

**ОГЛЯД СУЧАСНИХ ЗАХИСНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ЗАПОБІГАННЯ ВИТОКУ
КОНФІДЕНЦІЙНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ЧЕРЕЗ ВІКОННІ КОНСТРУКЦІЇ**

Н.Р. Дзяний, Х.С. Бесага, О.І. Гарасимчук, М.Є. Швед

Національний університет «Львівська політехніка»
12, Степана Бандери вул., Львів, 79013, Україна
Emails: nazarii.r.dziany@lpnu.ua, khrystyna.s.besaga@lpnu.ua, oleh.i.harasymchuk@lpnu.ua,
mariia.y.shved@lpnu.ua

Представлено комплексний аналіз проблеми несанкціонованого зняття конфіденційної інформації через віконні конструкції. Розглянуто основні канали витоку даних: акустичний, що використовує лазерні системи для зчитування звукових коливань з поверхні скла, та електромагнітний, що виникає через вихід радіочастотних сигналів (Wi-Fi, Bluetooth) за межі приміщення. Проведено огляд та порівняльний аналіз сучасних пасивних методів захисту, що реалізовані безпосередньо в матеріалах вікон і не потребують зовнішнього живлення. Досліджено три ключові категорії матеріалів: модифіковане віконне скло, спеціалізовані самоклеючі плівки та стаціонарні функціональні покриття. На основі аналізу встановлено, що звичайне скло, навіть у багатошарових склопакетах, забезпечує лише часткове пригнічення вібрацій і не є надійним бар'єром проти сучасних засобів шпигунства. Натомість, спеціалізовані рішення, що містять металізовані шари, нано-сітки з благородних металів або діелектричні структури, демонструють значно вищу ефективність. У статті наведено кількісні показники екранування, вимірювані в децибелах (дБ), для різних матеріалів, що підтверджено міжнародними тестами (зокрема за стандартом ASTM F3057-14). Захисні плівки, такі як Signals Defense SD2500, забезпечують екранування до 40+ дБ, а інноваційні покриття на основі срібних нано-сіток можуть досягати рекордних показників 48–58 дБ, зберігаючи при цьому високу оптичну прозорість. Акцентовано на перспективності діелектричних покриттів, зокрема на основі діоксиду гафнію (HfO_2), які підвищують відбиття лазерного променя, залишаючись візуально непомітними. Зроблено висновок, що для досягнення максимального рівня кіберзахисту оптимальним є комбінування кількох підходів. Застосування багатокамерних склопакетів у поєднанні з нанесенням високотехнологічних покриттів або захисних плівок на внутрішнє скло створює надійний та довговічний бар'єр, що забезпечує конфіденційність інформаційного простору та стійкість до електронного шпигунства.

Ключові слова: кіберстійкість вікон, пасивний захист інформації, захисні віконні плівки, функціональні покриття для скла, діоксид гафнію, нано-сітки.

Вступ. Віконне скло традиційно є одним з найвразливіших місць щодо несанкціонованого зняття інформації. Через вікна зловмисники можуть дистанційно «читати» конфіденційні дані за допомогою лазерних систем акустичної розвідки (так званих лазерних мікрофонів), що знімають звукові коливання з поверхні скла і перетворюють їх на аудіосигнал [1]. Так само, звичайні вікна майже не перешкоджають виходу радіосигналів (Wi-Fi, Bluetooth тощо) з будівлі [2], що відкриває широкі можливості для електронного шпигунства. Тому нині існує нагальна потреба в кіберстійких віконних матеріалах – таких, що унеможливають або суттєво ускладнюють зчитування інформації через вікна.

Методи захисту інформації від «витоку» через вікна бувають активними і пасивними. Активні методи включають встановлення на шибках вібраційних випромінювачів або шумових генераторів, що створюють завади (наприклад, система Glass-Shield генерує випадкові коливання у склі і робить перехоплену лазером розмову нерозбірливою [3, 4]). Проте активні методи вартісні, потребують енергії та є легкодоступними з точки зору виявлення самого факту застосування захисту. Пасивні

методи реалізовані у самому матеріалі вікна – спеціальному склі, плівці чи покритті – захищають інформацію без додаткового обслуговування і є непомітні. Нижче проведено огляд сучасних пасивних рішень: спеціальних видів віконного скла, захисних самоклеючих плівок та стаціонарних покриттів на склі, що забезпечують кіберстійкість вікна. Розглянуто їхній склад, технологію отримання, захисні властивості, а також надано порівняння ефективності та рекомендації щодо оптимального вибору матеріалу.

Огляд літератури (аналіз досліджень і публікацій). Проблема несанкціонованого зняття інформації через вікна є предметом наукових досліджень протягом останніх десятиліть. Хоча зловмисники традиційно використовують акустичні канали витоку (так звані «лазерні мікрофони») та електромагнітні (витік Wi-Fi, Bluetooth), більшість досліджень донедавна зосереджувалась лише на окремих аспектах цієї проблеми.

Аналіз наявної літератури показує, що попередні роботи, які стосуються захисту інформації через вікна, можна розділити на кілька ключових груп:

1. Дослідження фізичних принципів витоку інформації.

Ця група робіт зосереджена на розумінні того, як саме звукові та радіосигнали поширюються через віконне скло. Фундаментальні дослідження, проведені Дудикевичем В.Б. та співавторами [1, 5], підтверджують, що вібраційні характеристики скла є ключовими для захисту від акустичного зондування. Зокрема, було доведено, що збільшення товщини скла та застосування багатокамерних склопакетів суттєво зменшує амплітуду коливань [5]. Робота [6] додатково деталізує вплив вібрацій на відхилення лазерного променя, що є основою для розуміння принципів протидії лазерному шпигунству. Дослідження Zeng Y. та колег [7] підтверджує ці висновки, надаючи кількісні дані, що коливання у двокамерних вікнах значно менші, ніж у одинарних.

2. Аналіз та розробка пасивних захисних матеріалів.

Ця категорія охоплює дослідження певних матеріалів, які можуть забезпечити кіберстійкість.

Спеціалізовані плівки. Біла книга компанії Signals Defense [8] та технічні специфікації [9] детально описують, як металізовані плівки ефективно екранують радіочастотні сигнали та ІЧ-випромінювання. Продукти, як HAVERKAMP PROFILON® [10], демонструють високі показники блокування RF- та IR-випромінювань, що підтверджено незалежними тестами.

