

Нанопотонні елементи новітніх пакувань (моделювання процесів виготовлення)

О.О. Саранулова, В.П. Шерстюк, д.х.н., ВПІ НТУУ «КПІ», м. Київ

Нанопотонні елементи, які друкують на зовнішній або внутрішній поверхні матеріалу пакувань, призначені для забезпечення функціональності новітніх активних і розумних пакувань. Нанопотонні елементи повідомляють споживачу харчового продукту про процеси, які відбуваються чи відбувалися всередині або зовні пакування, таким чином інформуючи його про те, чи є запакований продукт безпечним і придатним до споживання. Дія нанопотонних елементів заснована на здатності нанорозмірного люмінесцентного компонента нанесеної друкарськими методами нанопотонної фарби змінювати інтенсивність люмінесценції при контакті із речовинами, які утворюються в запакованому продукті в результаті процесів розпаду. Таким чином, використання новітніх пакувань підвищує безпечність споживання запакованих харчових продуктів.

Фотолюмінесцентні характеристики друкованих нанопотонних елементів можна змінювати у певних межах через зміну параметрів технологічного процесу їх поліграфічного виготовлення. Отже, для одержання друкованих нанопотонних елементів новітніх пакувань із потрібними характеристиками фотолюмінесценції необхідно врахувати вплив технологічних параметрів у процесі друкування.

Аналітичні дослідження процесу поліграфічного виготовлення нанопотонних елементів новітніх пакувань практично не представлені в літературних джерелах. Деякі експериментальні дослідження впливу параметрів друкарських і післядрукарських процесів наведено в [1–4]. Таким чином, актуальним є моделювання процесів виготовлення друкованих нанопотонних елементів новітніх пакувань з метою прогнозування їхніх люмінесцентних характеристик за відомими параметрами технологічного процесу.

З метою встановлення аналітичних залежностей впливу параметрів технологічного процесу виготовлення друкованих нанопотонних елементів новітніх пакувань на їхні фотолюмінесцентні характеристики було досліджено процеси взаємодії друкованого шару нанопотонної фарби (НФ) і задрукованого матеріалу (ЗМ). Пояснення процесів, які відбуваються при утворенні люмінесценції у системі «НФ — ЗМ», надає схема, наведена на рис. 1. Світловий потік із певною силою світла $I_{зб}$, що відповідає довжині хвилі збудження люмінесценції, потрапляє на відбиток на задруковані і незадруковані ділянки. На незадрукованих ділянках відбитку в результаті часткового поглинання і відбивання отриманої енергії світла задрукований матеріал випромінює світловий потік, що відповідає інтенсивності люмінесценції ЗМ ($I_{ЗМ}$).

На задрукованих ділянках відбитку, завдяки прозорому шару нанопотонної фарби, частина енергії світла поглинається шаром НФ, який випромінює світловий потік, що відповідає інтенсивності люмінесценції НФ ($I_{НФ}$). Частина енергії світла надходить до задрукованого матеріалу, і в результаті часткового поглинання і відбивання отриманої енергії світла задрукований матеріал випромінює світловий потік, що відповідає інтенсивності люмінесценції ЗМ, вкритого шаром НФ ($I_{ЗМ}^*$).

Теоретично є можливим збудження люмінесценції НФ світловим потоком люмінесценції ЗМ, який знаходиться під шаром НФ. Проте довжина хвилі збудження люмінесценції ЗМ і НФ складає 330 нм і лежить в УФ-ділянці спектра, тоді як одержаний світловий потік люмінесценції знаходиться у видимій ділянці спектра. На підставі цього було зроблено припущення, що люмінесценція ЗМ під

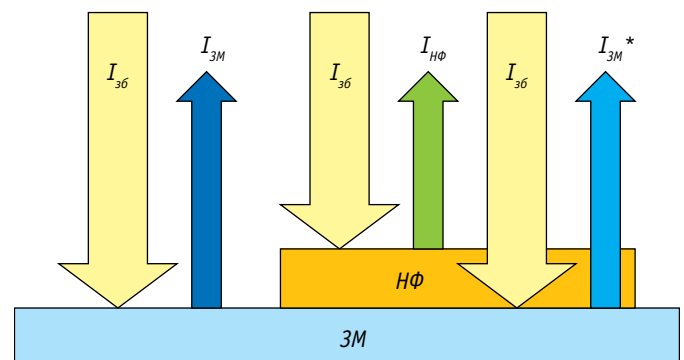


Рис. 1. Схема утворення люмінесценції в системі «НФ — ЗМ»



