

## Επιστήμη και τεχνολογία ηλεκτρικών πηγών φωτός



του Δρ. Εμμανουήλ Δρακάκη

Ο άνθρωπος, επειδή χρειάζεται το φως κατά τη διάρκεια της ημέρας και της νύκτας, ανακάλυψε δύο μεθόδους οι οποίες διεγείρουν την ύλη και την εξαναγκάζουν να παράγει τεχνητό φως: **την πυράκτωση** (incandescence) **και τη φωταύγεια** (luminescence).

Με τη μέθοδο της πυράκτωσης, παράγεται φως από ένα σώμα που βρίσκεται σε υψηλή θερμοκρασία. Χαρακτηριστικά παραδείγματα, είναι το παραγόμενο φως από ένα υπερθερμασμένο κομμάτι σιδήρου αλλιά και οι ηλεκτρικοί λαμπτήρες πυράκτωσης που εκπέμπουν λευκό φως από τη λευκοπύρωση δύστηκτων μεταλλικών νημάτων (συνήθως βολφραμίου).

Η μέθοδος που βασίζεται στο φαινόμενο της φωταύγειας, έχει σχέση με οποιαδήποτε εκπομπή φωτός χωρίς θέρμανση. Θα μπορούσε να την ονομάσει κανείς «κρύα» εκπομπή. Βάζοντας μπροστά στη λέξη αυτή ένα κατάλληλο πρόθεμα, καταδεικνύεται η μέθοδος με την οποία μπορεί κανείς να δημιουργήσει την έναυση του φαινομένου αυτού. Έτσι για παράδειγμα, η ηλεκτροφωταύγεια απαιτεί ηλεκτρική ενέργεια για την παραγωγή φωτός όπως αυτό συμβαίνει στα LEDs και τα OLEDs. Στην φωτοφωταύγεια, η ύλη απορροφά ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ορισμένου μήκους κύματος για να εκπέμψει φως σε ένα άλλο μήκος κύματος, όπως συμβαίνει στους λαμπτήρες φθορισμού που είναι ηλεκτρικές εκκενώσεις τόξου.

Στη σημερινή εποχή, οι ηλεκτρικοί λαμπτήρες μπορούν να παράγουν τεχνητό φως όταν και όπως αυτό είναι χρήσιμο.

Ένας διάσημος επιστήμων του σχετικού πεδίου, ο J. Waymouth, είπε ότι η παραγωγή φωτός είναι το πιο σημαντικό προϊόν του ανθρώπου.

Ιστορικά, η ανακάλυψη του λαμπτήρα ηλεκτρικού τόξου προηγήθηκε αυτή του λαμπτήρα πυράκτωσης. Το 1814, ο Faraday παρουσίασε στη Βασιλική Ακαδημία Επιστημών, το πρώτο ηλεκτρικό λαμπτήρα εκκένωσης φτιαγμένο από ηλεκτρόδια κάρβουνου, που είχε τη δυνατότητα παραγωγής λευκού φωτός για περίπου 15 ώρες. Πολύ αργότερα, το 1878, ο T. Edison κατέθεσε την πατέντα για τον ηλεκτρικό λαμπτήρα πυράκτωσης.

Σήμερα, γνωρίζουμε πολύ καλά ότι εξαιτίας φυσικών περιορισμών η παραγωγή φωτός με πυράκτωση είναι πολύ λιγότερο αποδοτική από εκείνη που οφείλεται στο φαινόμενο της φωταύγειας. Εντούτοις, ο λαμπτήρας του Edison επικράτησε στην αγορά για πολλές δεκαετίες, γιατί ήταν απλούστερος στη κατασκευή του και παράλληλα μπορούσε να κατασκευαστεί εύκολα σε μεγάλες ποσότητες, ενώ οι λαμπτήρες εκκένωσης είχαν σχεδόν ξεχαστεί. Παρόλα αυτά, τις τελευταίες δεκαετίες, υπήρξε έντονο ενδιαφέρον για τις νέες τεχνολογίες φωτισμού τόσο σε επιστημονικό όσο και τεχνολογικό επίπεδο, με αποτέλεσμα οι λαμπτήρες αυτού του τύπου να καταφέρουν να φτάσουν σε απόδοση της τάξης των 150 lm/W (παραγόμενη φωτεινή ενέργεια ανά μονάδα ηλεκτρικής ενέργειας). Έτσι, κατάφεραν σύντομα να επικρατήσουν στον εξωτερικό φωτισμό αλλιά και πρόσφατα στον εσωτερικό φωτισμό.

Εύηλογα όμως γεννιούνται τα δύο παρακάτω ερωτήματα:

1. Μήπως η τεχνολογία φωτισμού έχει πλησιάσει σε κάποιο «θερμοδυναμικό» όριο;
2. Υπάρχει κάποιος άλλος τρόπος παραγωγής φωτός πέραν της πυράκτωσης και της φωταύγειας;

Η απάντηση στο πρώτο ερώτημα είναι εξαιρετικά πολύπλοκη και κάποια στοιχεία θα συζητηθούν στη συνέχεια του κειμένου. Είναι το σημαντικότερο και το πιο πλούσιο αντικείμενο έρευνας των τελευταίων δεκαετιών στην επιστήμη και τεχνολογία των ηλεκτρικών λαμπτήρων. Η απάντηση στο δεύτερο ερώτημα είναι σαφής και κατηγορηματική: μόνο δύο μέθοδοι υπάρχουν για τη μετατροπή της ενέργειας σε φως: η πυράκτωση (incandescence) και η φωταύγεια (luminescence). Εντούτοις, η φωταύγεια μπορεί να παραχθεί με διαφορετικούς τρόπους. Το ηλεκτρικό τόξο, είναι ο τρόπος που μέχρι σήμερα έχει χρησιμοποιηθεί και έχει πολύ καλά διερευνηθεί.

