

ВИКОРИСТАННЯ КВАЗИМОНОХРОМАТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ СВІТЛОДІОДІВ ДЛЯ УПРАВЛІННЯ ФОТОСИНТЕЗОМ РОСЛИН

В.Д. Лісовенко*, Д.В. Лісовенко**

***Кременчуцький вертолітний коледж Київського державного авіаційного університету**

****Військовий інститут Одеського Національного політехнічного університету**

Тепличне рослинництво неможливе без додаткового штучного освітлення рослин впродовж всієї вегетації. Системи освітлення постійно вдосконалюються, накопичується агротехнічний досвід їхнього застосування. Наукові дослідження відкривають нові перспективи вирощування рослин в умовах штучного освітлення

Вступ. Відомо, що із загальної кількості сонячної енергії (випромінювання), яке потрапляє в атмосферу, лише половина доходить до поверхні Землі. 1/8 сонячного випромінювання має довжину хвилі, потрібну для фотосинтезу, і лише 0,4 % випромінювання (близько 1 % від загального об'єму енергії) використовується рослинами. Саме від цього одного відсотка залежить усе життя на Землі.

Розглядаючи сучасну галузь тепличного рослинництва, стає зрозумілим, що енергії сонячного випромінювання для інтенсивного фотосинтезу недостатньо. Тепличне рослинництво на сучасному етапі розвитку базується на застосуванні енергоємних і, водночас до недавніх пір найефективніших засобах штучного освітлення. В тепличних освітлювальних установках останнім часом прийнятними стають ті, що мають рівень освітленості 10 – 12 клк, при характерній потужності 80 – 100 Вт/м². Все помітнішою стає тенденція до підвищення рівнів освітленості для вирощування ряду культур.

Тепличне рослинництво – одна з небагатьох галузей застосування світлотехніки, де не потрібно переконувати споживача розробляти та впроваджувати спеціальні заходи, що дозволяють прискорити застосування енергоекономічних систем освітлення. Інтерес до останніх істотно зростає у зв'язку з розвитком у рослинництві технологій світлокультур, які більш чутливі до впливу світлоенергетичних параметрів освітлювальних приладів на продуктивність і собівартість продукції.

Завданням даної роботи є пошук і аналіз характеристик штучних джерел випромінювання, які б максимально співпадали з діапазоном поглинання рослинами світлового випромінювання для більш інтенсивного протікання процесу фотосинтезу і розробка рекомендацій щодо створення штучних джерел випромінювання з необхідним спектральним складом та потрібним світловим потоком (кількістю фотонів) для отримання інтенсивного процесу асиміляції при фотосинтезі, використовуючи новітні досягнення у галузі напівпровідникової світлотехніки.

Матеріал і методика досліджень. Загальновідомо, що процес фотосинтезу не може протікати за відсутності світла. Світлові кванти надають електронам енергію, необхідну для їх перенесення від хлорофілу, або іншого фотосинтезуючого пігменту. В ході фотосинтезу з АДФ (аденозіндіфосфату) і фосфату синтезується АТФ (аденозінтрифосфат), а НАДФ (нікотинамидадениндинуклео-тидфосфат) відновлюється до НАДФ·Н₂. Синтез АТФ за рахунок енергії світлових квантів називається фотофосфорилуванням. Цей процес може бути циклічним (у реакції працюють одні і ті ж електрони) та нециклічним (електрони зрештою надходять до НАДФ і, взаємодіючи з іонами водню, утворюють НАДФ·Н₂). Кисень як побічний продукт реакції виділяється тільки в другому випадку [1].

При проведенні досліджень було встановлено, що світло в діапазоні від 400 до 700 нм здатне стимулювати ріст рослин. Це так званий "PAR-діапазон" (скорочено від Photosynthetic Active Radiation – фотосинтетичне активне випромінювання). Близько 45% сонячного випромінювання знаходиться в PAR-діапазоні. Таким чином, у природі PAR-діапазон призначений для стимулювання росту рослин.