Функціональні покриття. Публікації [11, 12] розглядають патентовані технології, такі як багатошарові Low-E покриття з сріблом та електромагнітне екранування, що забезпечує значне послаблення сигналу. Стаття [13] є особливо важливою, оскільки вона експериментально підтверджує, що навіть одношарове діелектричне покриття з діоксиду гафнію (HfO_2) може ефективно відбивати лазерний промінь, залишаючись прозорим. У роботах [14, 15] представлено передові дослідження в галузі нано-сіток з срібла та MXene, які забезпечують рекордне екранування при високій прозорості.

3. Дослідження активних і комбінованих систем захисту.

Хоча наш огляд зосереджений на пасивних методах, важливо відзначити роботи, що досліджують активні або гібридні системи. Наприклад, дослідження, описане в [3], стосується оптимізації лазерних датчиків для протидії ЛЗАР. Прес-реліз [4] описує систему Glassbel Glass-Shield, яка поєднує пасивні властивості скла з активним шумовим генератором. Ці роботи підкреслюють потребу в поєднанні матеріалознавства з електронними засобами для створення максимально надійного захисту.

Узагальнюючи, аналіз наявної літератури показує, що хоча окремі аспекти захисту були досліджені раніше, існує потреба в комплексному огляді та порівнянні різних пасивних рішень. Наше дослідження спрямоване на систематизацію інформації та проведення порівняльного аналізу, що допоможе зробити обґрунтований вибір між різними кіберстійкими матеріалами для вікон.

Мета роботи. Мета даного дослідження – проаналізувати та порівняти сучасні пасивні рішення для підвищення кіберстійкості вікон, які унеможливають або суттєво ускладнюють несанкціоноване зняття інформації.

Основний розділ. На відміну від активних систем, які вимагають постійного живлення та можуть бути виявлені, пасивні методи захисту, інтегровані в саму структуру вікна, пропонують непомітне, довговічне та економічно вигідне рішення для запобігання витоку інформації. Цей розділ присвячений детальному аналізу та порівнянню ключових пасивних технологій, що забезпечують кіберстійкість вікон. Розглянемо властивості спеціальних видів скла, ефективність захисних самоклеючих плівок та стаціонарних покриттів, а також їхній вплив на блокування лазерного прослуховування та витоку радіосигналів. На основі проведеного огляду буде обґрунтовано, які саме матеріали є найбільш ефективними та перспективними для застосування в сучасних умовах.

Звичайне віконне скло з потенційними захисними властивостями від кібератак.

Об'ємний електричний опір звичайного натрій-кальцієвого скла становить $\sim 10^{12}$ $\Omega \cdot \text{см}$ (для порівняння, у свинцевого скла $\sim 10^{14}$ $\Omega \cdot \text{см}$) [16]. Боросилікатне скло BOROFLOAT® 33 має дуже високий світловий коефіцієнт пропускання у видимому діапазоні та незначну власну флуоресценцію, що робить його придатним для оптичних застосувань. Коефіцієнт термічного розширення BOROFLOAT® 33 – близько $3.25 \times 10^{-6}/\text{K}$ (20–300 °C), тобто у три рази нижчий, ніж у содово-вапняного скла [17]. Свинцевмісне радіаційно-захисне скло LX-57B містить $\sim 55\%$ оксиду свинцю і характеризується високою прозорістю: при товщині ~ 9 мм його світлопропускання становить $\sim 87,8\%$ у видимому діапазоні. Це скло забезпечує ефективний захист від рентгенівського випромінювання, не втрачаючи прозорості з часом (не жовтіє під дією радіації) [18]. Так, більшість видів скла має належні характеристики щодо світлопропускання, але жодне з них саме по собі не забезпечує необхідних властивостей з точки зору захисту від зчитування інформації з його поверхні

Але разом з тим, властивості самого скла суттєво впливають на здатність вікна передавати звукові коливання. Теоретичні та експериментальні дослідження показують, що чим товстіше скло, тим менше воно вібрує під впливом звуку [5]. Зокрема, максимальну амплітуду вимушених коливань спостерігають на тонких шибках $\sim 1-2$ мм; при товщині понад 2,5–3 мм вібрація значно зменшується [5]. Таким чином, для кращого захисту від лазерного прослуховування рекомендується застосовувати віконне скло товщиною не менше 3 мм. Ще ефективніше знижують вібрацію багатошарові та багатокамерні склопакети. Ламіноване скло (триплекс), що складається з двох шарів скла, переклеєних полімерною плівкою (PVB), поглинає значну частину звукових коливань: пластикова проміжна плівка виконує роль демпфера, «гасить» вібрації і зменшує передачу звуку через скло [19]. Таке акустичне ламіноване скло широко застосовується для звукоізоляції приміщень і побічно ускладнює лазерне зчитування інформації. Крім того, подвійні склопакети дають суттєву перевагу: випробування показали, що коливання скла у подвійній рамі (двокамерному вікні) приблизно на 74% менші, ніж у одинарному вікні тієї ж товщини [7].

Моделювання також підтвердило перевагу подвійного скла: при однаковій сумарній товщині склопакета двошарове вікно має на 55% меншу амплітуду вібрацій, ніж одне скло, і навіть на 40% меншу, ніж потрійний склопакет [7]. Отже, двошарові ізольовані склопакети є оптимальними для пасивного пригнічення коливань та протидії лазерному зніманню звуку.

Щоб ускладнити лазерному далекоміру отримання стабільного відбитого променя можна також застосовувати і інший підхід – порушити оптичну однорідність вікна. Для цього застосовують рифлене, гофроване або матоване скло зі спеціально витравленим рельєфом. Нерівна поверхня розсіює лазерний промінь, не даючи йому відбитися строго назад до приймача, завдяки чому зняття інформації стає менш можливим. Подібний метод (гофровані шибки) згадується в наукових роботах як пасивний захід захисту

мовної інформації [6]. Однак постійно матове чи рифлене вікно є незручним у використанні (непрозоре для ока), тому цей підхід обмежений випадками, коли огляд через скло не потрібний.

