

## WHITE COLOUR WITH LED's CONCEPTS AND METHODS FOR EFFICIENT SOLID-STATE LIGHTING

**Stelian MATEI**

Peninsula Technikon, Cape Town, South Africa

*The conventional lighting has nearly reached maximum in efficiency but is not the case with solid-state lighting. LED's works on entirely different principle using crystalline layers that converts electrical input into optical output at a colour determined by exact composition of the material. The coloured LED's are the main elements of white-light sources and already made a dramatic impact. White itself is not actually a colour and producing what the eye perceives as a white light requires the generation of many hues together. The easiest way to make white is by using either blue or ultra violet LED's and add phosphorous. Mixing LED's to produce white light is a difficult task. This paper looks into aspects regarding solutions and methods in generating white colour with LED's for lighting.*

### 1. Introduction

Semiconductor Lighting technology has gained momentum at an unprecedented rate. Recent advances in the basic technology now makes possible that these super-efficient, long life lights will soon competing for the white light market. These lighting systems are a huge area covering a wide variety of disciplines, and encompassing everything beyond the photon creation device, including photon placement, integration into the environment, and interaction with humans. Therefore, our thinking about lighting systems is relatively immature. Basic concepts often taken for granted, such as the Color Rendering Index (CRI) or even the definition of the lumen may need to be rethought with respect to Solid-State Lighting. Natural sunlight is the most acceptable "white" light to the human eye and thus has a baseline CRI of 100. Therefore, a LEDs with a CRI metric of minimum 85, is closer to 100, so the higher the CRI the better. Early white LEDs were closer to the other side of the scale, where ultraviolet light, for example, has a CRI between 0 and 10. Another metric that LEDs strongly competing is the colour temperature. "Cool" white LEDs, which are more bluish than red, have a Kelvin temperature of 5000 and above. The LED industry is quickly moving toward semiconductor replacement of

true, natural, warm light sources, where "warm" is referred to a metric colour rendering. Currently, white solid-state light source with high CRI, a colour temperature in the 3200 ranges and light output of 22 lumens are available on a volume basis. This first semiconductor light engine ready to replicate the glow of an incandescent bulb will dramatically increase the appeal of LED illumination for indoor lighting applications.

### 2. Technology

At the heart of a solid state light is a sandwich of semiconductor layers, built on a substrate. When the electrons and holes recombine, light is emitted in a narrow spectrum around the energy band gap of the material. Because the light is narrowband, and can be concentrated in the visible portion of the spectrum, it has, like Fluorescence, a much higher light-emission efficiency than Incandescence. Therefore, Solid-State Lighting technology are overcoming similar challenges associated with converting the narrowband emission into semi-broadband emission that fills the visible spectrum to give the appearance of white light. Unlike in Fluorescence technology, the wavelength of the narrowband emission can be adapted relatively easily, by either maximizing the quantum efficiency, or to minimize the quantum

## Information

energy inefficiency associated with its conversion. Consequently, this technology is potentially more efficient than Fluorescence.

Light trapped in the semiconductor chip is one of the problems encountered by this lighting technology. The problem is due to the high refractive index (over 3) of most semiconductors, which causes most of the light (>95%) to be internally trapped due to total internal reflection. The best external quantum efficiency reported to date for a visible LED is only around 55% while the theoretical maximum is 100%.

Currently, three *approaches exist for generating white light using solid-state devices*.

- UV LED with several phosphors; UVLED+red, green and blue phosphors
- Three or more LEDs of different colours; multichip LEDs.
- Blue LED with phosphor(s); blueLED+yellow phosphor; blue LEDs+green and red phosphors.

### 2.1 Wavelength Conversion Approach

The approach converts narrowband emission into broadband white light involves using UV LEDs to excite phosphors that emit light at down-converted wavelengths. This approach is likely to be the lowest cost, because of its low system complexity (only a single LED chip, and since the colours are created already blended, lamp-level optical and colour engineering is minimized). It is also the least efficient, because of the power-conversion loss associated with the wavelength down-conversion; and the least flexible, since the colours are “preset” at the factory.

The wavelength for the UV LED in this approach is possible to be determined by balancing: the efficiency of the LED (the shorter the wavelength the less efficient); the quantum efficiency of the phosphors (the shorter the wavelength the more efficient); and the phosphor conversion efficiency (the shorter the wavelength the less efficient).

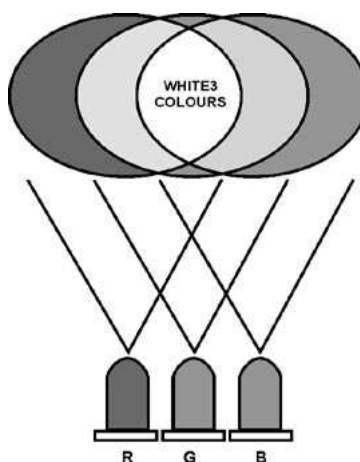
Therefore, the challenge will be the development of UV (370-410 nm) LEDs with high (>70%) external power-conversion efficiency and input power density, and multicolour phosphor blends with high (>85%) quantum efficiency. The phosphor

quantum efficiency is likely better for this approach, since there is a wider range of available phosphors that absorb in the UV. The phosphor conversion efficiency, in contrast, will be low, since there is a larger energy difference between the UV and red/green/blue light than between blue and red/green light.

### 2.2 Colour Mixing Approach.

The approach transforms narrowband emission into broadband white light by combining light from multiple LEDs of different colours (Figure1). This approach is expected to be the most efficient, as there are no power-conversion losses associated with wavelength down-conversion. It is also likely to be the most flexible, since the hue of the light can be controlled by varying the mix of primary colours, either in the lamp, or in the luminaire. For this approach, of course, there is no phosphor and therefore no phosphor-related losses.

However, it is also expected to be the most expensive, because of its high system complexity (multiple LED chips, mixing of light from separate sources, and drive electronics that must accommodate differences in voltage, luminous output, life and thermal characteristics among the individual LEDs). Therefore, the challenge will be the development of red, green and blue LEDs with high (>50%) external power-conversion efficiencies and input power density, low-cost optics and control strategies for spatially uniform, and programmable colour-mixing either in the lamp or in the luminaire. Efficiency of this approach, consist in difficulties in combining those separate sources of light.



