



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ

**Ψηφιακή μικροκατοπτρική συσκευή για τον έλεγχο της
φασματικής έντασης ισχύος πηγών φωτός ευρέως φάσματος**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Στέλλα Ν. Σπυριδάκη

Επιτροπή

Μπάλας Κωνσταντίνος (Καθηγητής – Επιβλέπων)

Μπλέτσας Άγγελος (Καθηγητής)

Μανιά Αικατερίνη (Αναπληρώτρια Καθηγήτρια)

Χανιά, Φεβρουάριος 2020

Περίληψη

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι μια καινοτόμα ψηφιακή μικροκατοπτρική συσκευή για τον έλεγχο της φασματικής έντασης ισχύος πηγών φωτός ευρέως φάσματος. Στον κόσμο της οπτικής επιστήμης, υπάρχουν ήδη ρυθμιζόμενες πηγές φωτός (Tunable Light Sources – TLS) βασισμένες σε διαφορετικές τεχνολογίες, όπως λείζερ (Distributed Bragg Reflector, Distributed Feedback, Ion and Dye), ρυθμιζόμενα φίλτρα (Liquid Crystal, Optical Parametric Oscillator and Acousto-optic) και άλλα. Οι εν λόγω πηγές παρουσιάζουν σημαντικά μειονεκτήματα, όπως χαμηλή απόδοση, υψηλό κόστος και χαμηλή εκπεμπόμενη ισχύ. Ένας ακόμα σημαντικός περιορισμός ως προς την απόδοσή τους είναι πως συνήθως μπορούν να προβάλουν λιγότερα από δέκα ταυτόχρονα μήκη κύματος με εύρος οριοθετημένο από τις κορυφές κάθε φασματικής καμπύλης.

Η οπτική συσκευή που παρουσιάζεται στην εργασία αυτή είναι ικανή να προβάλει οποιοδήποτε διαθέσιμο φάσμα υπάρχει σε μορφή καμπύλης, ξεπερνώντας έτσι τον περιορισμό των κορυφών που μέχρι τώρα μπορούσαν να προβάλουν οι ρυθμιζόμενες πηγές φωτός. Την καινοτόμα συσκευή πλαισιώνει κατάλληλο λογισμικό και έτσι είναι πλήρως ελεγχόμενη από τον υπολογιστή. Στο σημείο αυτό να σημειωθεί ότι η παρούσα μελέτη βασίστηκε σε προϋπάρχον μοντέλο, αντικείμενο προηγούμενης διπλωματικής εργασίας το οποίο τροποποιήθηκε τόσο σε επίπεδο αρχιτεκτονικής όσο και λογισμικού.

Abstract

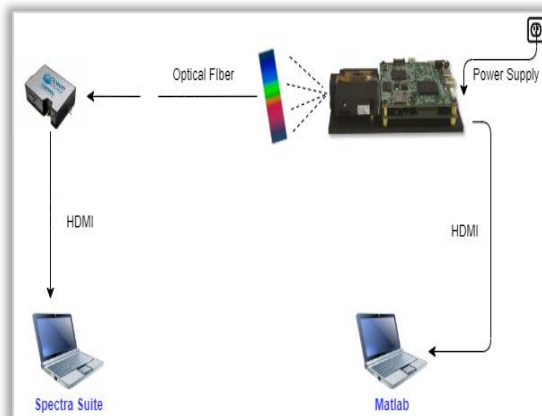
The subject of this thesis is an innovative digital micromirror device for controlling the spectral intensity of broad-spectrum light sources. In the world of optical science, there are already Tunable Light Sources (TLS) based on different technologies, such as lasers (Distributed Bragg Reflector, Distributed Feedback, Ion and Dye), tunable filters (Liquid Crystal, Optical Parametric Oscillator and Acousto-optic) and others. These sources have significant disadvantages, such as low throughput, high cost, and low power efficiency. Another important limitation on their performance is that they usually can project less than ten simultaneous wavelengths with a range delimited by the peaks of each spectral curve.

The optical device presented in this thesis is capable of projecting any available spectrum in a curved form, getting over the limitation of peaks that could be projected by tunable light sources until now. This innovative device is supported by appropriate software that enables fully computer-controlled operation. At this point, it should be noted that the present study was based on a pre-existing model, the subject of prior thesis work that was modified at both architectural and software level.

Introduction to Experimental Design

In optical science, there are already several Tunable Light Sources. However, these sources have significant disadvantages, such as low throughput, high cost, and low power efficiency. Another important limitation on their performance is that they usually can project less than ten simultaneous wavelengths with a range delimited by the peaks of each spectral curve. The innovative device created in the optoelectronics lab transcended these limitations, creating a system capable of projecting any spectrum in a curved form indicated by the user without any restrictions.

The device consists of optical elements properly connected resulting in the projection of the desired spectrum. The optical elements used in the layout are a DLP technology projector, a Schott linear filter, an optical fiber Line Light Guide and a spectrometer for the experimental procedure. The device is fully software controlled, specifically using the Matlab tool, to select the spectral curves that the user indicates and Spectra Suite for taking measurements.



The first optical element used in the project is the DLP LightCrafter 3000 from Texas Instruments, with a unique modification to replace the internal RGB LEDs with a halogen lamp for our study. The role of the LightCrafter 3000 is to project a black and white image onto the Schott linear filter, ranging from 400 to 700 nm, thus determining what wavelengths will pass through the optical fiber.

The black and white image projected by the DLP on the linear filter comes from the computer via HDMI. This image is generated from Matlab after the user has indicated points that are modeled in a spectrum curve or have been drawn from him. The final installation is completed by an experimental procedure using a spectrometer to evaluate the accuracy and performance of the optical device.

Ευχαριστίες

Με την περάτωση της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή κ. Μπάλα Κωνσταντίνο για την δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα. Ευχαριστώ εκ βαθέων το διδακτορικό φοιτητή Ρώσσο Χρήστο για τον πολύτιμο χρόνο που διέθεσε καθόλη τη διάρκεια της εργασίας μου, δίνοντας πολύτιμες υποδείξεις και συμβουλές. Θα ήθελα ακόμα να ευχαριστήσω όλη την ομάδα του εργαστηρίου οπτοηλεκτρονικής για την γενικότερη βοήθεια και το ευχάριστο κλίμα.

Μια λέξη είναι λίγη για να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου απέναντι στην αγαπημένη μου οικογένεια, τους γονείς και την μονάκριβη αδερφή και συγκάτοικο τα σημαντικότερα χρόνια της ζωής μου έως τώρα, τα φοιτητικά. Με την στήριξη και την αγάπη τους κατάφερα πολλά εντός και εκτός ακαδημαϊκού χώρου. Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ αξίζουν και οι φίλοι μου που είναι πνευματικός πλούτος για εμένα και βασικός πυλώνας των υπέροχων αναμνήσεων που έχτισα τόσα χρόνια στα Χανιά.

Σπυριδάκη Στέλλα

Φεβρουάριος 2020, Χανιά

Περιεχόμενα

1 Η φύση του φωτός	1
1.1 Η ανατομία του ηλεκτρομαγνητικού κύματος	1
1.2 Η σωματιδιακή φύση του φωτός	2
1.3 Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα	3
2 Οπτικές πηγές	5
2.1 Οπτικές πηγές συνεχούς φάσματος	5
2.1.1 Πηγές μέλανος σώματος	5
2.1.2 Πηγές εκκένωσης αερίων υπό υψηλή πίεση	6
2.1.3 Πηγές σύγχροτρον	7
2.2 Οπτικές πηγές γραμμικού φάσματος	8
2.2.1 Ασύμφωνες πηγές γραμμικού φάσματος	9
2.2.2 Σύμφωνες πηγές γραμμικού φάσματος	10
2.2.2.1 Λέιζερ αερίου	10
2.3 Πηγές συνεχούς φάσματος ενδιάμεσου εύρους	13
2.3.1 Λέιζερ χρωστικού (Dye Laser)	13
2.3.2 Δίοδοι εκπομπής φωτός (LED)	14
2.4 Ρυθμιζόμενες πηγές φωτός	14
2.4.1 Διακριτά LED	15
2.4.2 Ρυθμιζόμενα φίλτρα υγρών κρυστάλλων (LCTFs)	15
2.4.3 Φράγμα περίθλασης	16
2.4.4 Ακουστο-οπτικά φίλτρα (AOTF)	16
2.5 Κεντρική ιδέα εργασίας	16
3 Προβολικά συστήματα	18
3.1 Εισαγωγή στα προβολικά συστήματα	18
3.2 Προβολέας LCD τεχνολογίας	20
3.2.1 Αρχή λειτουργίας LCD προβολέα	20
3.3 Προβολέας DLP τεχνολογίας	21
3.3.1 Αρχή λειτουργίας DLP προβολέα	21
3.4 DLP vs LCD	24
3.4.1 Πλεονεκτήματα DLP τεχνολογίας	24
3.4.2 Αδυναμίες και περιορισμοί DLP τεχνολογίας	26
3.4.3 Πλεονεκτήματα 3LCD τεχνολογίας	29
3.4.4 Αδυναμίες και περιορισμοί 3LCD τεχνολογίας	30

3.5 Η τεχνολογία LCOS	31
4 Ελεγχόμενη μικροκατοπτρική συσκευή	33
4.1 Αρχιτεκτονική δομή DLP LightCrafter 3000.....	33
4.1.1 DLP3000.....	34
4.1.2 Μονοχρωματικά LED.....	35
4.1.3 NTC θερμίστορ	35
4.1.4 Απαιτούμενα στοιχεία για την λειτουργία.....	35
4.2 Η αρχική δομή του πειράματος	36
4.2.1 Γραμμικό φίλτρο Schott	37
4.2.2 Οπτική ίνα	38
4.2.3 Φασματόμετρο.....	39
4.3 Αναβάθμιση πρωτοτύπου	39
4.4 Ανάπτυξη λογισμικού.....	42
4.4.1 Επεξήγηση πειραματικής διαδικασίας.....	42
4.4.2 Ανάλυση και δυνατότητες αρχικού προγράμματος.....	42
4.4.3 Αναβάθμιση προγράμματος	44
5 Αποτελέσματα πειραματικής διαδικασίας	49
5.1 Τεστ αναπαραγωγής φάσματος εξόδου	49
5.1.1 Φάσμα εξόδου στα 460 nm	49
5.1.2 Φάσμα εξόδου στα 480 nm	52
5.1.3 Φάσμα εξόδου στα 500 nm	54
5.1.4 Φάσμα εξόδου στα 520 nm	57
5.1.5 Φάσμα εξόδου στα 540 nm	59
5.1.6 Φάσμα εξόδου στα 560 nm	61
5.1.7 Φάσμα εξόδου στα 580 nm	64
5.1.8 Φάσμα εξόδου στα 600 nm	66
5.1.9 Φάσμα εξόδου στα 620 nm	68
5.1.10 Φάσμα εξόδου στα 640 nm	71
5.1.11 Φάσμα εξόδου στα 660 nm	73
5.1.12 Φάσμα εξόδου στα 690-700 nm	75

5.2 Προβολή χλωροφύλλης και δέρματος.....	78
5.3 Προβολή μεταμερικού ζεύγους.....	80
6 Μελλοντική εργασία.....	82
Αναφορές.....	83

Ευρετήριο εικόνων

Εικόνα 1.1: Κυματοσωματιδιακός δυισμός	1
Εικόνα 1.2: Ηλεκτρομαγνητικό κύμα.....	2
Εικόνα 1.3: Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο	3
Εικόνα 1.4: Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα	4
Εικόνα 2.1: Λέιζερ χρωστικών βασιτισμένο στη Ροδαμίνη 6G.....	13
Εικόνα 2.2: LED.....	14
Εικόνα 3.1: Προβολέας LCD	20
Εικόνα 3.2: Προβολέας D-ILA.....	21
Εικόνα 3.3: Δομή DMD	22
Εικόνα 3.4: Διαδικασία ON/OFF Micromirror	22
Εικόνα 3.5: Προβολέας DLP	23
Εικόνα 3.6: Screendoor / Pixelation effect	26
Εικόνα 3.7: Rainbow effect	27
Εικόνα 4.1: Αναλυτική δομή LightCrafter 3000	34
Εικόνα 4.2: Πρωτότυπο συσκευής	36
Εικόνα 4.3: Τελικό Setup πρωτοτύπου.....	37
Εικόνα 4.4: Schott filter transmittance	38
Εικόνα 4.5: Δεύτερο μοντέλο DLP	40
Εικόνα 4.6: Τελικό Setup	40
Εικόνα 4.7: Τεστ εφαρμογής	41
Εικόνα 4.8: Σημεία επιλεγμένα από τον χρήστη	43
Εικόνα 4.9: Φασματική καμπύλη	43
Εικόνα 4.10: Τελική εικόνα προς DLP.....	44
Εικόνα 4.11: Ενεργή τοποθεσία κέρσορα	45
Εικόνα 4.12: Φασματική καμπύλη	45
Εικόνα 4.13: Τελική εικόνα προς DLP.....	46
Εικόνα 4.14: Καμπύλη με ψευδή φωτεινότητα στο άκρο	46
Εικόνα 4.15: Φάσμα με ψευδή φωτεινότητα στο άκρο	47
Εικόνα 4.16: Βέλτιστη μορφή φάσματος	47
Εικόνα 4.17: Ζωγραφισμένη καμπύλη	48
Εικόνα 4.18: Εξομαλυμένη καμπύλη	48
Εικόνα 5.1: Φασματική καμπύλη 460 nm	50
Εικόνα 5.2: Παραγόμενη εικόνα	50
Εικόνα 5.3: Φασματική καμπύλη 480 nm	52

Εικόνα 5.4: Παραγόμενη εικόνα	53
Εικόνα 5.5: Φασματική καμπύλη 500 nm	55
Εικόνα 5.6: Παραγόμενη εικόνα	55
Εικόνα 5.7: Φασματική καμπύλη 520 nm	57
Εικόνα 5.8: Παραγόμενη εικόνα	57
Εικόνα 5.9: Φασματική καμπύλη 540 nm	59
Εικόνα 5.10: Παραγόμενη εικόνα	60
Εικόνα 5.11: Φασματική καμπύλη 560 nm	62
Εικόνα 5.12: Παραγόμενη εικόνα	62
Εικόνα 5.13: Φασματική καμπύλη 580 nm	64
Εικόνα 5.14: Παραγόμενη εικόνα	64
Εικόνα 5.15: Φασματική καμπύλη 600 nm	66
Εικόνα 5.16: Παραγόμενη εικόνα	67
Εικόνα 5.17: Φασματική καμπύλη 620 nm	69
Εικόνα 5.18: Παραγόμενη εικόνα	69
Εικόνα 5.19: Φασματική καμπύλη 640 nm	71
Εικόνα 5.20: Παραγόμενη εικόνα	71
Εικόνα 5.21: Φασματική καμπύλη 660 nm	73
Εικόνα 5.22: Παραγόμενη εικόνα	74
Εικόνα 5.23: Φασματική καμπύλη 690-700 nm	76
Εικόνα 5.24: Παραγόμενη εικόνα	76

Ευρετήριο σχημάτων

Σχήμα 2.1: Φασματική κατανομή ακτινοβολίας μέλανος σώματος	6
Σχήμα 2.2: Επαφή ημιαγωγών τύπου p-n	12
Σχήμα 2.3: Σχηματική παράσταση διαφόρων τύπων ημιαγωγίμων λείζερ	12
Σχήμα 4.1: Block diagram	42
Σχήμα 5.1: Αποκλίσεις φασμάτων	78

Ευρετήριο πινάκων

Πίνακας 2.1: Γραμμές εκπομπής που προέρχονται από τις ατομικές μεταπτώσεις του υδρογόνου	10
--	----

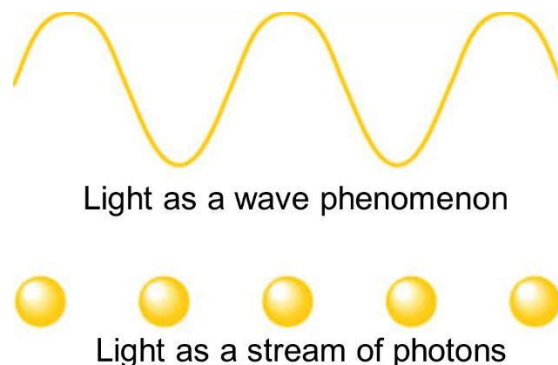
Πίνακας 2.2: Μήκη κύματος γραμμών εκπομπής από διάφορα στοιχεία	10
Πίνακας 2.3: Συστήματα λέιζερ αερίων και τα μήκη κύματος των κυριοτέρων γραμμών εκπομπής τους	11

1

Η φύση του φωτός [1][2]

Από τα αρχαία χρόνια υπάρχει η παραδοχή ότι το φως αποτελείται από μικρά σωματίδια τα οποία κινούνται με πολύ μεγάλη ταχύτητα και όταν πέσουν στο μάτι του παρατηρητή διεγείρουν το αισθητήριο της όρασης. Στη σωματιδιακή φύση του φωτός στηρίχτηκε ο Isaac Newton, για να διατυπώσει με βάση τις αρχές διατήρησης της ενέργειας και ορμής, το νόμο της ανάκλασης.

Αργότερα ένας σκωτσέζος επιστήμονας ο James Clerk Maxwell απέδειξε ότι το φως είναι εγκάρσια ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Μέχρι σήμερα έχουν αναπτυχθεί πολλές θεωρίες με τελική διαπίστωση ότι το φως έχει διπλή φύση. Δηλαδή όπως υποδεικνύεται στην Εικόνα 1.1, το φως συμπεριφέρεται άλλοτε ως κύμα και άλλοτε ως σωματίδιο που ονομάζεται φωτόνιο, το φαινόμενο αυτό καλείται κυματοσωματιδιακός δισισμός.



Εικόνα 1.1: Κυματοσωματιδιακός δισισμός

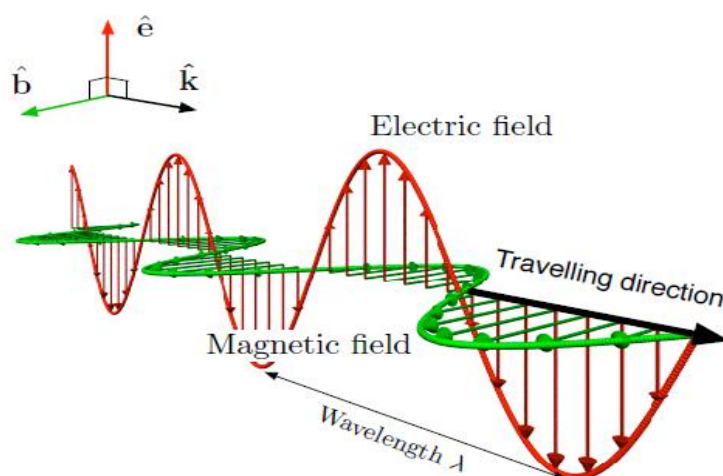
1.1 Η ανατομία του ηλεκτρομαγνητικού κύματος

Ενέργεια είναι η ικανότητα ενός σώματος ή συστήματος να παράγει έργο. Υπάρχει σε πολλές μορφές, ανάλογα με τον τρόπο που έχει αποκτηθεί, ανταλλαχθεί ή αποθηκευτεί. Μερικές μορφές ενέργειας είναι η μηχανική που συνδυάζει την κινητική και τη δυναμική ενέργεια, η ηλεκτρομαγνητική που συνδυάζει την ηλεκτρική και την ενέργεια της ακτινοβολίας, η πυρηνική, η θερμική, η χημική και η υλο-ενέργεια.

Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία είναι η εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας στον χώρο υπό μορφή κυμάτων που ονομάζονται ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Το 1873 ο

James Clerk Maxwell ανέπτυξε μια επιστημονική θεωρία για να εξηγήσει τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα.

Η θεωρία αυτή βασίζεται στο γεγονός ότι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.2 είναι συγχρονισμένα ταλαντούμενα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία τα οποία ταλαντώνονται σε κάθετα επίπεδα μεταξύ τους και κάθετα προς την διεύθυνση διάδοσης. Διαδίδονται στο κενό με ταχύτητα ίση με την ταχύτητα του φωτός ($c=299.792.458 \text{ m/s}$) αλλά και μέσα στην ύλη με ταχύτητα λίγο μικρότερη από την ταχύτητα του φωτός.



Εικόνα 1.2: Ηλεκτρομαγνητικό κύμα

Την ορθότητα της θεωρίας του Maxwell απέδειξε πειραματικά ο Χάινριχ Ρούντολφ Χερτς το 1887, ο οποίος παρήγαγε, μέσω ταχέων ηλεκτρικών ταλαντώσεων, κύματα της ίδιας φύσης με αυτήν του φωτός αλλά με μικρότερη συχνότητα. Επειδή το φως έχει πολύ μεγάλη συχνότητα, την εποχή εκείνη ήταν αδύνατο να δημιουργηθούν τεχνητά υψίσυχνες ταλαντώσεις σε ηλεκτρικά κυκλώματα.

Η ταχύτητα διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος (c), η συχνότητα (f) και το μήκος κύματος (λ) συνδέονται με τη σχέση $c=\lambda f$, η οποία ονομάζεται θεμελιώδης εξίσωση της κυματικής.

1.2 Η σωματιδιακή φύση του φωτός

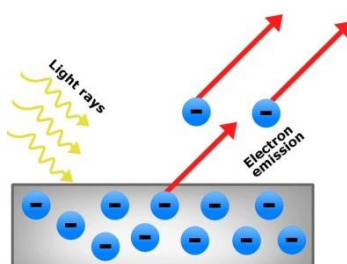
Σύμφωνα με την κβαντική θεωρία του Max Planck το φως και γενικότερα κάθε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, εκπέμπεται και απορροφάται από τα άτομα της ύλης ασυνεχώς. Δηλαδή κάθε άτομο εκπέμπει ή απορροφά στοιχειώδη ποσά ενέργειας, που ονομάζονται κβάντα φωτός ή φωτόνια. Κάθε φωτόνιο που εκπέμπεται από ένα άτομο χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένη συχνότητα και έχει συγκεκριμένη ποσότητα ενέργειας E .

Όταν το φως προσπίπτει πάνω στην ύλη, τα άτομα της ύλης απορροφούν την ακτινοβολία ασυνεχώς, που σημαίνει ότι κάθε άτομο απορροφά μεμονωμένα φωτόνια. Κάθε φωτόνιο μιας ακτινοβολίας έχει ενέργεια που δίνεται από τη σχέση :

$$E = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

Όπου $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ η σταθερά του Planck.

Στην Εικόνα 1.3 αναπαριστάται το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, κατά το οποίο ηλεκτρόνια απελευθερώνονται από μια επιφάνεια μετάλλου, όταν η προσπίπτουσα ακτινοβολία έχει συχνότητα ικανή να τα κάνει να υπερπηδήσουν το φράγμα δυναμικής ενέργειας που τα συγκρατεί σε εκείνη την επιφάνεια.

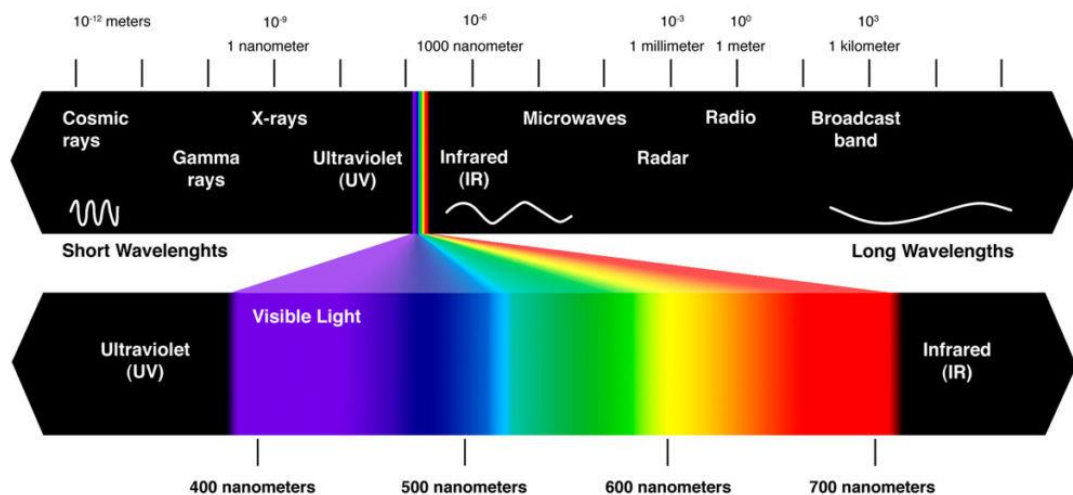


Εικόνα 1.3: Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

1.3 Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα είναι μια συνεχής περιοχή ακτινοβολίας που εκτείνεται θεωρητικά από σχεδόν μηδενικές συχνότητες έως το άπειρο. Σε όλες τις περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος τα κύματα έχουν την ίδια φύση, διαδίδονται με την ίδια ταχύτητα, την ταχύτητα του φωτός και διαφέρουν μόνο στη συχνότητα και το μήκος κύματος.

Με βάση τις παραπάνω χαρακτηριστικές ιδιότητες των κυμάτων το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα χωρίζεται σε επιμέρους ζώνες. Στην Εικόνα 1.4 παραθέτονται αναλυτικά όλες οι ζώνες ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που υπάρχουν στο σύμπαν.



Εικόνα 1.4: Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

Πιο συγκεκριμένα, το ορατό φάσμα, δηλαδή το φως που μπορεί να αντιληφθεί το ανθρώπινο μάτι, δεσμεύει ένα πολύ μικρό εύρος συχνοτήτων με μήκη κύματος που κυμαίνονται από $380nm$ έως $780nm$. Στα δεξιά του ορατού φάσματος βρίσκονται τύποι ενέργειας χαμηλότεροι σε συχνότητα και επομένως μεγαλύτερου μήκους κύματος. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι υπέρυθρες ακτίνες (IR), τα μικροκύματα και τα ραδιοκύματα. Αυτοί οι τύποι ακτινοβολίας μας περιβάλλουν καθημερινά και δεν είναι επιβλαβείς για την υγεία λόγω χαμηλών συχνοτήτων και κατά συνέπεια χαμηλότερης ενέργειας.

Στα αριστερά του ορατού φάσματος, εδραιώνονται τύποι ακτινοβολίας εξαιρετικά υψηλών συχνοτήτων και συνεπώς ενεργειών. Οι ακτίνες υπεριώδους ακτινοβολίας (UV), οι ακτίνες X και οι ακτίνες Γ στελεχώνουν την πλευρά αυτή και είναι επιβλαβείς για ζώντες οργανισμούς.