Показник числа фотонів, що випромінюються за секунду в PAR-діапазоні, називається PPF (скорочення від Photosynthetic Photon Flux, або фотосинтетичний потік фотонів) і вимірюється в $\mu\text{mol}/\text{с}$. PPF як одиницю вимірювання можна порівняти з люменом (lumen), проте в основі PPF лежить реакція рослин на світло. Енергія фотона світла з довжиною хвилі 400 нм (синє світло) у 1,75 разів вище за енергію фотона з довжиною хвилі 700 нм (червоне світло), але обидва фотони необхідні для нормального протікання процесу фотосинтезу. При цьому надлишок енергії "синього" фотону перетвориться на тепло. Інтенсивність фотосинтезу визначається не сумарною енергією фотонів в PAR - діапазоні, а тією їх кількістю, що поглинається рослинами. Число фотонів за секунду на одиницю площі називається PPFD (скорочення від Photosynthetic Photon Flux Density або щільності фотосинтетичного потоку фотонів) і найточніше характеризує світло, необхідне для фотосинтезу. PPFD можна порівняти з люксом ($\text{lux} = \text{lumen}/\text{m}^2$), проте з урахуванням чутливості рослин до світла. PPFD вимірюється квантовим датчиком і вимірюється у фотонах за секунду на квадратний метр ($\mu\text{mol}/\text{с}\cdot\text{m}^2$). Розглядаючи PAR-діапазон, потрібно брати до уваги енергетичну складову випромінювання ($\text{Вт}/\text{m}^2$) в діапазоні довжин хвиль від 400 700 нм [2].

Не всі рослини однаково чутливі до випромінювання різних довжин хвиль, навіть в PAR-діапазоні. Крім усього іншого, це зумовлено поглинаючою здатністю пігментів листя, найвідомішим з яких є хлорофіл. Випромінювання зеленого кольору найменшою мірою поглинається листям, майже повністю відбиваючись від нього. Саме з цієї причини людське око сприймає листя зеленим.

Вплив випромінювання з різними довжинами хвиль на ріст рослин зображено на кривій чутливості (рис.).

Фотосинтетичний спектр, що діє, визначається числом фотонів (квантів світла), що поглинаються, з певною довжиною хвилі. Цю залежність назива-

ють "спектральною квантовою ефективністю". Дослідження показали, що діапазон значень спектральної квантової ефективності для різних видів рослин не перевищує 5% від середнього значення. Також було доведено, що ефективність досягає максимуму в жовтогарячій – червоній області спектру, інакше кажучи, у цій області світло забезпечує найбільш інтенсивний фотосинтез [3].

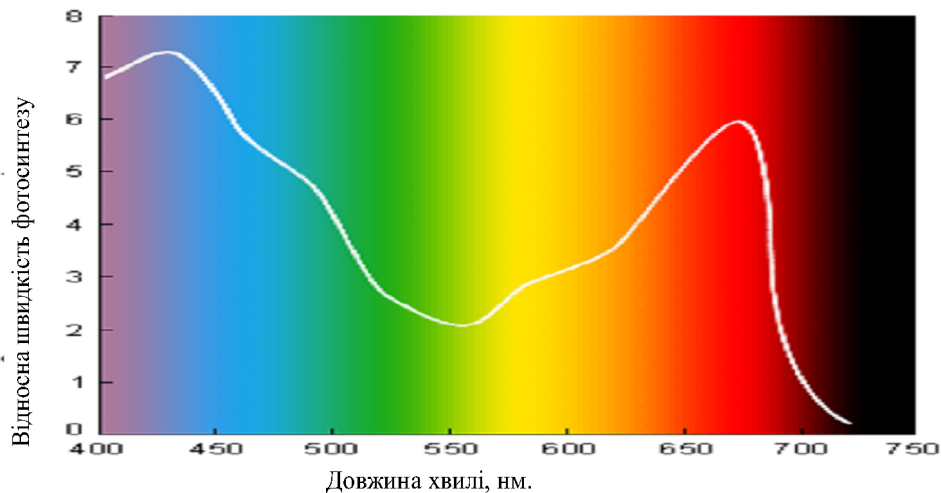


Рис. Крива залежності швидкості фотосинтезу від довжини світлової хвилі

Однак це не означає, що рослини потребують виключно такого світла. Для правильного розвитку надзвичайно важливо, щоб рослини отримували збалансоване за спектральними характеристиками світло. Для здорового розвитку рослини величезну роль відіграє синя область спектру. Нестача синьої складової призводить до гіпертрофованого зростання стебла та іноді – до пожовтіння листя. Співвідношення кількості червоного (інфрачервоного) випромінювань також має велике значення для правильного розвитку рослин. При низькому вмісті інфрачервоного випромінювання відбувається затримка росту стебла.

