



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**  
**ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΔΙΟΔΩΝ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΦΩΤΟΣ –**  
**ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΝΕΟΥ ΠΡΟΙΟΝΤΟΣ**



**ΚΑΡΥΣΤΗΝΑΙΟΥ**  
**ΜΑΡΙΑ – ΜΑΡΓΑΡΙΤΑ**  
**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΜΠΙΛΛΑΛΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ**

ΧΑΝΙΑ  
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2014



Αφιερωμένη στους γονείς μου.



## Πίνακας περιεχομένων

Ευχαριστίες .....	3
Περίληψη .....	7
Κεφάλαιο 1 .....	8
1.1. Η ιστορία των λαμπτήρων φωτισμού .....	8
1.2. Οι λαμπτήρες πυρακτώσεως «φωτίζουν» τον δρόμο .....	8
1.3. Ελλείψεις ενέργειας οδηγούν σε ανακάλυψη του φθορισμού .....	10
1.4. LEDs: Το μέλλον είναι εδώ .....	12
Κεφάλαιο 2 .....	14
2.1. Ηλεκτρικός λαμπτήρας .....	14
2.2. Λαμπτήρας πυρακτώσεως .....	14
2.3. Λαμπτήρας φωτοβολταϊκού τόξου .....	15
2.4. Λαμπτήρας φθορισμού .....	17
2.5. Λαμπτήρας αίγλης .....	19
2.6. Λαμπτήρες LED .....	19
Κεφάλαιο 3 .....	21
3.1. Ανάλυση της τεχνολογίας LED .....	21
3.2. Η δίοδος εκπομπής φωτός .....	22
3.3. Χρησιμοποιούμενα υλικά και χρώμα .....	24
3.4. Μίξη χρωμάτων και προβλήματα .....	27
3.5. Λευκό LED .....	31
3.6. Κατηγοριοποίηση λαμπτήρων LED .....	35
3.7. Από το chip στον λαμπτήρα .....	36
3.8. Είδη και κατασκευή LED .....	38
3.9. Θερμότητα και διαχείρισή της .....	41
3.9.1 Θερμοκρασιακή επίδραση στην φωτεινή απόδοση .....	41
3.9.2 Θερμοκρασιακή επίδραση στο χρώμα .....	42
3.9.3 Θερμοκρασιακή επίδραση στη διάρκεια ζωής .....	43
3.9.4 Διαχείριση θερμότητας .....	44
3.10. Ηλεκτρική συμπεριφορά των LED .....	45
3.11. Οπτικά χαρακτηριστικά των LED .....	46
Κεφάλαιο 4 .....	50
4.1. Σύγκριση τεχνολογιών φωτισμού .....	50
4.2. Απόδοση και διάρκεια ζωής .....	50

4.3.	Χρώμα .....	56
4.4.	Θόρυβος RF και Flickering .....	59
4.5.	Κόστος .....	61
Κεφάλαιο 5 .....		65
5.1.	LED και ενέργεια .....	65
5.2.	Πλεονεκτήματα τεχνολογίας LED .....	65
5.3.	Εξοικονόμηση ενέργειας με λαμπτήρες LED .....	67
5.4.	Λαμπτήρες LED: Η φιλική λύση για τον άνθρωπο και το περιβάλλον ....	69
5.5.	Προβλέψεις για το μέλλον .....	70
Κεφάλαιο 6 .....		74
6.1.	Γενικά .....	74
6.2.	Η χρήση θερμοπλαστικού στους λαμπτήρες LED .....	74
6.3.	Κόστος και απαγωγή θερμότητας των θερμοπλαστικών .....	75
6.4.	Προϊόντα που κυκλοφορούν .....	76
6.5.	Η κατασκευή λαμπτήρα LED .....	79
Βιβλιογραφία .....		83

# Περίληψη

Σε μια εποχή που η επάρκεια ενέργειας είναι επιτακτική, ο φωτισμός είναι ένα ακόμη βήμα προς αυτή την κατεύθυνση και μπορεί να αποδειχθεί πολύ χρήσιμος στο μακρύ δρόμο της εξοικονόμησης ενέργειας. Ο καλύτερος τρόπος εξοικονόμησης ενέργειας είναι ο έλεγχος και η μείωση της κατανάλωσής της και η απόλυτη μέθοδος για να το επιτύχουμε είναι η στροφή σε λιγότερο ενεργοβόρα συστήματα φωτισμού. Η πρώτη προσέγγιση έγινε με τους ενεργειακούς λαμπτήρες που δημιουργήθηκαν με σκοπό τον έλεγχο της υπερκατανάλωσης ενέργειας.

Καθώς οι ανάγκες μας μεγαλώνουν μέρα με τη μέρα, στο παιχνίδι της εξοικονόμησης ενέργειας μπήκε και η τεχνολογία των LED. Τα τελευταία χρόνια, τα LED υψηλής ισχύος παρέχουν υψηλή φωτεινότητα και υψηλή απόδοση στη χρήση τους ως πηγή φωτισμού. Για το λόγο αυτό, οι λαμπτήρες LED έχουν αντικαταστήσει σταδιακά τόσο τους λαμπτήρες πυρακτώσεως όσο και τους λαμπτήρες φθορισμού σε πολλές εφαρμογές. Λόγω της έλευσης των LED ως συσκευές φωτισμού, ο φωτισμός LED γίνεται μία από τις νέες τάσεις στη βιομηχανία φωτισμού.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η παρουσίαση της τεχνολογίας των λαμπτήρων LED, η ανάδειξη της ενεργειακής τους υπεροχής όσον αφορά την εξοικονόμηση ενέργειας καθώς και η σχεδιαστική ανάπτυξη ενός νέου προϊόντος.

Η μελέτη μας ξεκινάει με την τεχνολογική εξέλιξη των λαμπτήρων, από τον πρώτο λαμπτήρα μέχρι τις τελευταίες εξελίξεις της τεχνολογίας LED, με παράλληλη συνοπτική παρουσίαση όλων των ειδών των λαμπτήρων που έχουν επικρατήσει κατά καιρούς. Στη συνέχεια παρουσιάζουμε όλες τις λεπτομέρειες της τεχνολογίας των LED, ξεκινώντας από την απλή δίοδο LED, περνώντας στα βασικά χαρακτηριστικά του από τα οποία εξαρτάται η απόδοση ενός λαμπτήρα LED και καταλήγοντας στα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της τεχνολογίας σε σύγκριση με τους υπάρχοντες τρόπους φωτισμού.

Κατόπιν, επικεντρωνόμαστε στα ενεργειακά θέματα παραθέτοντας κάποια συγκριτικά στοιχεία που αφορούν την κατανάλωση ενέργειας όλων των ειδών φωτισμού, αποδεικνύοντας για πιο λόγο οι λαμπτήρες LED θεωρούνται σήμερα ως ενεργειακά αποδοτικότεροι έναντι των άλλων υπάρχοντων ειδών. Τελειώνοντας, παρουσιάζουμε τα είδη των λαμπτήρων LED που υπάρχουν σήμερα, για να καταλήξουμε στην παρουσίαση της σχεδιαστικής ανάπτυξης ενός νέου προϊόντος.

# Κεφάλαιο 1

## 1.1. Η ιστορία των λαμπτήρων φωτισμού

Πριν από 150 χρόνια οι εφευρέτες άρχισαν να εργάζονται πάνω σε μια λαμπρή ιδέα που θα μπορούσε να φέρει δραματικές αλλαγές στο πώς χρησιμοποιούμε την ενέργεια στα σπίτια και τα γραφεία μας. Αυτή η εφεύρεση άλλαξε τον τρόπο που σχεδιάζουμε τα κτίρια, αύξησε τον μέσο όρο της εργάσιμης ημέρας και ξεκίνησε νέες επιχειρήσεις. Οδήγησε επίσης σε νέες ανακαλύψεις σε ενεργειακά θέματα όπως σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας για οικιακές συσκευές και ηλεκτρικούς κινητήρες.

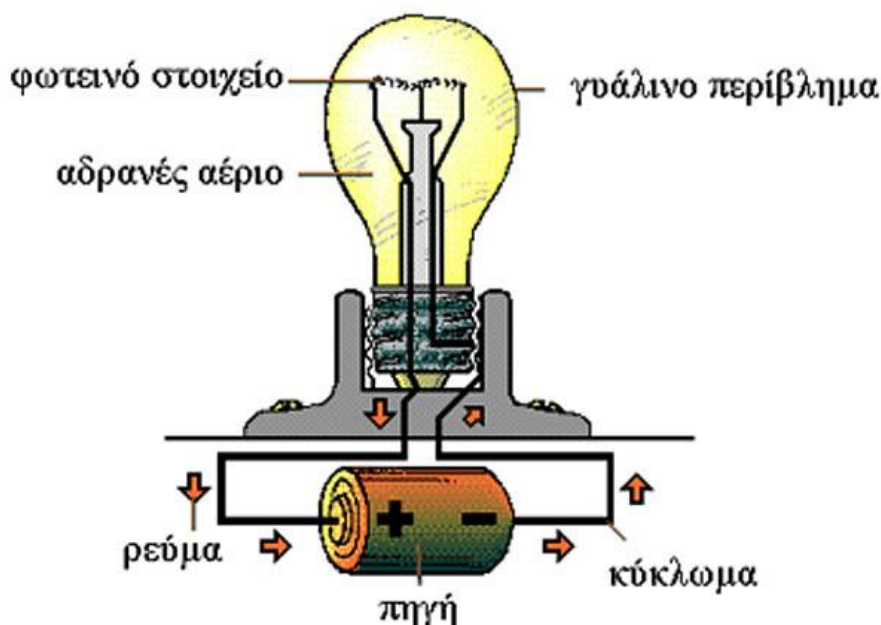
Όπως όλες οι μεγάλες εφευρέσεις, ο ηλεκτρικός λαμπτήρας δεν μπορεί να αποδοθεί σε έναν και μόνο εφευρέτη. Ήταν το αποτέλεσμα πολλών μικρών ιδεών προηγούμενων εφευρετών που οδήγησαν σε αυτόν και κατ' επέκταση στους λαμπτήρες που χρησιμοποιούμε έως και σήμερα στα σπίτια μας.

## 1.2. Οι λαμπτήρες πυρακτώσεως «φωτίζουν» τον δρόμο

Πολύ πριν ο Thomas Edison πατεντάρει και αρχίσει την εμπορευματοποίηση του λαμπτήρα πυρακτώσεως (αρχικά το 1879 και αργότερα το 1880), βρετανοί εφευρέτες είχαν αποδείξει πως το ηλεκτρικό φως ήταν δυνατό να παραχθεί με λαμπτήρες τόξου. Συγκεκριμένα ήταν το 1835 όταν έγινε για πρώτη φορά η παρουσίαση του συνεχόμενου ηλεκτρικού φωτός. Για τα επόμενα 40 χρόνια επιστήμονες σ' όλο τον κόσμο δούλευαν πάνω στον λαμπτήρα πυρακτώσεως πειραματιζόμενοι με το σύρμα καθώς και με τον αέρα μέσα στον λαμπτήρα. Αυτοί οι πρώτοι λαμπτήρες είχαν πολύ μικρή διάρκεια ζωής, ήταν απαγορευτικά ακριβή η παραγωγή τους ή καταλάωναν ασύμφορα πολύ ενέργεια.

Όταν ο Edison και οι συνεργάτες του ασχολήθηκαν με τον ζήτημα του ηλεκτρικού λαμπτήρα, έδωσαν την προσοχή τους στο λεπτό σύρμα και στη βελτίωση του, δοκιμάζοντας αρχικά τον άνθρακα, μετά την πλατίνα και καταλήγοντας στο αρχικό νήμα άνθρακα. Τον Οκτώβρη του 1879, η επιστημονική ομάδα του Edison δημιούργησε τους λαμπτήρες με ανθρακονήματα που είχαν διάρκεια ζωής έως 14,5 ώρες. Συνέχισαν να πειραματίζονται με το σύρμα μέχρι έως ότου καταλήξανε στη

χρήση ενός φτιαγμένου από μπαμπού, το οποίο έδωσε στους λαμπτήρες ζωή έως και 1.200 ώρες. Το συγκεκριμένο υλικό χρησιμοποιήθηκε για τα επόμενα 10 χρόνια στους λαμπτήρες πυρακτώσεως. Εκτός από το σύρμα η ομάδα του Edison ασχολήθηκε και με άλλα σημεία του λαμπτήρα όπως το κενό αέρος για το οποίο δημιούργησαν μια ειδική αντλία αφαίρεσης αέρα καθώς και την βιδωτή υποδοχή του.



Εικόνα 1: Αρχή λειτουργίας λαμπτήρα

Αυτό που έκανε μοναδική την προσφορά του Edison ήταν το ότι δεν σταμάτησε ποτέ να βελτιώνει την εφεύρεση του. Προσάρμοσε το μοντέλο της τεχνολογίας του λαμπτήρα του στο ήδη υπάρχον δίκτυο φωτισμού φυσικού αερίου. Το 1882 απέδειξε πως ο ηλεκτρισμός μπορούσε να διανεμηθεί από μια κεντρική γεννήτρια παροχής μέσω μιας σειράς συρμάτων και αγωγών. Την ίδια στιγμή έδωσε βαρύτητα στην βελτίωση της παραγωγής του ηλεκτρισμού, δημιουργώντας την πρώτη εμπορική επιχείρηση ηλεκτρισμού, την Pearl Street Station στο Μανχάταν. Επίσης για να μπορεί να ελέγχει την κατανάλωση του κάθε καταναλωτή, έφτιαξε και τον πρώτο μετρητή ηλεκτρικής κατανάλωσης.

Παράλληλα με τον Edison και άλλοι εφευρέτες δούλευαν πάνω στη βελτίωση της παραγωγής του σύρματος στον λαμπτήρα καθώς και στην απόδοσή του. Η επόμενη μεγάλη αλλαγή έγινε με την χρήση του σύρματος βολφραμίου από ευρωπαίους εφευρέτες το 1904. Οι λαμπτήρες αυτοί είχαν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και παρήγαγαν εντονότερο φως από τον λαμπτήρα με ανθρακονήματα. Το 1913, ο Irving Langmuir ανακάλυψε πως με τη χρήση αερίου μέσα στον λαμπτήρα, όπως το άζωτο,

διπλασιαζόταν η απόδοσή του. Οι επιστήμονες συνέχισαν να κάνουν αλλαγές για τη βελτίωση του χρόνου ζωής, της απόδοσής καθώς και της κατανάλωσης του λαμπτήρα πυρακτώσεως για τα επόμενα 40 χρόνια. Παρόλα αυτά, μέχρι τη δεκαετία του 1950 το μόνο που είχαν καταφέρει ήταν να μειώσουν την κατανάλωση στο λαμπτήρα πυρακτώσεως κατά 10%, κάτι που τους οδήγησε να ψάξουν για διαφορετικές λύσης φωτισμού.

### **1.3. Ελλείψεις ενέργειας οδηγούν σε ανακάλυψη του φθορισμού**

Το 19ο αιώνα δύο γερμανοί, ο υαλουργός Heinrich Geissler και ο φυσικός Julius Plücker, ανακάλυψαν ότι μπορούσε να παραχθεί φως με το να περάσει ηλεκτρικό ρεύμα μέσα από ένα γυάλινο σωλήνα που θα του έχουν πρώτα αφαιρέσει σχεδόν όλο τον αέρα. Μια εφεύρεση που έμεινε γνωστή ως σωλήνας Geissler. Αυτοί οι λαμπτήρες εκκένωσης δεν είχαν μεγάλη καταναλωτική απήχηση μέχρι και τις αρχές του 20ου αιώνα, όπου οι επιστήμονες άρχισαν να ψάχνουν τρόπους να αυξήσουν την απόδοσή τους. Οι λαμπτήρες εκκένωσης έγιναν η βάση για πολλές τεχνολογίες φωτισμού που ακολούθησαν όπως είναι τα φώτα νέον, οι λαμπτήρες νατρίου χαμηλής πίεσης και οι λάμπες φθορισμού.

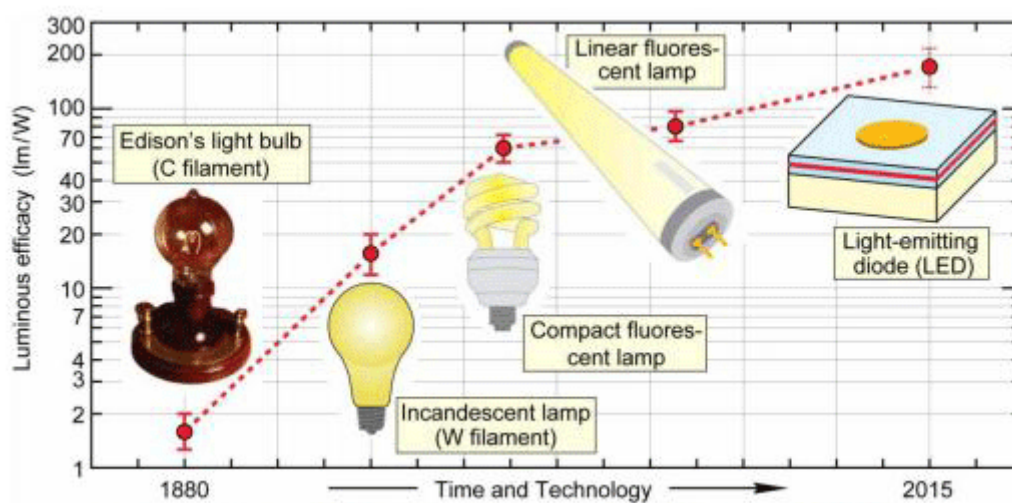
Ο Thomas Edison και ο Nikola Tesla είχαν πειραματιστεί με τους λαμπτήρες φθορισμού τη δεκαετία του 1890 αλλά κανείς από τους δύο δεν είχε καταφέρει να τους παράξει σε εμπορικό επίπεδο. Αντ' αυτών, ήταν ο Peter Cooper Hewitt που κατάφερε να δημιουργήσει τον πρόδρομο της λάμπας φθορισμού στις αρχές του 1900. Ο Hewitt δημιούργησε ένα μπλε-πράσινο φως με τη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος μέσω αερίου υδραργύρου και με ενσωματωμένο ένα στραγγαλιστικό πηνίο (ballast). Ενώ οι λαμπτήρες Cooper Hewitt ήταν πιο αποτελεσματικοί από τους λαμπτήρες πυρακτώσεως, είχαν λίγες κατάλληλες εφαρμογές, λόγω του χρώματος του φωτός.

Τις δεκαετίες 1920 – 1930, οι ευρωπαίοι ερευνητές έκαναν πειράματα με σωλήνες νέον με επικάλυψη φωσφόρου, ένα υλικό που απορροφά το υπεριώδες φως και το μετατρέπει σε χρήσιμο, ορατό λευκό φως. Αυτά τα πειράματα ήταν που εκτίναξαν τις έρευνες πάνω στις λάμπες φθορισμού στις Η.Π.Α. κι έτσι κατά τα τέλη του 1930 εταιρίες παραγωγής λαμπτήρων παρουσίαζαν για πρώτη φορά λάμπες φθορισμού στο αμερικάνικο ναυτικό και στην διεθνή έκθεση της Νέας Υόρκης το 1939. Αυτές οι

λάμπες είχαν πολύ μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και σχεδόν 3 φορές μεγαλύτερη απόδοση σε φως από τους λαμπτήρες πυρακτώσεως. Η ανάγκη για ενεργειακά αποδοτικό φωτισμό οδήγησε τις αμερικάνικες βιομηχανίες πολέμου στην ταχεία υιοθέτηση του φθορισμού κι έτσι από το 1951 και μετά στις ΗΠΑ, το μεγαλύτερο μέρος της ανάγκης για φωτισμό καλύπτεται από λαμπτήρες φθορισμού.

Μια ακόμα οικονομική κρίση (η πετρελαϊκή κρίση του 1973), ήταν που οδήγησε στη δημιουργία λαμπτήρων φθορισμού για οικιακή χρήση. Το 1974, ερευνητές της εταιρίας Sylvania ξεκίνησαν να ψάχνουν τρόπους ώστε να μειώσουν το μέγεθος του ballast ώστε να ενσωματωθεί στο εσωτερικό του λαμπτήρα. Αν και κατάφεραν να σχεδιάσουν μια πατέντα για τη λάμπα, δεν μπόρεσαν να κάνουν την παραγωγή της δυνατή. Δύο χρόνια μετά ο Edward Hammer της εταιρίας General Electric κατάφερε να δώσει στον λαμπτήρα σπειροειδή μορφή, δημιουργώντας έτσι τον πρώτο συμπαγή λαμπτήρα φθορισμού (CFL). Όπως η Sylvania έτσι και η General Electric βάλανε στο ράφι τα σχέδια αυτά μια και τα μηχανήματα που χρειάζονταν για την μαζική παραγωγή του νέου λαμπτήρα ήταν οικονομικά ασύμφορα.

Οι πρώτοι CFL λαμπτήρες βγήκαν στην αγορά στα μέσα του 1980 με λιανική τιμή στα 25-35 δολάρια. Βασικό μειονέκτημα για τους καταναλωτές ήταν η υψηλή τιμή τους καθώς και το μεγάλο και άχαρο σχήμα τους που τους έκανε δύσκολους στη χρήση. Επίσης είχαν χαμηλή και μη αξιόπιστη απόδοση φωτός. Οι βελτιώσεις που έγιναν έως το 1990 στους λαμπτήρες φωτισμού σε επίπεδο ενέργειας αλλά και απόδοσης τους έκαναν μια καλή επιλογή για οικιακή χρήση.



Εικόνα 2: Η εξέλιξη των λαμπτήρων στην πορεία του χρόνου

## 1.4. LEDs: Το μέλλον είναι εδώ

Μία από τις πιο γρήγορα αναπτυσσόμενες τεχνολογίες στο φωτισμό σήμερα είναι τα LED (δίοδοι εκπομπής φωτός). Τα LED χρησιμοποιούν έναν ημιαγωγό για τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε φως, είναι συχνά μικρά σε μέγεθος (λιγότερο από 1 mm<sup>2</sup>) και εκπέμπουν φως σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση, μειώνοντας έτσι την ανάγκη για ανακλαστήρες και διαχυτές που μπορούν να παγιδεύσουν το φως.

Επίσης, είναι τα πιο αποτελεσματικά φώτα στην αγορά. Η αποτελεσματικότητα ενός λαμπτήρα, που λέγεται και φωτεινή απόδοση, είναι το μέτρο του εκπεμπόμενου φωτός (lumens - lm) διαιρούμενο με την ενέργεια που καταναλώνει (watts - W). Μια λάμπα που είναι 100 % αποτελεσματική στη μετατροπή της ενέργειας σε φως, έχει αποτελεσματικότητα που φτάνει τα 683 lm/W. Για να το θέσουμε στην πράξη, μια λάμπα πυρακτώσεως των 60-100 W έχει αποτελεσματικότητα 15 lm/W, μια ισοδύναμη CFL έχει αποτελεσματικότητα 73 lm/W, ενώ μια LED, το φάσμα της οποίας αυτή τη στιγμή στην αγορά είναι από 70 - 120 lm/W, έχει μέση αποτελεσματικότητα της τάξης των 85 lm/W.

Το 1962, ενώ εργαζόταν για την General Electric, ο Nick Holonyak ο νεώτερος, εφηύρε το πρώτο φωτεινό φάσμα LED με τη μορφή της κόκκινης διόδου. Οι δίοδοι ανοιχτού κίτρινου και πράσινου εφευρέθηκαν αργότερα. Καθώς οι εταιρείες συνέχισαν να βελτιώνονται τις κόκκινες διόδους και την κατασκευή τους, άρχισαν να εμφανίζονται ως ενδεικτικές λυχνίες και display υπολογιστών στη δεκαετία του 1970. Η εφεύρεση του μπλε φωτός στη δεκαετία του 1990 οδήγησε γρήγορα στην ανακάλυψη των λευκών LED - οι ερευνητές απλώς επικάλυπταν τις μπλε διόδους με φώσφορο για να φαίνονται λευκές. Λίγο αργότερα, οι ερευνητές ανάδειξαν το λευκό φως χρησιμοποιώντας κόκκινες, πράσινες και μπλε LED. Αυτές οι ανακαλύψεις οδήγησαν σε LED που χρησιμοποιούνται σε μια ποικιλία εφαρμογών, όπως φανάρια οδικής κυκλοφορίας, φακούς και τηλεοράσεις.

Για να γίνουν τα LED επιλογή για το γενικό φωτισμό, οι ερευνητές έπρεπε να επικεντρωθούν στη βελτίωση της απόδοσης των LED, η οποία στην αρχή δεν ήταν μεγαλύτερη από τους λαμπτήρες πυρακτώσεως. Το 2000, όμως, δημιουργήθηκε η πρώτη λάμπα υψηλής απόδοσης που περιείχε πολλά LED συσκευασμένα μαζί κάτι που οδήγησε στην προώθηση της τεχνολογίας φωτισμού LED.

Μέχρι το 2008, στην αγορά υπήρχαν μόνο λίγοι λαμπτήρες LED που θα μπορούσαν να χρησιμεύσουν ως υποκατάστατο των λαμπτήρων πυρακτώσεως και οι περισσότεροι ήταν ισοδύναμοι των 25-40 W. Στα τέλη του 2009, η Philips Lighting εισήγαγε την L Prize 60-W και την πατρωνάρισε ως αντικαταστάτρια των λαμπτήρων πυρακτώσεως.

Οι εταιρείες φωτισμού συνέχισαν να επιφέρουν βελτιώσεις τόσο στην ποιότητα του φωτός όσο και την ενεργειακή απόδοση των LED, με παράλληλη μείωση του κόστους τους. Από το 2008, το κόστος των λαμπτήρων LED έχει μειωθεί περισσότερο από 85%. Οι λαμπτήρες LED σήμερα είναι, επίσης, έξι έως επτά φορές πιο ενεργειακά αποδοτικές από ότι τα συμβατικά φώτα πυρακτώσεως, έχουν μειώσει την χρήσης ενέργειας κατά περισσότερο από 80% και μπορούν να διαρκέσουν πάνω από 25 φορές περισσότερο. Στο σύνολό τους, αυτές οι εξελίξεις έχουν οδηγήσει σε ταχεία ανάπτυξη κατά τα τελευταία δύο χρόνια τόσο στις εμπορικές και όσο και στις οικιακές εφαρμογές .

Οι λαμπτήρες πυρακτώσεως και τα υφιστάμενα φωτιστικά σώματα χρησιμοποιούν σχέδια που χρονολογούνται από τις ημέρες του Edison. Η αντικατάσταση των παλαιών λαμπτήρων με LED είναι μόνο η κορυφή του παγόβουνου, όταν πρόκειται για την εξοικονόμηση ενέργειας φωτισμού. Τα συστήματα φωτισμού LED έχοντας σχεδιαστεί για να επωφεληθούν πλήρως από τα πλεονεκτήματα των διόδων LED, έχουν ακόμη μεγαλύτερες δυνατότητες εξοικονόμησης ενέργειας, οι οποίες αυξάνονται όσο βελτιώνεται η τεχνολογία LED.

# Κεφάλαιο 2

## 2.1. Ηλεκτρικός λαμπτήρας

Η εφεύρεση του ηλεκτρικού λαμπτήρα (ή αλλιώς λυχνίας ή λάμπας) αποδίδεται συνήθως στον Thomas Edison, όμως, όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, η ομάδα του Edison απλά τελειοποίησε τα χαρακτηριστικά του [3]. Ο ηλεκτρικός λαμπτήρας είναι τεχνητή πηγή φωτός τροφοδοτούμενη από ηλεκτρική ενέργεια. Οι ηλεκτρικές λάμπες διακρίνονται, με κριτήριο τον τρόπο λειτουργίας τους, σε λάμπες πυράκτωσης, λάμπες φωτοβολταϊκού τόξου, λάμπες φθορισμού, λάμπες αίγλης και LED.

## 2.2. Λαμπτήρας πυρακτώσεως

Ο λαμπτήρας πυράκτωσης είναι λαμπτήρας που εφευρέθηκε από τον Αμερικανό Thomas Edison. Περιλαμβάνει ένα λεπτό μεταλλικό νήμα, από βαρύ, δύστηκτο μέταλλο, συνήθως βολφράμιο, τυλιγμένο σε σπείρες. Αυτό φέρεται από τις άκρες του συγκολλημένο σε δύο παχύτερα σύρματα από όπου εφαρμόζεται η ηλεκτρική τάση η οποία θέτει τα ηλεκτρικά φορτία σε κίνηση και η οποία εξαναγκάζει το νήμα να φωτοβολεί από τη θέρμανσή του στους 2600°C. Όταν το μήκος του νήματος είναι μεγαλύτερο των 2 cm, τότε αυτό συγκρατείται και ενδιάμεσα από μη ηλεκτροφόρα σύρματα σε ακτινική διάταξη.

Η κατασκευή αυτή περικλείεται σε γυάλινη σφαιρική ή ελλειπτική φύσιγγα χαμηλής πίεσης αερίου. Η φύσιγγα αυτή σε λαμπτήρες μικρής ισχύος είναι κενού αέρος, ή περιέχει αδρανές αέριο, συνήθως άζωτο σε λαμπτήρες μεγάλης ισχύος ή και αλογόνο (ιώδιο) στους λαμπτήρες αλογόνου. Ο λαμπτήρας μπορεί να διαθέτει βιδωτή επαφή που συνδέεται με τον έναν πόλο και μια επαφή στην βάση που συνδέεται με τον άλλο πόλο (Εικ. 3).

Η ισχύς που καταναλώνεται είναι 25-1000W. Το χρώμα της ακτινοβολίας είναι λευκό. Η διάρκεια ζωής αυτού του τύπου λαμπτήρα είναι 750-1500 ώρες συνεχούς λειτουργίας. Όσο μεγαλύτερη είναι η ισχύς του, τόσο μικρότερη είναι η ζωή του. Ο λαμπτήρας πυράκτωσης ανάβει μόνο όταν και οι δύο επαφές του ακουμπούν και στους δύο πόλους της μπαταρίας ή της πρίζας. Στις περιπτώσεις που η λάμπα δεν

ανάβει, έχει κοπεί (καεί από υπερβολική αύξηση του ηλεκτρικού ρεύματος απότομα) το νήμα.



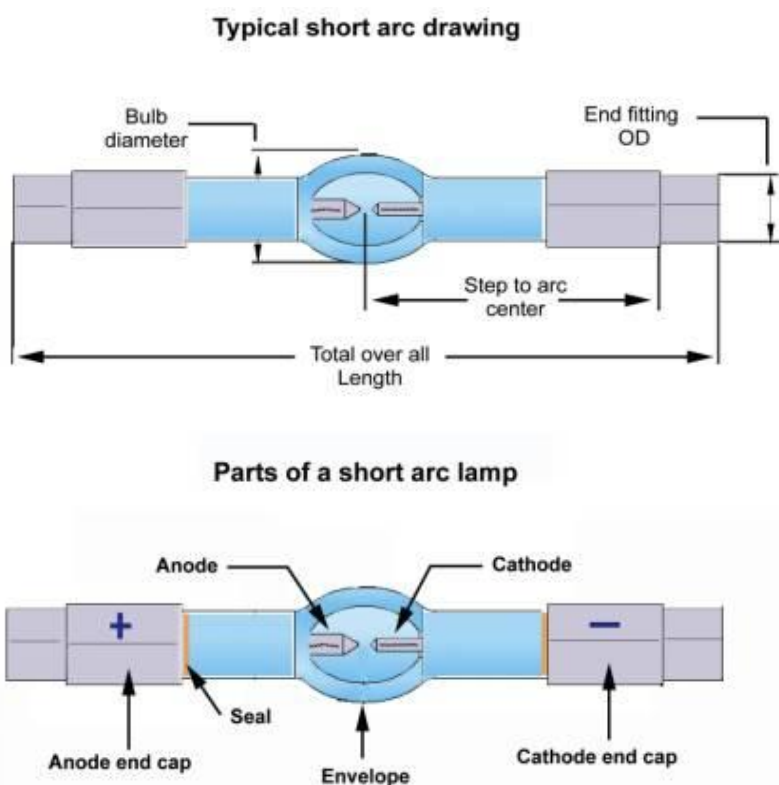
Εικόνα 3: Στοιχεία λαμπτήρα πυρακτώσεως

Χρησιμοποιείται για φωτισμό κατοικιών, καταστημάτων, αυτοκινήτων κλπ. Ο λαμπτήρας πυράκτωσης δημιουργεί τα λιγότερα προβλήματα στα μάτια λόγω του ότι παρέχει σταθερό και όχι κυμαινόμενο φως, το οποίο επίσης προσεγγίζει ικανοποιητικά, για το ανθρώπινο μάτι, το φυσικό φως του ήλιου, σε ότι αφορά την ομοιομορφία της κατανομής των συχνοτήτων που αναδύονται. Οι λαμπτήρες πυράκτωσης είναι πολύ λιγότερο αποδοτικοί από κάθε άλλου είδους λαμπτήρες. Καταναλώνουν μόλις το 5% της ενέργειας τους για δημιουργία φωτός, ενώ το υπόλοιπο μετατρέπεται σε θερμότητα [4]. Ο λαμπτήρας πυράκτωσης τείνει προς κατάργηση και πλέον αποσύρεται από την αγορά για λόγους κατανάλωσης ενέργειας κατά την χρήση του, που ευθέως συνεπάγονται περιβαλλοντικούς λόγους. Ήδη Ο λαμπτήρας αλογόνου χρησιμοποιείται για προβολείς. Βασικό μειονέκτημα του λαμπτήρα αυτού η ευαισθησία του σε μεταβολές της τάσης.