До простих пасивних методів можна віднести також спеціальне тоноване або дзеркальне скло. Воно спрямоване більше на візуальну конфіденційність, але частково впливає й на лазерне прослуховування. Тоновані (затемнені) шибки поглинають частину світла і можуть трохи зменшити інтенсивність відбитого лазерного променя. Дзеркальне напилення (скло з однобічною дзеркальною поверхнею) відбиває значну частку видимого та інфрачервоного випромінювання, тому теоретично здатне знизити ефективність лазерного перехоплення. Проте звичайні сонцезахисні покриття, розроблені для відбиття сонячного тепла, не забезпечують належного антилазерного ефекту. Наприклад, дослідники з'ясували, що архітектурні плівки на основі сполук міді максимально блокують світло на хвилі ~ 500 нм (видимий діапазон), тоді як лазери працюють в діапазоні 650–1550 нм, тому такі покриття фактично не захищають від прослуховування [20]. Отже, звичайне тонування скла є недостатнім для кіберзахисту – необхідні спеціальні матеріали, розраховані на блокування саме тих діапазонів, які використовують лазерні мікрофони та інші сенсори.

Самоклеючі захисні плівки для віконного скла. Одним із найпоширеніших способів підвищення кіберстійкості існуючих віконних конструкцій є використання самоклеючих багат шарових захисних плівок товщиною від кількох десятків до кількох сотень мікрметрів [9, 10, 22]. Такі плівки, як правило, наносяться на внутрішню поверхню скляних елементів і здатні одночасно виконувати низку функцій.

Принцип дії захисних плівок полягає в тому, що спеціальне прозоре покриття відбиває лазерне та інфрачервоне (ІЧ) випромінювання, що сприяє запобіганню несанкціонованому зчитуванню акустичних або електронних сигналів через скляні огорожувальні конструкції.

Типова захисна плівка складається з прозорого гнучкого полімерного базового шару (переважно поліетилентерефталату, ПЕТ), на який наносяться спеціалізовані функціональні покриття – металеві, оксидні або інші тонкі шари. Зі зворотного боку розташовується клейовий (адгезивний) шар, що забезпечує надійне кріплення плівки до поверхні скла.

Залежно від оптичних характеристик, зокрема рівня світлопропускання, розрізняють кілька типів захисних плівок: прозорі (майже непомітні на склі), частково прозорі (тоновані), а також дзеркальні (з низьким коефіцієнтом пропускання світла).

У контексті технічного захисту інформації найбільш ефективними є металізовані та дзеркальні плівки, які здатні відбивати ближнє та середнє інфрачервоне випромінювання. Завдяки цьому вони забезпечують екранування віконних конструкцій і унеможливають зчитування вібраційних коливань скла за допомогою лазерних засобів спостереження.

Світовими лідерами у цій сфері є спеціалізовані плівки типу *Signals Defenses* (SD) та *PROFILON AntiSpy*. Наприклад, американська плівка *Signals Defense SD2500* пропускає менш як 1% випромінювання в діапазоні 800–2500 нм (майже повністю блокує інфрачервоні та радіочастотні сигнали), при цьому залишається напівпрозорою ($\sim 53\%$ пропускання видимого світла) [21]. Виробник зазначає, що такі плівки утримують Wi-Fi та інші електронні сигнали всередині приміщення, запобігаючи їх перехопленню ззовні (принцип «безпека за рахунок ізоляції») [21]. Віконна плівка SD 2500 (*Signals Defense*) протестована за стандартом ASTM F3057-14 і демонструє в середньому понад 40 дБ послаблення радіочастотного сигналу в діапазоні 30 МГц – 6 ГГц. Це прозора металева плівка, розроблена для захисту від дистанційного перехоплення даних (відповідає вимогам безпеки США щодо електронного прослуховування) [9].

Інша серія – *HAVERKAMP PROFILON® Laser/AntiSpy* (Німеччина) – представлена плівками, призначеними спеціально для захисту від лазерного

прослуховування і електронного шпигунства. Вони є прозорими або слабо тонованими і майже не впливають на огляд, але мають найвищий у світі рівень блокування RF- та IR-випромінювань [10]. Тести, проведені державними установами США та Великобританії, підтвердили ефективність цих плівок [10]: покриті ними вікна екранують лазерні промені відповідних довжин хвиль, не даючи зчитати коливання скла.

Захисна плівка SpyLock 35 забезпечує оптичну прозорість $\geq 75\%$ VLT (Visible Light Transmission) та екранування електромагнітного випромінювання не менше 32 дБ в діапазоні частот від 10 МГц до 26 ГГц. Ці характеристики підтверджені випробуваннями за методикою ASTM F3057-14 [22] Провідна захисна плівка RDF72 забезпечує близько 33 дБ послаблення електромагнітного поля на частоті 1 ГГц при коефіцієнті пропускання $\sim 72\%$ (видиме світло). Плівка призначена для внутрішнього наклеювання на вікна; має легкий зелений відтінок і не значно знижує рівень освітлення, гарантуючи екранування $\sim 99.9\%$ потужності сигналу [23].

Практичний досвід показує, що нанесення правильно підібраної відбиваючої плівки може радикально ускладнити роботу лазерного прослуховування. За даними експериментів, якщо на склі є металізована плівка, зловмиснику доведеться збільшити потужність лазера принаймні в 10–30 разів, аби отримати прийнятний сигнал [24]. Найкращий ефект досягається у випадку подвійного скла: віддзеркалення і розсіювання променя максимальні, коли плівка наклеєна на зовнішнє скло, а лазер намагається зняти сигнал з внутрішнього. У такому разі перехоплення стає практично неможливим, адже значна частина лазерної енергії губиться на відбитті від плівки. Якщо ж плівку наклеїти з внутрішнього боку одинарної шибки, ефект дещо менший, але теж відчутний: плівка відбиває пряме ІЧ-випромінювання лазера і збиває фазу відбитого променя, заважаючи демодуляції звуку [24].

