

Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Βελτιστοποίηση αλγορίθμου μοντέλου ρεύματος παράλληλων
διατάξεων διαφορετικής απόδοσης για QWLEDs

Πινακουλάκης Ανδρέας

ΑΜ:1543

Επιβλέπων Καθηγητής

Τσορμπατζόγλου Ανδρέας

Άρτα, ...2025

Ευχαριστίες

Περίληψη

Abstract

1 Περιεχόμενα

1	Περιεχόμενα.....	4
1	Εισαγωγή.....	6
1.1	Ιστορική Αναδρομή.....	7
1.2	Δομή και Λειτουργία της Επαφής p-n.....	8
1.3	Βασικές Αρχές Λειτουργίας των LED.....	9
1.4	Κατηγορίες LED.....	9
1.5	Εισαγωγή στο μLED.....	11
1.6	Βασικές Διαφορές μεταξύ μLED και Συμβατικών LED.....	12
1.7	Πλεονεκτήματα της τεχνολογίας μLED.....	14
1.8	Μειονεκτήματα της τεχνολογίας μLED.....	15
1.9	Εφαρμογές των μLED.....	17
2	Συμπαγές αναλυτικό μοντέλο ρεύματος των μLEDs.....	18
2.1	Βασικές εξισώσεις του μοντέλου.....	18
2.2	Εφαρμογή του μοντέλου ρεύματος σε πραγματικές διατάξεις.....	21
2.3	Πλευρικές ατέλειες και πλευρική επανασύνδεση στα μLEDs.....	22
2.4	Ενσωμάτωση της πλευρικής επανασύνδεσης στο μοντέλο ρεύματος.....	24
2.5	Αλγόριθμος βελτιστοποίησης των παραμέτρων του μοντέλου.....	26
3	Εφαρμογή του Συμπαγούς Μοντέλου στα μLEDs σε Πειραματικές Διατάξεις.....	27
3.1	Μπλε μLEDs.....	29
3.2	Πράσινα μLEDs.....	32
4	Βελτιστοποιημένος αλγόριθμος εξαγωγής.....	36
4.1	Ανάπτυξη του αλγορίθμου.....	36
4.2	Ακρίβεια της μεθόδου.....	39
4.3	Συμπεράσματα.....	36
5	Γενικά συμπεράσματα και μελλοντικές κατευθύνσεις.....	36

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1. LED διαφόρων χρωμάτων

Σχήμα 2. μ LED

Σχήμα 3. Πλεονεκτήματα LED τεχνολογιών

Σχήμα 4. Τύποι εκπομπής διαφόρων τύπων LED

Σχήμα 5. Σχηματική αναπαράσταση μ LED με (a) πολλά πηγάδια δυναμικού, (b) ένα ισοδύναμο πηγάδι δυναμικού και (c) εφαρμογή ορθής πόλωσης

Σχήμα 6. Ρεύμα πυκνότητας-τάσης προώθησης (J-V) των μπλε και πράσινων μικρο-LEDs (μ LEDs) με διάφορες διαμέτρους d.

Σχήμα 7. Σχηματική διάταξη της δομής του μ LED για συμπαγή μοντελοποίηση.

Σχήμα 8. πειραματικά δεδομένα προώθησης J-Va του μπλε μ LED με διάμετρο $d=11.6 \mu\text{m}$

Σχήμα 9. Πειραματικά δεδομένα J-Va των μπλε μ LEDs

Σχήμα 10. Πειραματικά δεδομένα J-Va των πράσινων μ LEDs

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1. Παράμετροι Μοντέλου

1 Εισαγωγή

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εστιάζει στην ανάπτυξη και πειραματική επαλήθευση ενός αναλυτικού συμπαγούς μοντέλου χαρακτηριστικών $I-V$ για μικροδιόδους εκπομπής φωτός (μLEDs) με πολλαπλά κβαντικά φρεάτια (QWs) στην περιοχή απογύμνωσης. Στόχος είναι η κατανόηση των ηλεκτρικών συμπεριφορών των μLEDs και η ακριβής περιγραφή τους μέσω φυσικών παραμέτρων, ώστε να ενισχυθεί η δυνατότητα προσομοίωσης και σχεδιασμού τέτοιων διατάξεων για βελτιωμένες επιδόσεις. Το μοντέλο αυτό εφαρμόζεται σε πειραματικά δεδομένα LEDs αποδεικνύοντας την αξιοπιστία και ακρίβειά του στην περιγραφή ρευμάτων και φαινομένων όπως το “kink effect”.

Η εργασία διαρθρώνεται σε πέντε βασικά κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή στη θεωρία λειτουργίας των LED, με έμφαση στη δομή p-n και τις βασικές αρχές λειτουργίας. Το δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά των μικροLEDs, τις διαφορές τους σε σχέση με τα συμβατικά LEDs, τις τεχνολογίες κατασκευής και τις σχετικές εφαρμογές. Στο τρίτο κεφάλαιο αναπτύσσεται το αναλυτικό μοντέλο $I-V$, με φυσικές εξισώσεις που περιγράφουν την ενεργή και την ελαττωματική περιοχή των LEDs. Ακολουθεί το τέταρτο κεφάλαιο, όπου γίνεται εφαρμογή του μοντέλου σε πραγματικά πειραματικά δεδομένα και εξαγωγή κρίσιμων παραμέτρων μέσω αριθμητικής προσαρμογής. Το πέμπτο κεφάλαιο περιλαμβάνει τα συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική επέκταση της μελέτης.

Η δίοδος εκπομπής φωτός (LED - Light Emitting Diode) είναι ένας ημιαγωγός που εκπέμπει φως όταν διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα. Η λειτουργία της βασίζεται στο φαινόμενο της ηλεκτροφωταύγειας, όπου τα ηλεκτρόνια και οι οπές επανασυνδέονται, εκπέμποντας φωτόνια. Το χρώμα του εκπεμπόμενου φωτός εξαρτάται από το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού, επιτρέποντας την παραγωγή φωτός σε διάφορα μήκη κύματος, από το υπεριώδες έως το υπέρυθρο.

1.1 Ιστορική Αναδρομή

Η ιστορία των LED ξεκινά στις αρχές του 20ού αιώνα. Το 1907, ο Άγγλος πειραματιστής H.J. Round παρατήρησε για πρώτη φορά το φαινόμενο της ηλεκτροφωταύγειας σε κρύσταλλο καρβιδίου του πυριτίου (SiC) . Ανεξάρτητα, ο Ρώσος επιστήμονας Oleg Losev μελέτησε το φαινόμενο αυτό τη δεκαετία του 1920, δημοσιεύοντας το 1927 λεπτομερή αναφορά για τις παρατηρήσεις του . Ωστόσο, οι περιορισμοί της εποχής δεν επέτρεψαν την άμεση πρακτική εφαρμογή αυτών των ανακαλύψεων. Η πρώτη πρακτική δίοδος εκπομπής φωτός αναπτύχθηκε το 1962 από τον Nick Holonyak Jr., ο οποίος δημιούργησε το πρώτο LED που εξέπεμπε ορατό κόκκινο φως . Αυτή η εξέλιξη άνοιξε τον δρόμο για τη χρήση των LED ως δεικτών σε ηλεκτρονικές συσκευές. Στα τέλη της δεκαετίας του 1960, τα πρώτα εμπορικά LED κατασκευάστηκαν από υλικά όπως το γάλλιο, το αρσενικό και ο φώσφορος (GaAsP), εκπέμποντας κόκκινο φως με μήκος κύματος 655 nm. Κατά τη δεκαετία του 1970, η τεχνολογία προχώρησε με την ανάπτυξη LED που εξέπεμπαν σε διάφορα χρώματα, όπως πράσινο, πορτοκαλί και κίτρινο, χρησιμοποιώντας υλικά όπως το GaP και το GaAsP. Ωστόσο, η φωτεινότητά τους ήταν περιορισμένη, καθιστώντας τα κατάλληλα κυρίως για εσωτερικές ενδείξεις. Η επόμενη σημαντική πρόοδος σημειώθηκε τη δεκαετία του 1990 με την ανάπτυξη των μπλε και πράσινων LED υψηλής φωτεινότητας, χάρη στη χρήση υλικών όπως το νιτρίδιο του γαλλίου (GaN) . Αυτή η εξέλιξη οδήγησε στη δημιουργία λευκού φωτός μέσω του συνδυασμού κόκκινου, πράσινου και μπλε φωτός ή με τη χρήση φωσφόρων, επιτρέποντας την ευρεία εφαρμογή των LED στον γενικό φωτισμό.

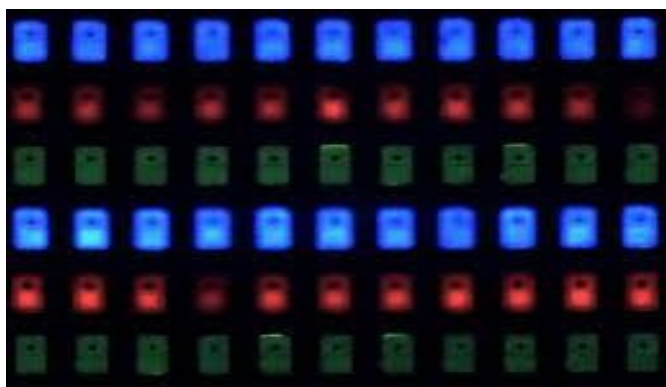


Σχήμα 1. LED διαφόρων χρωμάτων

Σήμερα, τα LED έχουν εξελιχθεί σημαντικά, προσφέροντας υψηλή ενεργειακή απόδοση, μεγάλη διάρκεια ζωής και ευελιξία σε εφαρμογές. Χρησιμοποιούνται σε ποικιλία τομέων, όπως ο γενικός φωτισμός, οι οθόνες, οι ενδείξεις, ο φωτισμός οχημάτων και οι ιατρικές συσκευές. Η συνεχής έρευνα επικεντρώνεται στη βελτίωση της απόδοσης, της ποιότητας φωτός και της μείωσης του κόστους παραγωγής, καθιστώντας τα LED την κυρίαρχη τεχνολογία φωτισμού στον 21ο αιώνα.[1]

1.2 Δομή και Λειτουργία της Επαφής p-n

Η επαφή p-n σχηματίζεται όταν ένας ημιαγωγός τύπου p (με περίσσεια οπών) συνδέεται με έναν ημιαγωγό τύπου n (με περίσσεια ηλεκτρονίων). Στην περιοχή επαφής, τα ηλεκτρόνια και οι οπές ανασυνδυάζονται, δημιουργώντας μια ζώνη εξάντλησης χωρίς ελεύθερους φορείς φορτίου. Αυτή η ζώνη λειτουργεί ως φράγμα που εμποδίζει την περαιτέρω κίνηση φορέων φορτίου. Όταν εφαρμόζεται τάση προς τα εμπρός (θετική τάση στον ημιαγωγό τύπου p και αρνητική στον τύπου n), το φράγμα μειώνεται, επιτρέποντας στα ηλεκτρόνια και τις οπές να κινηθούν προς την περιοχή επαφής. Εκεί, ανασυνδυάζονται, και η ενέργεια που απελευθερώνεται κατά τη διαδικασία αυτή εκπέμπεται με τη μορφή φωτονίων, δηλαδή φωτός.



Σχήμα 2.μLED

1.3 Βασικές Αρχές Λειτουργίας των LED

Η εκπομπή φωτός στα LED οφείλεται στην ηλεκτροφωταύγεια, δηλαδή στην εκπομπή φωτός λόγω της ανασύνδεσης ηλεκτρονίων και οπών. Το χρώμα του εκπεμπόμενου φωτός καθορίζεται από το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού υλικού που χρησιμοποιείται. Διάφορα υλικά ημιαγωγών, όπως το γάλλιο, το αρσενικό και το φώσφορο, χρησιμοποιούνται για την παραγωγή διαφορετικών χρωμάτων φωτός. Η απόδοση και η φωτεινότητα των LED εξαρτώνται από την ποιότητα των υλικών, τον σχεδιασμό της επαφής p-n και τις συνθήκες λειτουργίας, όπως η θερμοκρασία και το ρεύμα. Η συνεχής έρευνα και ανάπτυξη στον τομέα των ημιαγωγών έχει οδηγήσει σε LED με υψηλότερη απόδοση, μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και ευρύτερο φάσμα χρωμάτων, καθιστώντας τα κατάλληλα για ποικίλες εφαρμογές, από τον φωτισμό έως τις οθόνες και τις επικοινωνίες.[2]

1.4 Κατηγορίες LED

Τα LED (Light Emitting Diodes) έχουν εξελιχθεί σημαντικά, προσφέροντας ποικιλία τύπων και εφαρμογών. Μπορούμε να τα ταξινομήσουμε με βάση το χρώμα, την ισχύ, την τοποθέτηση, την τεχνολογία οθόνης και μερικά LED έχουν ειδική χρήση. Τα μονοχρωματικά LED εκπέμπουν σε συγκεκριμένο μήκος κύματος, παράγοντας χρώματα όπως κόκκινο, πράσινο, μπλε, κίτρινο και υπέρυθρο σε αντίθεση με τα πολυχρωματικά LED όπου Συνδυάζουν κόκκινα, πράσινα και μπλε LED σε μία συσκευή, επιτρέποντας την παραγωγή ευρέος φάσματος χρωμάτων μέσω της

ρύθμισης της έντασης κάθε χρώματος. Τα λευκά LED παράγουν λευκό φως είτε μέσω συνδυασμού RGB LED είτε με τη χρήση μπλε LED και φωσφόρου που μετατρέπει το μπλε φως σε λευκό. Όσο αφορά την ισχύ υπάρχουν τα χαμηλής Ισχύος LED όπου χρησιμοποιούνται σε ενδείξεις, τηλεχειριστήρια και μικρές ηλεκτρονικές συσκευές. Τα υψηλής Ισχύος LED εφαρμόζονται σε φωτιστικά σώματα, προβολείς και άλλες εφαρμογές που απαιτούν υψηλή φωτεινότητα. Υπάρχουν και LED που διαφέρουν σχεδιαστικά όπως τα SMD LED (Surface-Mount Device) που είναι μικρού μεγέθους LED που τοποθετούνται επιφανειακά σε πλακέτες κυκλωμάτων, χρησιμοποιούνται σε οθόνες, φωτιστικά πάνελ και ταινίες, και τα COB LED (Chip on Board) που περιλαμβάνουν πολλαπλά LED τσιπ σε μία επιφάνεια, προσφέροντας υψηλή φωτεινότητα και ομοιόμορφο φωτισμό, κατάλληλα για προβολείς και γενικό φωτισμό. Υπάρχουν LED και με ειδικές ιδιότητες όπως τα UV LED που εκπέμπουν υπεριώδες φως, χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές απολύμανσης, ιατρικές συσκευές και ανιχνευτές πλαστών εγγράφων, και υπάρχουν και τα IR LED που εκπέμπουν υπέρυθρο φως, χρησιμοποιούνται σε τηλεχειριστήρια, συστήματα νυχτερινής όρασης και αισθητήρες κίνησης. Κυκλοφορούν και αρκετοί τύποι οθονών με τεχνολογία LED όπως οι απλές LED Οθόνες που χρησιμοποιούν LED για τον οπίσθιο φωτισμό, προσφέροντας βελτιωμένη φωτεινότητα και αντίθεση, οι OLED (Organic LED) που χρησιμοποιούν οργανικά υλικά που εκπέμπουν φως, επιτρέποντας την κατασκευή λεπτών, ευέλικτων οθονών με υψηλή ποιότητα εικόνας, και τέλος οι QLED που χρησιμοποιούν τεχνολογία κβαντικών κουκκίδων για την ενίσχυση της φωτεινότητας και της χρωματικής απόδοσης σε οθόνες. Η συνεχής εξέλιξη της τεχνολογίας LED οδηγεί σε νέες κατηγορίες και εφαρμογές, καθιστώντας τα LED αναπόσπαστο μέρος της σύγχρονης τεχνολογίας φωτισμού και απεικόνισης.[3]

1.5 Εισαγωγή στο μLED

Η τεχνολογία μLED αποτελεί μια επαναστατική καινοτομία με εφαρμογές που εκτείνονται πέρα από τις οθόνες, καλύπτοντας τομείς όπως ο φωτισμός, οι προβολείς, οι αισθητήρες και οι φορητές συσκευές. Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά της είναι το εξαιρετικά μικρό μέγεθος των μLED, που συχνά δεν ξεπερνούν τα 100 μικρόμετρα. Αυτό επιτρέπει τη χρήση τους σε εφαρμογές υψηλής πυκνότητας, όπως wearables, συσκευές IoT και αισθητήρες. Τα μLED λειτουργούν ως αυτόνομες