шаром НФ не здійснює значного внеску в процеси збудження люмінесценції, які відбуваються в шарі НФ. Виходячи з цього, для суцільних задруканих ділянок інтегральна інтенсивність люмінесценції I_c становитиме:

$$I_c = I_{НФ} + I_{ЗМ}^* \quad (1)$$

Нехай

$$I_{ЗМ}^* = I_{ЗМ} \cdot k_{гасіння} \quad (2)$$

де $k_{гасіння}$ – коефіцієнт гасіння люмінесценції ЗМ, вкритого шаром НФ.

Тоді

$$I_c = I_{НФ} + I_{ЗМ} \cdot k_{гасіння} \quad (3)$$

Для растрових ділянок інтегральна інтенсивність люмінесценції I_p становитиме:

$$I_p = (1 - R/100) I_{ЗМ} + R/100 I_c \quad (4)$$

де R – відсоток растра.

Таким чином, підставивши (3) у (4), отримуємо:

$$I_p = (1 - R/100) I_{ЗМ} + R/100 (I_{НФ} + I_{ЗМ} \cdot k_{гасіння}) \quad (5)$$

Для експериментальної перевірки одержаних аналітичних залежностей необхідно попередньо окремо виміряти інтенсивність люмінесценції ЗМ за стандартних умов та знати інтенсивність люмінесценції шару НФ, надрукованого на нелюмінесцюючому ЗМ, яка є незмінною для відповідного складу нанофотонної композиції певної товщини. Останні значення були отримані в попередніх дослідженнях, наведених у [2]:

$$I_{НФ} = 0,00005\delta^2 + 0,0015\delta + 0,3055, \quad (6)$$

де δ – товщина фарбового шару (шару НФ).

Спектри люмінесценції було записано за допомогою флуоресцентного спектрометра Perkin Elmer LS 55; довжина хвилі світла, яким збуджувалася люмінесценція, становила $\lambda = 330$ нм. Коефіцієнт гасіння люмінесценції ЗМ, вкритого шаром НФ, $k_{гасіння}$ було визначено експериментальним шляхом для низки товщин шару НФ з використанням нанофотонних композицій із певним складом. Було використано декілька типів ЗМ із різними люмінесцентними властивостями, і було визначено, що $k_{гасіння}$ є незалежною від типу ЗМ величиною. На рис. 2 наведено одержану залежність $k_{гасіння}$ від товщини шару НФ δ .

Одержана залежність описується аналітичним виразом:

$$k_{гасіння} = -0,00003 \delta^2 + 0,0002 \delta + 1. \quad (7)$$

Було обчислено із використанням аналітичних залежностей (5) і (7) та з урахуванням люмінесценції незадрукованих ділянок полімеру $I_{ЗМ}$ значення інтегральної інтенсивності люмінесценції друкованих нанофотонних елементів від відсотку плашки при використанні фотоолімерних форм тампонного друку. Було здійснено порівняння експериментальних результатів із розрахунковими. Для кожної точки було проведено співставлення теоретичних і експериментально отриманих значень інтенсивності люмінесценції і визначено, що у випадку форм зі змінною

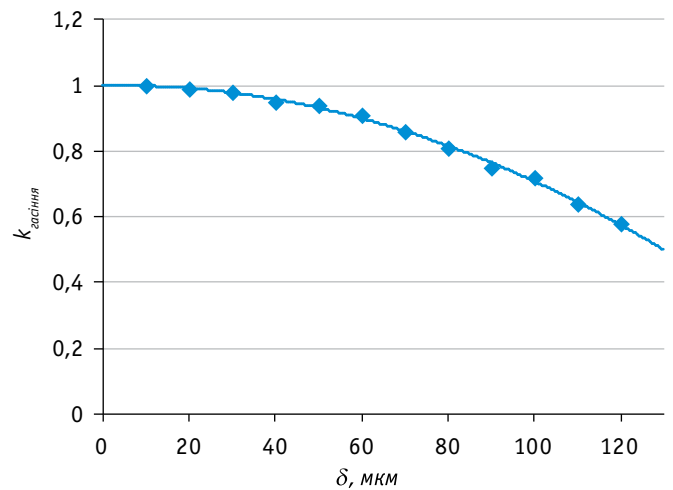


Рис. 2. Залежність коефіцієнта гасіння люмінесценції ЗМ, вкритого шаром НФ, ($k_{гасіння}$) від товщини шару НФ (δ)