**Figure 1** Colour mixing approach

### 2.3 Hybrid Approach

This approach converts narrowband emission into broadband white light involves Blue LEDs to excite a yellow or green and red phosphors (Figure 2). The present generation of white LEDs, with luminous efficacies of 25 lm/W, is based on this approach. Primary light from a blue (460 nm) InGaN-based LED is mixed with blue-LED-excited secondary light from a pale-yellow YAG:Ce<sub>3</sub> based inorganic phosphor. The secondary light is centred at about 580 nm with a full-width-at-half-maximum line width of 160 nm. The combination of partially transmitted blue and re-emitted yellow light gives the appearance of white light at a colour temperature of 8000 K and a luminous efficacy of about 25 lm/W. This combination of colours is similar to that used in black-and-white television screens – for which a low-quality white intended for “direct” rather than “indirect” viewing – is acceptable. There are possible other variations of this approach. The simplest extension would be to mix blue LED light with light from a blue-LED excited green and red duo-colour phosphor blend – this variation is likely to be give the best balance between efficiency, colour quality, cost and system complexity. A more complex but perhaps more efficient extension of this approach would be to mix blue and red LED light with light from a blue-LED excited green phosphor.

For this approach, colour non-uniformity occurs because the light from the blue LED is directional while the light from the phosphor radiates over a  $2\delta$  solid angle. Also, since chip and phosphor efficiency may change with temperature, the ratio of the colours that are being blended will also change with temperature.

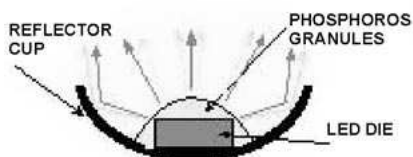


Figure 2 Blue LED chip + yellow phosphors

### 3. Delivering light to the viewer

The final step for a semiconductor light source is to delivery the white light, first to that part of the

environment that is to be illuminated, and then to the viewer.

Obviously the intent is that these targets would be met simultaneously, in a single SSL-LED lamp. SSL-LEDs have many advantages in this regard simply because they are point sources, they can deliver directed light more efficiently to small areas. Their compactness enables more flexibility in the design of unobtrusive and architecturally blended luminaires. Their ruggedness enables them to be mounted in high-stress positions. And, it may be possible to program their colour and direction for optimal interaction with the human visual system. Practical optimisation of a white LED involves two issues: firstly attaining the highest radiant efficiency and secondly the spectral power distribution optimisation for the highest CRI and efficacy.

#### 3.1 Colour Rendering

This attributes of a Solid-State Lighting source is its ability to closely deliver the colours of non-white objects that it illuminates. One quantitative measure of the accuracy of colour rendering is the colour-rendering index (CRI). This measure is based on comparing the colours rendered by a LEDs light source to the colours rendered by a “perfect” reference light source with the same CCT – daylight illumination for CCTs > 5000 K and Planckian blackbody radiation for CCTs < 5000 K.



Figure 3 White LED beam

The comparison is made for a set of sample colours; the weighted average of the colour rendering for each of these sample colours gives the General Colour Rendering Index  $R_a$  for the light source. For SSL-LEDs  $R_a$  is not a perfect measure of colour rendering quality but is the best-accepted

## Information

metric. The trade off between efficacy and *CRI* can be analysed easily for a spectral power distribution system containing  $n$  primary sources. The results of simulations in which, for a fixed colour temperature and fixed line widths, the wavelengths and power densities of 2-, 3-, 4- and 5-color white light sources were varied to deduce the envelope of maximum *CRI* and luminous efficacy indicates that a dichromatic system is incapable of offering high quality light.

As the maximum luminous efficacy decreases, the maximum *CRI* increases, as the wavelengths “fill” and move farther to the extremes of the visible spectrum. The maximum *CRI* begins to saturate at 3 for a 2-colour source, at 85 for a 3-color source, at 95 for a 4-color source, and at 98 for a 5-color source. Of course, the more colours, the more complex the lamp must be. Therefore, it is likely that a tri-colour source, which can achieve the target *CRIs* of 80 or greater, will provide the best balance between *CRI*, luminous efficacy, and lamp complexity. Indeed, the situation for tri-colour white light sources composed of broadband phosphors, or of a combination of narrowband LEDs and broadband phosphors, is even more favourable, and *CRIs* greater than 85 should be possible. In Figure 3 is illustrated the beam from a 5mm white LED (hybrid approach) with chromaticity coordinates  $x=0.32$ ,  $y=0.31$  and a  $23^\circ$  view angle. The brownish/yellowish emphasize some deficiency in the white phosphors conversion. The intensity of the white inner beam is approx 4000 mcd at 20 mA with a colour temperature of 5500 K. Therefore, SSL-LED technology has advantages and disadvantages relative to fluorescence technology. On the one hand, their initial narrowband light is available in a much greater range of wavelengths, including the visible and the near UV, rather than limited to the available emissions from a gas. On the other hand, phosphors that can simultaneously be excited by these wavelengths while emitting at wavelengths optimal for good *CRI* have thus far been limited.

### 3.2 Colour Temperature

One of another attribute of a SSL lighting source is its apparent colour when viewed directly, or when illuminating a perfectly white object. This attribute can be quantified through use of chromaticity coordinates ( $x$ ,  $y$ ) on the CIE 1931 chromaticity

diagram. These chromaticity coordinates apply both to monochromatic as well as white light. The chromaticity coordinates of monochromatic light are represented by the boundary of the horseshoe (the “spectrum locus”). The chromaticity coordinates of mixtures of monochromatic light are intensity-weighted linear combinations of the chromaticity coordinates of the individual monochromatic lights. In other words, a mixture of two colours will produce a chromaticity coordinate falling on the line between their respective chromaticity coordinates.

