

Запропонований винахід належить до приладів реєстрації задимленості для виявлення пожежної загрози і сповіщення про небезпеку загорання.

Найбільш розповсюдженими і важливим серед них є детектори диму двох типів: іонізаційні та оптичні [1]. Іонізаційні детектори використовують радіоактивне джерело для іонізації повітря в камері, створюючи канал для протікання електричного струму. Частинки диму перешкоджають іонізації і зменшують струм, викликаючи сигнал тривоги.

Оптичні детектори використовують явище розсіювання і зміни напрямку поширення променя світла на частинках диму, що потрапили у камеру детектора [2, 3]. Факт розсіювання або перешкоджання ходу променя реєструється фотодетектором і сприймається як наявність диму. Безпосередньо дим - це дрібнодисперсний аерозоль з розмірами твердих частинок від 0,1 до 0,001 мкм. В той же час частинки пилу мають розміри більші ніж 10 мкм. Розділяють наступні типи диму: дим з тліючої стадії пожежі (як правило, він складається з великих частинок горіння - від 0,3 до 10,0 мкм та дим зі стадії пожежі з відкритим горінням (як правило, складається з мікроскопічних частинок горіння - від 0,01 до 0,3 мкм). Іонізаційні детектори найкраще виявляють швидкоплинні пожежі, що продукують дим з частинками 0,01-0,4 мікрона, темного чи чорного кольору (так званий чорний дим), в той час як більш сучасні фотоелектричні детектори ефективніші при виявленні повільно-тліючих пожеж, з димом світлого (білого або сірого) кольору (так званий білий дим), з більшими частинками 0,4-10 мкм. Фотоелектричні детектори диму швидше реагують на займання, у його ранній стадії (мається на увазі процес тління, до того, як спалахне полум'я). В той час як іонізаційні детектори диму реагують швидше у стадії пожежі з вогнем (як правило 30-60 секунд). Крім того іонізаційні детектори мають знижену чутливість у середовищах з інтенсивним потоком повітря, і через це фотоелектричний детектор диму є надійнішим для виявлення диму як для фази пожежі з тлінням, так і з відкритим вогнем, оскільки потоки повітря не впливають на його функціональність.

Незважаючи на те, що такі датчики диму є дуже розповсюдженими, (особливо оптичні датчики), у них є суттєвий недолік, який пов'язаний з хибним спрацюванням на аерозольні, або пилові частинки, що може бути пов'язане, наприклад, з життєдіяльністю людини у побуті, а не з виникненням пожежі. Це призводить до значних і не виправданих матеріальних втрат, пов'язаних з реакцією на хибний пожежний виклик. Наприклад, з позаштатною посадкою літаків чи спрацювання системи пожегогасіння, внаслідок хибної тривоги.

Так, оптичні датчики диму [4-6] страждають від хибних спрацювань пов'язаних з наявністю пилу, а не диму, оскільки чутливий елемент не розрізняє задимленість і запиленість приміщення. Тому актуальним є завдання створити оптичний пилостійкий сенсор диму з пониженою імовірністю хибного спрацювання від частинок звичайного пилу, що буде призводити до суттєво меншої імовірності виникнення хибної тривоги у запилених приміщеннях.

За прототип вибрано триканальний детектор задимленості [7], принцип роботи чутливого елемента одного з каналів якого полягає у збудженні поверхневого плазмон-поляритонного резонансу (ПППР) в золотій плівці, що межує з навколишнім середовищем. Чутливим елементом цього каналу є скляна пластина з напиленою тонкою плівкою золота. Збудження ПППР відбувається з допомогою лазерного джерела р-поляризованого випромінювання в геометрії Кречмана з використанням скляної призми зв'язку. Кут між падаючим та відбитим оптичним випромінюванням в такому сенсорі відповідає куту плазмонного резонансу при наявності на чутливому елементі молекул оксиду вуглецю. Наявність диму призводить до збільшення концентрації оксиду вуглецю в повітрі та змінює оптичні параметри середовища і призводить до кутового зсуву ПППР, що реєструється по зміні інтенсивності променя світла додатковим фотодетектором. Детектор містить ще два канали реєстрації диму з допомогою вимірювання розсіювання світла від двох світлодіодів, а також напівпровідникові сенсори температури. Такий багатоканальний детектор є достатньо чутливим до диму і нечутливий до пилу за рахунок використання додаткових датчиків температури та додаткових оптичних сенсорів. Недоліком такого технологічного рішення є його великі габарити, конструкційна складність, затруднена мініатюризація та підвищена вартість.