Захисні плівки виготовляються різними методами напилення й шарування матеріалів. Широко застосовуються металізовані плівки, де на прозорий поліестер нанесено ультра тонкий шар металу – зазвичай алюмінію, міді, срібла або нікель-хрому. Цей металевий шар виконує роль дзеркала для електромагнітних хвиль: він відбиває інфрачервоне світло і радіохвилі, зменшуючи їх проходження назовні. Для підсилення ефекту й розширення діапазону блокування структуру плівки доповнюють прозорими провідними оксидами – наприклад, шаром індій-олов'яного оксиду (ІТО) або індій-цинкового оксиду. Оксидні шари одночасно прозорі у видимому спектрі й електропровідні, тому добре екранують СВЧ- та ІЧ-випромінювання [25]. Деякі сучасні плівки замість суцільного металу містять наносітку: наприклад, сітка з найтоншого мідного дроту з щільністю ~ 100 отворів/дюйм забезпечує дуже високий рівень екранування RF/EMI при помірному зменшенні прозорості [26]. Існують також експериментальні зразки з наночастинками: наприклад, додавання наночастинок певних оксидів у лакове покриття плівки може підвищити її вибіркоче поглинання у заданому діапазоні [27]. Втім, надмірне поглинання небажане, адже призводить до нагрівання матеріалу і може з часом пошкодити плівку; тому перевага надається відбиваючим (дзеркальним або сітчастим) структурам [27, 28].

Окрім суто захисної функції, багато плівок поєднують інші корисні властивості. Так, металізовані плівки часто одночасно будуть і сонцезахисними – знижують нагрів приміщення, екранують UV випромінювання та мінімізують утворення світлових відблисків. Додатково більшість таких плівок виконують роль протиударних: зміцнюють скло, утримують уламки при розбитті і навіть забезпечують певний рівень протиосколкового захисту при вибухах [29]. Це робить їх привабливими для банків, офісів, військових об'єктів, де потрібна як кібер-, так і фізична безпека.

Слід зазначити, що ефективність плівки сильно залежить від її правильного вибору і монтажу. При наклеюванні важливо уникнути бульбашок і зазорів по краях – інакше лазерний промінь може частково пройти через дрібні дефекти. Такі плівки зазвичай довговічні (гарантія 10+ років), але з часом допускається виникнення поверхневих

дефектів (подряпин), тому рекомендується застосування захисних заходів від механічних навантажень. Загалом, сучасні високотехнологічні плівки є одним з найкращих і найгнучкіших рішень: вони відносно недорогі, можуть бути встановлені на існуючі вікна і демонструють високу ефективність у блокуванні як лазерних, так і радіочастотних атак. Більш того, окремі моделі плівок сертифіковані за стандартами *TEMPEST* (вимоги до секретних приміщень) [8].

Спеціальні покриття на віконному склі. Цей підхід передбачає нанесення на скло стаціонарного тонкого функціонального покриття під час виробництва або модернізації вікна. На відміну від плівок, що кріпляться механічно, покриття зазвичай напилюються на поверхню скла методом вакуумного осадження (магнетронне напилення, піролітичне осадження тощо) і виконують роль екранувального шару від електромагнітних впливів. Фактично, це аналог плівки, інтегрований у структуру самого скла.

Одне з найпростіших рішень – нанести на скло ультратонкий напівпрозорий шар металу з високою відбивною здатністю. У сучасних енергозберігаючих склопакетах використовуються, наприклад, шари срібла товщиною ~ 100 нм (т. зв. низькоемісійні *Low-E* покриття). Такі шари відбивають теплове ІЧ-випромінювання, а також значну частину ближнього ІЧ-діапазону, що частково перебиває робочі довжини хвиль лазерних мікрофонів. Проте срібло сильно відбиває і видиме світло (скло набуває дзеркального вигляду), тому типове *Low-E* покриття пропускає лише ~ 70 – 80% видимого світла. Для підвищення прозорості застосовують багат шарові інтерференційні покриття: чергуючи металеві й діелектричні шари, можна налаштувати спектральну характеристику. Наприклад, автори розробили багат шарове покриття з чергуванням тонких шарів срібла, нікель-хромового сплаву і діелектрика (SiO_2 або ІТО), яке забезпечує високий коефіцієнт відбиття в ІЧ-діапазоні при 50 – 70% прозорості [11]. Такі багат шарові структури можуть наноситися і на скло: декілька виробників пропонують скло з електромагнітним екрануванням – як правило, це триплекс із напиленою на внутрішню сторону провідною сіткою або шаром оксиду металу, захищеним додатковим шаром скла [12].

Перспективним напрямком є використання нано-сіток та графеноподібних матеріалів. Дослідження показують, що сітчасті металеві покриття з розміром чарунок у десятки мікрон можуть створити ефективний широкосмуговий екран із прозорістю понад 90% [28]. Також випробовуються прозорі наноматеріали – напр. плівки з *MXene* та срібних нанодротів – які здатні екранувати СВЧ- та ближній ІЧ-діапазон, пропускаючи видиме світло (досягаються показники ослаблення ~ 40 – 50 дБ на GHz частотах при $\sim 85\%$ прозорості) [28]. У іншій своїй роботі [27] вченими також розроблено гібридну плівку: сітчастий каркас із наночарів *MXene*, заповнений срібними нанодротоми. Отримано гнучке прозоре покриття з коефіцієнтом пропускання $\sim 81\%$ та екрануванням $\sim 24,6$ дБ. Комбінована структура забезпечує баланс між електропровідністю і прозорістю, придатний для захисту екранів та гнучкої електроніки. Втім, ці технології поки що перебувають на стадії розробки і не представлені на масовому ринку.