The chromaticity coordinates of white light lie along the curved Planckian locus in the center of the diagram. The type of white on the Planckian locus is specified by the blackbody temperature in Kelvin and is called the colour temperature. For example, mixing two equal-intensity LEDs with wavelengths at 485 nm (blue) and 583 nm (orange) will produce white colour with a colour temperature of about 4000 K.

Strictly speaking, colour temperature cannot be used for colour coordinates ( $x$ ,  $y$ ) of the Planckian locus. In these cases, the correlated colour temperature (*CCT*) is used. *CCT* is the temperature of the blackbody whose perceived colour most resembles that of the light source in question. In principle, the *CCT* can be deduced by constructing “iso-*CCT*” lines, which intersect the Planckian locus. In practice, white light sources must lie very close to the Planckian locus, as the human eye is extremely sensitive to even small deviations.

However, as with the *CRI*, there is a strong trade-off between *CCT* and luminous efficacy. This trade off is illustrated in for a tri-colour white light source. As *CCT* decreases, the proportion of red to blue light increases. At a colour temperature of about 3900 K, in between those for typical incandescent lamps and daylight, the maximum luminous efficacy is 400 lm/W. This is the number used to represent the luminous efficacy of a 100%-efficient tricolour solid-state lighting source.

In Table 1 are the wavelengths of the tri-colour white light source that maximizes luminous efficacy at fixed *CRI*=80 as a function of *CCT*.

In order to specify the colour of an LED, three different wavelength specifications are generally used:

## Information

**Table 1** Wavelength versus luminous efficiency

| CCT  | CRI | Maximum luminous efficacy (lm/W) | Wavelength (nm) |       |     |
|------|-----|----------------------------------|-----------------|-------|-----|
|      |     |                                  | Blue            | Green | Red |
| 2500 | 80  | 419                              | 463             | 547   | 610 |
| 3000 | 80  | 416                              | 462             | 544   | 608 |
| 3500 | 80  | 408                              | 462             | 543   | 607 |
| 4000 | 80  | 397                              | 461             | 542   | 606 |
| 4500 | 80  | 387                              | 460             | 540   | 605 |
| 5000 | 80  | 378                              | 459             | 539   | 604 |
| 5500 | 80  | 368                              | 459             | 539   | 604 |
| 6000 | 80  | 361                              | 459             | 539   | 604 |

- Peak wavelength –the maximum point of the spectral curve:  $\lambda_p$
- Main wavelength- the main point of the spectral curve:  $\lambda_s$
- Dominant wavelength - a measure of the hue perceived by the human eye:  $\lambda_d$

The chromaticity  $x$  (red) and  $y$  (green) are determined using the 3-colour method. The dominant wavelength can then be graphically determined from the chromaticity diagram. For this purpose, a straight line is drawn from the white point (achromatic) W through the colour locus S ( $x, y$ ) until this line intersects with the spectral colour curve. Since the light emitted by LED's (exception blue) has a colour saturation of almost 100%, the colour locus S is very close to the spectral curve. In Table 2 are illustrated characterises for a typical red, blue and green LED's.

With a three-colour LEDs combination, highest overall luminous efficacy is achieved by using the most with more luminous efficacy (green and secondarily red) and less of what has the lowest luminous efficacy (blue). The characteristics of the mixed LEDs are illustrated in Table 3.

### 4. Intensity and hue of a mixed colour approach

The principle of colour mixing follows from the makeup of the 1931 CIE chromaticity diagram. A set of  $n$  primary sources with the chromaticity coordinates  $x_i, y_i$ , and radiant fluxes  $\Phi_{ei}$  will produce a colour with the following chromaticity coordinates:

$$x_m = \sum x_i \Phi_{ei} / \sum \Phi_{ei}; y_m = \sum y_i \Phi_{ei} / \sum \Phi_{ei}.$$

For  $n$  LEDs specified by its luminous intensities  $I_{vi}$  and by its dominant wavelength and with that by its chromaticity coordinates  $x_i, y_i$ , the following equations one can calculate hue and dominant wavelength of the mixed colour:  $x_m = \sum x_i m_i / \sum m_i$ ;  $y_m = \sum y_i m_i / \sum m_i$ ;  $I_{vm} = \sum I_{vi}$ , where  $m_i = I_{vi} / y_i$ .

For example for two LED's with the same viewing angle where LED<sub>1</sub> has a light intensity  $I_{v1}=1000$  mcd, with chromaticity coordinates  $x_1=0.13, y_1=0.075$  (blue 470 nm) and LED<sub>2</sub> with  $I_{v2}=2000$  mcd and chromaticity coordinates  $x_2=0.7, y_2=0.3$  (red 625 nm), the characteristics of the mixed colour are as follows:  $I_{vmix}=3000$  mcd,  $x=0.32, y=0.15$ .

Basically for two LEDs any colour can be obtained alongside the line connecting them on the CIE chromaticity diagram by varying the saturation level. For three LEDs, the colour coordinates are situated within the triangle of those components coordinates.

### 5. Lighting Systems

The light-engine chip, the lamp, and the luminaire, are clearly the technology enablers of the lighting system. However, the other pieces of the lighting system are also critically important, with their own unique challenges:

- Delivering low-voltage high-current electricity in a world dominated by high-voltage low-current sockets.
- Integrating solid-state lighting into building

**Table 2** Typical characteristics for high intensity AlInGaP/InGaN LEDs

| 5mm LEDs | X     | Y     | Z     | Luminous output at 20 mA (lm) | Luminous efficacy (lm/W) | Viewing angle degrees | Package optics   |
|----------|-------|-------|-------|-------------------------------|--------------------------|-----------------------|------------------|
| Blue     | 0.13  | 0.075 | 0.795 | 0.55                          | 75                       | 15                    | T-1 ¾ clear vert |
| Green    | 0.17  | 0.7   | 0.13  | 2.6                           | 520                      | 15                    | T-1 ¾ clear vert |
| Red      | 0.708 | 0.292 | 0.001 | 0.85                          | 155                      | 15                    | T-1 ¾ clear vert |