2

Οπτικές πηγές [3]

Οπτικές πηγές χαρακτηρίζονται οι διατάξεις που εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία στην περιοχή μηκών κύματος του ορατού φάσματος και των παρυφών του. Ανάλογα με το αν η εκπεμπόμενη ακτινοβολία έχει διακριτό ή συνεχή χαρακτήρα στο πεδίο των συχνοτήτων, οι οπτικές πηγές χαρακτηρίζονται ως πηγές γραμμικού ή συνεχούς φάσματος αντίστοιχα. Μια ενδιάμεση κατηγορία πηγών είναι οι πηγές συνεχούς μεν φάσματος, ενδιάμεσου όμως εύρους (LED, λέιζερ βαφής).

2.1 Οπτικές πηγές συνεχούς φάσματος

Πηγές οι οποίες εκπέμπουν σε μία, εκτεταμένη ή περιορισμένη, πάντως συνεχή περιοχή μηκών κύματος, χαρακτηρίζονται ως πηγές συνεχούς φάσματος. Τρεις χαρακτηριστικές οικογένειες πηγών συνεχούς φάσματος, με διαφορετική αρχή λειτουργίας η κάθε μία είναι, οι πηγές μέλανος σώματος, οι πηγές εκκένωσης αερίων υπό υψηλή πίεση και οι πηγές σύγχροτρον.

2.1.1 Πηγές μέλανος σώματος

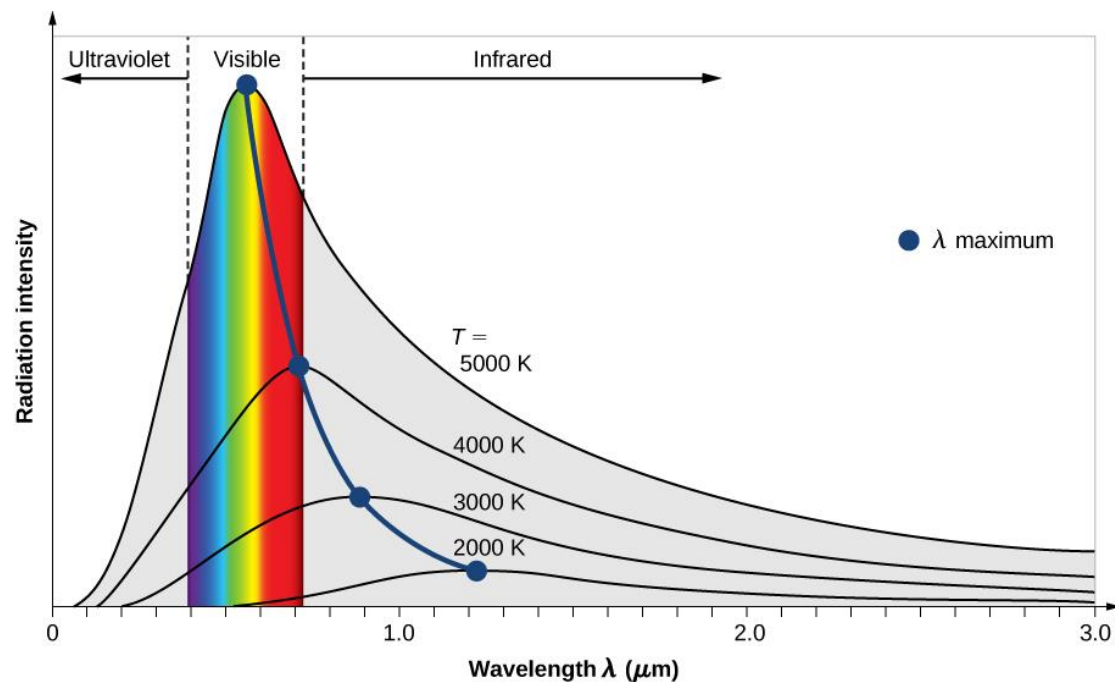
Οι πηγές μέλανος σώματος έχουν ως ενεργό στοιχείο ένα ερυθροπυρωμένο στερεό σώμα, του οποίου η θερμοκρασία ελέγχεται μέσω του ηλεκτρικού ρεύματος που το διαρρέει. Η εκπεμπόμενη ακτινοβολία προέρχεται από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του στερεού σώματος τα οποία υφίστανται στατιστικές επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις λόγω κρούσεων με τα ιόντα του στερεού. Η ένταση και η φασματική κατανομή της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας εξαρτώνται από τη θερμοκρασία του μέλανος σώματος. Για μια πηγή μέλανος σώματος με πεπερασμένες διαστάσεις ορίζουμε ως λαμπρότητα (σε $Wm^{-2}sr^{-1}$) ή φωτεινότητα (σε $lm\ m^{-2}sr^{-1}$) την ισχύ που ακτινοβολείται από μονάδα επιφάνειας της πηγής, ανά στερεακτίνιο, σε μια περιοχή συχνοτήτων $d\omega$. Η εξάρτηση των δύο αυτών μεγεθών από τη θερμοκρασία της πηγής και τη συχνότητα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας διέπεται από τον γνωστό νόμο του Planck

$$L_{\omega}(\omega, T)d\omega = \frac{\omega^2}{8\pi^3 c^2} \frac{\hbar\omega d\omega}{\exp\left(\frac{\hbar\omega}{kT}\right)-1},$$

όπου c η ταχύτητα του φωτός στο κενό, k η σταθερά του Boltzmann και $\hbar \equiv h / 2\pi$ όπου h είναι η σταθερά του Planck. Η εκπομπή γίνεται σε στερεά γωνία 2π sterad και όχι σε 4π sterad, λόγω του μη σημειακού χαρακτήρα της πηγής. Η συνολική ισχύς που εκπέμπεται ανά στερεακτίνιο από μονάδα επιφάνειας της πηγής, σε όλες τα συχνότητες, προκύπτει από την ολοκλήρωση της παρακάτω σχέσης ως προς ω

$$L(T) = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\pi^2 k^4}{60 h^3 c^2} \right) T^2 = \frac{R}{2\pi} T^4,$$

όπου $R = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ είναι η σταθερά ακτινοβολίας των Stefan-Boltzmann. Οι μονάδες της $L(T)$ είναι $\text{W/m}^2 \text{ sterad}$. Από τη σχέση αυτή διαπιστώνεται ότι η αύξηση της θερμοκρασίας, εκτός από την αύξηση της εκπεμπόμενης ισχύος, έχει ως αποτέλεσμα και τη μετατόπιση του συνολικού φάσματος εκπομπής προς μεγαλύτερες συχνότητες όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.1 Το γεγονός αυτό περιγράφεται από τον νόμο της μετατόπισης του Wien $\lambda_m T = 2898 \mu\text{m K}$, όπου λ_m είναι το μήκος κύματος στο οποίο παρουσιάζεται το μέγιστο της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας ενός μέλανος σώματος σε θερμοκρασία T .



Σχήμα 2.1: Φασματική κατανομή ακτινοβολίας μέλανος σώματος

2.1.2 Πηγές εκκένωσης αερίων υπό υψηλή πίεση

Οι πηγές εκκένωσης αερίου υψηλής πίεσης, επίσης εκπέμπουν ένα συνεχές φάσμα, το οποίο δεν διαφέρει πολύ από εκείνο του μέλανος σώματος, δεδομένου ότι οι στοιχειώδεις ακτινοβολητές είναι πάλι τα στατιστικώς επιταχυνόμενα και επιβραδυνόμενα ηλεκτρόνια, μέσω των τυχαίων κρούσεων στο εσωτερικό ενός αερίου σε κατάσταση πλάσματος. Οι πηγές εκκένωσης αερίου όμως έχουν το πλεονέκτημα της υψηλότερης θερμοκρασίας λειτουργίας, δηλαδή αν η θερμοκρασία σε μία λάμπα εκκένωσης υδραργύρου (Hg) μπορεί να πλησιάσει τους 6000 K, για πίεση πλάσματος 1 – 2 ατμόσφαιρες, με αποτέλεσμα την έντονη εκπομπή στην περιοχή του ορατού φάσματος ανάλογη εκείνης του Ηλίου. Παράλληλα, αυτές οι λάμπες μπορούν να περιοριστούν σε έναν πολύ μικρό όγκο, δίδοντας στοιχεία εκπομπής μικρών διαστάσεων, όπως π.χ. $0,1 \text{ mm}^2$.

Οι υψηλές τιμές θερμοκρασίας και πίεσης προκαλούν διεύρυνση και αλληλοεπικάλυψη των ηλεκτρονικών καταστάσεων των ατόμων των αερίων με αποτέλεσμα μία εκπομπή φωτός ευρείας ζώνης, όπως αναφέρθηκε και ανωτέρω. Η πίεση λειτουργίας φθάνει, σε μερικές περιπτώσεις, τις 100 ατμόσφαιρες. Σε αυτές τις πιέσεις, εκτός του ότι υπάρχει κίνδυνος έκρηξης, χρειάζεται επίσης ένα επιπλέον ηλεκτρόδιο προϊονισμού για την έναρξη της εκκένωσης, η οποία επιτυγχάνεται με την εφαρμογή ενός παλμού τάσης στην περίπτωση που η υψηλή πίεση υφίσταται πριν την έναρξη λειτουργίας και δεν είναι αποτέλεσμα της υψηλής θερμοκρασίας.

Η απόδοση των πηγών εκκένωσης αερίου υπό υψηλή πίεση, οριζόμενη ως το πηλίκο της ωφέλιμης φωτεινής ισχύος προς την καταναλισκόμενη ηλεκτρική ισχύ, μπορεί να φθάσει το 50 % (σε σχέση με τις λάμπες ερυθροπυρούμενου νήματος, οι οποίες δεν ξεπερνούν το 10 %), ενώ η αντίστοιχη λαμπρότητα μπορεί να φτάνει τα $250 \text{ W/cm}^2 \text{ sterad}$. Για φασματοσκοπικές εφαρμογές στην περιοχή του υπεριώδους, χρησιμοποιούνται πηγές εκκένωσης αερίων υδρογόνου, ηλίου ή ατμών υδραργύρου. Σε αυτές τις περιπτώσεις, το γυάλινο περίβλημα των πηγών κατασκευάζεται από χαλαζία (SiO_2) ο οποίος επιτρέπει τη διέλευση και της υπεριώδους ακτινοβολίας. Πρέπει επίσης να λαμβάνονται προφυλάξεις, καθόσον η υπεριώδης ακτινοβολία είναι επικίνδυνη για τους οφθαλμούς και το δέρμα, ενώ υπεριώδης ακτινοβολία με μήκη κύματος μικρότερα των 250 nm μετατρέπει το ατμοσφαιρικό οξυγόνο σε όζον το οποίο είναι τοξικό.

Όπως φαίνεται από τα ανωτέρω, οι πηγές εκκένωσης αερίου υπό υψηλή πίεση χρησιμοποιούνται για την περιοχή του ορατού (Xe) και του υπεριώδους (Hg) τμήματος του φάσματος.

2.1.3 Πηγές σύγχροτρον

Οι πηγές σύγχροτρον είναι συνήθως μεγάλης κλίμακας διατάξεις, οι οποίες επιταχύνουν δέσμες ηλεκτρονίων σε σχετικιστικές ταχύτητες και κυκλικές τροχιές. Το φασματικό εύρος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας είναι συνήθως μεγαλύτερο εκείνου των πηγών μέλανος σώματος, εκτείνεται κυρίως στην περιοχή του υπεριώδους ή των ακτίνων X, ενώ υπάρχουν και πηγές σύγχροτρον ειδικά σχεδιασμένες για να εκπέμπουν στο υπέρυθρο. Εν αντιθέσει με τις πηγές μέλανος σώματος, οι πηγές σύγχροτρον χαρακτηρίζονται από περιορισμένη στερεά γωνία εκπομπής. Αν οι σχετικιστικές παράμετροι ταχύτητας v και ενέργειας E της δέσμης των ηλεκτρονίων που κινούνται σε κυκλική τροχιά είναι

$$\beta = \frac{v}{c}, \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad E = \gamma m_o c_o^2$$

τότε το γωνιακό άνοιγμα της εμπροσθοεκπεμπόμενης (σε σχέση με την κίνηση των ηλεκτρονίων) δέσμης είναι

$$\Delta\theta \approx \frac{1}{\gamma} = \frac{m_o c^2}{E},$$

ενώ η πόλωση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας είναι παράλληλη προς το επίπεδο της κυκλικής τροχιάς των ηλεκτρονίων. Η φασματική κατανομή της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας έχει τη μορφή

$$P_{\lambda}(\lambda) \propto \frac{c\gamma^7}{R^3} \left(\frac{\lambda_c}{\lambda}\right)^3 \int_{\frac{\lambda_c}{\lambda}}^{\infty} K_{\frac{5}{3}}(x) dx,$$

όπου R η ακτίνα της κυκλικής τροχιάς, $K_{\frac{5}{3}}$ η τροποποιημένη συνάρτηση Bessel, και λ_c το μήκος κύματος που αντιστοιχεί στην (υψηλότερη) συχνότητα αποκοπής του φάσματος.

2.2 Οπτικές πηγές γραμμικού φάσματος

Οι οπτικές πηγές γραμμικού φάσματος έχουν ως ενεργό στοιχείο κάποιο αέριο σε χαμηλή πίεση (μερικές δεκάδες Torr) και σε θερμοκρασία δωματίου. Σε αυτές τις συνθήκες, η διεύρυνση και η αλληλοεπικάλυψη των ενεργειακών καταστάσεων των ηλεκτρονίων στα άτομα (ή τα μόρια) του αερίου είναι ασήμαντες, οπότε αναδεικνύεται και πάλι ο κβαντικός χαρακτήρας των συστημάτων, με αποτέλεσμα το ενεργειακό διάγραμμα και τα αντίστοιχα φάσματα εκπομπής να είναι διάκριτα (γραμμικά). Ένα παράδειγμα πηγής γραμμικού φάσματος είναι εκείνο μίας λυχνίας ατομικού υδρογόνου σε χαμηλή πίεση. Το πλεονέκτημα αυτού του παραδείγματος έγκειται στο ότι το άτομο του υδρογόνου είναι ένα σχετικά απλό κβαντικό σύστημα, του οποίου το πειραματικά μετρούμενο φάσμα εκπομπής μπορεί να ερμηνευθεί ικανοποιητικά στο πλαίσιο της παλαιάς Κβαντομηχανικής. Στο πλαίσιο αυτής της ημικλασικής προσέγγισης, η εξίσωση κίνησης ενός ηλεκτρονίου που κινείται σε κυκλική τροχιά ακτίνας r , υπό την επίδραση της δύναμης Coulomb που ασκεί σε αυτό ένα πρωτόνιο, παίρνει τη μορφή

$$\frac{m_e v^2}{r} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2},$$

ενώ η συνολική του ενέργεια είναι

$$E = \frac{1}{2} m_e v^2 - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}.$$

Οι δύο αυτές σχέσεις, συνδυαζόμενες, οδηγούν στη σχέση:

$$E = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r}.$$

Αν το αποτέλεσμα αυτό συνδυαστεί με τη συνθήκη κβάντωσης του Bohr

$$pr(= m_e v r) = n\hbar,$$

προκύπτει η κβάντωση των ακτίνων των τροχιών, σύμφωνα με τη σχέση

$$r = n^2 \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{e^2 m_e},$$

οπότε και οι ενεργειακές καταστάσεις του ηλεκτρονίου αποκτούν διακριτές τιμές.

$$E_n = -\frac{e^4 m_e}{2(4\pi\epsilon_0 \hbar)^2} \frac{1}{n^2} = -\frac{2\pi c \hbar R}{n^2} = -\frac{13,6}{n^2} (eV),$$

όπου η σταθερά του Rydberg είναι $R = 1,09738 \times 10^7 m^{-1}$ για βαρέα άτομα, και λίγο μικρότερη (0,055%) για την περίπτωση του υδρογόνου, στο οποίο η κίνηση του ηλεκτρονίου επηρεάζει την κινητική κατάσταση του πρωτονίου. Η προηγούμενη σχέση, για $n = 1$ αντιστοιχεί στη βασική κατάσταση, για μεγαλύτερα n αντιστοιχεί σε διεγερμένες καταστάσεις, και για $n \rightarrow \infty$ αντιστοιχεί στο ελεύθερο ηλεκτρόνιο του ιονισμένου ατόμου. Είναι φανερό ότι κατά τη μετάπτωση ενός ηλεκτρονίου από τη διεγερμένη κατάσταση n_2 στην κατάσταση n_1 , η διαφορά ενέργειας ΔE , η οποία εκπέμπεται με τη μορφή φωτονίου συχνότητας $\nu = \Delta E / h$, ικανοποιεί τη σχέση

$$\Delta E = h\nu = hcR \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) = 13,6 \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) (eV).$$

Ανάλογα με το αν η εκπεμπόμενη ακτινοβολία προέρχεται από διαδικασίες αυθόρμητης ή εξαναγκασμένης αποδιέγερσης, οπότε και χαρακτηρίζεται από μικρό ή μεγάλο βαθμό συμφωνίας αντίστοιχα, διακρίνουμε τις πηγές γραμμικού φάσματος σε δυο κατηγορίες: (α) ασύμφωνες πηγές γραμμικού φάσματος (ή λάμπες βαθμονόμησης), και (β) σύμφωνες πηγές γραμμικού φάσματος (λυχνίες λείζερ).

2.2.1 Ασύμφωνες πηγές γραμμικού φάσματος

Οι ασύμφωνες πηγές εκπομπής γραμμικών φασμάτων αποτελούνται από μια γυάλινη λυχνία με δύο ηλεκτρόδια, στο εσωτερικό της οποίας τοποθετείται ποσότητα αερίου σε χαμηλή πίεση (μερικά Torr) ή, στην περίπτωση των μεταλλικών στοιχείων, μικρή ποσότητα μετάλλου (όπως Hg, Cd και άλλα). Στα ηλεκτρόδια εφαρμόζεται υψηλή τάση (5-10 kV), με αποτέλεσμα τη δημιουργία ηλεκτρικής εκκένωσης που προκαλεί διέγερση των ατομικών ηλεκτρονίων. Οι αποδιεγέρσεις αυτών των ηλεκτρονίων έχουν ως αποτέλεσμα τα χαρακτηριστικά φάσματα εκπομπής. Στην περίπτωση που για τη διέγερση του μεταλλικού στοιχείου απαιτείται η παρουσία βοηθητικού αερίου ή ηλεκτροδίου άνθρακα, τότε το φάσμα του μεταλλικού στοιχείου συνυπάρχει με το φάσμα του βοηθητικού αερίου ή του άνθρακα.

Στην περίπτωση του υδρογόνου, ανάλογα με τον συνδυασμό των n_1 και n_2 έχουμε τις διάφορες σειρές των γραμμών εκπομπής που προέρχονται από τις ατομικές μεταπτώσεις του υδρογόνου, όπως φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 2.1

Πίνακας 2.1

n1	n2	Σειρά	Περιοχή
1	2, 3, 4...	Lyman	Βαθύ υπεριώδες
2	3, 4, 5...	Balmer	Εγγύς υπεριώδες και ορατό
3	4, 5, 6...	Paschen	Εγγύς υπέρυθρο
4	5, 6, 7...	Bracket	Υπέρυθρο
5	6, 7, 8...	Pfund	Υπέρυθρο

Στον Πίνακα 2.2 φαίνονται τα μήκη κύματος χαρακτηριστικών γραμμών εκπομπής από διάφορα στοιχεία, για τις επιμέρους περιοχές του ορατού φάσματος.

Πίνακας 2.2

Στοιχείο	Χρώμα και μήκος κύματος(nm)					
	Κόκκινο	Πορτοκαλί	Κίτρινο	Πράσινο	Μπλε	Ιώδες
H	656	-	-	-	486	410
Na	-	615	589	498	466	449
Hg	691	-	577	546	436	405
K	759	-	587	556	-	445
Kr	-	-	-	-	-	427
He	-	-	-	-	-	412
Ar	696	-	-	-	-	395
Ne	627	598	585	533	-	-

2.2.2 Σύμφωνες πηγές γραμμικού φάσματος

Οι σύμφωνες πηγές εκπομπής γραμμικών (ή και ευρύτερης ζώνης) φασμάτων ή πηγές λέιζερ (LASER = Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation), είναι πηγές των οποίων η λειτουργία στηρίζεται στο φαινόμενο της εξαναγκασμένης εκπομπής. Το ενεργό υλικό των πηγών λέιζερ μπορεί να βρίσκεται σε οποιαδήποτε φάση (στερεά, υγρή, αέρια, πλάσμα), και το φάσμα εκπομπής εκτείνεται, ανάλογα με το ενεργό υλικό, από το υπέρυθρο μέχρι το υπεριώδες.

2.2.2.1 Λέιζερ αερίου

Τα λέιζερ αερίου αποτελούνται από μία γυάλινη ή κεραμική λυχνία με δύο ηλεκτρόδια, στο εσωτερικό της οποίας τοποθετείται ποσότητα αερίου σε χαμηλή πίεση ή, στην περίπτωση των μεταλλικών στοιχείων, μικρή ποσότητα μετάλλου. Στα ηλεκτρόδια εφαρμόζεται υψηλή τάση (~1 kV), με αποτέλεσμα τη δημιουργία ηλεκτρικής εκκένωσης που προκαλεί διέγερση των ατομικών ηλεκτρονίων. Οι αυθόρμητες αποδιεγέρσεις αυτών των ηλεκτρονίων έχουν ως αποτέλεσμα, αρχικά, ένα γραμμικό φάσμα εκπομπής ασύμφωνης ακτινοβολίας. Η ακτινοβολία αυτή υποχρεώνεται, με τη βοήθεια δύο παράλληλων κατόπτρων, στο εσωτερικό των οποίων βρίσκεται η λυχνία, να επανέλθουν στην περιοχή του διεγερμένου αερίου,

προκαλώντας εξαναγκασμένες αποδιεγέρσεις των διεγερμένων ατόμων. Οι διαδικασίες αυτές έχουν ως αποτέλεσμα την εκπομπή ενός γραμμικού φάσματος σύμφωνης ακτινοβολίας. Ανάμεσα στους δύο καθρέπτες (οπτική κοιλότητα) και τη λυχνία, παρεμβάλλεται συνήθως και ένα πρίσμα με τη βοήθεια του οποίου επιλέγεται ένα μόνο μήκος κύματος. Η παρουσία της οπτικής κοιλότητας και ο μηχανισμός εξαναγκασμένης εκπομπής έχουν ως αποτέλεσμα, εκτός από τον σύμφωνο χαρακτήρα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, και ένα εξαιρετικά μικρό γωνιακό εύρος ($< 1 \text{ mrad} \approx 3,5$ δεύτερα λεπτά της μοίρας) της σχεδόν παράλληλης δέσμης που εκπέμπουν τα λέιζερ.

Στον Πίνακα 2.3 παρουσιάζονται διάφορα συστήματα λέιζερ αερίων και τα μήκη κύματος των κυριότερων γραμμών εκπομπής τους.

Πίνακας 2.3

Αέριο	Τύπος	Μήκος κύματος
He-Ne	Ατομικό	632, 1152, 3391
CO ₂	Μοριακό	9600, 10600
Ar	Ιοντικό	351, 364, 458, 466, 476, 478, 488, 496, 511, 514
Kr	Ιοντικό	521, 531, 568, 647, 676, 752, 793, 799

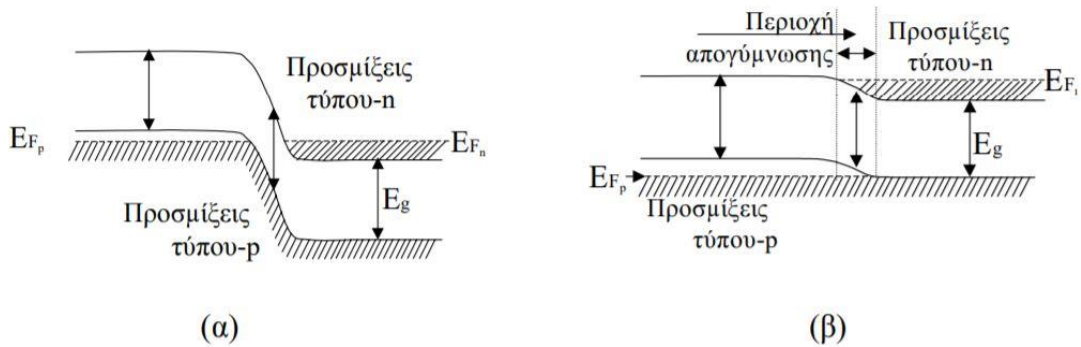
Εκτός από τα συστήματα λέιζερ με αέριο ως ενεργό υλικό, υπάρχουν και συστήματα λέιζερ με ενεργό υλικό στερεό. Τα λέιζερ αυτά χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: (α) Λέιζερ ιόντων σπανίων γαιών σε διηλεκτρικό περιβάλλον, και (β) λέιζερ ημιαγωγών.

(α) Λέιζερ ιόντων σε διηλεκτρικό περιβάλλον

Αυτά τα λέιζερ στερεού χρησιμοποιούν ως ενεργό υλικό ιόντα (συνήθως σπανίων γαιών) τα οποία φιλοξενούνται σε περιβάλλον διηλεκτρικού υλικού. Η αναστροφή πληθυσμών σε αυτά τα λέιζερ επιτυγχάνεται με οπτική άντληση (διέγερση). Το υλικό φιλοξενίας (γυαλί ή κρυσταλλικό) έχει συνήθως τη μορφή ράβδου. Το πρώτο λέιζερ το οποίο λειτούργησε το 1965, γνωστό ως λέιζερ ρουμπινιού (ruby), με εκπομπή στα 694 nm, ήταν αυτής της κατηγορίας και το ενεργό υλικό ήταν τρισθενή ιόντα χρωμίου (Cr^{3+}) σε περιβάλλον Al_2O_3 . Από το πιο γνωστό λέιζερ αυτής της κατηγορίας είναι τα λέιζερ του νεοδυμίου [Nd-YAG (= Yttrium Aluminum Garnet, garnet = πετράδι, ημιπολύτιμος λίθος) και Nd-Glass] τα οποία εκπέμπουν στα 1060 nm (και με διπλασιασμό και τριπλασιασμό συχνότητας μπορούν να εκπέμψουν αποδοτικά επίσης στα 532 nm και 355 nm αντίστοιχα). Λιγότερο διαδεδομένα είναι τα λέιζερ ιόντων ερβίου (Er), το οποίο όταν φιλοξενείται σε κρυσταλλικό περιβάλλον (συνήθως YLiF_4) εκπέμπει στα 850 nm (αλλά και στα 1230 και 1730 nm), καθώς και το λέιζερ ολμίου (Ho) το οποίο εκπέμπει στα 2060 nm (είτε φιλοξενείται σε περιβάλλον YLF είτε σε YAG).