Таким чином, задачею дійсного винаходу є створення оптичного одноканального датчика диму зі збереженням чутливості сенсора до диму, та нечутливості до частинок пилу, спрощеної конструкції, з можливістю мініатюризації та зменшених матеріальних затратах на виготовлення.

Поставлена задача вирішується тим, що пилостійкий оптичний детектор задимленості, що містить лазерний діод, монохроматичне випромінювання якого є р-поляризованим, чутливий елемент з напиленим шаром золота, що межує з середовищем з продуктами горіння, та електронну частину з модулем прийому і обробки інформації, який відрізняється тим, що в якості чутливого елемента в ньому використовується плазмон-поляритонний фотодетектор (ППФД) з золотим чи алюмінієвим покриттям, крім того, він містить два лазерних діоди з однаковими довжинами хвиль випромінювання та різними кутами падіння променів на поверхню ППФД, які відповідають положенню півширини максимуму на кутовій залежності фотоструму ППФД, або ж два лазерних діоди з різними довжинами хвиль випромінювання, які відповідають спектральному положенню півширини максимуму у спектрі фотоструму ППФД, при цьому кути падіння випромінювання обох лазерів на поверхню ППФД

однакові.

Запропонований датчик диму може базуватися на ППФД на основі р-п переходу в кремнії, або ж бар'єру Шотткі. Зокрема, фотодетектор першого типу являє собою фоточутливу кремнієву структуру з глибиною залягання р-п переходу 100-150 нм та сформованими омичними тильними контактами з Al. Глибина залягання р-п переходу вибрана таким чином, щоб його досягало поле ПППР, яке експоненційно спадає вглиб напівпровідника. При цьому воно буде генерувати фотоносії, які ефективно розділяються в вбудованому електричному полі цього переходу. На поверхню кремнієвої пластини нанесена металева (Au, Al) ґратка, виготовлена за технологією інтерференційної фотолітографії з використанням халькогенідного фоторезисту. Параметри дифракційної ґратки (період, глибина рельєфу, товщина металевої плівки у мінімумах рельєфу) вибираються таким чином, щоб забезпечити ефективне збудження ПППР та максимальну величину резонансного значення фотоструму.

Робота ППФД як сенсор диму випробувана на спеціально виготовленому стенді, з конструкцією, що ґрунтується на вимогах UL 217 [8]. Згідно зі стандартом UL217 спрацювання датчика диму має відбутись протягом 2 хвилин при перевищенні оптичної густини диму  $O=1,6\text{ \%}/\text{м}$ . Для нашого випадку при умові, що дим від тканини є сірий, це відповідає зменшенню пропускання  $T$  зі 100 % до величини меншої  $T_m=94\text{ \%}$ . На стенді генерувався дим від тліючої тканини і після досягнення коефіцієнта пропускання світла в камері 94 %, сенсори витримувались протягом 2 хвилин. Кутові (на довжині хвилі 650 нм, р-поляризація) та спектральні (при куті падіння світла 6 кутових градусів) залежності фотоструму ППФД на основі золотої дифракційної ґратки з періодом 800 нм представлені на Фіг. 1 та 2, відповідно. Криві 1, 3 відповідають характеристикам фотоструму ППФД до впливу диму, а криві 2, 4 - характеристики ППФД після перебуванні в камері з димом від тканини.

На цих рисунках видно зміщення спектрально-кутового положення резонансу фотоструму внаслідок осідання частинок диму на поверхню ППФД. Дим від тканини призводить до суттєвого зсуву кутового (на 5 градусів) та спектрального (на 27 нм) положення плазмон-поляритонного резонансу і пов'язаного з ним фотоструму в сторону більших довжин хвиль і більших кутів. Такі спектральні а також кутові зміни свідчать про належну чутливість сенсору до диму.