Σήμερα η κοινωνία διάγει μια σημαντική ιστορική μεταβατική περίοδο. Η τεχνολογία των λαμπτήρων πυράκτωσης περνά στην ιστορία πλέον παρόλη τη μεγάλη της δημοτικότητα και ο λόγος είναι απλός: η χαμηλή φωτεινή απόδοση τους (15-20 lm/W). Από την άλλη μεριά, οι λαμπτήρες εκκένωσης (ηλεκτρικού τόξου, εκκένωσης πλάσματος) έδωσαν τις τελευταίες δεκαετίες σημαντικά και αξιόλογα προϊόντα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν σε πολλές εφαρμογές. Η συγκεκριμένη τεχνολογία πλάσματος έδωσε επίσης πολύ μεγαλύτερο χρόνο ζωής στο λαμπτήρα και εντυπωσιακή απόδοση.

Η επερχόμενη όμως επανάσταση στο φωτισμό είναι γεγονός, με τα ανόργανα και οργανικά LEDs τα οποία θα αποτελέσουν τη νέα γενιά πηγών φωτός και θα συνυπάρξουν παράλληλα με τους λαμπτήρες εκκένωσης (τουλάχιστον για ένα πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα). Η νέα αυτή τεχνολογία έχει τις πηγές της στις αρχές του

περασμένου αιώνα μιας και το φαινόμενο της ηλεκτροφωταύγειας είχε παρατηρηθεί το 1907 σε δείγματα κρυστάλλου του καρβιδίου του πυριτίου (SiC). Έτσι, γεννήθηκε η οικογένεια φωτισμού από στερεά υλικά, γνωστή ως SSL (Solid State Lighting). Με τη σημερινή τεχνολογία, τα LEDs συνεχώς αυξάνουν τα επίπεδα της ακτινοβολίας τους, την ενεργητική τους απόδοση, τη φωτεινή τους απόδοση, το χρώμα (συμπεριλαμβανομένου και του λευκού) και μειώνουν δραστικά το κόστος τους.

Τέλος, η πραγματική πρόοδος στην οικογένεια των SSLs είναι η ανακάλυψη των OLEDs (Organic Light Emitting Diodes) το 1987 σαν ένα πακέτο από διαφορετικές επιστρώσεις λεπτών υμενίων (multilayer assembly of evaporated thin films). Στα υλικά αυτά γρήγορα διαπιστώθηκε η δυνατότητα τους να μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε φωτεινή αλληά και το αντίστροφο (ονομαζόμενα οργανικά φωτοβοληταϊκά, OPVs). Το 2008 κατασκευάστηκε ο πρώτος λαμπτήρας εσωτερικού φωτισμού από OLEDs με επίπεδες διαστάσεις από την OSRAM. Μπορεί κανείς λοιπόν να φανταστεί τι μπορεί να επιτευχθεί με αυτήν την τεχνολογία.

Είναι φανερό ότι η πρόοδος στην επιστήμη και στην τεχνολογία των ηλεκτρικών πηγών φωτός είναι συνεχής και ταχεία. Ένα όμως βασικό ερώτημα παραμένει: ποια από τα χαρακτηριστικά μιας ιδανικής πηγής φωτός μπορούν να επιτευχθούν; Μια προσπάθεια θα γίνει για να απαντηθεί το ερώτημα αυτό σε επόμενη ενότητα.

### Οικονομικές και περιβαλλοντικές διαστάσεις του φωτισμού

Ο παγκόσμιος ετήσιος τζίρος της βιομηχανίας φωτισμού, εκτιμάται σε 15 δισεκατομμύρια ευρώ. Όμως οι ηλεκτρικές πηγές φωτός σήμερα χρησιμοποιούνται και σε άλλες εφαρμογές όπως είναι η φωτοαντιγραφή, η επεξεργασία επιφανειών, ο καθαρισμός νερού και αέρα, στην ιατρική και στα αυτόματα συστήματα παρακολούθησης και έλεγχου. Έτσι, με αυτές τις εφαρμογές, το

παραπάνω ποσό του ετήσιου αυτού τζίρου σχεδόν τριπλασιάζεται.

Περισσότεροι από 7.5 δισεκατομμύρια ηλεκτρικοί λαμπτήρες λειτουργούν στον κόσμο, οι οποίοι καταναλώνουν 2000 δισεκατομμύρια κιλοβατώρες (kWh) ετησίως. Το πόσο αυτό είναι το 10-15% της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως. Αυτό, έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία αερίων θερμοκηπίου για την ατμόσφαιρα και συγκεκριμένα διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), που εκτιμάται ότι φτάνει στα 1500 εκατομμύρια τόνους ετησίως από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και περίπου 400 εκατομμύρια τόνους από τη χρήση κηροζίνης και κεριών που ακόμη και σήμερα χρησιμοποιούνται από 1.5 δισεκατομμύριο ανθρώπους που δεν έχουν πρόσβαση στην ηλεκτρική ενέργεια. Εκτιμάται επίσης, ότι στο μέλλον η χρήση ηλεκτρικών λαμπτήρων θα τριπλασιαστεί και επομένως, με δεδομένη την οικολογική αντιμετώπιση για όλο τον πλανήτη, θα πρέπει με τις νέες πηγές φωτός:

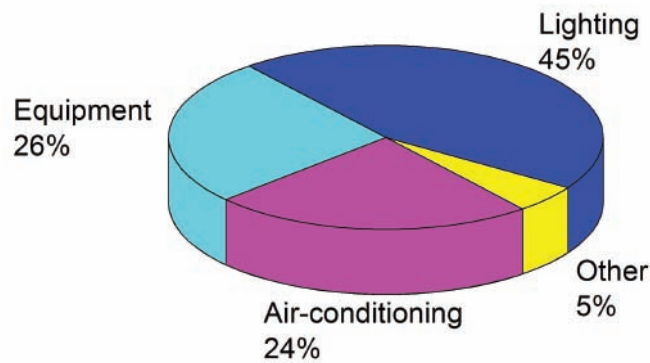
- να περιοριστεί η κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας
- να ελαττωθεί το κόστος παραγωγής
- να μειωθεί η εκπομπή αερίων θερμοκηπίου και άλλων παραγόμενων επιβλαβών ουσιών.