### 2.3. Λαμπτήρας φωτοβολταϊκού τόξου

Ο λαμπτήρας φωτοβολταϊκού τόξου ή λαμπτήρας τόξου είναι ειδικός λαμπτήρας που περιέχει κυρίως ατμούς μετάλλων και ίσως βοηθητικά κάποιο ευγενές αέριο [5]. Τα ηλεκτρόδια στα άκρα του εργάζονται «εν θερμώ», είναι δηλαδή στην ουσία νήματα πυράκτωσης. Η θέρμανση αρχικά πραγματοποιείται με ιδιαίτερο κύκλωμα που διακόπτεται αυτόματα μόλις ξεκινήσει η ακτινοβολία του λαμπτήρα, οπότε και η

θέρμανση διατηρείται από το ρεύμα του τόξου ή θερμαίνονται αυτοί από το ίδιο το τόξο που ξεκινάει υπό μορφή αίγλης και η οποία σχηματίζεται εξαιτίας του αερίου που περιέχει ο σωλήνας. Η θέρμανση αυτών των λαμπτήρων, αν και είναι χαμηλότερη εκείνης των λαμπτήρων πυράκτωσης, καθίσταται απαραίτητη τόσο για την εξάτμιση του μετάλλου που περιέχουν, και που συνήθως είναι υδράργυρος, ή νάτριο, όσο και για την περιορισμένη επιφάνεια των ηλεκτροδίων προκειμένου να εκπέμπουν εύκολα ηλεκτρόνια (Εικ. 4).



Εικόνα 4: Σχεδιάγραμμα και μέρη λαμπτήρα τόξου

Οι λαμπτήρες τόξου είναι ιδιαίτερα επικίνδυνοι για το περιβάλλον καθώς ο υδράργυρος είναι ιδιαίτερα τοξικός και πρέπει να αποφεύγεται να γίνεται χρήση μολυσμένων πια αντικειμένων, όπως χαλιά που έχει σπάσει πάνω τους π.χ. μια λάμπα φθορισμού, και μάλιστα ούτε να σκουπίζονται με ηλεκτρική σκούπα, καθώς διαχέονται εκ νέου τα τοξικά υλικά στον αέρα μέσα σε ένα δωμάτιο. Επίσης οι λαμπτήρες τόξου κάνουν flickering, που γίνεται ιδιαίτερα ορατό όταν είναι ευθείς (δεν έχουν π.χ. σπειροειδές σχήμα), πράγμα το οποίο είναι ενοχλητικό και κουράζει τα μάτια.

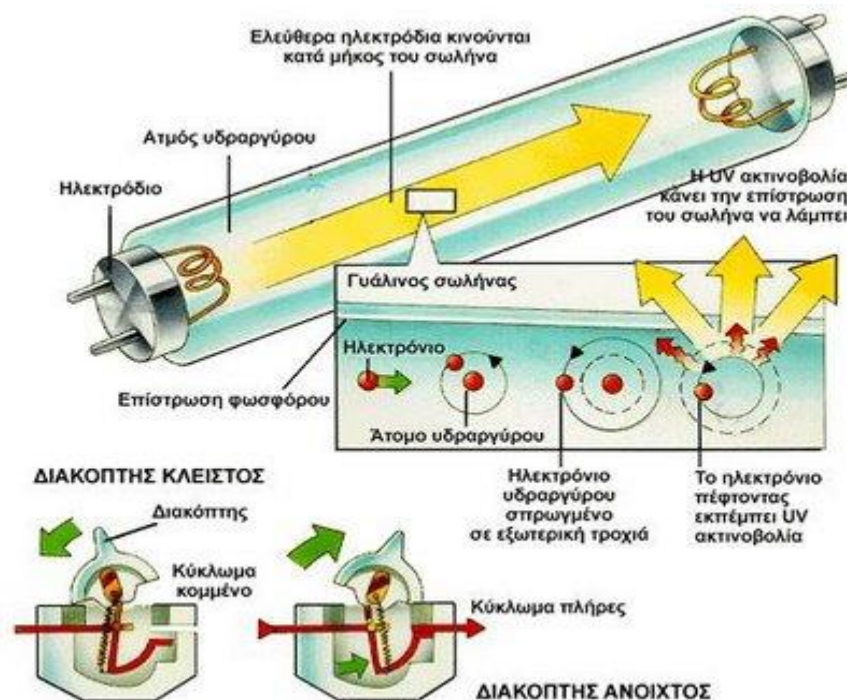
Οι λαμπτήρες τόξου διακρίνονται στους επιμέρους τρεις τύπους λαμπτήρων πίεσης:

- Λαμπτήρες ατμών υδραργύρου ή υψηλής πίεσης υδραργύρου
- Λαμπτήρες ατμών νατρίου
- Λαμπτήρες φθορισμού

Και οι τρεις παραπάνω τύποι λαμπτήρων τόξου ανήκουν στη κατηγορία των ψυχρών φωτεινών πηγών.

## 2.4. Λαμπτήρας φθορισμού

Μια λάμπα φθορισμού ή σωλήνα φθορισμού είναι ένας λαμπτήρας χαμηλής πίεσης εκκένωσης αερίου ατμών υδραργύρου που χρησιμοποιεί φθορισμό για την παραγωγή ορατού φωτός (Εικ. 5). Ένα ηλεκτρικό ρεύμα στο αέριο διεγείρει τον ατμό υδραργύρου με αποτέλεσμα την παραγωγή βραχέων κυμάτων υπεριώδους φωτός που στη συνέχεια αναγκάζει την επικάλυψη φωσφόρου που υπάρχει στο εσωτερικό του βολβού να λάμπει [6]. Ένας λαμπτήρας φθορισμού μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε χρήσιμο φως πολύ πιο αποτελεσματικά από τους λαμπτήρες πυράκτωσης. Η φωτεινή απόδοση ενός λαμπτήρα φθορισμού μπορεί να υπερβαίνει τα 100 lm/W, αρκετές φορές μεγαλύτερη της αποτελεσματικότητας ενός λαμπτήρα πυρακτώσεως με συγκρίσιμη απόδοση φωτός.



Εικόνα 5: Λαμπτήρας φθορισμού

Οι λαμπτήρες φθορισμού είναι πιο ακριβές από τους λαμπτήρες πυρακτώσεως επειδή απαιτούν ηλεκτρονικό ballast για να ρυθμίσει το ρεύμα που διαρρέει τον λαμπτήρα, αλλά το χαμηλότερο κόστος ενέργειας αντισταθμίζει συνήθως το υψηλότερο αρχικό κόστος. Οι λαμπτήρες φθορισμού είναι πλέον διαθέσιμοι στα ίδια δημοφιλείς μεγέθη των λαμπτήρων πυρακτώσεως και χρησιμοποιούνται ως εναλλακτική λύση εξοικονόμησης ενέργειας στα σπίτια.

Επειδή περιέχουν υδράργυρο , πολλοί λαμπτήρες φθορισμού ταξινομούνται ως επικίνδυνα απόβλητα και για το λόγο αυτό πρέπει να διαχωρίζονται από τα γενικά αποβλήτων για ανακύκλωση ή ασφαλή διάθεση .

Ένας συμπαγής λαμπτήρας φθορισμού (compact fluorescent lamp - CFL ), που ονομάζεται επίσης λαμπτήρας εξοικονόμησης ενέργειας, έχει σχεδιαστεί για να αντικαταστήσει τον λαμπτήρα πυρακτώσεως. Ορισμένοι τύποι ταιριάζουν σε φωτιστικά σώματα που χρησιμοποιούνταν παλαιότερα για τους λαμπτήρες πυρακτώσεως . Οι λαμπτήρες αυτού του τύπου χρησιμοποιούν ένα σωλήνα που είναι καμπύλος ή διπλωμένος ώστε να ταιριάζει στο χώρο ενός λαμπτήρα πυράκτωσης και περιέχουν ένα συμπαγές ηλεκτρονικό ballast στη βάση του λαμπτήρα .

Σε σύγκριση με τους λαμπτήρες πυρακτώσεως γενικής χρήσης, με την ίδια ποσότητα του ορατού φωτός , οι συμπαγείς λαμπτήρες φθορισμού χρησιμοποιούν το ένα πέμπτο έως το ένα τρίτο της ηλεκτρικής ενέργειας και διαρκούν οκτώ έως δεκαπέντε φορές περισσότερο. Ένας CFL έχει υψηλότερη τιμή αγοράς από τους λαμπτήρες πυράκτωσης, αλλά μπορεί να εξοικονομήσει πάνω από πέντε φορές το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτεί κατά τη διάρκεια ζωής του. Όπως όλοι οι λαμπτήρες φθορισμού, οι συμπαγείς λαμπτήρες φθορισμού περιέχουν τοξικό υδράργυρο που περιπλέκει την διάθεσή τους. Σε πολλές χώρες , οι κυβερνήσεις έχουν θέσει σε εφαρμογή συστήματα ανακύκλωσης ειδικά για το γυαλί των συμπαγών λαμπτήρων φθορισμού [ 7 ] .

Οι συμπαγείς λαμπτήρες φθορισμού ακτινοβολούν μια φασματική κατανομή ισχύος που είναι διαφορετική από εκείνη των λαμπτήρων πυρακτώσεως. Βελτιωμένες συνθέσεις φωσφόρου έχουν βελτιώσει την αντίληψη του χρώματος του φωτός που εκπέμπεται από λαμπτήρες φθορισμού μικρού μεγέθους, έτσι ώστε σε πολλές περιπτώσεις το "λευκό μαλακό" φως των συμπαγών λαμπτήρων φθορισμού,

εκτιμάται καλύτερα από το υποκειμενικά παρόμοιο χρώμα του φωτός των συνηθισμένων λαμπτήρων πυράκτωσης [ 8 ] .

## **2.5. Λαμπτήρας αίγλης**

Οι λαμπτήρες αίγλης μοιάζουν σε μορφή με τους κοινούς λαμπτήρες πυράκτωσης [9]. Ονομάζονται και ενδεικτικές λυχνίες επειδή συνήθως χρησιμοποιούνται ακριβώς ως ενδεικτικές λειτουργίας συσκευών ή σε πίνακες διανομής ηλεκτρικού ρεύματος. Πρόκειται για λαμπτήρες των οποίων τα ηλεκτρόδια έχουν σχήμα σταυρού ή άλλα σχήματα.

Οι λαμπτήρες αυτοί περιέχουν μίγματα ευγενών αερίων σε χαμηλή πίεση και δύο ηλεκτρόδια σε μικρή απόσταση μεταξύ τους. Το αέριο που βρίσκεται μεταξύ των ηλεκτροδίων ιονίζεται από το ηλεκτρικό πεδίο που αναπτύσσεται και επιτρέπει έτσι τη διέλευση μέσω αυτού του ηλεκτρικού ρεύματος, ενώ στη συνέχεια διατηρεί τον ιονισμό σε χαμηλότερη τάση.

Όταν όμως ξεκινά η εκκένωση αυτή, η αντίσταση του αερίου μεταξύ των ηλεκτροδίων είναι πολύ μικρή. Έτσι, απαιτείται μια ωμική αντίσταση, η οποία να περιορίζει την ένταση του ρεύματος. Η αντίσταση αυτή βρίσκεται συνήθως μέσα στη φύσιγγα του λαμπτήρα. Η ισχύς των λαμπτήρων αυτών είναι μικρή, περιοριζόμενη στο 1W περίπου.

Οι λαμπτήρες αυτοί ανήκουν στη κατηγορία των ψυχρών φωτεινών πηγών.

## **2.6. Λαμπτήρες LED**

Μια λάμπα LED είναι ένα προϊόν διόδων εκπομπής φωτός (LED) που συναρμολογούνται σε μορφή λάμπας για χρήση σε φωτιστικά. Οι λάμπες LED έχουν διάρκεια ζωής και ηλεκτρική απόδοση που είναι πολλές φορές μεγαλύτερα από τους λαμπτήρες πυράκτωσης , και πολύ καλύτερα από ότι οι περισσότεροι λαμπτήρες φθορισμού , με ορισμένες μάρκες να μπορούν να εκπέμπουν πάνω από 100 lm/W. Η αγορά λαμπτήρων LED αναμένεται να αυξηθεί περισσότερο από 12 φορές πάνω από την επόμενη δεκαετία, από τα 2 δισεκατομμύρια δολάρια στις αρχές του 2014 στα 25 δισεκατομμύρια δολάρια το 2023, που σημαίνει ένα ποσοστό ρυθμού ετήσιας ανάπτυξης που θα φτάσει τα 25 % . [ 10 ]

Όπως οι λαμπτήρες πυρακτώσεως και σε αντίθεση με τους λαμπτήρες φθορισμού, οι λαμπτήρες LED φτάνουν σε πλήρη φωτεινότητα χωρίς την ανάγκη του χρόνου προθέρμανσης. Άλλωστε αυτός ο χρόνος είναι και ένα από τα βασικά μειονεκτήματα των λαμπτήρων φθορισμού καθώς η διάρκεια ζωής τους μειώνεται με τη συχνή ενεργοποίηση και απενεργοποίηση. Το αρχικό κόστος των λαμπτήρων LED είναι συνήθως υψηλότερο. Ένα άλλο μειονέκτημά τους είναι και η μείωση της φωτεινής απόδοσής τους σε κάποιο βαθμό την πάροδο του χρόνου, λόγω της υποβάθμισης των χαρακτηριστικών των στοιχείων LED αλλά και των υλικών συσκευασίας τους.

Έρευνα σε οργανικά LED (organic LED - OLED) και πολυμερών LED (polymer LED - PLED) έχει αποδείξει ότι το κόστος ανά lumen και η παραγωγή ανά συσκευή βελτιώνονται γρήγορα, σύμφωνα με αυτό που έχει ονομαστεί ως νόμος του Haitz, ανάλογος με το νόμο του Moore για τις συσκευές ημιαγωγών.

Μερικοί λαμπτήρες LED είναι άμεσα συμβατοί με τους προς αντικατάσταση λαμπτήρες πυρακτώσεως ή φθορισμού. Ένας λαμπτήρας LED μπορεί να έχει φωτεινή έξοδο, κατανάλωση ισχύος σε W, θερμοκρασία χρώματος σε °K, περιγραφή (π.χ. "ζεστό λευκό φως") και μερικές φορές ισοδύναμη ισχύς με ένα λαμπτήρα πυράκτωσης παρόμοιας φωτεινής απόδοσης.

Τα LED δεν εκπέμπουν φως προς όλες τις κατευθύνσεις και τα κατευθυντικά χαρακτηριστικά τους επηρεάζουν το σχεδιασμό των λαμπτήρων. Η φωτεινή απόδοση των LED είναι σαφώς μικρότερη από εκείνη των λαμπτήρων πυρακτώσεως και των συμπαγών λαμπτήρες φθορισμού και για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται συστοιχία LED για το σχηματισμό ενός λαμπτήρα, αν και σε λίγο καιρό θα είναι διαθέσιμα LED υψηλής ισχύος που θα αλλάξει αυτό το καθεστώς.

Οι συστοιχίες LED τροφοδοτούνται μόνο από ελεγχόμενο συνεχές ρεύμα (DC) και γι' αυτό είναι απαραίτητα η χρήση ενός κατάλληλου τροφοδοτικού. Τα LED επηρεάζονται αρνητικά από την υψηλή θερμοκρασία και επομένως οι λαμπτήρες LED συνήθως περιλαμβάνουν στοιχεία απαγωγής θερμότητας, όπως διατάξεις απαγωγής θερμότητας και πτερύγια ψύξης.

# Κεφάλαιο 3

## 3.1. Ανάλυση της τεχνολογίας LED

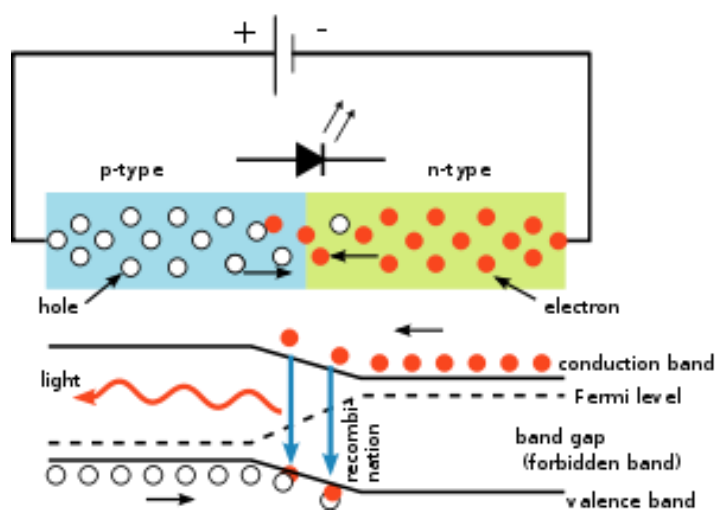
Οι περισσότεροι από εμάς έρχονται σε άμεση επαφή με διόδους εκπομπής φωτός (LED) κάθε μέρα. Το LED είναι ένα εξάρτημα τεχνολογίας στερεάς κατάστασης (solid-state technology) και επομένως οι λαμπτήρες LED συμμορφώνονται στους κανόνες του φωτισμού στερεάς κατάστασης (solid-state lighting – SSL). Αυτό σημαίνει ότι δεν είναι λαμπτήρες από γυαλί, δεν λειτουργούν με αέρια υπό πίεση, ούτε με τοξικές χημικές ουσίες και δεν έχουν νήματα καύσης. Αντίθετα λειτουργούν με ροή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ενός ημιαγωγού [11].

Χρησιμοποιούμενα ως ενδεικτικές λυχνίες στο ταμπλό του αυτοκινήτου, στις διάφορες ηλεκτρονικές συσκευές, ή σε φακούς χαμηλής ισχύος, τα LED είναι μονοχρωματικές πηγές φωτός χαμηλής εξόδου. Δεν αποτελεί έκπληξη επομένως το γεγονός ότι με βάση τα χαρακτηριστικά αυτά, για πολλά χρόνια, δεν υπήρχαν εξελίξεις στην τεχνολογία LED, ενώ η συνεισφορά τους στην τεχνολογία φωτισμού ήταν ουσιαστικά και συνολικά μηδαμινή. Τα τελευταία χρόνια όμως, η τεχνολογία LED έχει αλλάξει εντελώς με την εκ νέου “ανακάλυψη” του λαμπτήρα και τον τρόπο που σκεφτόμαστε για το φωτισμό σε γενικές γραμμές. Αυτό δεν ήταν πραγματικά δυνατό πριν από την τεχνολογική επανάσταση της δεκαετίας του '90 και την ταχεία πρόοδο των ημιαγωγών. Οι τεχνολογικές εξελίξεις που ώθησαν τους υπολογιστές να φτάσουν σε ιλιγγιώδη επίπεδα αποδοτικότητας, ήταν οι ίδιες και με τα ίδια όπως όλα δείχνουν αποτελέσματα και στην περίπτωση των LED. Ακριβώς όπως οι υπολογιστές έχουν γίνει ταχύτεροι και φθηνότεροι, έτσι και τα φώτα LED έχουν γίνει πιο φωτεινά, μικρότερα, λιγότερο ακριβά και βέβαια πιο εξελιγμένα.

Σήμερα, δεν τίθεται πλέον θέμα όσον αφορά την υπεροχή των λαμπτήρων LED έναντι των παραδοσιακών λαμπτήρων πυρακτώσεως. Με έως και οκτώ φορές μεγαλύτερη απόδοση από τους παραδοσιακούς λαμπτήρες πυρακτώσεως και μεγάλη υπεροχή απέναντι στους λαμπτήρες φθορισμού, τα LED γίνονται προτιμώμενες πηγές φωτός για τη σημερινή κοινότητα φωτισμού. Σήμερα επομένως, δεν υπάρχει άλλη τεχνολογία φωτισμού που να προσφέρει τόσες δυνατότητες εξοικονόμησης ενέργειας και βελτίωσης της ποιότητας του φωτισμού των πόλεων τόσο σε κτιριακά όσο και σε οδικά θέματα.

### 3.2. Η δίοδος εκπομπής φωτός

Η δίοδος LED αποτελεί τον ακρογωνιαίο λίθο μιας από τις πιο πολλά υποσχόμενες αναδυόμενες τεχνολογίες φωτισμού [12]. Αυτά τα ευέλικτα εξαρτήματα ημιαγωγών κατέχουν όλα τα επιθυμητά χαρακτηριστικά που μπορούν να δημιουργήσουν λαμπτήρες με στοιχεία που τόσο οι αντίστοιχοι πυρακτώσεως (βολφραμίου-αλογόνου) αλλά και οι λαμπτήρες τόξου στερούνται, ενώ είναι αρκετά αποτελεσματικοί ακόμα και όταν τροφοδοτούνται από μπαταρίες χαμηλής τάσης ή σχετικά ανέξοδα τροφοδοτικά μεταγωγής. Το χρώμα του φωτός που εκπέμπεται εξαρτάται από την χημική σύσταση του ημιαγωγικού υλικού που χρησιμοποιείται, και μπορεί να είναι υπεριώδες, ορατό και εγγύς υπέρυθρο. Το μήκος κύματος του φωτός που εκπέμπεται και, κατά συνέπεια, το χρώμα του, εξαρτάται από το χάσμα ενέργειας των υλικών που χρησιμοποιούνται για την δημιουργία της επαφής p-n. Ας δούμε όμως το πώς δύο ανόμοιοι ημιαγωγοί μπορούν να παράξουν φως όταν εφαρμόζεται μία τάση στην περιοχή συνδέσεώς τους.



Εικόνα 6: Αρχή λειτουργίας διόδου εκπομπής φωτός

Οι επαφές p-n των διόδων εκπομπής φωτονίων συνήθως δημιουργούνται από ένα μίγμα στοιχείων της ομάδας III και ομάδας V του περιοδικού συστήματος, όπως το γάλλιο, το αρσενικό, το φώσφορο, το ίνδιο και το αλουμίνιο. Η προσθήκη καρβιδίου του πυριτίου και νιτρίδιου του γαλλίου στους ημιαγωγούς αυτούς είχε ως αποτέλεσμα την δημιουργία των μπλε διόδων εκπομπής φωτός, οι οποίες μπορούν να συνδυαστούν με άλλα χρώματα ή άλλες φωσφορίζουσες επιφάνειες και να παράγουν τα LED λευκού φωτός. Το θεμελιώδες κλειδί για το χειρισμό των ιδιοτήτων των LED είναι η ηλεκτρονική φύση της συνδέσεως p-n μεταξύ δύο διαφορετικών υλικών

ημιαγωγών. Όταν δύο ανόμοιοι ημιαγωγοί συντήκονται, η ροή του ρεύματος σε συνδυασμό με τα χαρακτηριστικά μήκους κύματος του εκπεμπόμενου φωτός καθορίζονται από τον ηλεκτρονικό χαρακτήρα του κάθε υλικού. Σε γενικές γραμμές, το ρεύμα θα ρέει εύκολα προς τη μια κατεύθυνση κατά μήκος της σύνδεσης, αλλά όχι προς την άλλη, που αποτελεί τη βασική διαμόρφωση διόδου. Αυτό το είδος συμπεριφοράς γίνεται καλύτερα κατανοητό από την άποψη της μετάβασης των ηλεκτρονίων και των οπών στα δύο υλικά και κατά μήκος της επαφής (Εικ. 6).

Ηλεκτρόνια από τον ημιαγωγό τύπου - n κινούνται προς τον θετικά φορτισμένο ημιαγωγό (τύπου - p), ο οποίος έχει έλλειψη οπών, που επιτρέπει την "αναπήδηση" των ηλεκτρονίων από οπή σε οπή. Το αποτέλεσμα αυτής της μετανάστευσης των ηλεκτρονίων είναι η φαινόμενη κίνηση των οπών προς την αντίθετη κατεύθυνση, δηλαδή από το θετικά φορτισμένο ημιαγωγό προς τον αρνητικά φορτισμένο ημιαγωγό. Ηλεκτρόνια από την περιοχή τύπου- n και οπές από την περιοχή τύπου - p αλληλοεξουδετερώνονται στην περιοχή της επαφής για να σχηματίσουν έτσι την περιοχή απογύμνωσης, στην οποία δεν υπάρχουν φορείς φορτίου. Με τον τρόπο αυτό, στη νεκρή ζώνη δημιουργείται ένα στατικό φορτίο που αναστέλλει την ροή του ρεύματος, εκτός και αν εφαρμοστεί εξωτερική τάση.

Ηλεκτρόδια τοποθετούνται στις αντίθετες άκρες των ημιαγωγών pn, προκειμένου να ρυθμιστεί η δύσκολη μέσω της εφαρμογής μια τάσης, συνήθως 1-3V, ικανής να υπερνικήσει τα αποτελέσματα της περιοχής απογύμνωσης. Τυπικά, η περιοχή τύπου - n συνδέεται με τον αρνητικό ακροδέκτη και η περιοχή τύπου - p με το θετικό (μια συνδεσμολογία γνωστή ως ορθή πόλωση της επαφής), έτσι ώστε τα ηλεκτρόνια να ρέουν από το υλικό τύπου - n προς το τύπου - p και οι οπές προς την αντίθετη κατεύθυνση. Η ορθή πόλωση της επαφής έχει ως αποτέλεσμα την εξαφάνιση τη περιοχής απογύμνωσης και της κίνησης του ηλεκτρικού φορτίου κατά μήκος της διόδου, με τα ηλεκτρόνια να κινούνται προς την επαφή από το υλικό τύπου - n, ενώ οι οπές οδηγούνται προς την επαφή από το υλικό τύπου - p. Ο συνδυασμός των οπών και των ηλεκτρονίων που διαρρέει την επαφή p-n επιτρέπει τη διατήρηση ενός σταθερού συνεχούς ρεύματος κατά μήκος της διόδου, της τάξης των 1-100mA. Αν και ο έλεγχος της αλληλεπίδρασης ηλεκτρονίων και οπών στην επαφή p-n είναι ένα θεμελιώδες στοιχείο στο σχεδιασμό όλων των διόδων ημιαγωγών, ο πρωταρχικός στόχος των LED είναι η αποδοτική παραγωγή του φωτός. Η παραγωγή του ορατού φωτός που οφείλεται στην έγχυση φορέων φορτίου σε όλη την επαφή p-n

δημιουργείται μόνο σε διόδους ημιαγωγών που έχουν ειδικές συνθέσεις υλικού, το οποίο έχει οδηγήσει στην αναζήτηση νέων συνδυασμών που διαθέτουν το απαραίτητο χάσμα μεταξύ της ζώνης αγωγιμότητας και της ζώνης σθένους. Επιπλέον, η έρευνα βρίσκεται σε εξέλιξη για το σχεδιασμό αρχιτεκτονικών LED που ελαχιστοποιούν την απορρόφηση του φωτός από τα υλικά της διόδου και είναι πιο ισχυρά στη συγκέντρωση εκπομπής φωτός προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση.

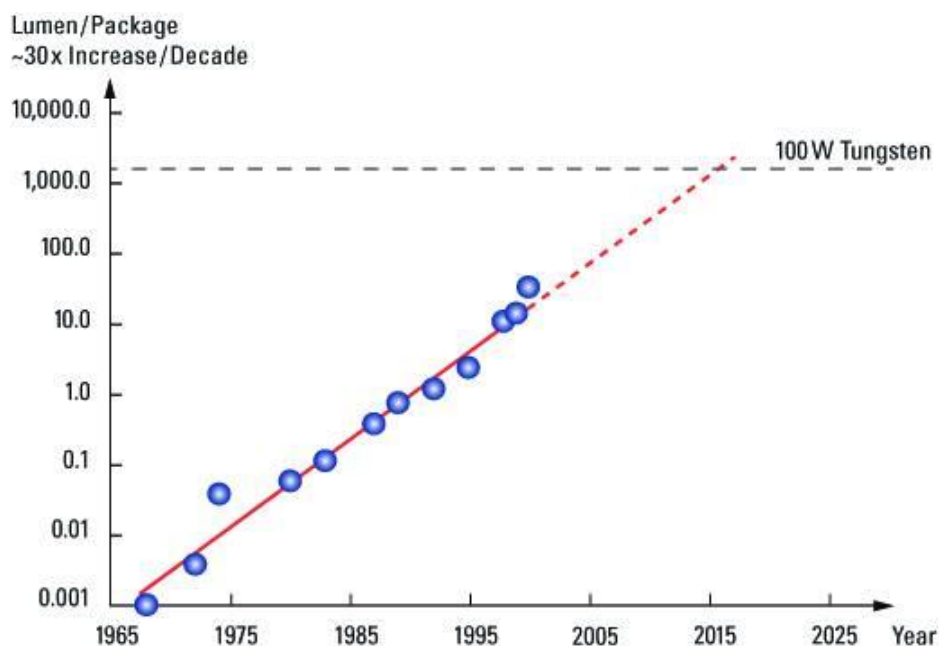
### **3.3. Χρησιμοποιούμενα υλικά και χρώμα**

Όπως είδαμε στην προηγούμενη ενότητα, το φάσμα ακτινοβολίας που παράγεται από ένα LED είναι πολύ μικρού φάσματος. Η διεύρυνση του φάσματος αυτού μπορεί να επιτευχθεί με την χρήση φωσφόρων, οι οποίοι διεγείρονται από την ακτινοβολία του LED. Έτσι, το πραγματικό χρώμα ενός LED προσδιορίζεται από το μήκος κύματος του εκπεμπόμενου φωτός, που με τη σειρά του προσδιορίζεται από την πραγματική ένωση ημιαγωγών που χρησιμοποιούνται στον σχηματισμό της επαφής p-n [13]. Ως εκ τούτου, το χρώμα του φωτός που εκπέμπεται από ένα LED δεν καθορίζεται από το χρωματισμό του περιβλήματος του LED, αν και αυτό είναι ελαφρά χρωματισμένο τόσο για την ενίσχυση της φωτεινής εξόδου όσο και για να δείχνει το χρώμα του όταν δεν φωτίζεται από μια ηλεκτρική παροχή.

Το υλικό που χρησιμοποιούταν παλαιότερα στην κατασκευή των LED ήταν το GaP (φωσφορούχο γάλλιο). Με την τεχνολογία GaP ήταν δυνατή η δημιουργία μηκών κύματος από κόκκινο σε κιτρινωπό πράσινο. Το μειονέκτημα της τεχνολογίας αυτής ήταν η σημαντικά μειωμένη διάρκεια ζωής των LED σε υψηλότερες θερμοκρασίες και ρεύματα και για το λόγο αυτό το GaP δεν χρησιμοποιείται πλέον στην κατασκευή LED. Ένα άλλο υλικό, το AlGaAs (αλουμίνιο αρσενικούχο γάλλιο) μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε LED για να δημιουργήσει ένα φάσμα χρωμάτων από πράσινο σε κόκκινο και ακόμη και υπέρυθη ακτινοβολία. Ωστόσο, τα LED που κατασκευάζονται με αυτό το υλικό έχουν πολύ χαμηλή απόδοση καθώς και διάρκεια ζωής και ως εκ τούτου αυτό το υλικό αυτό χρησιμοποιείται επίσης σπάνια στις μέρες μας.