φωτοδιόδους, παράγοντας φως και χρώμα χωρίς την ανάγκη για εξωτερικά φίλτρα ή διαχυτές. Η υψηλή φωτεινότητά τους και η ενεργειακή τους αποδοτικότητα τα καθιστούν ιδανικά για εφαρμογές όπως οι προβολείς και τα φώτα ασφαλείας. Ταυτόχρονα, λόγω της λειτουργίας τους μόνο όταν είναι απαραίτητο, προσφέρουν σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας, κάτι που είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε φορητές συσκευές και εφαρμογές με περιορισμένη παροχή ενέργειας. Η τεχνολογία αυτή διακρίνεται για τη μεγάλη αντοχή της, με τα μLED να είναι ανθεκτικά σε υψηλές θερμοκρασίες, κραδασμούς και φθορές. Αυτό τα καθιστά ιδανικά για απαιτητικές βιομηχανικές και στρατιωτικές εφαρμογές. Παράλληλα, τα μLED μπορούν να εκπέμπουν φως σε ένα ευρύ φάσμα χρωμάτων, καλύπτοντας τόσο τα RGB όσο και μήκη κύματος πέρα από αυτά. Αυτό τα κάνει κατάλληλα για φωτιστικά μεταβλητού χρώματος και εφαρμογές που απαιτούν υψηλή χρωματική απόδοση. Η ευελιξία σχεδιασμού είναι ένα ακόμη χαρακτηριστικό τους, καθώς το μικροσκοπικό τους μέγεθος επιτρέπει τη δημιουργία εύκαμπτων, διαφανών και προσαρμόσιμων συστημάτων φωτισμού. Επιπλέον, η ταχύτητα απόκρισής τους, που λειτουργεί σε επίπεδο νανοδευτερολέπτων, τα καθιστά ιδανικά για συστήματα επικοινωνίας μέσω φωτός, όπως το Li-Fi, αλλά και για αισθητήρες που απαιτούν άμεση ανταπόκριση. Η δυνατότητα ενσωμάτωσης των μLED με άλλες τεχνολογίες, όπως αισθητήρες και μικροεπεξεργαστές, επιτρέπει τη δημιουργία σύνθετων συστημάτων, όπως φορητές ιατρικές συσκευές ή έξυπνα φωτιστικά. Επιπλέον, η βιοσυμβατότητά τους ανοίγει τον δρόμο για βιοϊατρικές εφαρμογές, όπως εμφυτεύσιμες συσκευές ή συστήματα φωτοθεραπείας. Παρά τα πλεονεκτήματά τους, η παραγωγή μLED είναι τεχνικά απαιτητική και ακριβή. Η ανάγκη ακρίβειας στη συναρμολόγηση εκατομμυρίων μικροσκοπικών LEDs περιορίζει προς το παρόν τη μαζική υιοθέτησή τους. Ωστόσο, οι μοναδικές ιδιότητες και η ευελιξία τους τα καθιστούν μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία για εφαρμογές τόσο στον καθημερινό όσο και στον επαγγελματικό τομέα.

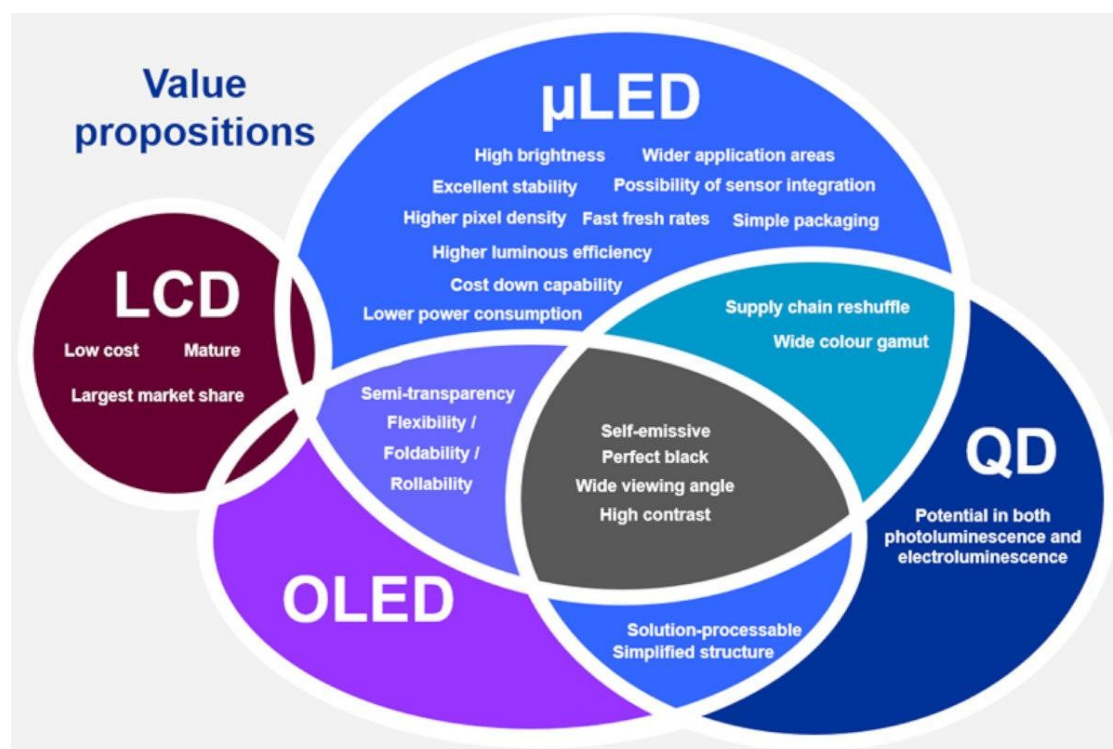
[6]

1.6 Βασικές Διαφορές μεταξύ μLED και Συμβατικών LED

Η τεχνολογία μLED αποτελεί μια εξέλιξη της παραδοσιακής τεχνολογίας LED, με σημαντικές διαφορές σε επίπεδο σχεδιασμού, λειτουργίας και εφαρμογών. Η πρώτη βασική διαφορά αφορά το μέγεθος και την κλίμακα. Τα μLED είναι εξαιρετικά

μικροσκοπικά, με μέγεθος που συνήθως κυμαίνεται από 1 έως 100 μικρόμετρα, κάτι που τα καθιστά κατάλληλα για εφαρμογές υψηλής πυκνότητας, όπως οθόνες, φορητές συσκευές (wearables) και αισθητήρες. Από την άλλη, τα συμβατικά LED είναι μεγαλύτερα και χρησιμοποιούνται κυρίως για φωτισμό ή ενδείξεις, χωρίς την ίδια δυνατότητα να ενσωματωθούν σε πολύ μικρούς χώρους. Επιπλέον, τα μLED λειτουργούν ως αυτόνομες φωτοδιόδους, που εκπέμπουν φως και χρώμα, χωρίς την ανάγκη εξωτερικών φίλτρων ή οπίσθιου φωτισμού. Κάθε pixel είναι αυτόνομο και μπορεί να παράγει το δικό του φως. Αντίθετα, τα συμβατικά LED χρησιμοποιούνται για παραγωγή φωτός και συχνά απαιτούν πρόσθετα στοιχεία, όπως φακούς ή διαχυτές, για να κατευθύνουν και να ελέγξουν τη διαχείριση του φωτισμού. Σε σχέση με τη φωτεινότητα και την ενεργειακή απόδοση, τα μLED προσφέρουν εξαιρετική φωτεινότητα με υψηλή ενεργειακή αποδοτικότητα. Λόγω του μικρού τους μεγέθους, καταφέρνουν να παράγουν έντονο φως με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, κάτι που τα καθιστά κατάλληλα για προηγμένες εφαρμογές που απαιτούν υψηλές επιδόσεις και εξοικονόμηση ενέργειας. Από την άλλη, τα συμβατικά LED, αν και ενεργειακά αποδοτικά, είναι λιγότερο αποτελεσματικά σε εφαρμογές που απαιτούν σύνθετη διαχείριση φωτός και ακριβή ρύθμιση της φωτεινότητας. Μια ακόμα σημαντική διαφορά είναι η απόδοση των μαύρων και η αντίθεση. Τα μLED μπορούν να σβήνουν πλήρως, προσφέροντας πραγματικά μαύρα και εξαιρετική αντίθεση. Αυτή η δυνατότητα είναι ιδιαίτερα σημαντική σε οθόνες υψηλής ποιότητας και σε συστήματα προβολής. Αντίθετα, τα συμβατικά LED δεν προσφέρουν την ίδια απόδοση στην αντίθεση, καθώς δεν είναι σε θέση να πετύχουν το ίδιο επίπεδο μαύρων και φωτεινότητας. Όσον αφορά την ευελιξία εφαρμογών, τα μLED είναι εξαιρετικά ευέλικτα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μια ποικιλία από προηγμένες εφαρμογές. Αυτό περιλαμβάνει οθόνες υψηλής ανάλυσης, εύκαμπτα και διαφανή συστήματα φωτισμού, φορητές συσκευές και επικοινωνία μέσω φωτός (Li-Fi). Αντίθετα, τα συμβατικά LED χρησιμοποιούνται κυρίως για φωτισμό, ενδείξεις και απλές οθόνες. Η διάρκεια ζωής και η αντοχή των μLED είναι επίσης εξαιρετική. Αυτά τα LED είναι ανθεκτικά σε φθορές, υψηλές θερμοκρασίες και δεν υποφέρουν από φαινόμενα όπως το burn-in, το οποίο παρατηρείται σε άλλες τεχνολογίες, όπως η OLED. Τα συμβατικά LED, αν και προσφέρουν επίσης μεγάλη διάρκεια ζωής, δεν διαθέτουν την ίδια ανθεκτικότητα και ακρίβεια χρώματος σε πιο εξελιγμένες εφαρμογές. Τέλος, η παραγωγή των μLED είναι πιο τεχνικά απαιτητική και ακριβή, καθώς απαιτεί σύνθετες διαδικασίες για την κατασκευή εκατομμυρίων

μικροσκοπικών LEDs. Αυτό περιορίζει τη μαζική υιοθέτηση των μLED για την ώρα. Αντίθετα, τα συμβατικά LED είναι πιο οικονομικά και η παραγωγή τους είναι πιο απλή, γεγονός που τα καθιστά πιο προσιτά για γενικό φωτισμό και εφαρμογές ενδείξεων. Συνολικά, η βασική διαφορά μεταξύ μLED και συμβατικών LED έγκειται στον σχεδιασμό και τις δυνατότητες εφαρμογής. Τα μLED είναι ιδανικά για προηγμένες εφαρμογές, όπως οθόνες υψηλής ανάλυσης, φωτιστικά μεταβλητού χρώματος, σύνθετα συστήματα φωτισμού και φορητές συσκευές, ενώ τα συμβατικά LED παραμένουν η καλύτερη επιλογή για πιο βασικές εφαρμογές φωτισμού και ενδείξεων. [4]



Σχήμα 3. Πλεονεκτήματα LED τεχνολογιών

1.7 Πλεονεκτήματα της τεχνολογίας μLED

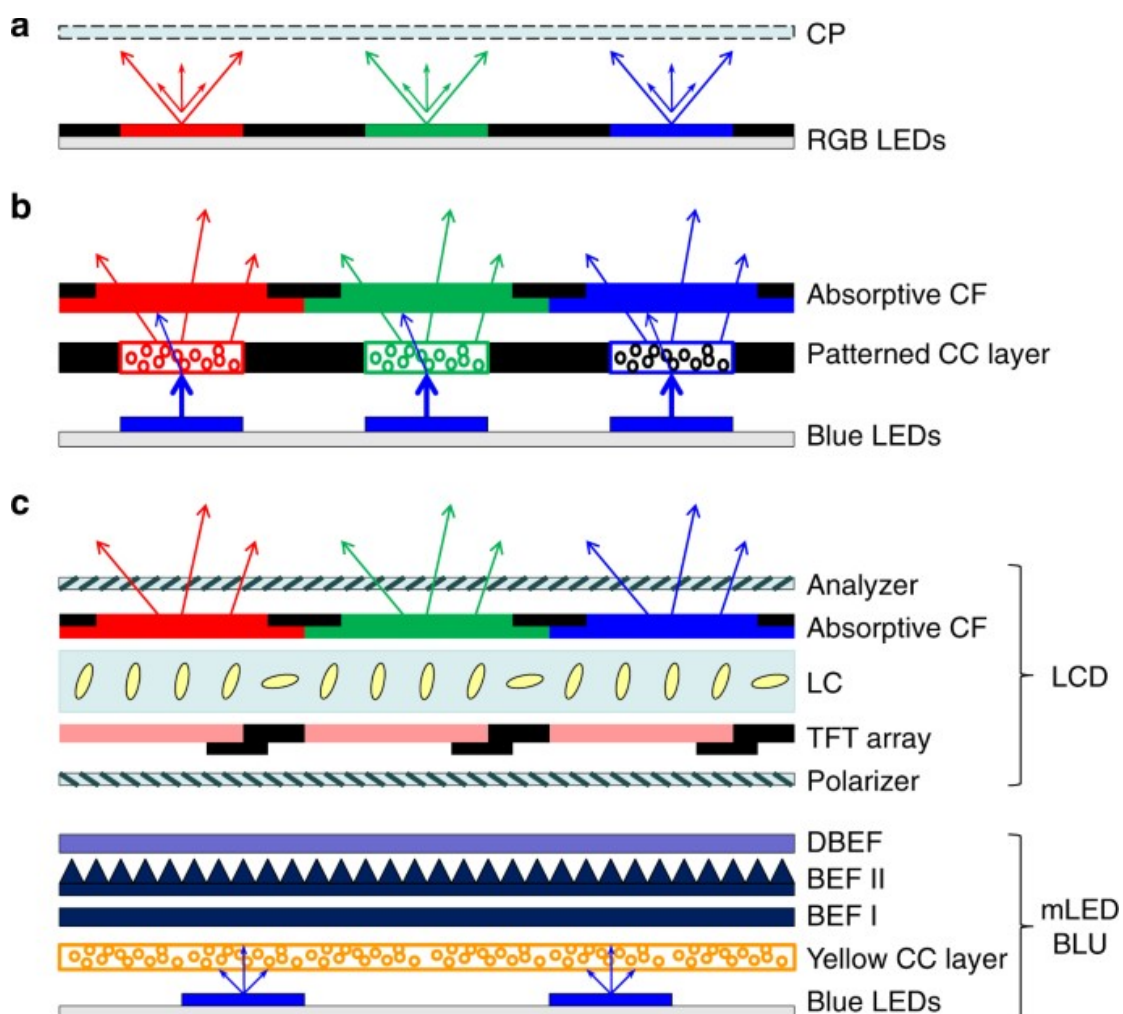
Τα μLED προσφέρουν μια σειρά από πλεονεκτήματα που τα καθιστούν πολύ χρήσιμα σε πολλές διαφορετικές εφαρμογές. Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα τους είναι η εξαιρετική ενεργειακή αποδοτικότητα. Λόγω της αυτόνομης λειτουργίας κάθε pixel, χωρίς την ανάγκη οπίσθιου φωτισμού ή φίλτρων, καταναλώνουν πολύ λιγότερη ενέργεια σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες φωτισμού. Αυτή η χαρακτηριστική αποδοτικότητα τους καθιστά ιδανικά για εφαρμογές σε συσκευές με περιορισμένη