Έτσι για παράδειγμα, μία αύξηση της τάξεως του 25% στην απόδοση ενός λαμπτήρα επιφέρει εξοικονόμηση 250 δισεκατομμυρίων kWh και 150 εκατομμύρια τόνους λιγότερα αέρια θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα ετησίως.

Ένας μεγάλος αριθμός μελετών έχουν γίνει και έχουν δημοσιεύσει τα αποτελέσματα για τη δυνατότητα εξοικονόμησης ενέργειας. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η κατανομή της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας για ένα μεγάλο σύγχρονο εμπο-

ρικό κέντρο. Παρατηρούμε ότι περισσότερο από το 40% της ενέργειας απαιτείται για φωτισμό. Υπάρχουν εκτιμήσεις που δείχνουν ότι μπορεί να επιτευχθεί 20-50% εξοικονόμηση στην απαιτούμενη ενέργεια για φωτισμό, αν γίνει χρήση ηλεκτρικών πηγών φωτός νέας τεχνολογίας. Αυτό θα μπορούσε να γίνει με την αύξηση της φωτεινής απόδοσης από 50 lm/W σε 100 lm/W που αυτήν τη στιγμή η νέας τεχνολογίας λαμπτήρες φθορισμού έχουν επιτύχει.

Αυτήν τη στιγμή οι λαμπτήρες φθορισμού, μαζί με τους λαμπτήρες εκκένωσης υψηλής πίεσης (HID lamps) επικρατούν στην αγορά. Αυτές οι πηγές φωτός μαζί με άλλα



Εικόνα 1. Κατανομή ηλεκτρικής κατανάλωσης σε ένα τυπικό εμπορικό κέντρο

προϊόντα που διατίθενται περιέχουν μία πολύ μικρή ποσότητα υδραργύρου (Hg). Έτσι λοιπόν, μετά την ολοκλήρωση του κύκλου ζωής τους, μια σημαντική ποσότητα ανεπιθύμητου κατάλοιπου πρέπει να συλλιχτεί. Επειδή ο υδράργυρος, όπως είναι γνωστό, είναι υλικό υψηλής τοξικότητας είναι φανερό και επιθυμητό αλλά και συγχρόνως πρόκληση για τη βιομηχανία φωτός, να αναζητήσει υλικά μη τοξικά και να αναπτύξει νέες γενιές ηλεκτρικούς λαμπτήρες της κατηγορίας αυτής, που παράλληλα όμως, θα πρέπει να έχουν δεδομένη την ίδια ή καλύτερη φωτεινή απόδοση.

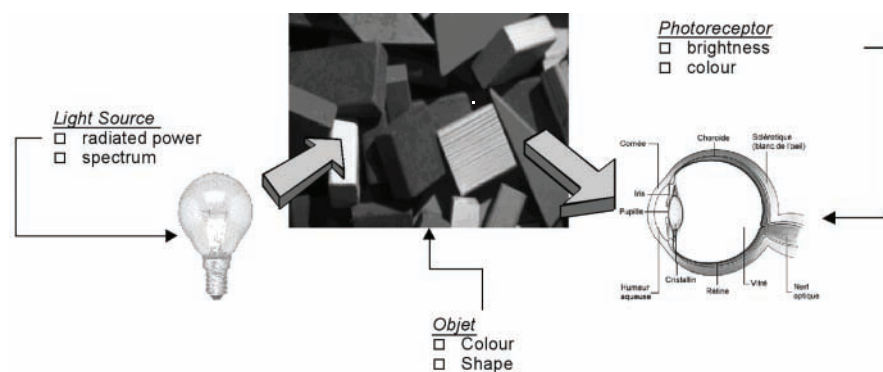
## Χαρακτηριστικά και επίδοση ηλεκτρικών πηγών φωτός

Η επίδοση των πηγών φωτός χαρακτηρίζεται από την απόδοση τους σε φωτεινή ισχύ ανά μονάδα παρεχόμενης ηλεκτρικής ισχύος. Συχνά όμως, η ποιότητα του φωτεινού συστήματος δε λαμβάνεται υπόψη ή αμελείται. Η ποιότητα μιας πηγής φωτός ορίζεται σε σχέση με την εφαρμογή για την οποία έχει σχεδιαστεί. Αν αυτή πρόκειται να είναι ο φωτισμός θα πρέπει να γνωρίζει κανείς καλά τα χαρακτηριστικά του «οπτικού περιβάλλοντος» τα οποία είναι απαραίτητα για να βελτιστοποιήσει την πηγή.

Το οπτικό περιβάλλον αποτελείται από την πηγή φωτός (light source), το αντικείμενο (object) και το φωτοδέκτη (photore-

receptor, ένα κόκκινο άνθος φαίνεται κόκκινο σε μας (και πιθανώς όχι σε κάποιο ζώο) επειδή ανακλά φως στη περιοχή των 700 nm και απορροφά όλες τις άλλες περιοχές του ορατού φάσματος.