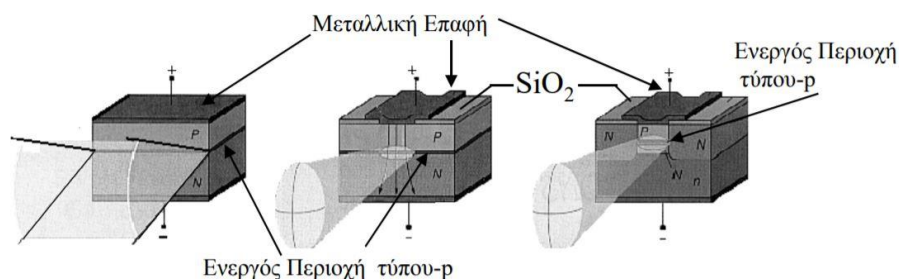
(β) Λείζερ ημιαγωγών

Τα λείζερ ημιαγωγών χρησιμοποιούν ως ενεργό υλικό ένα ημιαγώγιμο υλικό και συγκεκριμένα τη διοδική επαφή ανάμεσα σε δύο περιοχές οι οποίες χαρακτηρίζονται από προσμίξεις διαφορετικού τύπου n και p όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2: Επαφή ημιαγωγών τύπου p-n, (α) χωρίς πόλωση και (β) με ορθή πόλωση.

Η διοδική αυτή επαφή λειτουργεί σε ευθεία πόλωση (ο θετικός πόλος της πηγής τροφοδοσίας είναι συνδεδεμένος στην περιοχή τύπου p και ο αρνητικός στην περιοχή τύπου n, Σχήμα 2.2β), έτσι ώστε οι ανασυνδέσεις ηλεκτρονίου-οπής που συμβαίνουν στην περιοχή απογύμνωσης να έχουν ως αποτέλεσμα την εκπομπή φωτός με μήκη κύματος τα οποία αντιστοιχούν περίπου στο ενεργειακό χάσμα του ημιαγώγιμου υλικού. Τα φωτόνια που προκύπτουν από αυτές τις αυθόρμητες επανασυνδέσεις έχουν χαρακτηριστικά ασύμφωνης ακτινοβολίας. Η οπτική κοιλότητα που είναι απαραίτητη για την έναρξη του φαινομένου της εξαναγκασμένης εκπομπής (μέσω εξαναγκασμένων επανασυνδέσεων ηλεκτρονίου-οπής) δημιουργείται από δύο παράλληλες κατοπτρικές επιφάνειες, κάθετες στην επαφή p-n, οι οποίες είναι συνήθως πλεγματικά επίπεδα του κρυσταλλικού υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένη η διοδική επαφή p-n όπως θα παρατηρήσετε στο Σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.3: Σχηματική παράσταση διαφόρων τύπων ημιαγώγιμων λείζερ

Ανάλογα με το αν το υλικό που βρίσκεται εκατέρωθεν της διοδικής επαφής είναι ίδιο ή διαφορετικό, έχουμε ημιαγωγικά λείζερ ομο- ή ετερο-επαφής. Μερικά από τα εμπορικά διαθέσιμα λείζερ ημιαγωγών είναι τα λείζερ GaAs (904 nm), GaAlAs (720 – 900 nm), InGaAs (1060 nm), InGaAsP (1300 – 1550 nm). Τα λείζερ ημιαγωγών ευρίσκουν ευρεία εφαρμογή σε διατάξεις ανάγνωσης (ψηφιακών δίσκων,

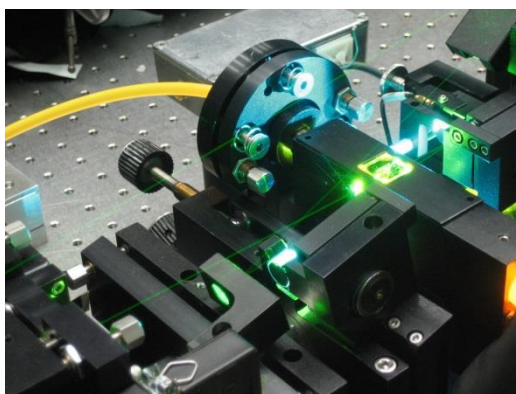
ραβδόμορφων κωδικών, και άλλες), καθώς και σε εκτυπωτές λέιζερ και συστήματα φωτοαναπαραγωγής.

2.3 Πηγές συνεχούς φάσματος ενδιάμεσου εύρους

Ως πηγές φάσματος ενδιάμεσου εύρους, από μερικές δεκάδες έως μερικές εκατοντάδες nm, μπορούμε να θεωρήσουμε τα λέιζερ χρωστικών (dye laser) και τις διόδους εκπομπής φωτός (LED = Light Emitting Diodes).

2.3.1 Λέιζερ χρωστικών (dye laser)

Οι χρωστικές είναι συνήθως οργανικά μακρομόρια (περίπλοκα μοριακά συστήματα με πολλούς βαθμούς ελευθερίας) τα οποία χαρακτηρίζονται, ως εκ τούτου, από ευρείες και ισχυρές ζώνες απορρόφησης στην περιοχή του ορατού ή του υπεριώδους. Διαλύματα αυτών των χρωστικών, σε οργανικούς διαλύτες, όταν διεγερθούν με κατάλληλο μήκος κύματος, παρουσιάζουν ισχυρό φάσμα φθορισμού, και επομένως μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ενεργά υλικά λέιζερ. Με τη βοήθεια κατάλληλης οπτικής κοιλότητας, η οποία εκτός από τα οπτικά άντλησης και ανάδρασης περιλαμβάνει και ένα οπτικό στοιχείο επιλογής μήκους κύματος, συνήθως ένα διπλοθλαστικό πλακίδιο μεταβλητού προσανατολισμού, τα λέιζερ αυτά μπορούν να εκπέμψουν σε μία ευρεία περιοχή συχνοτήτων αλλά και με δυνατότητα επιλογής μήκους κύματος. Μερικά από τα πιο χαρακτηριστικά παραδείγματα χρωστικών, με τις οποίες μπορεί να καλύψει κανείς ευρείες περιοχές μηκών κύματος, ανάλογα και με την πηγή διέγερσης η οποία είναι πάντα ένα άλλο λέιζερ, είναι η Ροδαμίνη 6G (ή Rhodamine 560 Εικόνα 2.3.1), η οποία ανάλογα με τη διέγερση μπορεί να εκπέμψει στις περιοχές από 420 nm μέχρι 650 nm, η Στιλβήνη 420 (Stilbene, 410 έως 470 nm), η p-Terphenyl (320 μέχρι 350 nm).



Εικόνα 2.1: Λέιζερ χρωστικών βασισμένο στη Ροδαμίνη 6G

2.3.2 Δίοδοι εκπομπής φωτός (LED)

Οι δίοδοι εκπομπής φωτός είναι διοδικές επαφές p-n, οι οποίες, όπως και στην περίπτωση των διοδικών λέιζερ, είναι πολωμένες στην ευθεία φορά, με αποτέλεσμα

να παίρνουμε εκπομπή φωτός από τις επανασυνδέσεις ηλεκτρονίου-οπής που συμβαίνουν στην περιοχή της επαφής. Η διαφορά από τα διοδικά λείζερ είναι ότι δεν υπάρχει οπτική κοιλότητα, με αποτέλεσμα η εκπεμπόμενη ακτινοβολία να είναι ασύμφωνη. Το ρεύμα επίσης που διαρρέει τις διόδους εκπομπής φωτός είναι γενικά χαμηλότερης έντασης από εκείνο που απαιτείται κατά τη λειτουργία των ημιαγωγικών λείζερ ενώ και το εκπεμπόμενο φάσμα των LED είναι ευρύτερο εκείνου των διοδικών λείζερ. Το κοινό χαρακτηριστικό διοδικών λείζερ και LED είναι ότι το ημιαγωγικό υλικό πρέπει να είναι υλικό με άμεσο ενεργειακό χάσμα. Αυτό σημαίνει ότι το μέγιστο της ζώνης σθένους και το ελάχιστο της ζώνης αγωγιμότητας πρέπει να βρίσκονται στο κέντρο της ζώνης Brillouin, έτσι ώστε η επανασύνδεση ηλεκτρονίου-οπής να είναι επιτρεπτή χωρίς τη μεσολάβηση φωτονίου (πλεγματικής ταλάντωσης) η οποία καθιστά τη διαδικασία επανασύνδεσης λιγότερο πιθανή και επομένως την εκπομπή φωτός πολύ λιγότερο αποδοτική. Το κατάλληλο ημιαγωγικό υλικό εξασφαλίζεται με επιλεκτική σύνθεση τριμερών ή τετραμερών ενώσεων από στοιχεία, συνήθως, των ομάδων III και V του περιοδικού συστήματος. Για παράδειγμα, μεταβάλλοντας τη σύνθεση της ένωσης $GaAs_{1-x}P_x$, από $x = 0$ μέχρι $x = 1$, μπορεί κανείς να κατασκευάσει διόδους εκπομπής φωτός οι οποίες να εκπέμπουν από την περιοχή του υπερύθρου (940 nm) μέχρι και το πράσινο (565 nm).



Εικόνα 2.2: LED

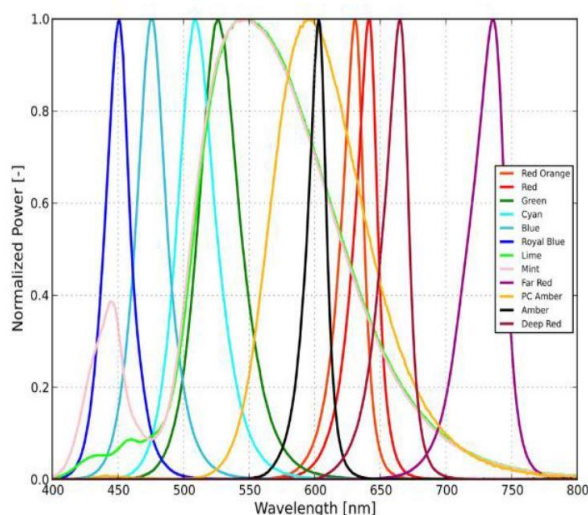
2.4 Ρυθμιζόμενες πηγές φωτός

Σε προηγούμενα κεφάλαια έγινε εισαγωγή στη φύση του φωτός και αναφορά στις βασικές πηγές φωτός. Οι πηγές αυτές περιγράφηκαν ανάλογα με το αν το φάσμα τους είναι συνεχές ή γραμμικό. Παρουσιάστηκαν έτσι πηγές μέλανος σώματος, πηγές εκκένωσης αερίων, λείζερ και LED. Οι αναφερθείσες πηγές δεν έχουν την δυνατότητα επιλογής φάσματος προς προβολή.

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει παράθεση ρυθμιζόμενων πηγών φωτός. Αυτό σημαίνει ότι δίνουν στον χρήστη τη δυνατότητα να ελέγχει το προβαλλόμενο φάσμα. Οι ρυθμιζόμενες πηγές φωτός (TLS – Tunable Light Sources) χρησιμοποιούνται για να φωτίζουν αντικείμενα σε συγκεκριμένο εύρος μήκους κύματος. Οι πηγές αυτές είναι εξαιρετικά χρήσιμες σε πολλές επιστήμες όπως η βιολογία, η οπτική, η χημεία και άλλες.

2.4.1 Διακριτά LED

Ένας τρόπος για τον έλεγχο του προβαλλόμενου φάσματος είναι η πηγή φωτός που



αποτελείται από πολλά διακριτά LED. Αυτές οι συσκευές μπορούν να ρυθμιστούν σε ευρεία φασματική περιοχή συνήθως 380 nm – 1000 nm με συγκεκριμένες φασματικές κορυφές στο εύρος αυτό. Μέσα από κατάλληλο λογισμικό ο χρήστης μπορεί να επιλέξει ποια κορυφή θέλει να προβάλλει. Το μειονέκτημα αυτών των πηγών φωτός είναι η πολυπλοκότητά τους μορφολογικά διότι μπορούν να προβάλλουν μόνο τις κορυφές.

Σχήμα 2.4: Φάσμα διακριτών LED

2.4.2 Ρυθμιζόμενα φίλτρα υγρών κρυστάλλων (LCTFs) [4][5][6][7]

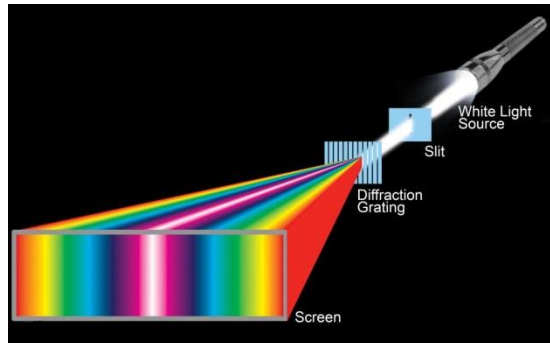
Τα ρυθμιζόμενα φίλτρα υγρών κρυστάλλων είναι οπτικά φίλτρα που χρησιμοποιούν ηλεκτρονικά ελεγχόμενα στοιχεία υγρών κρυστάλλων. Η βασική αρχή λειτουργίας βασίζεται συχνά στο φίλτρο Lyot. Τα LCTFs είναι γνωστά για την πολύ υψηλή ποιότητα εικόνας, την εύκολη ενσωμάτωσή τους σε οπτικά συστήματα και την ευχρηστία λογισμικού. Έχουν χαμηλότερες τιμές κορυφών μετάδοσης σε σύγκριση με τα συμβατικά φίλτρα σταθερού μήκους λόγω της χρήσης πολλών πολωτικών στοιχείων. Ορισμένα LCTFs έχουν σχεδιαστεί με περιορισμένο αριθμό σταθερών μηκών κύματος όπως κόκκινο, πράσινο, μπλε, ενώ άλλα μπορούν να ρυθμιστούν για να μεταδίδουν σε πιο ευρύ φάσμα από το ορατό έως το σχεδόν υπέρυθρο (400-3450 nm).

Η ταχύτητα ρύθμισης των LCTFs διαφέρει ανάλογα με τον κατασκευαστή και τον σχεδιασμό, γενικά είναι αρκετές δεκάδες ms και καθορίζεται κυρίως από την ταχύτητα μεταγωγής των υγρών κρυστάλλων. Υψηλές θερμοκρασίες μπορούν να μειώσουν το χρόνο μετάβασης υγρών κρυστάλλων ώστε να ευθυγραμμιστούν και να προσαρμοστεί το φίλτρο σε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος. Αντίθετα, στις χαμηλές θερμοκρασίες αυξάνεται ο χρόνος ρύθμισης του φίλτρου από το ένα μήκος στο άλλο. Τα LCTFs χρησιμοποιούνται συχνά σε πολυφασματικές και

υπερφασματικές απεικονίσεις λόγω της υψηλής ποιότητας εικόνας και της ταχείας ρύθμισης σε ευρύ φάσμα.

2.4.3 Φράγμα περίθλασης [8][9]

Όταν υπάρχει ανάγκη διαχωρισμού φωτός σε διαφορετικά μήκη κύματος με υψηλή

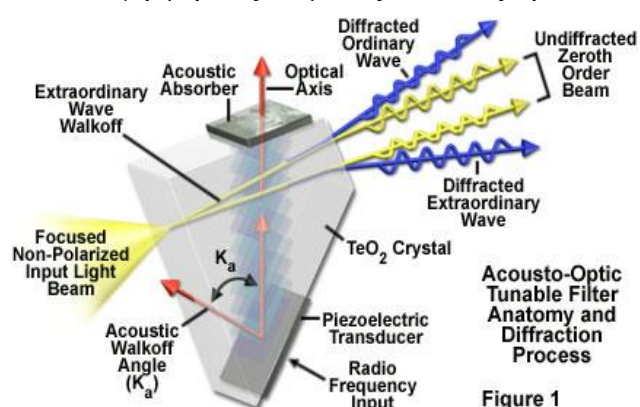


ανάλυση τότε το πλέγμα περίθλασης είναι συνήθως αυτό που δίνει λύση. Το φράγμα περίθλασης είναι ένα οπτικό στοιχείο με περιοδική δομή που χωρίζει και διαθλά το φως σε αρκετές δέσμες οι οποίες ταξιδεύουν σε διαφορετικές κατευθύνσεις. Οι κατευθύνσεις των φωτεινών δεσμών εξαρτώνται από την απόσταση του πλέγματος και του μήκους

κύματος ώστε να δρα σαν διασκορπιστικό στοιχείο. Οι πηγές φωτός που βασίζονται σε πλέγμα περίθλασης επιτρέπουν να περάσουν μόνο λίγα nm φωτός μέσα από την οπτική ίνα ή το καλώδιο.

2.4.4 Ακουστικο-οπτικά φίλτρα (AOTF) [10][11]

Η επιλογή μήκους κύματος είναι εξαιρετικά σημαντική σε πολλά πεδία οπτικών



επιστημών όπως η φασματοσκοπία και η μικροσκοπία. Το ακουστικο-οπτικό συντονιστικό φίλτρο (AOTF) είναι μια ηλεκτρο-οπτική συσκευή που λειτουργεί ως ηλεκτρικά ρυθμιζόμενο φίλτρο διέγερσης για ταυτόχρονη ρύθμιση της έντασης και του μήκους κύματος πολλαπλών δεσμών λέιζερ από μια ή περισσότερες

πηγές.

Οι συσκευές αυτού του τύπου βασίζονται σε ένα ειδικό κρύσταλλο του οποίου οι οπτικές ιδιότητες ποικίλουν κατά την αλληλεπίδρασή του με ένα ακουστικό κύμα. Οι μεταβολές στην ακουστική συχνότητα μεταβάλλουν τις ιδιότητες διάθλασης του κρυστάλλου, επιτρέποντας την πολύ γρήγορη ρύθμιση του μήκους κύματος, περιορισμένη μόνο από τον χρόνο ακουστικής διέλευσης μέσω του κρυστάλλου.

2.5 Κεντρική ιδέα εργασίας

Στις προηγούμενες ενότητες του δεύτερου κεφαλαίου έγινε αναφορά σε οπτικές πηγές ρυθμιζόμενου φάσματος οι οποίες έχουν την δυνατότητα να προβάλλουν μόνο συγκεκριμένες μονοχρωματικές περιοχές στο φάσμα (κορυφές). Η βασική ιδέα ήταν η δημιουργία μιας ελεγχόμενης φασματικής συσκευής που μέσω του υπολογιστή θα

μπορεί να σχεδιάζει και να προβάλλει οποιοδήποτε φάσμα του υποδείξει ο χρήστης, γεγονός που την κάνει καινοτόμα μιας και δεν υπάρχει αντίστοιχη με αυτήν την ικανότητα. Κάθε φάσμα στον επιστημονικό κόσμο περιγράφεται με μια καμπύλη και η συσκευή αυτή είναι σε θέση να δημιουργήσει και να προβάλλει το αντίστοιχο χρώμα. Το εύρος φάσματος που μπορεί να καλύψει είναι το ορατό και έχει την δυνατότητα να υποστηρίξει και το υπέρυθρο σε μελλοντική εργασία.

Η καινοτόμα συσκευή βασίστηκε σε έναν mini ψηφιακό προβολέα τεχνολογίας DLP και σε συνδυασμό με άλλα οπτικά μέσα συνέταξαν το τελικό αποτέλεσμα. Στο επόμενο κεφάλαιο θα γίνει μια εισαγωγή στα προβολικά συστήματα καθώς και μια εκτενής αναφορά πάνω στις τεχνολογίες που χρησιμοποιούν οι προβολείς μέχρι σήμερα.

3

Προβολικά συστήματα

3.1 Εισαγωγή στα προβολικά συστήματα [12]

Η ιστορία των προβολικών συστημάτων ξεκινά σχεδόν ταυτόχρονα με αυτή του σινεμά. Το 1896 η κατασκευαστική εταιρία του Έντισον ξεκίνησε την παραγωγή και εμπορική εκμετάλλευση της πρώτης συσκευής προβολής εικόνας σε μεγάλη οθόνη, το Vitascope, η οποία ήταν αυτή που άνοιξε την αυλαία για το σινεμά με τη μορφή που τον γνωρίζουμε σήμερα.

Παρά την πολύχρονη παρουσία των προβολικών συσκευών στο σινεμά, η προβολή ηλεκτρονικά παραγόμενης εικόνας άργησε πάρα πολύ να εμφανιστεί. Η κυριότερη αιτία της καθυστέρησης αυτής, ήταν η έλλειψη της τεχνολογίας σχηματισμού της εικόνας. Οι πρώτες προσπάθειες προβολής ηλεκτρονικά παραγόμενης εικόνας έγιναν στα τέλη της δεκαετίας του 1940, με την τοποθέτηση ενός φακού τύπου Φρέσνελ μπροστά από μια κοινή οθόνη τηλεόρασης. Με τη βοήθεια του φακού αυτού, επιτεύχθηκε η μεγεθυμένη προβολή της εικόνας σε μια επίπεδη λευκή επιφάνεια με αρκετά ικανοποιητική ποιότητα. Η διάταξη αυτή αποτέλεσε τον προπάτορα της ηλεκτρονικής προβολής και έδειξε το δρόμο στο πως είναι εφικτό να προβληθεί μια ηλεκτρονικά παραγόμενη εικόνα. Έτσι, τη δεκαετία του 1980 έκαναν την εμφάνισή τους στην αγορά τα πρώτα αμιγή προβολικά συστήματα, τα οποία δεν ήταν τίποτα περισσότερο από ένα κλειστό κουτί με μια οθόνη CRT πολύ υψηλής φωτεινότητας, της οποίας η εικόνα προβάλλονταν εκτός της συσκευής μέσω ενός παραθύρου με τους απαραίτητους φακούς. Ακολουθώντας τις εξελίξεις της τεχνολογίας, η εφαρμογή νέων τεχνολογιών απεικόνισης, όπως αυτή των οθονών υγρών κρυστάλλων, κατέστησε την ηλεκτρονική προβολή αρκετά οικονομική ώστε να χρησιμοποιηθεί ακόμα και για οικιακή χρήση.

Αρχή λειτουργίας: Η βασική αρχή λειτουργίας των προβολικών συστημάτων είναι πολύ απλή, αφού ο βασικός τους σκοπός έγκειται στο να μεγεθύνουν και να εστιάσουν την παραγόμενη εικόνα σε μια επίπεδη λευκή επιφάνεια λίγα μέτρα μακριά από τη συσκευή. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση των κατάλληλων φακών για τη μεγέθυνση και την εστίαση μιας πολύ φωτεινής εικόνας, η οποία σχηματίζεται εντός της προβολικής συσκευής.

Μέχρι πρότιςτος, η εικόνα σχηματιζόταν από τρεις πολύ φωτεινές οθόνες καθοδικού σωλήνα των 9 ιντσών, μια για κάθε ένα βασικό χρώμα (κόκκινο, πράσινο, μπλε), ωστόσο η κάθε οθόνη απαιτούσε τα δικά της οπτικά προβολής. Λόγω της ιδιαιτερότητας αυτής, το κόστος κατασκευής και απόκτησης αυτών των συσκευών ήταν αρκετά υψηλό, ενώ ταυτόχρονα η τοποθέτηση και ρύθμισή τους αποτελεί μια δύσκολη και χρονοβόρα διαδικασία.

Η πιο εκτενώς διαδεδομένη τεχνολογία απεικόνισης που χρησιμοποιείται σήμερα στις συσκευές προβολής χαμηλού κόστους, είναι αυτή της μικροσκοπικής διαφανούς οθόνης υγρών κρυστάλλων, η οποία παρεμβάλλεται μεταξύ μιας πολύ ισχυρής πηγής φωτός (προβολέα ξένου) και των οπτικών προβολής της εικόνας. Το χαμηλό κόστος των οθονών υγρών κρυστάλλων, σε συνδυασμό με το μικρό τους μέγεθος και βάρος, επέτρεψε τη δημιουργία φορητών προβολικών συστημάτων χαμηλού κόστους, ικανά να αντεπεξέλθουν τόσο στην προβολή δεδομένων από ηλεκτρονικό υπολογιστή, όσο και σε εφαρμογές οικιακής διασκέδασης.

Το 1987 η εταιρία Texas Instruments, μετά από δεκάχρονη σχετική έρευνα, παρουσίασε την τεχνολογία DMD (Digital Micromirror Device – Συσκευή Ψηφιακών Μικροκαθρεπτών) η οποία αποτελεί σήμερα την πιο εμπορικά επιτυχημένη λύση ηλεκτρονικής προβολής. Η τεχνολογία DMD πείρε το όνομά της από τον τρόπο που λειτουργεί, κατά τον οποίο η τετράγωνη επιφάνεια ενός μικροεπεξεργαστή (DLP Digital Light Processor – Ψηφιακός Επεξεργαστής Φωτός) είναι καλυμμένη με χιλιάδες ελεγχόμενους μικροσκοπικούς καθρέφτες. Οι καθρέφτες αυτοί είναι έτσι κατασκευασμένοι ώστε όταν δε περνά ηλεκτρικό ρεύμα από τους αγωγούς ελέγχου τους, αυτοί να είναι προσανατολισμένοι προς μια κατεύθυνση, ενώ όταν διέρχεται ρεύμα από τους αγωγούς, οι καθρέφτες να προσανατολίζονται κατά 20 μοίρες προς την αντίθετη. Κατά τον τρόπο αυτό, σε ένα προβολικό σύστημα τεχνολογίας DLP, είναι εφικτή η δρομολόγηση του φωτός ενός προβολέα ξένου προς τους φακούς προβολής, για την απεικόνιση οποιουδήποτε σχήματος. Όταν ο προσανατολισμός αυτών των καθρεπτών εναλλάσσεται πολύ γρήγορα (μέχρι και 1024 φορές) στο χρονικό διάστημα ενός δευτερολέπτου, είναι εφικτό να ελεγχθεί η ένταση/ενέργεια του φωτός που θα προβληθεί και έτσι να αποδοθούν διάφορες αποχρώσεις. Φιλτράροντας το φως του προβολέα με τη βοήθεια πρισμάτων ή περιστρεφόμενων χρωματικών φίλτρων, η τεχνολογία DMD κατάφερε να αποδώσει πιστά εικόνες με εκατομμύρια χρώματα και να κερδίσει τον χαρακτηρισμό της πιο εμπορικά επιτυχημένης τεχνολογίας ηλεκτρονικής προβολής.

Η τεχνολογία που χρησιμοποιείται σε προβολείς από διαφορετικούς κατασκευαστές εξελίσσεται συνεχώς. Κάθε τεχνολογία, όπως θα αναλυθεί και στα επόμενα κεφάλαια, κάνει χρήση διαφορετικής μεθοδολογίας ως προς την παραγωγή εικόνας και βίντεο.