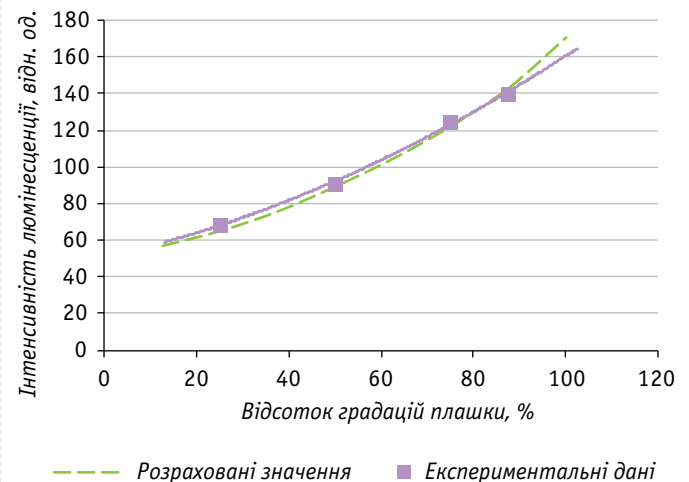


Рис. 3. Залежність інтегральної інтенсивності люмінесценції нанофотонних елементів від відсотка градацій плашки, що регулюється змінною глибиною друкувального елемента

глибиною друкувального елемента відхилення співставлених даних знаходяться у межах 3,1 %. Як видно з рис. 3, експериментальні дані відповідають розрахунковим значенням інтенсивностей люмінесценції, що дає можливість зробити висновок про адекватність запропонованих математичних моделей.

Аналогічні порівняння експериментальних результатів із розрахунковими було проведено для випадку використання форм зі змінним розміром растрової крапки, і визначено, що відхилення співставлених даних знаходяться у межах 2,8 %. Як видно з рис. 4, експериментальні дані відповідають розрахунковим значенням інтенсивностей люмінесценції, що дає можливість зробити висновок про адекватність запропонованих математичних моделей.

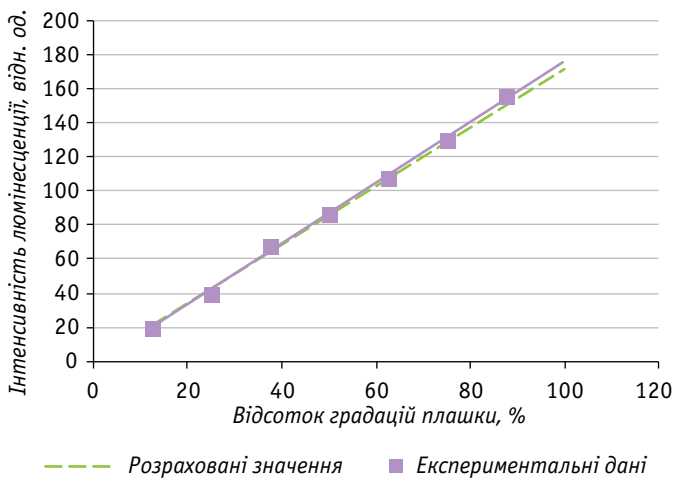


Рис. 4. Залежність інтегральної інтенсивності люмінесценції нанофотонних елементів від відсотка градацій плашки, що регулюється змінним розміром растрової крапки



Оскільки в новітніх пакуваннях є можливим друкування нанофотонних елементів на внутрішній поверхні пакування, то показники люмінесценції такого елемента будуть зчитуватися крізь шар матеріалу пакування — полімеру. Процеси, які відбуваються при утворенні люмінесценції в системі «НФ — ЗМ» при вимірюванні люмінесценції друківаних нанофотонних елементів крізь шар плівки, наведені на рис. 5. Світловий потік із певною силою світла $I_{зб}$, що відповідає довжині хвилі збудження люмінесценції, потрапляє на відбиток на прозорий ЗМ і крізь нього — на задруквані ділянки. Прозорий ЗМ у результаті часткового поглинання і відбивання отриманої енергії світла випромінює світловий потік, що відповідає інтенсивності люмінесценції ЗМ $I_{ЗМ}$. Крізь прозорий ЗМ частина енергії світла надходить до шару НФ і частково поглинається та відбивається ним, у результаті шар НФ випромінює світловий потік, який відповідає інтенсивності люмінесценції НФ, вкритого шаром ЗМ, $I_{НФ}^*$.