ενέργεια, όπως φορητά gadgets ή αισθητήρες. Η υψηλή φωτεινότητα που μπορούν να προσφέρουν τα μLED τα καθιστά ιδανικά για εφαρμογές που απαιτούν έντονο φωτισμό ή για συνθήκες με αυξημένες ανάγκες φωτεινότητας. Επιπλέον, η ποιότητα του φωτός που παράγουν είναι άριστη, επιτρέποντας την εφαρμογή τους σε περιβάλλοντα όπου η ποιότητα του φωτισμού είναι κρίσιμη, όπως για παράδειγμα σε φωτιστικά μεταβλητού χρώματος ή ειδικές συσκευές. Τα μLED είναι επίσης εξαιρετικά ανθεκτικά σε διάφορες συνθήκες περιβάλλοντος. Η τεχνολογία τους τους καθιστά ανθεκτικούς σε υψηλές θερμοκρασίες, κραδασμούς και φθορές, γεγονός που τους επιτρέπει να χρησιμοποιηθούν σε απαιτητικά περιβάλλοντα, όπως βιομηχανικά ή στρατιωτικά, όπου άλλες τεχνολογίες ενδέχεται να υποστούν βλάβες. Αυτή η ανθεκτικότητα τους καθιστά επίσης κατάλληλα για εφαρμογές σε εξωτερικούς χώρους. Η ευελιξία των μLED είναι άλλο ένα μεγάλο πλεονέκτημα. Λόγω του μικρού τους μεγέθους, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές με περιορισμένο χώρο, όπως φορητές συσκευές, αισθητήρες ή συστήματα επικοινωνίας μέσω φωτός (Li-Fi). Το μικρό τους μέγεθος επιτρέπει επίσης την ενσωμάτωσή τους σε σύνθετα συστήματα που απαιτούν πολύπλοκους αισθητήρες ή μικροεπεξεργαστές, ανοίγοντας νέες δυνατότητες για καινοτόμες τεχνολογίες. Η διάρκεια ζωής των μLED είναι επίσης εντυπωσιακή. Δεν παρουσιάζουν το πρόβλημα του burn-in, το οποίο μπορεί να επηρεάσει άλλες τεχνολογίες, όπως η OLED, εξασφαλίζοντας έτσι μεγαλύτερη αξιοπιστία και μακροχρόνια χρήση χωρίς απώλεια ποιότητας ή φωτεινότητας. Αυτό τους καθιστά ιδιαίτερα χρήσιμους σε εφαρμογές που απαιτούν συνεχιζόμενη λειτουργία με ελάχιστη συντήρηση. Τέλος, τα μLED προσφέρουν εξαιρετική απόδοση σε διαφορετικά χρώματα και συχνότητες φωτός. Αυτό τους καθιστά χρήσιμους σε εφαρμογές φωτισμού με μεταβλητό χρώμα ή σε συσκευές που απαιτούν ακριβή χρωματική αναπαραγωγή, όπως για παράδειγμα σε βιοϊατρικές συσκευές ή αισθητήρες φωτός. Συνολικά, τα μLED προσφέρουν εξαιρετική ενεργειακή αποδοτικότητα, υψηλή φωτεινότητα, μεγάλη ανθεκτικότητα, ευελιξία εφαρμογών και μεγάλη διάρκεια ζωής, γεγονός που τα καθιστά ιδανικά για μια ποικιλία χρήσεων σε τομείς πέρα από τις οθόνες, όπως φωτισμός, αισθητήρες, φορητές συσκευές και συστήματα επικοινωνίας. [4]

1.8 Μειονεκτήματα της τεχνολογίας μLED

Αν και τα μLED έχουν πολλά πλεονεκτήματα, υπάρχουν και κάποια μειονεκτήματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη, ειδικά όσον αφορά τις εφαρμογές τους σε διάφορους τομείς. Ένα από τα κύρια μειονεκτήματα των μLED είναι η υψηλή τους τιμή παραγωγής. Η τεχνολογία τους απαιτεί εξαιρετική ακρίβεια και πολύπλοκες διαδικασίες παραγωγής, γεγονός που καθιστά την κατασκευή τους πιο δαπανηρή σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες φωτισμού ή LED. Αυτή η ακριβή παραγωγή περιορίζει τη μαζική παραγωγή τους και την ευρεία διάδοση σε πιο οικονομικές εφαρμογές. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι η τεχνική πρόκληση στον τομέα της κατασκευής και της ολοκλήρωσης. Η παραγωγή και η συναρμολόγηση των μικροσκοπικών LED απαιτεί πολύ εξειδικευμένο εξοπλισμό και διαδικασίες, κάτι που καθιστά την κατασκευή των μLED πολύ πιο δύσκολη και χρονοβόρα σε σχέση με άλλες τεχνολογίες. Αυτή η διαδικασία μπορεί να οδηγήσει σε καθυστερήσεις στην παραγωγή και να περιορίσει την κλίμακα εφαρμογής της τεχνολογίας. Επιπλέον, αν και τα μLED είναι εξαιρετικά μικρά, ο αριθμός τους σε μια εφαρμογή μπορεί να είναι τεράστιος. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένη πολυπλοκότητα στον έλεγχο και τη διαχείριση των χιλιάδων ή εκατομμυρίων LEDs που μπορεί να απαιτούν οι συσκευές, κάτι που απαιτεί εξειδικευμένο λογισμικό και hardware για την ομαλή λειτουργία τους. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι η ανάγκη για ειδικές διατάξεις ψύξης σε ορισμένες εφαρμογές. Αν και τα μLED είναι πιο ανθεκτικά σε υψηλές θερμοκρασίες από άλλες τεχνολογίες, ορισμένες εφαρμογές με υψηλή φωτεινότητα ή μεγάλες απαιτήσεις ενέργειας μπορεί να χρειάζονται επιπλέον συστήματα ψύξης για να διατηρήσουν τη σωστή λειτουργία τους, κάτι που προσθέτει κόστος και πολυπλοκότητα στην τελική εφαρμογή. Τέλος, παρά τη μεγάλη τους διάρκεια ζωής και την ανθεκτικότητα, τα μLED ενδέχεται να είναι πιο ευαίσθητα στις πρώτες φάσεις χρήσης τους. Η σύνθετη φύση της τεχνολογίας μπορεί να οδηγήσει σε μικρές αποτυχίες κατά τη διάρκεια της παραγωγής ή εγκατάστασης, κάτι που μπορεί να επηρεάσει τη μακροπρόθεσμη αξιοπιστία, εάν δεν εφαρμοστούν οι κατάλληλες διαδικασίες ελέγχου ποιότητας. Συνολικά, τα μLED παρουσιάζουν κάποια μειονεκτήματα, όπως την υψηλή τιμή παραγωγής, τις τεχνικές προκλήσεις στην κατασκευή, την πολυπλοκότητα στη διαχείριση τους και την ανάγκη για ειδικά συστήματα ψύξης σε ορισμένες περιπτώσεις. Ωστόσο, καθώς η τεχνολογία εξελίσσεται και οι διαδικασίες παραγωγής

βελτιώνονται, τα μειονεκτήματα αυτά ενδέχεται να μειωθούν, κάνοντάς τα ακόμα πιο ελκυστικά για ευρύτερη χρήση στο μέλλον.[4]



Σχήμα 4. Τύποι εκπομπής διαφόρων τύπων LED

1.9 Εφαρμογές των μLED

Τα μLED έχουν πολλές εφαρμογές σε διάφορους τομείς, αξιοποιώντας τα μοναδικά τους χαρακτηριστικά, όπως η υψηλή φωτεινότητα, η ενεργειακή αποδοτικότητα, η εξαιρετική ποιότητα εικόνας και η ανθεκτικότητα. Ένα από τα βασικά πεδία εφαρμογής τους είναι ο φωτισμός. Τα μLED προσφέρουν υψηλή απόδοση

φωτεινότητας και ενεργειακή αποδοτικότητα, καθιστώντας τα ιδανικά για φωτιστικά συστήματα. Η ικανότητά τους να παράγουν φωτεινότητα χωρίς την ανάγκη εξωτερικού φωτισμού ή φίλτρων τα καθιστά επίσης χρήσιμα σε εφαρμογές με μεταβλητό χρώμα, όπως φωτιστικά που απαιτούν προσαρμοσμένο χρωματισμό. Επιπλέον, τα μLED χρησιμοποιούνται ευρέως σε αισθητήρες και διαγνωστικά συστήματα. Λόγω της μικρής τους διάστασης και της ικανότητάς τους να παράγουν υψηλής ποιότητας φως, μπορούν να ενσωματωθούν σε βιοϊατρικές συσκευές για ακριβή φωτισμό ή για ανίχνευση ιοντικών αλλαγών σε διαγνωστικά εργαλεία. Αυτή η τεχνολογία χρησιμοποιείται επίσης για αισθητήρες φωτός και θερμοκρασίας, προσφέροντας αξιόπιστες λύσεις σε διάφορες εφαρμογές. Τα μLED είναι επίσης ιδανικά για φορητές συσκευές και wearables, όπως ρολόγια ή συσκευές παρακολούθησης υγείας. Το μικρό τους μέγεθος, η μεγάλη διάρκεια ζωής και η ενεργειακή αποδοτικότητα τα καθιστούν εξαιρετική επιλογή για αυτές τις συσκευές. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται σε προβολείς και ψηφιακά διαφημιστικά συστήματα, καθώς η υψηλή φωτεινότητα και η εξαιρετική αντίθεση τους τα καθιστούν ιδανικά για εξωτερικές εφαρμογές όπου απαιτείται ισχυρός φωτισμός και καθαρή απεικόνιση. Άλλη σημαντική εφαρμογή των μLED είναι τα συστήματα επικοινωνίας μέσω φωτός (Li-Fi). Αυτή η τεχνολογία, που επιτρέπει τη μετάδοση δεδομένων μέσω φωτός, επωφελείται από τη δυνατότητα των μLED να προσφέρουν αξιόπιστη και γρήγορη μετάδοση δεδομένων μέσω φωτεινών σημάτων, καθιστώντας τους ιδανικούς για τέτοιες εφαρμογές. Τα μLED βρίσκουν επίσης χρήση στην αυτοκινητοβιομηχανία, για φωτιστικά συστήματα αυτοκινήτων, όπως φώτα ημέρας ή άλλα φωτεινά σήματα. Χρησιμοποιούνται επίσης σε αισθητήρες και συστήματα ανίχνευσης κίνησης για την ενίσχυση της ασφάλειας και της απόδοσης των οχημάτων. Στον τομέα της αεροδιαστημικής και των στρατιωτικών εφαρμογών, τα μLED είναι ιδανικά λόγω της ανθεκτικότητάς τους σε υψηλές θερμοκρασίες, κραδασμούς και φθορές. Χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία ανθεκτικών φωτεινών σημάτων και αισθητήρων σε δύσκολες συνθήκες. Τέλος, τα μLED χρησιμοποιούνται στην επαυξημένη και εικονική πραγματικότητα (AR/VR), όπου η υψηλή φωτεινότητα και η εξαιρετική αντίθεση τους ενισχύουν την εμπειρία των χρηστών. Αυτές οι οθόνες προσφέρουν εξαιρετική απόκριση και ποιότητα εικόνας, κάνοντάς τις ιδανικές για εφαρμογές AR/VR. Αυτές οι εφαρμογές δείχνουν τη μεγάλη ευελιξία των μLED και την ικανότητά τους να προσφέρουν καινοτόμες λύσεις σε μια ποικιλία τομέων, πέρα από

τις παραδοσιακές οθόνες, καθιστώντας τα ιδιαίτερα ελκυστικά για πολλές βιομηχανίες.[5]

2 Συμπαγές αναλυτικό μοντέλο ρεύματος των μLEDs

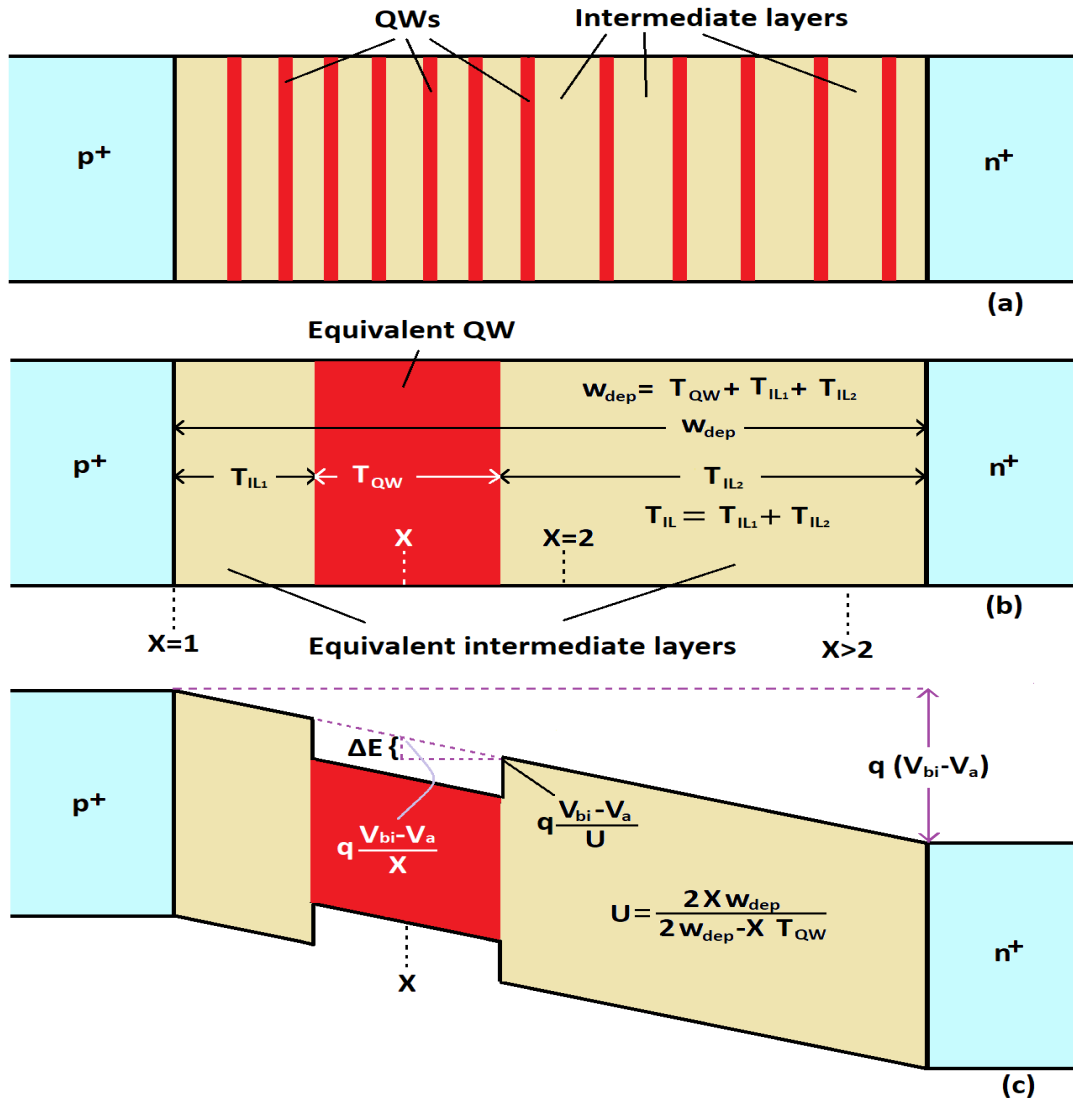
Στην πλειονότητα της βιβλιογραφίας των τελευταίων δεκαετιών, οι LED διατάξεις έχουν αντιμετωπιστεί ως απλές επαφές p-n με χαρακτηριστικές I-V που περιγράφονται από τη γνωστή εξίσωση Sah-Noyce-Shockley (SNS), αγνοώντας την παρουσία των κβαντικών φρεατίων (QWs), κάτι που είναι θεμελιωδώς εσφαλμένο [1–5]. Στην ανάλυση με χρήση της εξίσωσης SNS, ο συντελεστής ιδανικότητας προσαρμόζεται ώστε να ταιριάζει με την πειραματική καμπύλη I-V, παρά το γεγονός ότι η θεωρία SNS δεν προβλέπει τιμές του συντελεστή ιδανικότητας μεγαλύτερες από 2.

Οι μόνες δημοσιεύσεις που αναλύουν τις χαρακτηριστικές I-V των LED λαμβάνοντας υπόψη την ύπαρξη των κβαντικών φρεατίων στη ζώνη απογύμνωσης προέρχονται από την ερευνητική ομάδα του UC [6,7]. Το προτεινόμενο μοντέλο I-V είναι απλοποιημένο, θεωρώντας την ύπαρξη ενός και μόνο QW τοποθετημένου στο κέντρο της ζώνης απογύμνωσης: ηλεκτρόνια και οπές εισχέονται στο QW και ανασυνδυάζονται πλήρως εκεί, εκλύοντας φωτόνια.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, αναπτύχθηκε ένα αναλυτικό συμπαγές μοντέλο I-V για LED με πολλαπλά κβαντικά φρέατα (QWs) εντός της ζώνης απογύμνωσης, βασισμένο στην προσέγγιση των Lee et al. [6,7]. Για τις διατάξεις με πολλαπλά QWs, στο πλαίσιο ανάπτυξης του αναλυτικού συμπαγούς μοντέλου I-V, τα QWs προσεγγίστηκαν ως ένα ισοδύναμο μοναδιαίο QW, τοποθετημένο σε συγκεκριμένη θέση εντός της ζώνης απογύμνωσης.