Ο φωτοδέκτης είναι το στοιχείο το οποίο απαιτεί τις απαραίτητες οπτικές ιδιότητες που πρέπει να έχει η πηγή φωτός μας. Βέβαια, στις περισσότερες περιπτώσεις το ανθρώπινο μάτι είναι ο φωτοδέκτης. Το μάτι συλλογίζει λαμπρότητα και χρώμα (όπου το χρώμα χαρακτηρίζεται από τον χρωματικό τόνο και τον κορεσμό) από την πηγή ή από το αντικείμενο και μεταδίδει την πληροφορία αυτή στον εγκέφαλο. Επειδή το ανθρώπινο μάτι μπορεί να αντιληφθεί διαφορετικά μήκη κύματος λέμε ότι ο άνθρωπος εγκέ-



Εικόνα 2. Το οπτικό περιβάλλον

ceptor). Στην πραγματικότητα, «βλέπω», σημαίνει ότι χρησιμοποιώ ένα φωτοδέκτη για να εντοπίσω και να αναγνωρίσω ένα αντικείμενο το οποίο φωτίζεται από μια πηγή φωτός.

Το αντικείμενο είναι το παθητικό στοιχείο της τριάδας, διαθέτει σταθερές ιδιότητες και χαρακτηρίζεται από το σχήμα του και το χρώμα του. Το χρώμα είναι κάτι ιδεατό μιας και «βλέπουμε» χρώματα μόνο με τον εγκέφαλό μας. Στη πραγματικότητα το χρώμα ορίζεται με την επιλεκτικότητα των αντικειμένων να ανακλούν ή να απορροφούν ορισμένα μήκη κύματος από το φως που προσπίπτει επάνω τους. Για πα-

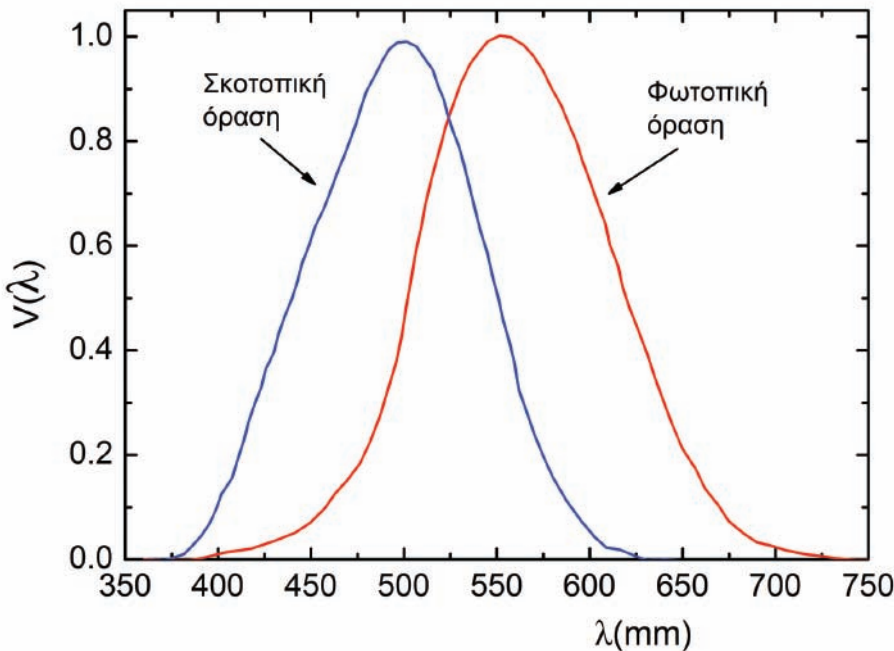
ραλhos «βλέπει» χρώματα. Είναι γνωστό ότι το ανθρώπινο μάτι είναι ευαίσθητο σε μια πολύ στενή περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που εκτείνεται από τα 400 nm στα 700 nm που ονομάζεται περιοχή ορατού φωτός. Λόγω της κατασκευής του ματιού, έχουμε δύο καταστάσεις ευαισθησίας στο ορατό φως, η μία, που είναι όταν έχουμε χαμηλό φωτισμό και λέγεται σκοτοπική όραση και η άλλη, η φωτοπική όραση, που αντιστοιχεί σε υψηλό φωτισμό. Η φωτοπική όραση είναι εκείνη που ενδιαφέρει την τεχνολογία πηγών φωτός μιας και το μάτι είναι περισσότερο προσαρμοστικό στο φως παρά στο σκοτάδι.

Η πηγή φωτός χαρακτηρίζεται από την εκπεμπόμενη φωτεινή ισχύ και το εκπεμπόμενο φάσμα. Η απόδοση ενός λαμπτήρα είναι κάτι πιο περίπλοκο και χωρίζεται σε ηλεκτρική απόδοση (electrical efficacy) και φωτεινή απόδοση (luminous efficacy).

Ηλεκτρική απόδοση,  $\epsilon$ , είναι ο λόγος της εκπεμπόμενης φωτεινής ισχύος,  $P_r$  (Watts) σε όλο το φάσμα (υπεριώδες, ορατό, υπέρυθρο) προς τη συνολική παρεχόμενη ηλεκτρική ισχύ,  $P_{in}$  (Watts):

$$\eta = \frac{\int_0^{\infty} P_r(\lambda) V_{ph}(\lambda) d\lambda}{P_{in}}$$

Έτσι, αν μια πηγή φωτός έχει πολύ λίγη εκπεμπόμενη ενέργεια στην περιοχή του φάσματος που ανακλά το αντικείμενο, τότε αυτό φαίνεται σκοτεινό. Ο δείκτης CRI μας δείχνει πώς μια φωτεινή πηγή αναπαράγει τα χρώματα ενός αντικειμένου σε σχέση με μια πηγή αναφοράς.



