

Andrzej PUTERNICKI

## ZASTOSOWANIE PÓŁPRZEWODNIKOWYCH ŹRÓDEŁ ŚWIATŁA DO WSPOMAGANIA WZROSTU ROŚLIN

**STRESZCZENIE** *W artykule przedstawiono analizę możliwości zastosowania półprzewodnikowych źródeł światła (LED) w doświetlaniu roślin w procesie ich wzrostu. Scharakteryzowano wpływ światła naturalnego na ten proces. Uwzględniono właściwości LED i dotychczas powszechnie stosowanych w tym zakresie wyładowczych źródeł światła. Do badań i analiz wykorzystano model oprawy diodowej opracowanej w Zakładzie Techniki Świetlnej i Promieniowania Optycznego Instytutu Elektrotechniki. Oprawa integruje diody o dominującej długości fal promieniowania w zakresie światła niebieskiego i czerwonego, zbliżonych do maksimum krzywej fotosyntezy. Na podstawie badań zoptymalizowano parametry zasilania, określono właściwości wykonanej oprawy diodowej oraz porównano podstawowe jej parametry z parametrami źródeł światła stosowanymi dotychczas do doświetlania roślin. Biorąc pod uwagę wyniki prac, w tym cechy diod, ich właściwości energetyczne oraz postęp technologiczny w tej dziedzinie, sformułowano stosowne wnioski.*

**Słowa kluczowe:** *światło naturalne i sztuczne, doświetlanie roślin, krzywa fotosyntezy, lampy LED*

---

**mgr inż. Andrzej PUTERNICKI**  
e-mail: a.puternicki@iel.waw.pl

Zakład Techniki Świetlnej i Promieniowania Optycznego  
Instytut Elektrotechniki

PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt, 2010

## 1. WSTĘP

---

Tematyka artykułu wpisuje się w zakres prowadzonych badań w wielu ośrodkach naukowych na świecie i w Polsce, której celem jest stworzenie efektywnych energetycznie i ekologicznych aplikacji oświetleniowych do zastosowania w uprawach szklarniowych roślin. Jest ona także zbieżna z priorytetami prawodawstwa Unii Europejskiej wyrażonymi w dyrektywach takich jak np. dyrektywa o ekoprojektowaniu – EuP, dyrektywa RoHS, czy też dyrektywa azotanowa.

Klimat w Polsce stwarza zmienne warunki do wegetacji roślin. Panują zmienne warunki świetlne. Od marca do października światło nie stanowi istotnego ograniczenia dla prawidłowego wzrostu i rozwoju roślin. Natomiast od listopada do lutego rośliny odczuwają niedobór światła. Przy tak niestabilnych warunkach do doświetlania roślin od szeregu lat wykorzystywane jest światło sztuczne, pochodzące przede wszystkim z wyładowczych źródeł światła o zróżnicowanej skuteczności świetlnej. Mając na uwadze obserwowany w ostatnich latach postęp technologiczny w dziedzinie półprzewodnikowych źródeł światła (LED), ich właściwości energetyczne, trwałość oraz aspekty ekologiczne, źródła te wydają się atrakcyjną alternatywą wspomagania wzrostu roślin światłem sztucznym.

W uprawach szklarniowych wzrost i plonowanie roślin zależy od wielu czynników środowiska, takich jak: światło, temperatura, wilgotność powietrza, skład podłoża, czy też stężenie dwutlenku węgla w powietrzu. Jednym z najważniejszych czynników wpływających na szereg procesów fizjologicznych w roślinie jest światło. Wpływ energii świetlnej na organizmy roślinne jest zróżnicowany. Ogólnie znane jest wykorzystanie energii słonecznej przez system chlorofilowy w celu syntezy związków organicznych. Jest to podstawowy proces biochemiczny warunkujący funkcjonowanie życia. Światło odgrywa także bardzo istotną rolę w procesach wzrostu i rozwoju roślin – określanym mianem fotomorfogenezy.

Niedobór światła skutkuje wolniejszym wzrostem roślin, zmniejszoną ich odpornością na choroby, wiotczeniem łodyg, obniżeniem zawartości chlorofilu w liściach i wynikłym z tego zmniejszeniem produktywności.

## 2. WYBRANE ZAGADNIENIA Z FIZJOLOGII ROŚLIN

---

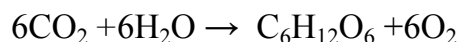
### 2.1. Zarys procesu fotosyntezy u roślin

---

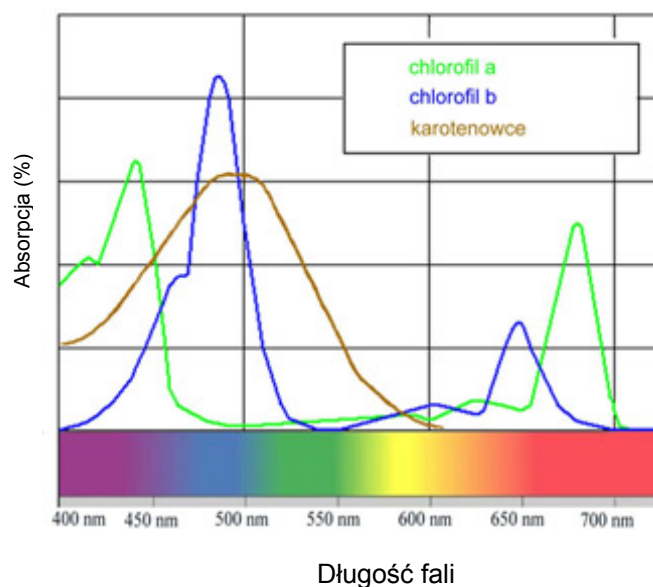
Fotosyntezę można zdefiniować jako syntezę związków organicznych z prostych substancji mineralnych przy udziale energii świetlnej. Fotosynteza

to bardzo istotny proces biochemiczny w przyrodzie, ponieważ dzięki niemu gromadzi się przetworzona energia chemiczna w postaci węglowodanów, białek, lipidów i innych związków organicznych, które służą jako podstawowy budulec dla pozostałych organizmów [3], [4].

Proces fotosyntezy przedstawiany jest zwykle w postaci prostego równania



Proces ten zachodzi w chloroplastach i jest w rzeczywistości dużo bardziej skomplikowany niż przedstawione równanie obrazujące jedynie stan początkowy i (w dużym uproszczeniu) końcowy procesu. Fotosynteza, jako proces zależny od światła, obejmuje reakcje fotochemiczne. Zgodnie z podstawową zasadą fotochemii, aby mogła zajść taka reakcja muszą zostać zaabsorbowane kwanty promieniowania. W fotosyntezie służą temu barwniki fotosyntetyczne: chlorofile i karotenoidy (u roślin lądowych). Na rysunku 1 przedstawiono intensywność absorpcji promieniowania przez te barwniki w funkcji długości fali.