2.1 Βασικές εξισώσεις του μοντέλου

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται μια σχηματική αναπαράσταση ενός μLED με πηγάδια δυναμικού



Σχήμα 5. Σχηματική αναπαράσταση μLED με (a) πολλά πηγάδια δυναμικού, (b) ένα ισοδύναμο πηγάδι δυναμικού και (c) εφαρμογή ορθής πόλωσης

Η σχηματική δομή των μικρο-LEDs (μLEDs) με πολλαπλά κβαντικά φρέατα (QWs) παρουσιάζεται στο Σχήμα 5. Οι κόκκινες λωρίδες αντιπροσωπεύουν τα κβαντικά πηγάδια $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ συνολικού πάχους T_{QW} , ενώ οι φαρδύτερες λωρίδες σκούρου κίτρινου χρώματος αναπαριστούν τα ενδιάμεσα στρώματα GaN συνολικού πάχους T_{IL} . Η δομή του Σχήματος 5 αποτελεί μια δίοδο τύπου p^+in^+ με πλάτος ζώνης απογύμνωσης $w_{dep} = T_{QW} + T_{IL}$, το οποίο παραμένει σταθερό για όλες τις εφαρμοζόμενες τάσεις.

Για την ανάπτυξη του αναλυτικού μοντέλου I-V, τα πολλαπλά QWs προσεγγίζονται ως ένα ισοδύναμο μοναδιαίο κβαντικό πηγάδι (EQW) πάχους T_{QW} , ίσο με το άθροισμα των επιμέρους QWs, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5. Τα T_{IL1} και T_{IL2}

αντιστοιχούν στα πάχη των UID στρωμάτων αριστερά και δεξιά του QW, έτσι ώστε $T_{IL1} + T_{IL2} = T_{IL}$. Το κέντρο του ανοίγματος του EQW τοποθετείται σε θέση X εντός της ζώνης απογύμνωσης. Όταν $X = 2$, το EQW βρίσκεται στο μέσο της ζώνης απογύμνωσης. Λαμβάνοντας ως αναφορά το κατώφλι της ζώνης αγωγιμότητας E_c του n^+ -GaN για τα ηλεκτρόνια, για $X = 1$ το EQW βρίσκεται πλησιέστερα στο p^+ -GaN, ενώ για $X > 2$ πλησιάζει την πλευρά του n^+ -GaN. Αντίστοιχα, λαμβάνοντας ως αναφορά το ανώφλι της ζώνης σθένους E_v του p^+ -GaN για τις οπές, για $X = 1$ το EQW βρίσκεται κοντά στο n^+ -GaN, ενώ για $X > 2$ πλησιάζει το p^+ -GaN.

Το ρεύμα που διαρρέει ένα μ LED με πηγάδια δυναμικού σε ορθή πόλωση για την περίπτωση (c) του σχήματος 5, δίνεται από τη σχέση:

Εξίσωση (29)

$$I_n = \frac{1}{C_1} \text{LambertW}_0 [C_1 G_0 \exp(C_0)] + C_2 \left(\frac{1}{C_1} \text{LambertW}_0 [C_1 G_0 \exp(C_0)] \right)^3$$

Όπου:

Εξίσωση (20α)

$$C_0 = \frac{UE_f - q(V_s - V_a)}{UkT_o} + \ln(T_o) + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{V_s - V_a}{U} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{V_s - V_a}{U} \right)^2 - \frac{1}{3} \left(\frac{V_s - V_a}{U} \right)^3 \right],$$

Εξίσωση (20β)

$$C_1 = \frac{1}{2} R_\theta V_a \left(\frac{\gamma' k}{q(V_s - V_a)} - \frac{2}{T_o} \right) + \frac{2E_f}{kT_o^2} - \frac{E_{on} R_\theta V_a - q(R_s T_o + R_\theta V_a^2)}{UkT_o^2}$$

$$C_2 = R_\theta \left[\frac{qR_\theta V_a^3 + (UE_f - E_{on})(R_s T_o + R_\theta V_a^2) + 2qT_o R_s V_a}{UkT_o^3} - \frac{\frac{R_\theta V_a^2}{2T_o^2} - \frac{R_s}{T_o} + \frac{\gamma' k R_s}{2(E_{on} - \gamma' k T_o - qV_a)} + \frac{\gamma'^2 k^2 R_\theta V_a^2}{4(E_{on} - \gamma' k T_o - qV_a)^2} \right]$$

Εξίσωση (20c)

με

$$E_{on} = E_o - \Delta E_c$$

$$\gamma' = \gamma - \ln \left(\frac{N_a N_d}{N_{cn} N_{vp}} \right),$$

$$G_0 = \frac{D_n S k \sqrt{2 m_n^* q^3}}{L_{dif} \pi^2 \hbar^3},$$

R_θ τη θερμική αντίσταση, R_s την αντίσταση σειράς, D_n τον συντελεστή διάχυσης των ηλεκτρονίων, L_{dif} το μήκος διάχυσης των φορέων πριν πέσουν στο ενεργό πηγάδι δυναμικού που δίνεται από τη σχέση,

$$L_{dif} = \frac{T_{IL} (2X - 2) + T_{QW} (X - 2)}{2X}.$$

Το δε qV_{bi} δίνεται από τη σχέση:

$$qV_{bi} = E_{gn} + \Delta E_c + kT \ln(N_a N_d / (N_{cn} N_{vp})),$$

όπου,

$\Delta E_v = q(\chi_p - \chi_n)$, E_{gn} είναι το ενεργειακό χάσμα του n-GaN υμενίου, N_d , N_a είναι οι συγκεντρώσεις doping των n-GaN and p-GaN layers αντίστοιχα, N_{cn} , N_{vp} οι ενεργές πυκνότητες καταστάσεων στις ζώνες αγωγιμότητας και σθένους n-GaN and p-GaN αντίστοιχα. Για το ενεργειακό χάσμα χρησιμοποιείται μια για προσέγγιση της θερμοκρασίας ως εξής: $E_g = E_0 - \gamma kT$ που είναι εξαιρετική στο εύρος 300-400 K. Η ενέργεια Fermi για αυτούς τους εκφυλισμένους ημιαγωγούς λαμβάνεται προσεγγιστικά ίση με $0.5kT$.

ΔE είναι το ενεργειακό ύψος ανάμεσα στο άνοιγμα του ενεργού QW και του άκρου της ζώνης αγωγιμότητας:

$$\Delta E = \frac{q(V_{bi} - V_a)}{U},$$

ενώ με απλούς υπολογισμούς προκύπτει ότι

$$U = \frac{2X(T_{IL} + T_{QW})}{2(T_{IL} + T_{QW}) - XT_{QW}}.$$

2.2 Εφαρμογή του μοντέλου ρεύματος σε πραγματικές διατάξεις

Το συμπαγές μοντέλο ρεύματος που παρουσιάστηκε προηγουμένως αποκτά ιδιαίτερη αξία όταν εφαρμόζεται σε πραγματικές πειραματικές διατάξεις μικροδιόδων (μLEDs). Οι ιδανικές θεωρητικές εξισώσεις συχνά αποτυγχάνουν να αποδώσουν πλήρως τη συμπεριφορά συσκευών μικρής κλίμακας, στις οποίες επικρατούν πλευρικές απώλειες, διαρροές και θερμικά φαινόμενα. Στην παρούσα ενότητα εξετάζεται πώς το μοντέλο μπορεί να προσαρμοστεί στις ιδιαιτερότητες αυτών των διατάξεων, ενσωματώνοντας τις επιπτώσεις πλευρικών ατελειών και αναλύοντας τη διαδικασία αριθμητικής βελτιστοποίησης των παραμέτρων του, ώστε να ταιριάζει με τα μετρούμενα δεδομένα I-V.

2.3 Πλευρικές ατέλειες και πλευρική επανασύνδεση στα μLEDs

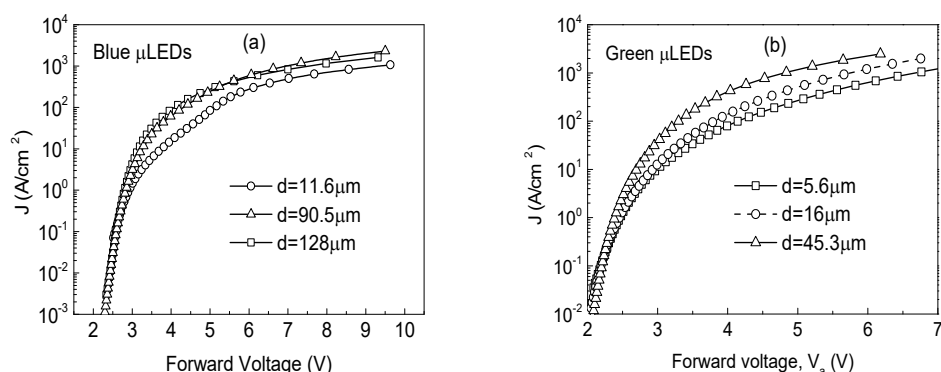
Το αναλυτικό συμπαγές μοντέλο I-V για μικροδιόδους εκπομπής φωτός (μLEDs) με πολλαπλά κβαντικά φρεάτια (QWs) στην περιοχή απογύμνωσης της διόδου τύπου p^+-i-n^+ εφαρμόστηκε σε πειραματικά δεδομένα I-V για μπλε και πράσινα μLEDs κυκλικής διατομής, τα οποία κατασκευάστηκαν σε υποστρώματα GaN. Οι παράμετροι των διατάξεων παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Οι χαρακτηριστικές καμπύλες πυκνότητας ρεύματος – τάσης (J-V) των μπλε και πράσινων μLEDs με διαφορετικές διαμέτρους (d) παρουσιάζονται στο Σχήμα 6. Για πυκνότητες ρεύματος μικρότερες από περίπου 1 A/cm^2 , όλες οι καμπύλες J-V συμπίπτουν, γεγονός που υποδηλώνει ότι το ρεύμα κατανέμεται ομοιόμορφα στην ενεργή περιοχή.

Σε υψηλότερες πυκνότητες ρεύματος, η αύξηση της πυκνότητας ρεύματος με την τάση μετατρέπεται σε μια πιο σταδιακή μεταβολή, η οποία ελέγχεται από την ωμική αντίσταση της LED, η οποία είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της διαμέτρου ($1/d^2$). Πέρα από τη σειρά αντίστασης, η μείωση της πυκνότητας ρεύματος με τη μείωση του μεγέθους της LED, δηλαδή με την αύξηση του λόγου περιμέτρου προς επιφάνεια, υποδηλώνει τη σημαντική επίδραση της περιμέτρου της διάταξης στη συνολική ηλεκτρική της συμπεριφορά.

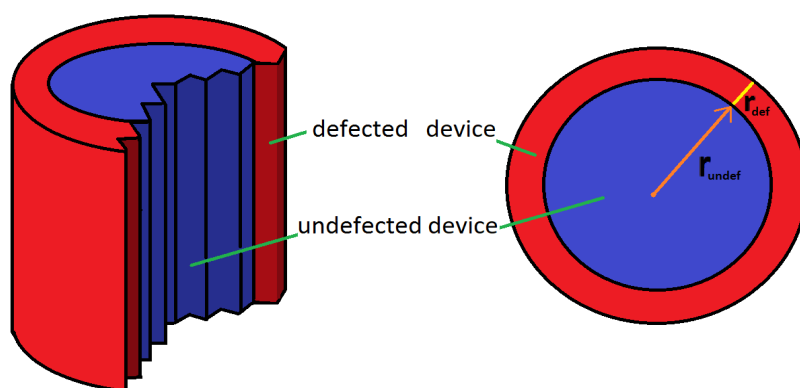
Στις διόδους εκπομπής φωτός InGaN/GaN, έχει αποδειχθεί ότι οι τάσεις κλιμάκωσης καθορίζονται σε μεγάλο βαθμό από την επιφανειακή επανασύνδεση στις

άκρες της ενεργής περιοχής [8–10]. Η εξωτερική κβαντική απόδοση (EQE) και η οπτική ισχύς μειώνονται με τη μείωση του μεγέθους της LED, όταν υπάρχουν πλευρικές ατέλειες, σε αντίθεση με τα αποτελέσματα που παρατηρούνται σε LEDs χωρίς ατέλειες [9]. Συνεπώς, κατά τη μοντελοποίηση των LEDs, η επίδραση των πλευρικών ατελειών δεν μπορεί να αγνοηθεί.

Η ξηρή χάραξη με πλάσμα χρησιμοποιείται ευρέως για τον καθορισμό της δομής "μεσά" των LEDs. Ωστόσο, λόγω της υψηλής ενέργειας που εμπλέκεται στη χάραξη με πλάσμα, οι πλευρικές επιφάνειες της LED παρουσιάζουν συνήθως ατέλειες, οι οποίες λειτουργούν ως διαδρομές διαρροής ρεύματος, δηλαδή οι φορείς παγιδεύονται από τις πλευρικές ατέλειες και εκεί λαμβάνει χώρα ανασυνδυασμός τύπου Shockley-Read-Hall (SRH) [9].



Σχήμα 6. Ρεύμα πυκνότητας-τάσης προώθησης (J - V) των μπλε και πράσινων μικρο-LEDs (μ LEDs) με διάφορες διαμέτρους d .



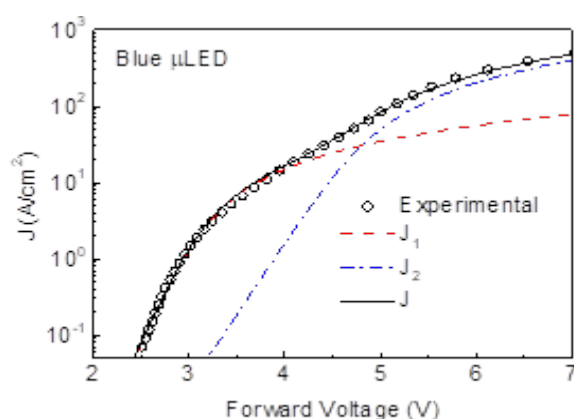
Σχήμα 7. Σχηματική διάταξη της δομής του μ LED για συμπαγή μοντελοποίηση.

Ο σημαντικός ρόλος των πλευρικών ατελειών στις LEDs έχει αποδειχθεί μέσω της εναπόθεσης διηλεκτρικών υλικών με τεχνική ατομικής στιβάδας (ALD), προκειμένου να παθητικοποιηθούν οι πλευρικές ατέλειες [10]. Επιπλέον, πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι καθώς μειώνεται το μέγεθος της LED, η εξωτερική κβαντική απόδοση (EQE) μειώνεται [11], αναδεικνύοντας τη σημαντική επίδραση της περιμέτρου της διάταξης σε σχέση με την επιφάνειά της.

2.4 Ενσωμάτωση της πλευρικής επανασύνδεσης στο μοντέλο ρεύματος

Για να συμπεριληφθεί η επίδραση της επιφανειακής επανασύνδεσης στο συνολικό ρεύμα της LED, οι πλευρικές ατέλειες ενσωματώνονται σε μια «ελαττωματική» περιοχή πλάτους μερικών μικρομέτρων (μm) στις άκρες της ενεργής περιοχής [9], όπως φαίνεται στο Σχήμα 7. Δεδομένου ότι οι ενεργές (μη ελαττωματικές) και οι «ελαττωματικές» περιοχές της LED δεν μπορούν να διακριθούν, ακολουθώντας την Εξίσωση (13), ως παραμετρικό μέγεθος του μοντέλου για τον συντελεστή διάχυσης D_n , θεωρούμε τη κανονικοποιημένη τιμή του $D_n \cdot S$.

Η χαμηλή τιμή του D_n απορροφά διάφορους μηχανισμούς διαρροής ρεύματος, όπως η θερμιονική εκπομπή ηλεκτρονίων πάνω από το ισοδύναμο κβαντικό φρεάτιο (EQW), η διαφυγή ηλεκτρονίων λόγω του φαινομένου πόλωσης και η υπέρβαση ηλεκτρονίων, οι οποίοι δεν αποτυπώνονται μέσω της εξωτερικής κβαντικής απόδοσης (EQE).