**Εικόνα 3.** Σχετική φωτεινή ευαισθησία του ανθρώπινου ματιού σε φωτοπική και σκοτοπική όραση

$$\epsilon = \frac{\int_0^{\infty} P_r(\lambda) d\lambda}{P_{in}}$$

Η φωτεινή απόδοση,  $\eta$ , εκφράζει το πόσο αποδοτικά ένας λαμπτήρας μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια (Watts) σε φως (lumens). Επομένως, οι μονάδες είναι lm/W και η έκφραση της:

Είναι δυνατόν να ορίσουμε τη θεωρητικά καλύτερη πηγή φωτός, η οποία θα έχει μέγιστη φωτεινή απόδοση σε λευκό φως, θα παράγει ευχάριστο ζεστό λευκό φως (στους 3000 K) με ένα καλό δείκτη CRI. Επομένως, ένας ιδεατός λαμπτήρας πρέπει να διαθέτει πολύ καλή φωτεινή απόδοση και χρώμα. Επιπλέον, ο λαμπτήρας αυτός θα πρέπει να ικανοποιεί και ορισμένες άλλες προϋποθέσεις οι οποίες έχουν σχέση με την ποιότητα, την υγεία, την ασφάλεια, την οικονομία, το σεβασμό στο περιβάλλον και άλλα. Έτσι,



έναν καλός λαμπτήρα θα πρέπει επιπλέον:

- να έχει μεγάλη διάρκεια ζωής,
- να παράγει σταθερό επίπεδο φωτός καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής του
- να μη έχει τρεμοπαίξιμο στη φωτεινή του ένταση,
- να αποδίδει το πλήρες φως του ακαριαία όταν ανάψει,
- να είναι συμπαγής και ελαφρύς,
- να μην εισάγει αρμονικές παραμορφώσεις στο ηλεκτρικό δίκτυο,
- να μην κάνει ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές σε άλλες ηλεκτρονικές συσκευές,
- να έχει υλικά φιλικά με το περιβάλλον,
- να είναι πλήρως ανακυκλώσιμος,
- να εκπέμπει χαμηλά επίπεδα θερμότητας και υπερϊώδους ακτινοβολίας,
- να είναι οικονομικός για τους καταναλωτές αλλά αποδοτικός για τον κατασκευαστή.

Βεβαίως, από όλα τα παραπάνω, είναι άμεσα φανερό ότι ένας λαμπτήρας δεν μπορεί να ικανοποιεί όλες αυτές τις προϋποθέσεις με τη μία. Είναι όμως απαραίτητο να εξετάζονται όλα αυτά τα κριτήρια σε κάθε συγκεκριμένη εφαρμογή. Όταν επομένως πρόκειται για την ανάπτυξη ενός νέου εμπορικού προϊόντος, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και οι απαιτήσεις του καταναλωτή.

### Ηλεκτρικοί λαμπτήρες εκκένωσης

Οι ηλεκτρικοί λαμπτήρες εκκένωσης διατίθενται σε δυο εμπορικές μορφές:

- **τους λαμπτήρες φθορισμού** (κανονικοί ή συμπαγείς) που ονομάζονται και λαμπτήρες χαμηλής πίεσης και χρησιμοποιούνται συνήθως στο εσωτερικό φωτισμό (οικίες, καταστήματα, κτήρια κλπ)
- **και τους λαμπτήρες μέσης και υψηλής πίεσης ή αλληώς λαμπτήρες HID** που χρησιμοποιούνται στον εξωτερικό φωτισμό και σε συστήματα προβολής (εξωτερικός φωτισμός κτηρίων και μνη-

μείων, δρόμοι, και προβολικά συστήματα: projectors).

Οι ηλεκτρικοί λαμπτήρες περιέχουν υδράργυρο και σε μερικές περιπτώσεις (π.χ. λαμπτήρες HID) ανάμειξη υδραργύρου με ιωδιούχα άλατα (συνήθως νατρίου και θαλλίου) τα οποία οδηγούνται με εκκένωση μέσα σε διαφανές κυλινδρικό περίβλημα (γυαλιού ή χαλαζία) σε δημιουργία πλάσματος το οποίο εκπέμπει την επιθυμητή ακτινοβολία. Ο υδράργυρος θεωρείται ένα από τα πιο αποτελεσματικά στοιχεία γιατί μας δίνει υψηλή απόδοση και παράλληλα μεγάλη συμβατότητα με το περίβλημα και τα ηλεκτρόδια. Τις περισσότερες φορές, αλλά απαραίτητα στους λαμπτήρες εκκένωσης χαμηλής πίεσης, το περίβλημα χρίζεται εσωτερικά με φθορίζουσα ουσία η οποία έχει ως σκοπό τη μετατροπή της υπερϊώδους ακτινοβολίας του υδραργύρου σε ορατή.

Με έρευνα και ανάπτυξη περισσότερο από 3 δεκαετίες (τον Ιούλιο του 2010 διεξήχθη το 12<sup>ο</sup> διεθνές συνέδριο), η περιοχή των λαμπτήρων εκκένωσης έδωσε λαμπρά ερευνητικά και τεχνολογικά επιτεύγματα, τα οποία εκτείνονται από την περιοχή της φυσικής πλάσματος, στη θερμοδυναμική, στη φωτομετρία, στην τεχνολογία υλικών ως την οικονομία και το περιβάλλον. Πριν να παραδοθεί η σκυτάλη στους λαμπτήρες στερεάς κατάστασης (SSL), πιστεύεται ότι υπάρχει ακόμη προοπτική για βελτίωση και καινοτομία, ειδικά στην περιοχή των υλικών εκπομπής.