Τα μειονεκτήματα αυτά ξεπεράστηκαν με την εισαγωγή του AlInGaP (Αλουμινίου ινδίου φωσφορούχο γάλλιο), ένα υλικό που είναι ικανό να αντέχει τόσο στις υψηλές

θερμοκρασίες όσο και στα υψηλά ρεύματα. Αυτό το υλικό χρησιμοποιείται για την παραγωγή υψηλής φωτεινότητας κόκκινων και πορτοκαλί LED.



Εικόνα 7: Νόμος του Haitz

Στις αρχές της δεκαετίας του 90, ένα άλλο υλικό, το InGaN (νιτρίδιο γαλλίου ινδίου) αναπτύχθηκε για να χρησιμοποιηθεί σε LED. Αυτό το υλικό χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά για την κατασκευή των μπλε LED, αλλά είναι σε θέση να παράγει ένα ευρύ φάσμα του πράσινου και του μπλε χρώματος συμπεριλαμβανομένης και της υπεριώδους ακτινοβολίας. Όπως προαναφέρθηκε στο πρώτο κεφάλαιο, ένα από τα μεγαλύτερα επιτεύγματα της τεχνολογίας LED ήταν το μπλε LED, χρώμα που ήρθε να κυριαρχήσει στην μετέπειτα ιστορία τους. Το πιο σημαντικό είναι ότι το μπλε είναι χρώμα μικρού μήκους κύματος (και άρα υψηλής ενέργειας) και βρίσκεται στο τέλος του ορατού φάσματος, επομένως κατέστη δυνατή η μετάπτωσή του σε πράσινο, κίτρινο και κόκκινο φως χρησιμοποιώντας παθητικά φωσφορίζοντα και φθορίζοντα υλικά. Τα μπλε LED χρησιμοποιούνται επίσης σε συνδυασμό με φώσφορο για να την δημιουργία λευκών LED.

Με τον τρόπο αυτό, το ορατό φάσμα θα μπορούσε να συμπληρωθεί, λευκό φως θα μπορούσε να παραχθεί και γενικές εφαρμογές φωτισμού ήταν πια δυνατόν να αναπτυχθούν. Πράγματι, όπως απεικονίζεται στο γράφημα της εικόνας 7, ο νόμος του Haitz νόμος, που αναπτύχθηκε αρχικά για το κόκκινο LED, συνεχίζει και για τα λευκά LED [14].

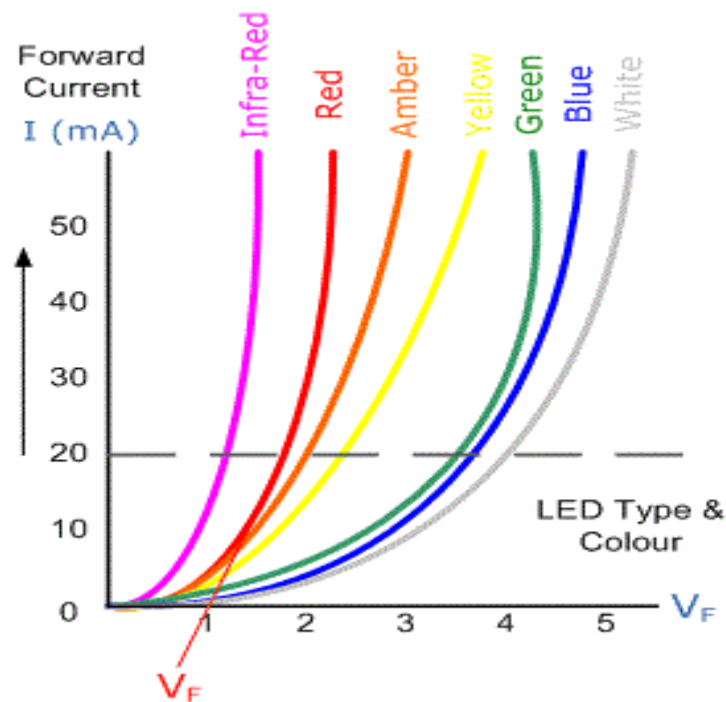
Typical LED Characteristics			
Semiconductor Material	Wavelength	Colour	$V_F$ @ 20mA
GaAs	850-940nm	Infra-Red	1.2v
GaAsP	630-660nm	Red	1.8v
GaAsP	605-620nm	Amber	2.0v
GaAsP:N	585-595nm	Yellow	2.2v
AlGaP	550-570nm	Green	3.5v
SiC	430-505nm	Blue	3.6v
GaN	450nm	White	4.0v

Εικόνα 8: Χρώματα ακτινοβολίας LED σε σχέση με τα χρησιμοποιούμενα υλικά

Ο Haitz προέβλεψε την αύξηση της έντασης του φωτός για τα φώτα LED και την εξέλιξη του κόστους παραγωγής. Σύμφωνα λοιπόν με τον Haitz, η ένταση του φωτός από ένα συσκευασμένο LED - πιθανώς συμπεριλαμβανομένων περισσότερων από ένα chip LED - θα πολλαπλασιαστεί με ένα συντελεστή από 20 έως 30 ανά δεκαετία, ενώ το κόστος παραγωγής θα μειωθεί κατά ένα συντελεστή 10 ανά δεκαετία. Η ανάπτυξη της αγοράς τα τελευταία χρόνια έχει επανειλημμένα επιβεβαιώσει την πρόβλεψη αυτή.

Ο πίνακας της εικόνας 8 απεικονίζει τα χρώματα ακτινοβολίας των LED σε σχέση με τις προσμίξεις της επαφής p-n, το μήκος κύματος του κάθε χρώματος καθώς επίσης και την τάση τροφοδοσίας που χρειάζεται κάθε LED με σταθερό ρεύμα. Όπως και στις συμβατικές διόδους επαφής p-n, οι διόδοι εκπομπής φωτός εξαρτώνται από το ρεύμα λειτουργίας τους και την τάση ορθής πόλωσης  $V_F$ . Η μόνη διαφορά είναι ότι ανάλογα με τους ημιαγωγούς που χρησιμοποιούνται και ανάλογα με το χρώμα της ακτινοβολίας τους, το σημείο αγωγιμότητάς τους ποικίλλει και είναι περίπου 1.2V για ένα κόκκινο LED και περίπου 3.6V για ένα μπλε LED.

Η ακριβής πτώση τάσης εξαρτάται αποκλειστικά από τον κατασκευαστή, λόγω των διαφορετικών υλικών προσμίξεως και τα μήκη κύματος που χρησιμοποιούνται. Η πτώση τάσης στα άκρα του LED σε μια συγκεκριμένη τιμή ρεύματος, για παράδειγμα 20mA, θα εξαρτηθεί επίσης από το σημείο αγωγιμότητάς του  $V_F$ . Οι χαρακτηριστικές του καμπύλες ρεύματος – τάσης ορθής πόλωσης για κάθε χρώμα φωτός φαίνονται στο διάγραμμα της εικόνας 9.



Εικόνα 9: Χαρακτηριστικές I-V σε σχέση με το χρώμα ακτινοβολίας ενός LED

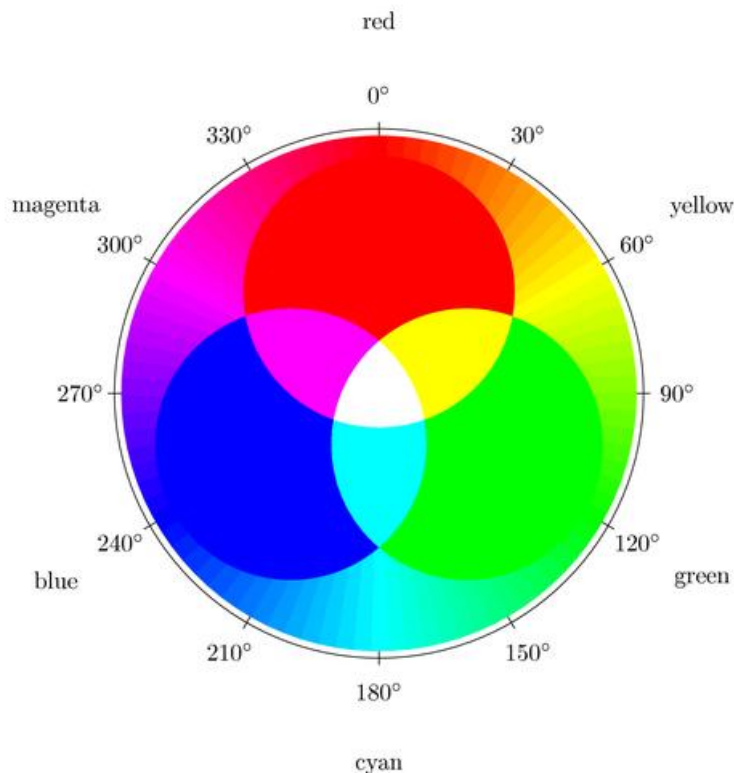
### 3.4. Μίξη χρωμάτων και προβλήματα

Τα LED χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά σε εφαρμογές φωτισμού, επειδή είχαν την δυνατότητα να δημιουργήσουν δυναμικά ένα ευρύ φάσμα χρωμάτων μέσω ενός και μόνο λαμπτήρα, μεταβάλλοντας την έξοδο των διαφορετικών χρωμάτων και την ανάμειξη του παραγόμενου χρωματιστού φωτός [15]. Με βάση την αρχή της προσθετικής ανάμειξης χρωμάτων, το φως από ένα κόκκινο, πράσινο και μπλε LED μπορούν να αναμιχθούν μαζί για να δημιουργήσουν μια ολόκληρη γκάμα χρωμάτων μεταβάλλοντας την ένταση του φωτός από κάθε ένα από αυτά. Πριν από τα LED, θα μπορούσαν να γίνουν αλλαγές στο χρώμα, είτε με χρήση δυναμικών (μηχανικών) φίλτρων χρώματος ή με χρήση λαμπτήρων φθορισμού τριών χρωμάτων (κόκκινο, πράσινο και μπλε). Τα LED αυτή τη στιγμή είναι η πρώτη επιλογή στην περίπτωση των εφαρμογών φωτισμού όπου απαιτείται αλλαγή χρώματος, για τους ακόλουθους λόγους:

- Σε σύγκριση με άλλους τύπους λαμπτήρων το χρωματιστό φως που εκπέμπεται από τα LED είναι πολύ πιο κορεσμένο.
- Σε χρήσεις dimmer οι σημαντικές διαφορές όσον αφορά το χρώμα του φωτός που μπορεί να παρατηρηθούν για τους περισσότερους τύπους λαμπτήρων, δεν

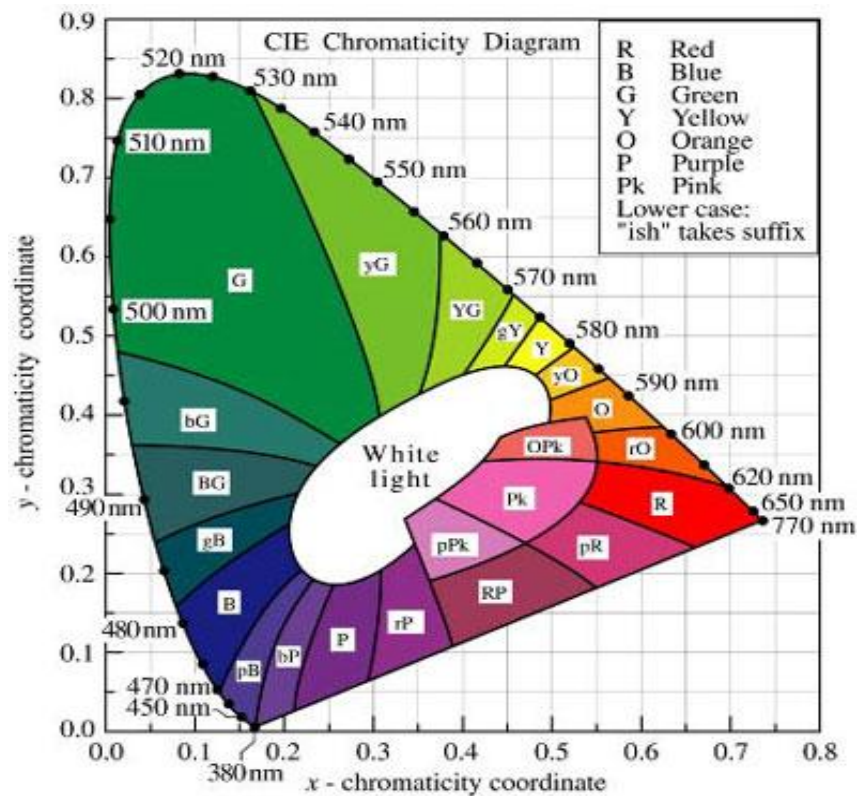
εμφανίζεται στην περίπτωση των LED, τα οποία μπορούν να ρυθμιστούν πλήρως, χωρίς αλλαγή στο χρώμα του φωτός που εκπέμπεται.

- Σε αντίθεση με ορισμένους λαμπτήρες εκκένωσης, τα LED όταν ενεργοποιούνται, παρέχουν το 100% του φωτός αμέσως και ως εκ τούτου το επιθυμητό χρώμα επιτυγχάνεται τη στιγμή της ενεργοποίησης.
- Τα κινούμενα μέρη που απαιτούνται για την αλλαγή του χρώματος και την εξασθένιση των πηγών εκκένωσης εισάγουν επιπρόσθετη απαίτηση αξιοπιστίας και συντήρησης, χαρακτηριστικά που αποφεύγονται με τη χρήση LED.
- Το φάσμα του φωτός που εκπέμπεται από ορισμένα LED μπορεί να προσαρμοστεί για συγκεκριμένες εφαρμογές. Για παράδειγμα, όταν ο φωτισμός των προϊόντων κρέατος γίνεται με LED, η φασματική έξοδος του φωτός μπορεί να περιέχει επιπλέον κόκκινη συνιστώσα για να ενισχύσει το χρώμα του κρέατος.
- Εάν χρησιμοποιείται σύστημα RGB, το ίδιο σύστημα μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή λευκού φωτός, διευρύνοντας έτσι το φάσμα των εφαρμογών.



Εικόνα 10: Μίξη χρωμάτων RGB

Στα LED υπάρχουν δύο βασικοί τύποι συστημάτων ανάμιξης χρωμάτων, το RGB σύστημα (κόκκινο, πράσινο, μπλε) και το AWB σύστημα (πορτοκαλί, λευκό, μπλε). Όπως απεικονίζεται στην εικόνα 10, το φως από ένα κόκκινο, πράσινο και μπλε LED μπορούν να αναμιχθούν μαζί για να δημιουργήσουν πολλά χρώματα (συμπεριλαμβανομένου του λευκού) [16]. Ο αριθμός των πιθανών χρωμάτων που μπορούν να παραχθούν προσδιορίζεται με γραφική παράσταση των σημείων των χρωμάτων κόκκινο, πράσινο και μπλε LEDs στο διάγραμμα CIE (Εικ. 11). Η περιοχή του τριγώνου που σχηματίζεται επεξηγεί τα διάφορα χρώματα που είναι δυνατόν να δημιουργηθούν. Στην περίπτωση του RGB συστήματος ανάμιξης χρωμάτων, το έγχρωμο φως μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να δημιουργήσει θεατρικές σκηνές φωτισμού, χρωματισμένες σκηνές περιβάλλοντος ή να ενισχύσει τα φυσικά χρώματα των υλικών.



Εικόνα 11: Διάγραμμα CIE

Το σύστημα AWB ανάμιξης χρωμάτων χρησιμοποιείται για να ληφθούν διάφορες αποχρώσεις του λευκού φωτός. Με άλλα λόγια, με τη χρήση αυτού του συστήματος μπορούμε να μεταβάλλουμε τη θερμοκρασία χρώματος του φωτός που λαμβάνεται. Οι αυξήσεις της θερμοκρασίας χρώματος με την αύξηση του ρεύματος (και ως εκ τούτου την αύξηση της ροής) μέσω του μπλε LED και η χαμηλότερη θερμοκρασία

χρώματος επιτυγχάνεται με την αύξηση της εξόδου φωτός του πορτοκαλί LED. Στην περίπτωση χρώματος μέσω ανάμιξης AWB του αποτελέσμα μπορεί να είναι αρκετά λεπτό, αλλά αυτό είναι κάτι που οι σχεδιαστές βρίσκουν πολύ χρήσιμο για να τροποποιήσουν τη διάθεση και την αντίληψη του χρώματος των υλικών.

Ωστόσο, όταν ένα αντικείμενο φωτίζεται από μια πηγή RGB LED, μπορούν να παρατηρηθούν δύο διαφορετικά οπτικά αποτελέσματα που προκαλούνται από τεχνολογικούς περιορισμούς. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για τα LED spot RGB που συχνά χρησιμοποιούνται για το φωτισμό έμφασης (accent lighting).

1. Εάν το αντικείμενο που φωτίζεται, τοποθετηθεί αρκετά κοντά στην πηγή φωτός RGB, τότε πάνω στο αντικείμενο μπορεί να παρατηρηθεί ένα έγχρωμο αποτύπωμα της ίδιας φωτεινής πηγής (Εικ.12).
2. Ανησυχητικές έγχρωμες σκιές μπορεί μερικές φορές να παρατηρηθούν πίσω από το αντικείμενο (Εικ. 13).



Εικόνα 12: Έγχρωμο αποτύπωμα της πηγής σε αντικείμενο που βρίσκεται κοντά της



Εικόνα 13: Έγχρωμες σκιές που σχηματίζονται πίσω από το αντικείμενο

Μερικές φορές αυτές οι επιδράσεις μπορεί να είναι δραματικές και χρήσιμες, αλλά τις περισσότερες φορές είναι ανεπιθύμητες. Ο σωστός σχεδιασμός ενός φωτιστικού μπορεί να μετριάσει αυτά τα οπτικά αποτελέσματα με ανάμιξη του φωτός εντός του φωτιστικού και στη συνέχεια, η επιθυμητή κατανομή φωτός να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας ένα φακό ή ένα κατευθυντήρα. Η βελτίωση μπορεί να παρατηρηθεί άμεσα από τις εικόνες 14 & 15 που φαίνονται παρακάτω.



Εικόνα 14: Απλή χρωματική αποτύπωση της φωτεινής πηγής



Εικόνα 15: Ανυπαρξία έγχρωμων σκιών πίσω από το αντικείμενο

### 3.5. Λευκό LED

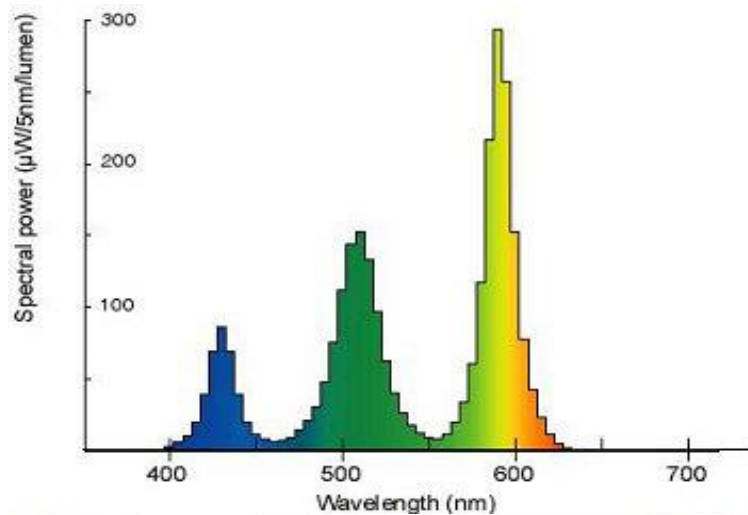
Μέχρι στιγμής έχουμε μιλήσει μόνο για χρωματιστά LED. Οι εξελίξεις στον τομέα της τεχνολογίας, ιδίως όσον αφορά τη φωτεινή απόδοση και την αποτελεσματικότητα, κατέστησαν τα LED λευκού φωτός ικανά να χρησιμοποιηθούν στη θέση των συμβατικών πηγών σε εφαρμογές που απαιτούν λευκό φως.

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι παραγωγής λευκού φωτός με LED:

#### 1. Σύστημα RGB

Έχουμε ήδη εξηγήσει πώς το φως από ένα κόκκινο, πράσινο και μπλε LED μπορούν να συνδυαστούν για να δημιουργήσουν λευκό φως. Το φάσμα μιας τέτοιας πηγής LED εμφανίζει κορυφές και κενά (Εικόνα 16) και ο δείκτης χρωματικής απόδοσης (Colour rendering index - CRI) μιας RGB πηγής λευκού φωτός είναι στην καλύτερη περίπτωση μέτρια.

- *Πλεονεκτήματα:* Ενδεχομένως υψηλότερη αποτελεσματικότητα, ζωντανά και κορεσμένα χρώματα (εάν δεν χρησιμοποιείται ως πηγή λευκού φωτός) και όταν χρησιμοποιείται ως πηγή λευκού φωτός, η καλύτερη απόδοση χρώματος / θερμοκρασίας του λευκού φωτός μπορεί να συντονιστεί.
- *Μειονεκτήματα:* Χρωματιστές σκιές πίσω από το αντικείμενο, μέτρια χρωματική απόδοση, απαιτείται περίπλοκο σύστημα οδήγησης όταν χρησιμοποιείται ως πηγή λευκού φωτός.

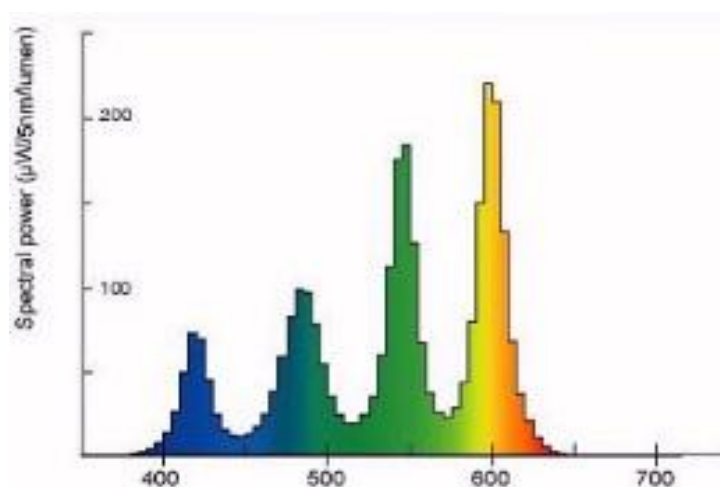


Εικόνα 16: Διάγραμμα διάχυσης φωτός του λευκού RGB LED

## 2. Σύστημα RGBA

Σε ένα σύστημα RGBA, ένα πορτοκαλί LED προστίθεται στο σύστημα RGB. Αυτό επιτρέπει τον καλύτερο έλεγχο της θερμοκρασίας χρώματος του λευκού φωτός που παράγεται, καθώς και ένα υψηλότερο CRI (της τάξης του 80-90). Το CRI εξαρτάται από το κεντρικό μήκος κύματος και το φασματικό πλάτος των LED που περιέχονται εντός της πηγής RGBA. Η φασματική έξοδος ενός τυπικού συστήματος RGBA φαίνεται στην εικόνα 17. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι το φάσμα είναι πιο καλά εξαπλωμένο και έχει λιγότερα κενά σε σχέση με το φάσμα των LED RGB.

- *Πλεονεκτήματα:* Καλύτερη CRI σε σύγκριση με το σύστημα RGB, καλύτερο έλεγχο της θερμοκρασίας χρώματος στην περίπτωση του λευκού φωτός.
- *Μειονεκτήματα:* Το ίδιο με εκείνο του συστήματος RGB

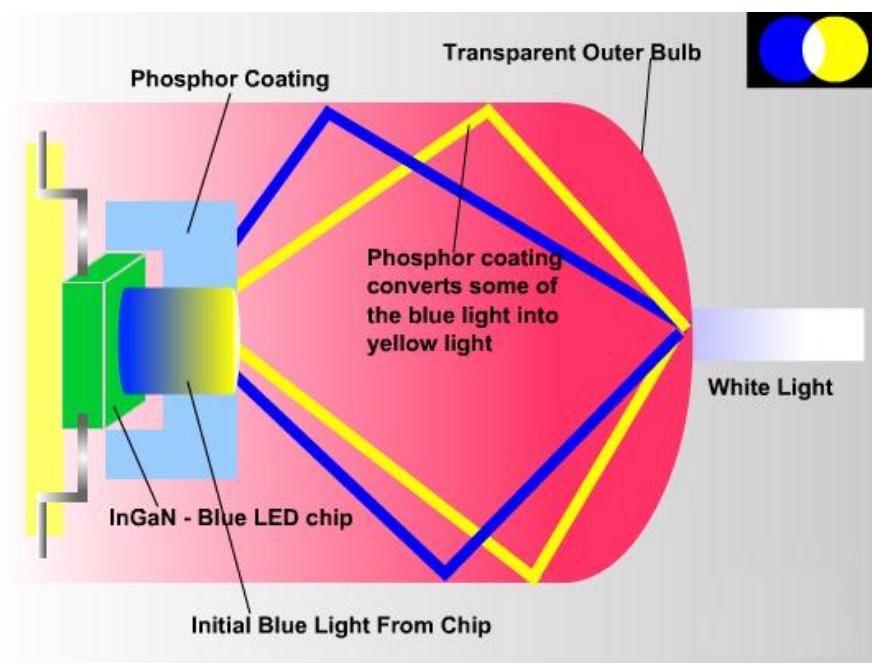


Εικόνα 17: Διάγραμμα διάχυσης φωτός του λευκού RGBA LED

### 3. Μπλε LED με ένα επίχρισμα φωσφόρου – LED Ψυχρού λευκού φωτός

Η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιεί ένα InGaN LED για να δημιουργήσει το μπλε φως. Η επιφάνεια εξόδου του φωτός του μπλε LED είναι επικαλυμμένο με φώσφορο. Αυτή η επίστρωση φωσφόρου μετατρέπει μέρος του μπλε φωτός σε κίτρινο φως. Το μπλε και το κίτρινο φως στη συνέχεια συνδυάζονται για να σχηματίσουν «λευκό φως» (Εικ.18). Αυτή είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνολογία για την κατασκευή λευκών LED και το λευκό φως που εκπέμπεται έτσι έχει μια σχετικά “ψυχρή” θερμοκρασία χρώματος ( $CCT > 5500K$ ).

- *Πλεονεκτήματα:* Υψηλή αποτελεσματικότητα (στο εργαστήριο μπορεί να μετρηθεί πάνω από 100 lm/W), λιγότερο ακριβό για την παραγωγή σε σύγκριση με τα θερμά λευκά LED
- *Μειονεκτήματα:* Μέτρια CRI ( $> 70$ )



Εικόνα 18: Δημιουργία λευκού LED από chip κυανού LED και κίτρινου φωσφόρου

### 4. LED Θερμού λευκού φωτός

Με την εφαρμογή μεγαλύτερης φωσφορίζουσας επιφάνειας που μετατρέπει μέρος του μπλε φωτός σε κόκκινο, μια σειρά από θερμότερα λευκά μπορεί να επιτευχθεί μέχρι 2700K και κάτω. Η εικόνα 19 δείχνει τη διαφορά μεταξύ του τυπικού θερμού και ψυχρού λευκού LED.

- *Πλεονεκτήματα:* Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εξοικονόμηση ενέργειας, μεγάλη διάρκεια ζωής για τα αλογόνα, καλό CRI ( $> 90$ ), επιτρέπει την χρήση

LED σε εφαρμογές όπου το ψυχρό λευκό δεν είναι κατάλληλο ή επιθυμητό (π.χ. σε ένα οικιακό περιβάλλον)

- *Μειονεκτήματα:* Η απόδοση είναι χαμηλότερη σε σύγκριση με το LED ψυχρού λευκού φωτός, ωστόσο, οι εξελίξεις στην τεχνολογία έχουν κλείσει αυτή την ψαλίδα σημαντικά τα τελευταία χρόνια.

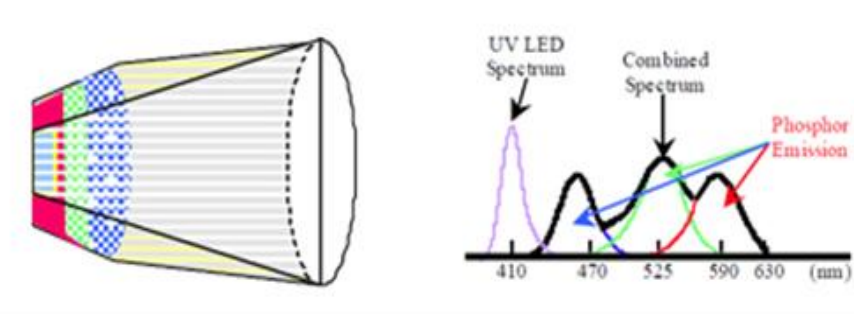


Εικόνα 19: Θερμός και ψυχρός λευκός φωτισμός LED

## 5. UV LED με RGB φώσφορο

Λευκό LED μπορεί επίσης να δημιουργηθεί από ένα LED εκπομπής UV με επικάλυψη τριών διαφορετικών φωσφορίζουσών επιφανειών ικανών να εκπέμπουν κόκκινο, πράσινο και μπλε φως αντίστοιχα (Εικ.20). Η αρχή λειτουργίας είναι ανάλογη με εκείνη των λαμπτήρων φθορισμού. Το λευκό φως που παράγεται με αυτόν τον τρόπο έχει εξαιρετική απόδοση χρωμάτων.

- *Πλεονεκτήματα:* άριστη απόδοση των χρωμάτων, αφού το λευκό καθορίζεται μόνο από τις φωσφορίζουσες επιφάνειες, δεν υπάρχει καμία αλλαγή στη θερμοκρασία χρώματος που να οφείλεται σε αλλαγή στο ρεύμα της διόδου.
- *Μειονεκτήματα:* Το υπεριώδες φως διασπά πολλά υλικά που χρησιμοποιούνται στη συσκευασία του LED, συμπεριλαμβανομένων των εποξικών και ως εκ τούτου η διάρκεια ζωής του λαμπτήρα είναι μικρότερη. Αυτή η μέθοδος είναι λιγότερο αποδοτική από το LED ψυχρού λευκού φωτός. Είναι κατανοητό ότι ένα ελαττωματικό LED θα μπορούσε ενδεχομένως να εκπέμψει την υπεριώδη ακτινοβολία στην ατμόσφαιρα σε επίπεδα που να υπερβαίνουν τα ασφαλή όρια.



Εικόνα 20: UV LED και RGB φωσφορίζουσες επιφάνειες

### 3.6. Κατηγοριοποίηση λαμπτήρων LED

Κατά τη διάρκεια της παραγωγής, τα LED συνήθως ποικίλουν στο χρώμα, το ρεύμα και την τάση ορθής πόλωσης και αυτό ισχύει ακόμα και για τα προϊόντα της ίδιας παρτίδας. Οι διαφορές είναι σημαντικές και, συνεπώς, τα LED μετρώνται και παραδίδονται στην αγορά σε κατηγορίες και αυτή η διαδικασία διαχωρισμού τους ονομάζεται κατηγοριοποίηση (binning). Έτσι, μια συγκεκριμένη κατηγορία μπορεί να περιέχει LED τα οποία έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά και που μπορεί να εφαρμοστεί με ασφάλεια στην κατασκευή λαμπτήρων LED. Για παράδειγμα, μια κατηγορία μπορεί να περιέχει μόνο LED που εκπέμπουν στην περιοχή μήκους κύματος από 587 έως 584,5 nm (δηλαδή μια γκάμα της τάξης των 2,5 nm, εξασφαλίζοντας έτσι τη συνοχή χρώμα), που εκπέμπουν φωτεινότητα στην περιοχή από 6.3 έως 8.2 lm και τάση ορθής πόλωσης στην περιοχή από 2,31 έως 2,55 βολτ (εξασφαλίζοντας έτσι ότι αν συνδέονται ηλεκτρικά, η εφαρμοζόμενη τάση δεν θα καταστρέψει κανένα LED).

Ο πίνακας που ακολουθεί παρουσιάζει κυανά LED κατηγοριοποιημένα βάσει του κυρίαρχου μήκους κύματος εκπομπής τους για σταθερότητα χρώματος.