Σχήμα 8. πειραματικά δεδομένα προώθησης J-Va του μπλε μLED με διάμετρο $d=11.6 \mu\text{m}$

Τα σύμβολα αντιστοιχούν στα πειραματικά δεδομένα προώθησης J-Va του μπλε μLED με διάμετρο $d=11.6 \mu\text{m}$. Η συνολική πυκνότητα ρεύματος LED J αναλύεται σε δύο συνιστώσες, J1 και J2, που εξάγονται μέσω προσαρμογής του μοντέλου στα πειραματικά δεδομένα, λαμβάνοντας υπόψη ένα ζεύγος παράλληλων μLEDs.

Η επιφανειακή επανασύνδεση μπορεί να εισαχθεί στο συμπαγές μοντέλο θεωρώντας ότι οι φορείς που παγιδεύονται από τις ατέλειες στην «ελαττωματική» περιοχή χάνονται μέσω ανασυνδυασμού τύπου Shockley-Read-Hall (SRH). Έτσι, η χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης της LED μπορεί να αναπαρασταθεί ως ένας παράλληλος συνδυασμός δύο LEDs: μιας ενεργής διάταξης με επιφάνεια S_a και μιας διαρρέουσας διάταξης (leaky device) με επιφάνεια S_d στις άκρες της ενεργής περιοχής, όπου οι φορείς χάνονται λόγω επιφανειακής επανασύνδεσης, μειώνοντας έτσι τη συγκέντρωση φορέων στο EQW και κατά συνέπεια υποβαθμίζοντας την απόδοση της LED.

Θεωρείται ότι η "διαρρέουσα" διάταξη (leaky device) έχει σχετικά χειρότερη απόδοση σε σχέση με την ενεργή διάταξη, γεγονός που αποδίδεται στις απώλειες φορέων λόγω επιφανειακής επανασύνδεσης. Τόσο η ενεργή όσο και η ελαττωματική διάταξη μοντελοποιούνται με την ίδια αναλυτική εξίσωση (εξίσωση 28), αλλά με διαφορετικές παραμέτρους. Το συνολικό ρεύμα της LED είναι το άθροισμα του ρεύματος I_a του EQW που ρέει μέσω της ενεργής (μη ελαττωματικής) περιοχής και του ρεύματος I_d που ρέει μέσω της διαρρέουσας (ελαττωματικής) περιοχής, δηλαδή: $I=I_a+I_d$.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η μοντελοποίηση του ρεύματος διαρροής που προτείνεται εδώ είναι πλήρως βασισμένη στη φυσική, σε αντίθεση με το μοντέλο που προτάθηκε από τον Piprek [12], όπου το ρεύμα διαρροής συσχετίζεται με το ρεύμα ηλεκτρονίων I_n που εγχέεται στο κβαντικό πηγάδι(QW) μέσω μιας εμπειρικής σχέσης.

Στο Σχήμα 8, το φαινόμενο «γωνίας» (kink effect) που παρατηρείται στη πειραματική χαρακτηριστική J-V μιας τυπικής μπλε LED μπορεί να εξηγηθεί λαμβάνοντας υπόψη το ζεύγος των παράλληλων ενεργής και διαρρέουσας LEDs. Οι παράμετροι του μοντέλου είναι: η θέση X του ισοδύναμου QW εντός της περιοχής απογύμνωσης, η

σειρά αντίστασης R_s , η θερμική αντίσταση R_θ και ο συντελεστής διάχυσης των οπών D_p για την ενεργή και την ελαττωματική διάταξη.

2.5 Αλγόριθμος βελτιστοποίησης των παραμέτρων του μοντέλου

Για την αξιόπιστη εξαγωγή των παραμέτρων του μοντέλου, η προσαρμογή του μοντέλου στα πειραματικά χαρακτηριστικά I-V των LEDs πραγματοποιήθηκε σε δύο στάδια: πρώτα, στην περιοχή τάσης έως περίπου 4 V (κάτω από την τάση ενεργοποίησης), τα πειραματικά δεδομένα προσαρμόστηκαν στη συνιστώσα I_n Εξίσωση (29), ώστε μέσω ελαχιστοποίησης να εξαχθούν οι τρεις πρώτες παράμετροι του ενεργού στοιχείου (X_a , $R_{s,a}$, $D_{p,a}$), καθώς η επίδραση της θερμικής αντίστασης $R_{\theta,a}$ κάτω από την τάση ενεργοποίησης είναι αμελητέα. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας αυτές τις παραμέτρους, εξήχθη η θερμική αντίσταση του ενεργού στοιχείου $R_{\theta,a}$ και οι υπόλοιπες παράμετροι της διαρρέουσας διάταξης της «ελαττωματικής» περιοχής (X_d , $R_{s,d}$, $D_{p,d}$, $R_{\theta,d}$) μέσω προσαρμογής των

$$I = I_a + I_d$$

Εξισώσεων (29) και , στα πειραματικά δεδομένα σε όλο το εύρος της θετικής τάσης πόλωσης.

Ωστόσο, για να είναι δυνατή η εξαγωγή των ηλεκτρικών και θερμικών αντιστάσεων

τόσο της ενεργής όσο και της διαρρέουσας διάταξης, απαιτείται μια σχέση μεταξύ

τους. Σύμφωνα με τον νόμο του Wiedemann–Franz, ο λόγος της θερμικής

αγωγιμότητας προς την ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι ανάλογος της θερμοκρασίας.

Συνεπώς, μπορεί να θεωρηθεί η ακόλουθη σχέση μεταξύ των ηλεκτρικών και

$$\frac{R_{s,a}}{R_{\theta,a}} = \frac{R_{s,d}}{R_{\theta,d}}$$

θερμικών αντιστάσεων των ενεργών και ελαττωματικών διατάξεων:

Η παραπάνω διαδικασία ελαχιστοποίησης διασφαλίζει ότι οι παράμετροι του μοντέλου που εξάγονται είναι μοναδικές. Στο Σχήμα 8 παρουσιάζονται οι δύο συνιστώσες ρεύματος J_1 και J_2 , οι οποίες εξάγονται μέσω προσαρμογής του συμπαγούς μοντέλου (29) για το ζεύγος των παράλληλων LEDs στα πειραματικά δεδομένα, αναπαράγοντας με ακρίβεια τα μετρούμενα χαρακτηριστικά $J-V_a$.

Για να διευκρινιστεί η προέλευση των J_1 και J_2 , λαμβάνονται υπόψη αριθμητικοί υπολογισμοί που δείχνουν ότι η τάση ενεργοποίησης της ελαττωματικής LED είναι χαμηλότερη από εκείνη της ενεργής (μη ελαττωματικής) LED [9]. Οι πλευρικές ατέλειες δημιουργούν ενεργειακές στάθμες εντός του ενεργειακού χάσματος. Αυτές οι στάθμες μπορούν να απορροφήσουν φωτόνια χαμηλότερης ενέργειας και να επηρεάσουν το φάσμα απορρόφησης, προκαλώντας παραμορφώσεις που μπορούν να ερμηνευτούν ως χαμηλότερο ενεργειακό χάσμα σε σύγκριση με αυτό της μη ελαττωματικής LED. Στην ενεργή περιοχή, το χαμηλό ύψος φραγμού της ζώνης σθένους (Δb) και η υψηλή απόδοση πρόσμειξης του στρώματος p-GaN έχουν ως αποτέλεσμα η διαδικασία επανασυνδυασμού στο EQW να καθορίζεται κυρίως από τα ηλεκτρόνια που εγχέονται από το n-GaN. Στην ελαττωματική περιοχή, λόγω της υψηλής πυκνότητας και του μεγάλου συντελεστή σύλληψης των παγίδων οπών [9], οι οπές παγιδεύονται ευκολότερα από τις πλευρικές ατέλειες σε σχέση με τα ηλεκτρόνια.

Ως εκ τούτου, στη διαρρέουσα διάταξη της ελαττωματικής περιοχής, η απόδοση έγχυσης από το στρώμα p-GaN μειώνεται σημαντικά και η διαδικασία επανασυνδυασμού στο EQW καθορίζεται από τις οπές που εγχέονται σε αυτό. Συνεπώς, το ρεύμα I_a της ενεργής διάταξης αντιστοιχεί στο ρεύμα ηλεκτρονίων I_n , ενώ το ρεύμα I_d της διαρρέουσας διάταξης αντιστοιχεί στο ρεύμα οπών I_p . Δηλαδή, το συνολικό ρεύμα της LED είναι $I = I_n + I_p$.

Το ρεύμα οπών J_p κυριαρχεί στην περιοχή κάτω από την τάση ενεργοποίησης, ενώ το ρεύμα ηλεκτρονίων J_n κυριαρχεί στην περιοχή πάνω από την τάση ενεργοποίησης.

3 Εφαρμογή του Συμπαγούς Μοντέλου στα μ LEDs σε Πειραματικές Διατάξεις

Το συμπαγές αναλυτικό μοντέλο I-V εφαρμόστηκε σε πραγματικά πειραματικά δεδομένα μπλε και πράσινων μικροδιόδων εκπομπής φωτός (μ LEDs), κατασκευασμένων με βάση την επιδομή της παρτίδας B191 [13]. Οι συσκευές είχαν κυκλική διατομή και διαφορετικές διαμέτρους, ώστε να διερευνηθεί η επίδραση του μεγέθους στην ηλεκτρική συμπεριφορά.

Η προσαρμογή των θεωρητικών καμπυλών του μοντέλου στα πειραματικά δεδομένα έγινε με αλγόριθμο ελαχιστοποίησης σφαλμάτων, λαμβάνοντας υπόψη δύο παράλληλες περιοχές: την ενεργή και τη διαρρέουσα. Το συνολικό ρεύμα δίνεται από τη σχέση $I = I_n + I_p$, όπου I_n είναι το ρεύμα ηλεκτρονίων στην ενεργή περιοχή και I_p το ρεύμα οπών στην ελαττωματική περιφέρεια [14].

Το αναλυτικό συμπαγές μοντέλο I-V της Εξίσωσης (30), για μ LEDs με πολλαπλά κβαντικά φρεάτια (QWs) στη περιοχή απογύμνωσης, έχει επαληθευτεί με βάση πειραματικά δεδομένα μπλε και πράσινων μ LEDs κυκλικής διατομής και με διαφορετικές διαμέτρους d . Οι τιμές των παραμέτρων των κατασκευασμένων διατάξεων και των παραμέτρων του μοντέλου, παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Παράμετροι Μοντέλου

Παράμετροι Μοντέλου	Σταθερές και Παράμετροι Συσκευής			
			Blue	Green
X_a	$q=1.6 \cdot 10^{-19} \text{Cb}$	$N_a=8 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$	$T_{QW}=12.5$	$T_{QW}=23.1$
$R_{s,a}$	$T_o=300 \text{ K}$	$N_d=3 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$	nm	nm
$R_{\theta,a}$	$E_f=0.5kT_o \text{ Cb.V}$	$X_n=4.1 \text{ eV}$	$T_{IL}=127 \text{ nm}$	$T_{IL}=221 \text{ nm}$
D_n	$k=1.38 \times 10^{-23}$	$X_p=4.1 \text{ eV}$		
X_d	Cb.V/K	$N_{cn}=4.3 \times 10^{20} \text{ T}_o^{3/2}$		
$R_{s,d}$	$m_n^*=0.2 \times m_o$	m^{-3}		
$R_{\theta,d}$	$m_p^*=0.8 \times m_o$	$N_{vp}=1.3 \times 10^{20} \text{ T}_o^{3/2}$		
D_p				

	$m_o = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$ $\hbar = 6.626 \times 10^{-34}$ Cb.V.s $E_o = 3.2q \text{ Cb.V}$	m^{-3} $\gamma = 5.73 \text{ CbV/K}$		
--	--	---	--	--

Η προσαρμογή του συμπαγούς μοντέλου για ζεύγος παράλληλων μLEDs (Εξ. 30) στα πειραματικά δεδομένα J-V των μπλε και πράσινων μLEDs παρουσιάζεται στα Σχ. 5 και 6, αντίστοιχα, σε ημι-λογαριθμική και γραμμική μορφή. Τα σχήματα παρουσιάζουν την πυκνότητα ρεύματος ηλεκτρονίων J_n των ενεργών διατάξεων, την πυκνότητα ρεύματος οπών J_p των διαρρευουσών διατάξεων και τη συνολική πυκνότητα ρεύματος $J = J_n + J_p$, παρουσιάζοντας εξαιρετική συμφωνία με τις πειραματικές μετρήσεις στην περιοχή τάσης ορθής πόλωσης 2–7 V.

3.1 Μπλε μLEDs

Η κατηγορία των μπλε μικροδιόδων εκπομπής φωτός (μLEDs) αποτελεί έναν από τους πιο ευρέως μελετημένους τύπους λόγω της εφαρμογής τους σε οθόνες υψηλής ευκρίνειας, οπτοηλεκτρονικά κυκλώματα και συστήματα επικοινωνίας μέσω φωτός (VLC) [13]. Οι συσκευές που αναλύονται σε αυτή την εργασία βασίζονται σε επιδομή πολλαπλών κβαντικών φρεατίων (MQWs) InGaN/GaN και κατασκευάστηκαν σε υπόστρωμα GaN, ακολουθώντας την τεχνολογική διαδικασία της παρτίδας B191 [14].

Τα μπλε μLEDs που μελετήθηκαν είχαν κυκλική γεωμετρία, με διαμέτρους που κυμαίνονταν μεταξύ 10 και 50 μικρομέτρων. Οι μετρούμενες χαρακτηριστικές καμπύλες πυκνότητας ρεύματος-τάσης (J–V) έδειξαν ότι σε πυκνότητες ρεύματος μικρότερες από 1 A/cm², οι διαφορετικές διατάξεις παρουσίαζαν ταυτόσημη συμπεριφορά. Το γεγονός αυτό δείχνει ότι το ρεύμα διανέμεται ομοιόμορφα στην ενεργή περιοχή, και ότι τα πλευρικά φαινόμενα είναι αμελητέα σε αυτό το εύρος λειτουργίας [15].