Σήμερα, οι επιστήμονες που ασχολούνται με αυτού του τύπου τους λαμπτήρες, έχουν ως στόχους την περαιτέρω βελτίωση της φωτεινής τους απόδοσης και την πιθανότητα εξάλειψης του υδραργύρου με χρήση άλλων στοιχείων ικανών να εκπέμπουν αποτελεσματικά και συγχρόνως να πληρούν περιβαλλοντικούς περιορισμούς. Τα βασικά κριτήρια τα οποία θα πρέπει να ικανοποιούν τα στοιχεία αυτά είναι δύο:

1. **Θα πρέπει να είναι αποτελεσματικά σε**

εκπομπή στην περιοχή από 380-580 nm,

**2. Θα πρέπει να έχουν τη δυνατότητα να βρίσκονται σε αέρια κατάσταση ή να μπορούν εύκολα να εξατμίζονται.**

Μέχρι σήμερα, τόσο η βιομηχανία όσο και τα ερευνητικά κέντρα, πανεπιστήμια και τεχνολογικά ιδρύματα, έχουν εξετάσει σχεδόν όλα τα υλικά του περιοδικού πίνακα για πιθανούς ισχυρούς αντικαταστάτες. Οι σπάνιες γαίες ικανοποιούν τη δεύτερη συνθήκη αλλιώς στο φάσμα εκπομπής τους κυριαρχούν φασματικές γραμμές στις περιοχές UV-C και VUV. Οι μεταλλικοί ατμοί εκπέμπουν φασματικές γραμμές στην επιθυμητή περιοχή αλλιώς οι κεκορεσμένοι ατμοί τους είναι πολύ φτωχοί, με αποτέλεσμα η εκπεμπόμενη ποσότητα φωτός να είναι χαμηλή. Οι μεταλλικοί ατμοί των ιωδιούχων αλάτων φαίνεται να είναι πιο αποτελεσματικοί. Όλα τα υπόλοιπα στοιχεία δεν μπορούν να θεωρηθούν ικανοί υποψήφιοι, επειδή είναι είτε τοξικά και έντονα δραστικά ή δεν εκπέμπουν φασματικές γραμμές στην επιθυμητή περιοχή του φάσματος. Μερικές προσπάθειες που έχουν γίνει είναι οι παρακάτω:

- το βάριο και το οξείδιο του μολυβδαίνιου θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε λαμπτήρες εκκένωσης χαμηλής πίεσης,
- ο ψευδάργυρος είναι ένας υποψήφιος αντικαταστάτης του υδραργύρου σε λαμπτήρες υψηλής πίεσης,
- τα ευγενή αέρια μόνα τους ή με παρουσία νερού μπορούν να δώσουν ισχυρή εκπομπή φασματικών γραμμών,
- στοιχεία που εκπέμπουν έντονη μοριακή ακτινοβολία όπως η περίπτωση του θείου που εκπέμπει μία έντονη συνεχή ακτινοβολία η οποία ταιριάζει απόλυτα στην κατανομή της φωτοπικής όρασης.

Πέρα από τη βιομηχανική-τεχνολογική εξέλιξη των λαμπτήρων αυτού του τύπου, δεν πρέπει κανείς να λησμονήσει και τη μεγάλη προσπάθεια των ερευνητικών ομά-

δων κυρίως των πανεπιστημίων και των τεχνολογικών ερευνητικών ιδρυμάτων, να διερευνήσουν τα εσωτερικά φαινόμενα και τις καταστάσεις (θερμοδυναμικές, ατομικές και μοριακές) που υπάρχουν σε ένα τόσο πολύπλοκο και δύσκολο πεδίο που είναι το πλάσμα. Οι έρευνες αυτές οδήγησαν σε σημαντικά ευρήματα και βοήθησαν παράλληλα τη βιομηχανία στη βελτίωση των προϊόντων απαντώντας σε δύσκολα ερωτήματα.

**Ηλεκτρικοί λαμπτήρες στερεάς κατάστασης**

Σήμερα πιστεύεται ότι τα LEDs, θα αποτελέσουν την επόμενη γενιά πηγών φωτός. Αρκετά ώριμα προϊόντα πλέον, είναι έτοιμα να εισέλθουν δραστικά στην αγορά φωτισμού παρά τις ατέλειες τους. Αυτή τη στιγμή υπάρχει μια έντονη κινητικότητα παγκοσμίως σε διαφορές κατευθύνσεις που αφορά στην τεχνολογία και την επιστήμη των LEDs.

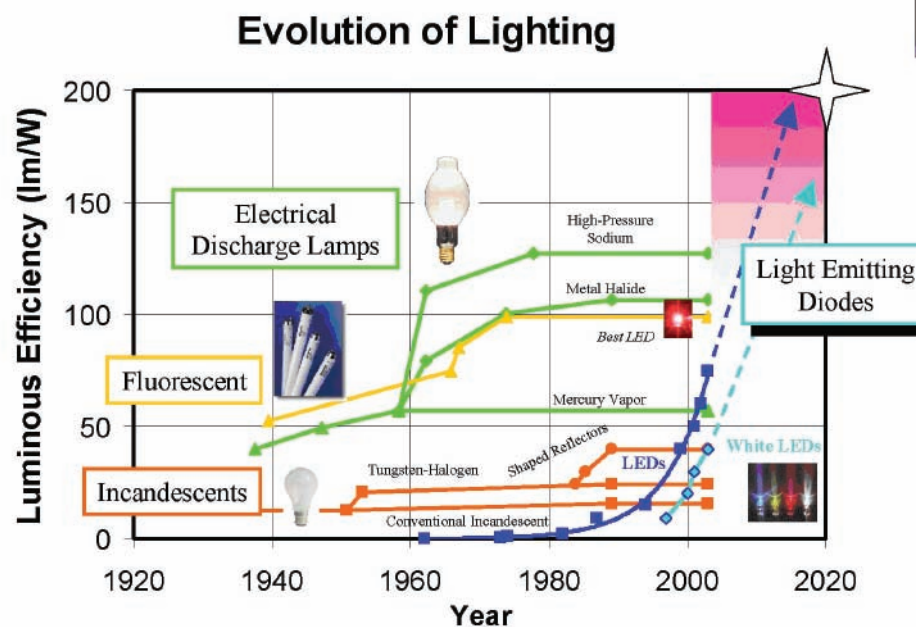
Η πιο σημαντική είναι η καλύτερη κατανόηση του μηχανισμού παραγωγής φωτός στους ημιαγωγούς αυτούς. Έτσι, αναπτύσσονται νέες διαγνωστικές τεχνικές αφιερωμένες στα LEDs και συγχρόνως αναπτύσσονται και διερευνώνται πιο εξελιγμένα μαθηματικά μοντέλα από τα υπάρχοντα. Όσο για τα υλικά, το ίνδριο π.χ., που είναι χαρακτηριστικό υλικό συστατικό κάποιας οικογένειας LED είναι σπάνιο και παρόλο που χρησιμοποιείται σε πάρα πολύ μικρή ποσότητα στη κατασκευή LED, είναι αδύνατον να ανακυκλωθεί. Εναλλακτικά υλικά έχουν προταθεί και διερευνηθεί όπως το Si, το f-SiC και το ZnO αλλιώς η τεχνολογία τους δεν είναι ακόμη ώριμη.