## *Information*

**Table 3** Colour temperature for three mixed colour

| Colour temperature (K) | B 472 nm (%) | G 525 nm (%) | R 626 nm (%) | Overall efficiency (lm/W) |
|------------------------|--------------|--------------|--------------|---------------------------|
| 2700                   | 4.9          | 31.6         | 63.5         | 26.9                      |
| 3000                   | 6.8          | 32.8         | 60.4         | 26.7                      |
| 3500                   | 9.9          | 33.9         | 56.2         | 26.3                      |
| 4100                   | 13.4         | 34.4         | 52.2         | 25.7                      |
| 5000                   | 17.8         | 34.4         | 47.8         | 24.8                      |
| 5500                   | 20.0         | 34.1         | 45.9         | 24.4                      |
| 6500                   | 23.4         | 33.5         | 43.1         | 23.65                     |
| 9300                   | 29.8         | 31.7         | 38.5         | 22.25                     |
| 13,000                 | 33.3         | 33.3         | 33.3         | 20.8                      |

architectures, and the complex and delicate interplay between function and form.

- Understanding the ways in which solid-state lighting interacts with the human visual system to increase comfort and human productivity.

Perhaps the most critical aspect of the luminaire is how it distributes light from the lamp into the workspace, according to the application. It is this aspect that will most distinguish luminaires for solid-state lighting from those used in traditional lighting. Because solid-state lighting lamps are essentially point sources of light, the optics required to collimate, focus and direct are relatively straightforward, and are ideally suited to directed “task-lighting” applications. Indeed, for such applications, solid-state lighting is expected to have a roughly 2x advantage over traditional lighting in the efficiency with which the task area is selectively illuminated. It is also necessary to use optics to create the uniform and homogeneous light output necessary for indirect large-area lighting applications.

In the early stages of solid-state lighting, luminaire optics will be even more complex, as much of the colour-mixing may be done at the luminaire level, and the lack of single lamps with the necessary lumens out will require working with multiple lamps. In the later stages, however, the optics is expected to simplify, as colour mixing and white light production moves to the lamp level, and as single lamps achieve the lumens necessary for single luminaires.

## **6. Conclusions**

The connection between lighting, the human visual system and, ultimately, human comfort and productivity, has long been complex and controversial. As it was mentioned, even the most basic concept of colour rendering quality is not yet well defined. The connection is all the more critical for solid-state lighting, with its ability to selectively and perhaps programmably fill the visible spectrum through primary light from chips and secondary light from phosphors.

One of the most fascinating aspects of solid-state lighting technology is sure to be the development of building and lighting architectures that, at a system level, exploit the unique characteristics of solid state lighting while still appealing at a consumer level to human ergonomics. Some of these unique features are related to the physical form factors (compactness) and environmental compatibility (rugged and vibration resistant) of SSL-LEDs. These physical characteristics will enable SSL-LEDs to be integrated more readily with building architectures and architectural materials. Some of these unique features are related to the programmability of SSL-LEDs – including dimmability while maintaining high luminous efficacy, and colour tailoring. Especially in buildings in which lighting is a mix between electric and natural (daylight) sources, programmable (dimmable) lighting can save significant amounts of energy. The Solid-State Lighting adds a new dimension to programmability – modifying lights according to the use of a room, switching between programmability and energy efficiency. For solid-state lighting, these compromises may not need to be made – human

## Information

comfort and productivity through programmable lighting can be optimised more independently of energy efficiency. The common theme is to make use of both the hardware and software aspects of SSL-LEDs to create a new generation of more aesthetic and more energy-efficient buildings and homes.

### 7. References

- 1 Zukauskas, A., Vaicekauskas, R., Ivanauskas, F., Gaska, R., Shur, M.S., 2002, *Introduction in Solid-State Lighting*, John Wiley and Sons, Inc., New York
- 2 Chipalkatti, Ch., LED Systems for Lighting: Where the rubber hits the road, *OIDA Solid-State Lighting workshop*
- 3 Agilent Technologies - *Data sheet for trough hole LED's*
- 4 Lumileds Lighting - *Application Notes*
- 5 Tsao, J., 2002, Light emitting diodes for general illumination - *An OIDA Technology road map update 2002*", published by OIDA
- 6 Hewlett Packard, 1999, *FAE Peak Seminar 1999* - ESS Training
- 7 Lumileds Lighting LC, 2003, New Luxeon White binning structure, *Memorandum June 20*
- 8 Rea, M.S., *The IESNA Lighting Handbook*, 9<sup>th</sup> edition

- 9 Schubert, E.F., 2000, *Light Emitting Diodes*, Viewgraph tutorial put together in 2000
- 10 Haitz, R., Kish, F., Tsao, J.Y., Nelson, J., *The case of a National Research Program on Semiconductor Lighting*, OIDA



**Stelian MATEI**

Department of Electrical Engineering, Peninsula Technikon, P.O.Box 1906, Bellville 7536, South Africa  
Office Ph.: 021-959 6012,  
Fax: 021-959 6117 (Reception)  
E-mail: mateis@pentech.ac.za

Dipl. Eng. Bucharest – Polytechnic Institute. PhD dissertation at UCT- Faculty of Electrical Engineering. Lecturer - Digital Systems, Optoelectronics, Design Projects. Research and area of interest - Energy efficient solution: Solid-State illumination (LED's lighting), Process Controllers, Solid-State Technology application in Biotechnology and Medicine (Phototherapy)

Received 29 February 2004

## CULOAREA ALBĂ CU LED-URI: CONCEPTE ȘI METODE ÎN ILUMINAREA EFICIENTĂ CU COMPONENTE SOLID-STATE

*Iluminarea. convențională aproape că a atins eficiența maximă, nu însă și în cazul iluminării cu surse solid-state. LED-ul funcționează pe un principiu complet diferit, prin conversia semnalului electric în semnal optic, a cărui culoare este determinată de compoziția materialului straturilor cristaline din care este alcătuit. LED-urile colorate au produs deja un impact dramatic, ele fiind principalele elemente din sursele de lumină albă cu solid-state. De fapt, albul în sine nu este o culoare, iar generarea a ceea ce ochiul percepe ca lumină albă necesită producerea unui spectru larg de nuanțe. Cea mai simplă cale de a obține culoarea albă este prin utilizarea LED-urilor albastre sau UV la care se adaugă un strat de fosfor. Mixarea LED-urilor pentru a produce lumină albă este o misiune dificilă. Acest articol se referă la metode și soluții utilizate pentru obținerea culorii albe cu LED-uri.*