3.2 Προβολέας LCD τεχνολογίας [13][14]

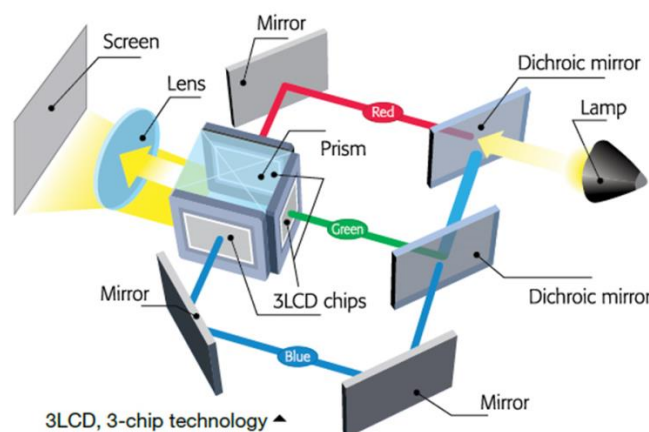
Η τεχνολογία LCD (Liquid Crystal Display) χρησιμοποιείται εδώ και πολλές δεκαετίες σε διάφορες εφαρμογές προβολής βίντεο και εικόνων, όπως οθόνες ηλεκτρικών συσκευών, ψηφιακές σημάνσεις και άλλα.

Η πιο γνωστή χρήση τους στους καταναλωτές είναι στις τηλεοράσεις, όπου τα LCD τσιπ τοποθετούνται σε μια επιφάνεια οθόνης και με την βοήθεια οπίσθιου φωτισμού (ο πιο κοινός είναι LED), μπορούν να εμφανίσουν εικόνες. Ο αριθμός τσιπ που διαθέτει κάθε τηλεόραση είναι ανάλογη με την ανάλυση της οθόνης της και μπορεί να αριθμεί εκατομμύρια (LCD chip per pixel).

3.2.1 Αρχή λειτουργίας LCD προβολέα

Σε αντίθεση με τις τηλεοράσεις ένας προβολέας της ίδιας τεχνολογίας χρησιμοποιεί τρία ειδικά σχεδιασμένα LCD τσιπ για τη δημιουργία και προβολή εικόνων σε εξωτερική επιφάνεια. Τα τρία αυτά τσιπ περιέχουν τον ίδιο αριθμό pixel με την ανάλυση της οθόνης του προβολέα, με εξαίρεση τις τεχνικές pixel-shifting που χρησιμοποιούνται σε μερικούς προβολείς για εμφάνιση εικόνας 4K χωρίς να έχουν τον απαιτούμενο αριθμό pixel. Ένας LCD προβολέας συχνά αναφέρεται και ως 3LCD κάτι που δεν πρέπει να συγχέεται με το 3D.

Στους περισσότερους προβολείς 3LCD, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.1, μια ισχυρή πηγή φωτός εκπέμπει δέσμη λευκού φωτός που προσπίπτει σε μια ομάδα διχρωματικών καθρεπτών. Αυτοί οι καθρέπτες είναι ενισχυμένοι με μια ειδική μεμβράνη που αντανακλά μόνο ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος του φωτός. Έτσι το φως που προσπίπτει στους καθρέπτες αυτούς αντανακλά με τη σειρά του μια δέσμη χρωματισμένου φωτός μέσα στον προβολέα, ένα κόκκινο, ένα πράσινο και ένα μπλε. Στη συνέχεια οι δέσμες φωτός των παραπάνω χρωμάτων περνούν από την οθόνη υγρών κρυστάλλων, που αποτελείται από χιλιάδες μικροσκοπικά άχρωμα pixels, και είτε εμποδίζουν το φως είτε το αφήνουν να περάσει καθώς ενεργοποιούνται από ηλεκτρικό ρεύμα.

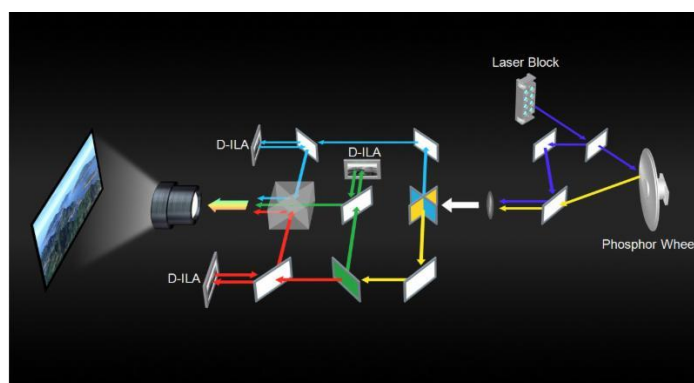


Εικόνα 3.1 : Προβολέας 3LCD

Οι τρεις LCD οθόνες στον προβολέα εμφανίζουν την ίδια εικόνα ή κινούμενη εικόνα σε gray scale μορφή (διαβαθμίσεις του γκρι). Όταν έγχρωμο φως περάσει μέσα από τις οθόνες, αναμεταδίδουν τρεις εκδοχές της ίδιας σκηνής σε κόκκινη, πράσινη και μπλε απόχρωση. Η εικόνα που φτάνει στον παρατηρητή όμως δεν είναι μονοχρωματική διότι μέσα στον προβολέα με την βοήθεια ειδικών πρισμάτων οι τρεις αυτές εκδοχές ανασυνδυάζονται για να σχηματίσουν μια ενιαία εικόνα με εκατομμύρια χρώματα.

Αν και οι πηγές φωτισμού που χρησιμοποιούνται σε προβολείς είναι κατά κύριο λόγο λάμπες, πλέον συναντάμε στην αγορά πηγές Laser/Led με το τελικό αποτέλεσμα να παραμένει αναλλοίωτο.

Παρόλο που η 3LCD τεχνολογία, μαζί με την DLP που θα παρατεθεί στο επόμενο κεφάλαιο είναι από τις πιο διαδεδομένες, υπάρχουν και μερικές παραλλαγές που βασίζονται σε αυτές. Οι παραλλαγές αυτές είναι η LCOS (Liquid Crystal on Silicon), D-ILA (Digital Imaging Light Amplification used by JVC) και η SXRD (Silicon Crystal Reflective Display used by SONY).



Εικόνα 3.2 : Προβολέας D-ILA

3.3 Προβολέας DLP τεχνολογίας [15][16]

Η τεχνολογία DLP (Digital Light Processing) είναι μια τεχνολογία προβολής βίντεο, που όπως προαναφέρθηκε στην εισαγωγή του κεφαλαίου, δημιουργήθηκε από την Texas Instruments. Χρησιμοποιείται κυρίως σε βιντεοπροβολείς αλλά στο παρελθόν υπήρξε και σε τηλεοράσεις οπίσθιας προβολής οι οποίες πλέον δεν είναι διαθέσιμες.

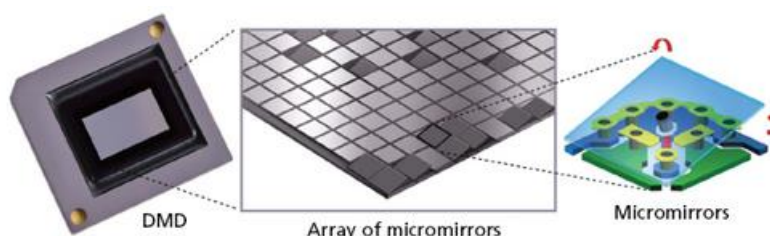
Η βάση της συγκεκριμένης τεχνολογίας είναι μια οπτική ημιαγώγιμη συσκευή που ονομάζεται DMD (Digital Micromirror Device).

Σαν τεχνολογία μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως μέρος μιας 3D εκτύπωσης, ενός μικροσκοπίου, ενός φασματόμετρου ακόμα και σε μεθόδους ιατρικής απεικόνισης.

3.3.1 Αρχή λειτουργίας DLP τεχνολογίας

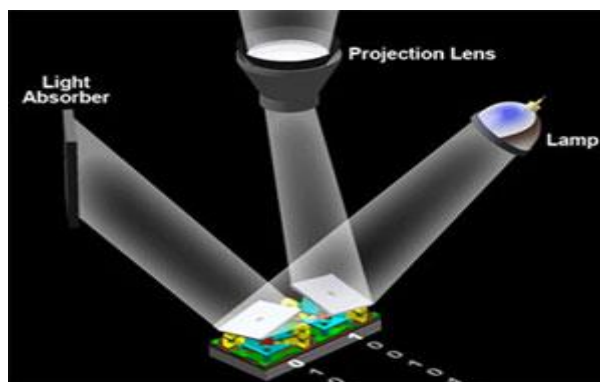
Το DMD είναι ένα τσιπ το οποίο έχει σχεδιαστεί να λειτουργεί με βάση τη μνήμη RAM (Random Access Memory), γνωστή από την χρήση της στους υπολογιστές. Το

τσιπ έχει μια σειρά από μικροσκοπικά κάτοπτρα, ένα για κάθε θέση μνήμης. Κάθε DMD αποτελείται από τουλάχιστον δυο εκατομμύρια καθρέπτες και το πλάτος τους δεν ξεπερνά τα 5.4 μm . Κάθε κάτοπτρο ισοδυναμεί με ένα pixel. Στους προβολείς με DMD τσιπ ανάλυσης 1920X1080, τα κάτοπτρα είναι όσα και τα pixel ($1920 \times 1080 = 2.073.600$). Κάθε κάτοπτρο βρίσκεται πάνω σε μια νάνο-άρθρωση όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.3 και μπορεί να γέρνει δεξιά ή αριστερά χιλιάδες φορές το δευτερόλεπτο.



Εικόνα 3.3: Δομή DMD

Κάθε κάτοπτρο είναι ένα pixel της εικόνας που βλέπουμε. Η μνήμη RAM λέει στο συγκεκριμένο κάτοπτρο κάθε φορά να ενεργοποιείται ή να απενεργοποιείται για να δείξει μαύρο ή λευκό στην οθόνη (Εικόνα 3.4). Όταν το κάτοπτρο ανακλά φως προς την μια μεριά (προς τον φακό του προβολέα) τότε βλέπουμε λευκό στην οθόνη μας και όταν το ανακλά προς την άλλη (σε μια φωτοπαγίδα που υπάρχει στο εσωτερικό του οπτικού) τότε βλέπουμε μαύρο.



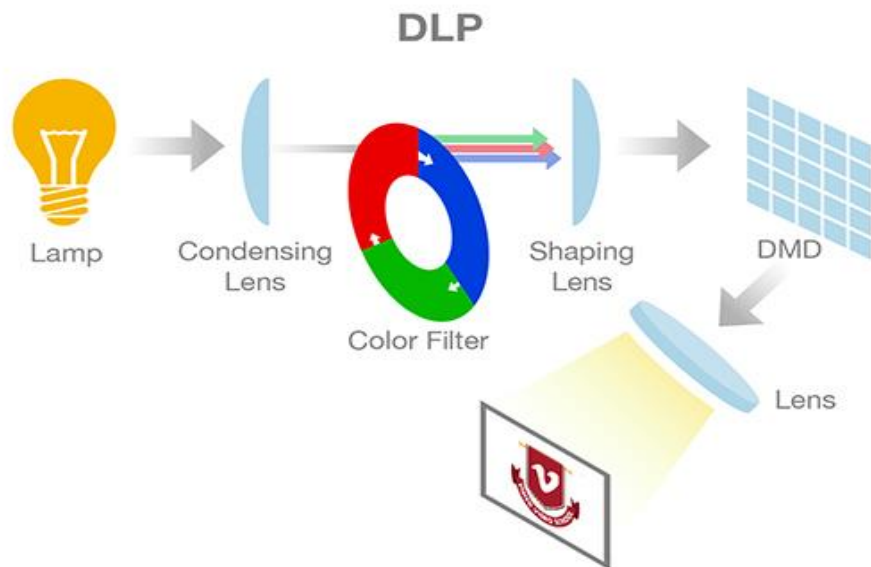
Εικόνα 3.4: Διαδικασία ON/OFF Micromirror

Η RAM μνήμη μπορεί να αλλάξει χιλιάδες φορές ανά δευτερόλεπτο την εντολή προς το DMD, εξαναγκάζοντας στην ουσία το κάθε μικροσκοπικό κάτοπτρο να ταλαντώνεται με διάφορες ταχύτητες και να δημιουργεί στην οθόνη μας διάφορα επίπεδα φωτός, τα λεγόμενα επίπεδα του γκρι (gray scale). Ένας τυπικός DLP προβολέας που κάνει χρήση μονού DMD τσιπ εμφανίζει 256 επίπεδα του γκρι.

Για να προσθέσουμε χρώμα στην εικόνα ενός DLP προβολέα ενός τσιπ, Εικόνα 3.5, τοποθετούμε έναν γυάλινο κινούμενο τροχό που αποτελείται από διάφορα χρωματικά τμήματα, τα λεγόμενα segments, ο οποίος περιστρέφεται μεταξύ της λάμπας και του DMD. Το όνομα του, χρωματικός τροχός (color wheel).

Ο πιο κοινός συνδυασμός χρωματικών τμημάτων είναι κόκκινο, πράσινο, μπλε και λευκό (RGBW), τα βασικά χρώματα RGB δηλαδή, άλλα υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι χρωματικών τροχών για ειδικές εφαρμογές (data, cinema, home cinema και άλλα).

Όταν όλα τα χρώματα απεικονίζονται με μεγάλη συχνότητα στην οθόνη, τότε ο εγκέφαλος μας τα συνδυάζει και βλέπουμε έγχρωμη εικόνα. Ο χρωματικός τροχός περιστρέφεται με ταχύτητες 2X μέχρι 6X ανά καρέ (που είναι 50 έως 150 στροφές ανά δευτερόλεπτο).



Εικόνα 3.5: Προβολέας DLP

Για εφαρμογές του DMD όπως home cinema (προβολή ταινιών δηλαδή) δεν χρησιμοποιούμε χρωματικούς τροχούς φιλοσοφίας RGBW άλλα Brilliant Color. Οι χρωματικοί τροχοί Brilliant Color έχουν συνήθως έξι ή επτά χρωματικά τμήματα. Συνήθως κόκκινο, πράσινο, μπλε, κυανό, magenta, κίτρινο (RGBCMY) και σε κάποιες υλοποιήσεις και το λευκό (RGBCMYW)



Σε αυτούς τους τροχούς συμπεριλαμβάνονται όπως θα προσέξατε τα τρία βασικά χρώματα RGB άλλα και τα τρία δευτερεύοντα χρώματα CMY, διάταξη η οποία επιτρέπει στους DLP να παράγουν περισσότερα χρώματα από τις υπόλοιπες τεχνολογίες προβολής, συμπεριλαμβανομένων των LCD, SXRD/LCOS που κάνουν χρήση μόνο κόκκινου, πράσινου και μπλε (RGB) για την δημιουργία έγχρωμης εικόνας.

Το μέγεθος του κάθε χρωματικού τμήματος του τροχού έχει να κάνει αποκλειστικά με τη χρήση για την οποία

προορίζεται ο προβολέας. Οι προβολείς DATA έχουν μεγαλύτερο τμήμα λευκού στον τροχό τους (για μεγαλύτερη φωτεινότητα) ενώ οι προβολείς που προορίζονται για προβολή ταινιών ελάχιστο ή και καθόλου.

3.4 DLP vs LCD [17]

Σε αυτό το υποκεφάλαιο θα συγκριθούν οι κύριες τεχνολογίες ψηφιακής απεικόνισης DLP και LCD που αναλύθηκαν παραπάνω. Και οι δυο έχουν πλεονεκτήματα και περιορισμούς έναντι του άλλου. Και οι δυο έχουν εξελιχθεί πολύ από την πρώτη τους εμφάνιση. Σκοπός είναι να γίνει αναφορά στο που διαφέρουν σήμερα, ώστε να μπορέσει να προσδιοριστεί αν η τεχνολογία που χρησιμοποιεί ένας προβολέας μπορεί από μόνη της να είναι σημαντικός παράγοντας για την επιλογή του ανάλογα με το πεδίο χρήσης του.

3.4.1 Πλεονεκτήματα DLP τεχνολογίας

✓ Σφραγισμένα τσιπ

Οι περισσότεροι προβολείς DLP έχουν σφραγισμένα τσιπ που εξαλείφουν την πιθανότητα να εισχωρήσουν σωματίδια σκόνης, γεγονός που θα επηρέαζε την προβολόμενη εικόνα. Οι LCD προβολείς δεν διαθέτουν σφραγισμένα τσιπ και έτσι ενδέχεται εάν δεν καθαρίζονται τα φίλτρα αέρα σύμφωνα με τις προδιαγραφές, να είναι διακριτή η παρουσία σκόνης στην προβολή.

✓ Χωρίς φίλτρο αέρα

Οι προβολείς DLP μπορούν να λειτουργήσουν και χωρίς φίλτρα αέρα. Αυτόματα λοιπόν μειώνεται η συντήρηση, καθώς δεν υπάρχει ανάγκη περιοδικού καθαρισμού ή αντικατάστασης των φίλτρων. Η συντριπτική πλειοψηφία των προβολέων DLP στην αγορά δεν διαθέτει φίλτρα αέρα με εξαίρεση μερικά από τα πιο ακριβά 3chip-DLP υψηλής απόδοσης και κάποια παλαιότερης γενιάς.

Εκτός από πλεονέκτημα έρχεται και ως θέμα ανταγωνιστικής συζήτησης και αντιπαράθεσης για τον χρήστη. Αυτό συμβαίνει διότι στους περισσότερους DLP προβολείς είναι σφραγισμένο μόνο το DLP τσιπ και όχι τα υπόλοιπα στοιχεία. Πιο συγκεκριμένα η σκόνη στον χρωματικό τροχό μπορεί να επηρεάσει το χρώμα και την ποιότητα της εικόνας. Επίσης αν τα σωματίδια σκόνης έρθουν σε επαφή με την επιφάνεια της λάμπας μπορούν να καούν ή να λιώσουν με αποτέλεσμα την σταδιακή υποβάθμιση της ποιότητας εξόδου κατά τη διάρκεια ζωής της. Ο βαθμός που μπορεί να επηρεαστεί δυσμενώς ένας προβολέας χωρίς φίλτρο εξαρτάται από την υπάρχουσα σκόνη στο περιβάλλον λειτουργίας.

Η Texas Instruments υποστηρίζει ότι η ποσότητα σκόνης που βρίσκεται σε ένα κανονικό περιβάλλον δωματίου δεν μπορεί να επηρεάσει έναν προβολέα χωρίς φίλτρο. Εκείνοι που υποστηρίζουν τα φίλτρα αέρα στους προβολείς θεωρούν ότι

τα φίλτρα βοηθούν στην ποιοτική απόδοση προβολής ακόμα και σε κανονικές συνθήκες δωματίου.

Η Mitsubishi αναγνωρίζοντας τη σκόνη ως πιθανό πρόβλημα έχει λάβει μέτρα για την καταπολέμηση της σκόνης σε DLP χωρίς φίλτρο προβολείς, όπως ο XD3200 και ο WD3300. Έχουν σφραγίσει και τον χρωματικό τροχό για να αποφευχθεί η φθορά λόγω σκόνης. Έχουν επίσης πραγματοποιήσει βελτιώσεις στον σχεδιασμό των αγωγών φωτός και των καναλιών ροής αέρα μειώνοντας έτσι την ποσότητα σκόνης που μπορεί να φτάσει στην λάμπα.

Υποστηρικτές των σχεδίων χωρίς φίλτρο επισημαίνουν ότι πολλοί χρήστες φιλτραρισμένων προβολέων δεν ακολουθούν τις συστάσεις για καθαρισμό ή αντικατάσταση φίλτρων αέρα. Αν το φίλτρο έχει φράξει με την πάροδο του χρόνου, μπορεί να εμποδίσει τη ροή αέρα, να αυξήσει τις εσωτερικές θερμοκρασίες και να επηρεάσει αρνητικά τη διάρκεια ζωής του LCD πάνελ.

✓ *Δεν υπάρχει πρόβλημα σύγκλισης*

Όλοι οι προβολείς που χρησιμοποιούν τρεις συσκευές απεικόνισης είτε είναι LCD, DLP είτε LCOS πρέπει να τις έχουν απόλυτα ευθυγραμμισμένες έτσι ώστε η κόκκινη, πράσινη και μπλε πληροφορία για κάθε pixel να συμπίπτει. Με την πάροδο του χρόνου οι τρεις συσκευές μπορεί να μετατοπιστούν προκαλώντας σφάλματα, όπως έγχρωμα αντικείμενα σε σημεία που δεν υπάρχουν. Ο σχεδιασμός DLP ενός τσιπ έχει ως πλεονέκτημα έναντι των άλλων με τρία τσιπ ή πάνελ δεδομένου ότι είναι αδύνατο να υπάρξει πρόβλημα σύγκλισης.

✓ *Αντίθεση ANSI*

Οι περισσότεροι προβολείς DLP επαγγελματικής κατηγορίας έχουν πολύ μεγαλύτερες επιδόσεις πλήρους ενεργοποίησης/απενεργοποίησης σε σύγκριση με LCD μοντέλα με συγκρίσιμη τιμή. Σπάνια στην βιομηχανία των προβολέων δημοσιεύονται στοιχεία ANSI, αλλά μετρήσεις μας δείχνουν ότι προβολείς DLP έχουν πλεονέκτημα συνήθως έναντι των ανταγωνιστικών. Ωστόσο με την εισαγωγή των ανόργανων LCD πάνελ που χρησιμοποιούν πλέον τα περισσότερα προϊόντα οικιακού LCD κινηματογράφου 1080p, έχουν εξουδετερώσει το πλεονέκτημα αυτό σε μεγάλο βαθμό.

✓ *Καλή απόδοση με την πάροδο χρόνου*

Συνήθως δεν υπάρχει υποβάθμιση της ποιότητας της εικόνας σε DLP προβολείς εάν χρησιμοποιούνται για μεγάλες χρονικές περιόδους, εκτός αν προκύψει πρόβλημα λόγω υπερβολικής σκόνης εσωτερικά. Παρόλα αυτά τα DLP τσιπ παραμένουν άθιχτα. Αντίθετα τα LCD πάνελ και οι πολωτές μπορούν να φθαρούν με τον χρόνο, προκαλώντας μεταβολές χρώματος, ανομοιότητες στον φωτισμό και μείωση αντίθεσης.

✓ *Ελαφρώς λιγότερο pixelation/screendoor effect*

Ένα από τα ιστορικά πλεονεκτήματα του DLP έναντι του LCD προβολέα ήταν το μειωμένο επίπεδο pixelation στην εικόνα. Τα στοιχεία τείνουν να είναι πιο ευκρινή σε έναν προβολέα LCD τεχνολογίας και αυτό έχει ως αποτέλεσμα την πιο ορατή δομή των pixel στην εικόνα. Αυτό καλείται screendoor effect και είναι διακριτό όπως θα παρατηρήσετε στην Εικόνα 3.6.



Εικόνα 3.6: Screendoor / Pixelation Effect

Ωστόσο οι διαφορές μεταξύ LCD – DLP από αυτή την άποψη δεν είναι τόσο μεγάλες όσο ήταν για δυο λόγους. Αρχικά οι κατασκευαστές LCD έχουν επιτύχει μικρότερα διάκενα interpixel, καθιστώντας το screendoor effect πολύ λιγότερο ορατό. Δεύτερον, η μέση ανάλυση των προβολέων που πωλούνται έχει αυξηθεί δραματικά σε σχέση με αυτή που ήταν κάποτε. Με την αύξηση της ανάλυσης έχουμε αξιοσημείωτη μείωση pixelation λόγω μικρότερων αλλά περισσότερων pixel στην επιφάνεια. Παρόλα αυτά σε προϊόντα χαμηλής ανάλυσης όπως SVGA (XGA) οι DLP προβολείς συνεχίζουν να έχουν πλεονέκτημα σε σχέση με τους LCD.

✓ Μέγεθος συσκευής

Ο DLP προβολέας ενός τσιπ προσφέρει την ευκαιρία για δημιουργία μικροσυσκευής, κάτι που η LCD τεχνολογία δεν μπορεί να προσφέρει προς το παρόν. Υπάρχουν τουλάχιστον δεκαπέντε προβολείς DLP που ζυγίζουν λιγότερο από 3 κιλά και παράγουν έξοδο περισσότερο από 1000 lumens. Συγκριτικά, ο ελαφρύτερος 3LCD προβολέας στην αγορά ζυγίζει 3.5 κιλά με την πλειοψηφία να είναι πάνω από 4 κιλά.

3.4.2 Αδυναμίες και περιορισμοί DLP τεχνολογίας

✖ Rainbow effect

Το πρόβλημα που αναφέρουν συχνά οι χρήστες ως αδυναμία στο DLP είναι η τάση να παράγει αντικείμενα ουράνιου τόξου. Έτσι καλούνται κάποια στιγμιαία σχήματα που μοιάζουν με ουράνια τόξα όπως δείχνει και η Εικόνα 3.7, εμφανίζονται τυχαία και διαρκούν ελάχιστα.



Εικόνα 3.7: Rainbow effect

Για θεατές που είναι ευαίσθητοι με αυτά είναι αρκετό για να τους αποσπάσει την προσοχή.

Το rainbow effect είναι ένα πρόβλημα μόνο για DLP προϊόντα με ένα τσιπ και κυρίως για εκείνα που χρησιμοποιούν τροχούς με μικρότερη ταχύτητα χρώματος. Δεν αντιλαμβάνονται όλοι τα ουράνια τόξα με τον ίδιο τρόπο. Πολλοί άνθρωποι έχουν λιγότερο ευαίσθητα μάτια και δεν μπορούν να τα ανιχνεύσουν καθόλου εύκολα. Δεδομένου ότι οι προβολείς LCD και DLP τριών τσιπ παρέχουν ταυτόχρονα σταθερά κόκκινη, πράσινη και μπλε εικόνα δεν μπορούν να παράξουν το φαινόμενο αυτό.

Σε προβολείς DLP με έγχρωμους τροχούς το rainbow effect μειώνεται αυξάνοντας την ταχύτητα του τροχού. Οι DLP πρώτης γενιάς είχαν ενσωματωμένο τροχό που στρεφόταν 60 φορές ανά δευτερόλεπτο ή 3600 RPM. Με ένα κόκκινο, πράσινο, μπλε φίλτρο στον τροχό τα χρώματα ανανεώνονται 60 φορές το δευτερόλεπτο και η ταχύτητα περιστροφής είναι γνωστή ως «1X». Στα προϊόντα DLP δεύτερης γενιάς η ταχύτητα περιστροφής τροχού έγινε 2X ή 7200 RPM, κάπως έτσι μειώθηκε και το rainbow effect στους περισσότερους χρήστες.