Більшість виробників освітлювального обладнання для вирощування рослин у теплицях пропонують використовувати фіто-лампи. Дані лампи ідентичні звичайним освітлювальним лампам та мають аналогічну будову. Відмінною рисою фіто-лампи від освітлювальних ламп є спеціальний шар, нанесений на скло лампи. Даний шар виступає у ролі світлофільтру, який пропускає певні довжини хвиль випромінювання. Отже, шар, яким вкрито скло фіто-лампи, не пропускає решту діапазону випромінювання, що утворюється всередині лампи. У цьому випадку звичайно відбувається велика втрата електроенергії і світла.

Виникає питання: як зменшити витрати електроенергії та зберегти необхідний потік фотонів і необхідний спектр випромінювання?

Світлодіоди (СІД, у англійському варіанті LED light emitting diode) стали дуже поширеними завдяки їхньому використанню в аудіо - відеоапаратурі та побутовій техніці. Яскраві світлодіоди (AlGaInP) червоного, жовтогарячого і жовтого випромінювання, що з'явилися на початку 1990-х років, і пізні-

ше сині, зелені та білі світлодіоди InGaN зробили реальною мрію про використання світлодіодів замість лампи Едісона. З'явилося безліч нових можливостей використання світлодіодів: у світлофорах і активних дорожніх знаках, автомобілях, світловій рекламі, повнокольорових світлодіодних дисплеях та багато в чому іншому. Більш того, над'яскраві світлодіоди почали витісняти звичайні лампи освітлення (розжарювання) та галогенні лампи. Світлодіоди не мають ніяких скляних колб і ниток розжарювання, що забезпечує високу механічну міцність і надійність. Відсутність розігрівання і високої напруги гарантує високий рівень електро- і пожегобезпеки, а безінерційність робить світлодіоди незамінними, коли потрібна висока швидкодія.

Результати дослідження. Випромінювання світлодіодів близьке до монохроматичного. Але є широкий набір світлодіодів різних кольорів, що дозволяє використовувати їх у різних пристроях без вживання світлофільтрів та одержувати будь-який колір випромінювання.

Значне вдосконалення епітаксимальної технології напівпровідни-кових світлодіодів призвело до збільшення світловіддачі у порівнянні з лампами освітлення в основних кольорах видимого діапазону [4]. Так, світлова віддача ламп освітлення складає всього 10-17 лм/Вт, тоді як червоні світлодіоди дають 50-60 лм/Вт. Для жовто-помаранчевих світлодіодів світловіддача перевищує 100 лм/Вт; у синьо-зеленій частині спектру вдалося досягти світловіддачі 60-80 лм/Вт.

Світлодіоди використовують дуже малу кількість електроенергії у порівнянні з освітлювальними лампами і фіто-лампами (освітлювальні лампи випромінюють 10% видимого випромінювання і 90% теплового випромінювання, а в світлодіодах все навпаки, 90% - це видимий діапазон випромінювання і лише 10% - теплове випромінювання). Таким чином, використання світлодіодів призведе до зменшення витрат на електроенергію.

За рахунок того, що світлодіоди, як було сказано вище, є монохроматичними випромінювачами, а їхня кольорова (хвилева) гамма є достатньо великою, - вони не потребують спеціального покриття, яке є у фіто-лампи. Останні вкриті дзеркальним складом, що виконує функцію світлофільтру і пропускає випромінювання з синьо-червоною складовою випромінювання. Також відомо, що світлофільтри в середньому поглинають 50-60% світлового випромінювання, утвореного ниткою розжарювання, що призводить до втрати великої кількості енергії. Завдяки використанню світлодіодного випромінювання в PAR-діапазоні, ми зможемо досягти зменшення витрат на електроенергію та зберегти необхідний спектр випромінювання для активного фотосинтезу.

Використовуючи світлодіоди червоного та ультрафіолетового випромінювання були виготовлені світильники, які по світловому потоку відповідали світильникам з фіто-лампами. Світлові потоки визначали за допомогою люксметра Ю 116. Результати вимірювань показали, що при рівних світлових потоках затрати електроенергії у світлодіодних світильниках були у п'ять разів менші ніж у світильниках з фіто-лампами. Слід зазначити, що люксметр Ю 116 фіксує інтегральний світловий потік, тобто у фіто-лампи прибор замі-

ряє сумарний світловий потік, який складається з усіх довжин хвиль, що є у спектрі випромінювання фіто-лампи. Тоді як у світлодіодному світильнику його спектр був сформований з двох довжин хвиль (червоного та ультрафіолетового випромінювання). Тому, інтенсивність випромінювання цих довжин хвиль при рівних інтегральних світлових потоках у світлодіодному світильнику була значно вищою.