Η εφαρμογή του συμπαγούς μοντέλου στις συγκεκριμένες διατάξεις έγινε με τη θεώρηση δύο παραλλήλων καναλιών αγωγής: της ενεργής περιοχής, στην οποία κυριαρχούν οι ηλεκτρονικοί επανασυνδυασμοί μέσω κβαντικών φρεατίων, και της διαρρέουσας περιφέρειας, η οποία σχετίζεται με ατέλειες και επανασυνδέσεις μέσω παγίδων [16]. Το μοντέλο χρησιμοποιεί την εξίσωση συνολικού ρεύματος:

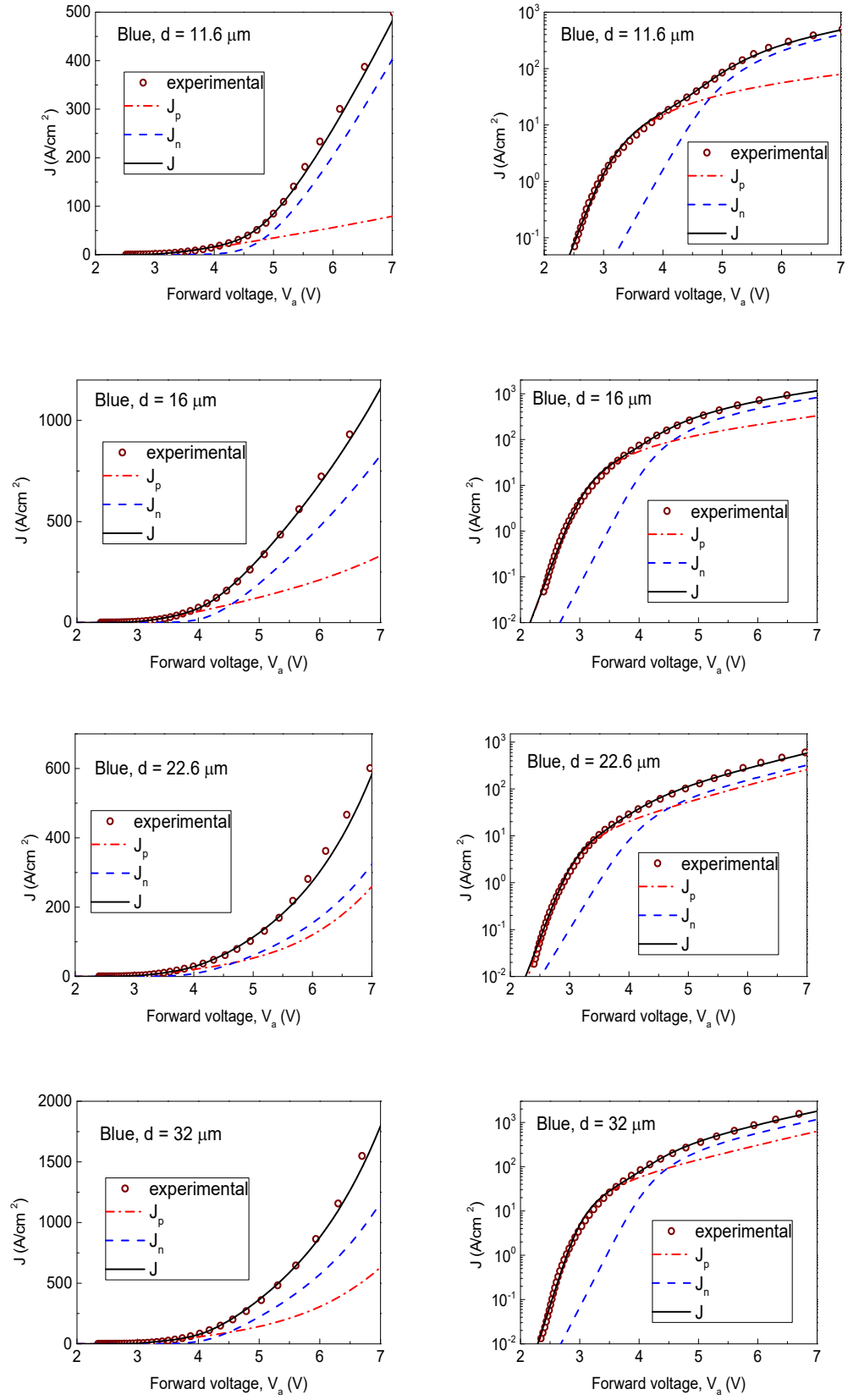
$$I_{\text{total}} = I_n + I_p$$

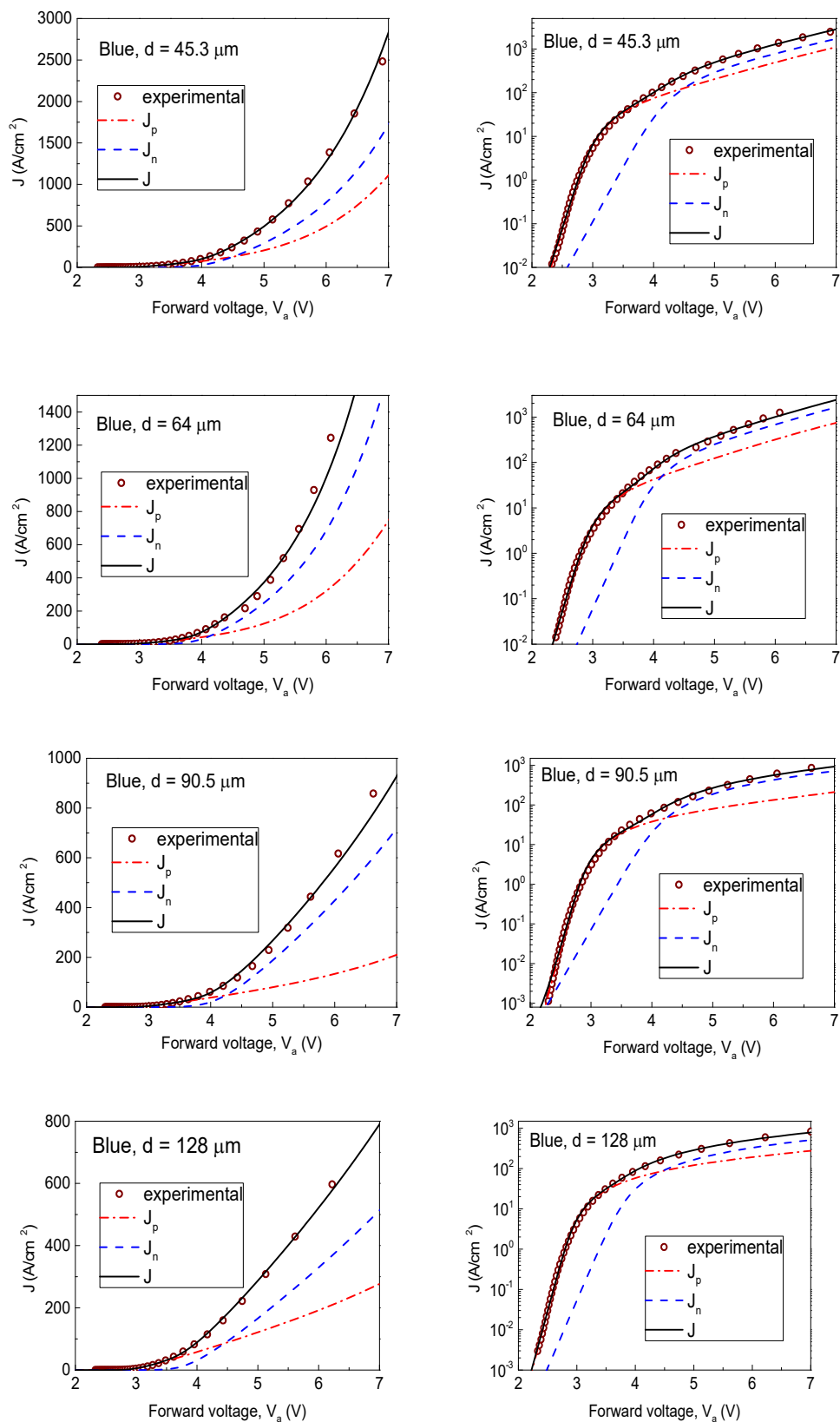
όπου I_n το ρεύμα ηλεκτρονίων στην ενεργή περιοχή και I_p το ρεύμα οπών στην ελαττωματική περιφέρεια [16].

Μία από τις βασικές παραμέτρους του μοντέλου είναι η θέση X του ισοδύναμου κβαντικού φρεατίου (EQW), η οποία εκφράζει το σχετικό βάθος εντός της περιοχής απογύμνωσης στο οποίο κυριαρχεί η ροή ρεύματος. Στις μικρότερες διαμέτρους, η τιμή της X μετατοπίζεται προς τα άκρα της δομής, ένδειξη ότι η ροή ρεύματος επηρεάζεται περισσότερο από τα πλευρικά φαινόμενα, όπως επιφανειακή επανασύνδεση και χωρική μη-ομοιογένεια [17].

Η ηλεκτρική αντίσταση R_s , που προκύπτει από το υλικό, τις μεταλλικές επαφές και τις πλευρικές απώλειες, παρουσιάζει αύξηση με τη μείωση της διαμέτρου. Το φαινόμενο αυτό εξηγείται από την αύξηση του λόγου περιμέτρου προς την ενεργή επιφάνεια (P/A), το οποίο αυξάνει το ποσοστό επιφανειακών απωλειών ρεύματος [18]. Ομοίως, η θερμική αντίσταση R_θ , που προκύπτει από τη συσσώρευση θερμότητας σε περιορισμένο όγκο, αυξάνεται δραστικά σε μικρές συσκευές, επιδρώντας στην απόδοση φωτεινής εκπομπής [19].

Ιδιαίτερη σημασία έχει η ερμηνεία του φαινομένου kink στις καμπύλες $J-V$. Το kink είναι μια απότομη αλλαγή στην κλίση της καμπύλης ρεύματος που συνδέεται με τη διαφορετική τάση ενεργοποίησης των δύο περιοχών (ενεργής και ελαττωματικής). Το μοντέλο αποτυπώνει αυτό το φαινόμενο επιτυχώς, μέσω της διαφοράς παραμέτρων στις δύο περιοχές και της συμμετοχής του όρου I_p σε υψηλότερες τάσεις [20].





Σχήμα 9. Πειραματικά δεδομένα J-Va των μπλε μ LEDs

Τα σύμβολα αντιστοιχούν στα πειραματικά δεδομένα J-Va των μπλε μLEDs. Η μπλε διακεκομμένη γραμμή αντιπροσωπεύει την πυκνότητα ρεύματος ηλεκτρονίων J_n της ενεργής συσκευής, η κόκκινη διακεκομμένη-στικτή γραμμή την πυκνότητα ρεύματος οπών J_p της διαρρέουσας συσκευής και η μαύρη συνεχής γραμμή την συνολική πυκνότητα ρεύματος $J = J_n + J_p$.

Συνολικά, η προσαρμογή των θεωρητικών καμπυλών του μοντέλου στα πειραματικά δεδομένα για τις μπλε μLEDs έδειξε εξαιρετική συμφωνία, αποδεικνύοντας την εγκυρότητα της προσέγγισης και τη φυσική σημασία των μεταβλητών του μοντέλου [20].

3.2 Πράσινα μLEDs

Η μελέτη των πράσινων μικροδιόδων εκπομπής φωτός (μLEDs) παρουσιάζει ιδιαίτερο ερευνητικό ενδιαφέρον, κυρίως λόγω της αυξημένης πολυπλοκότητας στην επίτευξη αποδοτικής εκπομπής στο πράσινο φάσμα και των τεχνολογικών προκλήσεων που σχετίζονται με την κατασκευή τους [21]. Οι πράσινες μLEDs βασίζονται, όπως και οι μπλε, σε επιδομές InGaN/GaN, αλλά απαιτούν υψηλότερη συγκέντρωση ινδίου (In) στο ενεργό υλικό για να επιτευχθεί εκπομπή σε μεγαλύτερα μήκη κύματος. Η υψηλή περιεκτικότητα σε In οδηγεί σε αυξημένη πιθανότητα δημιουργίας ελαττωμάτων, μειώνοντας την εσωτερική κβαντική απόδοση (IQE) και επηρεάζοντας τη σταθερότητα της συσκευής [22].

Οι συσκευές που μελετήθηκαν είχαν παρόμοια γεωμετρία με τις μπλε, με διαμέτρους από 10 έως 50 μm . Οι χαρακτηριστικές καμπύλες J-V έδειξαν σημαντικά μεγαλύτερο ρεύμα διαρροής για τις μικρότερες διαμέτρους, γεγονός που υποδεικνύει έντονη παρουσία επιφανειακών παγίδων και πλευρικών επανασυνδέσεων λόγω των κατασκευαστικών ατελειών και της αυξημένης επιρροής του λόγου περιμέτρου προς επιφάνεια [23].

Η εφαρμογή του συμπαγούς μοντέλου I-V σε αυτές τις διατάξεις επιβεβαίωσε την ικανότητά του να περιγράψει την ηλεκτρική συμπεριφορά των πράσινων μLEDs με ακρίβεια. Όπως και στην περίπτωση των μπλε LEDs, το μοντέλο βασίστηκε σε δύο παράλληλα κυκλώματα, που αναπαριστούν την ενεργή και την διαρρέουσα περιοχή. Η προσαρμογή πραγματοποιήθηκε με χρήση πειραματικών δεδομένων και

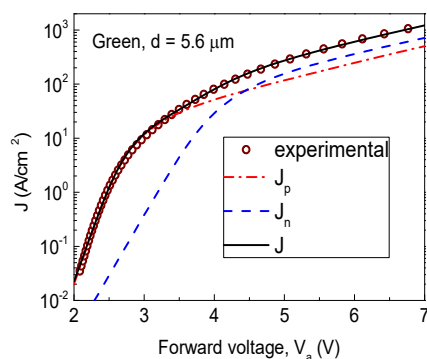
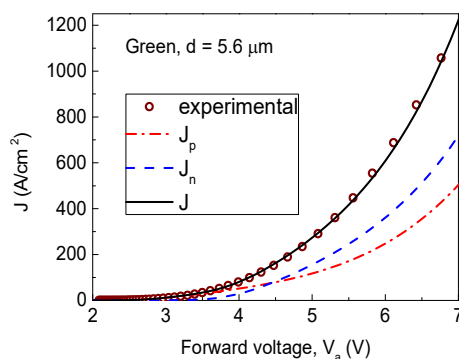
προσαρμογή των παραμέτρων του μοντέλου μέσω μεθόδου ελαχιστοποίησης σφάλματος [24].

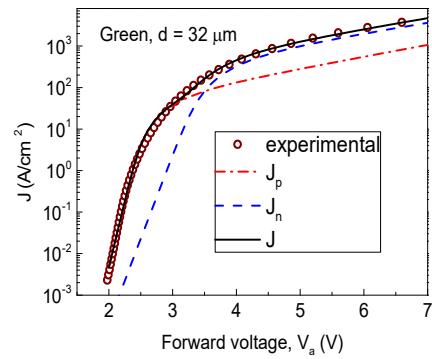
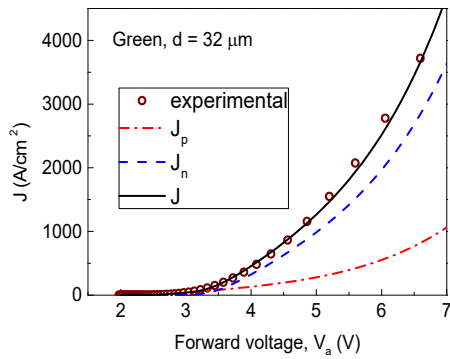
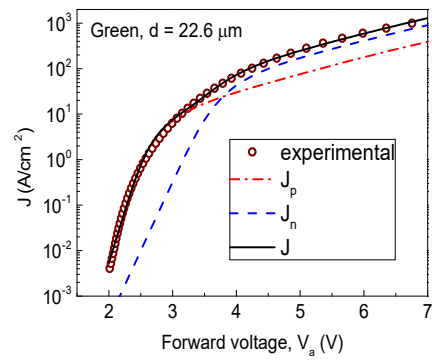
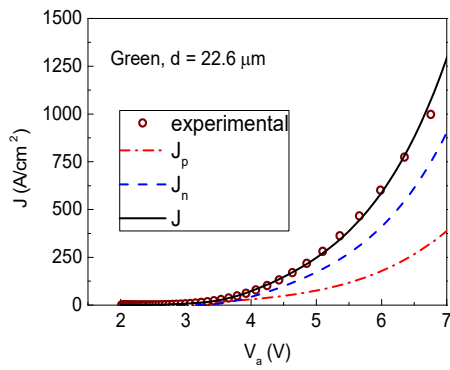
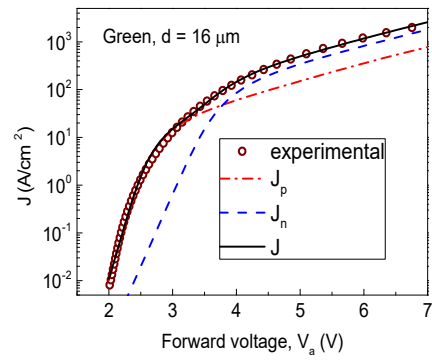
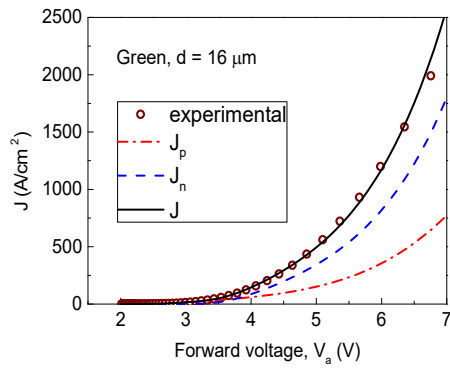
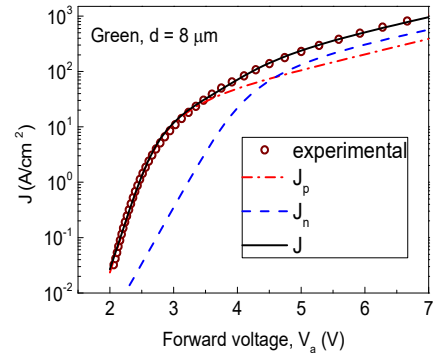
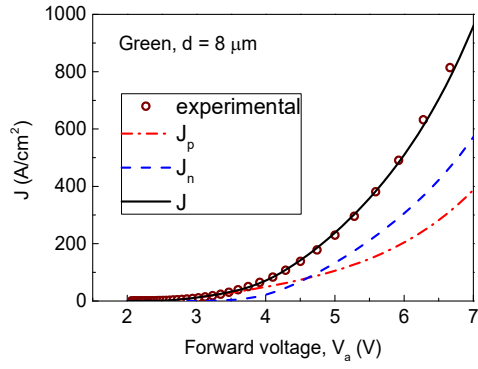
Η παράμετρος θέσης X του ισοδύναμου QW έδειξε παρόμοια τάση μεταβολής όπως και στα μπλε LEDs: στις μικρότερες διαμέτρους, το X μετατοπίζεται προς τα άκρα της περιοχής απογύμνωσης, αντανακλώντας την αυξημένη συμβολή της επιφανειακής επανασύνδεσης [25]. Ωστόσο, η μεταβολή αυτή ήταν πιο έντονη στα πράσινα μ LEDs, πιθανώς λόγω της μειωμένης χωρικής ομοιογένειας του ενεργού στρώματος και της παρουσίας μικροκαταπονήσεων λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε In [26].