Bin code	Minimum Dominant Wavelength (nm)	Maximum Dominant Wavelength (nm)
1	490	495
2	495	500
3	500	505
4	505	510
5	510	515
6	515	520

Η κατηγοριοποίηση είναι απαραίτητη για τις περισσότερες, αν όχι για όλες τις εφαρμογές των LED. Για παράδειγμα, λόγω της κατηγοριοποίησης είναι δυνατή η δημιουργία ενός φωτεινού σηματοδότη με το συγκεκριμένο χρώμα που απαιτείται για

να πληρείται το ευρωπαϊκό πρότυπο (EN12368 - Πρότυπο για τον εξοπλισμό του ελέγχου της κυκλοφορίας). Στην περίπτωση της κατασκευής προϊόντων λαμπτήρων LED υψηλής ποιότητας, η κατάλληλη κατηγοριοποίηση θα εξασφαλίσει την συνοχή της φωτεινότητας και του χρώματος σε όλους τους λαμπτήρες.

Τα λευκά LED κατηγοριοποιούνται με βάση την Συσχετισμένη Θερμοκρασία χρώματος (Correlated Colour Temperature - CCT) και με τις συντεταγμένες x, y που ορίζουν τα LED στο διάγραμμα CIE. Όπως γνωρίζουμε, οι συντεταγμένες x, y ορίζουν το σημείο χρώματος για κάθε πηγή φωτός στο διάγραμμα CIE. Η απαίτηση και των δύο χαρακτηριστικών οφείλεται στο γεγονός ότι, ακόμη και λευκά LED με περίπου την ίδια CCT μπορεί να έχουν διαφορετική χροιά χρώματος. Μια τυπική κατηγοριοποίηση για ένα λευκό LED μπορεί να μοιάζει ως εξής:

Bin Code	X	Y	Typical CCT (K)
U0	0.362	0.372	4750
	0.360	0.357	
	0.344	0.344	
	0.346	0.356	

Σε αυτό το παράδειγμα, η κατηγορία U0 μπορεί να περιέχει μόνο LED που έχουν μια συσχετισμένη θερμοκρασία χρώματος 4750 K. Ωστόσο, το σημείο χρώματος των LED μπορεί να βρίσκεται σε οποιαδήποτε από τις τέσσερις συντεταγμένες X, Y που αναφέρονται παραπάνω.

Δεδομένου ότι η ποιότητα των LED βελτιώνεται με την πρόοδο της τεχνολογίας και της κατασκευής, οι απαιτήσεις, τα κριτήρια και πρότυπα της κατηγοριοποίησης θα ανανεώνονται συνεχώς ώστε να εξασφαλιστεί ο έλεγχος ποιότητας σύμφωνα με αυτές τις βελτιώσεις.

### 3.7. Από το chip στον λαμπτήρα

Στην σύγχρονη τεχνολογία LED, η δίοδος επαφής p-n μετατρέπεται σε chip που εκπέμπει φως. Στη συνέχεια, το chip αυτό συσκευάζεται στο ίδιο κάλυμμα μαζί με ένα φακό και μερικές φορές με μια ψύκτρα για να δημιουργηθεί έτσι η λάμπα LED. Η λάμπα LED μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί σε διάφορα επίπεδα, μερικές φορές να ομαδοποιηθεί σε 10άδες ή σε 1000άδες, ανάλογα με την εφαρμογή όπου

χρησιμοποιείται. Τα επίπεδα στα οποία ένα LED μπορεί να υπάρχει είναι τα εξής (Εικ.21):

- *Επίπεδο 0:* Στην πιο απλή μορφή τους τα LED υφίστανται ως chip, τα οποία όταν συνδεθούν ηλεκτρικά εκπέμπουν φως. Το chip αποτελείται μόνο από την δίοδο, χωρίς εξωτερικό προστατευτικό κάλυμμα, ηλεκτρικά καλώδια, φακό, κλπ. Αυτή είναι η βάση για κάθε λαμπτήρα LED και κατασκευάζονται σε σύνθετο εξοπλισμό παραγωγής πλακιδίων. Η σημασία της διαδικασίας και των παραμέτρων του είναι υψίστης σημασίας καθώς καθορίζει το μήκος κύματος (χρώμα) και τις ηλεκτρικές ιδιότητες του chip.
- *Επίπεδο 1:* Σε αυτό το επίπεδο, το chip έχει μετατραπεί σε μια λάμπα LED. Το chip εδώ συσκευάζεται μαζί με φακό, ψύκτρα, κάλυμμα, κλπ. Εδώ καθορίζονται οι θερμικές και οπτικές ιδιότητες του LED.
- *Επίπεδο 2:* Ένα ή αρκετά LED συνδέονται μεταξύ τους σε μια πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος (PCB) με driver. Το PCB ενεργεί ενίοτε ως διαπαφή μεταξύ του driver και της ψύκτρας.
- *Επίπεδο 3:* Οι μονάδες LED περιέχουν τα PCB των LED όπως έχουν διαμορφωθεί στο προηγούμενο επίπεδο. Ένα παράδειγμα χρήσης μονάδων LED είναι ένα από τα χρώματα φωτεινού σηματοδότη κυκλοφορίας (κόκκινο, πορτοκαλί ή πράσινο). Όταν τρεις τέτοιες μονάδες LED συσκευαστούν μαζί τότε παίρνουμε στο επίπεδο 4 όπου νοείται το φωτιστικό LED.
- *Επίπεδο 4:* Ένα φωτιστικό LED μπορεί να συνδεθεί άμεσα με την τάση του δικτύου και μπορεί να εγκατασταθεί όπως και κάθε άλλο φωτιστικό, με την μόνη ιδιαιτερότητα την απαίτηση ύπαρξης ενός ακόμα driver.



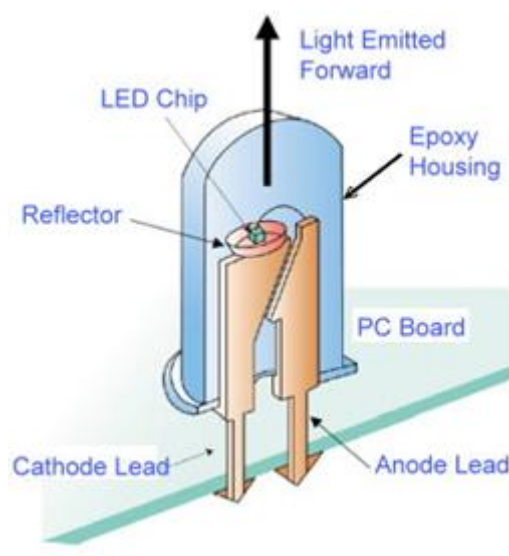
Εικόνα 21: Επίπεδα LED

### 3.8. Είδη και κατασκευή LED

Αυτή την στιγμή κατασκευάζονται τρία βασικά είδη LED:

#### 1. Το συμβατικό ημισφαιρικό LED 5 mm μολύβδινου πλαισίου

Το συμβατικό ημισφαιρικό LED 5 mm μολύβδινου πλαισίου, που απεικονίζεται στην εικόνα 22 χρησιμοποιείται συνήθως ως μια ενδεικτική λυχνία στις ηλεκτρονικές συσκευές. Το εξωτερικό περίβλημα της επαφής p-n των LED αυτών περιέχει εποξειδικές ρητίνες, ενώ εσωτερικά διαθέτουν φακούς κυλινδρικής και ορθογώνιας γεωμετρίας. Η μήτρα στερεώνεται σε ένα κωνικό κύπελλο ανακλαστήρα που κολλιέται στη μολύβδινη καθόδου ενώ η άνοδος είναι συνδεδεμένη με την μήτρα με ένα σύρμα συγκόλλησης. Το φως που εξέρχεται από τις πλευρές του LED αντανακλάται από το κύπελλο μέσα στο εποξικό σώμα. Ένα επίπεδο χυτό μέσα στη βάση του εποξικού θόλου χρησιμεύει ως δείκτης της πολικότητας του μολύβδου.



Εικόνα 22: Συμβατικό ημισφαιρικό LED 5 mm

Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα μιας τέτοιας κατασκευής είναι τα ακόλουθα:

- Η απλή κατασκευή του και το γεγονός ότι το εποξικό περίβλημα λειτουργεί ως φακός, μειώνουν το κόστος παραγωγής.
- Η παραγόμενη θερμότητα στο chip θα πρέπει να “ταξιδέψει” μέσω της οπής της καθόδου και της κόλλησης πράγμα που σημαίνει ότι δυσκολεύεται στο να απεγκλωβιστεί από τη συσκευασία. Ο εγκλωβισμός αυτός της θερμότητας μειώνει την ενεργειακή απόδοση του LED 5 χιλιοστών.

- Τα εποξικά υλικά που χρησιμοποιούνται είναι ευαίσθητα στο μπλε φως, δηλαδή αλλοιώνονται κάτω από έντονο μπλε φως. Αυτό μειώνει τη διάρκεια ζωής τόσο των μπλε όσο και των λευκών LED.
- Εκτός από το μπλε φως, το εποξικό είναι επίσης ευαίσθητο σε υψηλές θερμοκρασίες και ως εκ τούτου δεν μπορεί να λειτουργήσει σε υψηλές θερμοκρασίες.

Τυπικά, τα ενδεικτικά LED αυτά περιέχουν μία μήτρα 0,25 έως 0,3 mm, ενώ η διάμετρος του φακού κυμαίνεται από 2 έως 10 mm. Διατίθενται σε διαμέτρημα των 3, 4 και 5 mm, έχουν ρεύμα λειτουργίας 20-50 mA και μπορούν να εκπέμψουν μέχρι 10 lm.

## **2. LED επιφανειακής στήριξης (SMD)**

Τα LED επιφανειακής στήριξης (Εικ. 23) παρέχουν παρόμοια απόδοση φωτός και μπορούν να χειριστούν παρόμοια ρεύματα με τα LED 5 χιλιοστών. Ωστόσο, έχουν ένα μεγάλο πλεονέκτημα ότι μπορούν να τοποθετηθούν σε PCB με στάνταρ εξοπλισμό αυτόματης τοποθέτησης και συγκόλλησης. Χρησιμοποιούνται για τον οπίσθιο φωτισμό (backlight) των οργάνων των αυτοκινήτων, των κινητών τηλεφώνων και των ηλεκτρολογίων, όπως επίσης και ως ενδεικτικές λυχνίες σε υπολογιστές.



Εικόνα 23: SMD LED

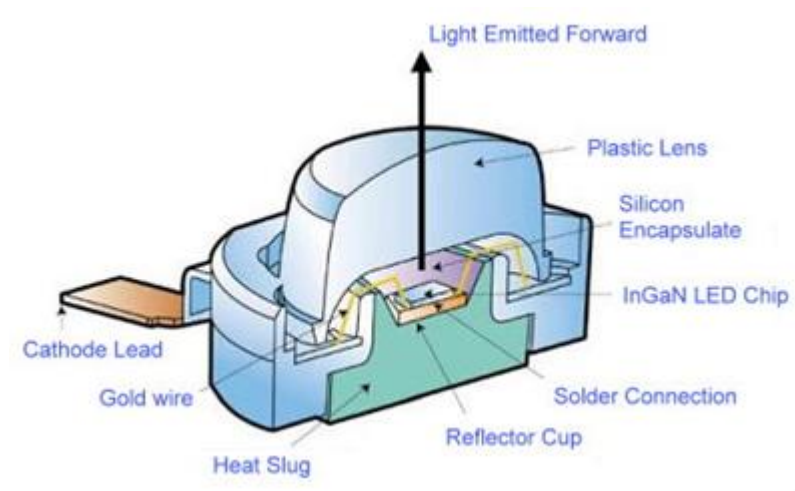
## **3. LED υψηλής ισχύος**

Κατασκευάζεται πάνω σε αλουμινένια ή χάλκινη ψύκτρα απαγωγής θερμότητας και μπορεί να συγκολληθεί επάνω σε τυπωμένο κύκλωμα για πιο αποτελεσματική απαγωγή της θερμότητας (Εικ. 24). Η μήτρα ενθυλακώνεται σε ένα προστατευτικό στρώμα σιλικόνης που έχει σχεδιαστεί για να απορροφά την ολική εσωτερική ανάκλαση των εκπεμπόμενων κυματικών μετώπων και να τα κατευθύνουν προς το

μεγαλύτερο πλαστικό φακό. Ένα χρυσό σύρμα χρησιμεύει για τη σύνδεση της μολύβδινη κάθοδο με τη μήτρα, η οποία είναι τοποθετημένη σε ένα chip πυριτίου για την προστασία από ηλεκτροστατικές εκκενώσεις. Η άνοδος ( που δεν φαίνεται στην εικόνα) έχει παρόμοια διαμόρφωση με την κάθοδο. Τα LED αυτού του τύπου είναι σήμερα η προτιμώμενη επιλογή για το φωτισμό σε μικροσκοπία φθορισμού.

Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα μιας τέτοιας κατασκευής είναι τα εξής:

- Λόγω της ψύκτρας μπορεί να χειριστεί πολύ περισσότερη ισχύ σε σύγκριση με τα LED 5 χιλιοστών.
- Επειδή ο φακός είναι κατασκευασμένο από πλαστικό, δεν είναι ευαίσθητος στο μπλε φως. Αυτό δίνει πολύ μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, συμπεριλαμβανομένων των LED μπλε και λευκού φωτός.
- Λόγω της πολύ αυξημένης ισχύος το μέγεθος της ψύκτρας και ο σχεδιασμός της είναι πολύ σημαντικά στοιχεία
- Λόγω της φύσης των προϊόντων αυτών απαιτούνται δευτερεύοντα οπτικά για τον έλεγχο του φωτός.

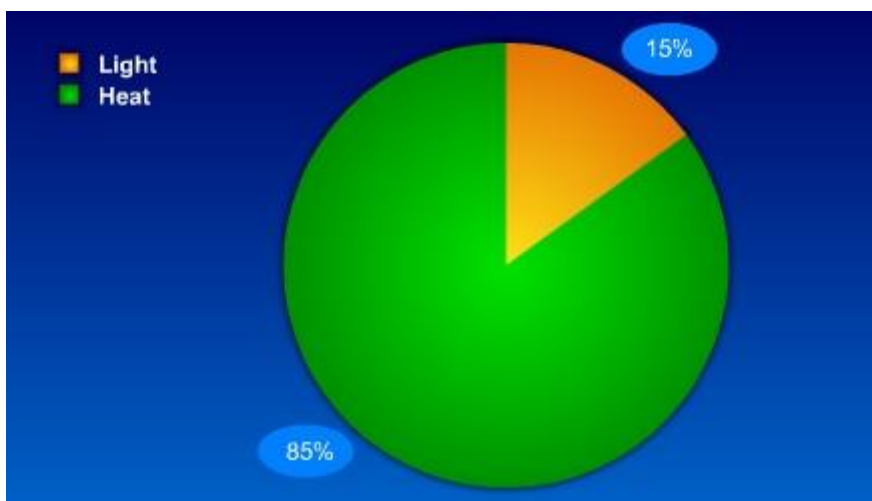


Εικόνα 24: LED υψηλής ισχύος

Όταν οδηγούνται από υψηλά ρεύματα ορθής πόλωσης (1000mA), τα LED αυτά είναι ικανά να παράγουν πάνω από 300 lm φωτεινότητας, για χαμηλότερες θερμοκρασίες χρώματος, ενώ ακόμη και σε υψηλότερες θερμοκρασίες χρώματος η φωτεινότητα μπορεί να φτάσει τα 200 lm.

### 3.9. Θερμότητα και διαχείρισή της

Έχουμε ήδη συζητήσει για το πως τα LED παράγουν φως. Ωστόσο, όταν ένα ηλεκτρόνιο συναντά μια οπή και πέφτει σε ένα χαμηλότερο επίπεδο ενέργειας, η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που εκπέμπεται λόγω αυτής της διαδικασίας δεν είναι πάντα το φως. Όντως, όπως μπορεί να φανεί από το διάγραμμα της εικόνας 25, σε ένα LED μόνο το 15% περίπου της ενέργειας εισόδου μετατρέπεται σε φως, ενώ το υπόλοιπο μετατρέπεται σε θερμότητα [17].



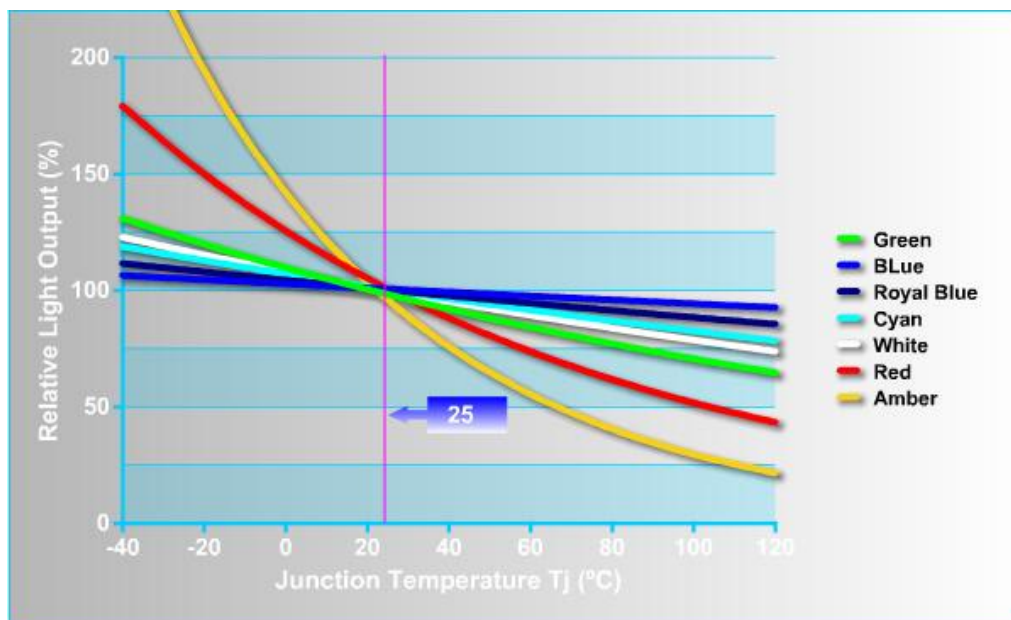
Εικόνα 25: Μετατροπή ενέργειας LED

Αυτή η μετατροπή της ενέργειας σε θερμότητα και φως γίνεται βέβαια στην επαφή p-n. Αν η υπερβολική θερμότητα που παράγεται σε μια λυχνία δεν διαχυθεί γρήγορα προς τα έξω, θα αυξήσει τη θερμοκρασία στην επαφή αυτή. Η απόδοση ενός LED μετριέται γενικά σε μία θερμοκρασία επαφής των 25 °C και μια αύξηση στη θερμοκρασία επαφής έχει δυσμενή επίδραση στη διάρκεια ζωής και την απόδοση του, ενώ, σε ορισμένες περιπτώσεις, μπορεί ακόμα και να βλάψει ή να καταστρέψει το LED. Ως εκ τούτου, το κύριο μέλημα κάθε κατασκευαστή LED είναι να διατηρηθεί η θερμοκρασία επαφής μέσω απαγωγής της θερμότητάς της προς το περιβάλλον. Αλλά εξετάσουμε το θέμα της διάχυσης της θερμότητας που παράγεται σε ένα LED, θα δούμε πρώτα τις αρνητικές επιπτώσεις της θερμότητας σχετικά με την απόδοση και τη διάρκεια ζωής των LED.

#### 3.9.1 Θερμοκρασιακή επίδραση στην φωτεινή απόδοση

Η απόδοση ενός LED μετριέται σε θερμοκρασία επαφής 25 °C (ιδανικές εργαστηριακές συνθήκες). Αλλά στην πράξη, τα LED λειτουργούν σε πολύ

υψηλότερη θερμοκρασία επαφής ( $T_j$ ) της τάξης των 60 °C με 80 °C. Αυτό σημαίνει ότι υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας, η έξοδος φωτεινής ροής του LED θα είναι πάντα χαμηλότερη από την ονομαστική του αξία. Όπως μπορεί να φανεί από το γράφημα της εικόνας 26, τα InGaN LED (μπλε, πράσινο, κυανό και λευκό) αντιμετωπίζουν καλύτερα το πρόβλημα αυτό, με την μείωση της φωτεινής απόδοσης να φτάνει το 5-20%, ενώ λειτουργεί σε θερμοκρασίες επαφής των 60-80 °C. Ωστόσο, τα AlInGaP LED (πορτοκαλί και κόκκινο) είναι πιο ευαίσθητα στις αλλαγές της θερμοκρασίας επαφής ( $T_j$ ) και σε θερμοκρασίες λειτουργίας από 60-80 °C, ένα κόκκινο LED παράγει 25% λιγότερο φως ενώ ένα πορτοκαλί LED παράγει 45% λιγότερο φως.



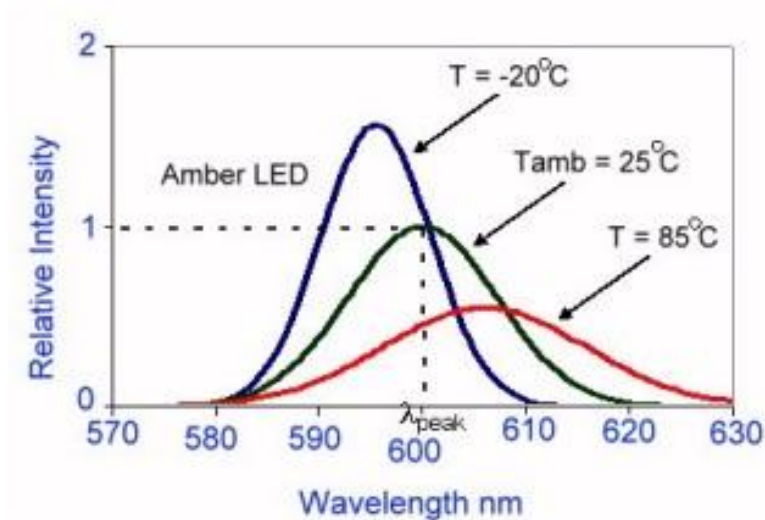
Εικόνα 26: Φωτεινή απόδοση LED σε σχέση με την θερμοκρασία επαφής

### 3.9.2 Θερμοκρασιακή επίδραση στο χρώμα

Το μήκος κύματος των LED μετατοπίζεται με την μεταβολή της θερμοκρασίας επαφής ( $T_j$ ). Η μετατόπιση του μήκους κύματος δεν είναι ορατή στο ανθρώπινο μάτι, εκτός από την περίπτωση του πορτοκαλί LED. Όπως μπορεί να φανεί από τον παρακάτω πίνακα και στο γράφημα της εικόνας 27, στην περίπτωση του πορτοκαλί LED, η ολίσθηση της βασικής συνιστώσας του μήκους κύματος ανά τη μεταβολή του βαθμού της θερμοκρασίας επαφής είναι τρεις φορές μεγαλύτερη από αυτή του κόκκινου LED και πάνω από το διπλάσιο από εκείνης του InGaN LED (μπλε, πράσινο και κυανό). Έτσι, σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας, εάν η  $T_j$  ενός πορτοκαλί LED φθάνει τους 85 °C, η μετατόπιση του μήκους κύματος της θα είναι

$[(85 - 25) \times 0,09] = 5,4$  ηΜ και η διαφορά αυτή μπορεί εύκολα να ανιχνευθεί από το ανθρώπινο μάτι. Παρά το γεγονός ότι το πρόβλημα αυτό δεν αφορά άλλα χρωματιστά LED, για ορισμένες εφαρμογές όπου τα πρότυπα πρέπει να πληρούνται αυστηρά (π.χ. χρώματα σε φωτεινούς σηματοδότες), θα πρέπει να λαμβάνεται μεγαλύτερη προσοχή ώστε να μην υπάρχει τέτοια ολίσθηση. Αυτό μπορεί να εξασφαλιστεί με αποτελεσματική θερμική διαχείριση, έτσι ώστε το LED να λειτουργεί σε μία θερμοκρασία επαφής που δεν θα προκαλέσει ολίσθηση του μήκους κύματος.

Colour	Shift in wavelength(nm/°C)
Amber	0.09
Red	0.03
Blue	0.04
Green	0.04
Cyan	0.04

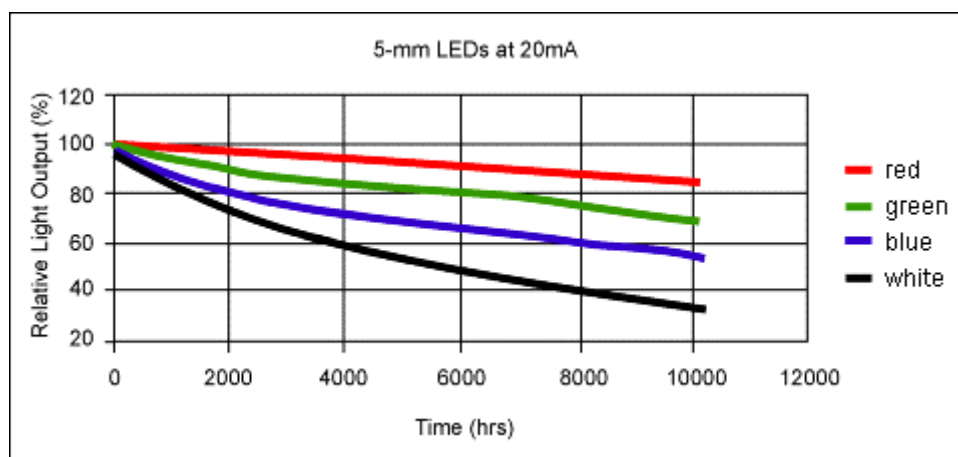


Εικόνα 27: Διάγραμμα θερμοκρασιακής επίδρασης στο χρώμα

### 3.9.3 Θερμοκρασιακή επίδραση στη διάρκεια ζωής

Οι συσκευές στερεάς κατάστασης, όπως τα LED, υπόκεινται σε πολύ περιορισμένη φθορά εάν λειτουργούν σε χαμηλές θερμοκρασίες επαφής. Πολλά από τα LEDs που κατασκευάστηκαν στη δεκαετία του 1970 και του 1980 είναι σε λειτουργία ακόμα και τώρα. Τυπικά, η διάρκεια ζωής τους κυμαίνεται από τις 25.000 έως τις 100.000 ώρες λειτουργίας, αλλά ρυθμίσεις στη θερμότητα μπορεί να παρατείνουν ή να συντομεύσουν σημαντικά το χρόνο αυτό [18]. Η διάρκεια ζωής ενός LED ορίζεται ως ο χρόνος κατά τον οποίο το LED εκπέμπει τουλάχιστον το 70% του αρχικού φωτός εξόδου του.

Το χρώμα ενός LED παίζει ρόλο στη διάρκεια ζωής του. Ημιαγωγοί διαφορετικών υλικών έχουν διαφορετικές ιδιότητες υποβάθμισης της λειτουργίας. Επιπρόσθετα, το φως μικρού μήκους κύματος τείνει να προκαλεί μεγαλύτερη υποβάθμιση λειτουργίας των εποξικών υλικών που χρησιμοποιούνται για την επικάλυψη της επαφής p-n (Εικ. 28) [19]. Οι λυχνίες LED θεωρείται ότι εκπέμπουν το 100% του φωτός εξόδου μόνο μετά από τις πρώτες 50 ώρες λειτουργίας.



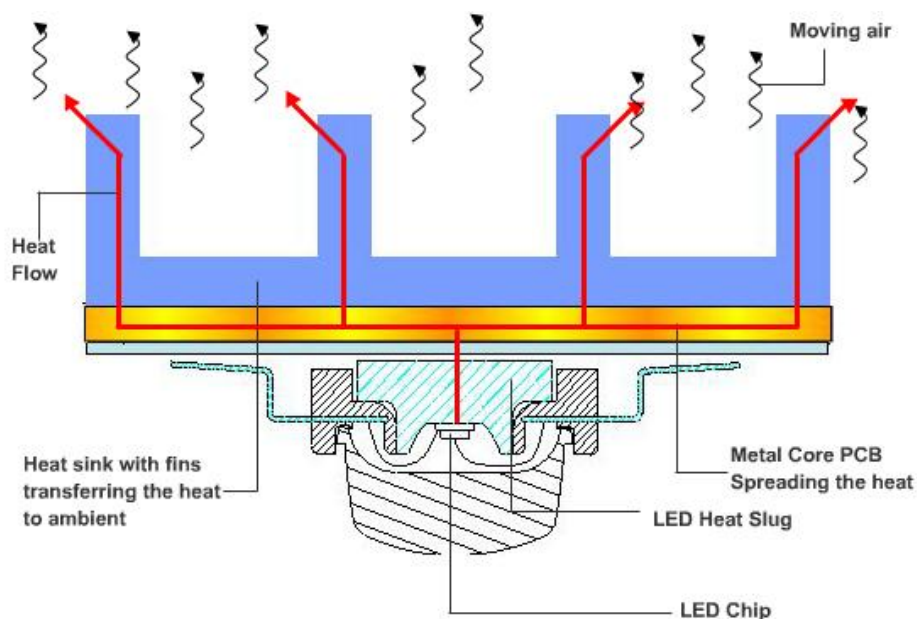
Εικόνα 28: Φωτεινή απόδοση διαφόρων χρωμάτων LED σε συνάρτηση με τις ώρες λειτουργίας τους

Με την ανάπτυξη των LED υψηλής ισχύος οι επαφές p-n τους μπορούν να αντέξουν σε υψηλότερες θερμοκρασίες από τις παραδοσιακές διόδους. Η υψηλή θερμοκρασία επαφής p-n μπορεί να προκαλέσει πρόωμη μείωση της φωτεινής εξόδου. Για την ποσοτική ταξινόμηση της ωφέλιμης διάρκειας ζωής με τυποποιημένο τρόπο έχει προταθεί η χρησιμοποίηση των όρων L70 και L50, ο οποίος είναι ο χρόνος που χρειάζεται ένα LED να πέσει στο 70% και στο 50% της εξόδου του αντίστοιχα [20].

### 3.9.4 Διαχείριση θερμότητας

Η θερμότητα που παράγεται (δηλαδή η αύξηση της θερμοκρασίας επαφής) έχει αρνητικές επιπτώσεις για την παράσταση και τη διάρκεια ζωής ενός LED. Έτσι, από τεχνική άποψη, θα συζητηθούν τα μέτρα που λαμβάνονται για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος. Βασικός στόχος είναι η απαγωγή της θερμότητας που παράγεται στην επαφή προς το περιβάλλον [21]. Τα LED ισχύος έχουν μια ενσωματωμένη ψύκτρα και ως εκ τούτου είναι θερμικά καλά σχεδιασμένα. Η ενσωματωμένη ψύκτρα απαγωγής θερμότητας στο εσωτερικό των LED μεταφέρει τη θερμότητα από τη επαφή προς την κάτω πλευρά του LED. Η κάτω πλευρά του LED

τοποθετείται σε PCB. Παρά το γεγονός ότι τα συμβατικά ηλεκτρονικά PCB είναι γενικά κατασκευασμένα από πλαστικό, στις περισσότερες εφαρμογές LED, χρησιμοποιείται ο λεγόμενος μεταλλικός πυρήνας PCB-MCPCB, για το απλό γεγονός ότι τα μέταλλα είναι καλύτεροι αγωγοί της θερμότητας από τα πλαστικά. Ο πυρήνας αυτός είναι ένας συνδυασμός ενός λεπτού PCB σε ένα φύλλο αλουμινίου. Μερικές φορές ο MCPCB έχει την μορφή εξαγωνικού αστεριού για καλύτερη απαγωγή της θερμότητας. Από τον MCPCB η θερμότητα μεταφέρεται σε μία εξωτερική ψύκτρα. Αυτή η ψύκτρα μπορεί να είναι αναπόσπαστο τμήμα του προϊόντος ή ένα αποσπώμενο κομμάτι αλουμινίου [22]. Η εξωτερική ψύκτρα θα μεταφέρει τελικά τη θερμότητα στο περιβάλλον μέσω της κίνησης του αέρα (Εικ. 29). Χωρίς αυτή την ψύκτρα, η λυχνία LED θα καταστραφεί μέσα σε λίγα λεπτά, λόγω της ραγδαίας αύξησης της θερμοκρασίας στην επαφή. Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι η ελεύθερη διέλευση του αέρα είναι ζωτικής σημασίας για τη μεταφορά της θερμότητας από τον απαγωγέα θερμότητας προς το περιβάλλον και ως εκ τούτου η ψύκτρα δεν πρέπει ποτέ να καλύπτεται.