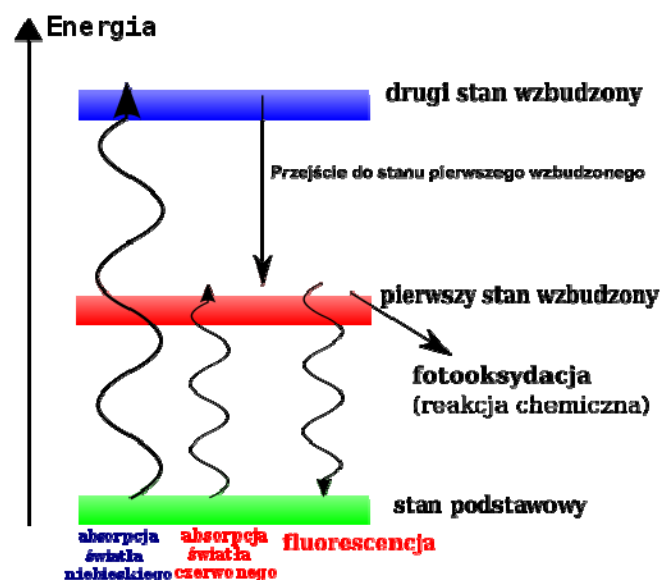


**Rys. 1. Widma absorpcyjne barwników fotosyntetycznych**

Maksimum absorpcji dwóch najczęściej występujących chlorofili u roślin lądowych określone jest dla określonych długości fal:

- 430 nm i 662 nm – dla chlorofilu *a*;
- 453 nm i 642 nm – dla chlorofilu *b*.

Cząsteczka chlorofilu po zaabsorbowaniu kwantu światła (fotonu) ulega wzbudzeniu do wyższego poziomu energetycznego. Pochłonięcie kwantu światła czerwonego wiąże się z przejściem do pierwszego stanu wzbudzonego (1,8 eV), pochłonięcie kwantu światła niebieskiego skutkuje przejściem do drugiego stanu wzbudzonego (2,5 eV). Wzbudzona cząstka nie jest stabilna i elektrony gwałtownie powracają do swoich stanów podstawowych. Energia wzbudzenia jest przede wszystkim przekazywana do innej akceptorowej cząsteczki (fotosyntetyczny transport elektronów). Część energii wzbudzenia może być uwolniona jako ciepło (rozproszenie termiczne). Pozostała część energii jest wyemitowana jako foton o większej długości fali (zjawisko fluorescencji) [3]. Na rysunku 2 w sposób schematyczny pokazano zmiany poziomu energii w fotosyntetycznym centrum reakcji w wyniku wzbudzenia chlorofilu *a* pod wpływem światła czerwonego i niebieskiego.



Rys. 2. Stany wzbudzone chlorofilu *a* pod wpływem światła [3]

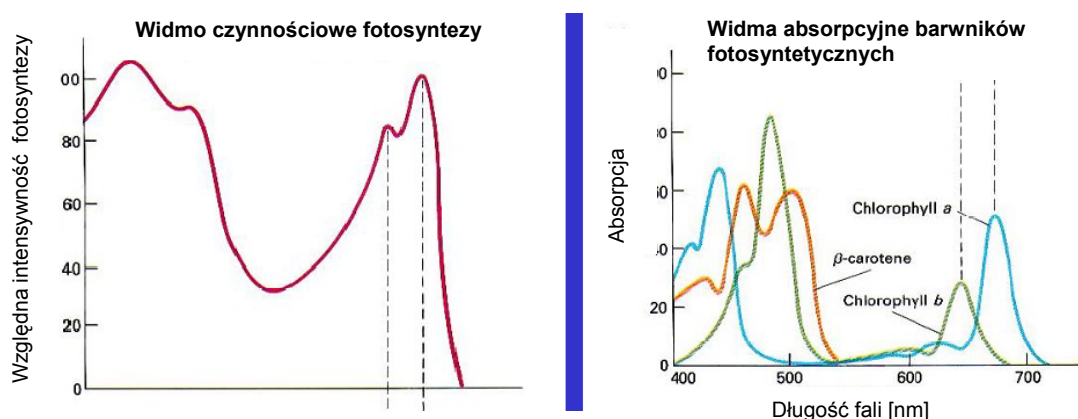
Jak wiadomo kwanty światła niebieskiego posiadają wyższą energię niż kwanty światła czerwonego. Mimo to efektywność światła niebieskiego nie jest wyższa niż światła czerwonego. Choć światło niebieskie powoduje w chlorofilu przejście elektronu na wyższy poziom energetyczny, niż w przypadku światła czerwonego, jednak ta dodatkowa energia zostaje utracona w postaci ciepła, a elektron powraca do poziomu odpowiadającemu pierwszemu stanowi wzbudzenia. Światło czerwone (lub jego zawartość w świetle białym) ma podstawowe znaczenie dla procesu fotosyntezy.

W każdym aparacie fotosyntetycznym występują też karotenoidy, choć w stężeniu kilkakrotnie niższym od chlorofilu. Najważniejsze karotenoidy to

powszechnie występujący  $\beta$ -karoten oraz luteina. Barwniki te absorbują światło w niebieskiej części widma, z maksimum przesuniętym w kierunku fal nieco dłuższych w porównaniu z absorpcją chlorofilu w tym zakresie widma (rys. 1). Pełnią one rolę wspomagającą chlorofile w absorpcji promieniowania dla celów fotosyntezy. Mogą bowiem absorbować światło w zakresie długości fal nieabsorbowanych przez chlorofil i następnie przekazywać energię stanu wzbudzonego na chlorofil, działając jak antena. Ponadto chronią one chlorofil przed fotooksydacją. Ochronna rola karotenoidów polega na przejmowaniu nadmiaru energii stanu wzbudzonego chlorofilu i jej dezaktywacji termicznej. Potwierdzeniem udziału tych barwników w fotosyntezie jest kształt krzywej widma czynnościowego fotosyntezy (rys. 3).