Παρόλο αυτά η 2X ταχύτητα δεν ήταν αρκετά γρήγορη για να χρησιμοποιηθεί σε προϊόντα οικιακού κινηματογράφου και βίντεο. Σήμερα, μερικοί προβολείς DLP που κατασκευάζονται για οικιακή χρήση χρησιμοποιούν έναν τροχό χρώματος που περιέχει δυο σετ κόκκινου, πράσινου και μπλε φίλτρου. Εξακολουθεί να στρέφεται με 7200 RPM αλλά επειδή τα χρώματα ανανεώνονται δυο φορές σε μια περιστροφή η βιομηχανία το έχει ονομάσει 4X. Αυξάνοντας την ταχύτητα φυσικής περιστροφής πάνω από 7200 RPM ορισμένοι προβολείς έχουν τροχούς ταχύτητας 5X ή 6X. Ωστόσο οι περισσότερες συσκευές DLP εμπορικής χρήσης κατασκευάζονται με 2X ταχύτητα επειδή είναι λιγότερο δαπανηρό.

✖ Κορεσμός και φωτεινότητα χρώματος

Ορισμένοι προβολείς έχουν εξαιρετικό κορεσμό χρωμάτων ενώ άλλοι είναι αρκετά φτωχοί ποιοτικά. Υποστηρικτές της 3LCD τεχνολογίας τονίζουν διαρκώς

την έλλειψη φωτεινότητας χρώματος στους DLP ενός τσιπ προβολείς, ιδιαίτερα εκείνων με λευκό χρώμα στους χρωματικούς τροχούς.

Όταν ένας τροχός χρώματος έχει ένα λευκό καθαρό τμήμα η φωτεινότητα στην έξοδο του προβολέα αυξάνεται πολύ και η βαθμολογία ANSI εκτοξεύεται. Τα περισσότερα DLP προϊόντα επαγγελματικής χρήσης έχουν λευκά τμήματα στους τροχούς για να ενισχύσουν την βαθμολογία ANSI. Αντίθετα, οι περισσότεροι προβολείς DLP που έχουν κατασκευαστεί για οικιακή χρήση δεν έχουν λευκά τμήματα.

Αν μετρηθεί η φωτεινότητα των χρωμάτων (κόκκινο, πράσινο, μπλε) ενός LCD προβολέα, το άθροισμα τους συνήθως συμπίπτει με την ένδειξη φωτεινότητας που θα δώσει το λευκό. Αυτό είναι λογικό γιατί σε έναν LCD προβολέα το λευκό παράγεται από την πλήρη ενεργοποίηση του κόκκινου, πράσινου, μπλε καναλιού. Δεν ισχύει το ίδιο σε έναν DLP και αυτό διότι η παρουσία του λευκού τμήματος στον τροχό μπορεί να δώσει διπλάσια αποτελέσματα στην μέτρηση φωτεινότητας από αυτό του αθροίσματος των τριών βασικών χρωμάτων.

Αν ένας LCD προβολέας μετρήσει 2000 lumens λευκού φωτός θα έχει επίσης 2000 lumens έγχρωμου φωτός. Ένας DLP αν μετρήσει 2000 lumens λευκού φωτός μπορεί να έχει μόνο 1000 lumens πραγματικού έγχρωμου φωτός από αυτό και το υπόλοιπο είναι λευκό φως.

✱ *Dithering artifacts effect*

Σε έναν DLP προβολέα η θέση κάθε Micromirror είτε είναι πλήρως ενεργοποιημένη για να δώσει μέγιστη φωτεινότητα είτε πλήρως απενεργοποιημένη για να δώσει μαύρο. Δεν υπάρχει τρόπος να μπορέσει ένα κάτοπτρο να αντιπροσωπεύσει το γκρι, δηλαδή να βρίσκεται σε μια ενδιάμεση κατάσταση ON/OFF, σε αντίθεση με έναν LCD. Ο τρόπος που δημιουργεί τις γκρι αποχρώσεις ένας DLP προβολέας είναι με πολύ γρήγορη ταχύτητα εναλλαγής της ON/OFF κατάστασης. Αυτή η διαδικασία λέγεται dithering, λειτουργεί αρκετά καλά στην απόδοση γκρι αποχρώσεων αλλά μπορεί να προκαλέσει ορατή αστάθεια σε στερεές σκοτεινές περιοχές, που αναφέρονται ως ακανόνιστα αντικείμενα. Μοιάζει με ψηφιακό θόρυβο αλλά δεν προέρχεται από το σήμα αλλά από την τεχνολογία DLP.

Αυτό το φαινόμενο δεν εμφανίζεται σε LCD τεχνολογίες διότι οι υγροί κρύσταλλοι μπορούν να είναι πλήρως ενεργοποιημένοι, απενεργοποιημένοι ή σε ενδιάμεσες καταστάσεις μεταδίδοντας το επιθυμητό επίπεδο φωτός.

✱ *Περιορισμένη συμβατότητα με φακούς ζουμ και μετατόπισης*

Λόγω της φύσης των προϊόντων DLP, ελαφριά και πιο κομψά σε μέγεθος, είναι δύσκολο να ενσωματωθούν φακοί με μεγάλο ζουμ ή στοιχεία μετατόπισης φακών. Αυτό αρχικά δεν προβλημάτιζε τους παραγωγούς γιατί πρωταρχικός στόχος τους ήταν το μικρό μέγεθος. Όμως στην αγορά του οικιακού εξοπλισμού

οι πωλητές LCD έχουν κατακτήσει σημαντικό κοινό λόγω της ικανότητας X2 ζουμ. Αυτό καθιστά αμέσως τους LCD προβολείς ευέλικτους ως προς το που θα τοποθετηθούν μέσα στον χώρο.

3.4.3 Πλεονεκτήματα 3LCD τεχνολογίας

Πολλά από τα πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς των 3LCD έχουν ήδη επισημανθεί προηγουμένως στο πλαίσιο παρουσίασης των DLP. Ωστόσο υπάρχουν αρκετά πλεονεκτήματα που δεν έχουν αναφερθεί και άλλα που χρειάζονται περεταίρω ανάλυση.

✓ *Καλύτερη τιμή και απόδοση σε προϊόντα οικιακής χρήσης*

Το κύριο κλειδί για την επιτυχία των προϊόντων LCD στην αγορά οικιακού κινηματογράφου είναι το τεράστιο πλεονέκτημα στην τιμή τους. Στα 1080p προσφέρουν εξαιρετική απόδοση ποιότητας εικόνας για τα χρήματά τους. Επίσης έχουν και άλλα χαρακτηριστικά που σε DLP αντίστοιχης τιμής δεν υπάρχουν.

✓ *Υψηλότερη αντίθεση σε προϊόντα οικιακής χρήσης*

Πολλοί προβολείς LCD που έχουν κατασκευαστεί για οικιακό κινηματογράφο έχουν πετύχει καλύτερη απόδοση αντίθεσης και βαθύτερα επίπεδα μαύρου σε σχέση με τους DLP. Αυτό συμβαίνει ειδικά σε μοντέλα LCD που χρησιμοποιούν ανόργανες οθόνες. Τα ανόργανα πάνελ είναι πιο ακριβά στη παραγωγή και για αυτό δεν χρησιμοποιούνται σε φθηνούς προβολείς.

✓ *Λιγότερα dithering artifacts / μεγαλύτερη σταθερότητα εικόνας*

Όπως σημειώθηκε προηγουμένως, τα dithering artifacts και το rainbow effect τα συναντάμε σε DLP ενός τσιπ. Δεδομένου αυτού, οι LCD προβολείς μας δίνουν την αίσθηση πιο σταθερής εικόνας βίντεο αν τους συγκρίνουμε με τους DLP παρόμοιας κατηγορίας και τιμής. Έτσι ο LCD προβολέας μας παρέχει ένα πιο καθαρό και χωρίς θόρυβο αποτέλεσμα.

✓ *Καλύτερη ευκρίνεια εικόνας*

Ο τρόπος που είναι δομημένα τα pixel σε ένα LCD πάνελ σε σχέση με την δομή ενός DLP προβολέα τείνει να αποδίδει πιο ευκρινή εικόνα. Αυτό παρατηρείται σε προϊόντα χαμηλότερης ανάλυσης (SVGA, XGA). Σε προϊόντα υψηλής ανάλυσης οι δυο κατηγορίες έχουν ελάχιστη διαφορά.

✓ *Μεγαλύτερη ευελιξία εγκατάστασης οικιακού κινηματογράφου*

Οι προβολείς LCD που αποσκοπούν σε οικιακό κινηματογράφο διαθέτουν συχνά X2 φακούς και ευέλικτη μετατόπιση κάθετα και οριζόντια του φακού. Αυτό τους καθιστά ικανούς να τοποθετηθούν σχεδόν οπουδήποτε.

✓ *Καλύτερη απόδοση φωτισμού και λιγότερη κατανάλωση ενέργειας*

Η LCD τεχνολογία είναι εγγενώς πιο αποδοτική όσον αφορά την φωτεινότητα. Οι περισσότεροι χρησιμοποιούν λαμπτήρες χαμηλής ισχύος για να παράγουν την ίδια φωτεινότητα που θα παρήγαγε αντίστοιχα ένας DLP προβολέας. Αυτό είναι αξιοσημείωτο όταν συγκρίνουμε LCD με DLP χωρίς λευκό τμήμα στον χρωματικό τροχό. Ένα καλό παράδειγμα είναι η σύγκριση μεταξύ δυο οικιακών κινηματογράφων 1080p, ο LCD Panasonic AE3000 με λαμπτήρα 165 Watt παράγει 1600 ANSI lumens. Ενώ ο Sharp χρησιμοποιεί 250 Watt λαμπτήρα για να παράξει 1600 ANSI lumens. Αυτό μπορεί να κάνει αισθητή τη διαφορά στην κατανάλωση ενέργειας. Επίσης μπορεί να κάνει αισθητή και τη διαφορά στην ποσότητα θερμότητας που παράγεται εντός της συσκευής του προβολέα.

3.4.4 Αδυναμίες και περιορισμοί 3LCD τεχνολογίας

✱ *Διάρκεια ζωής των LCD πάνελ*

Δεδομένης της παρατεταμένης έκθεσης σε υπεριώδη ακτινοβολία υψηλής έντασης και θερμότητας, οι οργανικές ενώσεις που χρησιμοποιούν στις περισσότερες LCD οθόνες τείνουν να υποβαθμίζονται με τον χρόνο. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε αποχρωματισμό της εικόνας και μείωση της αντίθεσης. Ο μόνος τρόπος να διορθωθεί αυτό είναι να αντικατασταθεί το LCD πάνελ το οποίο είναι απαγορευτικό από πλευρά κόστους. Συνήθως τον αντικαταστούν με καινούριο προβολέα.

Δεν υπάρχουν αντιπροσωπευτικά δεδομένα για τη διάρκεια ζωής των LCD πάνελ και σε γενικές γραμμές οι πωλητές υποστηρίζουν ότι ενδέχεται να υπάρξει φθορά αν ξεπεράσει την πρακτική χρονική διάρκεια ζωής το προϊόν.

✱ *Χαμηλότερη αντίθεση σε επαγγελματικά προϊόντα*

Σχετικά με την αντίθεση ο LCD υστερεί σε σχέση με έναν DLP κατά αξιοσημείωτο βαθμό. Αλλά και οι δυο τεχνολογίες έχουν κάνει διασκελισμούς προς τα εμπρός. Οι τυπικοί LCD προβολείς αναλογούν σε αντίθεση 400:1 ή χαμηλότερης ενώ τα συγκρίσιμα προϊόντα DLP ήταν σε 600:1 ή 800:1. Αλλά σημαντικές βελτιώσεις και στις δυο τεχνολογίες έχουν ωθήσει τις αναλογίες αντίθεσης σε καταπληκτικά επίπεδα. Πολλοί εμπορικοί προβολείς DLP αναλογούν σε 2000:1 σήμερα, ενώ τα προϊόντα που κατασκευάζονται συγκεκριμένα για τα συστήματα οικιακής προβολής αναλογούν σε 5000:1.

✱ *Ευαισθησία στη σκόνη*

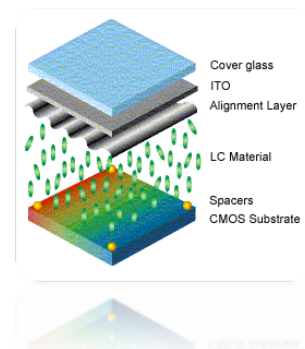
Επειδή τα LCD πάνελ δεν είναι σφραγισμένα είναι πιθανό τα σωματίδια σκόνης να φουσκώσουν τις οθόνες LCD δημιουργώντας έτσι ένα θαμπό ακαθόριστο αποτέλεσμα σε κάποιο σημείο της προβαλλόμενης εικόνας. Αυτό προκαλεί μικρή απόσπαση προσοχής όταν εμφανίζονται στατικές εικόνες όπως δεδομένα ή φωτογραφίες. Αλλά σε βίντεο με πλήρη κίνηση, βλέποντας ένα ακίνητο στοιχείο σε μια κινούμενη εικόνα είναι εξαιρετικά αποσπασματικό. Όταν η σκόνη

προσγειώνεται σε ένα LCD πάνελ στο κόκκινο ή το μπλε κανάλι, σπάνια είναι ορατή ώστε να αποσπάσει την προσοχή. Όταν ακουμπήσει στο πράσινο κανάλι όμως μπορεί να γίνει αρκετά αισθητή. Ορισμένοι πωλητές παρέχουν εναλλακτικές μεθόδους με τις οποίες ο χρήστης μπορεί να αφαιρέσει τη σκόνη χωρίς να στείλει τη μονάδα για καθαρισμό. Οι LCD κατασκευαστές ισχυρίζονται ότι τα σημερινά συστήματα φίλτρων αέρα είναι ανώτερα από του παρελθόντος και ότι η μόλυνση από σκόνη είναι ασυνήθιστη αν τα φίλτρα καθαρίζονται ή αντικαθίστανται σύμφωνα με τις οδηγίες συντήρησης. Οι περισσότεροι κατασκευαστές LCD προϊόντων καλύπτουν την αφαίρεση σκόνης με εγγύηση γεγονός που τους κάνει πιο δελεαστικούς στο καταναλωτικό κοινό.

Ο ανταγωνισμός μεταξύ των δυο βασικών κατηγοριών συνεχίζεται με γοργό βήμα, οι κατασκευαστές και των δυο τεχνολογιών εξακολουθούν να καινοτομούν για να παραμένουν ένα βήμα μπροστά ο ένας από τον άλλο. Η ποιότητα εικόνων σε ψηφιακούς προβολείς έχει βελτιωθεί εξαιρετικά την τελευταία δεκαετία, με σημαντικές αυξήσεις στην αντίθεση την ανάλυση και την απόδοση χρώματος. Οι τιμές έχουν μειωθεί και έτσι οι ψηφιακοί προβολείς απευθύνονται πλέον σε ευρύτερο κοινό και όχι μόνο σε επιχειρήσεις και εύπορους καταναλωτές.

3.5 Η τεχνολογία LCOS

Η τεχνολογία LCOS συνδυάζει τις δύο προγενέστερες ιδέες, του LCD και του DLP. Είναι μια «ανακλαστική» τεχνολογία που χρησιμοποιεί τα υγρά κρύσταλλα αντί των μεμονωμένων καθρεφτών. Στον προβολέα LCOS, τα υγρά κρύσταλλα εφαρμόζονται σε ένα αντανάκλαστικό υπόστρωμα καθρεφτών. Καθώς τα υγρά κρύσταλλα ανοίγουν και κλείνουν, το φως είτε απεικονίζεται από τον κατώτερο καθρέφτη, είτε αντιθέτως εμποδίζεται. Αυτό διαμορφώνει το φως και δημιουργεί την εικόνα.



Οι ψηφιακοί προβολείς που είναι βασισμένοι σε τεχνολογία LCOS χρησιμοποιούν τυπικά τρία αντίστοιχα ολοκληρωμένα κυκλώματα, όπου κάθε ένα συμμετέχει στο να διαμορφωθεί το φως στα κόκκινα, πράσινα και μπλε κανάλια. Σ' αυτό μοιάζουν με έναν προβολέα LCD που χρησιμοποιεί αντίστοιχα τρία πλαίσια LCD. Τόσο οι προβολείς LCOS όσο και οι προβολείς LCD παραδίδουν τα κόκκινα, πράσινα και μπλε συστατικά του φωτός στην οθόνη ταυτόχρονα. Δεν υπάρχει καμία περιστρεφόμενη ρόδα χρώματος που χρησιμοποιείται σε αυτούς τους προβολείς, όπως υπάρχει στους προβολείς DLP με ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα.

Η τεχνολογία LCOS είναι συνήθως πολύ υψηλής ανάλυσης, και χαρακτηριστικά υψηλότερου κόστους από τα περισσότερα μοντέλα LCD και DLP. Γενικά οι μηχανές LCOS αρχίζουν να εμφανίζονται σε ανάλυση τύπου SXGA (1365x1024) και υψηλότερης. Οπότε και εξ ορισμού δεν είναι φτηνοί.

Ούτε οι προβολείς LCOS είναι ιδιαίτερα συμπαγείς σε σύγκριση με τις φορητές μονάδες LCD και DLP. Οι ελαφρύτερες μηχανές LCOS ζυγίζουν σήμερα περίπου 5,5 κιλά. Βέβαια μπορούν κάλλιστα να είναι μεγαλύτεροι και βαρύτεροι από αυτούς.

Οι προβολείς LCOS έχουν διάφορα βασικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις άλλες δύο δημοφιλέστερες τεχνολογίες. Κατ' αρχάς, λόγω της υψηλής ανάλυσης αλλά και λόγω του ελάχιστου διαστήματος μεταξύ των εικονοκυττάρων, η ορατή εμφάνιση των ξεχωριστών εικονοστοιχείων είναι ανύπαρκτη. Έτσι η προκύπτουσα τηλεοπτική εικόνα μπορεί να είναι ομαλή σαν μετάξι.

Δεύτερον, με την τεχνολογία LCOS οι άκρες του εικονοκύτταρου τείνουν να είναι ομαλότερες σε αντίθεση με τις αιχμηρές άκρες της DLP. Στην πραγματικότητα, αυτό δίνει στην εικόνα μια λείανση, περισσότερο φυσική στην αίσθηση και την εμφάνιση της.

Τρίτον, οι προβολείς LCOS και LCD παραδίδουν συνεχή κόκκινο, πράσινο και μπλε ταυτόχρονα επάνω στην οθόνη, σε αντίθεση με τους προβολείς DLP που παραδίδουν το χρώμα διαδοχικά, εναλλασσόμενο μεταξύ κόκκινου, πράσινου και μπλε σε μια στιγμή. Αυτή η διαφορά κάνει τους προβολείς LCOS και LCD να τείνουν να είναι ανώτεροι σε ποιότητα χρώματος.

Τέταρτο, η απουσία ενδιάμεσων ροδών χρώματος αποκλείει εντελώς κάθε πιθανότητα δημιουργίας παρενεργειών σε άτομα με κάποιες ιδιαίτερες ευαισθησίες στα μάτια και επιρρεπείς στον πονοκέφαλο.

Αντιθέτως, η πρωταρχική αδυναμία της τεχνολογίας LCOS είναι η αντίθεση. Σήμερα τα περισσότερα μοντέλα LCOS αναλογούν σε 500:1 ή 800:1. Έτσι δεν έχουν την απόδοση αντίθεσης που είναι σε θέση να επιτύχουν τα περισσότερα μοντέλα DLP. Η χρήση των νέων υψηλής ανάλυσης υλικών οθόνης αντιστάθμισε αυτήν την αδυναμία μέχρι ενός ορισμένου βαθμού. Και εάν υπάρχει έμμεσο περιβαλλοντικό φως στο χώρο προβολής, οι διαφορές στην αντίθεση γίνονται λιγότερο αισθητές.

Πολλοί προβολείς LCOS επίσης έχουν περιορίσει τη ζωή λαμπτήρων στις 1000 έως 1500 ώρες. Και σε ορισμένα πρότυπα οι αντικαταστάσεις λαμπτήρων μπορούν να είναι ακριβότερες από ότι είναι οι τυπικοί προβολείς LCD ή DLP. Αν και LCOS είναι ένας γενικός όρος, υπάρχουν διάφορες παραλλαγές και τεχνικές εφαρμογές.

4

Ελεγχόμενη ψηφιακή μικροκατοπτρική συσκευή

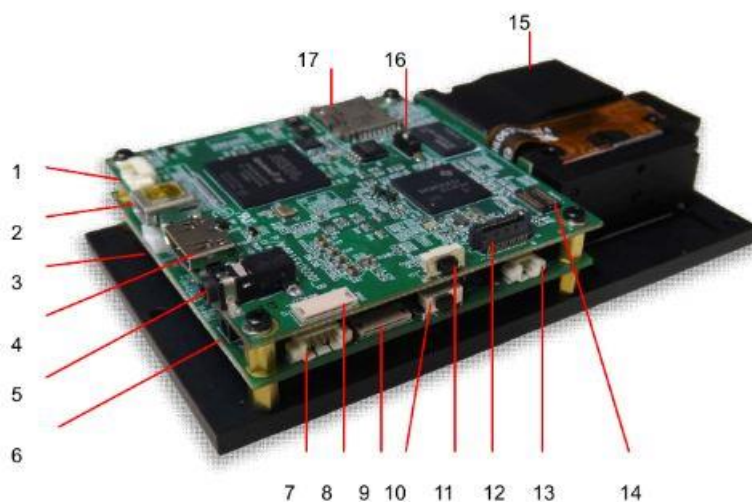
Η κεντρική ιδέα που αναπτύχθηκε εντός του εργαστηρίου οπτοηλεκτρονικής ήταν μια ψηφιακή μικροκατοπτρική συσκευή ευρέως φάσματος βασισμένη στον DLP LightCrafter 3000 της *Texas Instruments*, που είναι απόλυτα ελεγχόμενη από τον χρήστη. Σε αυτή την εργασία θα αναλυθεί το δεύτερο και πιο εξελιγμένο μοντέλο αλλά θα συγκρίνουμε και τις δυο εκδόσεις τόσο σε hardware όσο και σε software επίπεδο. Ουσιαστικά η ικανότητα που έχει η συγκεκριμένη συσκευή είναι ότι λαμβάνει φάσματα σε μορφές κυματομορφών από τον χρήστη και τις προβάλλει, γεγονός που την κάνει καινοτόμα για τα μέχρι στιγμής δεδομένα. Τέλος, έχει πολύ καλή απόδοση και είναι συμφέρουσα όσον αφορά το κόστος.

4.1 Αρχιτεκτονική δομή DLP LightCrafter 3000 [18]

Η ψηφιακή συσκευή επεξεργασίας φωτός (DLP – Digital Light Processing) είναι μια συσκευή βασισμένη σε μικρο-ηλεκτρομηχανική τεχνολογία. Το μέγεθος της είναι 117mm x 65mm x 23mm και είναι σε θέση να εμφανίζει εικόνες και βίντεο WVGA ανάλυσης έως και 854 x 480. Προσφέρει επιλογές συνδεσιμότητας με κάμερες, αισθητήρες, mini HDMI, micro-SD, mini USB, mini βύσμα UART, I^2C . Μέσα της υπάρχει μια μηχανή που παράγει φως και απαρτίζεται από μια ψηφιακή μικροκατοπτρική συσκευή (DMD – Digital Micromirror Device), ένα κόκκινο, ένα πράσινο και ένα μπλε LED καθώς και ένα NTC θερμίστορ.

Τέλος, διαθέτει οπτικά με 1.66 *Throw Ratio* όπου
$$Throw Ratio = \frac{\text{απόσταση μεταξύ φακού προβολέα και οθόνης}}{\text{πλάτος οθόνης}}.$$

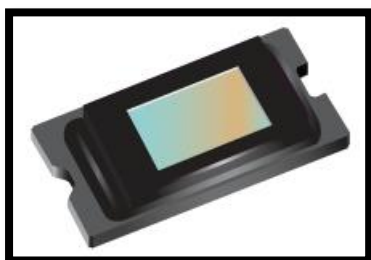
Στην Εικόνα 4.1 παραθέτεται αναλυτικά η δομή της συσκευής DLP LightCrafter 3000 με επεξήγηση των βασικών του σημείων.



1. Trigger Input/Output
2. Mini USB
3. Power Connector
4. Mini HDMI
5. UART
6. Power Socket
7. I2C
8. FPGA SPI Flash Programming Interface
9. MSP430/DLPC300 Flash Programming Interface
10. On/Off Button
11. Input Selection Button (DM365/Internal Test Pattern/HDMI input)
12. Ethernet PHY
13. Fan
14. Camera
15. Focus Control
16. Boot Mode Selection Switch
17. Micro SD card

Εικόνα 4.1: Αναλυτική δομή LightCrafter 3000

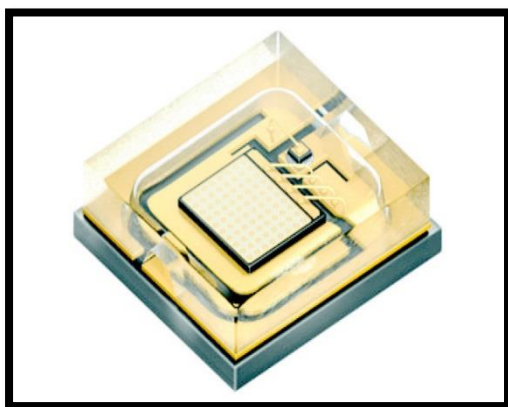
4.1.1 DLP 3000



Το DLP3000 είναι ένα ψηφιακά ελεγχόμενο μικρο-οπτο-ηλεκτρομηχανικό σύστημα (MOEMS: Micro-Opto-Electro-Mechanical Systems) που ενεργεί ως χωρικός ρυθμιστής φωτός (SLM: Spatial Light Modulator). Χαρακτηρίζεται από υψηλή απόδοση και ταχύτητα και είναι σε θέση να ρυθμίζει το εύρος και την κατεύθυνση του εισερχόμενου φωτός. Το μέγεθος του DMD είναι 0,3 ίντσες (7,62 mm) και περιέχει 415.872 καθρέπτες σε σειρά 608 x 68. Έχει εξαιρετική απόδοση στο ορατό φως στην

φασματική περιοχή 420 nm – 700 nm. Η κατανάλωση του είναι χαμηλή περίπου στα 200MW και υποστηρίζει θερμοκρασίες από 0°C – 70°C. Το DLP3000 μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες εφαρμογές όπως συστήματα μηχανικής όρασης, αναγνώριση προσώπου, 3D σάρωση, φασματοσκοπία, χημικούς αναλυτές και ιατρικά όργανα.

