused by low-rank process noise approximations, preventing false ownership handoffs across lossy network links.

Keywords: real-time target tracking, hardware-software co-design, distributed state estimation, cache-hot paradox, joint probabilistic data association, track deduplication, bounded degradation, decentralized sensor networks.

Introduction

The growing use of tactical UAVs is pushing short-range air defense to its limits, especially when dealing with low radar cross-section targets. Standalone radars can measure range accurately but struggle with angular resolution and are vulnerable to electronic warfare [1]. Passive IR and optical sensors excel at angular measurements and target recognition, but cannot directly measure distance [2]. The natural answer is to combine these sensors into heterogeneous distributed networks [3]. However, fusing their data streams in real time is harder than it sounds: spatio-temporal redundancy regularly produces duplicate or ghost tracks that clog the decision pipeline [4].

Data association gets particularly messy in dense swarm scenarios [5]. Overlapping sensor coverage zones produce phantom bearing-line intersections [6], and asynchronous data arrival makes things worse [7]. The resulting ghost tracks overload decision channels and erode system reliability [8]. Meanwhile, tactical UAVs routinely pull high-g maneuvers that classical linear filters simply cannot handle [9, 10]. Adaptive filtering algorithms, covariance intersection, and information matrix methods are needed to keep up [11, 12].