### 1. Introducere

Dezvoltarea tehnologiei luminii bazate pe semiconductori a atins un ritm fără precedent. Ultimele descoperiri din tehnologiile de bază vor face posibil ca, în curând, aceste surse de lumină,

super-eficiente și de viață lungă să concureze pe piața tradițională de surse luminoase. Sistemele de lumină cu semiconductori acoperă o arie largă de discipline, începând cu crearea fotonului, incluzând plasarea și integrarea în mediul înconjurător și terminând cu interacțiunea cu omul. Ca urmare a

acestui fapt, gândirea noastră legată de sistemele de lumină a rămas relativ imatură. Concepte de bază, cum sunt indicele de redare a culorii (*CRI*) și chiar definiția lumen-ului, sunt adesea luate ca atare și, în consecință, necesită reconsiderație ca răspuns la apariția acestor noi surse de lumină.

Lumina naturală, a cărei valoare *CRI* de bază este 100, este cea mai acceptabilă lumină «albă» pentru ochi. Astfel că un LED cu un *CRI* de minimum 85 este apropiat de valoarea de 100 și, deci, cu cât mai ridicat cu atât mai acceptat. La început, LED-urile albe se apropiau de cealaltă parte a scalei, dinspre lumina ultravioletă, ce au, spre exemplu, un indice *CRI* între 0 și 10. O altă măsură cu care LED-urile concurează puternic, este temperatura de culoare. LED-urile albe «reci» au o tentă mai mult albastră decât roșie și au o temperatură de culoare de 5000 K și chiar mai mare. Industria de LED-uri se dezvoltă cu viteză și se îndreaptă către înlocuirea surselor de lumină naturale «calde». În prezent, sursele de lumină cu solid-state cu un indice *CRI* ridicat, ce au o temperatură de culoare de circa 3200 K și flux luminos de 22 lm, sunt produse pe scară largă. Apariția primului semiconductor generator de lumină, gata să reproducă strălucirea unui bec cu incandescență, va face deosebit de atractivă implementarea LED-urilor în aplicații de iluminat interior și exterior.

## 2. Tehnologie

La baza surselor de lumină cu componente solid-state stă un sandwich de straturi semiconductoare, crescute pe un substrat. Când electronii și golurile se recombina, emit o lumină într-un spectru îngust în jurul benzii energetice a materialului. Fiindcă lumina este emisă într-o bandă îngustă de-a lungul spectrului vizibil, eficiența emisiei luminoase este mult mai ridicată decât Incandescența. Tehnologia luminii cu solid-state se confruntă cu aceleași dificultăți legate de conversia emisiei de bandă îngustă în cea de bandă semi-largă, din cadrul spectrului vizibil, în vederea creării senzației de lumină albă. Spre deosebire de tehnologia fluorescentă, lungimea de undă a emisiei de bandă îngustă poate fi controlată relativ ușor, fie prin creșterea eficienței quantice, fie prin micșorarea ineficienței acestei energii asociate conversiei. Ca urmare, această tehnologie prezintă

un potențial de eficiență mult mai ridicat decât fluorescența.

Una dintre problemele cu care se confruntă această tehnologie este eliberarea luminii reținute în chip-ul semiconductor. Reținerea acestei luminii se datorează, în principal, indicelui de refracție ridicat al majorității semiconductorilor (peste 3), care determină ca cea mai mare parte a luminii (95%) să fie reținută ca urmare a reflexiilor interioare. Cea mai ridicată eficiență quantică externă pentru LED-urile din spectrul vizibil este de numai 55%. Astăzi există trei moduri de abordare pentru generarea luminii albe folosind componente cu solid-state:

- LED-uri UV cu straturi multiple de fosfor; LED-uri UV+fosfor roșu, verde și albastru.
- Trei sau mai mult LED-uri de diferite culori; LED-uri multichip.
- LED-uri albastre cu fosfor; LED-uri albastre+fosfor galben, LED-uri albastre+fosfor verde și roșu.

### 2.1 Abordarea prin schimbarea lungimii de undă.

Aceast mod de abordare transformă emisia de lumină de bandă îngustă în lumină albă de bandă largă prin folosirea de LED-uri ultraviolete ce excită un fosfor care emite la rândul lui o lumină convertită – în domeniul de jos al spectrului. Acest mod de conversie este de așteptat a fi cel mai eficient din punct de vedere al costului, datorită complexității scăzute (este utilizat un singur chip LED, iar sistemul optic și de prelucrare a culorii este minimdat fiind faptul că culorile sunt amestecate deja). Această metodă este însă cea mai puțin eficientă, datorită pierderilor de energie din procesul de conversie, în domeniul de jos al spectrului și mai puțin flexibilă, deoarece culoarea este “presetată” la fabrică.

În cazul acestei abordări, lungimea de undă pentru LED-urile UV poate fi determinată prin echilibrarea eficienței LED-ului (lungimi de undă mici, eficiență redusă) cu eficiența quantică a fosforului (lungimi de undă mici, eficiență crescută) și eficiența conversiei fosforului (lungimi de undă mici, eficiență redusă).

În consecință, problema constă în dezvoltarea de LED-uri UV (370 – 410 nm) cu un grad ridicat de eficiență de conversie externă (>70%) și un amestec de culori de fosfor cu un grad ridicat de

## Information

eficiență quantică (>85%). Eficiența de conversie a fosforului va fi, în contrast, scăzută atâta timp cât diferența energetică între lumina UV și cea roșie/verde/albastră este mai mare decât cea dintre lumina albastră și cea roșie/verde/albastră.