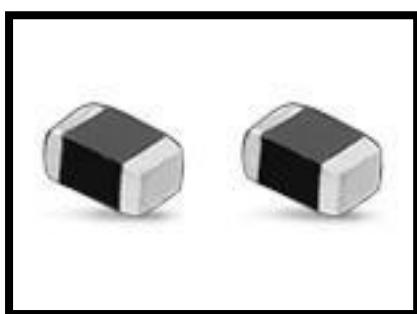
4.1.2 Μονοχρωματικά LED



Ο LightCrafter3000 χρησιμοποιεί μονοχρωματικά LED της OSRAM υψηλής ισχύος, που η χρήση τους είναι κοινή σε εφαρμογές προβολών. Το μέγεθός τους είναι μικρό γιατί έχουν σχεδιαστεί για χρήση μίνι συσκευών. Υπάρχουν τρεις ενσωματωμένες λυχνίες LED, πιο συγκεκριμένα μια μπλε στα 465 nm, μια πράσινη στα 550 nm και μια κόκκινη στα 624 nm. Ένα από τα χαρακτηριστικά τους είναι η πολύ χαμηλή θερμική τους

αντίσταση. Χαρακτηρίζονται από υψηλή φωτεινότητα και γρήγορο χρόνο μεταγωγής. Η χρήση τους είναι κοινή σε Pico προβολείς, σε γενικές εφαρμογές φωτισμού, σε RGB προβολείς και σε φωτισμούς εφέ. Στο πείραμα της συγκεκριμένης εργασίας τα τρία LED αντικαταστήθηκαν με μια λάμπα αλογόνου για να εξασφαλιστεί μεγαλύτερη ισχύς στην έξοδο και να είναι σε θέση να προβάλλει και στο υπέρυθρο φάσμα.

4.1.3 NTC Θερμίστορ



Το θερμίστορ είναι ένας τύπος αντίστασης, η τιμή της οποίας επηρεάζεται από τη θερμοκρασία, πολύ περισσότερο από όσο στις συνηθισμένες αντιστάσεις. Τα θερμίστορ χρησιμοποιούνται ευρέως για τον περιορισμό της απότομης αύξησης των ρευμάτων, σαν αισθητήρες θερμοκρασίας (τυπικά τα Αρνητικού Συντελεστή Θερμοκρασίας- Negative Temperature Coefficient ή NTC). Στο εσωτερικό του DLP3000 LightCrafter υπάρχει

ένας θερμοστάτης NTC που έχει αναπτυχθεί από το Murata. Μερικά από τα χαρακτηριστικά τους είναι η υψηλή σταθερότητα στο περιβάλλον και η εξαιρετική μακροχρόνια σταθερότητα γήρανσης.

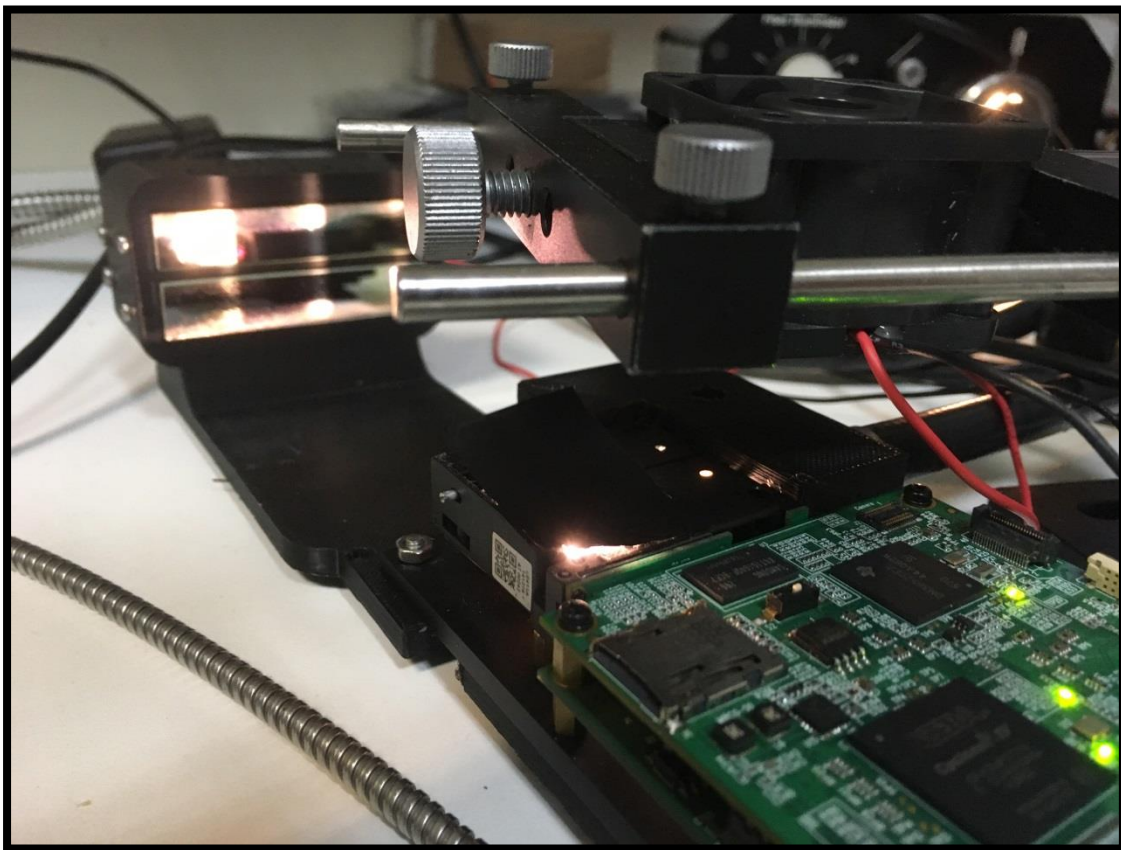
4.1.4 Απαιτούμενα στοιχεία για την λειτουργία

Ο χρήστης για να θέσει σε λειτουργία το DLP3000 χρειάζεται τροφοδοσία που δεν συμπεριλαμβάνεται στην συσκευασία, τάξεως των 5 V.

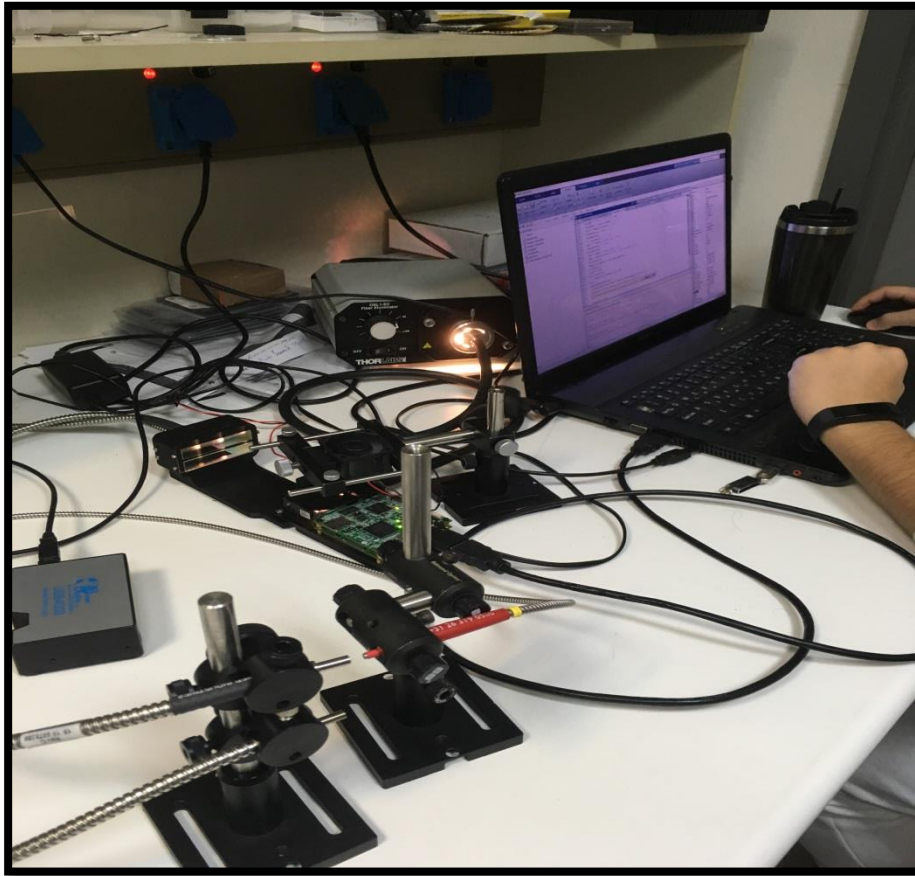
4.2 Η αρχική δομή του πειράματος [19]

Για να υλοποιηθεί το πείραμα της συγκεκριμένης εργασίας, εκτός από το DLP LightCrafter 3000 χρειάστηκε να γίνουν προσθήκες εξαρτημάτων που θα αναλυθούν στο παρόν κεφάλαιο. Αρχικά θα παρουσιαστεί το πρωτότυπο της συσκευής, το οποίο είχε δημιουργηθεί από τον Κοσμά Κυριακόπουλο στα πλαίσια της διπλωματικής του εργασίας και μετέπειτα θα γίνει αναφορά στο δεύτερο και πιο εξελιγμένο Setup που είναι και το κύριο θέμα αυτής της εργασίας.

Στην Εικόνα 4.2 παρουσιάζεται το πρωταρχικό μοντέλο του ελεγχόμενου ψηφιακού προβολέα και στην Εικόνα 4.3 το τελικό Setup που στήθηκε για να υλοποιηθούν οι μετρήσεις του πειράματος που θα παρατεθούν σε επόμενο κεφάλαιο.



Εικόνα 4.2: Πρωτότυπο συσκευής



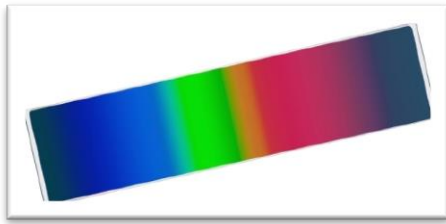
Εικόνα 4.3: Τελικό Setup πρωτοτύπου

Για να υλοποιηθεί η καινοτόμα αυτή συσκευή χρειάστηκε να αλλάξουμε, όπως προαναφέρθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο, τις τρεις λυχνίες LED του DLP LightCrafter 3000 με μια λάμπα αλογόνου σε ρόλο πηγής. Έπειτα δημιουργήθηκε εξ ολοκλήρου στον 3D printer του εργαστηρίου, μια βάση που πάνω της εφαρμόστηκαν δυο γραμμικά φίλτρα Schott στην εμπρόσθια όψη και πίσω σαν οδηγοί εξόδου δυο οπτικές ίνες Single head της Dolan-Jenner Industries. Αυτή η τεχνητή βάση ενώθηκε με το LightCrafter 3000 με κύρια σημεία ευθυγράμμισης τα φίλτρα Schott και τον φακό του DLP.

Η πειραματική διαδικασία ολοκληρώθηκε με τη λήψη των απαραίτητων μετρήσεων χρησιμοποιώντας το ειδικό φασματόμετρο USB4000 Fiber Optic της Ocean Optics. Τέλος, για την αποφυγή προβλημάτων από την αύξηση θερμοκρασίας λόγω παρατεταμένης χρήσης της συσκευής τοποθετήθηκε ανεμιστηράκι πάνω από το LightCrafter 3000.

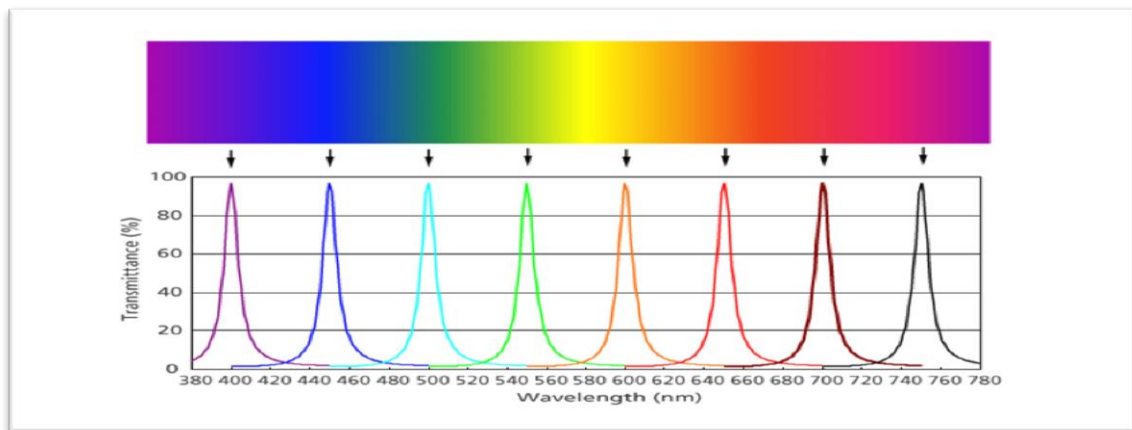
4.2.1 Γραμμικό φίλτρο Schott [20]

Το γραμμικό φίλτρο από την Schott που χρησιμοποιήθηκε έχει κοινή χρήση σε διάφορες εφαρμογές όπως φασματοσκοπία, ανοσολογία, φαρμακευτική ανάλυση και



άλλα. Γραμμικά φίλτρα τέτοιου τύπου χρησιμοποιούνται ιδανικά για τη παραγωγή μονοχρωματικού φωτός σε συνδυασμό με οπτικές ίνες που είναι ορθά τοποθετημένες πίσω από αυτά. Έτσι προβάλλοντας μια gray scale εικόνα πάνω σε ένα τέτοιου είδους γραμμικό

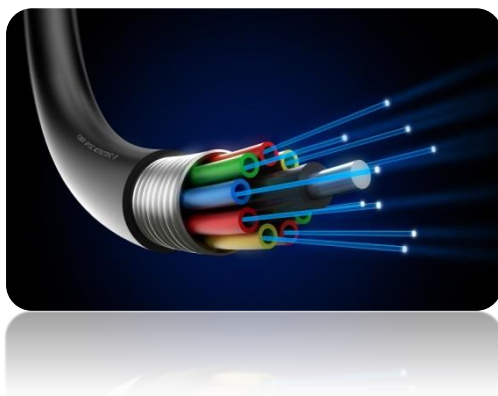
φίλτρο, φωτίζονται διαφορετικές περιοχές πίσω από αυτό και μέσω των οπτικών ινών δίνονται κάθε φορά διαφορετικά μήκη κύματος. Το μήκος του είναι περίπου 50 nm και η φασματική περιοχή του ανέρχεται στα 400 με 700 nm.



Εικόνα 4.4: Schott Filter Transmittance

4.2.2 Οπτική ίνα [21]

Οι οπτικές ίνες είναι πολύ λεπτά νήματα από πλαστικό ή γυαλί, με διάμετρο μικρότερη των 10μm όπου από μέσα τους μεταδίδονται ψηφιακά δεδομένα υπό μορφή φωτός. Συνήθως τις συναντάμε συγκεντρωμένες σε δέσμες, που σχηματίζουν τα λεγόμενα οπτικά καλώδια.



Στο ένα άκρο της οπτικής ίνας, υπάρχει ο πομπός και στο άλλο ο δέκτης. Ο πομπός μετατρέπει τις ψηφιακές πληροφορίες ενός σε ψηφιακά φωτεινά κύματα. Ο δέκτης αποκωδικοποιεί τα ψηφιακά κύματα φωτός σε ψηφιακά δεδομένα. Τα ψηφιακά κύματα ταξιδεύουν με την ταχύτητα του φωτός μέσω της οπτικής ίνας με διαδοχικές ανακλάσεις στους τοίχους της οπτικής ίνας. Αυτές οι αντανάκλασεις λαμβάνουν χώρα στους τοίχους, υπό γωνία μικρότερη από 42 μοίρες,

ως αποτέλεσμα οι τοίχοι λειτουργούν σαν καθρέφτες. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται ολική αντανάκλαση και αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο τα φωτεινά κύματα

παραμένουν μέσα στην οπτική ίνα και συνεχίζουν το ταξίδι τους προς το άλλο άκρο χωρίς να βγουν από την ίνα.

Οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται αντί των μεταλλικών καλωδίων, διότι τα σήματα ταξιδεύουν μαζί τους με μικρότερη απώλεια και επίσης δεν επηρεάζονται από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται επίσης για φωτισμό, για τη μεταφορά εικόνων επιτρέποντας έτσι την προβολή σε στενούς χώρους. Ειδικά σχεδιασμένες οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται και για πολλές εφαρμογές σε τηλεπικοινωνίες, ιατρική και άλλους κλάδους.



Στο πρωτότυπο πείραμα χρησιμοποιήθηκαν δύο καλώδια οπτικών ινών Single head της Dolan-Jenner Industries.

Στο νέο μοντέλο, όπως θα αναλυθεί και σε επόμενη παράγραφο, έγινε αντικατάσταση των δυο οπτικών ινών με μια μεγαλύτερης διαμέτρου.

4.2.3 Φασματόμετρο [22]

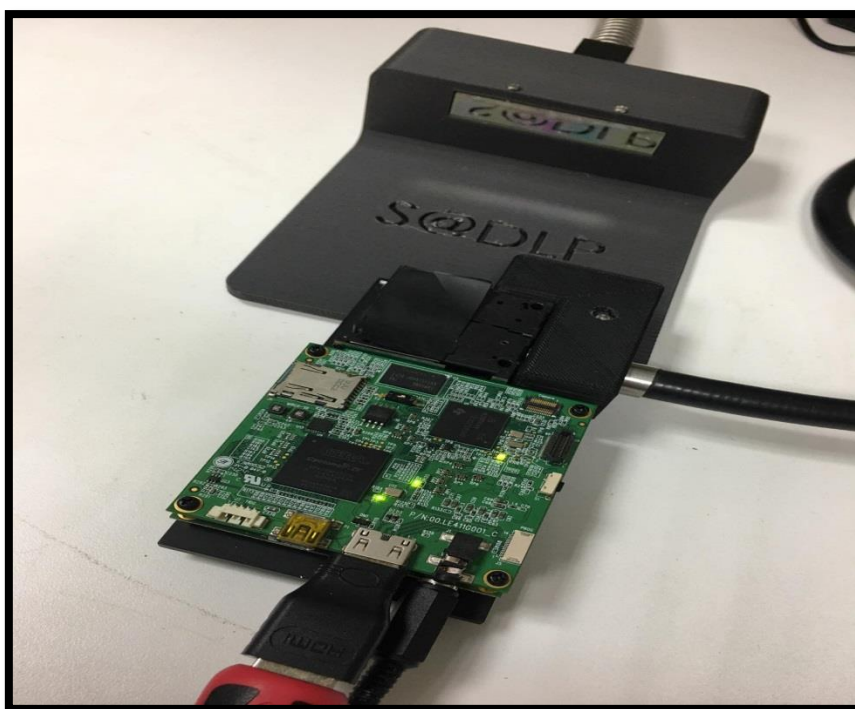


Στην οπτοηλεκτρονική ένα φασματόμετρο είναι μια επιστημονική συσκευή που έχει ως κύρια λειτουργία να αναλύει, να διαχωρίζει και να μετρά στο ορατό φως τις ιδιότητες ενός φωτισμένου αντικειμένου, ή ενός ανακλώμενου φωτός. Πιο συγκεκριμένα καθορίζει το μήκος κύματος και την ένταση του φωτός. Ένα φασματόμετρο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε

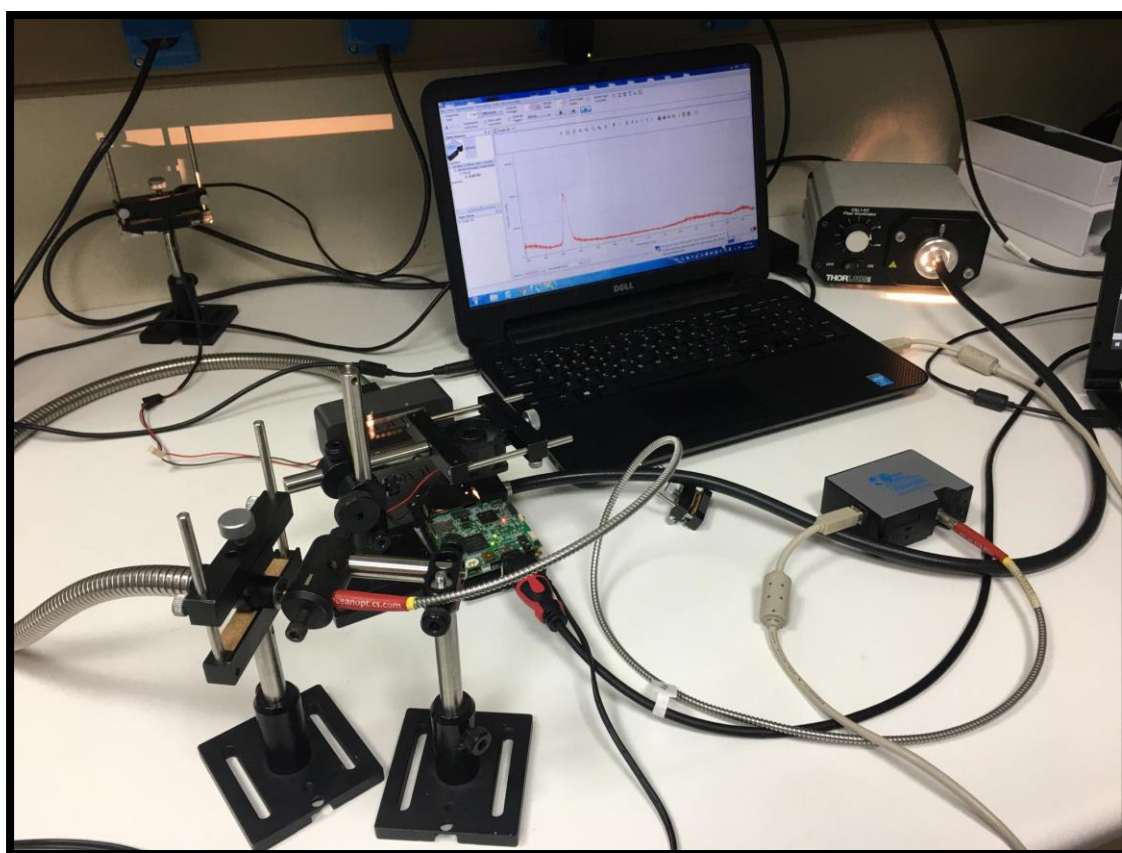
επιστήμες όπως η αστρονομία και η χημεία. Αποτελείται από μια πηγή φωτισμού, φίλτρα παρεμβολής, ανιχνευτή ή φωτοδίοδο και μια συσκευή ανάγνωσης. Για τις ανάγκες του παρόντος πειράματος έγινε χρήση του USB4000 της Ocean Optics το οποίο μπορεί να καλύψει φασματική περιοχή τάξεως 200 με 1100 nm.

4.3 Αναβάθμιση πρωτοτύπου

Για να εξελιχθεί το πρωτότυπο μοντέλο και να δίνει καλύτερα αποτελέσματα εξόδου τόσο σε ισχύ όσο και σε ακρίβεια έγιναν κάποιες αλλαγές στην αρχιτεκτονική του δομή. Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει παράθεση των αλλαγών αυτών και σε επόμενο θα γίνει αναφορά και στην αναβάθμιση του λογισμικού του.



Εικόνα 4.5: Δεύτερο μοντέλο DLP

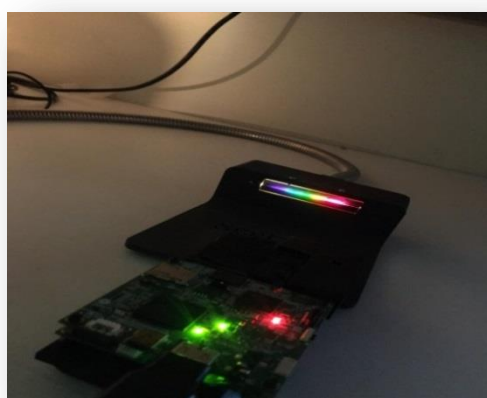


Εικόνα 4.6: Τελικό Setup

Ανατρέχοντας στις Εικόνες 4.2-4.3 και συγκρίνοντας τες με τις παραπάνω θα δούμε πως το μοντέλο του ψηφιακού προβολέα λειτουργεί πλέον με ένα οπτικό καλώδιο και ένα φίλτρο Schott. Θέλοντας να ενισχύσουμε την έξοδο και να βελτιώσουμε αποκλίσεις που έλαβαν χώρα στις πειραματικές μετρήσεις του πρωτοτύπου, η πρώτη σκέψη ήταν να γίνει αντικατάσταση οπτικής ίνας.



Επενδύσαμε λοιπόν σε οπτικό καλώδιο ίδιου τύπου, αλλά μεγαλύτερης διαμέτρου για να διευρύνουμε το εύρος φάσματος εξόδου καθώς και για καλύτερη απόδοση ισχύος. Πραγματοποιήθηκε έρευνα και αγορά καινούριας οπτική ίνας με ονομασία Line Light Guide GX-71 της Beijing PVD Instrument. Το συγκεκριμένο καλώδιο έχει στη μία πλευρά πολλές οπτικές ίνες τοποθετημένες η μια δίπλα στην άλλη και στο άλλο άκρο συγκεντρώνονται όλες μαζί σε στρογγυλή βάση μεταδίδοντας τα φωτόνια. Η νέα οπτική ίνα έχει διάμετρο εξόδου $\Phi 10\text{mm}$, μήκος καλωδίου 1m και κεφαλή εισόδου $1 \times 71\text{mm}$. Στη συνέχεια δημιουργήσαμε από την αρχή στον 3D printer του εργαστηρίου καινούρια βάση οπτικού καλωδίου – φίλτρου για να καλύπτει τα νέα δεδομένα, και το ευθυγραμμίσαμε με την πλακέτα του LightCrafter.

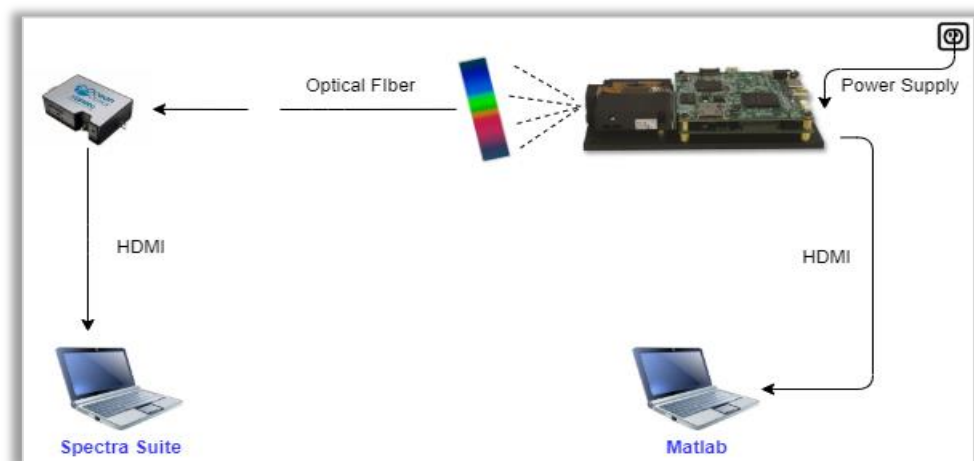


Εικόνα 4.7: Τεστ Εφαρμογής

Στην Εικόνα 4.7 παραθέτονται στιγμιότυπα από πειραματικές δοκιμές που έγιναν εντός του εργαστηρίου εφόσον είχε ολοκληρωθεί η νέα διάταξη της συσκευής. Αριστερά παρατηρείται το νέο οπτικό καλώδιο, φανερά μεγαλύτερης διαμέτρου, σε

μια τυχαία επιλογή φάσματος προς προβολή. Δεξιά φαίνονται τα όρια του γραμμικού φίλτρου εκτελώντας αντίστροφη διαδικασία. Φωτίζοντας την στρογγυλή έξοδο της οπτικής ίνας από την μια πλευρά, λευκό φως πέφτει πάνω στο φίλτρο Schott προσδιορίζοντας τις φασματικές του ιδιότητες.