Επιπρόσθετα, η βελτίωση της εσωτερικής κβαντικής απόδοσης (IQE) είναι μια μεγάλη πρόκληση για τους επιστήμονες. Το IQE είναι ο λόγος των παραγόμενων φορέων φωτονίων προς τον αριθμό των φορέων ηλεκτρονίων. Αυτή η παράμετρος είναι πολύ σημαντική γιατί είναι η μόνη που έχει απομείνει για βελτίωση. Ο στόχος είναι να επιτευχθεί η τιμή του 90% στην επόμενη

δεκαετία.

Είναι επίσης απαραίτητο, να αναπτυχθούν και οι κατάλληλες φωσφορικές επιστρώσεις ικανές να απορροφήσουν ακτινοβολίες στην περιοχή του υπεριώδους-ιώδους και να τη μετατρέψουν με μεγάλη απόδοση. Έρευνες γίνονται και προς την κατεύθυνση ειδικών επιστρώσεων που ονομάζονται quantum-splitting phosphors που χρησιμοποιούνται ήδη στους λαμπτήρες χαμηλής πίεσης και οι οποίες έχουν

αριθμό ξεχωριστών LEDs. Θα πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη και η ευαισθησία του LED στην αλληλαγή χρώματος λόγω αστάθειας της τάσης και του ρεύματος πόλωσης. Μια πολύ μικρή μεταβολή σε μία από τις δυο αυτές τιμές θα μπορούσε να αλλιάξει το χρώμα τους. Ως διοδικά στοιχεία έχουν συμπεριφορά που επηρεάζονται από το χρόνο με αποτέλεσμα τη μείωση φωτεινής ροής και της αλληλαγής χρώματος. Επιπρόσθετα, τα χαρακτηριστικά τους αλλιάζουν από τσιπ σε



Εικόνα 4: Φωτεινή απόδοση ηλεκτρικών λαμπτήρων

ενισχυμένες ικανότητες απόδοσης σε σχέση με τις συμβατικές επιστρώσεις.

Για να μπορέσουν οι λαμπτήρες LED να διεισδύσουν στην αγορά, θα πρέπει να διαθέτουν ειδικά σχεδιασμένους ανακλαστήρες προσαρμοσμένους στη μεγάλη κατευθυντικότητα που χαρακτηρίζει τα LEDs αλλά και το μικρό τους μέγεθος. Επίσης, το σύστημα τροφοδοσίας θα πρέπει να είναι ειδικής σχεδίασης αφού θα πρέπει να τροφοδοτήσει συγχρόνως έναν μεγάλο

τσιπ και επομένως είναι απαραίτητος ο σχολαστικός έλεγχος για κάθε ξεχωριστή δίοδο. Όλα αυτά βέβαια τα στοιχεία έχουν οδηγήσει σε μία αρνητική δημοσιότητα για τα συγκεκριμένα προϊόντα και τους σχεδιαστές τους.

Παρόλα αυτά, η τεχνολογία των LEDs έχει ωριμάσει αρκετά όπως αυτό φάνηκε καθαρά και από το τελευταίο συνέδριο τον Ιούλιο του 2010 (LS12: The 12th International Symposium on the Science and Tech-



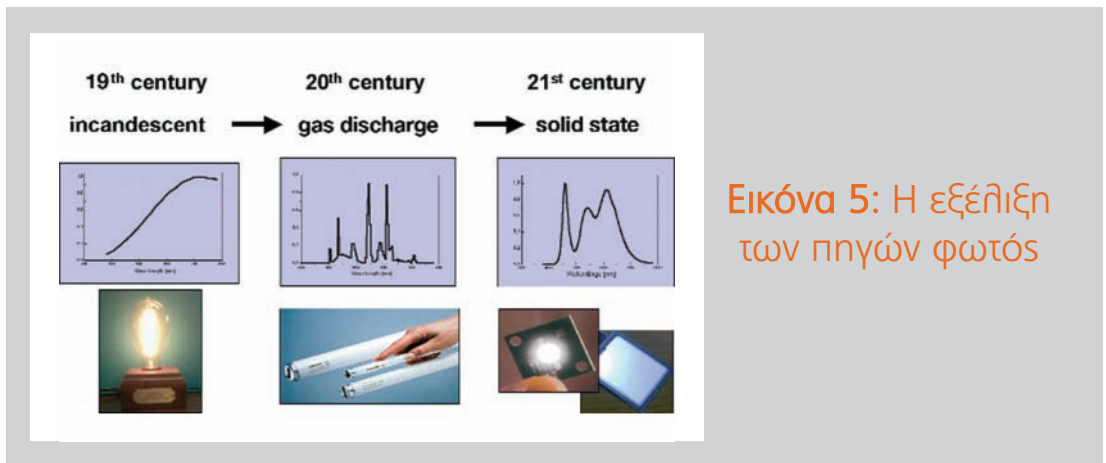
nology of Light Sources. **WLED3:** The 3rd International Conference on White LEDs and Solid State Lighting, Eindhoven, the Netherlands).