## 2.2. Widmo czynnościowe fotosyntezy

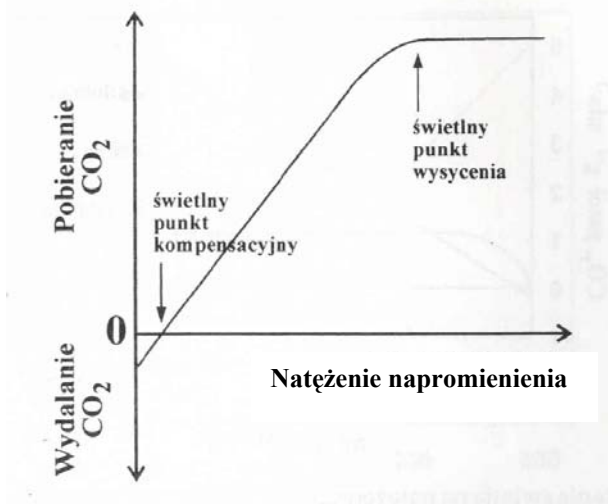
Ze światła białego barwniki fotosyntetyczne pochłaniają intensywnie tylko promieniowanie o niektórych długościach fal. Najsilniej z fotosyntetycznie czynnego zakresu promieniowania (PAR – Photosynthetic Active Radiation: 400-700 nm) absorbowane jest promieniowanie o barwie czerwonej i niebieskiej. Mianem widma czynnościowego fotosyntezy określa się wydajność fotor reakcji w funkcji długości fali zależną głównie od składu jakościowego barwników i ich udziału w fotor reakcji. Istnieje przy tym ścisła korelacja pomiędzy widmem czynnościowym a widmami absorpcyjnymi barwników fotosyntetycznych (rys. 3).



Rys. 3. Widma czynnościowe i absorpcyjne w fotosyntezie

Widmo czynnościowe zostało znormalizowane w normie DIN 5031 – 10: Marz 2000 – *Strahlungsphysik im Optischen Bereich und Lichttechnik – Teil 10: Photobiologisch Wirksame – Strahlung Großen, Kurzzeichen und Wirkungsspektren* [5].

### 2.3. Aktywność fotosyntetyczna roślin



Rys. 4. Krzywa świetlna fotosyntezy [7]

W warunkach naturalnych fotosynteza poddawana jest wpływowi różnych czynników środowiska. Czynniki warunkującymi aktywność fotosyntetyczną roślin są: światło, dwutlenek węgla, temperatura oraz woda [7]. Stosownych pomiarów natężenia fotosyntezy dokonuje się zwykle poprzez oznaczenie ilości pobranego  $\text{CO}_2$  lub wydalonego tlenu. W dłuższych przedziałach czasu miarą aktywności fotosyntezy może być przyrost suchej masy rośliny.

Światło jest podstawowym czynnikiem niezbędnym do fotosyntezy. Z całej energii promieniowania docierającej do rośliny dla potrzeb fotosyntezy wykorzystuje ona tylko 5%.

Okolo 25% zostaje zmienione w roślinie w ciepło, a 70% jest odbijane przez liście. Zależność fotosyntezy od natężenia napromienienia przedstawiają krzywe świetlne tego procesu. Przykład takiej krzywej pokazany jest na rysunku 4.

W ciemności oraz przy bardzo niskich poziomach natężenia napromienienia fotosynteza zużywa  $\text{CO}_2$  wytworzony w oddychaniu, bez pobierania go z zewnątrz. Zwiększając stopniowo natężenie napromienienia ustaje przy pewnym jego poziomie wymiana gazowa (zrównoważenie procesów oddychania i fotosyntezy). Moment ten to tzw. światlny punkt kompensacyjny. U roślin światłolubnych światlny punkt kompensacyjny mieści się w zakresie fotonowego natężenia napromienienia równego  $10\text{-}20 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ , a u roślin ze środowisk zacienionych wartość ta maleje do  $1\text{-}5 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  [4]. Niska wartość dla roślin ceniolubnych jest przejawem przystosowania tych roślin do niewielkich ilości promieniowania w środowisku.

Przy bardziej intensywnym napromienieniu (powyżej punktu kompensacyjnego) początkowo liniowo zwiększa się intensywność fotosyntezy w funkcji zwiększonego natężenia napromienienia. Po osiągnięciu pewnego progu, dalsze zwiększanie intensywności napromienienia nie powoduje już wzrostu fotosyntezy (punkt wysycenia). U roślin światłolubnych światlny punkt wysycenia wynosi okolo  $400 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  (wartość napromienienia odpowiadająca okolo jednej piątej pełnego nasłonecznienia), a u roślin ze środowisk zacienionych maleje on do  $40\text{-}50 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ . Bardzo duże ilości promieniowania

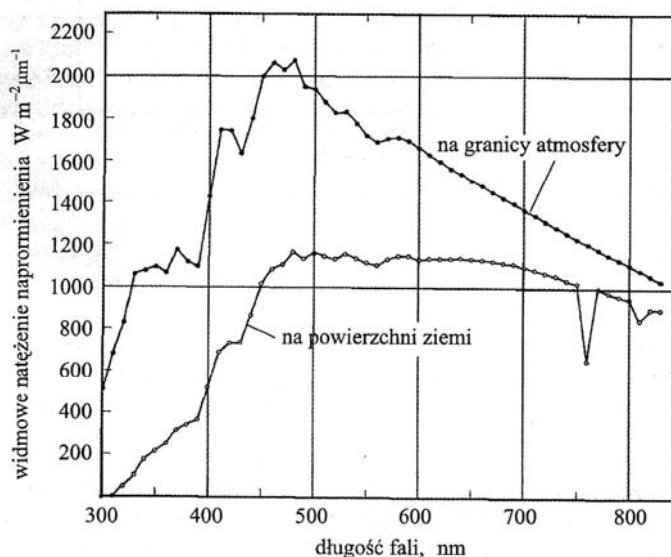
prowadzą do zapoczątkowania procesu fotoinhibicji [4]. Zjawisko to powoduje zmniejszenie intensywności fotosyntezy i może doprowadzić do uszkodzenia aparatu fotosyntetycznego.

Czynnikami warunkującymi fotosyntezę są także stężenie dwutlenku węgla oraz temperatura otoczenia. Znaczenie tych czynników wzrasta przy silnym napromienieniu rośliny (szczególnie powyżej punktu wysycenia). Przy słabszym napromienieniu to promieniowanie absorbowane przez roślinę jest czynnikiem decydującym o przebiegu fotosyntezy. Dlatego też poziomem odpowiednim do oceny wpływu doświetlającego promieniowania na rośliny wydaje się wartość fotonowego natężenia napromienienia około  $100 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ .

### 3. ŚWIATŁO WE WSPOMAGANIU ROZWOJU ROŚLIN

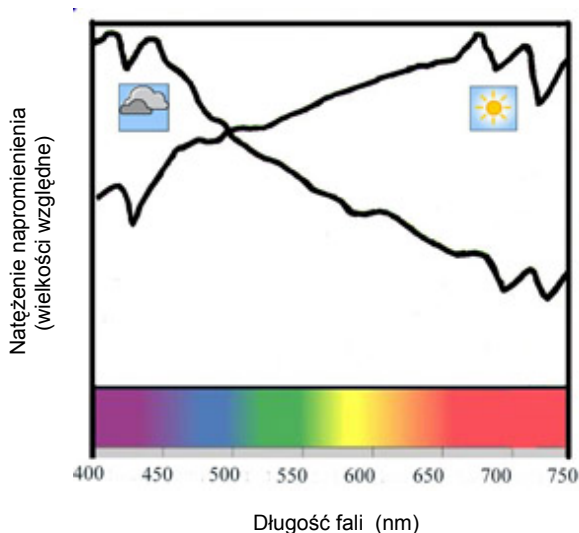
#### 3.1. Promieniowanie słoneczne

Atmosfera Słońca składa się głównie z wodoru. Energia słoneczna pochodzi z syntezy czterech jąder wodoru w jądro helu z emisją kwantów promieniowania w całym zakresie widma fal elektromagnetycznych. Ziemska atmosfera jest przezroczysta tylko dla części promieniowania podczerwonego i nadfioletowego oraz całego zakresu promieniowania widzialnego. Pozostała część promieniowania jest absorbowana przez tlen i ozon w górnych warstwach atmosfery. Jest to zjawisko korzystne, ponieważ ta część promieniowania jest szkodliwa dla żywych organizmów. Widmo promieniowania Słońca w bezchmurny dzień jest zbliżone do widma promieniowania ciała doskonale czarnego w temperaturze 5800 K [6] (rys. 5).



Rys. 5. Widmo natężenie napromienienia promieniowania słonecznego [6]

Natężenie napromienienia promieniowaniem słonecznym padającym na powierzchnię Ziemi w bezchmurny dzień wynosi około  $1000 \text{ W/m}^2$ . Wartość ta jest zupełnie wystarczająca dla wysycenia możliwości fotosyntetycznych roślin.



**Rys. 6. Widmo światła słonecznego w dzień słoneczny i pochmurny**

te dwa wykresy, zarys krzywej widma czynnościowego fotosyntezy staje się wyraźnie widoczny. Kształt tej krzywej może być wynikiem przystosowania się roślin do zmiennych warunków napromienienia w procesie ich ewolucji.

Na uśrednionym wykresie widma promieniowania słonecznego, które dociera do roślin w ciągu całego dnia, widać, że wskutek przechodzenia przez atmosferę ziemską jego charakterystyka ulega znacznym zmianom (rys. 6). W dni bezchmurne, kiedy promienie Słońca spotykają na swojej drodze jedynie cząsteczki powietrza, widmo przesuwają się ku czerwieni, bowiem rozpraszane są przede wszystkim fale krótkie. Z kolei w dni pochmurne kropelki wody tworzące chmury pochłaniają dodatkowo dużą część fal długich (których brakuje również w cieniu). Jeśli nałoży się na siebie

### 3.2. Doświetlanie roślin światłem sztucznym

Rośliny uprawiane obecnie w szklarniach odczuwają niedobór światła pochodzącego od promieniowania słonecznego w okresie od listopada do lutego. Dlatego też dla zwiększenia ich plonowania stosuje się sztuczne źródła światła. Dla wspomaganie wzrostu i rozwoju roślin w tym okresie stosuje się asymilacyjne doświetlanie upraw głównie wyładowczymi źródłami światła (świełtówki, wysokoprężne lampy sodowe, lampy metalohalogenkowe). Zestawienie tych źródeł, ich wad i zalet oraz zakresu ich stosowania przedstawia autorska tabela 1.

Obecnie najczęściej stosowaną lampą jest lampa sodowa (HPS), która charakteryzuje się wysoką skutecznością świetną i relatywnie długim czasem użytkowania. Doświetlanie tymi lampami stosuje się głównie do produkcji rozsady roślin warzywnych i ozdobnych. Niesprzyjające warunki ekonomiczne (wysokie ceny nośników energii) ograniczają jednak w znacznym stopniu



wprowadzenie tych lamp do szerokiej uprawy produkcyjnej zarówno w Polsce, jak i w innych krajach europejskich. Należy podkreślić także, że widmo światła w tych lampach określone jest przez ich konstrukcję i trudno je modyfikować. Dlatego też obecnie prowadzi się intensywne badania nad alternatywnymi rozwiązaniami doświetlania roślin światłem sztucznym w uprawach szklarniowych.

**TABELA 1**

Wybrane cechy obecnie stosowanych lamp w doświetlaniu roślin

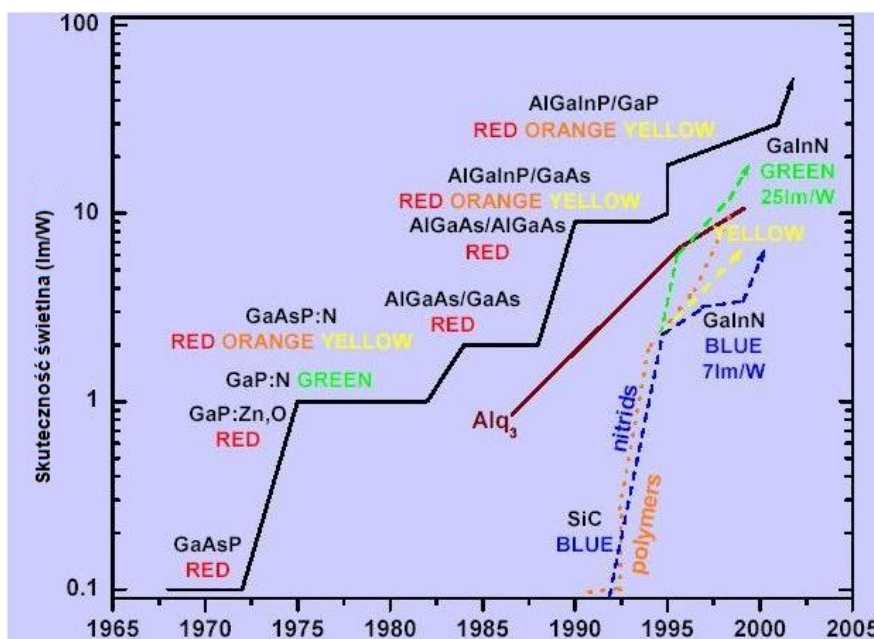
Źródło światła	Zalety	Wady	Uwagi
Świetlówki	Dosyć wysoka skuteczność; niska cena; wydzielają stosunkowo mało ciepła.	Duże wymiary (klasyczne rury w oprawach zacinają uprawy). Konieczność stosowania układów stabilizacyjno-zapłonowych.	Stosowane do: niewielkich upraw, klonowania, początkowej fazy wzrostu roślinnego i wszędzie tam, gdzie z uwagi na niedostateczną wysokość zawieszenia nie można stosować HPS.
Lampy HPS (wysokoprężne lampy sodowe)	Wysoka skuteczność. Skład widmowy światła pobudzający kwitnienie.	Niedobór światła niebieskiego. Konieczność stosowania układów stabilizacyjno-zapłonowych. Zacienianie upraw. Konieczność dużych wysokości zawieszenia.	Najpowszechniej stosowane dotychczas w produkcji rozsady roślin warzywnych i ozdobnych.
Lampy MH (metalo-halogenkowe)	Wysoka skuteczność. Promieniowanie o widmie zbliżonym do światła naturalnego.	Niższa skuteczność od lamp HPS.	Zalecane do stymulacji wzrostu roślinnego. Stosowane często w mieszanych układach oświetleniowych MH+HPS.