### 2.2 Abordarea prin mixarea culorilor

Acest mod de abordare transformă emisia de bandă îngustă în lumină albă de bandă largă prin combinarea LED-urilor de diferite culori (Figura 1). Acest mod de conversie este de așteptat să fie cel mai eficient pentru că nu există pierderi de putere asociate cu conversia lungimii de undă în domeniul de jos al spectrului. Este de așteptat, de asemenea, să fie cel mai flexibil, deoarece nuanța culorii de lumină poate fi controlată prin varierea amestecului de culori primare, fie în aparatul de iluminat, fie în lampă. Bineînțeles că, la acest mod de abordare, nu există fosfor și, deci, nu sunt pierderi asociate cu acest lucru.

Este însă de așteptat ca această abordare să fie cea mai scumpă, datorită complexității sistemului (numeroase chip-uri LED, amestecul luminii de la surse separate, sistem electronic de control ce trebuie să facă față diferențelor de tensiune, intensitate luminoasă, durată de viață și caracteristici termice dintre LED-uri). Ca urmare, provocarea va consta din obținerea de LED-uri roșii, verzi și albastre cu valori ridicate ale eficienței conversiei de putere de la ieșire (>50%), preț scăzut al sistemului optic, precum și un mod de abordare strategic în vederea mixării spațial uniforme și programabile a culorilor, fie în lampă, fie în aparatul de iluminat. Dificultățile legate de eficiența acestui mod de abordare constau din combinarea surselor de lumină separate.

### 2.3 Abordarea hibridă

Acest mod de abordare transformă emisia de bandă îngustă în lumină albă de bandă largă, prin excitarea unui fosfor galben, verde sau roșu de la un LED albastru (Figura 2). Generația actuală de LED-uri albe cu eficacitate luminoasă de 25 lm/W se bazează pe acest mod de abordare. Lumina primară albastră (460 nm), produsă de un LED bazat pe tehnologia InGaN, este mixat cu lumina secundară emisă prin excitarea stratului de fosfor anorganic YAG:Ce<sub>3</sub> de culoare galben pal. Această lumină secundară are maximul în jurul valorii de 580 nm cu

o lățime la jumătatea intensității maxime (FWHM) de 160 nm. Combinația de lumină albastră, parțial transmisă și re-emisă, dă aparența de lumină albă cu o temperatură de culoare de 8000 K și o eficacitate luminoasă de aproape 25 lm/W. Această combinație de culori este similară cu cea utilizată la ecranele de televiziune alb negru, pentru care este acceptabilă o calitate scăzută a albului, destinată mai mult privitorului “direct” decât celui “indirect”. Modul acesta de abordare creează posibilitatea și unor variațiuni. Prima și cea mai simplă ar fi mixarea luminii de la un LED albastru cu lumina produsă de un LED albastru ce excită un amestec de fosfor bi-color; aceasta variație este de așteptat să producă cel mai bun echilibru între eficiență, calitate a culorii, cost și complexitate a sistemului. O altă variație, mult mai complexă și, probabil, mult mai eficientă, ar fi mixarea luminilor de la un LED albastru și roșu cu cea produsă de un fosfor verde de la un LED albastru.

Pentru acest mod de abordare hibrid, neuniformitățile culorii pot apare datorită faptului că lumina de la LED-ul albastru este unidirecțională, în timp ce lumina de la fosfor este radiată cu un unghi solid de  $2\delta$ . De asemenea, eficiențele chip-ului și fosforului se schimbă cu temperatura și, deci, raportul amestecului de culori se va schimba deasemeni cu temperatura.

### 3. Furnizarea luminii la observator

Ultimul pas pentru o sursă de lumină cu semiconductori este furnizarea luminii albe, mai întâi către zona de iluminat și apoi către observator. Bineînțeles că scopul este ca aceste obiective să fie satisfăcute simultan de lampa SSL cu LED-uri. În această privință, SSL-LED sunt mai avantajoase pentru simplul fapt că sunt surse de lumină punctiforme și, deci, pot furniza lumină directă mult mai eficient pe suprafețe mici. Pentru că sunt așa de compacte, asigură flexibilitate în proiectarea de combinații arhitecturale de aparate de iluminat neobstructive. Durabilitatea lor permite instalarea în locuri cu solicitare ridicată. De asemenea, este posibilă programarea culorilor și direcționarea pentru o interacțiune optimă cu sistemul vizual uman. Optimizarea practică a unui LED alb presupune două aspecte: primul - atingerea celei

mai mari eficiențe radiative și al doilea - optimizarea distribuției spectrului de putere pentru cel mai ridicat indice *CRI* și eficacitate.

### 3.1 Indicele de redare a culorii

Această caracteristică a surselor de lumină cu solid-state reprezintă abilitatea lor de a reda cât mai apropiat culorile obiectelor iluminate. O măsură cantitativă a acestei precizii de redare este indicele de redare a culorii (*CRI*). Acesta se determină prin compararea luminii redată de o sursă cu LED-uri cu o sursă de referință etalon cu aceeași temperatură de culoare corelată (*CCT*) – *CCT*>5000 K pentru iluminatul natural și *CCT*<5000 K pentru radiația Planckiană a corpului negru. Compararea a fost făcută pentru un set de eşantioane de culori; media redării culorii, pentru fiecare din aceste eşantioane, produce indicele general de redare a culorii  $R_a$  al sursei de lumină respective. Pentru SSL cu LED-uri,  $R_a$  nu este o măsură perfectă a calității redării culorii dar este în prezent cel mai acceptat. Relația dintre eficacitate și indicele *CRI* poate fi analizată ușor pentru un sistem spectral de distribuție a puterii ce conține  $n$  surse primare de culoare. Rezultatele obținute în urma simulărilor, în care pentru o temperatură de culoare fixă și lățimi fixe, au fost variate lungimile de undă și densitățile de putere pentru 2, 3, 4 și 5 culori componente dintr-o sursă albă de lumină au fost variate pentru a deduce anvelopa indicelui maxim *CRI* și eficacitatea luminoasă, demonstrează că un sistem bi-cromatic este incapabil să ofere o lumină de calitate ridicată.