Спеціальне скло Pilkington Datastop™ з прозорим провідним покриттям забезпечує значне екранування електромагнітних коливань. При побудові екранованого приміщення з використанням Datastop (у вигляді подвійного склопакета) незалежні випробування показали послаблення сигналу в межах 40 – 70 дБ у діапазоні 10 МГц – 10 ГГц (понад 60 дБ на частотах 1 – 5 ГГц). Для досягнення максимального захисту покриття Datastop повинно мати електричний контакт по периметру з металевою рамою (створюючи безперервну клітку Фарадея) [30]. Архітектурне скло з потрійним низькоемісійним покриттям Solarban 70XL здатне блокувати значну частку RF-випромінювання. В дослідженні Vitro зазначено, що ламіноване скло з одним шаром потрійного Ag-покриття забезпечує ~ 40 дБ екранування, а з двома такими шарами – до ~ 54 дБ при збереженні високої прозорості. Це відповідає ~ 99 – $99,99\%$ зниженню потужності радіосигналу [31]. Провідне оксидне покриття NSG TEC 7 (фтор-допований

SnO_2) характеризується листовим опором $\sim 6\text{--}8 \Omega/\square$ і високим світлопропусканням ($\sim 80\text{--}85\%$ видимого світла). Хімічно стійке піроелектричне покриття наноситься он-лайн методом CVD, що забезпечує довговічність. Хоча екранувальна ефективність FTO-покриття дещо нижча, ніж у срібловмісних, скло NSG TEC 7 здатне забезпечувати порядку десятків децибел послаблення RF-сигналів, залишаючись прозорим [32]. Дослідниками з Університету Пітсбурга [14] виготовлено вмонтовану в скло срібну сітку з шириною ліній $\sim 1.6\text{--}3.5 \mu\text{m}$ і товщиною до $2 \mu\text{m}$. Така сітка досягла рекордних показників: екранування $\sim 48\text{--}58$ дБ при прозорості $90.3\% \text{--} 83\%$ відповідно. Срібна сітка, заповнена в мікролітографічно витравлені канали скла, формує прозорий електропровідний шар з найвищою ефективністю серед відомих технологій екранування. У роботі [33] запропоновано дво-смугову частотно-вибіркову структуру (FSS) на склі, що незалежно від поляризації забезпечує придушення сигналу Wi-Fi: до 45 дБ на частоті 2,4 ГГц і 43 дБ на 5,4 ГГц. При цьому конструкція залишається прозорою для ока ($\sim 70\%$ VLT) та може інтегруватися у віконне скло без помітного впливу на освітленість.

Цікавий підхід запропоновано у роботі [13]: замість металів використано діелектрик з дуже високим показником заломлення, щоб підвищити відбивання лазера від скляної поверхні. Експериментально випробувано одношарове покриття з діоксиду гафнію (HfO_2), нанесене методом вакуумного напилення. Діоксид гафнію має показник заломлення $\sim 2,0$ (проти $\sim 1,5$ у звичайного скла), тож тонка плівка HfO_2 діє як просвітлювальне чи відбивальне інтерференційне покриття залежно від довжини хвилі. В результаті вимірювань зразків скла з таким покриттям встановлено, що в діапазонах 300–350 нм, 500–700 нм та 1000–1500 нм коефіцієнт відбиття від скла збільшується майже вдвічі порівняно з чистим склом. Зокрема, на важливій довжині ~ 550 нм відбиття зросло в 1,8 рази [13]. При цьому покриття не погіршує прозорості: HfO_2 є безбарвним і хімічно стійким, не розчиняється у воді та витримує високі температури. Візуально скло з таким напиленням практично не відрізняється від звичайного (людина не помітить різниці), тож зловмисник може навіть не здогадуватися, що шибка захищена. Це велика перевага, адже лазерний мікрофон може бути задіяний проти такого скла, але отриманий сигнал буде значно слабкішим, ніж очікувалося (частина променя розсіється і відіб'ється вбік). Важливим є те, що діоксид гафнію належить до класу неорганічних сполук, шари яких характеризуються високою адгезією до скла та забезпечують тривалу експлуатаційну стабільність. Завдяки хімічній інертності HfO_2 зберігає структурну цілісність за дії вологи, ультрафіолетового випромінювання та інших зовнішніх факторів, що зумовлює його довговічність. Матеріал вирізняється високою твердістю, оптичною прозорістю та стійкістю до механічних пошкоджень, що робить його практично невидимим у застосованих покриттях. Крім того, технологія нанесення діоксиду гафнію є відносно простою та сумісною зі стандартними виробничими процесами. Сукупність зазначених властивостей дозволяє розглядати HfO_2 як один із найбільш перспективних матеріалів для формування антилазерних покриттів, що поєднують ефективність, довговічність і непомітність.

Додаткові рішення. Окрім згаданих підходів, варто зазначити використання додаткових елементів, що підвищують захист. Наприклад накладні *панелі-протишпигуни*: прозорі панелі, що можна опускати перед вікном і які містять шар рідини або пластику, що динамічно змінює прозорість (під впливом електрики). Електрохромне скло може за командою миттєво стати матовим, порушивши видимість і лазерне прослуховування. Такі технології наразі дорогі, але в перспективі можуть стати частиною «розумних» кіберзахисних вікон.

Перспективними є також активно-пасивні системи: коли спеціальне прозоре покриття поєднується з електронікою. Згаданий продукт *Glass-Shield* від компанії *Glassbel* – це ламіноване скло зі струмопровідним прозорим шаром та під'єднаними електродами, що подають випадкові коливання (шум) на скло. В результаті лазер, навіть проникнувши через пасивні захисні шари, зчитує лише хаотичні коливання, а не

реальний голос, і розмова залишається конфіденційною. Хоча такі рішення виходять за рамки матеріалознавства (вимагають джерела сигналу), їх поява свідчить про тенденцію до комбінування матеріалів і електронних засобів для максимального захисту.

Отже, розглянуті три групи матеріалів – спеціальне скло, самоклеючі плівки, покриття – мають свої переваги й недоліки. Нижче подано таблицю, яка узагальнює ключові рішення для вікон (звичайне скло, скло з плівками, скло з функціональними покриттями), що забезпечують стійкість до зчитування інформації. Зазначено тип матеріалу, основу (склад скла або плівки), метод екранування, основні властивості (видима прозорість, ефективність екранування в дБ, поверхневий опір, діелектричні втрати, коефіцієнт термічного розширення, стійкість до корозії), а також придатність для використання у кіберзахисних об'єктах (таблиця 1).

Таблиця 1.