### 3.3. Półprzewodnikowe źródła światła (LED)

W ostatnich latach coraz szersze zastosowanie w praktycznych rozwiązaniach oświetleniowych znajdują półprzewodnikowe źródła światła (LED). Diody są udoskonalane pod względem materiałów emiterów, przezroczystych obudów, czy też przynależnej do nich optyki wtórnej. Opracowywane są coraz nowocześniejsze technologie ich wytwarzania. Raptowny wzrost zapotrzebowania na te źródła wiąże się m.in. ze spadkiem ich cen. Aplikacja LED jako źródeł światła, znajduje się w fazie dynamicznego rozwoju. Diody świecące są już stosowane w oświetleniu sygnalizacyjnym, w reklamie wizualnej, w oświetleniu ewakuacyjnym, w podświetlaniu ekranów telewizyjnych, jako światło

impulsowe w lampach błyskowych aparatów fotograficznych – zwłaszcza w telefonach komórkowych, w projektorach światła do kamer, w światłach samochodowych – poza światłami długimi. Nowa technologia wchodzi do oświetlenia ogólnego, gdzie z powodzeniem LED-y zastępują już żarówki halogenowe i konkurują ze świetłówkami kompaktowymi. W oświetleniu zewnętrznym oprawy z LED-ami są stosowane do oświetlenia ciągów pieszych, parków, w próbnych instalacjach do oświetlenia ulicznego. Skuteczność świetlna półprzewodnikowych źródeł światła białego w praktycznych aplikacjach oświetleniowych przekroczyła już dziś 100 lm/W, a według prognoz w roku 2020 może osiągnąć wartość 200 lm/W [2].

Światło białe może być wytwarzane dwiema metodami: poprzez zmieszanie promieniowania pochodzącego od trzech struktur (RGB) lub przez konwersję promieniowania w diodach emitujących promieniowanie niebieskie lub UV przy zastosowaniu luminoforów. Coraz szersze aplikacje oświetleniowe diodowego światła białego spowodowały, że obserwuje się coraz większy postęp w technologii wytwarzania diod barwnych. W ostatnich latach opracowano i są wciąż udoskonalane zielone i niebieskie emiterzy oparte na strukturach azotku galu i heterostrukturach AlInGaN. Wraz z poprzednio opracowanymi emiterami światła czerwonego opartych na strukturach AlGaAs i AlGaInP praktycznie pokryte jest całe widmo światła wraz z obszarem bliskiego nadfioletu oraz bliskiej i średniej podczerwieni. Na rysunku 7 pokazano rozwój technologii LED-ów emitujących światło barwne w ujęciu historycznym.



Rys. 7. Rozwój historyczny technologii LED światła barwnego [9]

**TABELA 2**

Struktury półprzewodnikowe światła barwnego w doświetlaniu roślin

Promieniowanie	Struktura	Długość fali, *) (nm)	Wspomagany proces
Niebieskie	AlInGaN	455	Fotosynteza – chlorofil <i>b</i> Fototropia
Czerwone	AlGaInP	640	Fotosynteza – chlorofil <i>b</i>
Czerwone	AlGaAs	660	Fotosynteza – chlorofil <i>a</i>
Podczerwone	AlGaAs	735	Fotomorfologia

\*) przy której występuje maksymalna emisja promieniowania

Zastosowanie diod świecących w doświetlaniu roślin pozostaje wciąż jeszcze zagadnieniem marginalnym. Niemniej jednak w Polsce i na świecie prowadzone są obecnie badania nad tymi aplikacjami [2], [8]. Pojawiają się pierwsze, jeszcze nie rozpropagowane na szerszą skalę rozwiązania praktyczne. Cechą wspólną tych badań jest zastosowanie wysokowydajnych diod mocy oraz dążenie do optymalizacji widma promieniowania modułów LED integrujących w sobie odpowiednie proporcje promieniowania o barwie czerwonej i niebieskiej. Diody są niezastąpione w tym zakresie, albowiem pozwalają na budowanie dowolnych charakterystyk widmowych z dyskretnych charakterystyk pojedynczych diod, które mogą być dostosowane do indywidualnych potrzeb danej rośliny. Należy wymienić także inne zalety tych nowych źródeł światła, takie jak: bardzo duża trwałość i niezawodność, coraz lepsza skuteczność świetlna, brak nagrzewania roślin promieniowaniem, brak w widmie promieniowania nadfioletowego itp. W tabeli 2 zestawiono struktury półprzewodnikowe, które mogą być wykorzystane w zależności od pożądanego rodzaju oddziaływania na rośliny.

#### 4. KRYTERIA OCENY ŹRÓDEŁ ŚWIATŁA W FOTOBIOLOGII

Reakcje fotochemiczne w fotosyntezie zależą bardziej od liczby fotonów padających na powierzchnię niż od energii niesionej przez te fotony, dlatego też znacznie sensowniej jest wyrażać energię promieniowania fotosyntetycznego w liczbie fotonów padających na jednostkę powierzchni w jednostce czasu. Niektóre z jednostek miar promieniowania używane w fotobiologii podano w tabeli 3.