Cu cât maximul eficacității luminoase descrește, cu atât maximul *CRI* descrește și el, iar lungimile de undă tind să “umple”, deplasându-se către extremele spectrului vizibil. Maximul indicelui *CRI* începe să se satureze la 3, pentru o sursă compusă din două culori, la 85 pentru o sursă compusă din 3 culori, la 95 pentru o sursă compusă din 4 culori și la 98 pentru o sursă cu 5 culori. Bineînțeles că, cu cât sunt mai multe culori, cu atât lampa este mai complexă. Ca urmare, este posibil ca o sursă compusă din trei culori care ar putea atinge un indice *CRI* de 80 sau mai mare, să producă cel mai bun echilibru între eficacitatea luminoasă și complexitatea lămpii. Într-adevăr, situația este avantajoasă pentru sursele de lumină albă compuse din trei culori cu fosfor de bandă largă sau combinațiile de LED-uri de bandă

îngustă și fosfor de bandă largă, al căror posibil indice *CRI* este mai mare de 85. În Figura 3 este ilustrat fascicolul unui LED alb (mod de abordare hibrid) cu coordonatele cromatice  $x=0,32$ ,  $y=0,31$  și un unghi de 23°. Maroniu/gălbuiul indică deficiența de conversie în alb a fosforului. Intensitatea luminoasă în centrul fascicolului este de aproximativ 4000 mcd, la 20 mA cu o temperatură de culoare de 5500 K. Prin urmare, tehnologia SSL cu LED-uri are avantaje dar și dezavantaje în comparație cu tehnologia Fluorescentă. Pe de altă parte, lumina de bandă îngustă inițial este accesibilă într-un domeniu larg de lungimi de unde, incluzând spectrul vizibil și cel apropiat de UV, nefiind limitat ca în cazul emisiei cu gaze. De asemenea, fosforul, excitat simultan de aceste lungimi de unde, va emite lungimile de unde optime nefiind limitate în ceea ce privește indicele *CRI*.

### 3.2 Temperatura de culoare

Un alt atribut al unei surse de lumină cu SSL este aparența culorii când este privită direct sau când luminează un obiect perfect alb. Acest atribut poate fi cuantificat utilizând coordonatele cromatice ( $x$ ,  $y$ ) din diagrama cromatică CIE 1931. Aceste coordonate cromatice se aplică atât în cazul luminii monocromatice, cât și al luminii albe. Coordonatele cromatice ale luminii monocromatice sunt reprezentate prin linia în formă de potcoavă («spectrum locus»). Coordonatele cromatice ale amestecurilor de lumini monocromatice reprezintă estimarea intensităților combinațiilor liniare ale coordonatelor cromatice ale componentelor individuale de lumină monocromatică. Cu alte cuvinte, o combinație de două culori va produce coordonate cromatice ce se află pe linia dintre cele două coordonate. Coordonatele cromatice ale luminii albe se află pe curba Planckiană în centrul acesteia. Acest tip de alb, de pe locusul Planckian, este specificat de temperatura corpului negru în grade Kelvin și este denumit temperatura de culoare. Spre exemplu, mixând lumina de la două LED-uri cu lungimi de unde de 485 nm (albastru) și, respectiv, 583 nm (portocaliu), se va produce culoarea albă cu o temperatură a culorii de aproape 4000 K.

De fapt, temperatura de culoare nu poate fi folosită pentru coordonatele culorii ( $x$ ,  $y$ ) care nu se află pe locus-ul Planckian. În aceste cazuri se

## Information

folosește temperatura de culoare corelată (*CCT*). *CCT* este temperatura corpului negru a cărui culoare este percepută ca fiind cea mai apropiată de sursa de lumină analizată. În principiu, *CCT* poate fi dedus prin construirea liniilor «iso-*CCT*» care intersectează locusul Planckian. În practică, sursele de lumină albă se întâlnesc foarte aproape de locusul Planckian, deoarece ochiul uman este foarte sensibil la deviații mici. Există o dependență puternică între *CCT* și eficacitatea luminoasă. Cu cât *CCT* descreește, proporția de lumină roșie și albastră descreește. La o temperatură de culoare de 3900 K situată între lumina de zi și cea tipică produsă de lămpile incandescente, eficacitatea luminoasă maximă este de 400 lm/W. Aceasta este valoarea folosită în reprezentarea eficacității luminoase a unei surse de lumină cu solid-state cu eficiență 100%.

În Tabelul 1 este arătat maximul eficacității luminoase a unei surse de lumină albă compusă din trei culori în funcție de *CCT* pentru un indice *CRI*=80. În specificarea culorii unui LED sunt folosite, în general, trei moduri diferite: - lungimea de undă de vârf - punctul de maxim al curbei spectrale  $\lambda_p$ ; - lungimea de undă principală - punctul principal de pe curba spectrală  $\lambda_s$ ; - lungimea de undă dominantă - măsura nuanței percepute de ochiul uman  $\lambda_D$ .

Cromaticitățile  $x$  (roșu) și  $y$  (verde) sunt determinate folosind metoda celor trei culori. Lungimea de undă dominantă este apoi determinată grafic din diagrama cromatică. În acest scop, se poate trasa o linie dreaptă pornind de la punctul de alb (acromatic) W, trecând prin locusul de culoare S ( $x, y$ ), până când linia intersectează curba spectrală de culoare. Deoarece lumina emisă de LED-uri (exceptând albastru) are saturația culorii de aproape 100%, locusul S este foarte apropiat de curba spectrală. În Tabelul 2 sunt ilustrate caracteristicile unui LED roșu/albastru/verde obișnuit.

Cu o combinație de LED-uri de trei culori diferite, cea mai ridicată eficacitate luminoasă totală este obținută prin folosirea celor cu eficacitate luminoasă ridicată (verde și secundar roșie) și cea mai mică eficacitate - folosind pe cele având eficacitatea luminoasă redusă (albastru). Caracteristicile unui asemenea amestec de LED-uri este ilustrat în Tabelul 3.