Для оцінки впливу пилу на сенсори диму на основі ППФД, той же зразок був розміщений в закритій герметичній камері об'ємом 0.1 м, де згідно рекомендацій [8], було розпилено 60 г цементної суміші, що підтримувалась у розпиленому стані упродовж 15 і 30 хвилин за допомогою вентиляторів. На Фіг. 3 представлені кутові (на довжині хвилі 650 нм, р-поляризація), а на Фіг. 4 спектральні (при куті падіння світла 6 кутових градусів) залежності фотоструму досліджуваного ППФД до (криві 5, 8), та після 15 (6, 9) та 30 (7, 10) хвилин перебування в камері з пилом. Видно, що ні спектральне, ні кутове положення резонансу фотоструму не змінилось. Змінилась тільки амплітуда, що є наслідком затінення частини зразка пилом. З цього можна зробити висновок, що частинки пилу занадто великі, щоб наблизитись до поверхні зразка (до того ж, рельєфного) на відстань порядку довжини хвилі і суттєво впливати на збудження і поширення ПППР, тому запропонований сенсор диму не чутливий до пилу.

Приклади конкретного виконання:

Приклад 1

На Фіг. 5 зображена схема детектора задимленості на основі ППФД, який містить два лазерних діоди (11, 12) з однаковими довжинами хвиль випромінювання (в даному випадку  $\lambda_1=\lambda_2=650\text{ нм}$ ), які по чергово освітлюють ППФД. Чутливий елемент ППФД - це кремнієва пластина (14) в приповерхневому шарі якої сформовано р-п перехід, на поверхню пластини нанесено золоту ґратку (13), а на тильну поверхню - омичний алюмінієвий контакт (15). Кути падіння випромінювання цих лазерів різні і вони відповідають положенню півширини максимуму на кутовій залежності фотоструму ППФД в повітрі, тобто  $\theta_1$  та  $\theta_2$  на Фіг. 1. Детектор також включає електронну частину (16), яка містить модуль прийому і обробки інформації ARDUINO. Модуль керує роботою лазерних діодів і визначає відношення значень фотоструму, збуджуваних лазерами. При відсутності диму, як видно з Фіг. 1, ці значення фотоструму ( $I_1$  та  $I_2$ ) рівні між собою і їх відношення дорівнює одиниці. Коли ж на поверхню ППФД потрапляють частинки диму, кутове положення поверхневого плазмон-поляритонного резонансу зміщується. При цьому значення фотоструму, збуджуваного лазерним діодом з меншим кутом падіння випромінювання на ППФД ( $\theta_1$  на Фіг. 1) зменшується, тобто  $I_1$  прямує до  $I_1'$ . В той же час фотострум, який збуджується другим лазерним діодом з більшим кутом падіння випромінювання ( $\theta_2$  на Фіг. 1) зростає,  $I_2$  прямує до  $I_2'$ . Суттєво зростає і відношення значень фотоструму ( $I_2'/I_1'$ ), і при досягненні критичної величини модуль обробки інформації включає сигнал сповіщення, чи систему пожехогасіння.

Приклад 2

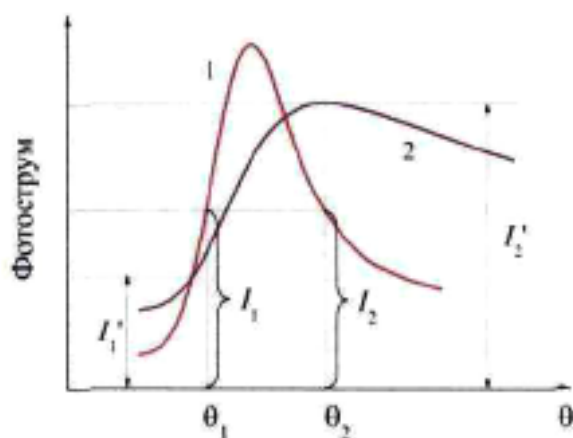
На Фіг. 6 зображена схема детектора задимленості на основі ППФД, який містить два лазерних діоди (17, 18) з різними довжинами хвиль випромінювання ( $\lambda_1$  та  $\lambda_2$ ), які по чергово освітлюють ППФД. Кути падіння випромінювання від обох лазерів однакові і в даному випадку  $\theta_1=\theta_2=6^\circ$ . Чутливий елемент ППФД той же самий, як і в прикладі 1 - це кремнієва пластина (14) в приповерхневому шарі