Στο Σχήμα 4.1 παραθέτεται και το block diagram του πειράματος για καλύτερη κατανόηση.



Σχήμα 4.1: Block Diagram

Τέλος, είναι σημαντικό να αναφερθεί πως τα υπόλοιπα στοιχεία που στελεχώνουν το τελικό Setup είναι ίδια με του πρωτοτύπου, αφήνοντας βέβαια περιθώρια για μελλοντική εξέλιξη.

4.4 Ανάπτυξη λογισμικού

Έχοντας τελειοποιήσει την αρχιτεκτονική δομή του ψηφιακού μικροκατοπτρικού προβολέα, επόμενο βήμα για την ολοκλήρωση του πειράματος είναι το κομμάτι του λογισμικού που θα πλαισιώσει την καινοτόμα αυτή συσκευή.

Με σκοπό να αναλύσουμε τα κύρια σημεία του λογισμικού που δημιουργήθηκε πρέπει για αρχή να γίνει κατανοητός ο τρόπος που θα ενεργεί το παρόν πείραμα.

4.4.1 Επεξήγηση πειραματικής διαδικασίας

Στόχος της καινοτόμας αυτής συσκευής, όπως έχει προαναφερθεί σε προηγούμενο υποκεφάλαιο, είναι η προβολή φασμάτων δοσμένων από τον ίδιο τον χρήστη. Για να υλοποιηθεί η ιδέα αυτή, εκτός από το hardware κομμάτι που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 4.3, αναγκαία συνθήκη ήταν και η ανάπτυξη κατάλληλου λογισμικού.

Σκοπός του απαιτούμενου λογισμικού είναι να δέχεται τυχαίες καμπύλες από τον χρήστη και να τις στέλνει στην συσκευή DLP προς προβολή. Για την διαδικασία αυτή αναπτύχθηκε αλγόριθμος στο προγραμματιστικό περιβάλλον του *Matlab*, με αρχική δομή που υλοποιήθηκε από τον Κοσμά Κυριακόπουλο για το πρωτότυπο.

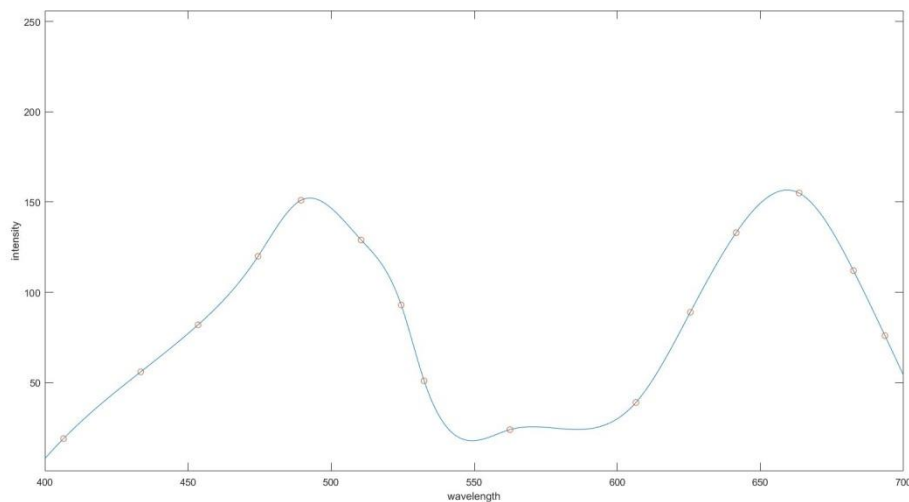
4.4.2 Ανάλυση και δυνατότητες αρχικού προγράμματος

Στο παρόν κεφάλαιο θα αναλυθεί περαιτέρω ο τρόπος που ενεργεί ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε στο *Matlab* και πως επιδρά στο υπόλοιπο σύστημα.

Η βασική λειτουργία του προγράμματος για το πείραμα της εργασίας αυτής είναι η δημιουργία ασπρόμαυρων εικόνων με μορφή κάθετων γραμμών. Οι γραμμές αυτές ορίζονται από τον χρήστη και συγκεκριμένα από την καμπύλη που εκείνος επιθυμεί να προβάλει (Εικόνα 4.8-4.9).



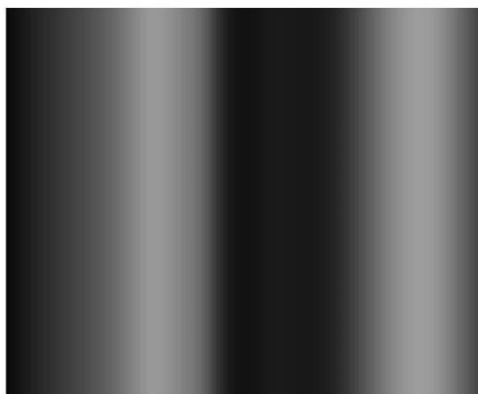
Εικόνα 4.8: Σημεία επιλεγμένα από τον χρήστη



Εικόνα 4.9: Φασματική καμπύλη

Η καμπύλη αυτή είναι οριοθετημένη σε 2D διάσταση με τα όρια του άξονα X να κυμαίνονται από 380 nm – 720 nm, προσδιορίζοντας έτσι το μήκος κύματος και τον άξονα Y από 0 – 255 επιλέγοντας έτσι την ένταση. Σε κάθε μήκος κύματος

αντιστοιχεί μια τιμή έντασης που σε μια νέα εικόνα που δημιουργείται εμφανίζεται με μορφή κάθετων γραμμών (Εικόνα 4.10).



Εικόνα 4.10: Τελική εικόνα προς DLP

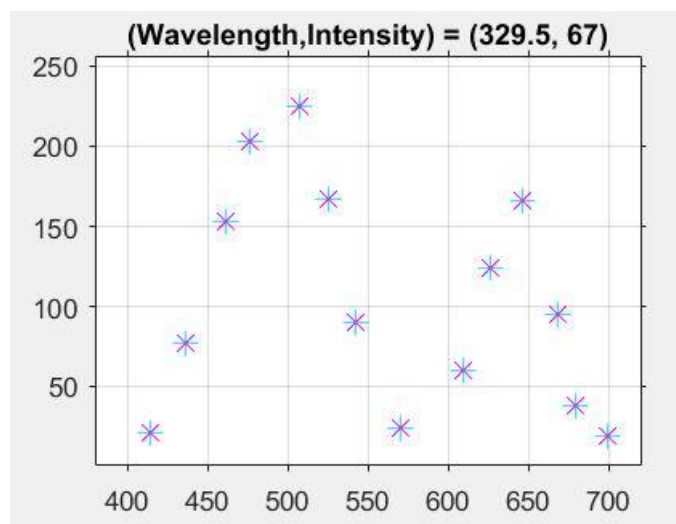
Η φασματική καμπύλη που στέλνεται στο DLP δημιουργείται με την εντολή *Spline* του Matlab με δοθέντα σημεία αυτά που έχει επιλέξει ο χρήστης κατά την έναρξη του προγράμματος. Έγινε χρήση της συγκεκριμένης μεθόδου διότι δίνει ομοιόμορφες καμπύλες, χωρίς αιχμηρές κορυφές μεταξύ των σημείων και έτσι το φάσμα περιγράφεται πολύ καλύτερα.

Τέλος, επειδή η ασπρόμαυρη εικόνα που φτάνει μέσω HDMI στο DLP είναι διαφορετικής ανάλυσης, ήταν αναγκαία η μορφοποίηση της στις προδιαγραφές του (854 x 480).

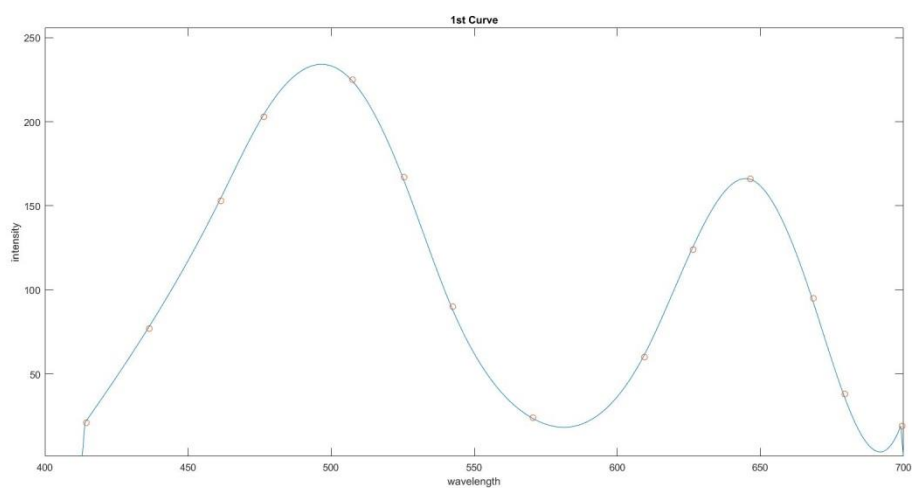
4.4.3 Αναβάθμιση προγράμματος

Στα πλαίσια της εξέλιξης του προγράμματος που προϋπήρχε από την εργασία του Κοσμά Κυριακόπουλου, έγιναν αλλαγές ώστε να αναβαθμιστεί και να βελτιστοποιηθεί.

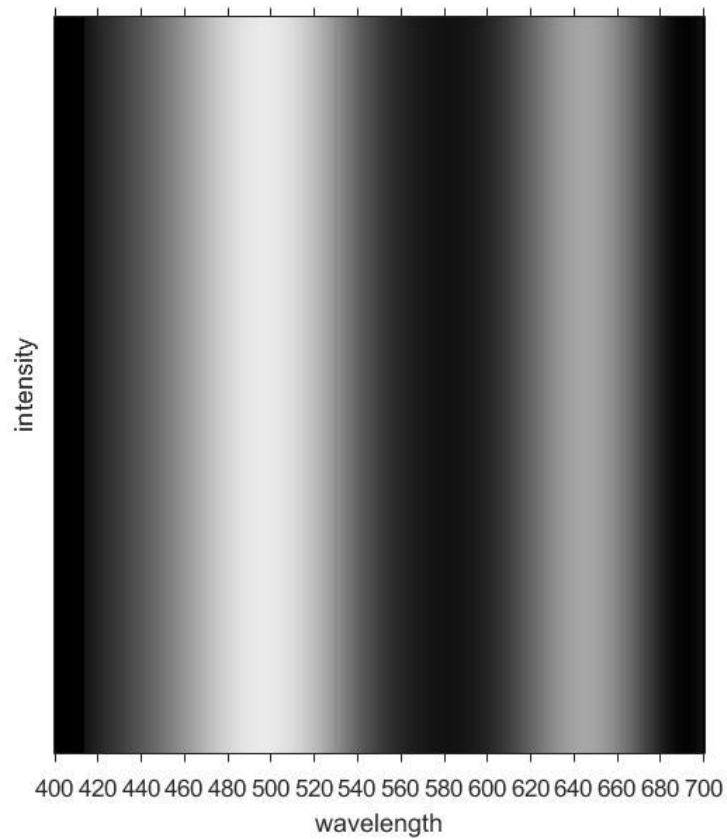
Αρχικά πραγματοποιήθηκαν μικρές αλλαγές όσον αφορά την αισθητική όψη των εικόνων που τρέχουν κατά την διάρκεια εκτέλεσης του προγράμματος. Αυτές οι αλλαγές έγιναν για την διευκόλυνση του χρήστη κατά την διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας. Στο πρώτο στάδιο της εκτέλεσης του προγράμματος η επιλογή στοιχείων χειροκίνητα από τον χρήστη όπως θα δείτε στην Εικόνα 4.11 γίνεται με μεγαλύτερη ακρίβεια και ευκολία. Αυτό έγινε με την βοήθεια ενεργής τοποθεσίας κέρσora καθόλη τη διάρκεια επιλογής σημείων εντός του παραθύρου και των ορίων X, Y των αξόνων.



Εικόνα 4.11: Ενεργή τοποθεσία κέρσορα

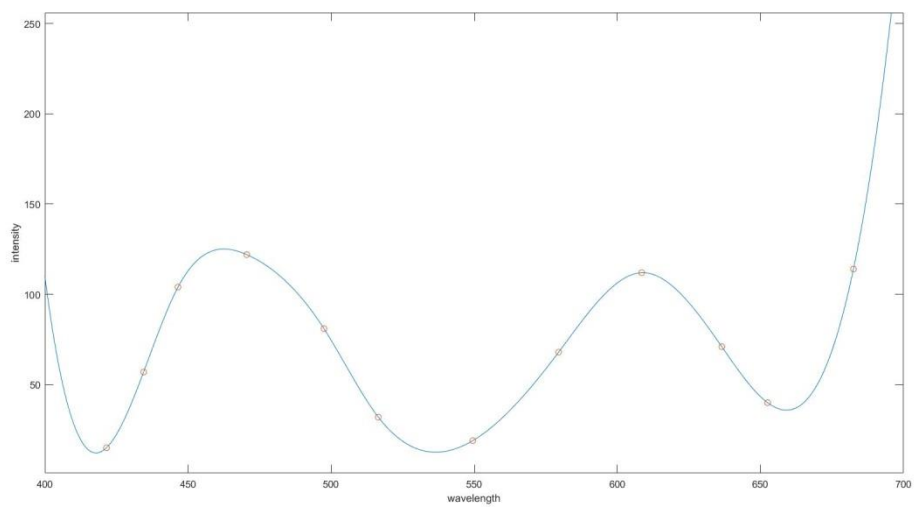


Εικόνα 4.12: Φασματική καμπύλη



Εικόνα 4.13: Τελική εικόνα προς DLP

Μετά από αρκετές εκτελέσεις του αρχικού προγράμματος παρατηρήθηκε ότι σε ορισμένες περιπτώσεις ο συνδυασμός των σημείων (Εικόνα 4.14) που έδινε ο χρήστης και της εντολής *Spline* δημιουργούσε ψευδή έντονη φωτεινότητα (Εικόνα 4.15).



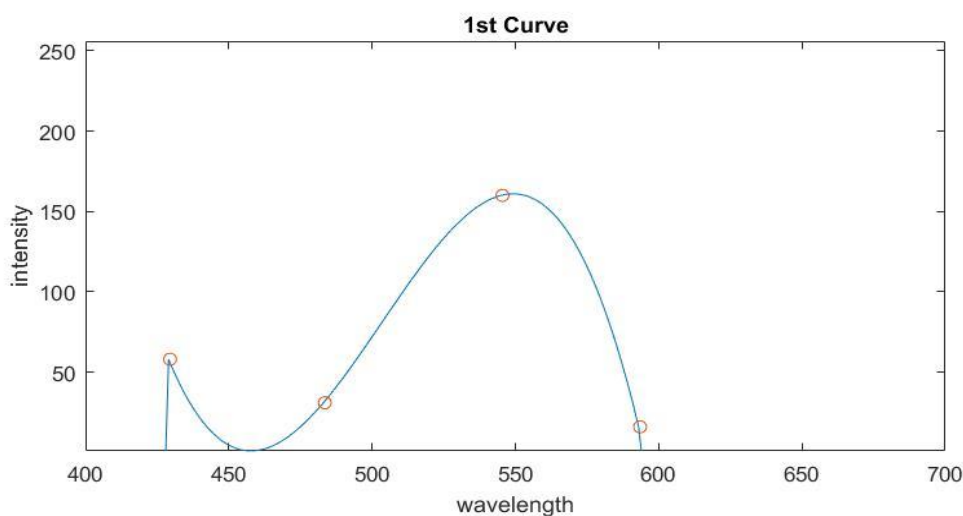
Εικόνα 4.14: Καμπύλη με ψευδή ένταση στο άκρο



Εικόνα 4.15: Φάσμα με ψευδή ένταση στο άκρο

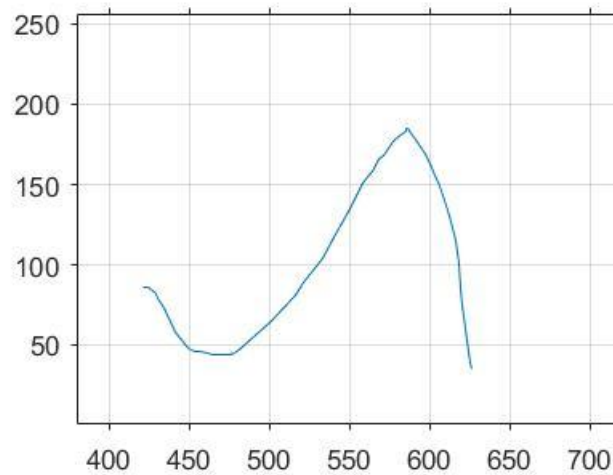
Παρατηρείται στην Εικόνα 4.14 ότι ο χρήστης έχει δώσει 12 σημεία προς δημιουργία φασματικής καμπύλης. Το τελευταίο σημείο δεξιά στα 675 nm περίπου το έχει υποδείξει με χαμηλή ένταση. Στο επόμενο στάδιο που εκτελείται η εντολή *Spline* μας δίνει κυματομορφή που εκτοξεύει την φωτεινότητα δεξιά. Κάτι που στην Εικόνα 4.15 είναι φανερό παρατηρώντας το πολύ έντονο λευκό χρώμα στο δεξί άκρο της ασπρόμαυρης εικόνας.

Το συγκεκριμένο πρόβλημα αντιμετωπίστηκε με αλγόριθμο ειδικά διαμορφωμένο που λαμβάνει υπόψη τέτοιες ακραίες καταστάσεις. Εν ολίγοις θέτουμε σαν όρια τα ακραία σημεία που έχει δώσει ο χρήστης και έξω από αυτά τις εντάσεις τις τείνουμε στο 0. Στην Εικόνα 4.16 φαίνεται ένα παρόμοιο παράδειγμα στην βέλτιστη μορφή του.

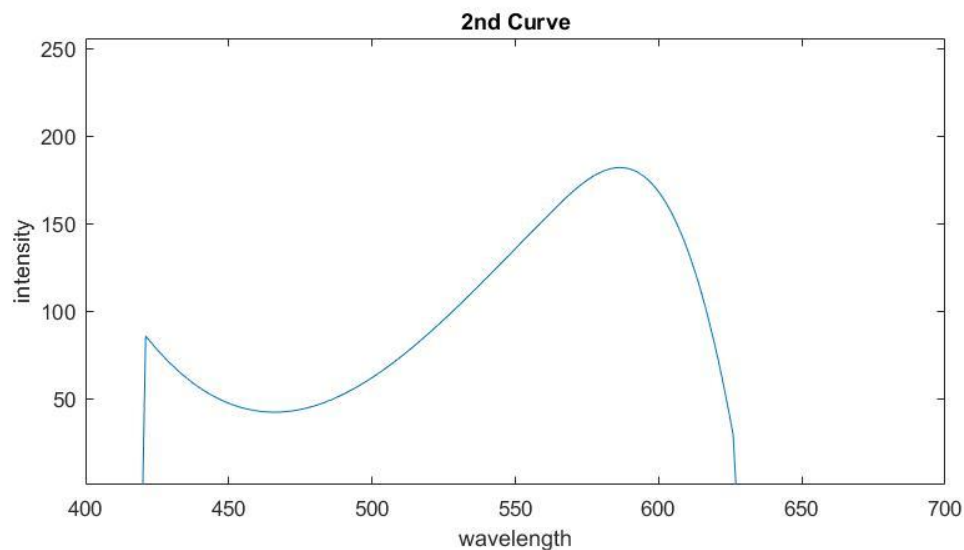


Εικόνα 4.16: Βέλτιστη μορφή φάσματος

Τέλος, με προσθήκη κώδικα δόθηκε η επιπλέον επιλογή στον χρήστη να μπορεί να σχεδιάζει μόνος του την φασματική καμπύλη με την μέθοδο της ζωγραφικής. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.17, με την μέθοδο αυτή η καμπύλη είναι αρκετά τραχιά στην επιφάνεια της. Έτσι εφαρμόστηκε πάνω της αλγόριθμος εξομάλυνσης για μια πιο ομοιόμορφη αναπαράσταση του φάσματος (Εικόνα 4.18).



Εικόνα 4.17: Ζωγραφισμένη καμπύλη



Εικόνα 4.18: Εξομαλυμένη καμπύλη

5

Αποτελέσματα πειραματικής διαδικασίας

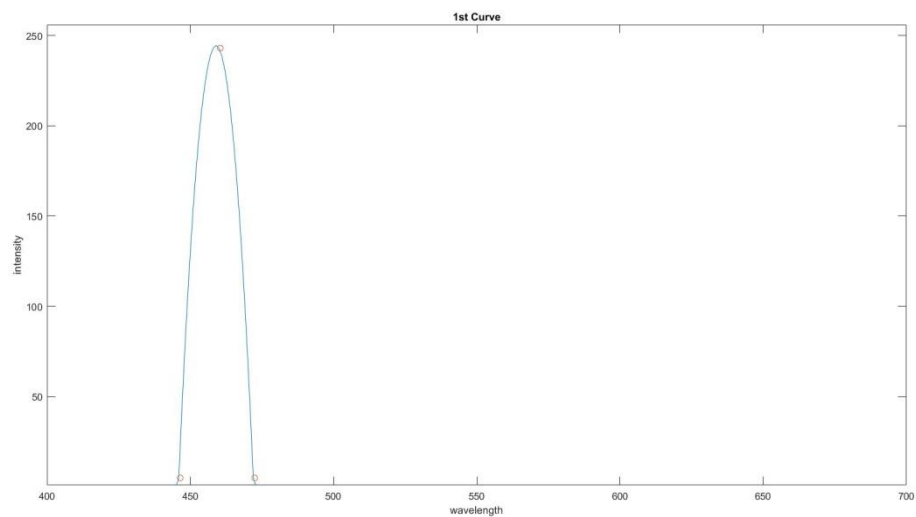
Στο παρόν κεφάλαιο θα παρατεθούν οι μετρήσεις που λάβαμε κατά την λειτουργία ολόκληρου του συστήματος όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1. Θα ληφθούν μετρήσεις μέσω του φασματόμετρου εν ώρα λειτουργίας της συσκευής με σκοπό να ελέγξουμε την ακρίβεια και γενικά τις δυνατότητες του μοντέλου αυτού. Η πειραματική διαδικασία ξεκίνησε λαμβάνοντας μετρήσεις από την αναπαραγωγή συγκεκριμένων φασμάτων εξόδου της συσκευής, έπειτα έγινε αναπαραγωγή του φάσματος του δέρματος, της χλωροφύλλης και τέλος η δημιουργία ενός ζεύγους μεταμερικών χρωμάτων. Τα παραπάνω πειράματα ήταν σημαντικά για την αξιολόγηση της πηγής από άποψη ποιότητας και σταθερότητας.

5.1 Τεστ αναπαραγωγής φάσματος εξόδου

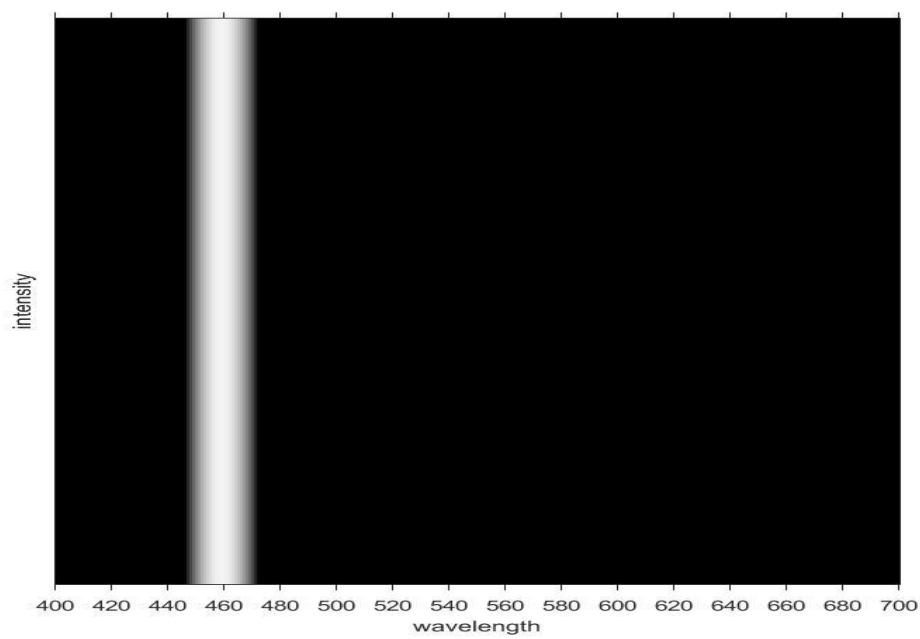
Σε αυτό το πείραμα επιλέχθηκαν δώδεκα μπάντες φάσματος προς αναπαραγωγή, με το εύρος τους να κυμαίνεται από τα 460 nm έως και τα 690-700 nm. Ο χρήστης επιλέγει μέσω του Matlab μια στενή περιοχή τοποθετώντας τρία σημεία εντός του δοθέντος φάσματος. Στα επόμενα υποκεφάλαια αναπαριστάται λεπτομερώς η διαδικασία.