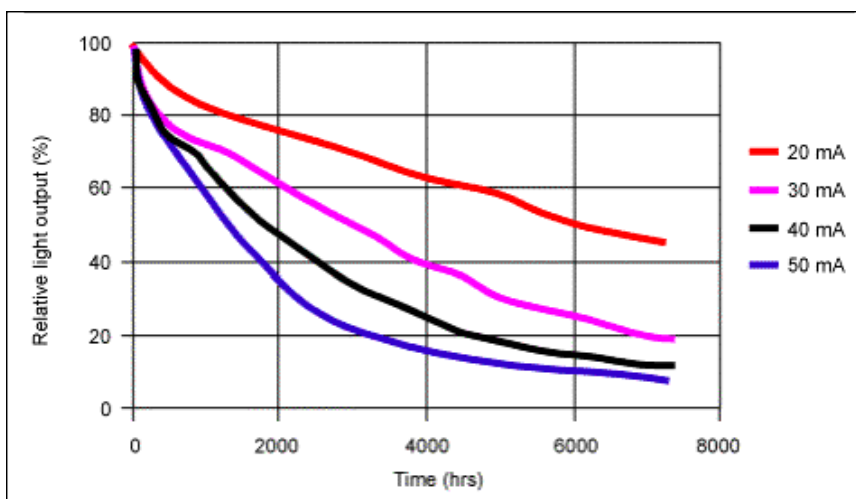
Εικόνα 29: Απαγωγή θερμότητας σε LED υψηλής ισχύος

### 3.10. Ηλεκτρική συμπεριφορά των LED

Τα LED είναι πολύ γρήγορες συσκευές. Η κατάσταση off-on είναι του εύρους των 20-100 nsec, έτσι ώστε αν υπάρχει μία μεταβολή στην τάση ορθής πόλωσης, ακόμη και για μικρότερο χρόνο, η διακύμανση του ρεύματος είναι τόσο μεγάλη που μπορεί

ενδεχομένως να βλάψει το LED. Ως εκ τούτου, τα LED πρέπει να οδηγούνται από μία πηγή ρεύματος. Μια πηγή ρεύματος οδηγεί το LED με σταθερό ρεύμα, ανεξάρτητο από την τάση ορθής πόλωσης. Κατά την ανάστροφη πόλωση, τα LED δεν άγουν, μέχρι η τάση στα άκρα τους να φτάσει την τιμή της τάσης διάσπασης. Ακόμα και σε αυτή την περίπτωση, το ανάστροφο ρεύμα παίρνει μεγάλες τιμές.

Καταλαβαίνουμε λοιπόν, ότι η πηγή ρεύματος οδήγησης είναι απαραίτητη για την οδήγησή τους με σταθερό ρεύμα, ανεξάρτητα της πόλωσής τους. Συνήθως οι drivers που χρησιμοποιούνται για την οδήγηση των LED έχουν όλους τους απαραίτητους προστατευτικούς μηχανισμούς για την προστασία τους έναντι των υψηλών ρευμάτων. Υψηλότερο ρεύμα λειτουργίας ενός LED από αυτό που δίνει ο κατασκευαστής επιταχύνει το ρυθμό μείωσης της αποδοτικότητας του λόγω της δημιουργίας υψηλότερων θερμοκρασιών στην επαφή p-n (Εικ.30).



Εικόνα 30: Φωτεινή απόδοση λευκού LED σε σχέση με το ρεύμα λειτουργίας του

### 3.11. Οπτικά χαρακτηριστικά των LED

Τα πολλά διαφορετικά είδη των LED παράγουν διαφορετικό διάγραμμα φωτεινής ακτινοβολίας. Για ορισμένες εφαρμογές, είναι απαραίτητη η ακριβής γνώση της γωνίας από την οποία εξαρτάται η κατανομή της ακτινοβολίας αυτής [23]. Τις περισσότερες φορές, τα LED είναι εξοπλισμένα με διαφορετικούς τύπους φακών για την επίτευξη ακτινοβολίας διαφορετικής γωνίας κατανομής. Δεδομένου ότι μια συγκεκριμένη εφαρμογή φωτισμού θα απαιτούσε συνήθως ένα ορισμένο είδος ακτινοβολίας, στην αγορά είναι διαθέσιμα προϊόντα με τρία τυποποιημένα διαφορετικά διαγράμματα ακτινοβολίας.

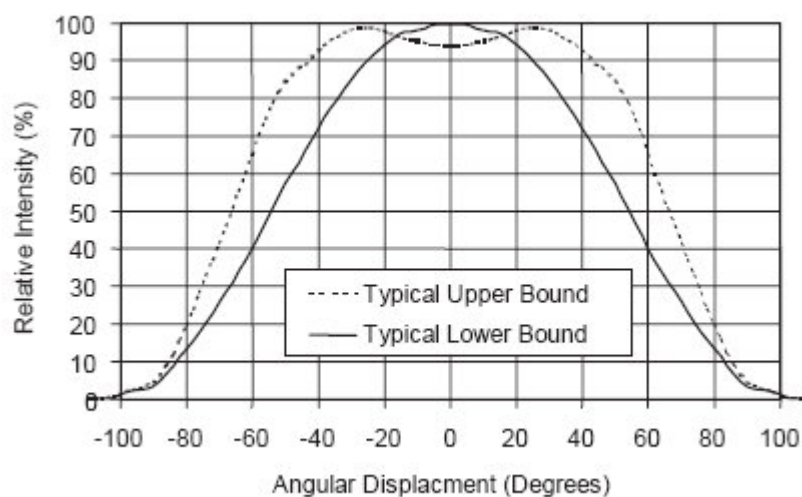
## 1. Διάγραμμα ακτινοβολίας Lambertian

Το μοτίβο του διαγράμματος ακτινοβολίας Lambertian επιτυγχάνεται με την ενθυλάκωση του chip σε ημισφαιρικό κάλυμμα (Εικ. 31).



Εικόνα 31: LED διαγράμματος ακτινοβολίας Lambertian

Στην εικόνα 32 απεικονίζεται το διάγραμμα ακτινοβολίας που επιτυγχάνεται με τον τρόπο αυτό. Όπως μπορεί να φανεί, η μέγιστη ένταση του φωτός επιτυγχάνεται στις  $0^\circ$  από τον άξονα του λαμπτήρα. Καθώς η γωνιακή μετατόπιση αυξάνει, η ένταση του φωτός πέφτει και περίπου στις  $80^\circ$ , από κάθε πλευρά του λαμπτήρα, η ένταση του φωτός είναι σχεδόν αμελητέα. Το διάγραμμα αυτό αποτελεί ένα παράδειγμα μιας σχεδόν τέλειας πηγής φωτός.

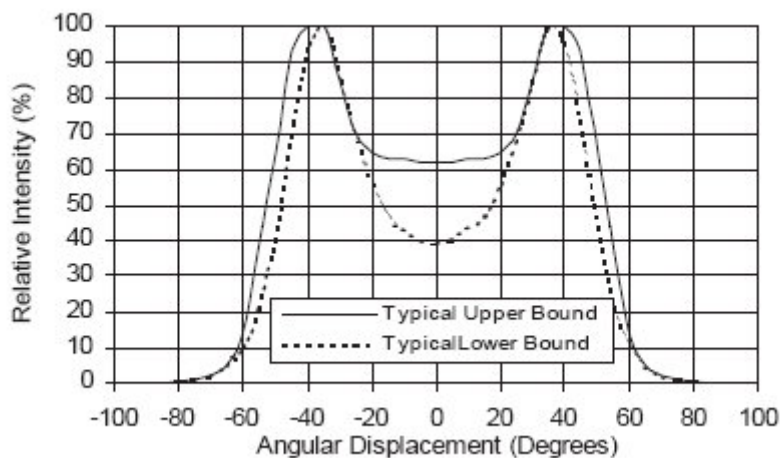


Εικόνα 32: Διάγραμμα ακτινοβολίας Lambertian

## 2. Διάγραμμα ακτινοβολίας Batwing

LED με διάγραμμα ακτινοβολίας Batwing (Εικ. 33) χρησιμοποιούνται σε φωτεινούς σηματοδότες κυκλοφορίας [24]. Η ένταση του φωτός είναι σχεδόν το ήμισυ της

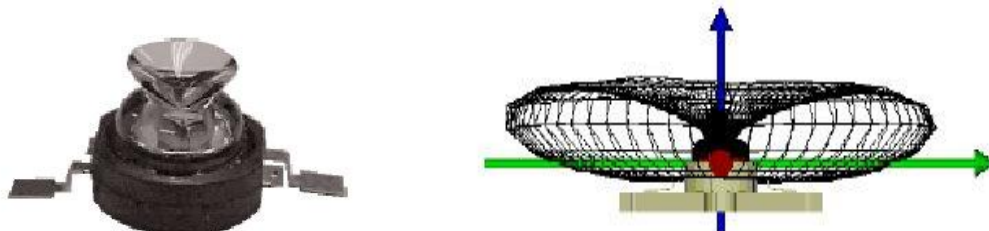
μέγιστης στο κέντρο του λαμπτήρα, ενώ το μέγιστο επιτυγχάνεται περίπου στις 55° εκατέρωθεν. Οποιαδήποτε αύξηση της γωνιακής μετατόπισης πάνω από τις 55°, συνοδεύεται από ταχεία πτώση της έντασης του φωτός. Το διάγραμμα αυτό προκαλεί τον ομοιόμορφο φωτισμό μιας επίπεδης επιφάνειας. Το φως που εκπέμπεται, συμπυκνώνεται σε ακτίνα περίπου στις 110° της συνολικής γωνίας. Το χαρακτηριστικό αυτό, καθιστά τα LED κατάλληλα για εφαρμογές όπου απαιτείται ομοιόμορφος φωτισμός μέσω ανακλαστήρα.



Εικόνα 33: Διάγραμμα ακτινοβολίας Batwing

### 3. Διάγραμμα ακτινοβολίας *Side-emitting*

Αυτό το διάγραμμα ακτινοβολίας είναι ειδικής μορφής. Στην εικόνα 34 απεικονίζονται LED που κατασκευάζονται για να εκπέμπουν με βάση αυτό το διάγραμμα καθώς και μια 3D απεικόνιση του λοβού ακτινοβολίας.

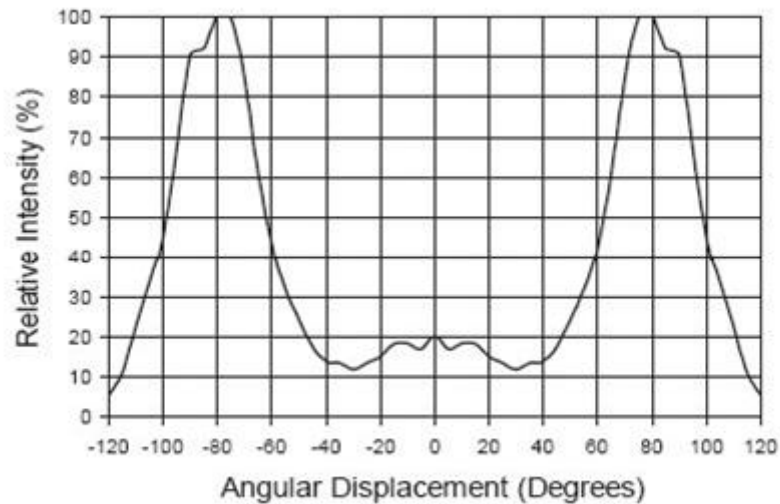


LED διαγράμματος ακτινοβολίας Side-Emitting

3D απεικόνιση της φωτεινής εξόδου

Εικόνα 34

Μπορεί να συγκριθεί με το διάγραμμα ακτινοβολίας ενός στατικού φάρου που ρίχνει το φως του με μορφή μικρής ακτίνας υπό γωνία  $360^\circ$ . Το διάγραμμα ακτινοβολίας (Εικ. 35) δείχνει ότι η ένταση του φωτός είναι μέγιστη περίπου στις  $75^\circ$  και πέφτει γρήγορα με την αύξηση ή την μείωση της γωνιακής μετατόπισης αυτής. Οι λαμπτήρες αυτού του είδους χρησιμοποιούνται συχνά ως οπίσθιος φωτισμός σε οθόνες LCD.



Εικόνα 35: Διάγραμμα ακτινοβολίας Side-Emitting

# Κεφάλαιο 4

## 4.1. Σύγκριση τεχνολογιών φωτισμού

Στο κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθούμε με την σύγκριση των διαφόρων τεχνολογιών του ηλεκτρικού φωτισμού ξεκινώντας από τα βασικά χαρακτηριστικά του καθενός, όπως είναι η απόδοση, η διάρκεια ζωής, το χρώμα και ο θόρυβος. Πολλοί καταναλωτές δεν επιλέγουν την εκάστοτε τεχνολογία με βάση τα χαρακτηριστικά της, αλλά με βάση οικονομικά κριτήρια. Για το λόγο αυτό, η επόμενη σύγκριση θα γίνει με βάση το κόστος της κάθε τεχνολογίας φωτισμού. Το κεφάλαιο θα κλείσει με μηχανοοικονομικές εκτιμήσεις του μελλοντικού κόστους του φωτισμού τόσο από εμπορικής όσο και καταναλωτικής μεριάς.

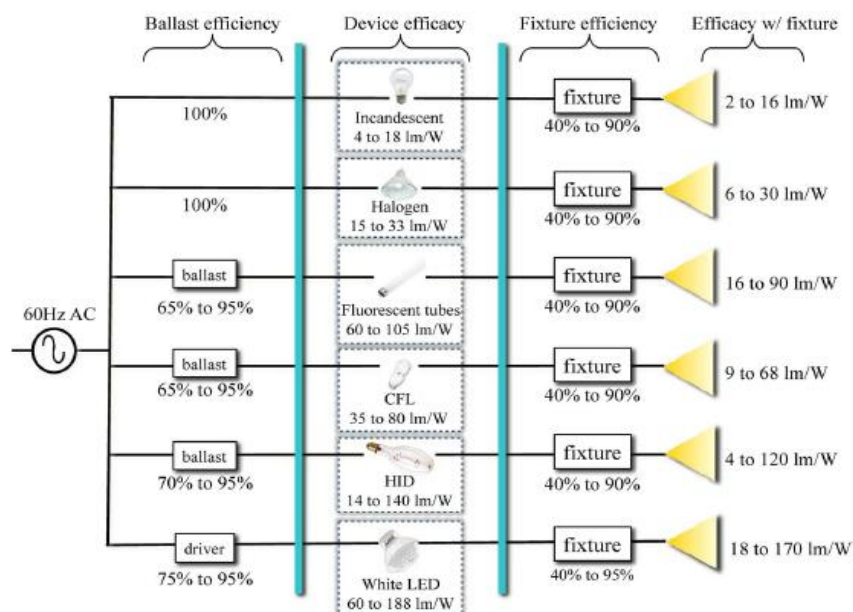
## 4.2. Απόδοση και διάρκεια ζωής

Η αποτελεσματικότητα με την οποία ένα σύστημα μετατρέπει μια μορφή ενέργειας σε κάποια άλλη επιθυμητή μορφή, μπορεί να προβεί χρήσιμο μέτρο σύγκρισης. Ωστόσο, η αποτελεσματικότητα από μόνη της δεν είναι το κύριο μέλημα των περισσότερων μεμονωμένων καταναλωτών ή της κοινωνίας στο σύνολό της. Οι καταναλωτές νοιάζονται περισσότερο για το κόστος και για μη εμπορικούς εξωγενείς παράγοντες όπως η ρύπανση του περιβάλλοντος και η ενεργειακή ασφάλεια. Στην περίπτωση του φωτισμού, ένα από τα χαρακτηριστικά που ενδιαφέρει σίγουρα είναι η ποιότητα του φωτός.

Είναι δεδομένο ότι για το μεγαλύτερο μέρος του περασμένου αιώνα, η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας είχε συνεχώς πτωτικές τάσεις. Υπήρχαν επίσης σχετικά χαμηλά επίπεδα ανησυχίας για τις τοπικές και παγκόσμιες περιβαλλοντικές επιπτώσεις της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Υπό αυτές τις συνθήκες, οι ιδιαίτερα ενεργοβόροι λαμπτήρες πυρακτώσεως ήταν μια απολύτως αποδεκτή πηγή φωτός. Σήμερα, καμία από τις προϋποθέσεις αυτές δεν εξακολουθούν να ισχύουν κάτι που έχει ως αποτέλεσμα την ανάγκη για βελτίωση της αποτελεσματικότητας με την οποία η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να μετατραπεί σε φως με ένα οικονομικά αποδοτικό τρόπο και με παράλληλη αποδεκτή ισορροπία χρώματος.

Όσον αφορά την αποτελεσματικότητα, είναι σημαντικό η σύγκριση των συστημάτων να γίνεται επί ίσοις όροις. Πάρα πολύ συχνά, η απόδοση ενός ολόκληρου συστήματος φωτισμού, το οποίο περιλαμβάνει τα ηλεκτρονικά μέρη, την πηγή, αλλά και τα φωτιστικά μέρη, σχετίζεται μόνο με την πηγή. Ως αποτελεσματικότητα ενός λαμπτήρα ορίζεται ως ο λόγος μεταξύ της φωτεινής ροής εξόδου προς την ηλεκτρική ισχύ εισόδου και δεν σχετίζεται με τις απώλειες που μπορεί να έχει το σύστημα εξαιτίας προβλημάτων των φωτιστικών μερών. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να ξεχωρίζεται η αποτελεσματικότητα ενός λαμπτήρα από την αποτελεσματικότητα του συστήματος, η οποία ορίζεται ως η συνολική αναλογία μεταξύ της φωτεινής ροής και της εισόδου της ηλεκτρικής ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων όμως και των απωλειών των φωτιστικών μερών. Η διάκριση μεταξύ της αποτελεσματικότητας ενός λαμπτήρα και του συστήματος είναι σαφώς σημαντική, δεδομένου ότι μια πηγή υψηλής αποτελεσματικότητας δεν αποτελεί πάντα ένδειξη της συνολικής αποτελεσματικότητας του συστήματος.

Η εικόνα 36 απεικονίζει το φάσμα των αποδόσεων των πηγών πυρακτώσεως, φθορισμού και LED. Οι αριθμοί της δεύτερης στήλης αναφέρουν το εύρος της αποτελεσματικότητας των λαμπτήρων. Οι αριθμοί στη τέταρτη στήλη αναφέρουν την συνολική αποτελεσματικότητα του συστήματος. Οι αριθμοί στην πρώτη και τρίτη στήλη αντιπροσωπεύουν την αποτελεσματικότητα του ballast ή του driver και του φωτιστικού αντίστοιχα.



Εικόνα 36: Σύγκριση αποδοτικότητας λαμπτήρων φωτισμού

Επειδή οι γυμνοί λαμπτήρες παράγουν έντονο φως αισθητικά δυσάρεστο, οι περισσότεροι τοποθετούνται σε μια ποικιλία φωτιστικών. Σε πειραματικές μελέτες που εκπονήθηκαν από την Color Kinetics Inc. [25], αξιολογήθηκαν μια σειρά από κοινά φωτιστικά και διαπιστώθηκε ότι οι σχετικές απώλειες φωτός κυμαίνονται περίπου από 10% έως και πάνω από 60%. Λόγω των απωλειών αυτών, οι τιμές αποτελεσματικότητας της τέταρτης στήλης της εικόνας 36, διαφέρουν από τις αντίστοιχες της δεύτερης και είναι ανεξάρτητες από τον τύπο του λαμπτήρα που χρησιμοποιείται. Παρόλα αυτά, όπως προκύπτει από την σύγκριση αυτή, οι λαμπτήρες LED έχουν μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα έναντι των άλλων τύπων λαμπτήρων.

Η έξοδος φωτός των περισσότερων πηγών μειώνεται κατά τη διάρκεια της ζωής τους. Αυτή η μείωση φωτεινότητας, ποικίλλει ανάλογα με την τεχνολογία και τα αποτελέσματα από διάφορους παράγοντες για την καθεμία. Στην περίπτωση των λαμπτήρων πυρακτώσεως, η μείωση της φωτεινότητας κυμαίνεται από 10% έως 15% της αρχικής εξόδου για διάρκεια λειτουργίας 1000 ωρών και είναι αποτέλεσμα κυρίως της αλλοίωσης των νημάτων βολφραμίου με την πάροδο του χρόνου και της συσσώρευσης των σωματιδίων βολφραμίου που εξατμίζονται στην εσωτερική επιφάνεια του λαμπτήρα. Οι λαμπτήρες φθορισμού παρουσιάζουν μείωση της φωτεινότητας λιγότερο από 20% για πάνω από 10000 ώρες λειτουργίας. Ωστόσο, η απόσβεση αυτή είναι γενικά μικρότερη από 10% στην περίπτωση των λαμπτήρων φθορισμού υψηλής ποιότητας που χρησιμοποιούν ειδικές επιστρώσεις φωσφορίζουσών επιφανειών [26]. Η μείωση φωτεινότητας στους λαμπτήρες φθορισμού προκύπτει από την μείωση του φωτοχημικού χαρακτηριστικού του επιχρίσματος φωσφόρου και του γυάλινου σωλήνα, καθώς και από την συσσώρευση σωματιδίων εντός του λαμπτήρα που απορροφούν την φωτεινή έξοδο. Στην περίπτωση των LED, όπως έχει αναφερθεί, η μείωση φωτεινότητας οφείλεται σε κακή απομάκρυνση της θερμότητας που παράγεται στην επαφή της διόδου LED που έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας του λαμπτήρα, η οποία οδηγεί σε χαμηλότερη απόδοση φωτός. Σύμφωνα με μελέτες του προγράμματος DOE Solid-State Lighting CALiPER, οι λαμπτήρες LED παράγουν περισσότερο από το 96% της αρχικής τους εξόδου μετά από περισσότερο από 5000 ώρες λειτουργίας [27]. Φυσικά, η συνολική έξοδος ενός φωτιστικού, εξαρτάται επίσης από το πόσο φως απορροφάται από το ίδιο το φωτιστικό καθώς η απορρόφηση φωτός αυξάνεται με την πάροδο του

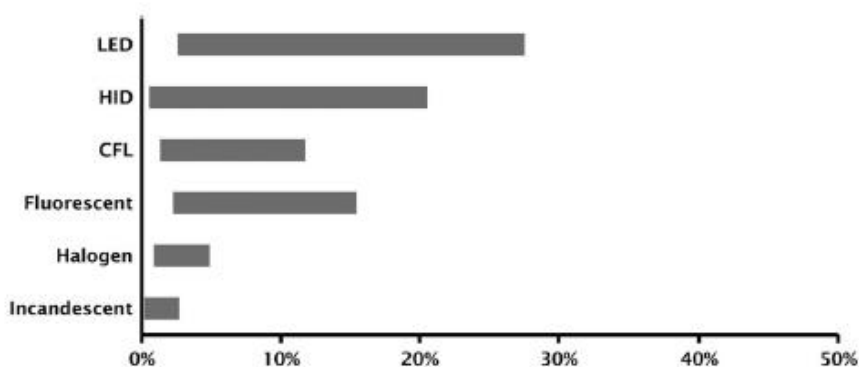
χρόνου, λόγω των βρώμικων καλυμμάτων γυαλιού ή πλαστικού που λειτουργούν ως ανακλαστικές επιφάνειες [28]. Αν τα φωτιστικά δεν καθαρίζονται και δεν συντηρούνται τακτικά, η συνεισφορά στη συνολική μείωση της αποτελεσματικότητας μπορεί να είναι μεγαλύτερη από εκείνη της πηγής.

Η αποτελεσματικότητα των λαμπτήρων πυρακτώσεως είναι σταθερή εδώ και δεκαετίες και κυμαίνεται από 4 έως 18 lm/W ανάλογα με την ισχύ του λαμπτήρα. Λαμβάνοντας υπόψη το 683 lm/W της θεωρητικής μέγιστης αποτελεσματικότητας, αυτό μεταφράζεται ότι περίπου μόνο το 0,2% με 2,6% της ηλεκτρικής ενέργειας καταναλώνεται για να μετατραπεί σε χρήσιμο φως. Αυτοί οι λαμπτήρες λειτουργούν με θέρμανση μιας μεταλλικής αντίστασης νήματος που βρίσκεται μέσα σε ένα γυάλινο περίβλημα το οποίο περιέχει ένα χαμηλής πίεσης αδρανές αέριο. Ο μόνος τρόπος για να αυξηθεί σημαντικά η αποδοτικότητα θα ήταν να γίνει το νήμα θερμότερο. Τα περισσότερα νήματα είναι κατασκευασμένα από βολφράμιο, το οποίο στους 3695 °K, έχει το υψηλότερο σημείο τήξεως και χαμηλότερη ταχύτητα εξάτμισης των μετάλλων. Φυσικά, το νήμα δεν μπορεί να γίνει τόσο ζεστό. Οι περισσότεροι λαμπτήρες λειτουργούν σε θερμοκρασίες μεταξύ 2000 και 3300 °K. Με την αντικατάσταση του αδρανούς αερίου με αλογόνο, το οποίο περιορίζει την απώλεια των εξατμίσεων των μετάλλων και τα σωματίδια βολφραμίου που επικάθονται πάνω στο νήμα, η θερμοκρασία λειτουργίας μπορεί να αυξηθεί περίπου στους 3450 °K. Μέχρι στιγμής, δεν έχει αναπτυχθεί κανένας πρακτικός τρόπος για την περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας του νήματος και την αποτελεσματικότητα των λαμπτήρων πυρακτώσεως.

Οι λαμπτήρες πυρακτώσεως παύουν να λειτουργούν είτε λόγω μηχανικής δόνησης η οποία σπάει το νήμα είτε λόγω της εξάτμισης του βολφραμίου από το νήμα πυράκτωσης. Η εξάτμιση αυτή μπορεί να αυξηθεί δραματικά σε θερμά σημεία, αν το νήμα δεν είναι ομοιόμορφο. Η διάρκεια ζωής των συμβατικών λαμπτήρων πυρακτώσεως είναι συνήθως μεταξύ μερικές εκατοντάδες έως αρκετές χιλιάδες ώρες [29]. Επειδή το αέριο αλογόνο μειώνει τις απώλειες των εξατμίσεων από το νήμα, οι λάμπες αλογόνου βολφραμίου μπορεί να έχουν κάπως μεγαλύτερη διάρκεια ζωής.

Οι λαμπτήρες φθορισμού χρησιμοποιούν ένα σταθεροποιημένο αέριο εκκένωσης χαμηλής πίεσης που βρίσκεται μέσα σε ένα σωλήνα ευγενούς αερίου και ατμών υδραργύρου. Τα ηλεκτρόνια ιονίζουν τα άτομα υδραργύρου, τα οποία στην κατάσταση αδράνειας εκπέμπουν φωτόνια στο υπεριώδες φάσμα με μήκος κύματος

253,7 nm. Το εσωτερικό του σωλήνα εκκένωσης είναι επικαλυμμένο με ένα φώσφορο που, όταν ακτινοβολείται με υπεριώδεις (UV) ακτίνες, εκπέμπει ορατό φως. Το ρεύμα κατά την όλη διαδικασία θα πρέπει να περιορίζεται, δεδομένου ότι η αντίσταση της στήλης εκκένωσης μειώνεται με την αύξηση του ρεύματος. Τυπικά, το ρεύμα περιορίζεται μέσω της χρήσης ενός επαγωγικού στραγγαλιστικού πηνίου (ballast) που επίσης περιλαμβάνει συχνά ένα αυτομετασχηματιστή για να αυξήσει την τάση λειτουργίας. Οι πρώτοι λαμπτήρες φθορισμού χρησιμοποιούσαν φωσφορίζουσες επιφάνειες που εξέπεμπαν ένα ευρύ φάσμα στην περιοχή του μπλε χρώματος, παράγοντας έτσι ψυχρό φως. Σήμερα, η χρήση μικτών φωσφορίζουσών επιφανειών έχει οδηγήσει στη δημιουργία λαμπτήρων φθορισμού που παράγουν ένα θερμότερο φως (δηλ., περισσότερο εκπομπών στον κόκκινο). Υπό ιδανικές συνθήκες, συμπεριλαμβανομένων των απωλειών τόσο της μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας εισόδου σε υπεριώδη ακτινοβολία όσο και τη μετατροπή της υπεριώδους σε ορατό φως, οι λαμπτήρες φθορισμού λειτουργούν με απόδοση περίπου 13% (αν αναλογιστεί κανείς το θεωρητικό μέγιστο 683 lm/W) , δηλαδή περίπου πέντε φορές υψηλότερη από την απόδοση μετατροπής των λαμπτήρων πυρακτώσεως (Εικ. 37). Η αποτελεσματικότητα ενός λαμπτήρα φθορισμού εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ισχύ: κυμαίνεται από 35 έως 40 lm/W για χαμηλές μονάδες ισχύος (από 4 έως 5W) και από 75 έως 100 lm/W σε λαμπτήρες με μεγαλύτερη ισχύ (από το 70 έως 125W) ή ηλεκτρονικά στραγγαλιστικά πηνία (από 10 έως 60W). Η διάρκεια ζωής των λαμπτήρων φθορισμού κυμαίνεται από 3000 έως 30000 ώρες. Στην εικόνα 37 απεικονίζονται η συνολική αποτελεσματικότητα των συστημάτων φωτισμού (κάτω όρια) και των λαμπτήρων (άνω όρια) λαμβάνοντας υπ' όψη ότι η θεωρητική μέγιστη αποτελεσματικότητα είναι 683 lm/W.



Εικόνα 37: Συνολική αποτελεσματικότητα των συστημάτων φωτισμού (κάτω όρια) και των λαμπτήρων (άνω όρια)

Στους λαμπτήρες φθορισμού, ανεπάρκεια λειτουργίας ή δραματικά μειωμένη απόδοση, τυπικά προκύπτει από την φθορά της καθόδου ή της επιφανείας εκπομπής. Η διάρκεια της ζωής τους μπορεί επίσης να περιοριστεί από την απώλεια του υδραργύρου στην εσωτερική επιφάνεια του σωλήνα ή σε άλλα εσωτερικά εξαρτήματα, τη μείωση της απόδοσης μετατροπής του φωσφόρου, και, σπάνια, από δυσλειτουργία των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων.

Τα λευκά LED έχουν υποστεί δραματικές βελτιώσεις στην αποτελεσματικότητα, δεδομένου ότι αναπτύχθηκαν για πρώτη φορά το 1996. Σήμερα τα πιο αποτελεσματικά λευκά LED παράγουν περίπου 90 με 170 lm/W της ηλεκτρικής ισχύος εισόδου[30]. Το καλύτερο ποσοστό των LED υψηλής και μέσης ισχύος είναι της τάξης των 90 με 153 lm/W, ενώ το πιο σύνηθες ποσοστό είναι της τάξης των 35 με 50 lm/W. Η αποτελεσματικότητα αυτή αυξάνεται σαφώς όταν η ισχύς μειώνεται και φτάνει τα 150 με 180 lm/W. Ένα εργαστηριακό πρωτότυπο λευκού LED έφτασε σε αποτελεσματικότητα 276 lm/W [31]. Η αποτελεσματικότητα αυτή αναφέρεται σε LED ψυχρού λευκού φωτός, ενώ η καλύτερη αποτελεσματικότητα που επιτυγχάνεται στο θερμό λευκό είναι 75 με 130 lm/W. Στην εικόνα 38, απεικονίζεται η πρόβλεψη της αποδοτικότητας των LED ψυχρού και θερμού λευκού φωτός για το 2021 [32].