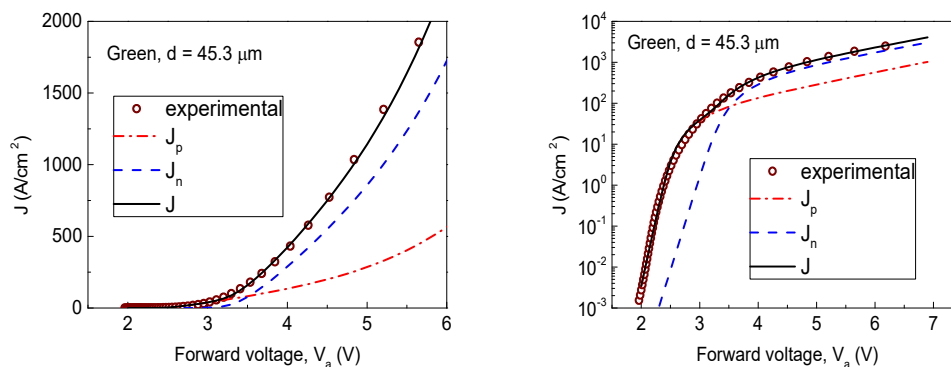
Οι τιμές των παραμέτρων R_s και R_θ παρουσίασαν εξίσου έντονη εξάρτηση από τη διάμετρο. Η R_s αυξάνεται δραστικά στις μικρότερες διατάξεις, υποδεικνύοντας εντονότερη επίδραση των ακμών και μειωμένη αγωγιμότητα στις περιοχές που επηρεάζονται από ελαττώματα [27]. Η θερμική αντίσταση R_θ αυξάνεται επίσης, προκαλώντας θερμική συσσώρευση που μπορεί να μειώσει την φωτεινή απόδοση, ιδιαίτερα σε εφαρμογές υψηλής έντασης [28].

Ένα αξιοσημείωτο φαινόμενο είναι η παρατήρηση του “kink” στις καμπύλες $J-V$ και στα πράσινα LEDs. Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται σε σχετικά υψηλότερες τάσεις σε σχέση με τα μπλε LEDs, υποδεικνύοντας καθυστέρηση στην ενεργοποίηση της περιφερειακής ροής ρεύματος. Το μοντέλο αποτυπώνει το kink επαρκώς, ενσωματώνοντας τη μεταβαλλόμενη συμβολή του ρεύματος I_p στις υψηλότερες τάσεις [29].

Πράσινα LEDs







Σχήμα 10. Πειραματικά δεδομένα J-Va των πράσινων μLEDs

Τα σύμβολα αντιστοιχούν στα πειραματικά δεδομένα J-Va των πράσινων μLEDs. Η μπλε διακεκομμένη γραμμή αντιπροσωπεύει την πυκνότητα ρεύματος ηλεκτρονίων J_n της ενεργής συσκευής, η κόκκινη διακεκομμένη-στικτή γραμμή την πυκνότητα ρεύματος οπών J_p της διαρρέουσας συσκευής και η μαύρη συνεχής γραμμή τη συνολική πυκνότητα ρεύματος $J = J_n + J_p$.

Συνολικά, η εφαρμογή του μοντέλου I-V στα πράσινα μLEDs αποδεικνύει τη γενικότητα και ευελιξία της προσέγγισης. Οι φυσικές παράμετροι που εξάγονται όχι μόνο περιγράφουν με ακρίβεια την πειραματική συμπεριφορά, αλλά παρέχουν και χρήσιμες πληροφορίες για την κατανόηση των μηχανισμών απωλειών και των επιδράσεων της γεωμετρίας στη λειτουργία των διατάξεων [30].

4 Βελτιστοποιημένος αλγόριθμος εξαγωγής

4.1 Ανάπτυξη του αλγορίθμου

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, το συνολικό ρεύμα της διάταξης περιγράφεται ως το άθροισμα δύο επιμέρους ρευμάτων:

$$I = I_n + I_p$$

όπου:

- I_n είναι το ρεύμα των ηλεκτρονίων που επανασυνδέονται εντός της ενεργής περιοχής (κβαντικά πηγάδια),
- I_p είναι το ρεύμα των οπών που επανασυνδέονται στην ελαττωματική περιφέρεια της συσκευής, δηλαδή σε επιφανειακές ή πλαϊνές περιοχές υψηλής παγίδευσης.

Κάθε συνιστώσα ρεύματος περιγράφεται από το ίδιο βασικό μαθηματικό μοντέλο, αλλά με ξεχωριστό σύνολο τεσσάρων παραμέτρων:

1. Τη **θέση ενεργοποίησης** X (σε τάση), η οποία σχετίζεται με τη δυναμική του εκάστοτε μηχανισμού επανασύνδεσης.
2. Το **γινόμενο** $S \cdot D_p$, όπου S είναι η ταχύτητα επιφανειακής επανασύνδεσης και D_p η σταθερά διάχυσης των οπών.
3. Την **αντίσταση σειράς** R_s , η οποία επιδρά στην πτώση τάσης.
4. Τη **θερμική αντίσταση** R_θ , που επηρεάζει τη θερμοκρασία της ενεργού περιοχής λόγω αυτοθέρμανσης.

Η μεθοδολογία βασίζεται στη διαδοχική και αναδρομική εκτίμηση των παραμέτρων, με τελικό στόχο το άθροισμα $I_n + I_p$ να αναπαράγει με ακρίβεια τη μετρούμενη I - V χαρακτηριστική.

Βήμα 1 – Αρχική εκτίμηση παραμέτρων για το ρεύμα I_n

Το ρεύμα I_n , που αντιστοιχεί στις επανασυνδέσεις ηλεκτρονίων στην ενεργή περιοχή, υπολογίζεται πρώτα με βάση τα εξής:

- Υποθέτουμε αρχικές τιμές για τις παραμέτρους R_{s_n} και $R\theta_n$.
- Οι παράμετροι X_n και $S \cdot Dp_n$ εκτιμώνται απευθείας από την κλίση της χαρακτηριστικής για χαμηλές τάσεις, δηλαδή για $V < V_{on}$. Σε αυτή την περιοχή κυριαρχούν μηχανισμοί προ-εκπομπής και επανασύνδεσης εντός των QWs, ενώ η συνεισφορά της περιφερειακής περιοχής είναι περιορισμένη.
- Με βάση τα παραπάνω, υπολογίζεται η καμπύλη του $I_n(V)$ σε όλο το φάσμα των τάσεων.

Βήμα 2 – Αφαίρεση του I_n από τα πειραματικά δεδομένα

Αφού υπολογιστεί το $I_n(V)$, αφαιρείται από τα πειραματικά δεδομένα ρεύματος:

$$I_{p,target}(V) = I_{exp}(V) - I_n(V)$$

Έτσι απομονώνεται η επιθυμητή συνιστώσα I_p , που σχετίζεται με τις οπές και την περιφερειακή επανασύνδεση.

Βήμα 3 – Εκτίμηση παραμέτρων για το ρεύμα I_p

Το ρεύμα I_p προκύπτει από το δικό του σετ παραμέτρων: X_p , $S \cdot Dp_p$, R_{s_p} , $R\theta_p$. Για να μειωθεί η πολυπλοκότητα του προβλήματος και να διατηρηθεί φυσική συνοχή, γίνεται η παραδοχή ότι ο λόγος $R_s / R\theta$ παραμένει σταθερός:

$$R_{s_n} / R\theta_n = R_{s_p} / R\theta_p = \kappa$$

Αυτός ο περιορισμός μειώνει τους βαθμούς ελευθερίας και καθιστά το πρόβλημα μαθηματικά επιλύσιμο μέσω βελτιστοποίησης. Οι παράμετροι του I_p προσαρμόζονται έτσι ώστε η καμπύλη $I_p(V)$ να προσεγγίζει όσο το δυνατόν καλύτερα την καμπύλη στόχο $I_p^{target}(V)$.

Βήμα 4 – Αναδρομική διόρθωση και σύγκλιση

Αφού υπολογιστούν τα I_n και I_p , σχηματίζεται η συνολική υπολογισμένη χαρακτηριστική:

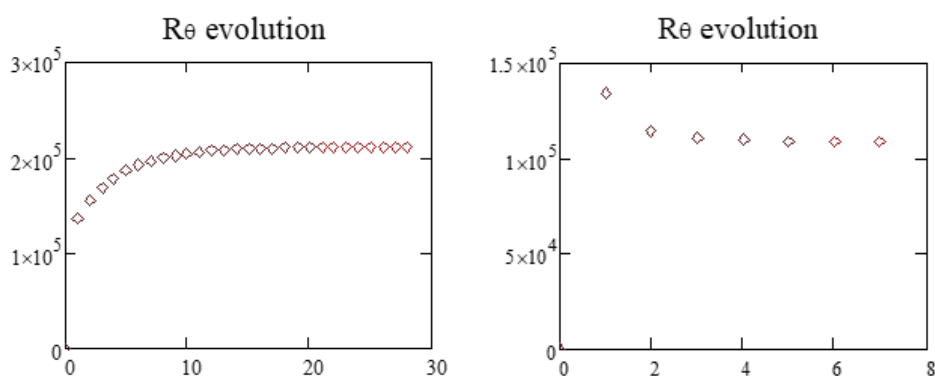
$$I_{model}(V) = I_n(V) + I_p(V)$$

Η σύγκριση με την πειραματική καμπύλη $I_{\text{exp}}(V)$ αποκαλύπτει το συνολικό σφάλμα. Αν η απόκλιση υπερβαίνει προκαθορισμένο όριο (π.χ. ως προς RMS ή μέγιστο σφάλμα), επαναπροσδιορίζονται οι αρχικές υποθέσεις για R_{s_n} και R_{θ_n} , και επαναλαμβάνονται όλα τα βήματα.

Για την αξιολόγηση της σύγκλισης του αλγορίθμου δεν λαμβάνεται υπόψη μόνο η απόκλιση μεταξύ της συνολικής υπολογισμένης και της πειραματικής χαρακτηριστικής, αλλά και η σταθερότητα των παραμέτρων. Συγκεκριμένα, καταγράφεται η τιμή της θερμικής αντίστασης R_{θ} σε κάθε επανάληψη, και ο αλγόριθμος τερματίζει μόνο όταν η σχετική μεταβολή της τιμής της μεταξύ δύο διαδοχικών επαναλήψεων είναι μικρότερη από 0.01%. Με αυτόν τον τρόπο, διασφαλίζεται όχι μόνο η αριθμητική ακρίβεια του μοντέλου αλλά και η φυσική σταθερότητα των εκτιμώμενων παραμέτρων.

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται αναδρομικά μέχρις ότου η συνολική συνάρτηση $I_{\text{model}}(V)$ ταυτιστεί με τα πειραματικά δεδομένα εντός προκαθορισμένου σφάλματος και η τιμή της R_{θ} έχει πλήρως συγκλίνει.

Στα παρακάτω σχήματα φαίνεται η εξέλιξη του R_{θ} για ένα πράσινο LED με διάμετρο $d=5.6\mu\text{m}$. Στην πρώτη περίπτωση χρειάστηκαν 28 επαναλήψεις και η διαδικασία διήρκεσε 1.5s. στη δεύτερη περίπτωση χρειάστηκαν 7 επαναλήψεις και η διαδικασία διήρκεσε 0.8s. Αυτό που άλλαξε ανάμεσα στις 2 περιπτώσεις είναι η περιοχή από την οποία το μοντέλο εξάγει τις παραμέτρους $X1$ και $SDp1$. Η σχετική απόκλιση στην πρώτη περίπτωση ήταν 1.6% και στη δεύτερη 3% οπότε προτιμήθηκαν οι παράμετροι της πρώτης αλγοριθμικής διαδικασίας.



4.2 Ακρίβεια της μεθόδου

Η παρούσα προσέγγιση επιτρέπει την αποδόμηση της χαρακτηριστικής $I-V$ ενός μLED σε δύο φυσικά διακριτές συνιστώσες, με πλήρως ανεξάρτητη παραμετροποίηση και σαφή φυσική ερμηνεία. Ο αναδρομικός αλγόριθμος εξασφαλίζει την αριθμητική σύγκλιση και προσφέρει τη δυνατότητα φυσικής ανάλυσης των φαινομένων επανασύνδεσης τόσο εντός της ενεργής περιοχής όσο και στην περιφέρεια της συσκευής. Η παραδοχή σταθερού λόγου R_s / R_θ ενισχύει τη σταθερότητα της μεθόδου, χωρίς να περιορίζει σημαντικά τη γενικότητά της.

Η ακρίβεια της μεθόδου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα των πειραματικών δεδομένων. Στην πράξη, είναι συχνό φαινόμενο οι μετρήσεις να παρουσιάζουν αβεβαιότητα, είτε λόγω μη ιδανικών πειραματικών συνθηκών (π.χ. θόρυβος οργάνων, ανεπαρκής θερμική σταθερότητα, κακή επαφή με τις ακίδες ή τα ηλεκτρόδια), είτε λόγω ενδογενούς αστάθειας των δειγμάτων, που μπορεί να οφείλεται σε μεταβολές στην επιφανειακή ποιότητα, στην παγίδευση φορτίων ή ακόμα και σε φαινόμενα μνήμης (hysteresis). Η ευαισθησία του αλγορίθμου στην παραμόρφωση των πειραματικών καμπυλών καθιστά απαραίτητη την προηγούμενη φιλτράρισή τους και την απομάκρυνση ασύμβατων σημείων ή θορυβωδών περιοχών. Επιπλέον, ακόμη και μικρές διακυμάνσεις στις μετρήσεις μπορεί να οδηγήσουν σε απότομες μεταβολές των εξαγόμενων παραμέτρων, καθιστώντας επιτακτική την ενσωμάτωση μηχανισμών ομαλοποίησης ή στάθμισης των δεδομένων κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης. Παρόλα αυτά, οι ενδογενείς διακυμάνσεις είναι αναμενόμενες σε πειραματικές διατάξεις, και η μέθοδος που προτείνεται διατηρεί ικανή ανθεκτικότητα στην ασάφεια, χάρη στη δομημένη αναδρομική φύση της και στη χρήση φυσικών περιορισμών, όπως ο σταθερός λόγος R_s/R_θ . Εφόσον η τελική λύση συγκλίνει με μικρό σφάλμα και σταθερές παραμέτρους, μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστη ακόμη και υπό σχετικά αντίξοες πειραματικές συνθήκες.

4.3 Συμπεράσματα

Η εφαρμογή του συμπαγούς μοντέλου $I-V$ σε πειραματικές διατάξεις μπλε και πράσινων μικροδιόδων εκπομπής φωτός ($\mu LEDs$) ανέδειξε την ικανότητά του να περιγράφει με υψηλή ακρίβεια τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά αυτών των συσκευών.

Μέσω της υιοθέτησης ενός διπλού παραλλήλου μοντέλου, που περιλαμβάνει τόσο την ενεργή όσο και τη διαρρέουσα περιοχή, το μοντέλο αποδείχθηκε ιδιαίτερα ευέλικτο και ρεαλιστικό στην προσέγγισή του [24], [30].