Теоретично є можливим збудження люмінесценції ЗМ світловим потоком люмінесценції НФ, який знаходиться під шаром ЗМ. Проте довжина хвилі збудження люмінесценції ЗМ і НФ становить 330 нм і лежить в УФ-ділянці спектра, тоді як одержаний світловий потік люмінесценції знаходиться у видимій ділянці спектра. На підставі цього було зроблено припущення, що люмінесценція НФ під шаром ЗМ не здійснює значного внеску у процеси збудження люмінесценції, які відбуваються у шарі ЗМ.

Для врахування впливу шару плівки на інтенсивність люмінесценції друківаних нанофотонних елементів, вимірних крізь шар плівки, було введено коефіцієнт товщини плівки $k_{плівки}$, аналітичну залежність для розрахунку якого було визначено експериментальним шляхом аналогічно до визначення аналітичної залежності для обчислення

$k_{гасіння}$. На рис. 6 наведено одержану залежність $k_{плівки}$ від товщини шару НФ δ .

Одержані залежності описуються таким чином. Для матової поліпропіленової плівки $k_{плівки}$ визначається за таким виразом:

$$k_{плівки} = -0,00001 \delta^2 + 0,0057 \delta + 0,2282. \quad (8)$$

Для глянцевої поліпропіленової плівки $k_{плівки}$ визначається за таким виразом:

$$k_{плівки} = -0,000009 \delta^2 + 0,0059 \delta + 0,0644. \quad (9)$$

Виходячи з наведеного вище, для суцільного друківаного нанофотонного елемента, розміщеного на внутрішній поверхні пакування, інтегральна інтенсивність люмінесценції I_c становитиме:

$$I_c = I_{ЗМ} + I_{НФ} \cdot k_{плівки}. \quad (10)$$

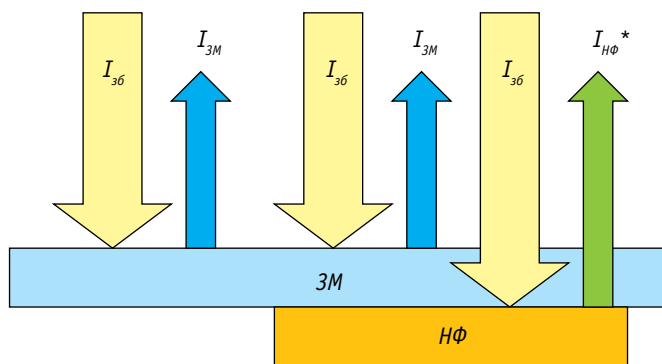


Рис. 5. Схема утворення люмінесценції у системі «НФ — ЗМ» при вимірюванні люмінесценції друківаних нанофотонних елементів крізь шар плівки

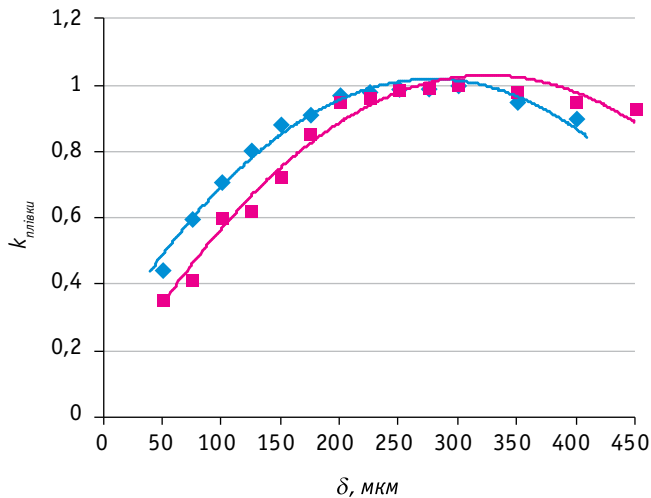


Рис. 6. Залежність коефіцієнта товщини плівки ($k_{\text{плівки}}$) від товщини шару НФ (δ) для матової (◆) та глянцевої (■) плівок з ПП

Для растрового друкованого нанофотонного елемента, розміщеного на внутрішній поверхні пакування, інтегральна інтенсивність люмінесценції I_p становитиме:

$$I_p = I_{3M} + R/100 I_c, \quad (11)$$

де R – відсоток растра.