Widmo czynnościowe fotosyntezy wskazuje w praktyce, na co reaguje roślina. Jest ono odmienne w swoim kształcie od krzywej skuteczności świetlnej oka ludzkiego w procesie widzenia. Odmienność tą należy uwzględnić przy

ocenie przydatności źródeł światła sztucznego do fotosyntetycznego (asymilacyjnego) doświetlania roślin. Przy tej ocenie należy brać pod uwagę intensywność użytecznego dla rośliny promieniowania w zakresie PAR mierzoną ilością fotonów wykorzystywanych w procesie fotosyntezy. Ważnymi parametrami jest określenie: powierzchniowej gęstości strumienia fotonów (PPFD – *Photosynthetic Photon Flux Density*), która powinna być wyrażana w  $\mu\text{mol/s/m}^2$  oraz fotosyntetycznej skuteczności świetlnej (PUR/P) określanej w  $(\mu\text{mol/s})/W$ .

**TABELA 3**

Zestawienie wielkości i ich miar mających zastosowanie w fotobiologii [3]

Wielkość	Jednostka	Definicja
Energia promieniowania	J	Energia w formie promieniowania elektromagnetycznego
Moc promieniowania	$W = J/s$	Energia emitowana lub absorbowana w jednostce czasu
Natężenie napromienienia	$W/m^2$	Strumień energetyczny padający na jednostkę powierzchni
Gęstość strumienia fotonów (PFD)	$\mu\text{mol/m}^2/s$	Liczba fotonów padająca na jednostkę powierzchni w jednostce czasu
Promieniowanie czynne fotosyntetycznie (PAR)	-	Promieniowanie elektromagnetyczne w przedziale długości fal 400 –700 nm
Użyteczny strumień fotonów (PUR)	$\mu\text{mol/s}$	Użyteczny dla rośliny strumień fotonów w zakresie 400 –700 nm
Fotosyntetyczna gęstość strumienia fotonów (PPFDe)	$\mu\text{mol/m}^2/s$	Liczba fotonów w zakresie PAR padająca na jednostkę powierzchni w jednostce czasu
Gęstość skuteczna promieniowania fotosyntetycznie czynnego (PPFDs)	$\mu\text{mol/m}^2/s$	Liczba fotonów skutecznie oddziałująca na roślinę, padająca na jednostkę powierzchni w jednostce czasu ( <i>PPFDe przeskalowane krzywą fotosyntezy</i> )
Fotosyntetyczna skuteczność świetlna	$(\mu\text{mol/s})/W$	Użyteczny strumień fotonów na jednostkę zainstalowanej mocy

W praktyce oznacza to, że istotnym w ocenie staje się nie tylko intensywność promieniowania, ale także jego charakterystyka widmowa, która powinna być skorelowana z widmem czynnościowym fotosyntezy. Źródło będzie tym skuteczniejsze w stymulacji wzrostu roślin, im więcej emituje promieniowania w zakresie fal długich i krótkich, a mniej w okolicach 550 nm.

## 5. OPRAWA MODELOWA PARRebel

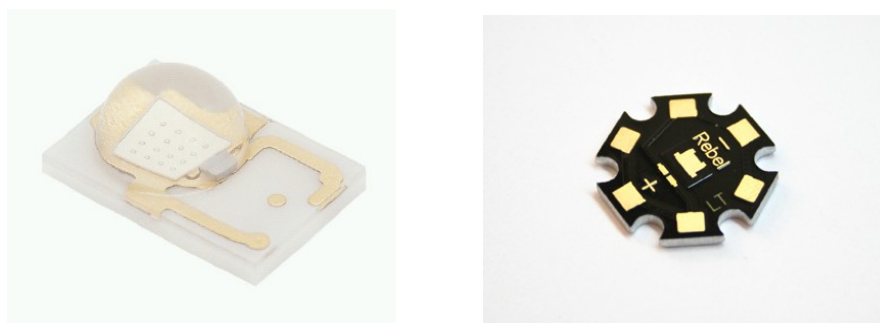
### 5.1. Charakterystyka ogólna

Z wyników badań prowadzonych na świetle, a w szczególności rezultatów zaprezentowanych w [8], w sposób jednoznaczny wynika, że podsta-

wowym promieniowaniem istotnym dla asymilacyjnego doświetlenia roślin jest światło czerwone ( $\lambda_{\max} = 640 - 660 \text{ nm}$ ), wspomagane przez promieniowanie niebieskie ( $\lambda_{\max} = 430 - 450 \text{ nm}$ ). Badania te były punktem wyjścia do ustalenia założeń konstrukcyjnych oprawy modelowej PARRebel opracowanej w Zakładzie Techniki Świetlnej i Promieniowania Optycznego Instytutu Elektrotechniki. Oprawa ta integruje w sobie 7 diod mocy Lumileds, wykonanych w technologii Rebel (6 czerwonych i 1 niebieską), zamontowanych w aluminiowym korpusie pełniącym rolę radiatora. Zastosowane diody stanowią nową rodzinę diod (rys. 8) wyróżniającą się spośród dotychczas stosowanych:

- wysokim natężeniem promieniowania;
- małymi wymiarami;
- łatwym powierzchniowym montażem na płytkach PCB;
- możliwością zasilania prądem do 1000 mA;
- podwyższoną odpornością na wilgoć;
- dużą trwałością.

Czołowy producent diod – Philips Lumileds – dużo inwestuje w rozwój tej nowej technologii, zaprzestając przy tym produkcji dla nowych aplikacji oświetleniowych powszechnie stosowanych do tej pory diod mocy Luxeon K2 i Luxeon I/III/IV. Szczegóły na temat nowej generacji diod mocy można znaleźć w zakładce *Luxeon Rebel Color* na stronie internetowej firmy Philips Lumileds [10].



Rys. 8. Widok diody Luxeon Rebel i płytki PCB

Oprawę skonstruowano w trzech odmianach, z trzema układami optycznymi wąskim ( $RS - \delta_{0,5} = \pm 4^{\circ}$ ), pośrednim ( $M - \delta_{0,5} = \pm 13^{\circ}$ ) oraz szerokim ( $W - \delta_{0,5} = \pm 23^{\circ}$ ).

Zamontowane na płytkach PCB soczewki:

- przystosowane są wymiarami i właściwościami do diod Rebel (światła białego i barwnych);
- wykonane są ze szkła akrylowego (PMMA – polimetakrylan metylu) o podwyższonej wytrzymałości temperaturowej;

- charakteryzują się dobrą przepuszczalnością światła – współczynnik przepuszczania powyżej 90%;
- są łatwe w montażu, zarówno na płytkach PCB, jak i obwodzie drukowanym.

Dla rozwiązania konstrukcyjnego dokonano optymalizacji, w rezultacie czego wybrano opcję zasilania przy stabilizacji prądowej dla zakresu 350 mA. Diody czerwone i niebieska sterowane są z odrębnych zasilaczy poprzez potencjometry umożliwiające płynną regulację prądu przepływającego przez diody w zakresie 0-330 mA.