Metric	2013	2015	2017	2020	Goal
Cool-White Efficacy (lm/W)	166	192	211	231	250
Cool-White Price (\$/klm)	4	2	1.3	0.7	0.5
Warm-White Efficacy (lm/W)	135	169	197	225	250
Warm-White Price (\$/klm)	5.1	2.3	1.4	0.7	0.5

Εικόνα 38: Πίνακας αποτελεσματικότητας και κόστους LED ψυχρού και θερμού λευκού φωτός 2013 - 2021

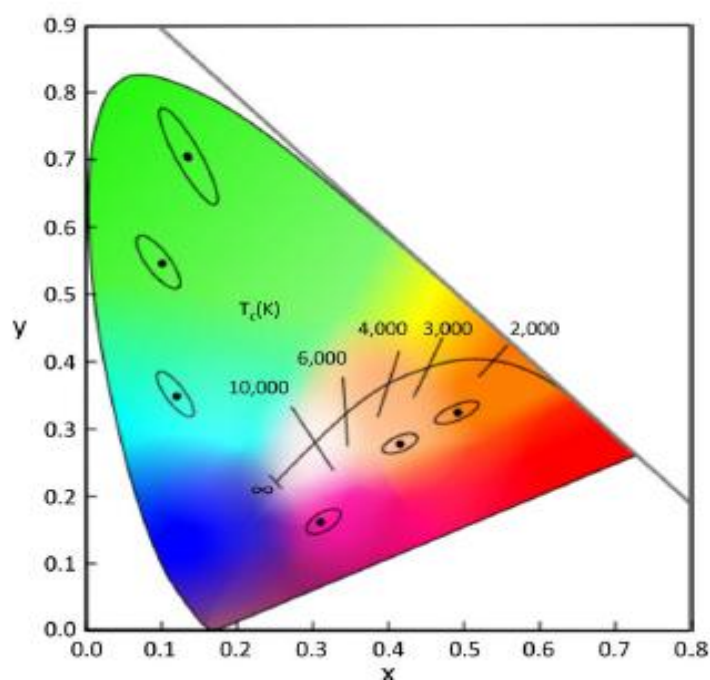
Αυτές οι εξελίξεις προέρχονται από βελτιώσεις στην εσωτερική κβαντική απόδοση (ο λόγος των εγχυόμενων ηλεκτρονίων προς τα εκπέμποντα φωτόνια στην ενεργό περιοχή), από βελτιώσεις της απόδοσης εκπομπής (ο αριθμός των φωτονίων που δημιουργούνται στην ενεργή περιοχή και εκπέμπονται έξω από το κάλυμμα του LED), από βελτιώσεις των φωσφορικών επικαλύψεων και βελτιώσεις στην απόδοση σκέδασης (ο λόγος των φωτονίων που εκπέμπονται από το φώσφορο προς τον αριθμό όλων των φωτονίων που προέρχονται από το chip). Εκτός από την

αποτελεσματικότητα, οι βελτιώσεις αυτές αυξάνουν και τη διάρκεια ζωής των LED σε 30000 με 50000 ώρες λειτουργίας.

### 4.3. Χρώμα

Η αποδοτικότητα και η διάρκεια ζωής, δεν είναι οι μόνοι παράγοντες που καθορίζουν την επιλογή των πηγών φωτισμού. Το διακρινόμενο χρώμα του φωτός και ο τρόπος με τον οποίο εμφανίζονται οι φωτεινές έγχρωμες επιφάνειες είναι επίσης σημαντικοί παράγοντες. Πράγματι, εδώ και χρόνια, αυτοί ήταν το βασικό εμπόδιο για την ευρεία υιοθέτηση των λαμπτήρων φθορισμού.

Όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, τα LED παράγουν λευκό φως συνήθως μετά από κατάλληλα προσαρμοζόμενη ανάμειξη των στενών φασματικών (περίπου 20 nm) μπλε, πράσινων και κόκκινων εξόδων τους. Οι λαμπτήρες πυρακτώσεως, κατασκευαστικά, δεν μπορούν να δημιουργούν λευκό φως, ενώ οι λαμπτήρες φθορισμού εκπέμπουν λευκό φως λόγω της ύπαρξης της φθορίζουσας επιφάνειας τους.

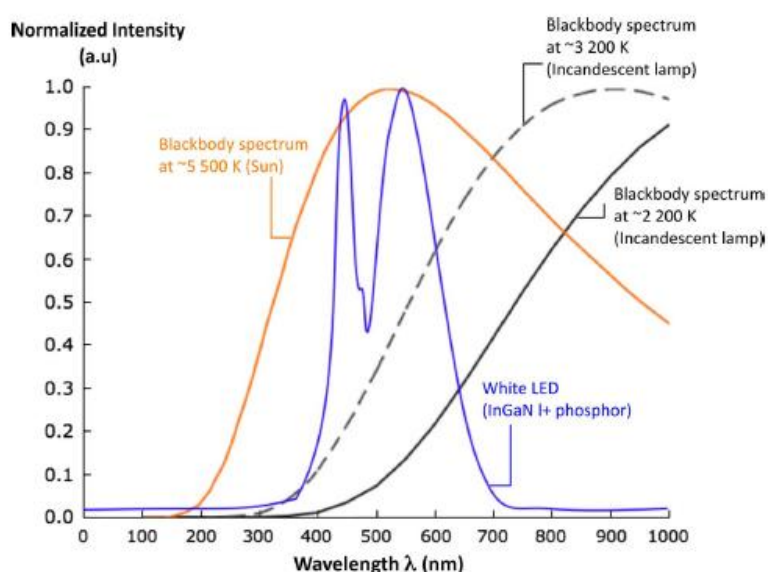


Εικόνα 39: Διάγραμμα CIE στο οποίο φαίνονται τα σημεία φάσματος μελανού σώματος

Παρά τις ποικίλες στρατηγικές που έχουν αναπτυχθεί ώστε να αποδοθεί σωστά το λευκό χρώμα που προκύπτει στους λαμπτήρες αυτούς, καμία δεν έχει πετύχει 100%

το σκοπό της. Ίσως η πιο πετυχημένη να είναι η χρωματικότητα χώρου που αναπτύχθηκε από την επιτροπή Internationale de L'Eclairage (CIE) [33]. Αυτός ο δισδιάστατος χώρος (Εικ. 39) δημιουργείται από μια σειρά τριών αδιάστατων “συναρτήσεων ανάμειξης χρωμάτων” που συλλογικά δημιουργούν την εκάστοτε απόχρωση χρώματος. Τα σημεία γύρω από τα όρια του χώρου CIE αντιστοιχούν σε καθαρά μονοχρωματικά χρώματα. Το λευκό βρίσκεται στο κέντρο του χώρου. Στο χώρο αυτό συνήθως σχεδιάζεται και μια καμπύλη που προσδιορίζει τη θέση της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας μελανού σώματος, σύμφωνα με τον νόμο του Wien.

Οι λαμπτήρες πυρακτώσεως παράγουν φάσματα εκπομπής που είναι αρκετά κοντά σε αυτά τα φάσματα μελανού σώματος. Έτσι, είναι σύνηθες να γίνεται αναφορά στις εν λόγω εκπομπές των λαμπτήρων αυτών με βάση την “θερμοκρασία χρώματος”. Οι πηγές του λευκού φωτός των οποίων τα φάσματα δεν είναι κοντά σε εκείνα του μέλανος σώματος χαρακτηρίζονται από την συσχετισμένη θερμοκρασία χρώματος (Correlated Color Temperature – CCT), ανάλογα με το πού βρίσκονται ως προς τις γραμμές που διασχίζουν το φάσμα μελανού σώματος του νόμο του Wien (Εικ. 39).



Εικόνα 40: Σύγκριση τυπικών φασμάτων

Οι ιδιότητες της χρωματικής απόδοσης των φωτεινών πηγών των λαμπτήρων καθορίζονται μέσω του δείκτη χρωματικής απόδοσης (Color Rendering Index - CRI), ο οποίος με την σειρά του υποδεικνύει και την ποιότητα του φωτισμού των λαμπτήρων [34]. Ο δείκτης CRI μπορεί να πάρει τιμές από 0 μέχρι 100, με το φυσικό υπαίθριο φως να έχει δείκτη CRI ίσο με 100. Ουσιαστικά η απόδοση του φυσικού

φωτός στα χρώματα αποτελεί το μέτρο σύγκρισης για όλες τις πηγές φωτός. Για την περίπτωση λαμπτήρων φθορισμού ο δείκτης CRI κυμαίνεται γύρω στα 50-60, ενώ στην περίπτωση λαμπτήρων LED ο CRI, ανάλογα με την μάρκα του λαμπτήρα, είναι μεγαλύτερος από 80. Οι λαμπτήρες LED υψηλής ισχύος μπορούν να επιτύχουν τιμές μέχρι και 98 CRI.

Στην εικόνα 40 γίνεται μια σύγκριση των τυπικών φασμάτων ενός λευκού LED, ενός λαμπτήρα πυρακτώσεως και μιας λάμπας φθορισμού. Σε έναν λαμπτήρα πυρακτώσεως, το θερμαινόμενο νήμα ακτινοβολεί περίπου στο φάσμα μελανού σώματος του Planck, δηλαδή παρουσιάζει μια ελάχιστη ολίσθηση προς το φάσμα του μπλε χρώματος. Λόγω του θερμοκρασιακού ορίου λειτουργίας του νήματος, η κορυφή της εξόδου βρίσκεται στην περιοχή του υπέρυθρου, σε ένα μήκος κύματος δηλαδή περίπου της τάξης των 10  $\mu\text{m}$ , ενώ το φάσμα ακτινοβολίας καλύπτει όλο το ορατό φάσμα με απότομη κλίση προς το κόκκινο. Αντίθετα, οι πρώτοι λαμπτήρες φθορισμού με ένα μόνο φωσφόρο έτειναν να παράγουν χρώμα που ήταν πιο γαλανό. Οι θερμότεροι λαμπτήρες φθορισμού χρησιμοποιούν φωσφορίζουσες επιφάνειες που δίνουν ένα φάσμα εκπομπής που τείνει περισσότερο προς το κόκκινο, με αποτέλεσμα την δημιουργία θερμού φωτός.

Πολλοί άνθρωποι προτιμούν θερμότερο φως, ειδικά όταν πρόκειται για φωτισμό χλωμού δέρματος [35]. Για το λόγο αυτό τόσο στην Ευρώπη όσο και στις Η.Π.Α. όπου πολλοί άνθρωποι έχουν χλωμό δέρμα, η θερμοκρασία του λευκού φωτός σε αρκετές εφαρμογές, όπως για παράδειγμα στις οθόνες τηλεόρασης, έχει ρυθμιστεί σε 6500 °K. Σε αντίθεση, στην Ιαπωνία, η θερμοκρασία ρυθμίζεται στους 9300 °K. Αυτός μπορεί επίσης να είναι ένας λόγος για τον οποίο ο φωτισμός με λαμπτήρες πυρακτώσεως, παρέμενε πιο δημοφιλής σε Ευρώπη και Αμερική από ό, τι στην Ιαπωνία.

Ο παρακάτω πίνακας παρέχει σύγκριση των βασικών χαρακτηριστικών των τεχνολογιών λαμπτήρων που συζητήθηκαν παραπάνω.

Λαμπτήρας	Είδος	Ισχύς (W)	Αποδοτικότητα (lm/W)	Διάρκεια ζωής σε χιλιάδες ώρες	CCT (°K)	CRI
INC	-	3 - 150	4 - 18	1	2400 - 3100	98 - 100
Αλογόνου	-		15 - 33	2 - 6	3000 - 3100	98 - 100
HID	-	40 - 400	14 - 140	6 - 28	2900 - 5700	15 - 62
LID	LPNa	26 - 180	70 - 200	7,5 - 30	1700 - 7500	75 - 95

	T12	14 - 90	60 - 105	7 - 20	3000 - 6500	62 - 75
	T8				3000 - 6500	75 - 98
	T5				3000 - 6500	75
CFL	ενσωματωμένο ballast	4 - 120	35 - 80	5 - 15	3000 - 6500	75 - 90
CFL	εξωτερικό ballast	40 - 95	60 - 80	10 - 20	2700 - 6500	80 - 85
Λευκό SSL	LED	1 - 20	160(lab) 20 - 55	20 - 40	5000 - 6000	70 - 80
	OLED	1 - 20	< 18	< 4	3000 - 6000	~ 80

Δεδομένου ότι τα φάσματα των πηγών LED διαφέρουν από αυτά των παραδοσιακών λαμπτήρων πυρακτώσεως, ορισμένα από τα υφιστάμενα πρότυπα και μεθόδους μέτρησης είναι ανεπαρκείς ή ελλιπείς όταν εφαρμόζονται στα LED [36]. Για παράδειγμα, έχει αναπτυχθεί μια νέα μέτρηση της χρωματικής απόδοσης των πηγών φωτός με σκοπό την αντιμετώπιση των προβλημάτων του δείκτη χρωματικής απόδοσης (CRI) που παρουσιάζεται στις πηγές φωτός LED. Επειδή οι πηγές φωτισμού στερεάς κατάστασης έχουν πολύ μεγαλύτερη ευελιξία στο σχεδιασμό του φάσματος εξόδου από τις παραδοσιακές λάμπες, οι κατασκευαστές έχουν μεγαλύτερη ελευθερία στην επιλογή της συσχετισμένης θερμοκρασίας χρώματος και της ποιότητας των χρωμάτων για διάφορες εφαρμογές φωτισμού. Ωστόσο, οι αλληλένδετες επιπτώσεις της χρωματικότητας, της χρωματικής απόδοσης και άλλων πτυχών των φασμάτων φωτισμού δεν είναι ακόμα πλήρως κατανοητά. Έτσι, ο φωτισμός στερεάς κατάστασης απαιτεί εκ νέου απάντηση στα ερωτήματα σχετικά με τις επιπτώσεις των φασμάτων στο φωτισμό.

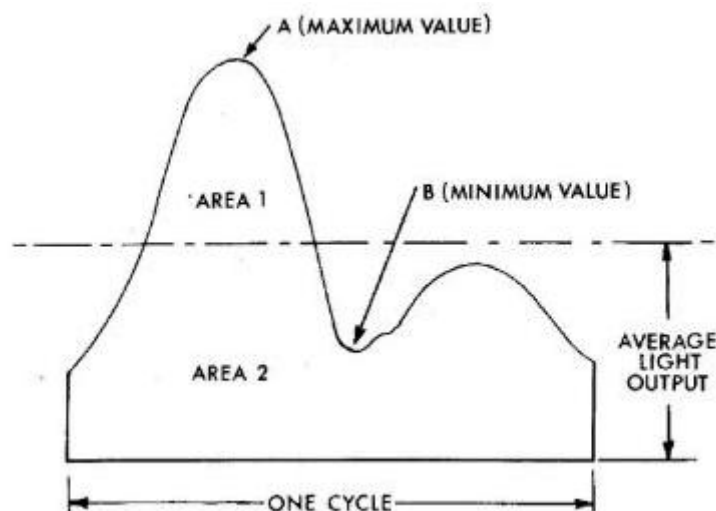
#### 4.4. Θόρυβος RF και Flickering

Τα switching τροφοδοτικά που χρησιμοποιούνται στους λαμπτήρες LED, τα ηλεκτρονικά μέρη που χρησιμοποιούνται στους λαμπτήρες φθορισμού και τα dimmer που χρησιμοποιούνται με τους λαμπτήρες πυρακτώσεως, εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία υψηλής συχνότητας και φορτώνουν τις γραμμές του ηλεκτρικού ρεύματος με θόρυβο υψηλής συχνότητας. Ενώ αυτές οι εκπομπές ραδιοσυχνοτήτων συνήθως δεν αποτελούν πρόβλημα, υπάρχουν περιπτώσεις που η παρουσία τους μπορεί να είναι προβληματική με αποτέλεσμα η αυξανόμενη χρήση των ηλεκτρονικών συστημάτων που τις προκαλούν να δημιουργεί ένα ζήτημα που θα χρίζει ιδιαίτερης προσοχής.

Για το λόγο αυτό, πολλοί εθνικοί φορείς επικοινωνιών ασχολούνται με τις παρεμβολές των ακτινοβολούμενων εκπομπών στις ζώνες επικοινωνιών μεταξύ 3 MHz έως 1 GHz και 150 kHz έως 30 MHz. Έτσι, οι κατασκευαστές λαμπτήρων οφείλουν να δοκιμάζουν τις ακτινοβολούμενες εκπομπές των προϊόντων τους για να εξασφαλίσουν ότι δεν παράγουν ακτινοβολία όπως ορίζεται από το διεθνές εναρμονισμένο πρότυπο EN55022 [37].

Επειδή το νήμα σε μια λάμπα πυρακτώσεως έχει σημαντική θερμική αδράνεια, τα dimmer που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της φωτεινότητάς τους, δεν παράγουν αισθητό flickering, παρά την chopped κυματομορφή εξόδου τους. Αντίθετα, το flickering είναι αισθητό στους λαμπτήρες φθορισμού, όπου η συχνότητά του είναι διπλάσια της συχνότητας τροφοδοσίας, δηλαδή 100 Hz για τροφοδοσία 50 Hz. Flickering μπορεί επίσης να παρατηρηθεί και σε ορισμένα συστήματα LED, αλλά μπορεί να μειωθεί με προσεκτικό σχεδιασμό της τροφοδοσίας τους.

Ο δείκτης flickering είναι ένας λόγος που έχει καθιερωθεί για τη μέτρηση των μεταβολών της εξόδου μιας πηγής [38]. Ορίζεται ως ο λόγος του εμβαδού της κυματομορφής εξόδου του φωτός που βρίσκεται πάνω από το μέσο επίπεδο φωτός και του συνολικού εμβαδού της κυματομορφής εξόδου του φωτός στη διάρκεια ενός κύκλου και παίρνει τιμές μεταξύ μηδέν και ένα (Εικ. 41).



Εικόνα 41: Γράφημα flickering

Σε μετρήσεις που έχουν γίνει, η αντιληπτικότητα του flickering μπορεί να είναι υποκειμενική, ιδιαίτερα σε συχνότητες άνω των 75 Hz. Η μεγάλη πλειοψηφία των λαμπτήρων LED που έχουν δοκιμαστεί δεν παρουσιάζουν εμφανές flickering, πολλοί

έχουν την ίδια ή μικρότερη εμφάνιση του φαινομένου από λαμπτήρες αλογόνου και λαμπτήρες πυρακτώσεως. Ακόμη και με τους δείκτη έως 0,5, το flickering δεν έγινε αμέσως αντιληπτό, όμως για εκείνους που είναι ιδιαίτερα ευαίσθητοι στο φαινόμενο, τα αποτελέσματα έδειξαν πιθανή εκδήλωση καταπόνησης των ματιών και πονοκεφάλους, αν χρησιμοποιείται λανθασμένο είδους λαμπτήρα για φωτισμό εργασίας ή για παρατεταμένο χρονικό διάστημα.

Για την αποφυγή στροβοσκοπικών φαινομένων καλύτερη θα ήταν η χρήση λαμπτήρων LED με δείκτη μικρότερου του 0,1. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι το φαινόμενο του flickering δεν είναι χαρακτηριστικό όλων των LED φωτισμού αλλά εμφανίζεται σε φθηνότερα και χαμηλότερης ποιότητας προϊόντα [39].

## **4.5. Κόστος**

Η συντήρηση του φωτισμού μπορεί να είναι μια δαπανηρή και χρονοβόρα διαδικασία, ιδιαίτερα σε δημόσια κτίρια όπου η χρήση είναι συνεχής. Στο παρελθόν, η φυσική και οικονομική προσπάθεια που απαιτείται για τη διατήρηση του φωτισμού σε ικανοποιητικά επίπεδα στα δημόσια κτίρια έχει δημιουργήσει ελλείμματα στον προϋπολογισμό που δύσκολα μπορεί να φανταστεί κανείς.

Ο φωτισμός LED μειώνει δραματικά το κόστος, ένα σημαντικό πλεονέκτημα για ζητήματα δημόσιων κτιριακών εγκαταστάσεων, κυρίως λόγω της δυνατότητας προσαρμογής του στα παλαιότερα συστήματα καθώς και την μεγαλύτερη διάρκεια ζωής του σε σχέση με τις παραδοσιακές τεχνολογίες. Στη διαχείριση των δημόσιων κτιρίων, όπως και σε κάθε εγκατάσταση ή συντήρηση κτιρίων, ο χρόνος είναι χρήμα, και επειδή η αλλαγή των λαμπτήρων LED συμβαίνει πολύ λιγότερο συχνά απ'ότι συνήθως με τον παραδοσιακό φωτισμό, οι ανάγκες χρήσης του ανθρώπινου δυναμικού μεταφέρεται σε άλλα θέματα.

Το αρχικό κόστος του εξοπλισμού λαμπτήρων LED μπορεί να τρομάζει, όμως θα πρέπει να γίνει κατανοητό ότι η εξοικονόμηση χρημάτων θα αρχίσει να φαίνεται μέσα σε πέντε χρόνια το πολύ, αν όχι νωρίτερα, καθώς η διάρκεια ζωής των λαμπτήρων είναι δέκα ετών, αν όχι μεγαλύτερη. Αυτή η παρατήρηση σημαίνει ότι ένα σχεδιασμός που θα περιέχει αρχικά μεγαλύτερο κόστος υλοποίησης, στην πορεία θα αποδειχτεί ως μελλοντικά οικονομικότερος και πιο βιώσιμος.

Τα οικονομικά οφέλη μπορούν να επικεντρωθούν σε δύο βασικούς παράγοντες που είναι η μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας καθώς και το μικρότερο κόστος συντήρησης που απαιτείται από την μεγαλύτερη διάρκεια ζωής των λαμπτήρων. Θα μπορούσε να πει κανείς ότι από ένα σημείο και μετά ο φωτισμός τεχνολογίας LED αυτοσυντηρείται και αυτό δεν θα ήταν υπερβολή. Στο διαδίκτυο υπάρχει μια πληθώρα εφαρμογών που μπορεί να βοηθήσουν στον υπολογισμό της προβλεπόμενης απόδοσης της επένδυσης σε ένα κτίριο από την εγκατάσταση λαμπτήρων LED καθώς επίσης και να αποδείξουν το οικονομικό πλεονέκτημα που παρουσιάζουν μακροπρόθεσμα οι λαμπτήρες στερεάς κατάστασης έναντι των παραδοσιακότερων [40]. Ο υπολογισμός αυτός γίνεται με τρία βασικά χαρακτηριστικά, που έχουν αναλυθεί εκτεταμένα στο προηγούμενο κεφάλαιο, ο κύκλος ζωής, η θερμοκρασία και το χρώμα.

Τα χαρακτηριστικά αυτά μπορούν να συνδυαστούν με τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας των έξυπνων κτιρίων και να αποτελέσουν μια μεγάλη μακροχρόνια οικονομική ανάσα. Ο φωτισμός LED μπορεί να ρυθμιστεί σε θέμα έντασης όπως και σε θέμα λειτουργίας εύκολα χωρίς να επηρεαστεί καθόλου η διάρκεια ζωής του. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε εφαρμογές με αισθητήρες, όπου η λειτουργία των λαμπτήρων μπορεί να διακοπεί όταν η περιοχή φωτισμού δεν είναι σε χρήση, ή η ένταση φωτισμού μπορεί να μειωθεί, όταν το φως στον εξωτερικό χώρο διατηρεί ικανοποιητικά επίπεδα. Έχει ήδη αναφερθεί ότι ένας καλά σχεδιασμένος λαμπτήρας μπορεί να διατηρήσει το 90% της αρχικής εξόδου του, ακόμα και μετά από λειτουργία 70.000 ωρών, ο οποίος είναι σχεδόν διπλάσιος από τη διάρκεια ζωής των πηγών φθορισμού. Γίνεται λοιπόν εύκολα κατανοητό ότι με την πάροδο του χρόνου, οι ανάγκες σε αντικατάσταση προβληματικών λαμπτήρων μειώνεται, κάτι που μειώνει δραματικά το συνολικό κόστος φωτισμού ενός κτιρίου.

Όπως έχει αποδειχθεί και από τις προηγούμενες ενότητες, τα πλεονεκτήματα του φωτισμού LED έναντι των παραδοσιακών τεχνολογιών φωτισμού, μπορούν να επεκταθούν και στα χαρακτηριστικά θερμοκρασίας λειτουργίας όπως επίσης και στην ποιότητα φωτισμού λόγω της μεγαλύτερης εκπομπής ποικιλίας χρωμάτων, έντασης της φωτεινότητάς τους καθώς και της χρωματικής θερμοκρασίας τους. Η ικανότητα των LED να λειτουργούν σε περιβάλλοντα όπου οι παραδοσιακές λύσεις φωτισμού απαιτούν την προσθήκη ειδικών τεχνολογιών για την σωστότερη λειτουργία τους, αυξάνει ακόμα περισσότερο τα οικονομικά οφέλη σε σχέση με τις άλλες τεχνολογίες

φωτισμού. Οι λύσεις που προσφέρει η τεχνολογία φωτισμού LED συμβάλλουν τεράστια σε εξοικονόμηση χρημάτων κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους και αυτό μπορεί να αποδειχθεί μόνο με την οικονομική ανάλυση της εγκατάστασης ή/και της συντήρησης ενός συστήματος φωτισμού.

Η βιωσιμότητα μιας επένδυσης ενός συστήματος φωτισμού, δηλαδή το σύνολο των δαπανών που απαιτούνται καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του συστήματος, περιγράφονται από τρεις δείκτες: τον δείκτη καθαρής παρούσας αξίας (Net Present Value), τον δείκτη χρονικής απόσβεσης (Payback period) και τον δείκτη επιστροφής κεφαλαίου (ROI).

Ο δείκτης Καθαρής Παρούσας Αξίας ορίζεται ως:

$$NPV = K_o + \sum_{t=1}^t \frac{KTP_t}{(1-p)^t}$$

όπου  $K_o$  είναι το αρχικό κόστος της επένδυσης,  $KTP_t$  οι καθαρές ταμειακές ροές ανά έτος και  $p$  το επιτόκιο αναγωγής.

Ο δείκτης της Χρονικής Απόσβεσης ορίζεται ως:

$$Payback\ period = \frac{\text{Κόστος επένδυσης}}{\text{Ετήσια οικονομικά οφέλη}}$$

Ο δείκτης ROI ορίζεται ως:

$$ROI = \frac{\text{Κέρδη επένδυσης} - \text{Έξοδα επένδυσης}}{\text{Έξοδα επένδυσης}}$$

Με βάση λοιπόν τους δείκτες αυτούς μπορούμε να υπολογίσουμε το συνολικό χρηματικό όφελος της χρήσης ενός συστήματος φωτισμού LED απέναντι στα άλλα συστήματα [41].

Με δεδομένη την απόδοση των διάφορων τεχνολογιών φωτισμού και έχοντας υπ' όψη ότι η τεχνολογία λαμπτήρων LED είναι ακόμα στα σπάργανα αλλά εξελίσσεται συνεχώς, η επιλογή της χρήσης μιας εξ αυτών με γνώμονα τα οικονομικά κριτήρια, εξαρτάται από την απόδοση της μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας σε φως, το εκτιμώμενο κόστος αγοράς και συντήρησης, την τιμή μονάδας αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας από τον εκάστοτε πάροχο, την διάρκεια ζωής των λαμπτήρων καθώς και την χρήση τους.

Με βάση αυτούς τους παράγοντες μπορούμε να καταλήξουμε στα στοιχεία που απεικονίζονται στον παρακάτω πίνακα. Στα στοιχεία του πίνακα αυτού έχουμε θεωρήσει ότι η εκάστοτε τεχνολογία φωτισμού παράγει το ίδιο επίπεδο φωτισμού και έχουμε θεωρήσει ως στοιχεία των λαμπτήρων LED αυτά που έχουν μπει ως στόχος για το 2015 [25]. Τέλος, γνωρίζοντας ότι η διάρκεια ζωής ενός λαμπτήρα εξαρτάται και από την χρήση του, έχουμε υποθέσει ότι η διάρκεια ζωής ενός λαμπτήρα πυρακτώσεως είναι θεωρητικά 1000 ώρες με 2 ώρες χρήσης καθημερινά.

	Αποδοτικότητα (lm/W)	Διάρκεια ζωής (h)	Φωτεινότητα (lm)	Ισχύς (W/lamp)	Κόστος συντήρησης (\$/χιλ. lm)	Κόστος λαμπτήρα (\$/λαμπτήρα)
Πυράκτωσης	14	1.000	926	65	0,5	0,5
CFL	69	8.000	926	13	4,3	4
T12	69	5.000	926	13	2	2
T8	92	12.000	926	10	2	2
T5	104	20.000	926	9	2	2
Σύστημα φωτισμού SSL Πρόβλεψη για το 2015	137 (cool) 117 (warm)	50.000	926	7	3	3

# Κεφάλαιο 5

## 5.1. LED και ενέργεια

Στη σημερινή εποχή, όπου ολόκληρη η ανθρωπότητα βρίσκεται κάτω από την πίεση σοβαρότατων προβλημάτων όπως είναι η καταστροφή του περιβάλλοντος και η διεθνής οικονομική κρίση, η εξοικονόμηση ενέργειας είναι ιδιαίτερα σημαντική, επειδή επιτυγχάνει μείωση του κόστους λειτουργίας στις επιχειρήσεις, εξοικονόμηση χρημάτων στα νοικοκυριά, καθώς επίσης και μείωση των ρύπων που εκλύονται στο περιβάλλον κατά την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας [42].

Στα προηγούμενα κεφάλαια εξετάσαμε τα χαρακτηριστικά της τεχνολογίας LED, ενώ είδαμε και τις διαφορές που έχει με τις άλλες τεχνολογίες φωτισμού πάνω στα χαρακτηριστικά αυτά. Με βάση τις συγκρίσεις που έγιναν, μπορούμε πλέον να ανακεφαλαιώσουμε και να συνοψίσουμε στα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η τεχνολογία LED έναντι των υπόλοιπων τεχνολογιών, πλεονεκτήματα τα οποία ουσιαστικά αποδεικνύουν την συνεισφορά της τεχνολογίας LED στην μερική επίλυση του ενεργειακού προβλήματος της σημερινής εποχής.

## 5.2. Πλεονεκτήματα τεχνολογίας LED

Τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας LED μπορούν να συνοψισθούν ως ακολούθως:

- *Αποτελεσματικότητα:* Οι λαμπτήρες LED παράγουν περισσότερο φως ανά Watt από τους λαμπτήρες πυρακτώσεως. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε συσκευές εξοικονόμησης ενέργειας. Η συνολική εξοικονόμηση ενέργειας των LED κυμαίνεται από 70 – 95%
- *Χρώμα:* Τα LED μπορούν να εκπέμψουν φως του επιδιωκόμενου χρώματος χωρίς τη χρήση έγχρωμων φίλτρων που απαιτούν οι παραδοσιακές μεθόδους φωτισμού. Αυτό είναι πιο αποτελεσματικό και μπορεί να μειώσει το αρχικό κόστος. Τα LED διατίθενται σε μεγάλη ποικιλία χρωμάτων (warm, daylight, cool κ.ά.)
- *Μέγεθος:* Τα LED μπορεί να είναι πολύ μικρά (μικρότερα από 2 mm<sup>2</sup>) και επομένως εύκολα προσαρμοζόμενα σε τυπωμένα κυκλώματα

- *Χρόνος ενεργοποίησης/απενεργοποίησης:* Τα LED ανάβουν πολύ γρήγορα. Μια τυπική κόκκινη ενδεικτική λυχνία LED θα επιτύχει πλήρη φωτεινότητα σε μικροδευτερόλεπτα. Οι λυχνίες LED που χρησιμοποιούνται σε συσκευές επικοινωνίας μπορούν να έχουν ακόμη ταχύτερους χρόνους απόκρισης. Επίσης είναι ιδανικά για χρήση σε εφαρμογές που υπόκεινται σε συχνές on-off καταστάσεις, σε αντίθεση με τους λαμπτήρες φθορισμού που καίγονται πιο γρήγορα όταν εναλλάσσουν συχνά την κατάστασή τους, ή τους HID λαμπτήρες που απαιτούν μεγάλο χρονικό διάστημα πριν από την επανεκκίνηση
- *Dimming:* Τα LED μπορούν πολύ εύκολα να ρυθμιστούν είτε με διαμόρφωση πλάτους παλμού ή μειώνοντας το ρεύμα ορθής φοράς
- *Δροσερό φως:* Σε αντίθεση με τις περισσότερες πηγές φωτός, τα LED εκπέμπουν πολύ λίγη θερμότητα υπό μορφή υπερύθρων που μπορεί να προκαλέσει βλάβη σε ευαίσθητα αντικείμενα ή υφάσματα. Το μικρό ποσοστό της ενέργειας που δεν μετατρέπεται σε φωτεινή, διαχέεται ως θερμότητα μέσω της βάσης των LED. Η θερμότητα αυτή όμως είναι πολύ μικρότερη της αντίστοιχης των λαμπτήρων πυρακτώσεως
- *Διάρκεια ζωής:* Τα LED μπορεί να έχουν σχετικά μεγάλη διάρκεια ζωής. Μια έκθεση εκτιμά 35.000 έως 50.000 ώρες διάρκειας ζωής, αν και ο χρόνος για την πλήρη αδυναμία λειτουργίας του λαμπτήρα μπορεί να είναι μεγαλύτερος. Οι λαμπτήρες φθορισμού συνήθως φθάνουν σε περίπου 10.000 έως 15.000 ώρες λειτουργίας, ανάλογα εν μέρει με τις συνθήκες χρήσης και οι λαμπτήρες πυρακτώσεως σε 1.000-2.000 ώρες. Τα LED επίσης δεν σταματούν να λειτουργούν απότομα αλλά εξασθενούν με την πάροδο του χρόνου, σε αντίθεση με τις λάμπες πυρακτώσεως και τους λαμπτήρες φθορισμού
- *Αντοχή στην κρούση:* Τα LED ως στοιχεία στερεάς κατάστασης, είναι δύσκολο να καταστραφούν από εξωτερικό σοκ, σε αντίθεση με τους λαμπτήρες φθορισμού και πυρακτώσεως, οι οποίοι είναι εύθραυστοι
- *Εστίαση:* Το στερεό πακέτο των LED μπορεί να σχεδιαστεί για να εστιάζει το παραγόμενο φως κατάλληλα. Αντίθετα οι λαμπτήρες πυρακτώσεως και φθορισμού συχνά απαιτούν ένα εξωτερικό ανακλαστήρα για να συλλέγει το φως και να το κατευθύνουν σε εύχρηστο τρόπο.