## 4. Intensitatea și nuanța culorii în cazul modului de abordare prin mixare

Principiul mixării culorii a rezultat din modul în care a fost construită diagrama CIE 1931. Un set de  $n$  surse primare cu coordonatele cromatice  $x_p, y_i$  și un flux radiant  $\Phi_{ei}$  va produce o culoare cu următoarele coordonate cromatice:

$$x_m = \sum x_i \Phi_{ei} / \sum \Phi_{ei}; y_m = \sum y_i \Phi_{ei} / \sum \Phi_{ei}.$$

În vederea calculării lungimii de unde dominante a culorii rezultate pentru  $n$  LED-uri caracterizate prin intensitățile lor luminoase, lungimile de unde dominante, deci coordonatele cromatice  $x_p, y_i$  pot fi folosite următoarele ecuații:  $x_m = \sum x_i m_i / \sum m_i; y_m = \sum y_i m_i / \sum m_i$ , unde  $m_i = I_{vi} / y_i$ .

Spre exemplu, pentru două LED-uri cu același unghi de privire, unde LED<sub>1</sub> are intensitatea luminoasă  $I_{v1}=1000$  mcd și coordonatele cromatice  $x_1=0,13, y_1=0,075$  (albastru 470 nm), iar LED<sub>2</sub> are  $I_{v2}=2000$  mcd și coordonatele cromatice  $x_2=0,7, y_2=0,3$  (roșu 625 nm), caracteristicile culorii rezultate sunt următoarele:  $I_{vmix} = 3000$  mcd,  $x=0,32, y=0,15$ .

În principiu, pentru două LED-uri se poate obține orice culoare de-a lungul liniei ce unește aceste coordonate din diagrama cromatică CIE, prin varierea nivelului de saturație. Pentru trei LED-uri, coordonatele cromatice sunt situate în interiorul triunghiului determinat de coordonatele acestor componente.

## 5. Sisteme de iluminat

Chip-ul generator de lumină, lampa și aparatul de iluminat sunt tehnologiile ce stau la baza unui sistem de iluminat. Sunt, însă, și alte componente deosebit de importante din acest sistem, cum ar fi:

- furnizarea de tensiuni reduse și intensități ridicate într-o lume dominată de prize cu tensiuni mari și curenți mici;
- integrarea iluminatului cu solid-state în arhitectura clădirilor, precum și misiunea delicată și complexă de adaptarea între funcțiune și formă.
- înțelegerea modului în care sursele de lumină cu solid-state interacționează cu sistemul vizual uman în vederea creșterii confortului și a productivității.

## *Information*

Probabil că cel mai important aspect al aparatului de iluminat este distribuția luminii de la lampă în spațiul de lucru, în conformitate cu cerințele. Acest aspect va produce distincția dintre aparatele de iluminat pentru surse solid-state față de cele tradiționale. Deoarece un aparat de iluminat pentru surse cu solid-state conține lămpi emițătoare punctiforme, sistemul optic necesar de colimare, direct sau concentrat, este relativ simplu și de aceea sunt recomandate pentru iluminatul de lucru. Pentru acest gen de aplicații, sursele cu solid-state vor fi de două ori mai avantajoase decât sistemele de iluminat tradiționale, datorită eficienței cu care este iluminată zona de lucru. Este necesar, de asemenea, folosirea de sisteme optice, pentru producerea luminii uniforme și omogene, necesară zonelor indirecte largi.

Pentru început, aparatele de iluminat cu solid-state vor conține sisteme optice foarte complexe, atâta timp cât mixarea culorilor va fi făcută la nivelul aparatului de iluminat, iar lumina necesară este obținută de la o multitudine de lămpi în locul lămpii singulare. În etapele următoare, este de așteptat ca sistemele optice să se simplifice, deoarece mixarea culorilor și producerea luminii albe se va muta la nivelul lămpii, iar lumina necesară va fi produsă doar de o singură lampă.

### **6. Concluzii**

Legătura dintre lumină, sistemul vizual uman și, în final, confort și productivitate a rămas pentru mult timp complexă și controversată. Așa cum a mai fost menționat, chiar și cele mai de bază concepte legate de calitatea redării culorii nu sunt îndeajuns de bine definite. Această legătură devine și mai critică

în cazul iluminatului cu surse solid-state, pentru că ele au abilitatea să completeze spectrul vizibil selectiv și, probabil, programabil, prin folosirea componentelor primare, plecând de la chip și sursa secundară de lumină a fosforului. Este de așteptat ca unul dintre cele mai fascinante aspecte ale tehnologiei acestor surse de lumină cu solid-state să fie dezvoltarea arhitecturii clădirii și a luminii, care la nivel de sistem exploatează caracteristicile unice ale acestor surse, reușind însă să rămână atrăgătoare din punct de vedere ergonomic la nivelul consumatorului. Câteva din aceste caracteristici unice ale SSL cu LED-uri se referă la aspectul fizic (compacte), la compatibilitatea lor cu mediul înconjurător (rezistența la vibrații și intemperii) și la programabilitate, ce constă din reglarea intensității luminii, menținând însă un grad înalt de eficacitate și calitate a culorii. În acest fel, se pot aduce economii substanțiale de energie, în special în clădirile unde lumina este un amestec de surse de lumină naturală și electrică. Iluminarea cu SSL adaugă, de asemenea, o nouă dimensiune programabilității prin modificarea intensității luminii în funcție de nivelul de utilizare a camerei, făcând distincția între programabilitate și eficiență energetică. Prin programabilitatea iluminatului, confortul uman precum și productivitatea pot fi optimizate mult mai independent față de eficiența energetică pentru iluminarea cu SSL, nefiind necesar să se facă compromisuri. Ambele aspecte hardware și software ale SSL cu LED-uri vor fi folosite în ideea de a crea o generație nouă de clădiri și construcții mult mai estetice și eficiente energetic.

*Traducerea autorului*