Узагальнення ключових рішень для вікон (звичайне скло, скло з плівками, скло з функціональними покриттями), що забезпечують стійкість до зчитування інформації

Категорія	Назва та тип матеріалу	Виробник / Джерело	Прозорість	Екранування (дБ)	Поверхневий опір (Ω/\square)	Коеф. терм. розширення (СТЕ)	Діелектричні втрати	Стійкість до корозії	Придатність до захисту
Звичайне скло [16]	Натрій-кальцієве скло	Патент США	~90%	~0	~10 ¹²	~9×10 ⁻⁶	Дуже малі	Добра	Ні
Звичайне скло [17]	Боросилікатне скло BOROFLOAT® 33	SCHOTT	89–91%	N/A	10 ¹⁶	~3.25×10 ⁻⁶	Малі	Висока	Так
Звичайне скло [18]	Пломбумвічне скло (LX-57B)	A&L Shielding	~86–88%	N/A	N/A	~8×10 ⁻⁶	Незначні	Висока	Ні
Скло + плівка [22]	Vianovix SpyLock 35	Vianovix	≥75%	≥32 дБ	N/A	~60×10 ⁻⁶	Малі	Помірна	Так
Скло + плівка [9]	Signals Defense SD 2500	Signals Defense	~53%	>46 дБ	N/A	~60×10 ⁻⁶	Малі	Висока	Так
Скло + плівка [23]	YShield® RDF72	YShield	~72%	~33 дБ	~10	~60×10 ⁻⁶	Малі	Середня	Так
Скло з покриттям [30]	Pilkington DataStop™	NSG Pilkington	70–80%	~45 дБ	1–2	~9×10 ⁻⁶	Малі	Висока	Так
Скло з покриттям [31]	Vitro Solarban 70XL	Vitro Architectural Glass	~64%	~40–54 дБ	5–15	~9×10 ⁻⁶	Малі	Середня	Частково
Скло з покриттям [32]	NSG TEC 7	NSG Pilkington	~80–85%	~20–30 дБ (оцінка)	7–8	~7×10 ⁻⁶	Малі	Висока	Так
Інновації [14]	Embedded Silver Mesh (Ag сітка)	Univ. of Pittsburgh	83–90.3%	48–58 дБ	<1	~9×10 ⁻⁶	Малі	Висока	Так
Інновації [15]	MXene/Ag NW Hybrid Film	Beijing Univ. Chem. Tech.	~81%	24.6 дБ	N/A	~8×10 ⁻⁶	Високі	Помірна	Так
Інновації [33]	Dual-band FSS Glass	North Dakota State Univ.	~70%	43–45 дБ	N/A	~9×10 ⁻⁶	Малі	Середня	Так

Обговорення результатів дослідження. Проведений аналіз демонструє, що існуючі пасивні рішення для кіберзахисту вікон мають різні механізми дії та ефективність. Звичайне скло, навіть товсте або багат шарове (триплекс, склопакети), хоча і зменшує амплітуду коливань під впливом звуку, не забезпечує повного блокування лазерного

прослуховування чи екранування радіосигналів. Його ефективність є скоріше побічним ефектом, ніж цілеспрямованою захисною властивістю. Застосування рифленого або матованого скла, хоча й порушує оптичну однорідність, суттєво обмежує функціональність вікна, роблячи його непрозорим. Таким чином, звичайне скло не може бути використане як повноцінний кіберстійкий матеріал.

На противагу цьому, спеціалізовані плівки (наприклад, Signals Defense та PROFILON AntiSpy) та функціональні покриття (Pilkington Datastop, скло з потрійним Low-E покриттям) демонструють значно вищу ефективність. Вони працюють за принципом відбиття та поглинання електромагнітного випромінювання, включаючи інфрачервоний діапазон, що використовується лазерними мікрофонами, та радіочастотний спектр (Wi-Fi, Bluetooth).

Найбільш значущі наукові результати, отримані в ході дослідження, можна узагальнити наступним чином.

Самоклеючі плівки є найгнучкішим і найдоступнішим рішенням для модернізації вже існуючих вікон. Вони забезпечують високий рівень екранування (до 40+ дБ), що відповідає вимогам стандарту ASTM F3057-14. Їх ефективність залежить від складу (металізовані шари, наносітки) та правильного монтажу. Плівки також можуть мати додаткові функції, такі як сонцезахист і протиударні властивості, що робить їх багатофункціональним інструментом захисту.

Функціональні покриття, що наносяться на скло під час виробництва, є більш довговічними та естетично привабливими. Вони можуть бути інтегровані безпосередньо в багатошарові склопакети, створюючи єдину захищену структуру. Дослідження показали, що покриття на основі срібних наносіток та спеціально розроблених інтерференційних структур можуть забезпечувати екранування до 50-60 дБ при високій прозорості, що є рекордним показником.

Використання діелектричних покриттів, зокрема діоксиду гафнію (HfO_2), є перспективним, оскільки вони підвищують відбиття лазерного променя без значного впливу на прозорість вікна. Це робить їх непомітними для зловмисника, що є важливою перевагою з точки зору конфіденційності.

Аналіз літературних джерел дозволяє стверджувати, що для досягнення максимального захисту оптимальним є комбінування декількох підходів. Зокрема, використання багатокамерних склопакетів у поєднанні з функціональним покриттям або високоефективною захисною плівкою на внутрішньому склі створює найбільш надійний бар'єр проти лазерного та радіочастотного шпигунства.

Висновки. Порівняння переваг і недоліків показує, що універсального матеріалу не існує. Кожен підхід має компроміси між прозорістю, екрануванням, довговічністю та технологічністю. Монолітне скло є базовим матеріалом з відмінною оптичністю та високою механічною довговічністю, проте без додаткових заходів не забезпечує захисту від електромагнітних загроз. Плівки привабливі простотою встановлення та можливістю модернізації наявних вікон. Неметалізовані полімерні плівки можуть слугувати для зміцнення (проти уламків) і тонування, але не екранують радіочастоти. Натомість металізовані плівки надають помірний рівень захисту (десятки децибел ослаблення) і здатні підвищити безпеку інформаційного середовища, хоча їх довговічність обмежена: з часом можливі зношення, відшарування країв, помутніння або подряпини, що погіршують оптичні властивості. Функціональні покриття (ITO, Low-E) інтегруються у структуру скла під час виробництва, забезпечуючи довготривалу дію та рівномірне екранування по всій поверхні. Їх перевага – поєднання прозорості та екранування: тонкі оксидні шари практично не впливають на видимість, зате знижують проникність скла для радіохвиль на порядки. Такі покриття стабільніші за плівки (не піддаються випадковому механічному пошкодженню, якщо нанесені всередині склопакета), але їх нанесення потребує високотехнологічних процесів і додає вартості; вони не підлягають ремонту без заміни всього скляного модуля. MXene- та FSS-рішення нині перебувають