Ποια θα είναι επομένως η επόμενη γενιά πηγών φωτός; Η απάντηση περιστρέφεται γύρω από τα οργανικά LEDs. Είναι προϊόντα που παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα αντίστοιχα ανόργανα. Μπορούν να κατασκευαστούν σε μεγάλες επιφάνειες με χρήση καθιερωμένων και χαμηλού κόστους τεχνικών. Οι διατάξεις OLED είναι δύο κατηγοριών: αυτές που φτιάχνονται από μικρά οργανικά μόρια και αυτές από

σμό με πολύ καλές φωτεινές ιδιότητες, τη συμπαγή μορφή τους και τη δυνατότητα τους να αναπτύσσονται και σε επίπεδο σχήμα. Το πεδίο είναι ακόμη ανοικτό και πολύ υποσχόμενο ενώ παράλληλα, αυτή τη στιγμή πολλές και μεγάλες επενδύσεις έχουν γίνει στην Ευρώπη και στις ΗΠΑ.

### Σύνοψη

Αυτή τη στιγμή, η επόμενη επανάσταση στο φωτισμό είναι γεγονός. Ο φωτισμός με πηγές στερεάς κατάστασης, έχει τη δυναμική να αντικαταστήσει τις συμβατικές πηγές φωτός με τον ίδιο τρόπο που τα ολοκληρωμένα κυκλώματα αντικατέστησαν τις ηλε-



Εικόνα 5: Η εξέλιξη των πηγών φωτός

οργανικά πολυμερή. Υπάρχει μεγάλη επιλογή οργανικών φωτεινών υλικών και έτσι μια μεγάλη ποικιλία διατάξεων σε πάρα πολλά χρώματα μπορεί να κατασκευαστεί. Υπάρχει η δυνατότητα, με χρήση χημικού ελέγχου, να επιλέγεται το φωτεινό τους φάσμα αλλά και οι ηλεκτρικές τους ιδιότητες. Αν και δεν υπάρχουν ακόμη εμπορικές πηγές φωτός OLEDs στη διεθνή επιστημονική βιβλιογραφία υπάρχουν τεχνικές που βασίζονται σε χρήση φωσφορικών οργανομεταλλικών υλικών τα οποία παράγουν λευκό φως (WOLEDs) με μεγάλη φωτεινή απόδοση. Τα WOLEDs μπορεί να γίνουν εναλλακτικές λύσεις για εσωτερικό φωτι-

κτρονικές λυχνίες περίπου 50 χρόνια πριν. Οι νέες πηγές συνδυάζουν υψηλές φωτεινές αποδόσεις με άμεση μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε φωτεινή.

Οι λαμπτήρες εκκένωσης και ιδιαίτερα οι λαμπτήρες εκκένωσης υψηλής έντασης (HID lamps) θα συνεχίσουν να παίζουν ένα σημαντικό ρόλο στο φωτισμό. Σήμερα, αυτές οι πηγές όχι μόνο διαθέτουν τις υψηλότερες ηλεκτροοπτικές αποδόσεις, αλλά βρίσκουν όλο και περισσότερες εφαρμογές εκτός του γενικού φωτισμού.

Οι πηγές στερεάς κατάστασης, ανόργανες και οργανικές (LEDs και OLEDs) θα είναι

οι πηγές φωτός της επόμενης γενεάς οι οποίες θα αντικαταστήσουν τους λαμπτήρες πυράκτωσης και τους λαμπτήρες εκκένωσης (ή τουλάχιστον μια μεγάλη κατηγορία τους).

### Γενική βιβλιογραφία

- Cayless, M.A., Brit. J. Appl. Phys., 11, 2, 1960
- Cayless, M.A., A.M. Marsden, Lamps and Lighting, Edward Arnold Pub., London, 1983
- COST Action 529, Efficient Lighting for the 21st Century, Final Report, 2001-2006
- Damelincoirt, J.J., L'arc électrique et ses applications, 2, 217, Ed. CNRS, Paris 1985
- Drakakis, E., Karabourniotis, D., Appl. Phys. Lett., 97, 1, 2010
- Drakakis, E., Palladas, A., Karabourniotis, D., J. Phys. D: Appl. Phys. 25, 1733, 1992
- Elenbaas, W., The high pressure mercury vapour discharge, North Holland Pub., Amsterdam, 1951
- de Groot, J.J., J.A.J.M. van Vliet, J. Phys. D, 8, 653, 1975
- Jack, A.G., M. Koedam, J. of IES, 323, July 1974
- Karabourniotis, D., Drakakis, E., van der Mullen, J.J, Journ. of Quant. Spectr. & Rad. Transfer, 108, 319, 341, 2007
- Karabourniotis, D., Drakakis, E., IEEE Trans. On Plasma Science (Invited Paper), 31, 310, 2003
- Karabourniotis, D., C. Karras, C., E. Drakakis, E., Damelincoirt, J.J, J.

- Appl. Phys. 53, 7259, 1982
- Kenty, C., J. Appl. Phys. 21, 1309, 1950
- Koedam, M., A.A. Kruithof, J. Riemens, Physica, 29, 565, 1963
- LS12: The 12th International Symposium on the Science and Technology of Light Sources και WLED3: The 3rd International Conference on White LEDs and Solid State Lighting, 11-17 July 2010, Eindhoven, The Netherlands
- Maya, J., R. Lagushenko, Molecular and Optical Phys., 26, 321, 1990
- Towards a Bright Future for Europe, Photonics 21, European Technology Platform, 2006
- Waymouth, J., Electric Discharge Lamps, The M.I.T. press, Cambridge, 1971
- Waymouth, J., Invited Talk, 5th Symp. On Sc. And Techn. of Light Sources, York, 1989
- Wharmby, D.O., IEE Proc. A, 140, 485, 1993
- Zisis, G., Kitsinelis, S., J. Phys. D, 42, 1, 16, 2009
- Zollweg, R.J., J.J. Lowke, R.W. Liebermann, J. Appl. Phys., 46, 3828, 1975