Підставивши (10) в (11), одержимо:

$$I_p = I_{3M} + R/100 (I_{3M} + I_{НФ} \cdot k_{\text{плівки}}). \quad (12)$$

Для експериментальної перевірки отриманих аналітичних залежностей було записано спектри люмінесценції зразків друкованих нанофотонних елементів крізь шар поліпропіленової плівки. Одержані експериментальні залежності впливу товщини поліпропіленової плівки на інтенсивність люмінесценції нанофотонних шарів, виміряну крізь плівку, було співставлено з даними, одержаними за допомогою аналітичних залежностей (10) і (12). Було визначено, що відхилення співставлених даних знаходяться у межах 2,9 % для глянцевої поліпропіленової плівки і 3,4 % — для матової поліпропіленової плівки. Це дає можливість зробити висновок про адекватність запропонованих математичних моделей.

Висновки

Було здійснено аналітичні дослідження процесів утворення люмінесценції у системі «нанофотонна фарба — задруковуваний матеріал», у результаті яких було побудовано математичні моделі, які дають можливість розрахувати прогнозовану інтенсивність люмінесценції нанофотонних елементів новітніх пакувань за відомими параметрами нанофотонної фарби (її складом), задруковуваного матеріалу (спектром люмінесценції), а також технологічними параметрами — товщиною фарбового шару і відсотком градацій растра. Окремо було розглянуто випадок, коли нанофотонні елементи друкують на внутрішній частині

матеріалу пакування для прямого контакту таких елементів із запакованим продуктом, а вимірювання люмінесценції друкованих нанофотонних елементів здійснюють крізь шар плівки. Одержані математичні моделі було перевірено експериментально, відхилення співставлення розрахункових і експериментальних даних знаходяться в межах 2,8–3,4 %, що підтверджує адекватність запропонованих математичних моделей.

Створені математичні моделі можуть бути використані для поліграфічного виготовлення нанофотонних елементів новітніх пакувань із наперед заданими фотолюмінесцентними характеристиками.

Дослідження проводилися за підтримки Міністерства освіти і науки України у рамках НДР №2873п.

Література

1. Сарапулова О.О. Технологічні особливості нанесення нанофотонних елементів пакувань графаретним способом друку / О.О. Сарапулова, В.П. Шерстюк // Технологія і техніка друкарства. — 2013. — № 3. — С. 18–26.
2. Сарапулова О. Особливості відтворення нанофотонних міток тампонним способом друку / О. Сарапулова, В. Шерстюк // Матеріали доп. XVIII Міжнар. наук.-практ. конф. з проблем видавничо-поліграфічної галузі. — 2014. — С. 56–58.
3. Сарапулова О.О. Вплив властивостей задруковуваного матеріалу на виготовлення друкованих нанофотонних систем / О.О. Сарапулова // Технологія і техніка друкарства. — 2014. — № 3 (45). — С. 103–112.
4. Сарапулова О.О. Вплив технологічних параметрів фіксування нанофотонних друкованих покриттів на їхні фотолюмінесцентні характеристики / О.О. Сарапулова, В.П. Шерстюк // Технологія і техніка друкарства. — 2014. — № 4 (46). — С. 21–28. ✓

Нанофотонные элементы новейших упаковок (моделирование процессов изготовления)

О.А. Сарапулова, В.П. Шерстюк, д.х.н.

В статье приведены математические модели, которые описывают люминесцентные характеристики печатных нанофотонных элементов с учетом технологических параметров печатного процесса. Модели позволяют получать печатные нанофотонные элементы новейшей упаковки с наперед заданными фотолюминесцентными характеристиками. Проведены экспериментальные исследования для проверки полученных аналитических зависимостей, которые дают основания сделать вывод про адекватность предложенных математических моделей.

Ключевые слова: математическая модель; печать; нанофотоника; новейшая упаковка; фотолюминесценция.

Nanophotonic elements of new packages (simulation of manufacturing processes)

O.A. Sarapulova, V.P. Sherstuk, Dr.

In this paper there are created the mathematical models that describe luminescent characteristics of printed nanophotonic elements on the basis of technological parameters of the printing process. The models allow to obtain printed nanophotonic elements with predetermined photoluminescent characteristics. Experimental studies are conducted to verify the obtained analytical dependencies, which give grounds for concluding the adequacy of the proposed mathematical models.

Keywords: mathematical model; printing; nanophotonics; smart packaging; photoluminescence.