- *Τοξικότητα:* Τα LED δεν περιέχουν υδράργυρο, σε αντίθεση με τους λαμπτήρες φθορισμού. Επομένως είναι εντελώς αβλαβή για την υγεία και απόλυτα φιλικά προς το περιβάλλον.
- *Χρόνος απόσβεσης:* Σήμερα, οι λαμπτήρες LED τέταρτης γενιάς (SMD LED) έχουν ξεπεράσει όλα τα προβλήματα των προηγούμενων γενιών και μπορούν πλέον να αντικαθιστούν σχεδόν όλους τους τύπους λαμπτήρων. Η επένδυση αντικατάστασης αποσβένεται μέσα σε 6 μήνες έως 2 έτη, με μόνη εξαίρεση τους λαμπτήρες φθορισμού, των οποίων ο χρόνος απόσβεσης συνήθως ξεπερνά τα 5 έτη.
- *Λειτουργία ειδικών συνθηκών:* Τα λαμπτήρες LED έχουν την ικανότητα να συνδυάζουν την εξοικονόμηση ενέργειας με άλλα σημαντικά πλεονεκτήματα της τεχνολογίας όπως καλύτερη ποιότητα φωτισμού, δεν παρουσιάζουν flickering, δεν προκαλούν παράσιτα και ηλεκτρομαγνητικά πεδία κ.ά.

### **5.3. Εξοικονόμηση ενέργειας με λαμπτήρες LED**

Όλα τα παραπάνω πλεονεκτήματα της τεχνολογίας LED συμβάλλουν αποφασιστικά στο κύριο στόχο της τεχνολογίας που δεν είναι άλλος από την εξοικονόμηση ενέργειας με παράλληλα καλύτερες συνθήκες φωτισμού. Το 2012, μία ανεξάρτητη παγκόσμια έρευνα της τεχνολογίας LED έδειξε ότι ο φωτισμός LED στους δρόμους μπορεί να επιτύχει εξοικονόμηση ενέργειας έως και 85%. Από το πρόγραμμα, επίσης αποδείχθηκε ότι οι κάτοικοι των πιλοτικών πόλεων προτιμούν το φωτισμό LED λόγω κοινωνικών και περιβαλλοντικών οφελών [43].

Τα ευρήματα του προγράμματος LightSavers, ενός ανεξάρτητου παγκόσμιου πιλοτικού προγράμματος λαμπτήρων LED που διήρκησε δύομιση χρόνια και πραγματοποιήθηκε μέσω 15 ξεχωριστών δοκιμών σε 12 πόλεις συμπεριλαμβανομένων της Νέας Υόρκης, του Λονδίνου, της Καλκούτας και του Σύδνεϋ, απέδειξαν ότι υψηλή εξοικονόμηση ενέργειας μπορεί να επιτευχθεί πρακτικά μέσα σε μία νύχτα με σχετικά χαμηλό κόστος.

Ανάμεσα στα βασικά ευρήματα του προγράμματος ήταν:

- Έρευνες στην Καλκούτα, στο Λονδίνο, στο Σύδνεϋ και στο Τορόντο έδειξαν ότι οι πολίτες προτιμούν το LED φωτισμό, ενώ μάλιστα το 68% μέχρι το 90% των ερωτηθέντων τάχθηκαν υπέρ της εγκατάστασης της τεχνολογίας σε

ολόκληρη την πόλη. Ανάμεσα στα οφέλη που υπογραμμίστηκαν σε αυτές τις έρευνες ήταν η μεγαλύτερη αίσθηση ασφάλειας και η βελτιωμένη ορατότητα.

- Το γεγονός ότι η διάρκεια ζωής του LED φωτισμού κυμαίνεται από 50.000 μέχρι 100.000 ώρες αποδεικνύει ότι πρόκειται για μια εξαιρετική επενδυτική απόδοση.
- Διαπιστώθηκε ότι ο LED φωτισμός είναι μια ανθεκτική τεχνολογία που απαιτεί ελάχιστες επισκευές – το ποσοστό αποτυχίας των προϊόντων LED άνω των 6.000 ωρών λειτουργίας είναι περίπου στο 1% σε σύγκριση με το συμβατικό φωτισμό για παράδειγμα που στη διάρκεια της ίδιας χρονικής περιόδου είναι στο 10%.

Ο φωτισμός αφορά το 19% της παγκόσμιας χρήσης ηλεκτρικού ρεύματος και το 14% σε ευρωπαϊκό επίπεδο. Ταυτόχρονα αφορά και το 6% των παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Στην Ευρώπη περίπου το 50% της κατανάλωσης ηλεκτρισμού σε κτίρια του τριτογενή και δημόσιου τομέα αφορά τον φωτισμό. Οι ενεργειακά αποδοτικοί λαμπτήρες μπορούν να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας έως και κατά 70% και μπορούν να έχουν διάρκεια ζωής μέχρι και 15 φορές μεγαλύτερη από ότι οι ισοδύναμοι μη οικονομικοί λαμπτήρες.

Ο διπλασιασμός της παγκόσμιας αποδοτικότητας του φωτισμού θα επηρέαζε το κλίμα στο βαθμό που οι μισές εκπομπές ρύπων που προέρχονται από την παραγωγή ηλεκτρισμού και θέρμανσης στην Ευρωπαϊκή Ένωση θα εξαλείφονταν. Και όπως πολλές άλλες ενεργειακά αποδοτικές τεχνολογίες, ο αποδοτικός φωτισμός θα αυξήσει την παγκόσμια ευημερία. Μόνο στις ΗΠΑ, η μείωση κατά 40% της ενέργειας που καταναλώνεται για το φωτισμό θα εξοικονομούσε 53 δισεκατομμύρια δολάρια από το ετήσιο ενεργειακό κόστος και θα μείωνε τη ζήτηση της ενέργειας κατά το ισοδύναμο 198 σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μεσαίου μεγέθους.

Παρακάτω δίνεται ένα παράδειγμα εξοικονόμησης ενέργειας σε επαγγελματικό χώρο, με 100 λαμπτήρες φθορισμού 120 cm των 36 W [44].

Αν αντικαταστήσουμε τους λαμπτήρες φθορισμού με 100 λαμπτήρες LED, 120 cm, 18 W θα αφαιρέσουμε τα ballast τα οποία με τους λαμπτήρες LED δεν είναι απαραίτητα και καταναλώνουν άσκοπη ενέργεια (περίπου 30% της ονομαστικής ισχύος του φωτιστικού σώματος). Θεωρούμε ότι ο φωτισμός λειτουργεί 12 ώρες ανά ημέρα για 315 ημέρες ετησίως. Λαμβάνοντας επίσης υπόψη ότι η διάρκεια ζωής των

λαμπτήρων LED είναι 50.000 ώρες, έναντι 7.000 ωρών για τους λαμπτήρες φθορισμού, ισχύουν τα παρακάτω:

- Ετήσια κατανάλωση ενέργειας με λαμπτήρες LED: 68,00 kWh
- Ετήσια κατανάλωση ενέργειας με λαμπτήρες φθορισμού: 176,00 kWh
- Εξοικονόμηση ενέργειας ετησίως: 62%
- Εξοικονόμηση ενέργειας και μη αντικατάστασης λαμπτήρων ετησίως: 64%
- Μείωση εκπομπής CO<sub>2</sub> ετησίως: 8.500 kg
- Διάρκεια ζωής λαμπτήρων LED: 13,5 χρόνια
- Απόσβεση επένδυσης: 1,7 χρόνια
- Αξία αγοράς λαμπτήρων: 3.870,00 €

*Κέρδος μετά την απόσβεση για τη διάρκεια ζωής των λαμπτήρων (περίπου 7,8 χρόνια)*  
*LED: 27.800 €*

Από τα παραπάνω είναι φανερό ότι η αντικατάσταση των παλαιών λαμπτήρων ενός επαγγελματικού χώρου με λαμπτήρες LED είναι από τις πιο συμφέρουσες και αποδοτικές επενδύσεις για επαγγελματίες, που χρησιμοποιούν το φωτισμό για πολλές ώρες.

#### **5.4. Λαμπτήρες LED: Η φιλική λύση για τον άνθρωπο και το περιβάλλον**

Οι λαμπτήρες πυρακτώσεως έχουν ήδη καταργηθεί στην Ευρωπαϊκή Ένωση και από το 2012 καταργήθηκαν και οι λαμπτήρες αλογόνου και φθορισμού ως επικίνδυνοι για την υγεία και επιβλαβείς για το περιβάλλον. Μελλοντικά είναι βέβαιο ότι θα καταργηθούν και οι CFL υδραργύρου για τον ίδιο λόγο, αφού ο υδράργυρος είναι άκρως επικίνδυνο τοξικό μέταλλο και όταν σπάσει ένας λαμπτήρας υδραργύρου, ελευθερώνεται στο χώρο με κίνδυνο κατάποσης από παιδιά κτλ. Επιπλέον, οι λαμπτήρες CFL υδραργύρου παράγουν κακή ποιότητα και στενή δέσμη φωτός, διατίθενται μόνο σε λευκό χρώμα, έχουν μόνο 8.000 ώρες διάρκεια ζωής, εκπέμπουν βλαβερή υπεριώδη (UV) ακτινοβολία και παράγουν ηλεκτρομαγνητικά πεδία.

Αντίθετα οι λαμπτήρες LED παρουσιάζουν φιλική στάση προς το περιβάλλον, επειδή:

- Δεν επιβαρύνουν με CO<sub>2</sub> το περιβάλλον.

- Είναι πλήρως ανακυκλώσιμοι.
- Δεν περιέχουν επικίνδυνα τοξικά στοιχεία: υδράργυρος, κάδμιο, μόλυβδος
- Μειώνουν και την κατανάλωση των κλιματιστικών, αφού δεν εκλύουν θερμότητα στο χώρο.
- Εκπέμπουν μηδαμινή υπερϊώδη ακτινοβολία
- Παράγουν πολύ καλύτερη ποιότητα φωτός για το ανθρώπινο μάτι και επομένως εξαλείφουν προβλήματα οράσεως εξαιτίας κακού φωτισμού.
- Δεν εκπέμπουν ακτινοβολία επικίνδυνη όπως οι CFL λαμπτήρες υδραργύρου που διαφημίζονται έντονα και πουλιούνται σε πολύ χαμηλές τιμές στα super-market.
- Προσφέρουν άνετο και ξεκούραστο φωτισμό, με πολύ καλή ποιότητα χρώματος (CRI>80).

Παρατηρούμε επομένως ότι εκτός από την εξοικονόμηση ενέργειας, η τεχνολογία LED έχει ένα πιο φιλικό χαρακτήρα προς το περιβάλλον σε σχέση με τις παλαιότερες τεχνολογίες φωτισμού.

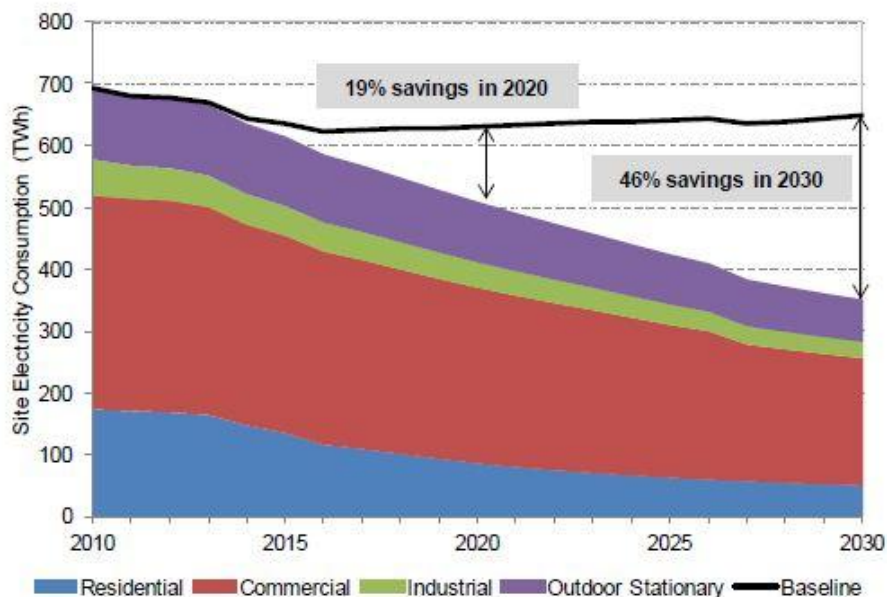
## 5.5. Προβλέψεις για το μέλλον

Το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ δημοσίευσε μια έκθεση που εκτιμά ότι η ευρεία εξάπλωση του φωτισμού LED θα μπορούσε να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας περίπου κατά το ήμισυ έως το 2030, με την προϋπόθεση ότι οι στόχοι απόδοσης και τιμών κόστους θα έχουν επιτευχθεί [45]. Η έκθεση αυτή με τίτλο «Εξοικονόμηση Ενέργειας δυνατότητες του Solid-State Lighting στη Γενική Φωτισμός εφαρμογών», συγκρίνει την ετήσια κατανάλωση ενέργειας φωτισμού στις ΗΠΑ εξετάζοντας τις περιπτώσεις της περαιτέρω διείσδυσης ή μη, στην αγορά των LED φωτισμού, πέρα από τα σημερινά επίπεδα.

Σύμφωνα με την μελέτη αυτή, το σωρευτικό δυναμικό εξοικονόμησης ενέργειας από την προβλεπόμενη διείσδυση στην αγορά της τεχνολογίας LED κατά την περίοδο 2010-2030 θα φτάσει τις 2700 TWh, μια εξοικονόμηση ύψους της τάξης των 250 δις δολαρίων με βάση τις σημερινές τιμές ενέργειας. Το ισοδύναμο αυτής της ενέργειας είναι 1800 εκατομμύρια μετρικούς τόνους διοξειδίου του άνθρακα. Το ποσό αυτό της ενέργειας έρχεται σε σύγκριση με τις 1800 TWh που είχε εκτιμηθεί στην έκθεση δυναμικού εξοικονόμησης ενέργειας το 2010.

Η ανάλυση προβλέπει ότι μέχρι το 2020, οι λαμπτήρες LED θα έχουν διεισδύσει κυρίως στις εφαρμογές εμπορικού και εξωτερικού φωτισμού. Από κει και πέρα, στο χρονικό διάστημα 2020-2030, θα υπάρξει μεγαλύτερη διείσδυση στην οικιστική, βιομηχανική αλλά και εμπορική αγορά. Με βάση τις προβλέψεις αυτές, η τεχνολογία LED σε εφαρμογές γενικού φωτισμού θα έχει τη δυνατότητα να εκπροσωπεί το 36% των πωλήσεων στη γενική αγορά φωτισμού μέχρι το 2020 και το 74% των πωλήσεων μέχρι το 2030.

Σύμφωνα με την Υπηρεσία Πληροφοριών Ενέργειας (EIA), το 2010, στις ΗΠΑ καταναλώθηκαν 694 TWh ηλεκτρικής ενέργειας μόνο για φωτισμό, περίπου δηλαδή το 18% του συνόλου της ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται. Το μοντέλο δείχνει ότι η συνολική κατανάλωση ενέργειας για φωτισμό θα μπορούσε να μειωθεί κατά 19% έως το 2020 και κατά 46% μέχρι το 2030 με βάση ένα σενάριο σύμφωνα με το οποίο δεν θα εγκατασταθεί κανένα επιπλέον φωτιστικό και λαμπτήρας LED πέρα από ό, τι έχει εγκατασταθεί σήμερα. Στην εικόνα 42 εμφανίζεται η καμπύλη της μείωσης της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας μέχρι το 2030 σύμφωνα με το σενάριο που περιγράφηκε.



Εικόνα 42: Προβλέψεις κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας μέχρι το 2030

Μέχρι το 2030, η ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας από τη διείσδυση των LED στην αγορά θα είναι περίπου 297 TWh, ηλεκτρική ενέργεια αρκετή για να τροφοδοτήσει 24 εκατομμύρια σπίτια. Σε τρέχουσες τιμές κόστους ενέργειας, η ενέργεια αυτή ισοδυναμεί με 30 δισεκατομμύρια δολάρια σε εξοικονόμηση πόρων κατά το έτος

2030. Υποθέτοντας ότι μέχρι τότε θα υπάρχει ο ίδιος αριθμός σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, αυτή η εξοικονόμηση, σύμφωνα με την έκθεση, θα μειώσει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά 210 εκατομμύρια μετρικούς τόνους διοξειδίου του άνθρακα το 2030.

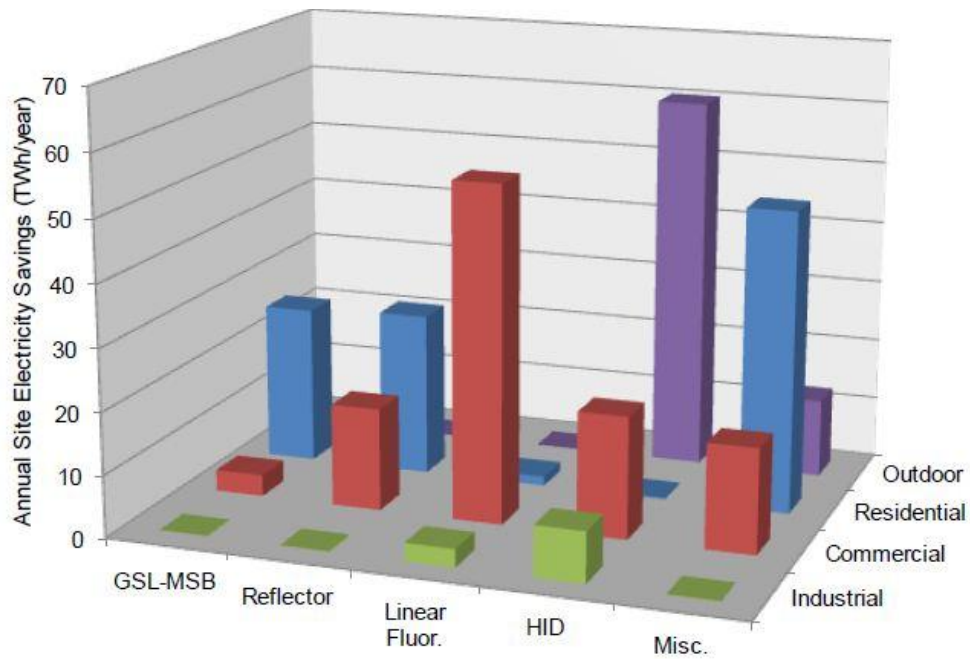
Το οικονομετρικό μοντέλο που χρησιμοποιείται στην ανάλυση βασίζεται σε παραδοχές αποτελεσματικότητας, λιανικής τιμής και χρόνου λειτουργίας των λαμπτήρων, ως εξής:

- Μια μέση αποτελεσματικότητα των 37 lm/W για μια λάμπα LED και 70 lm/W για ένα φωτιστικό LED το 2010, θα έχει αυξηθεί σε 182 lm/W και 193 lm/W, αντίστοιχα, το 2020 και 203 lm/W και για τους δύο τύπους του προϊόντος το 2030
- Οι τιμές για το 2030 εξήχθησαν με βάση την επικρατούσα τάση καθορισμού τιμών. Το μοντέλο υποθέτει ένας λαμπτήρας LED, που στοίχιζε 55,16 \$/klm το 2010, θα στοίχιζε 6,28 \$/klm το 2020 και 3,34\$/klm το 2030. Για τα φωτιστικά σώματα LED, η τιμή αναμένεται να μειωθεί από τα 180,88 \$/klm το 2010, σε 23,69 \$/klm το 2020 και σε 12,73 \$/klm το 2030
- Η έκθεση σημειώνει ότι οι καλύτερες λάμπες LED και τα φωτιστικά σώματα εσωτερικών χώρων έχουν διάρκεια ζωής περίπου 25.000 ώρες, ενώ τα φωτιστικά εξωτερικών χώρων έχουν διάρκεια ζωής 50.000 ώρες. Αυτή η διάρκεια ζωής αναμένεται να αυξηθεί σε 50.000 ώρες για τους λαμπτήρες LED και τα φωτιστικά εσωτερικού χώρου και σε 75.000 για τα υπαίθρια φωτιστικά περίπου στο 2020

Το μοντέλο του ρυθμού υιοθέτησης της τεχνολογίας LED έχει λάβει υπ' όψη του τόσο το αρχικό κόστος των λαμπτήρων LED και των φωτιστικών σωμάτων όσο και το ετήσιο κόστος συντήρησης και λειτουργίας, που αντιπροσωπεύουν από κοινού το κόστος κύκλου ζωής των λαμπτήρων LED.

Μέχρι το 2030, το δυναμικό εξοικονόμησης ενέργειας είναι μεγαλύτερο στον εμπορικό τομέα, ακολουθούμενο από τον οικιακό τομέα, που συμβάλλουν κατά 37% και 34%, αντίστοιχα, στη συνολική εξοικονόμηση ενέργειας. Οι εφαρμογές εξωτερικών χώρων συνθέτουν τον επόμενο μεγαλύτερο τομέα, κατά 25% ενώ ο βιομηχανικός τομέας συμβάλλει μόνο κατά το 4% του συνόλου. Η κατανομή των προβλεπόμενων εξοικονομήσεων ενέργειας το 2030 (Εικ. 43) δείχνει ότι η

αντικατάσταση των λαμπτήρων φθορισμού σε εμπορικές εφαρμογές, των HID σε εξωτερικές εφαρμογές και των λαμπτήρων πυρακτώσεως σε οικιακές εφαρμογές αποτελούν μερικές από τις πιο σημαντικές ευκαιρίες για την εξοικονόμηση ενέργειας από την εφαρμογή της τεχνολογίας LED.



Εικόνα 43: Πρόβλεψη εξοικονόμησης ενέργειας σε διάφορους τομείς μέχρι το 2030

# Κεφάλαιο 6

## 6.1. Γενικά

Η τεχνολογία LED έχει κερδίσει την μάχη απέναντι στα παραδοσιακά συστήματα φωτισμού λόγω της χαμηλότερης κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, του μεγαλύτερου χρόνου ζωής, καθώς και των μικρότερων περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Ωστόσο, τα συστήματα φωτισμού LED, όπως και τα άλλα συστήματα, αντιμετωπίζουν το πρόβλημα της διαχείρισης της ακραίας θερμότητας που παράγεται. Μολονότι τα LED καταναλώνουν λίγη ενέργεια, μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας μετατρέπεται σε θερμότητα και όχι σε φωτεινή ενέργεια, γεγονός που μειώνει την αποδοτικότητα [46].

Η ζήτηση της αγοράς που αφορά τον φωτισμό LED μέρα με τη μέρα αυξάνεται με ταχύτητα και λόγω της ραγδαίας ανάπτυξης της τεχνολογίας solid state, είναι λογικό να απαιτούνται νέα προϊόντα που θα αναδεικνύουν τα πολλά πλεονεκτήματα που παρουσιάζει. Αυτό που απαιτείται είναι βέβαια η κατασκευή προϊόντων που θα συνδυάζουν μέγιστη αποδοτικότητα, ελάχιστη κατανάλωση και μικρό κόστος. Για το λόγο αυτό πολλοί κατασκευαστές έχουν οδηγηθεί τον τελευταίο καιρό προς αναζήτηση νέων υλικών κατασκευής λαμπτήρων LED που θα μπορούν να συνδυάζουν τα παραπάνω στοιχεία [47].

Αυτή τη στιγμή λείπει από την αγορά ένας λαμπτήρας LED που θα έχει σχετικά χαμηλό κόστος κατασκευής, δεν θα αναπτύσσει μεγάλες θερμοκρασίες λειτουργίας που θα μπορούσαν να του μειώσουν την απόδοση και που θα μπορούσε να έχει 3600 περιφερειακού φωτισμού. Τα παραπάνω στοιχεία συνιστούν τη χρήση θερμοπλαστικού υλικού, ένα υλικό που έχει χαρακτηριστικά ικανά να ανταπεξέρθουν στις απαιτήσεις που προαναφέρθηκαν. Η κατασκευή ενός τέτοιου λαμπτήρα LED αποτελεί και την πρόταση της πτυχιακής αυτής εργασίας.

## 6.2. Η χρήση θερμοπλαστικού στους λαμπτήρες LED

Οι πρόσφατες εξελίξεις στα πλαστικά θερμικού διασκορπισμού αποδεικνύουν ότι σιγά-σιγά είναι σε θέση να αρχίσουν να αντικαταστήσουν τα μέταλλα, όπως το αλουμίνιο, για σκοπούς ελέγχου θερμότητας σε LED. Κάτι τέτοιο έχει ως

αποτέλεσμα, τα LED να μπορούν να επωφεληθούν από τη χρήση θερμοπλαστικών για τη διαχείριση της θερμότητας λόγω του χαμηλού βάρους τους, την ευελιξία στο σχεδιασμό τους, την υψηλότερη απόδοση και φυσικά το χαμηλότερο κόστος. Κατασκευαστές συστημάτων LED αρχίζουν να συνειδητοποιούν τα οφέλη των υψηλά θερμοαγώγιμων πλαστικών για την κατασκευή τόσο των περιβλημάτων των λαμπτήρων LED όσο και των ψυκτών τους.

Το πρώτο χαρακτηριστικό του προϊόντος που παρουσιάζεται στην πτυχιακή αυτή είναι η αντικατάσταση του αλουμινίου με θερμοπλαστικό για την κατασκευή της ψύκτρας απαγωγής θερμότητας. Σε σύγκριση με τις παραδοσιακές ψύκτρες θερμότητας από αλουμίνιο, η χρήση των θερμοπλαστικών θα μειώσει το κόστος παραγωγής κατά 20-30 %. Παράλληλα, ο δείκτης ακτινοβολίας του θερμοπλαστικού είναι 7-8 φορές υψηλότερη από αυτή του αλουμινίου και παρέχει καλύτερη απόδοση. Επιπλέον, το κόστος για τη χύτευση ψύκτρας με έγχυση θερμοπλαστικού είναι χαμηλότερη σε σχέση με την αντίστοιχη των μετάλλων ενώ παράλληλα έχει μεγαλύτερη απόδοση παραγωγής. Όλα τα στοιχεία αυτά συνηγορούν στην κατασκευή προϊόντων με υψηλότερη αναλογία απόδοσης/τιμής για χρήση στην αγορά φωτισμού LED.

Το εξωτερικό του περιβλήματος βοηθά επίσης στην απαγωγή της θερμότητας. Μολονότι η θερμική αγωγιμότητα στα θερμοπλαστικά δεν είναι τόσο καλή όσο στα μέταλλα, είναι δυνατή η κατασκευή τους με προσθήκη αλουμινίου, γεγονός που θα αυξήσει ακόμα περισσότερο την αποδοτικότητα του λαμπτήρα. Εξάλλου το κόστος παραγωγής θερμοπλαστικού για χρήση σε ψύκτρες απαγωγής θερμότητας είναι σημαντικά χαμηλότερο από το αντίστοιχο του αλουμινίου. Με βάση ελέγχων και δοκιμών ανακύκλωσης για το θερμοπλαστικό έχει αποδειχθεί ότι η διαφορά απόδοσης μεταξύ χρήσης ανακυκλωμένων θερμοπλαστικών και νέου υλικού ήταν σχετικά μικρή, γεγονός που θα μπορούσε τελικά να οδηγήσει σε χαμηλότερο κόστος για τους καταναλωτές.

### **6.3. Κόστος και απαγωγή θερμότητας των θερμοπλαστικών**

Το μικρότερο κόστος κατασκευής κάνει τα θερμοπλαστικά την τέλεια επιλογή των ολοένα αυξανόμενων αναγκών φωτισμού των λαμπτήρων LED. Η τιμή για κάθε κιλό θερμοπλαστικού είναι περίπου US \$ 7-10 η οποία είναι 20-30% μικρότερη της τιμής

του αλουμινίου. Με αυτό σαν δεδομένο, για να αποδειχθεί το πλεονέκτημα κόστους που παρουσιάζουν τα θερμοπλαστικά έναντι του αλουμινίου, θα πρέπει να υπολογιστεί και το κόστος του χρόνου που απαιτείται στο πλαίσιο της διαδικασίας κατασκευής των θερμοπλαστικών μερών των λαμπτήρων. Η χρήση της επιφάνειας του αλουμινίου ως ψύκτρες απαγωγής θερμότητας απαιτεί μια σειρά διεργασιών όπως στίλβωση, τρύπημα και ανοδίωση. Συγκριτικά, οι θερμοπλαστικές ψύκτρες δημιουργούνται μέσω χύτευσης με έγχυση και μόνο, μια διεργασία που έχει υλοποιηθεί και προκαλεί ελάχιστη φθορά στην ψύκτρα καθώς και στα χαρακτηριστικά του θερμοπλαστικού υλικού. Λόγω του μειωμένου χρόνου κατασκευής, επομένως, το κόστος παραγωγής για τους καταναλωτές θα είναι σημαντικά μειωμένο.

Εκτός από το κόστος παραγωγής της χρήσης θερμοπλαστικής πρώτης ύλης, άλλος ένας παράγοντας που θεωρείται από τους καταναλωτές ως βασικός είναι η απόδοση στην απαγωγή θερμότητας. Αν και προς το παρόν η θερμική αγωγιμότητα των θερμοπλαστικών δεν είναι τόσο καλή όσο των μετάλλων, σύμφωνα με θερμοκρασιακούς ελέγχους που έχουν πραγματοποιηθεί, έχει αποδειχθεί ότι θερμοπλαστικό υλικό που χρησιμοποιείται σε λαμπτήρες LED των 8W και 10W, οι λαμπτήρες παρουσιάζουν μια θερμοκρασία χαμηλότερη από 80°C, η οποία είναι σύμφωνη με τα πρότυπα της βιομηχανίας φωτισμού LED. Με βάση του γεγονότος ότι η αναλογία ακτινοβολίας στα θερμοπλαστικά είναι υψηλότερη από ό, τι στα μέταλλα, η θερμική αυτή ενέργεια διαχέεται πιο γρήγορα. Αυτό διασφαλίζει τους χρήστες απέναντι σε πιθανά καψίματα από την ψύκτρα απαγωγής θερμότητας κατά την αντικατάσταση λαμπτήρων, γεγονός που είναι σημαντικό για τους καταναλωτές, με δεδομένο ότι η ασφάλεια είναι από τους σημαντικότερους παράγοντες που λαμβάνονται υπ' όψη.