Widok ogólny oprawy PARRebel przedstawiony jest na rysunku 9.



Rys. 9. Widok oprawy PARRebel

## 5.2 Pomiary i wyniki

Dla każdego rodzaju zastosowanej optyki wykonano następujące pomiary fotometryczne, radiometryczne i widmowe:

- pomiar widma promieniowania spektrometrem w osi oprawy (odległość przeliczona na 1 m). Przyjęto niezmiennosc tego rozkładu w funkcji kąta;
- pomiar przestrzennego rozkładu promieniowania – nastawy ręcznej z rozdzielczością co  $0,5^{\circ}$  przy użyciu goniometru ramiennego (dla optyki RS) i automatycznej z rozdzielczością co  $1,5^{\circ}$  przy użyciu goniometru ramiennego (dla optyki M i W) w dwunastu płaszczyznach dla barwy czerwonej, niebieskiej i łącznego świecenia obu rodzajów diod;
- pomiar równomierności oświetlenia płaszczyzny 1 m x 1 m na siatce co 0,1 m z odległości 1 m przy użyciu luksomierza Minolta.

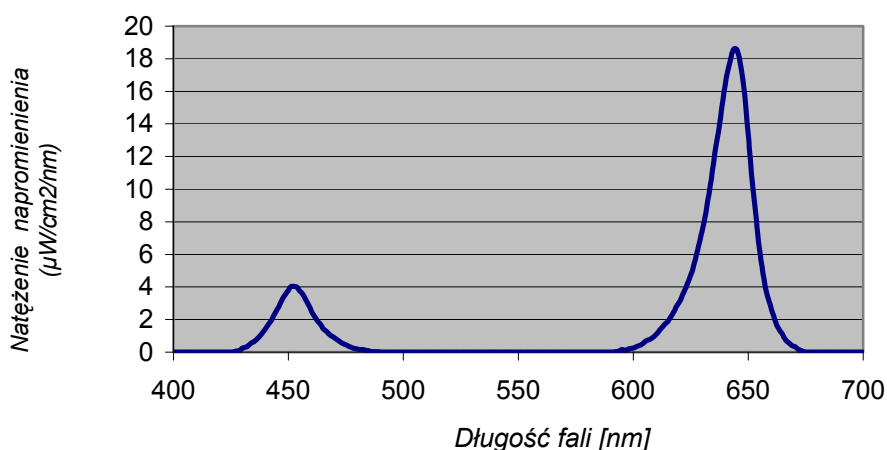
Dokonano także pomiarów podstawowych parametrów elektrycznych opraw. Zestawienie wybranych wyników pomiarów przedstawiono w tabeli 4.

**TABELA 4**

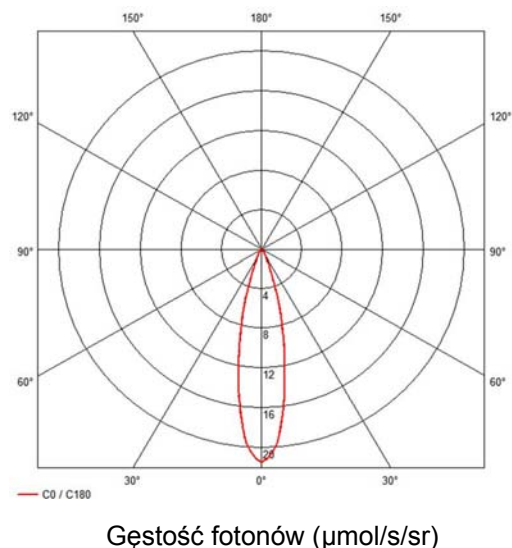
Zestawienie wybranych wyników pomiarów

	Strumień użyteczny		Gęstość strumienia		Równomierność <sup>*)</sup>		
	PUR	PUR/P	PPFDe	PPFDs	R1	R3	R5
	μmol/s	(μmol/s)/W	μmol /m <sup>2</sup> /s	μmol/m <sup>2</sup> /s	0,2x0,2 m	0,6x0,6 m	1,0x1,0 m
PARRebel 6R1B – RS	5,8018	0,919	192,56	150,38	0,549	0,210	0,097
PARRebel 6R1B – M	5,5656	0,882	27,36	21,48	0,911	0,225	0,098
PARRebel 6R1B – W	5,5736	0,883	10,49	8,19	0,943	0,447	0,120

<sup>\*)</sup> Równomierność mierzona na prostokątnej siatce zgodnie z normą PN-EN 1265

**Rys. 10. Rozkład widmowy natężenia napromienienia modelu oprawy PARRebel M**

Na rysunkach 10 i 11 przedstawiono rozkład widmowy i przestrzenny promieniowania oprawy PARRebel 6R1B – M. Model ten został wybrany jako optymalny mając na uwadze jego parametry fotometryczne oraz równomierność napromienienia płaszczyzny.

**Rys. 11. Rozkład przestrzenny promieniowania modelu oprawy PARRebel M**

### 5.3. Analiza porównawcza

W związku z faktem, że na tym etapie nie można było ocenić kompleksowego efektu doświetlenia (na podstawie pomiarów parametrów rozwojowych i fizjologicznych rośliny), dokonano odniesienia do dostępnych danych źródeł światła zaprezentowanych w [1], a w szczególności ważnego parametru, jakim jest współczynnik (PUR/P) określający fotosyntetyczną skuteczność świetlną. Dane z pomiarów wykonanego modelu porównano z danymi producentów wybranych źródeł światła stosowanych dla wspomaganie roślin i uszeregowano w tabeli 5, uporządkowanej według kryterium fotosyntetycznie czynnej skuteczności świetlnej [ $\mu\text{mol/s/W}$ ] w całym zakresie PAR (400-700 nm).

Należy zaznaczyć, że w tabelach nie uwzględniono mocy pobieranej przez układy zasilające i stabilizująco-zapłonowe. Porównanie dotyczy samych źródeł światła.