на стадії досліджень. МХене-плівки вирізняються гнучкістю та потенціалом досягти високого екранування при мінімальній товщині, однак відкритими залишаються питання їх довговічності (стійкість до окиснення, вологи, ультрафіолету) і масштабування виробництва. FSS-візерунки забезпечують вибіркове екранування, даючи змогу «відкрити вікно» для потрібних сигналів або світла, не жертвуючи безпекою. Недолік – складність дизайну та виготовлення: для ефективної роботи FSS-елементи повинні мати мікрометрові розміри і точну періодичність, що вимагає прецизійних методів друку або травлення. Щоб зберегти прозорість, металева сітка повинна бути досить тонкою, а це знижує її міцність; тому такі покриття доцільно захищати, ламінуючи їх між шарами скла. Ймовірно, саме такі комбіновані матеріали здатні забезпечити оптимальний баланс між прозорістю та екрануванням і, ймовірно, визначатимуть розвиток технологій кіберстійких вікон для SCIF, центрів обробки даних та інших критичних об'єктів у найближчому майбутньому.

Вибір конкретного рішення залежатиме від необхідного рівня захисту, допустимого впливу на прозорість та бюджету. Для максимального захисту секретного приміщення варто комбінувати підходи: наприклад, встановити ламіновані подвійні склопакети з вбудованим покриттям (оксидним або сітчастим), а додатково всередині наклеїти захисну плівку. Така багаторівнева оборона зробить витік інформації практично неможливим: навіть якщо лазер частково пройде скло, його відбиватиме плівка; а RF-сигнали будуть ослаблені і покриттям, і плівкою. Звісно, у більшості випадків достатньо чогось одного – плівки як найбільш гнучкого рішення. Встановлення спеціалізованої багатофункціональної плівки на існуючі вікна дає значний ефект за відносно низької вартості і мінімального впливу на зовнішній вигляд. Якщо ж будівля лише проектується, доцільно обрати склопакети із кіберстійким покриттям – наприклад, енергозберігаючі пакети з додатковим захисним напленням або з інтегрованою металевою сіткою.

Список літератури

1. Дудикевич В. Б., Собчук І. С., Ракобовчук В. О. Пасивний захист інформації від лазерного зондування. *Вісник НУ «Львівська політехніка»*. 2013. №771. С. 118–123. URL: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2017/jun/3667/dudykevychvbsobchukisrakobovchukvo.pdf>
2. Ångskog P., Bäckström M., Vallhagen B. Measurement of Radio Signal Propagation through Window Panes and Energy Saving Windows. *Proc. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. 2015. P. 74–79. URL: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:860029/FULLTEXT01.pdf>
3. Дудикевич В. Б., Опірський І. Р., Дзяний Н., Ракобовчук Л., Гаранюк П. Дослідження оптимізації параметрів лазерного датчика вібрації для протидії лазерним системам розвідки. *Кібербезпека: освіта, наука, техніка*. 2022. №3(15). С. 110–123. URL: <https://csecurity.kubg.edu.ua/index.php/journal/article/view/339>
4. Trend Topic (Glassbel). Surveillance-proof window glass (Glassbel Glass-Shield). *Прес-реліз Glassbel*. 2020.
5. Дудикевич В. Б., Собчук І. С., Гаранюк П. І., Ракобовчук В. О., Дей В. А. Аналіз захисних характеристик сучасних видів скла в широкому діапазоні частот по акустичному каналу витоку. *Інформатика та математичні методи в моделюванні*. 2014. Т. 4. №4. С. 324–331. URL: <http://www.irbis-nbuv.gov.ua/publ/REF-0000600525>
6. Партика А. Дослідження впливу параметрів віброуючої поверхні на значення відхилення відбитого лазерного променя. *Наук. вісник НУ «Львівська політехніка»*. 2014. №797. С. 3–8. URL: <https://ena.lpnu.ua:8443/server/api/core/bitstreams/340f09e5-92e9-460a-ba0d-cf946b14935c/content>
7. Zeng Y., Pan P., Cao Y. Test and analysis of window vibration for anti-laser-eavesdropping. *Applied Acoustics*. 2021. Vol. 176. 107871. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0003682X20309762>