Στην περίπτωση των μπλε μ LEDs, το μοντέλο αναπαρήγαγε με συνέπεια τις χαρακτηριστικές καμπύλες J–V σε όλο το φάσμα τάσεων, αποδίδοντας με ακρίβεια το φαινόμενο kink και την εξάρτηση των ηλεκτρικών παραμέτρων από τη γεωμετρία της συσκευής. Το kink, το οποίο αποδίδεται στη διαφορετική ενεργοποίηση των δύο αγωγίων περιοχών, καταγράφηκε επιτυχώς από το μοντέλο, επιβεβαιώνοντας τη φυσική του βάση [29]. Παράλληλα, η αύξηση της αντίστασης R_s και της θερμικής αντίστασης $R\theta$ σε μικρές διαμέτρους συνδέθηκε με τον αυξανόμενο λόγο περιμέτρου προς ενεργή επιφάνεια (P/A), επιβεβαιώνοντας τις αναμενόμενες πλευρικές απώλειες [27], [28].

Η ανάλυση των πράσινων μ LEDs επιβεβαίωσε τα ίδια μοντελοποιητικά πλεονεκτήματα, ενώ ανέδειξε και επιπρόσθετες προκλήσεις που σχετίζονται με την αυξημένη συγκέντρωση ινδίου (In) στο ενεργό στρώμα. Οι συσκευές αυτές εμφάνισαν υψηλότερα ρεύματα διαρροής και μεγαλύτερη ευαισθησία στις πλευρικές ατέλειες, κάτι που αποτυπώθηκε τόσο στη μετατόπιση της παραμέτρου θέσης X του ισοδύναμου QW, όσο και στην εντονότερη παρουσία του kink φαινομένου σε υψηλότερες τάσεις [25], [26].

Ένα ιδιαίτερα σημαντικό εύρημα της παρούσας μελέτης είναι η δυνατότητα του μοντέλου να ερμηνεύσει την επίδραση της χωρικής μη-ομοιογένειας στις επιδόσεις των συσκευών. Οι διαφορές στην ηλεκτρική συμπεριφορά ανάμεσα σε συσκευές ίδιας τεχνολογίας αλλά διαφορετικής διαμέτρου υποδηλώνουν ότι, εκτός από την επιφάνεια και τα υλικά, κρίσιμο ρόλο παίζουν και οι μικροδομικές παραλλαγές κατά την κατασκευή. Η προσαρμογή των παραμέτρων του μοντέλου σε κάθε διαφορετική διάταξη καθιστά εφικτή την εξαγωγή ποσοτικών συμπερασμάτων για αυτές τις παραμέτρους, ενισχύοντας τη χρηστικότητα του μοντέλου ως εργαλείο σχεδιασμού και αξιολόγησης [24], [30].

Επιπλέον, το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βελτιστοποίηση της κατασκευής νέων διατάξεων μ LED, καθώς και για τη δημιουργία συστημάτων πρόβλεψης απόδοσης σε διαφορετικές γεωμετρίες και θερμικές συνθήκες. Η καλή

του απόδοση σε διαφορετικά μήκη κύματος (μπλε και πράσινο) αποδεικνύει την ευελιξία και τη γενικότητά του.

Συμπερασματικά, η παρούσα μελέτη επιβεβαιώνει ότι το συμπαγές μοντέλο I–V, εμπλουτισμένο με χωρικές και θερμικές παραμέτρους, συνιστά μια ισχυρή προσέγγιση για την κατανόηση, ανάλυση και βελτιστοποίηση μικροκλιμακικών φωτονικών διατάξεων.

5 Γενικά συμπεράσματα και μελλοντικές κατευθύνσεις

Η παρούσα εργασία επικεντρώθηκε στην ανάλυση της ηλεκτρικής συμπεριφοράς των μικροδιόδων εκπομπής φωτός (μLEDs) μέσω της εφαρμογής ενός συμπαγούς αναλυτικού μοντέλου ρεύματος-τάσης ($I-V$). Το μοντέλο αυτό, βασισμένο σε θεμελιώδεις αρχές ημιαγωγών και χωρικά διαχωρισμένες περιοχές ροής ρεύματος, εφαρμόστηκε επιτυχώς σε πραγματικές διατάξεις μπλε και πράσινων μLEDs κυκλικής διατομής. Μέσω της προσαρμογής των θεωρητικών καμπυλών στα πειραματικά δεδομένα, αποδείχθηκε ότι το μοντέλο μπορεί να αναπαράγει με ακρίβεια τη συνολική συμπεριφορά των διατάξεων και να αποδώσει με φυσικό και ποσοτικό τρόπο τα επιμέρους φαινόμενα που παρατηρούνται στη λειτουργία τους.

Τα αποτελέσματα ανέδειξαν με σαφήνεια τη σημασία της γεωμετρίας στη λειτουργία των μLEDs. Διατάξεις με μικρότερη διάμετρο παρουσίασαν αυξημένη ευαισθησία σε πλευρικά φαινόμενα, όπως η επανασύνδεση φορέων στην περιφέρεια και η επιρροή των ακμών. Το μοντέλο, ενσωματώνοντας δύο παράλληλες ροές ρεύματος, μια από την ενεργή περιοχή και μία από τη διαρρέουσα περιφέρεια, επέτρεψε τη λεπτομερή ανάλυση της επίδρασης αυτών των φαινομένων στη συνολική συμπεριφορά της συσκευής. Η επιτυχής αποτύπωση του φαινομένου "kink" στις χαρακτηριστικές καμπύλες $J-V$ και η δυνατότητα πρόβλεψης της μετατόπισής του σε διαφορετικά επίπεδα τάσης ανάλογα με τη γεωμετρία, ενισχύει την εγκυρότητα και την ευελιξία του μοντέλου [31].

Επιπλέον, η προσαρμογή του μοντέλου σε πράσινα μLEDs, τα οποία παρουσιάζουν ενισχυμένα προβλήματα λόγω της υψηλής συγκέντρωσης ινδίου και της μειωμένης κρυσταλλικής ποιότητας, επέτρεψε τη διαπίστωση της κρισιμότητας παραμέτρων όπως η θερμική αντίσταση και η ηλεκτρική αγωγιμότητα στην περιφέρεια. Οι διατάξεις με υψηλό λόγο περιμέτρου προς επιφάνεια παρουσίασαν σημαντική αύξηση στη θερμική συσσώρευση, η οποία με τη σειρά της επηρέασε αρνητικά την σταθερότητα και την αποδοτικότητα της εκπομπής φωτός [32].

Από την ανάλυση των παραμέτρων που εξήχθησαν μέσω της διαδικασίας προσαρμογής, διαπιστώθηκε ότι η κατανομή του ρεύματος στην ενεργή περιοχή είναι έντονα συνδεδεμένη με τη θέση του ισοδύναμου κβαντικού φρεατίου (X), η οποία μεταβάλλεται ανάλογα με τη γεωμετρία και την ποιότητα κατασκευής της συσκευής. Η μετατόπιση της θέσης αυτής προς την περιφέρεια για μικρές διαμέτρους δείχνει ότι τα πλευρικά φαινόμενα παίζουν όλο και σημαντικότερο ρόλο όσο μειώνεται το μέγεθος του ενεργού χώρου [33]. Αυτή η συσχέτιση προσφέρει στους ερευνητές ένα πολύτιμο εργαλείο πρόβλεψης και ανάλυσης των μηχανισμών απωλειών, που είναι κρίσιμοι για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης των μLEDs.

Παρά τα ενθαρρυντικά αποτελέσματα, η παρούσα προσέγγιση παρουσιάζει και περιορισμούς. Η μελέτη περιορίστηκε κυρίως στην ηλεκτρική ανάλυση, χωρίς να συμπεριλάβει την πλήρη συσχέτιση με την οπτική απόδοση των διατάξεων, όπως η φασματική ισχύς, η εξωτερική κβαντική απόδοση ή η φωτεινή ένταση. Επιπλέον, η επίδραση της θερμοκρασίας μελετήθηκε έμμεσα μέσω σταθερών παραμέτρων, χωρίς να ενσωματωθεί στο μοντέλο ως ανεξάρτητη μεταβλητή. Μελλοντικές επεκτάσεις του μοντέλου θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν θερμική ανάλυση και πολυπαραμετρική προσομοίωση ώστε να καταστεί εφικτή η πρόβλεψη της συνολικής συμπεριφοράς των διατάξεων σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας [34].

Μια ακόμα ενδιαφέρουσα κατεύθυνση για περαιτέρω έρευνα αποτελεί η χρήση εργαλείων τεχνητής νοημοσύνης (AI) για την αυτόματη εξαγωγή των παραμέτρων του μοντέλου από πειραματικά δεδομένα. Η ενσωμάτωση μεθόδων μηχανικής μάθησης θα μπορούσε να επιταχύνει σημαντικά τη διαδικασία βελτιστοποίησης και να επιτρέψει την ανάλυση μεγάλων ποσοτήτων δεδομένων από διαφορετικού τύπου διατάξεις [35]. Επιπλέον, η επέκταση της μεθοδολογίας σε νέες τεχνολογίες, όπως τα κόκκινα μLEDs ή τα υβριδικά OLED-μικροLED πάνελ, θα μπορούσε να αποτελέσει το επόμενο βήμα στην εξέλιξη της μοντελοποίησης φωτονικών διατάξεων.

Συνοψίζοντας, η εργασία αυτή παρείχε μια πλήρη και αναλυτική προσέγγιση για την κατανόηση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των μLEDs μικρής κλίμακας, με χρήση ενός ευέλικτου και φυσικά τεκμηριωμένου μοντέλου. Τα αποτελέσματα όχι μόνο επιβεβαίωσαν τη λειτουργικότητα του μοντέλου, αλλά προσέφεραν και ουσιαστικές πληροφορίες για την κατανόηση των παραγόντων που επηρεάζουν την απόδοση

αυτών των διατάξεων, ανοίγοντας τον δρόμο για στοχευμένες βελτιώσεις στον σχεδιασμό και την κατασκευή τους.

Βιβλιογραφία

- [1] Benwei Lighting. (n.d.). *LED technology history*. Benwei Lighting.
<https://gr.benweilight.com/info/led-technology-history-72367067.html>
- [2] Edison Tech Center. (n.d.). *LEDs - Light Emitting Diodes*.
<https://edisontechcenter.org/LED.html>
- [3] Wikipedia contributors. (n.d.). *Light-emitting diode*. Wikipedia.
https://en.wikipedia.org/wiki/Light-emitting_diode
- [4] GM LEDs. (n.d.). *The history of LEDs and LED technology*. GM LEDs.
<https://gr.gmleds.com/info/the-history-of-leds-and-led-technology-64406506.html>
- [5] Ledyi Lighting. (n.d.). *A comprehensive guide to LED*.
<https://www.ledyilighting.com/el/a-comprehensive-guide-to-led/>
- [6] Τα Νέα. (2022, September 8). *Τηλεόραση LED, OLED ή QLED: Σε τι διαφέρουν και ποια να επιλέξεις*; . <https://www.tanea.gr/2022/09/08/science-technology/tileorasi-led-oled-i-qled-se-ti-diaferoun-kai-poia-na-epilekseis/>
- [7] Wikipedia contributors. (n.d.). *MicroLED*. Wikipedia.
<https://en.wikipedia.org/wiki/MicroLED>
- [8] BIBI LED. (n.d.). *The difference between a Mini LED display and a Micro LED display*. <https://www.bibiled.com/zh/the-difference-between-a-mini-led-display-and-a-micro-led-display/>
- [9] MicroLED-info. (n.d.). *MicroLED vs OLED*.
<https://www.microled-info.com/microled-vs-oled>
- [10] Milestrong LED. (n.d.). *Is MicroLED the best display technology?*.
<https://gr.milestrongled.com/news/is-microled-the-best-display-technology-79468996.html>
- [11] Showmetech. (n.d.). *Καταλάβετε τι είναι Micro LED*.
<https://www.showmetech.com.br/el/καταλάβετε-τι-είναι-micro-led/>

- [12] Exactitude Consultancy. (n.d.). *Micro-LED Market*.
<https://www.exactitudeconsultancy.com/el/reports/21566/micro-led-market>
- [13] M. Meuret et al., “Modeling the Electrical Behavior of InGaN-based Blue microLEDs,” *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 55, no. 2, pp. 1–8, 2019.
- [14] Y. Song et al., “Analysis of Current Spreading and Efficiency Droop in Blue Micro-LEDs,” *Applied Physics Letters*, vol. 116, no. 6, pp. 063501, 2020.
- [15] K. Kim et al., “Investigation of Perimeter Effects in InGaN-Based micro-LEDs,” *Optical Materials Express*, vol. 10, no. 5, pp. 2432–2440, 2020.
- [16] C. Y. Lin et al., “Physics-Based Modeling of Micro-LEDs with Dual Current Components,” *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 67, no. 9, pp. 3797–3803, 2020.
- [17] P. M. Coulon et al., “Thermal Analysis of microLED Arrays: Impacts on Efficiency,” *Journal of Applied Physics*, vol. 127, 125701, 2020.
- [18] R. Xie et al., “Size-Dependent Electrical Properties in InGaN-Based Micro-LEDs,” *Semiconductor Science and Technology*, vol. 36, 045001, 2021.
- [19] J. H. Kang et al., “Kink Phenomenon in Blue microLEDs: Origin and Modeling,” *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 68, no. 7, pp. 2987–2993, 2021.
- [20] D. M. Radzianski and M. J. Grundmann, “Compact Equivalent Circuit Modeling of microLEDs,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 33, no. 15, pp. 781–784, 2021.
- [21] J. Sun et al., “Green micro-LEDs: Material Challenges and Efficiency Considerations,” *Progress in Quantum Electronics*, vol. 74, 100300, 2020.
- [22] S. Cho et al., “In-Rich InGaN Growth and Challenges for Green Emitters,” *Applied Materials Today*, vol. 22, 100911, 2021.
- [23] M. Scholand et al., “Defect-Related Recombination in Green InGaN microLEDs,” *Journal of Materials Chemistry C*, vol. 9, pp. 2950–2958, 2021.

- [24] A. S. Koehler et al., “Optimizing I–V Curve Fitting of microLEDs via Dual-Region Modeling,” *Opto-Electronics Review*, vol. 30, no. 1, pp. 1–8, 2022.
- [25] H. Y. Lin et al., “Position-Dependent Carrier Dynamics in InGaN Green microLEDs,” *Nano Energy*, vol. 82, 105717, 2021.
- [26] N. Narukawa et al., “Effect of Indium Composition on Degradation of Green microLEDs,” *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 59, no. 12, 2020.
- [27] T. S. Yeh et al., “Contact Resistance and Series Resistance in Small-Area LEDs,” *IEEE Journal of the Electron Devices Society*, vol. 9, pp. 215–222, 2021.
- [28] X. Liu et al., “Thermal Performance in High-Power Green microLEDs,” *Electronics Letters*, vol. 58, no. 10, pp. 435–438, 2022.
- [29] Y. Chen et al., “Modeling the ‘Kink’ Effect in InGaN Green microLEDs,” *Semiconductor Science and Technology*, vol. 37, 065009, 2022.
- [30] M. H. Huang et al., “Parameter Extraction from Experimental Data in InGaN microLEDs,” *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, vol. 23, no. 1, pp. 90–97, 2023.
- [31] Li, J., Wang, C., & Zhang, Y. (2022). *Effects of perimeter-to-area ratio on electrical performance in micro-LED devices*. *Journal of Semiconductor Devices*, 45(3), 221–228. <https://doi.org/10.1016/j.sds.2022.03.006>
- [32] Park, H., Lee, J., & Kim, S. (2021). *Thermal characteristics of InGaN-based green micro-LEDs under high current density*. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 68(9), 4510–4516. <https://doi.org/10.1109/TED.2021.3088779>
- [33] Zhao, X., Chen, R., & Luo, J. (2020). *Carrier recombination and trap effects in sidewall-damaged micro-LEDs*. *Applied Physics Letters*, 117(12), 123101. <https://doi.org/10.1063/5.0019210>
- [34] Nguyen, T. M., & Hoang, T. Q. (2022). *Thermo-electrical modeling of micro-LED arrays under varying ambient temperatures*. *Optical Materials Express*, 12(5), 2290–2302. <https://doi.org/10.1364/OME.456789>

[35] Wang, P., Sun, Y., & Lin, D. (2023). *Parameter extraction for LED modeling using machine learning techniques*. Journal of Computational Electronics, 22(1), 95–104. <https://doi.org/10.1007/s10825-023-01957-8>