якої сформовано р-п перехід, на поверхню пластини нанесено золоту ґратку (13), а на тильну поверхню - омичний алюмінієвий контакт (15). Довжини хвиль цих лазерів вибрано таким чином, що вони відповідають спектральному положенню півширини максимума фотоструму ППФД в повітрі, тобто  $\lambda_1$  та  $\lambda_2$  на Фіг. 2. Цей детектор теж має електронну частину (16) з модулем прийому і обробки інформації ARDUINO, який керує роботою лазерних діодів і визначає відношення значень фотоструму, збуджуваних лазерами. Принцип роботи цього варіанта детектора задимленості аналогічний прикладу 1. При відсутності задимлення значення фотоструму ППФД від двох лазерів ( $I_1$  та  $I_2$ ) рівні між собою і їх відношення дорівнює одиниці. При осадженні на ППФД субмікронних часточок диму це відношення значень фотоструму ( $I_2'/I_1'$ ) суттєво зростає, і при досягненні критичної величини модуль обробки інформації включає сигнал сповіщення, чи систему пожежогасіння.

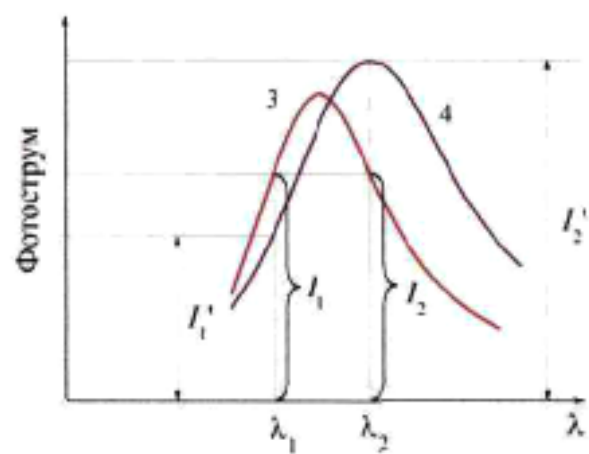
Таким чином, одноканальний детектор задимленості, що заявляється, є достатньо чутливим до диму та не чутливим до пилу; має малі габаритні розміри за рахунок використання ППФД, що дає можливість об'єднання в одному елементі збудження ПППР і його реєстрацію у вигляді фотоструму та дозволяє здійснити його мініатюризацію; має нижчу собівартість ніж прототип, оскільки використовує кремній-сумісні технології та меншу кількість компонент, ніж прототип; нечутливість до пилу досягається за рахунок способу отримання сигналу поверхневого плазмон-поляритонного резонансу і пов'язаного з ним резонансу фотоструму; наявність пилу навіть на поверхні сенсора, що заявляється, призводить тільки до зменшення величини фотоструму внаслідок затінення частини поверхні ППФД, а тому не буде реєструватись детектором.