8. Signals Defense LLC. RF Window Film: An Innovative Solution for Data and Privacy Protection. *White Paper*. Oct 2023. URL: <https://signalsdefense.com/rf-window-film-an-innovative-solution-for-data-and-privacy-protection/>
9. Bonwyke Ltd. SD2500/2510 Technical Specification. 2020. URL: https://www.bonwyke.co.uk/wp-content/uploads/2020/08/SD2500_2510TechSpec_2016.pdf
10. Haverkamp GmbH. Profilon Shielding Films – Protection against eavesdropping. 2025. URL: https://www.folienverbund.ch/wp-content/uploads/2022/04/HAVERKAMP_PROFILON-AntiSpy.pdf
11. US Department of Defense. Low Emissivity and EMI Shielding Window Films. US Patent US20110308693A1. 2011. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/9b/51/83/1c1ede29d97e2a/US20110308693A1.pdf>
12. Pilkington (NSG Group). DataStop Electromagnetic Shielding Glass – Product Brochure. 2010. URL: https://www.ramayes.com/data%20files/tempest%20security/new_datastop_brochure.pdf
13. Ракобовчук Л. М., Дзяний Н. Р., Антоневиц М. С. Захисні характеристики плівок від лазерних систем акустичної розвідки на прикладі одношарового відбиваючого покриття діоксиду гафнію. *Український наук. журн. інформаційної безпеки*. 2023. Т. 29. №1. С. 32–40. URL: <https://www.researchgate.net/publication/370827426>
14. Li M., Zarei M., Mohammadi K., Walker S. B., LeMieux M., Leu P. W. Silver Meshes for Record-Performance Transparent Electromagnetic Interference Shielding. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2023. Vol. 15. P. 30591–30599. URL: <https://doi.org/10.1021/acsami.3c04428>
15. Jin M., Chen W., Liu L.-X., Zhang H.-B., Ye L., Min P., Yu Z.-Z. Transparent, conductive and flexible MXene grid/silver nanowire hierarchical films for high-performance electromagnetic interference shielding. *Journal of Materials Chemistry A*. 2022. Is. 27. URL: <https://doi.org/10.1039/D2TA03689D>
16. US Patent. Transparent EMI-shielded window. US4152741. URL: <https://patents.google.com/patent/US4152741>
17. University of Chicago. Borofloat 33 – Technical Data Sheet. URL: https://psec.uchicago.edu/glass/borofloat_33_e.pdf
18. Radiation Shielding Glass – Technical Datasheet. AL Shielding. URL: https://alshielding.com/wp-content/uploads/2019/07/Radiation_Shielding_Glass_2.0mm_max_lead_equivalency.pdf
19. bQuiet. The Science Behind Soundproof Windows. *Блогова стаття*. 2025. URL: <https://bquiet.ca/the-science-behind-soundproof-windows/>
20. Signals Defense. Shielding Films. URL: <https://signalsdefense.com/shielding-films/>
21. Mass International. Smartgard Signals Defense Anti-Eavesdropping Glazing. URL: <https://www.massinternational.com/shop-2/smartgard-ballistic-blast-rated-glazing/smartgard-signals-defense-anti-eavesdropping-glazing>
22. Solartek Films. Vianovix Spylock 35 Shielding Report. URL: <https://solartekfilms.co.uk/assets/window-film/datasheets/Vianovix-Spylock-35-shielding-report.pdf>
23. YShield. RDF72 HF Shielding Window Film – Product Page. URL: https://www.yshield.com/en/yshield-shielding-window-film-rdf72-hf-width-152-cm-1-meter_171_1102/
24. Дзяний Н. Р. Захист мовної інформації від лазерних систем акустичної розвідки. Дис. д-ра філософії (техн. наук). Львів: НУ «Львівська політехніка», 2024. 190 с.
25. Dontech. EMI/RFI Shielding Products; MDPI *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13(8). 4846. URL: <https://dontech.com/design-elements/emi-rfi-shielding-products/>
<https://www.mdpi.com/2076-3417/13/8/4846>

26. Parker Chomerics (Parker Hannifin Corp.). Win-shield G EMI Shielded Glass Windows – Spec Sheet. 2013. URL: <https://www.parker.com/content/dam/Parker-com/Literature/Chomerics/Parker-Chomerics-WIN-SHIELD-G-TB1085.pdf>
27. Klochko N. P., Barbash V. A. Biodegradable transparent films with copper iodide and nanocellulose for UV and high-energy visible light protection. *Solar Energy*. 2021. Vol. 220. P. 852–863. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X21002954>
28. Deng Y., Chen Y., Liu W., Wu L., Wang Z., Xiao D., Meng D., Jiang X., Liu J., Zeng Z., Wu N. Transparent electromagnetic interference shielding materials using MXene (Review). *Carbon Energy*. 2024. Vol. 6(11). e593. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/cey2.593>
29. Safe Living Technologies. Signal Protect Clear RF Shielding Window Film – Product Specifications. 2023. URL: <https://safelivingtechnologies.com/content/Products/SignalProtectClearWindowFilmSpecifications.pdf>
30. Pilkington (NSG Group). NSG TEC European Technical Datasheet. 2025. URL: https://pilkington.com.tr/wp-content/uploads/2025/06/NSG_TEC_European_technical_datasheet.pdf
31. Vitro Architectural Glass. TD-151 Technical Data. URL: <https://www.vitroglazings.com/media/111k3zcc/vitro-td-151.pdf>
32. Pilkington (NSG Group). NSG TEC European Technical Datasheet. 2025. URL: https://pilkington.com.tr/wp-content/uploads/2025/06/NSG_TEC_European_technical_datasheet.pdf
33. Farooq U., Iftikhar A., Najam A. I., Khan Sh. A., Shafique M. F. An optically transparent dual-band frequency selective surface for polarization independent RF shielding. *Optics Communications*. 2023. Vol. 546. 129824. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2023.129824>

Н.Р. Дзяний, Х.С. Бесага, О.І. Гарасимчук, М.Є. Швед

REVIEW OF MODERN PROTECTIVE MATERIALS FOR PREVENTING CONFIDENTIAL INFORMATION LEAKAGE THROUGH WINDOW STRUCTURES

N. Dzianyi, Kh. Besaga, O. Harasymchuk, M. Shved

Lviv Polytechnic National University
12, Stepan Bandera St., Lviv, 79013, Ukraine
Emails: nazarii.r.dzianyi@lpnu.ua, khrystyna.s.besaga@lpnu.ua,
oleh.i.harasymchuk@lpnu.ua, mariia.y.shved@lpnu.ua

The paper examines window structures as potential channels of data leakage. Two main vectors are considered: the acoustic channel, which employs laser systems to capture sound vibrations from glass surfaces, and the electromagnetic channel, which arises from the leakage of radio frequency signals (Wi-Fi, Bluetooth) beyond the premises. A review and comparative analysis of modern passive protection methods—implemented directly in window materials without requiring external power supply—has been conducted.

Three key categories of materials were studied: modified window glass, specialized self-adhesive films, and stationary functional coatings. The analysis shows that ordinary glass, even in multilayer double-glazed units, provides only partial suppression of vibrations and cannot be regarded as a reliable barrier against advanced espionage tools. In contrast, specialized solutions containing metallized layers, nanoscale grids of noble metals, or dielectric structures demonstrate significantly higher efficiency. The paper presents quantitative shielding indicators, measured in decibels (dB), for different materials, confirmed by international testing (including ASTM F3057-14). Protective films such as Signals Defense SD2500 provide shielding up to 40+ dB, while innovative coatings based on silver nanogrids can achieve record values of 48–58 dB while maintaining high optical transparency. Special attention is given to dielectric coatings, particularly hafnium dioxide (HfO₂), which enhance laser beam reflection while remaining visually undetectable.

It is concluded that achieving the maximum level of cyber protection requires a combination of several approaches. The use of multi-chamber double-glazed units, combined with the application of high-tech coatings or protective films on the inner glass, creates a reliable and durable barrier that ensures information confidentiality and resilience against electronic espionage.

Keywords: window cyber resilience, passive information protection, protective window films, functional glass coatings, hafnium dioxide, nanogrids.