## **6.4. Προϊόντα που κυκλοφορούν**

Η Philips, ο κορυφαίος πάροχος σε ενεργειακά αποδοτικές λύσεις φωτισμού, λάνσαρε πρόσφατα ένα νέο λαμπτήρα LED ο οποίος σηματοδότησε την πρώτη υψηλής ισχύος εφαρμογή LED αντικατάστασης του καλύμματος αλουμινίου με θερμικά αγωγίμο πλαστικό για τον έλεγχο και τη διαχείριση της θερμότητας. Ο νέος λαμπτήρας MASTER LED MR16 (Εικ.44) χρησιμοποιεί για τις ανάγκες ελέγχου της θερμότητας το STANYL, υψηλής απόδοσης πολυαμίδιο της DSM [48]. Η Philips χρειαζόταν ένα

υλικό που θα μπορούσε να προσφέρει ανώτερη διαχείριση της θερμότητας και ταυτόχρονη μεγαλύτερη ευελιξία στο σχεδιασμό, διατηρώντας ή βελτιώνοντας τα χαρακτηριστικά του θερμοπλαστικού. Ως εκ τούτου, η συνεργασία των δύο εταιρειών δημιούργησε ένα θερμικά αγωγίμο πλαστικό υλικό με σκοπό την παραγωγή ελαφρών, υψηλής απόδοσης λαμπτήρων LED που μειώνουν την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και προσφέρουν εκτεταμένο κύκλο ζωής. Σύμφωνα με τους υπεύθυνους σχεδιασμού, το θερμικά αγωγίμο STANYL αποδίδει καλύτερα από το αλουμίνιο αν εφαρμοστεί σε κατασκευαστικά προϊόντα στις σωστές συνθήκες και σχεδιασμό. Επιπλέον, αυτός ο τύπος πολυαμιδίου προσφέρει επίσης τα πρόσθετα οφέλη των θερμοπλαστικών συμπεριλαμβανομένων την ευελιξία στο σχεδιασμό, την εξαιρετική αντοχή και την μείωση του βάρους. Το LED της Philips είναι ένας λαμπτήρας 4W που αντικαθιστά τους δημοφιλείς λαμπτήρες αλογόνου χαμηλής τάσης spot. Με ισοδύναμη απόδοση φωτός με εκείνη των λαμπτήρων αλογόνου 20W MR16, προσφέρει τα βασικά πλεονεκτήματα της έως και 80% εξοικονόμηση ενέργειας με 40-φορές μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Η Philips ανακοίνωσε ότι αυτή η ρητίνη πολυαμιδίου υψηλής απόδοσης παρέχει τέτοια θερμική αγωγιμότητα που απαιτείται για να εκλύσει πλήρως τη θερμότητα που παράγεται από το LED.

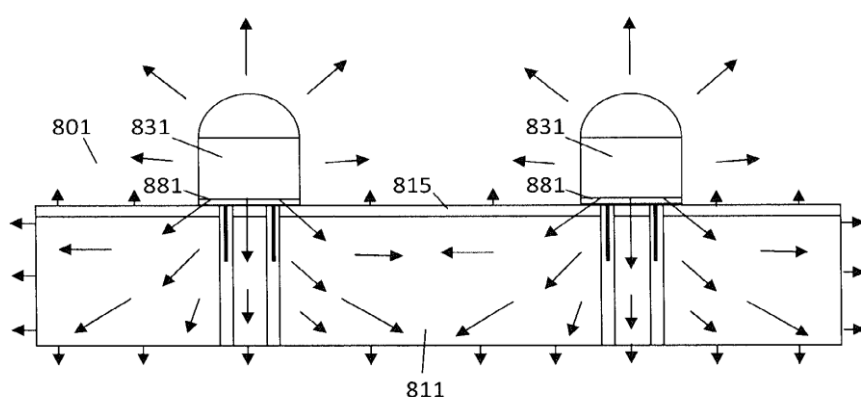


Εικόνα 44: Λαμπτήρας Philips Master LED MR16

Η εταιρεία υποβρύχιου φωτισμού Aqualuma, κατασκευαστής σκαφών και υποβρύχιων συστημάτων φωτισμού είναι μια άλλη εταιρεία η οποία έχει χρησιμοποιήσει θερμικά αγωγίμο πλαστικά για τη διαχείριση των προβλημάτων της θερμότητας των λαμπτήρων LED. Η εταιρεία ξεκίνησε πρόσφατα να προσφέρει λαμπτήρες LED που διαθέτουν πολυμερή διασκορπισμού θερμότητας. Τα πολυμερή

αυτά κατασκευάζονται από την Cool Polymers, Inc των ΗΠΑ. Το τμήματα R & D των εταιρειών συνεργάστηκαν για να δημιουργήσουν το CoolPoly®, ένα χυτεύσιμο θερμικά αγωγίμο πλαστικό. Το αποτέλεσμα των αυστηρών δοκιμών και αξιολόγησης είναι η κατασκευή ενός θερμοπλαστικού με εξαιρετικό επίπεδο θερμικής αγωγιμότητας που είναι 100 φορές μεγαλύτερο των συμβατικών πλαστικών [49]. Σε αντικατάσταση του αλουμινίου, το θερμοπλαστικό αυτό κοστίζει λιγότερο, είναι ελαφρύτερο, μπορεί να χυτευτεί εύκολα και δεν διαβρώνεται κάτω από το νερό. Τα νεότερα προϊόντα τους που παρασκευάζονται με στεγανό περίβλημα για μια μακροχρόνια πηγή φωτός LED.

Στο επίπεδο του περιβλήματος, όταν χυτεύεται για την τελική διαμόρφωση του λαμπτήρα LED, το θερμοπλαστικό λειτουργεί και ως ψύκτρα. Στο επίπεδο της μήτρας, παρέχει χαμηλό συντελεστή θερμικής διαστολής (CTE) και θερμικά αγωγίμη μάζα για να βοηθήσει τη μεταφορά και απομάκρυνση της θερμότητας που παράγεται κοντά στην επαφή του LED. Διάφορες ποιότητες θερμικών αγωγίμων πλαστικών είναι ήδη διαθέσιμα για κατασκευή όλων των μερών ενός λαμπτήρα LED. Στο επίπεδο της μήτρας (Εικ.45), το CoolPoly D5506, θερμικά αγωγίμο πολυμερές υγρού κρυστάλλου (LCP), λέγεται ότι είναι μια ιδανική επιλογή [50], [51]. Επίσης, το CoolPoly D5108, Πολυφαινυλενο Sulfide (PPS) λέγεται ότι είναι ιδανικό για κατασκευή του κυρίου μέρους του λαμπτήρα [52], ενώ το CoolPoly E5101 (PPS) είναι κατάλληλη επιλογή για τα καταλύματα των LED [53].



Εικόνα 45: Διάχυση θερμότητας του CoolPoly D5506 σε συστοιχία LED

Η ιαπωνική εταιρεία Teijin Limited είναι έτοιμη να ξεκινήσει την διάθεση του Raheama, ένα υλικό θερμικής διαχείρισης [54]. Το Raheama είναι ένα υλικό πληρώσεως από ανθρακονήματα που διαχέει τη θερμότητα καλύτερα από μέταλλα

όπως το ασήμι ή ο χαλκός, καθιστώντας το ιδανικό ως θερμοαγώγιμο υλικό πλήρωσης για πλαστικά. Το Raheama αποτελείται από ίνες 50 - 200  $\mu\text{m}$ , κομμένες από ένα κυλινδρικό απόθεμα ίνων γραφίτη διαμέτρου 8  $\mu\text{m}$ . Μπορεί να αναμειχτεί εύκολα σε πλαστικό, επιτρέποντας στους κατασκευαστές την κατασκευή εξαρτημάτων διάχυσης θερμότητας οποιουδήποτε σχήματος. Έχει θερμικό συντελεστή διαστολής τόσο χαμηλό όσο των κεραμικών, έτσι τα εξαρτήματα που μπορούν να κατασκευαστούν έχουν εξαιρετική σταθερότητα διαστάσεων, καθώς δεν διαστέλλονται. Το Raheama κατασκευάζεται σε δύο βασικούς τύπους: το R-A201, που παρέχει ανώτερη μορφοποίηση και διασπορά ως συμπλήρωμα σε πλαστικό ή καουτσούκ και το R-A301, που παρέχει ανώτερη θερμική ακτινοβολία. Μια ιδιαίτερα ελπιδοφόρος εφαρμογή των προϊόντων αυτών είναι σε ψύκτρες, ή σε μεταλλικά φύλλα ακτινοβολίας θερμότητας, λαμπτήρων LED φιλικών προς το περιβάλλον. Πειράματα με λαμπτήρες LED στους οποίους χρησιμοποιούνται πολυκαρβονικά φύλλα με πλήρωση Raheama, έχουν αποδείξει η διασπορά θερμότητας που μπορεί να επιτευχθεί βρίσκεται στα επίπεδα της αντίστοιχης με χρήση αλουμινίου. Το πολλά αυτό υποσχόμενο υποκατάστατο μπορεί να εξαλείψει την ανάγκη της χρήσης μετάλλου, λόγω της μείωσης βάρους των λαμπτήρων LED που μπορεί να επιτύχει [55].

## **6.5. Η κατασκευή λαμπτήρα LED**

Με βάση τα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, είναι εύλογη η στροφή της τεχνολογίας φωτισμού LED, προς τη χρήση θερμοπλαστικού υλικού, λόγω του οικονομικού κυρίως παράγοντα, καθώς φαίνεται ότι μέχρι στιγμής τα επίπεδα απαγωγής θερμότητας στην περίπτωση των θερμοαγώγιμων υλικών είναι στα ίδια αν όχι σε καλύτερα επίπεδα με την χρήση αλουμινίου ή άλλων μετάλλων.

Για το λόγο αυτό, η πρόταση της πτυχιακής αυτής εργασίας είναι η κατασκευή ενός λαμπτήρα LED με χρήση λεντοταινίας, μιας απλής και οικονομικής κατασκευής για μια επιλογή χαμηλού κόστους από μεριάς καταναλωτή. Εκτός από την κατασκευή του λαμπτήρα με θερμοαγώγιμο πλαστικό, το καινοτόμο μέρος του λαμπτήρα είναι οι 3600 περιφερειακού φωτισμού, που μπορεί να παρέχει. Ο λαμπτήρας έχει τα εξής βασικά χαρακτηριστικά:

- Απόδοση 7W, που επιτυγχάνεται με 5 λωρίδες από λεντοταινία 14,4W/m μη στεγανή
- Τάση τροφοδοσίας 12Vdc, κάτι που σημαίνει ότι υπάρχει δυνατότητα σύνδεσης με μπαταρία, ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε πλοία ή σε εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούν φωτισμό 12Vdc.
- Θερμοπλαστικό υλικό

Ο λαμπτήρας που προτείνουμε στην παρούσα πτυχιακή εργασία είναι σχεδιασμένος για να αντικαταστήσει τους αντίστοιχους λαμπτήρες πυρακτώσεως 50W, αλλά είναι καλύτερος, πιο φωτεινός και ενεργειακά πιο αποδοτικός από τον παραδοσιακά ομόλογό του.

Έχει έξοδο φωτισμού που φτάνει τα 700 lumen, καθιστώντας τον μια τέλεια λύση για το φωτισμό σε αρκετά μεγάλους χώρους, τόσο εσωτερικούς όσο και εξωτερικούς. Οι 5 λωρίδες λεντοταινίας που διαθέτει και ο τρόπος με τον οποίο έχουν αυτές τοποθετηθεί του δίνουν την δυνατότητα να διατηρεί μια διάχυση δέσμης 360° (Εικ. 46) . Η γωνία φωτεινής δέσμης ενός λαμπτήρα LED είναι ένα πολύ σημαντικό στοιχείο το οποίο καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την ποιότητα του εκπεμπόμενου φωτός από τον λαμπτήρα [56]. Μικρή γωνία σημαίνει ότι ο λαμπτήρας θα εστιάζει την εκπομπή του και επομένως θα μπορεί να λειτουργεί ως φακός. Αντίθετα μεγάλη γωνία εκπομπής δέσμης σημαίνει μαλακότερο φως με μεγαλύτερη διάχυση στο χώρο κάτι που αποσκοπεί σε φωτισμό μεγάλων χώρων.



Εικόνα 46: Ταινία LED μη στεγανή αυτοκόλλητη IP33 60ledm 12V-DC 14,4w 1,2AM 960lm WW Θερμό Λευκό 3000K

Άλλα χαρακτηριστικά του λαμπτήρα είναι η συμβατότητά του με dimming controler, έχει γύρω στις 20.000 ώρες ζωής, ενώ διακρίνεται από την πλήρη έλλειψη στοιχείων υδραργύρου και άλλων παρόμοιων τοξικών ουσιών.

Τα χαρακτηριστικά του λαμπτήρα μπορούν να συνοψισθούν ως ακολούθως:

- Λαμπτήρας LED
- Χρώμα φωτός: Cool White και Warm White
- Δυνατότητα κατασκευής σε βάσεις Small Edison Screw (E14) και Edison Screw (E27)
- Σχήμα: GLS
- Πολύ χαμηλή κατανάλωση ενέργειας
- Μεγάλη διάρκεια ζωής
- Καμία ακτινοβολία UV και IR
- Άμεση λειτουργία 100% χωρίς απαιτούμενο χρόνο προθέρμανσης
- Προσαρμόζεται σε ντουϊ παλαιότερων τεχνολογιών φωτισμού
- Φιλική προς το περιβάλλον (δεν περιέχει υδράργυρο ή άλλες τοξικές ουσίες)

Χαρακτηριστικά:

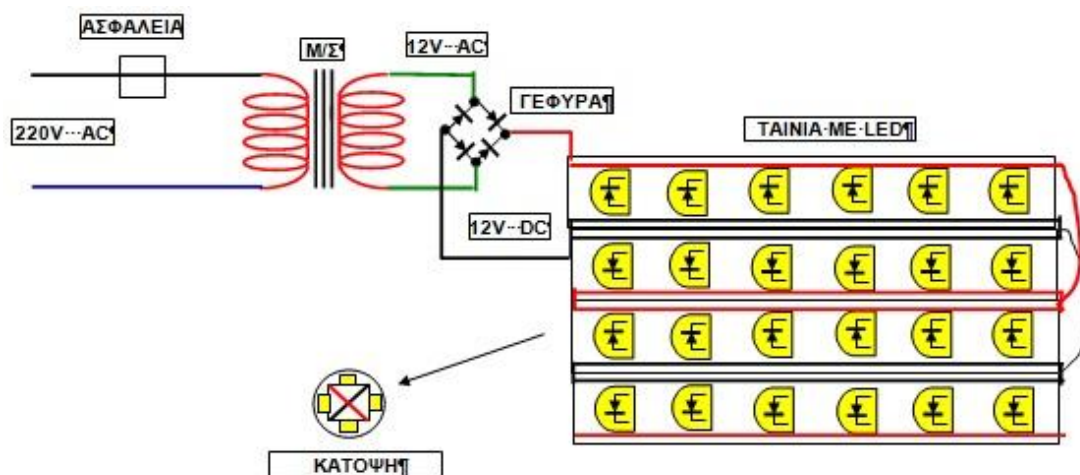
- Κατανάλωση ενέργειας: 7 Watt
- Τάση λειτουργίας: 240Vac ή 12Vdc
- Γωνία φωτεινής δέσμης: 360ο
- Φωτεινότητα: 700 Lm
- Μέσος όρος διάρκειας ζωής (hr): 20.000
- Θερμοκρασία χρώματος: 5500ο Kelvin
- Ισοδυναμία ισχύος με λάμπα πυρακτώσεως: 50 Watt
- CRI: 75
- Διαστάσεις: 11 cm H x 3.5 cm W x 3.5 cm D

Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι από αντίστοιχο προϊόν που υπάρχει στο εμπόριο, το οποίο όμως δεν είναι κατασκευασμένο από θερμοπλαστικό υλικό [57]. Αυτό, βέβαια σημαίνει ότι με βάση τα όσα έχουν προαναφερθεί για τα θερμοπλαστικά υλικά και την απαγωγή θερμότητας που προσφέρουν, τα χαρακτηριστικά του προτεινόμενου λαμπτήρα LED θα είναι ακόμα καλύτερα από πλευρά ισχύος και κατανάλωσης.



Εικόνα 47: Προτεινόμενο προϊόν LED

Στην εικόνα 47, απεικονίζεται μια φωτογραφία του προϊόντος που προτείνεται, ενώ στην εικόνα 48 η κυκλωματική διάταξη της τροφοδοσίας αλλά και της συνδεσμολογίας του. Με βάση την κυκλωματική διάταξη γίνεται εύκολα κατανοητό ότι ο λαμπτήρας μπορεί να κατασκευαστεί για λειτουργία με 12Vdc, με χρήση ενός pack 12V/1A και μιας ανορθωτικής διάταξης, κύκλωμα το οποίο βέβαια δεν αποτελεί μέρος του λαμπτήρα. Για το λόγο αυτό με χρήση λεντοταινίας με τροφοδοσία 220Vac, ο λαμπτήρας μπορεί να λειτουργήσει και με απευθείας τροφοδότησή του από το ηλεκτρικό δίκτυο.



Εικόνα 48: Κυκλωματική διάταξη προτεινόμενου προϊόντος LED

# Βιβλιογραφία

- [1] Rebecca Matulka, Daniel Wood, "History of the Light Bulb", U.S. Department of Energy, November 22, 2013, <http://energy.gov/articles/history-light-bulb>
- [2] Josie Lowry, "The future of LED lighting", Ezine Articles, LEDKE Technology Co., Ltd, 29/6/2010, <http://www.ledke.com/news/LED-lighting-future.html>
- [3] Robert Douglas Friedel, Paul Israel, Bernard S. Finn, "Edison's electric light: biography of an invention", New Brunswick, New Jersey: Rutgers University Press, 1986, ISBN 0813511186
- [4] Keefe, T.J, "The Nature of Light", 2007, <http://archive.today/me55>
- [5] Chen, Kao, "Fluorescent Lamps". Industrial Power Distribution and Illuminating Systems, Electrical Engineering and Electronics 65, New York: Dekker, 1990, ISBN 978-0-8247-8237-5
- [6] M. A. Laughton, "Electrical Engineer's Reference Book", Sixteenth Edition, Newnes, 2003, ISBN 0-7506-4637-3
- [7] Elizabeth Shogren, "CFL Bulbs Have One Hitch: Toxic Mercury", npr, February 15, 2007, <http://www.npr.org/templates/story/story.php?storyId=7431198>
- [8] Mary Bellis, "The History of Fluorescent Lights", About.com, 2007, <http://www.popularmechanics.com/home/reviews/news/4215199>
- [9] Γεωργία Μπισμπίκη, "Μελέτη Συστημάτων Έναυσης με Ρυθμιζόμενη Στάθμη Φωτισμού (ELECTRONIC DIMMABLE BALLAST)", Διπλωματική εργασία, Φραγκίσκος Τοπαλής, Ε.Μ.Π., Αθήνα, Ιούλιος 2012, [http://dspace.lib.ntua.gr/bitstream/123456789/6834/3/bismpikig\\_ballast.pdf](http://dspace.lib.ntua.gr/bitstream/123456789/6834/3/bismpikig_ballast.pdf)
- [10] Carole Jacques, "LED Lighting Market to Grow Over 12-Fold to \$25 Billion in 2023", Lux Research, 28 January 2014, [http://finance.yahoo.com/news/led-lighting-market-grow-over-123000345.html;\\_ylt=AwrBEiEyM\\_hSeA4AIC7QtDMD](http://finance.yahoo.com/news/led-lighting-market-grow-over-123000345.html;_ylt=AwrBEiEyM_hSeA4AIC7QtDMD)
- [11] onceinnovations.com, "Understanding LEDs and LED Lighting", [http://www.onceinnovations.com/downloads/und\\_led.pdf](http://www.onceinnovations.com/downloads/und_led.pdf)
- [12] Tony B. Gines and Michael W. Davidson, "Light-Emitting Diode Operation", National High Magnetic Field Laboratory, The Florida State University, Florida, <http://zeiss-campus.magnet.fsu.edu/tutorials/leddiagram/indexflash.html>
- [13] Wayne Storr, "The Light Emitting Diode", Basic Electronics Tutorials, [http://www.electronics-tutorials.ws/diode/diode\\_8.html](http://www.electronics-tutorials.ws/diode/diode_8.html)
- [14] Cornelius Neumann, "The Light Emitting Diode - a success story", Stahl, 2012, [http://www.r-stahl.com/fileadmin/Dateien/ex-zeitschrift/2012/en/LED\\_PDF\\_englisch.pdf](http://www.r-stahl.com/fileadmin/Dateien/ex-zeitschrift/2012/en/LED_PDF_englisch.pdf)
- [15] Philips N.V., "Light Emitting Diodes - LEDs", Internet Courses, [http://www.lighting.philips.com/pwc\\_li/main/connect/Lighting\\_University/internet-courses/LEDs/led-lamps.html](http://www.lighting.philips.com/pwc_li/main/connect/Lighting_University/internet-courses/LEDs/led-lamps.html)

- [16] Deacon Wardlow, "Counting Colors: The Truth Behind the Numbers", Vantage LED Signs, Thursday, May 17, 2012, <http://vantageled.blogspot.gr/2012/05/counting-colors-truth-behind-numbers>
- [17] Lightning Research Center, "How are LEDs affected by heat?", LED Lightning Systems, <http://www.lrc.rpi.edu/programs/nlpip/lightinganswers/led/heat.asp>
- [18] US Department of Energy, "Lifetime of White LEDs", [http://web.archive.org/web/20100821055249/http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/lifetime\\_white\\_leds\\_aug16\\_r1.pdf](http://web.archive.org/web/20100821055249/http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/lifetime_white_leds_aug16_r1.pdf)
- [19] Narendran, N. and Y. Gu, "Life of LED-based white light sources", IEEE/OSA Journal of Display Technology 1, 2005, <http://www.lightingresearch.org/programs/solidstate/pdf/narendran-gu-jdt2005.pdf>
- [20] Lightning Research Center, "Do all LEDs have the same lumen maintenance characteristics?", LED Lightning Systems, <http://www.lrc.rpi.edu/programs/nlpip/lightinganswers/led/lumenMaintenance.asp>
- [21] Gu, Y., A. Baker, and N. Narendran. 2007. Investigation of thermal management technique in blue LED airport taxiway fixtures. Seventh International Conference on Solid State Lighting, Proceedings of SPIE 6669: 66690U
- [22] Kimberly Bowen, "How Do LED Light Bulbs Work?", TopTenREVIEWS, <http://led-light-bulbs-review.toptenreviews.com/how-do-led-light-bulbs-work.html>
- [23] Instrument Systems GMBH, "Handbook of LED Metrology", München, Germany, [http://www.instrumentsystems.com/fileadmin/editors/downloads/Products/LED\\_Handbook\\_e.pdf](http://www.instrumentsystems.com/fileadmin/editors/downloads/Products/LED_Handbook_e.pdf)
- [24] Conway K. M., J. D. Bullough, "Will LEDs transform traffic signals as they did exit signs?", Proceedings of the Illuminating Engineering Society of North America Annual Conference, New Orleans, Louisiana, New York, NY: Illuminating Engineering Society of North America, August 9–11 1999, <http://www.lrc.rpi.edu/resources/pdf/57-1999.pdf>
- [25] Ines Lima Azevedo, M. Granger Morgan, and Fritz Morgan, "The Transition to Solid-State Lighting", Proceedings of the IEEE, Vol. 97, No. 3, March 2009, <http://www.andrew.cmu.edu/user/sgradeck/DOCS/TransitiontoSSL.pdf>
- [26] James R Benya, "Lighting Calculations in the LED Era", Cree LED Lighting, May 15, 2011, [http://www.cree.com/~media/Files/Cree/Lighting/Misc Tech Docs/LightingCalculationsintheLEDEra\\_Benya.pdf](http://www.cree.com/~media/Files/Cree/Lighting/Misc Tech Docs/LightingCalculationsintheLEDEra_Benya.pdf)
- [27] U.S. Department of Energy, "Energy efficiency and renewable technology, building technologies program, DOE solid-state lighting CALiPER program: Summary of results Round 20 of product testing", September 2013, [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/caliper\\_20\\_summary.pdf](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/caliper_20_summary.pdf)

- [28] David DiLaura, Kevin Houser, Richard Mistrick, Gary Steffy, "The IESNA Lighting Handbook", 10th ed., Illuminating Engineering Society of North America, 2011, ISBN # 978-0-87995-241-9
- [29] International Energy Agency, "Light's labours lost: Policies for energy-efficient lighting, in support of the G8 plan of action", OECD/IEA, 2006, <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/light2006.pdf>
- [30] Don Klipstein, "Why LEDs can be 10-15 times as efficient as incandescents in some applications, but only 3-4 times as efficient in general home lighting!", Feb. 2014, <http://donklipstein.com/lede.html>
- [31] Cree, Inc., "Cree Sets New R&D Performance Record with 276 Lumen-Per-Watt Power LED", February 13, 2013, <http://www.cree.com/news-and-events/cree-news/press-releases/2013/february/276-lpw>
- [32] Solid-state lighting research and development: Multi-year program, Navigant Consulting, Inc., May 2014, prepared for Lighting Research and Development Building Technologies Program, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, U.S. Dept. of Energy, [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/ssl\\_mypp2014\\_web.pdf](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/ssl_mypp2014_web.pdf)
- [33] Wikipedia, "CIE 1931 color space", [http://en.wikipedia.org/wiki/CIE\\_1931\\_color\\_space](http://en.wikipedia.org/wiki/CIE_1931_color_space)
- [34] National Institute of Standards and Technology, Physics Laboratory, Optical Technology Division, "Color rendering of light sources", July 24, 2009 [http://www.nist.gov/pml/div685/grp03/vision\\_color.cfm](http://www.nist.gov/pml/div685/grp03/vision_color.cfm)
- [35] M. S. Rea, A. R. Robertson, W. M. Petrusic, "Color rendering of skin under fluorescent lamp illumination", Color Res. Applicat., vol. 15, no. 2, 2007, <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/col.5080150206/abstract>
- [36] National Institute of Standards and Technology, Physics Laboratory, Optical Technology Division, "Spectrally tunable lighting facility", October 2, 2012, [http://www.nist.gov/pml/div685/grp03/vision\\_lighting.cfm](http://www.nist.gov/pml/div685/grp03/vision_lighting.cfm)
- [37] HIS, "Information Technology Equipment - Radio Disturbance Characteristics - Limits and Methods of Measurement, Internal Harmonized Standard EN55022", 2006, <http://www.global.ihs.com/>
- [38] Poplawski, M. & Miller, N.J., "Exploring flicker in Solid-State Lighting: What you might find, and how to deal with it", Pacific Northwest National Laboratory, <http://www.e3tnw.org/Documents/2011%20IES%20flicker%20paper%20poplawski-miller-FINAL.pdf>
- [39] Alliance for Solid-State Illumination Systems and Technologies (ASSIST), "ASSIST recommends... Flicker Parameters for Reducing Stroboscopic Effects from Solid-State Lighting Systems", Vol. 11, Iss. 1. Troy, N.Y.: Lighting Research Center, 2012, <http://www.lrc.rpi.edu/programs/solidstate/assist/pdf/AR-Flicker.pdf>
- [40] Sean Fuller, "The Financial and Environmental Benefits of LED Lighting in Public Buildings", Bluestone Energy Services, TriplePundit, Thursday October 3rd, 2013, <http://www.triplepundit.com/2013/10/led-lighting-public-buildings/>

- [41] Δημήτριος Παναγιώτης Τ. Νικολάου, “Η εφαρμογή των LED στον φωτισμό δρόμων και οι προοπτικές εξοικονόμησης ενέργειας”, Διπλωματική εργασία, Φραγκίσκος Τοπαλής, Ε.Μ.Π., Αθήνα, Σεπτέμβριος 2013, [http://artemis.cslab.ntua.gr/el\\_thesis/artemis.ntua.ece/DT2014-0038/DT2014-0038.pdf](http://artemis.cslab.ntua.gr/el_thesis/artemis.ntua.ece/DT2014-0038/DT2014-0038.pdf)
- [42] Smart Digital Media, “Λαμπτήρες Εξοικονόμησης Ενέργειας LED 4ης γενιάς”, [http://www.sts.gr/?page\\_id=1480](http://www.sts.gr/?page_id=1480)
- [43] energypress, “Εξοικονόμηση έως 85% από πρόγραμμα φωτισμού LED της Philips”, Jul 4, 2012, <http://www.energypress.gr/news/Exoikonomhsh-ews-85-prokyptei-apo-programma-fwismoy-LED-ths-Philips>
- [44] ecoboiler, “Εξοικονόμηση ενέργειας στον φωτισμό με λαμπτήρες LED”, <http://ecoboiler.gr/%CE%B5%CE%BE%CE%BF%CE%B9%CE%BA%CE%BF%CE%BD%CF%8C%CE%BC%CE%B7%CF%83%CE%B7-%CE%B5%CE%BD%CE%AD%CF%81%CE%B3%CE%B5%CE%B9%CE%B1%CF%82-%CF%83%CF%84%CE%BF%CE%BD-%CF%86%CF%89%CF%84%CE%B9%CF%83%CE%BC%CF%8C/>
- [45] LEDs Magazine, “DOE estimates energy-saving potential of LEDs in general lighting through 2030”, <http://www.ledsmagazine.com/articles/2012/01/doe-estimates-energy-saving-potential-of-leds-in-general-lighting-through-2030.html>
- [46] LeahRae, “Replacing Aluminum with Thermoplastic in Heat Sinks Cuts Cost by 20-30 %”, LEDinside, a Business Division of TrendForce Corp., September.6, 2013, [http://www.ledinside.com/interview/2013/9/replacing\\_aluminum\\_with\\_thermoplastic\\_in\\_heat\\_sinks\\_cuts\\_cost\\_by\\_20\\_30](http://www.ledinside.com/interview/2013/9/replacing_aluminum_with_thermoplastic_in_heat_sinks_cuts_cost_by_20_30)
- [47] Smartech Global Solutions Ltd., “Plastics show sustainable promise for heat management in LED applications”, Plastemart, Technical Articles & Reports on Plastic Industry, <http://www.plastemart.com/upload/literature/Plastics-heat-management-in-LED-Light-Emitting-Diodes-applications.asp>
- [48] LED Professional, “Philips and DSM Announce Breakthrough Sustainable Solution for Heat Management”, Apr 28, 2009, <http://www.led-professional.com/products/led-lamps/philips-and-dsm-announce-breakthrough-sustainable-solution-for-heat-management>
- [49] Cool Polymers, “CoolPoly® Thermally Conductive Plastics For Light Emitting Diodes (LED)”, <http://www.coolpolymers.com/led.asp>
- [50] Cool Polymers, “CoolPoly® D5506 Thermally Conductive Liquid Crystalline Polymer (LCP)”, Product Data, Rev. 12/12/2013, [http://www.coolpolymers.com/files/ds/Datasheet\\_d5506.pdf](http://www.coolpolymers.com/files/ds/Datasheet_d5506.pdf)
- [51] Logan Brook Hedin, David Michael Miller, “Thermally conductive polymer based printed circuit board”, patent US 20100012354 A1, 13 Jul. 2009, <http://www.google.com/patents/US20100012354>
- [52] Cool Polymers, “CoolPoly® D5108 Thermally Conductive Polyphenylene Sulfide (PPS)”, Product Data, Rev. 8/8/2007, [http://www.coolpolymers.com/Files/DS/Datasheet\\_d5108.pdf](http://www.coolpolymers.com/Files/DS/Datasheet_d5108.pdf)

- [53] Cool Polymers, “CoolPoly® E5101 Thermally Conductive Polyphenylene Sulfide (PPS)”, Product Data, Rev. 27/8/2007,  
[http://www.coolpolymers.com/Files/DS/Datasheet\\_e5101.pdf](http://www.coolpolymers.com/Files/DS/Datasheet_e5101.pdf)
- [54] LEDs Magazine, “Raheama carbon fiber filler offers high thermal conductivity”, 21 May 2009,  
<http://www.ledsmagazine.com/ugc/2009/05/raheama-carbon-fiber-filler-offers-high-thermal-conductivity.html>
- [55] Lucintel, “Raheama Carbon Fiber Filler Promises Better-than-Metals Heat Dissipation”, CompositesWeek No. 21, Vol. 11, May 26, 2009,  
[http://www.lucintel.com/news/raheama\\_carbon\\_fiber\\_filler\\_promises\\_betterthanmetals\\_heat\\_dissipation.aspx](http://www.lucintel.com/news/raheama_carbon_fiber_filler_promises_betterthanmetals_heat_dissipation.aspx)
- [56] ΜΑΛΑΜΑΣ ΣΤΕΛΙΟΣ ΟΕ, “Τατνία LED μη στεγανή αυτοκόλλητη IP33 60led/m 12V-DC 14,4w 1,2A/M 960lm WW Θερμό Λευκό 3000K”,  
[http://malama.com.gr/index.php?id\\_product=64&controller=product&id\\_lang=2](http://malama.com.gr/index.php?id_product=64&controller=product&id_lang=2)
- [57] Wayfair Australia PTY LTD, “Dimmable 2U Mini LED Light Bulb Liquid LEDs”, <http://www.wayfair.com.au/Liquid-LEDs-Dimmable-2U-Mini-LED-Light-Bulb-C10-LIQA1034.html>