Джерела інформації:

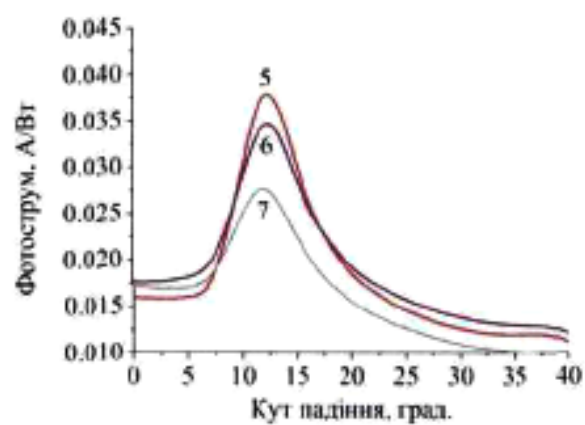
1. Fleming J. M. Photoelectric and Ionization Detectors-A Review of The Literature Re-Visited // Retrieved December. - 2004. - Т. 31. - С. 2010.
2. Войтович, И., В. Корсунский, Сенсоры на основе плазмонного резонанса: принципы, технологии, применения. - К.: Сталь, 2011.
3. Homola, J., Surface plasmon resonance sensors for detection of chemical and biological species. Chemical reviews, 2008.108(2): p. 462-493.
4. Пат. UA 76633. Оптичний датчик диму / Кравченко Ю.С., Косаковський І.А. № u201207770; заявка. 25.06.2012, опубл. 10.01.13, Бюл. № 1.
5. Пат. UA 37266. Датчик диму / Пойманов О.С. № s 2017 02441; заявка. 28.12.2017, опубл. 25.07.18, Бюл. № 14.
6. Пат. UA 42892. Датчик диму радіоканальний / Федоренко С. В. № s 2020 01521; заявка. 06.10.2020, опубл. 10.12.20, Бюл. № 23.
7. Дорожинський Г.В., Маслов В.П., Качур Н.В., Філончук Р.Л., Багатоканальний детектор задимленості. Патент 91922 Україна, МПК (2006.01) G08B 17/10. Заявл. 13.01.2014; Опубл. 25.07.2014, Бюл. №14.
8. UL217. - Single and Multiple Station Smoke Alarms. // Underwriters Laboratories. Inc., Northbrook, IL, 60062.



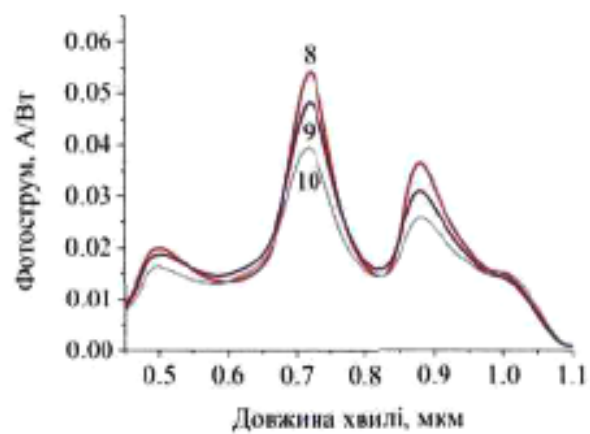
Фіг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4

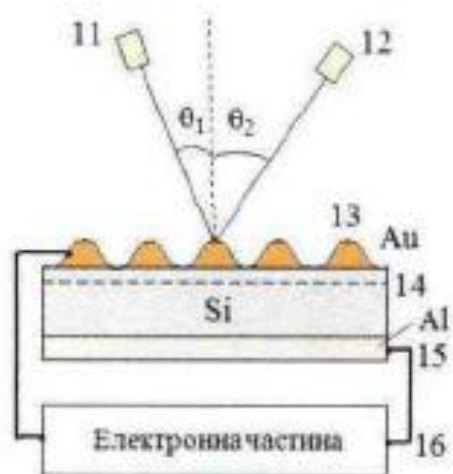


Fig. 5

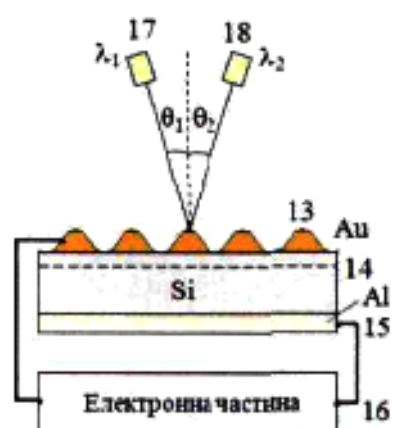


Fig. 6