**TABELA 5**

Zestawienie porównawcze źródeł światła [1]

Lp	Rodzaj lampy	Typ	Moc [W]	PUR [ $\mu\text{mol/s}$ ]	PUR/P [ $(\mu\text{mol/s/W})$ ]
1	LED	IEL – model PARRebel 6R1B - M	6,3	5,57	0,882
2	metalohalogenkowa	Philips – MHN150/TD/840, 4100 K	150	116	0,773
3	sodowa	Philips HPS Ceramlux C100S54/C/M	100	72,8	0,728
4	metalohalogenkowa	Iwasaki – MTD 150/D, 6500 K	150	107	0,713
5	fluorescencyjna liniowa	Philips – Advantage F32T8/ADV850, 5000K	32	22,8	0,713
6	fluorescencyjna kompaktowa	Osram – Dulux L, 5400 K	55	36,3	0,660
7	fluorescencyjna	General Electric – SPX 65, 6500 K	40	24,0	0,600
8	fluorescencyjna kompaktowa	Philips – PL-L/950, 5300 K	55	32,8	0,596
9	fluorescencyjna liniowa	Sylvania – Pentron T5 HO/ECO FP54/841/HO/ECO, 4100 K	54	32	0,593
10	światło słoneczne	Iluminant CIE – D 5500 K	40	22,8	0,570
11	fluorescencyjna liniowa	Philips – Agro-Lite F40T12AGRO	40	19,2	0,480
12	rtęciowa	Philips – Deluxe H38MP-100/DX, 3700 K	100	17,8	0,178
13	halogenowa	Philips – Masterline Par 16 60PAR16/H/NSP, 2950 K	60	15,8	0,145

Przy analizie trzeba także mieć na uwadze, że widma prezentowane przez producentów lamp mierzone były w odmiennych warunkach w stosunku do naszych pomiarów (przy rozdzielczości co 5-10 nm). Trzeba do nich podcho-



dzić z pewną ostrożnością. Ta niska rozdzielczość może być powodem znaczących różnic w wartościach obliczonych parametrów tych źródeł.

## 6. PODSUMOWANIE

---

Tematyka podjęta w badaniach, a przedstawiona w niniejszym referacie, jest zgodna z nowoczesnymi kierunkami badań nad alternatywnymi źródłami światła w produkcji roślinnej.

Przeprowadzone pomiary spektrofotometryczne, obliczenia i analizy konstrukcji modelowej PARRebel już dziś pokazują, że doświetlanie stymulujące wzrost i rozwój roślin w uprawach lampami LED jest atrakcyjną alternatywą dla powszechnie stosowanych w tym zakresie wyładowczych źródeł światła.

Badania są w fazie wstępnej dotyczącej głównie właściwości źródeł światła. Wyniki prac uzasadniają dalsze ich kontynuowanie. Do analiz należałoby włączyć przeprowadzenie wielokryterialnych badań konkretnych systemów oświetleniowych w porównywalnych warunkach, z włączeniem do oceny pomiarów wybranych parametrów rozwojowych i fizjologicznych konkretnej rośliny. Badania te pokażą, jak jakość światła, a nie tylko jego ilość, wpływa na rozwój rośliny.

Takie interdyscyplinarne badania będą prowadzone w najbliższych latach przez Instytut Elektrotechniki we współpracy z SGGW w ramach przyznanych środków na realizację zadania pt. „Wpływ doświetlania lampami LED na rozwój roślin pomidora (*Lycopersicon esculentum* Mill.), plonowanie i jakość owoców w uprawie jesienno-zimowej”. Mogą one doprowadzić do rozpowszechnienia w kraju nowego sposobu doświetlenia i wdrożenia praktycznych rozwiązań w uprawach szklarniowych.

## LITERATURA

1. Busko I.: Comparison Between Light Sources. [www.aquabotanic/library.com](http://www.aquabotanic/library.com).
2. Grzesiak W.: Zastosowanie diod LED w systemach doświetlania roślin wyzwaniem na dziś i jutro. *Elektronika – konstrukcje – technologie – zastosowania*, 10/2009, str 73-76.
3. Hall D.O., Rao K.K.: *Fotosynteza*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 1999.
4. Kopcewicz J., Lewak S.: *Podstawy Fizjologii Roślin*. PWN, 2002.
5. Norma DIN 5031 – 10: Marz 2000, *Strahlungsphisk im Optischen Bereich und Lichttechnik – Teil 10: Photobiologisch Wirksame – Strahlung Großen, Kurzzeichen und Wirkungsspektren*.
6. Pietrzykowski J.: *Promieniowanie optyczne*. Poradnik Technika Świetlna, 2009.

7. Szweykowska A.: Fizjologia Roślin. Wydawnictwo Naukowe UAM, 2004.
8. Tamulaitis G. et al.: High-power light-emitting diode based facility for plant cultivation. Journal of Physics D: Applied Physics 38(2005), str. 3182-3187.
9. [www.kme.elf.stuba.sk/kme/buxus/docs/predmety/OEaLT/Prednasky/6\\_prednaska\\_LED.pdf](http://www.kme.elf.stuba.sk/kme/buxus/docs/predmety/OEaLT/Prednasky/6_prednaska_LED.pdf).
10. [www.philipsumileds.com](http://www.philipsumileds.com).

Rękopis dostarczono dnia 26.03.2010 r.

**Opiniował: prof. dr hab. inż. Władysław Dybczyński**

## THE APPLICATION OF SOLID STATE LIGHTS TO SUPPORT THE PLANT GROWTH

Andrzej PUTERNICKI

**ABSTRACT** *The article presents the analysis of the possibilities for the Solid State Lights (LED) being applied for the horticulture purposes. The influence of the daylight on the process of plant growth was outlined. The main features of LED as well as commonly used for this case discharge lamps were stated. The relevant analysis were performed using the LED model lamp elaborated in the Light Engineering and Optical Radiation Department of Electrotechnical Institute. It integrates the red and blue LEDs of the radiation pick wave lengths close to the extremes of the action spectrum of photosynthesis. The power supply of LED lamp was optimized as well as the main parameters were defined in comparison to the actually used lamps for grow lighting. Taking into account the results of research works, LED features as well as the technological progress in the field of solid state lights, the relevant concluding suggestions were expressed.*



**Mgr inż. Andrzej PUTERNICKI** ukończył Wydział Elektryczny Politechniki Warszawskiej o specjalności Technika Świetlna w 1982 roku. Po ukończeniu studiów rozpoczął pracę w Zamku Królewskim w Warszawie zajmując się między innymi wdrożeniem do eksploatacji instalacji *Światło i Dźwięk*. W roku 1988 podjął pracę w firmie Elektrim, gdzie zajmował się zagadnieniami techniczno-handlowymi w sektorze energetycznym, w tym realizacją umów dla kompletnych obiektów z włączeniem instalacji elektrycznych i oświetleniowych. Od 2007 roku pracuje w Zakładzie Techniki Świetlnej i Promieniowania Optycznego Instytutu Elektrotechniki.

W kręgu jego zainteresowań naukowych leżą szeroko rozumiane zagadnienia z zakresu fotobiologii. Autor lub współautor kilku prac, artykułów, referatów i prezentacji o tej tematyce.