Висновки

1. Завдяки розвитку новітніх технологій у галузі напівпровідникової світлотехніки вперше з'явилась можливість створення світильників з вузьким спектром випромінювання. Змінюючи технологічні параметри можна створити світильники з заданою довжиною хвилі випромінювання – від інфрачервоного до видимого і далі – до ультрафіолетового світла.

2. Узгодження довжини хвилі випромінювання з довжиною хвиль, які максимально відповідають за процеси фотосинтезу рослини, дозволяють не використовувати непродуктивну електроенергію на той діапазон спектру, який не задіяний у фотосинтезі, що значно поліпшує економічні показники системи освітлення.

3. Лампа розжарювання має ККД 1,25-2,5 % і термін експлуатації 1000 год., тоді як світлодіод – 60-70 %, а термін його служби перевищує 100000 год. Лампи розжарювання випромінюють широкий спектр довжин хвиль, з якого рослини використовують тільки невелику його частину, тоді як основна його частина розсіюється у вигляді тепла. Якщо є необхідність збільшення інтенсивності випромінювання у будь-якій частині спектру, то необхідно збільшити загальну інтенсивність світлового потоку та за допомогою світлофільтрів «вирізати» з нього необхідну частину, що також призводить до непродуктивних витрат електроенергії.

4. Світлодіоди дозволяють одержувати світильники з необхідним для рослини спектром випромінювання, при цьому вся електроенергія використовується тільки на одержання випромінювання заданого вузького діапазону.

5. У лампах розжарювання, люмінесцентних і фітохромних лампах співвідношення інтенсивностей випромінювання червоної та синьої частини спектру є величиною постійною, тоді як у світлодіодному випромінювачі за кожну частину спектру відповідає своя група світлодіодів, що дає можливість окремо керувати інтенсивністю випромінювання у кожній частині спектру, виявляти більш тонкі механізми фотосинтезу і навіть адаптувати спектри випромінювання до можливих особливостей спектрів поглинання рослин різних видів.

6. Окремо управляючи різними частинами спектру випромінювання, наприклад, "червоною" та "синьою", встановлюючи необхідну інтенсивність світлового потоку кожної з довжин хвиль, є можливість оптимізувати світлові умови на кожній фазі вегетації; або навпаки, програмуючи світловий режим по кожному діапазону довжини хвиль, вперше з'явилась можливість регулювати розвиток рослин на різних фазах вегетації, інтенсифікуючи або пригнічуючи ті процеси в рослині, за які відповідає короткохвильова або довгохвильова частина спектру.

7. Узгодження довжин хвиль випромінювання з довжинами хвиль поглинання рослинами, оптимізація інтенсивностей та співвідношення інтенсивностей випромінювання з різними довжинами хвиль значно ефективніше перетворення електроенергії у світлову енергію. Генерування монохроматичного випромінювання світлодіодними світильниками у десятки разів зменшить витрати на штучне освітлення в тепличному рослинництві.

Література

1. *Высоцкая Л.В. и др.* Общая биология. – 3-е изд. – М.: Просвещение, 2001.
2. *Микробиология: Учебник для студ. биол. специальностей вузов / М.В.Гусев, Л.А.Минеева.* – 5-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 464 с.
3. *Кафедра клеточной физиологии и иммунологии биологического факультета МГУ им.М.В. Ломоносова* © 2000-2001. [http://evolution.powernet.ru/library/micro/09.html #35](http://evolution.powernet.ru/library/micro/09.html#35)
4. *Коган Лев, Рассохин Игорь.* Полупроводниковые инфракрасные осветительные модули направленного действия // *Электронные компоненты.* – 2001. – №3. – С. 25–26.

Тепличное растениеводство невозможно без дополнительного искусственного освещения растений на протяжении всей вегетации. Системы освещения постоянно совершенствуются, накапливается агротехнический опыт их применения. Научные исследования открывают новые перспективы выращивания растений в условиях искусственного освещения.

A hothouse plant-grower is unthinkable without additional lamplight of plants during all vegetation. The systems of illumination are constantly perfected, agrotechnical experience of their application accumulates. Scientific researches are opened by the new prospects of growing of plants at lamplight