5.1.1 Φάσμα εξόδου στα 460 nm

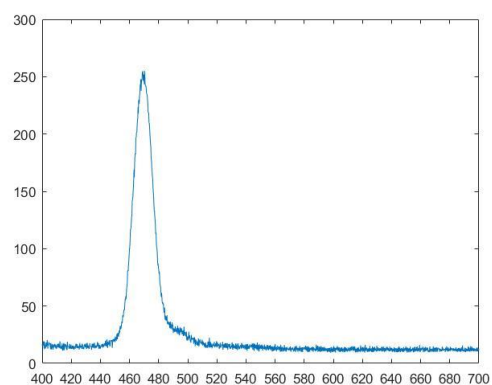
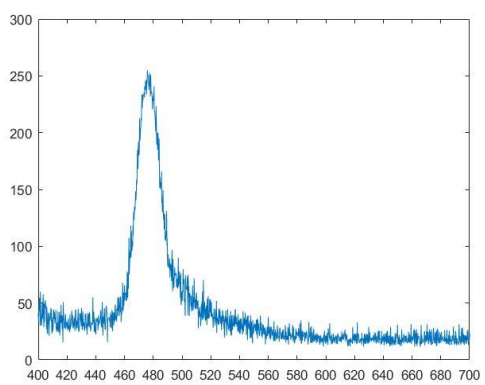
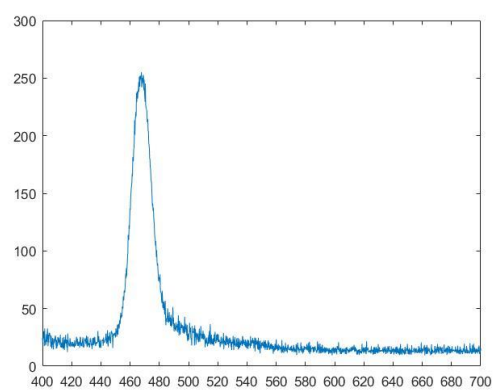
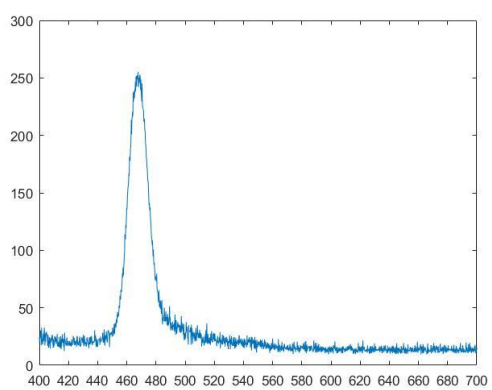
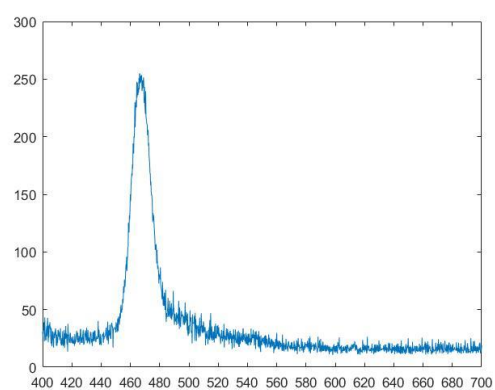
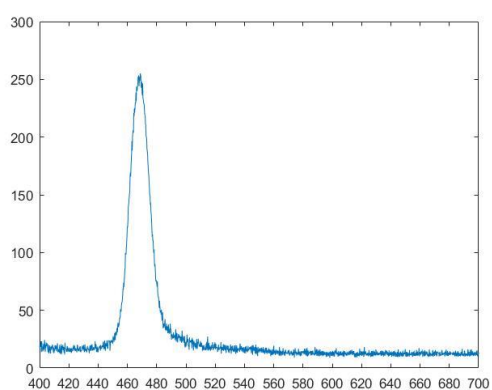
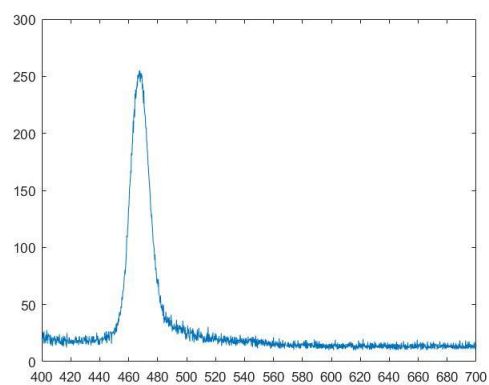
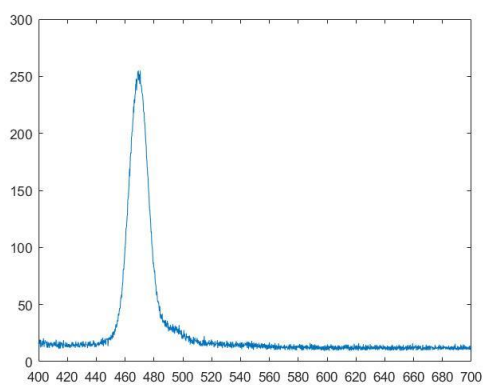
Η ζητούμενη φασματική καμπύλη και η ασπρόμαυρη εικόνα μου παράγει το Matlab και στέλνεται στο DLP φαίνεται στις εικόνες Εικόνα 5.1 και Εικόνα 5.2 αντίστοιχα. Έπειτα ακολουθούν οι πειραματικές μετρήσεις που διεξήχθησαν για το συγκεκριμένο φάσμα.

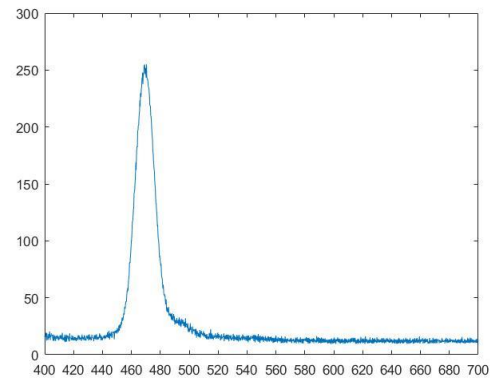
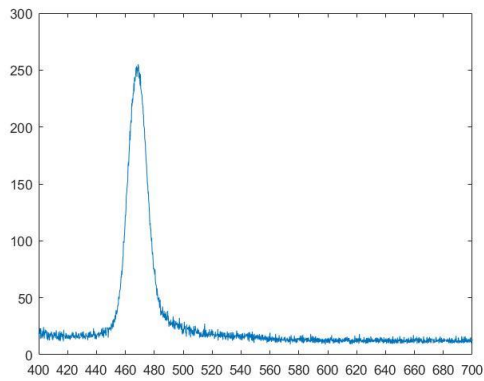


Εικόνα 5.1: Φασματική καμπύλη 460nm



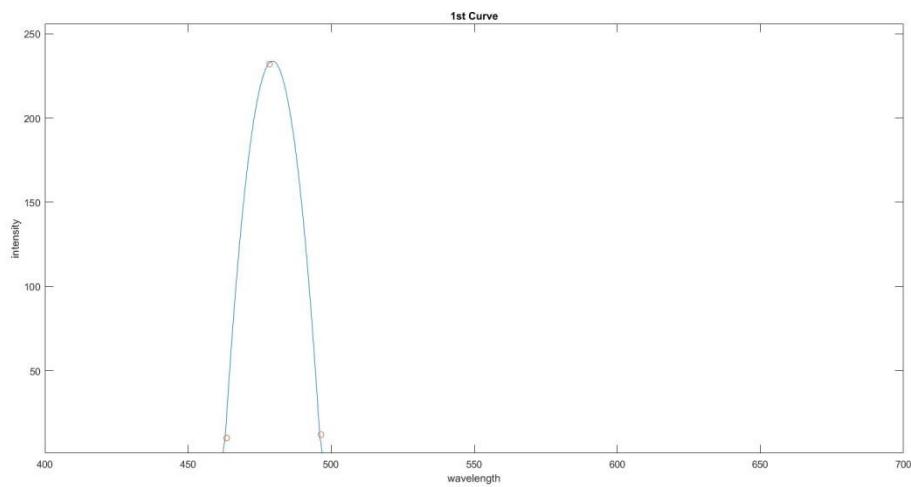
Εικόνα 5.2: Παραγόμενη εικόνα



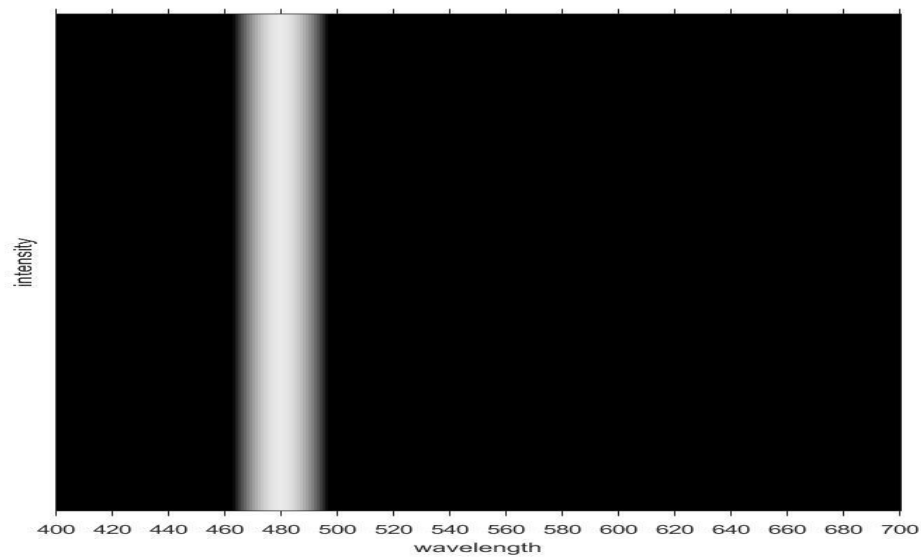


5.1.2 Φάσμα εξόδου στα 480 nm

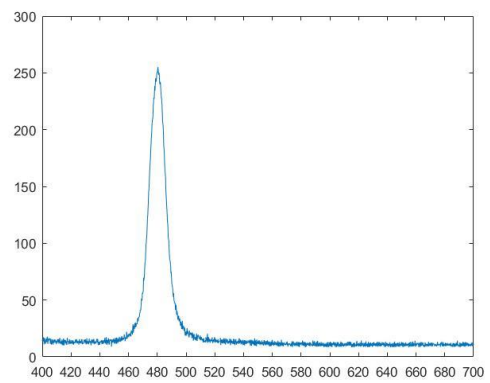
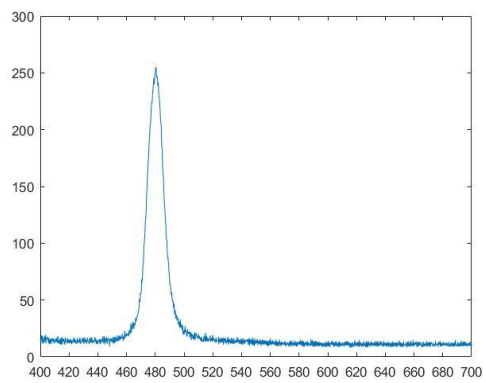
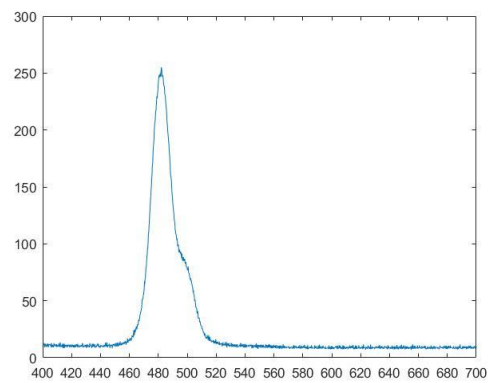
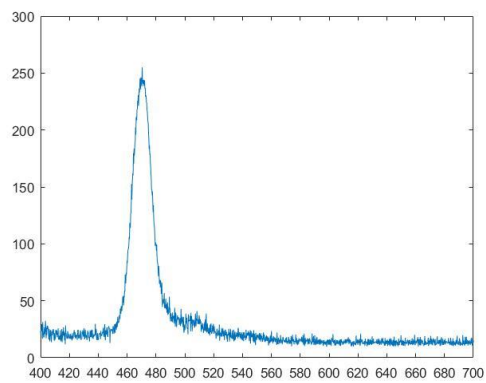
Η ζητούμενη φασματική καμπύλη και η ασπρόμαυρη εικόνα που παράγει το Matlab και στέλνεται στο DLP φαίνεται στις εικόνες Εικόνα 5.3 και Εικόνα 5.4 αντίστοιχα. Έπειτα ακολουθούν οι πειραματικές μετρήσεις που διεξήχθησαν για το συγκεκριμένο φάσμα.

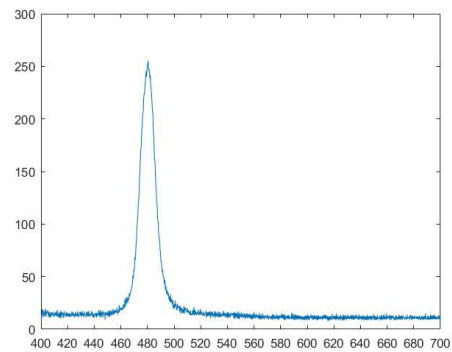
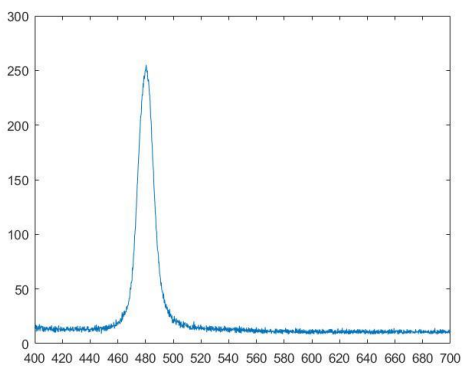
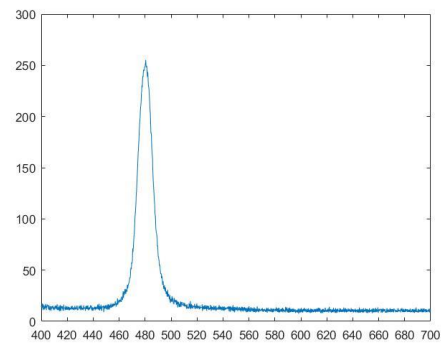
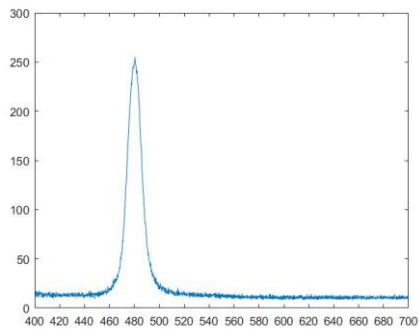
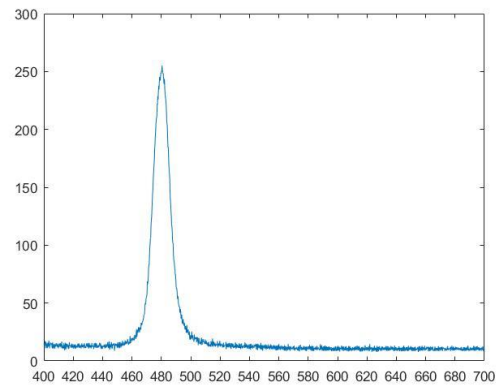
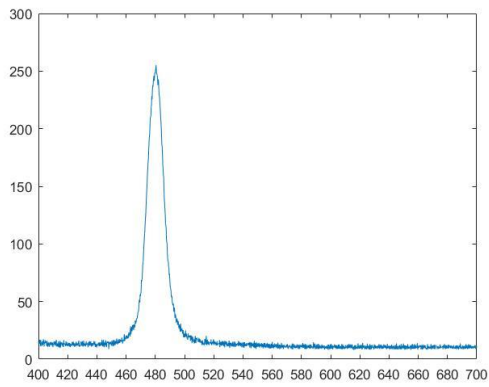


Εικόνα 5.3: Φασματική καμπύλη 480 nm



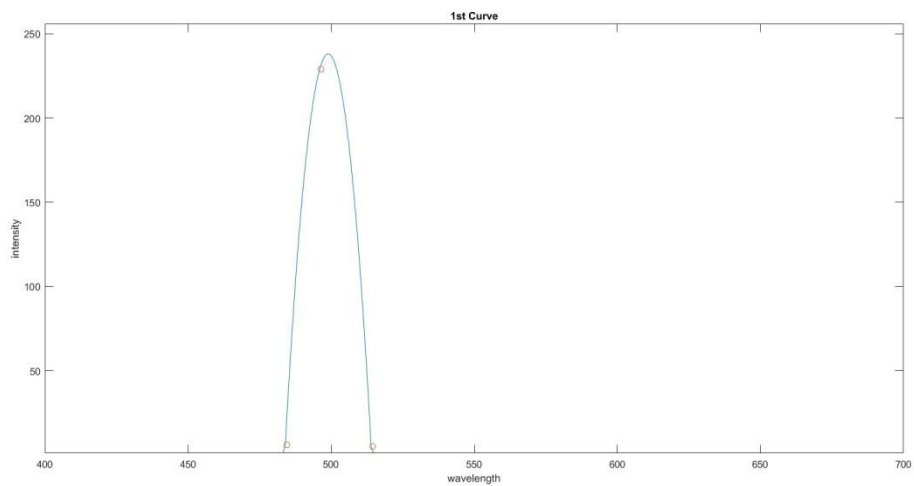
Εικόνα 5.4: Παραγόμενη εικόνα



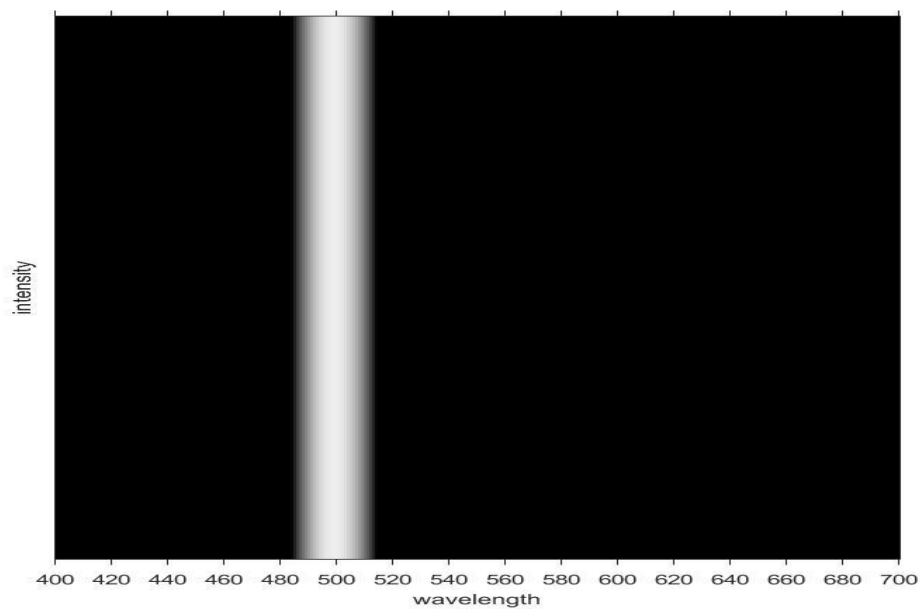


5.1.3 Φάσμα εξόδου στα 500 nm

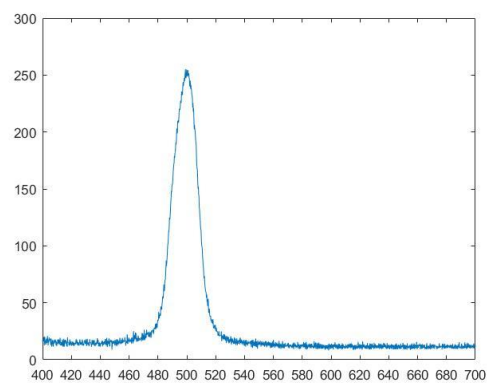
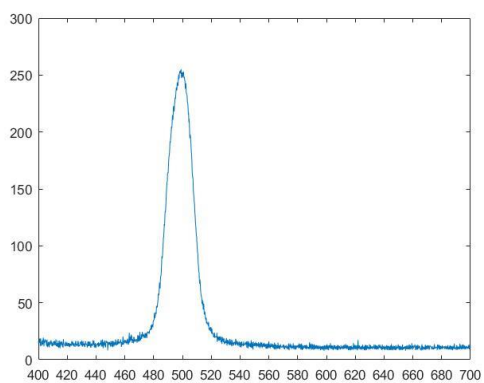
Η ζητούμενη φασματική καμπύλη και η ασπρόμαυρη εικόνα που παράγει το Matlab και στέλνεται στο DLP φαίνεται στις εικόνες Εικόνα 5.5 και Εικόνα 5.6 αντίστοιχα. Έπειτα ακολουθούν οι πειραματικές μετρήσεις που διεξήχθησαν για το συγκεκριμένο φάσμα.

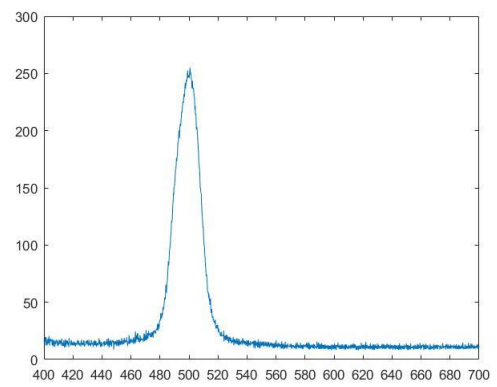
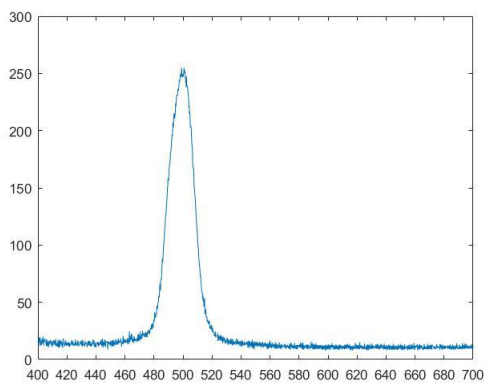
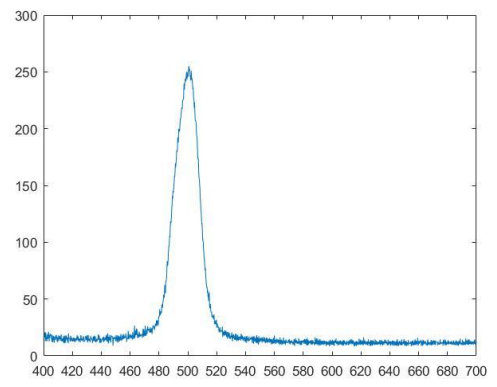
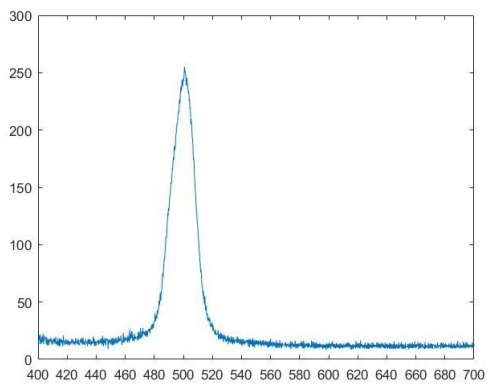
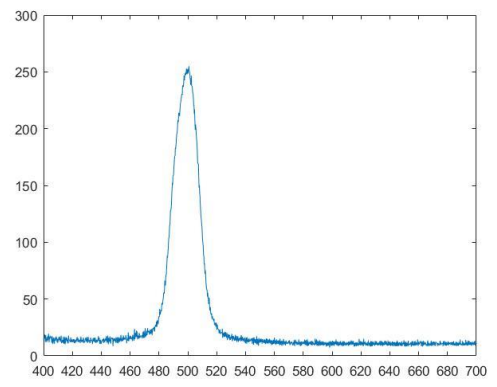
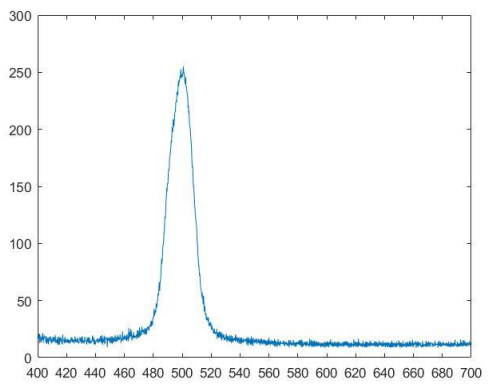
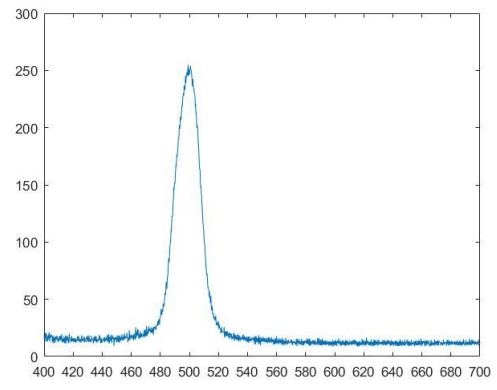
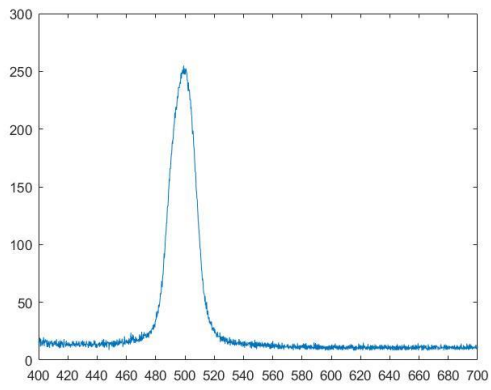


Εικόνα 5.5: Φασματική καμπύλη 500 nm



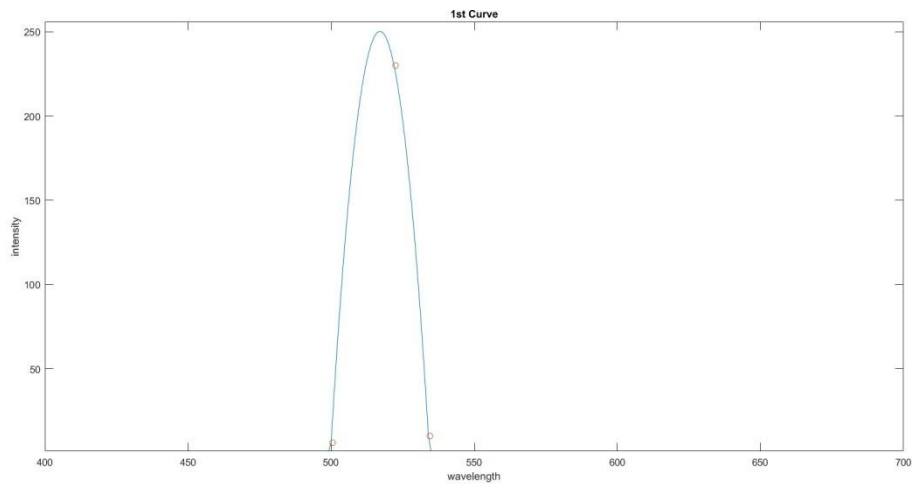
Εικόνα 5.6: Παραγόμενη εικόνα



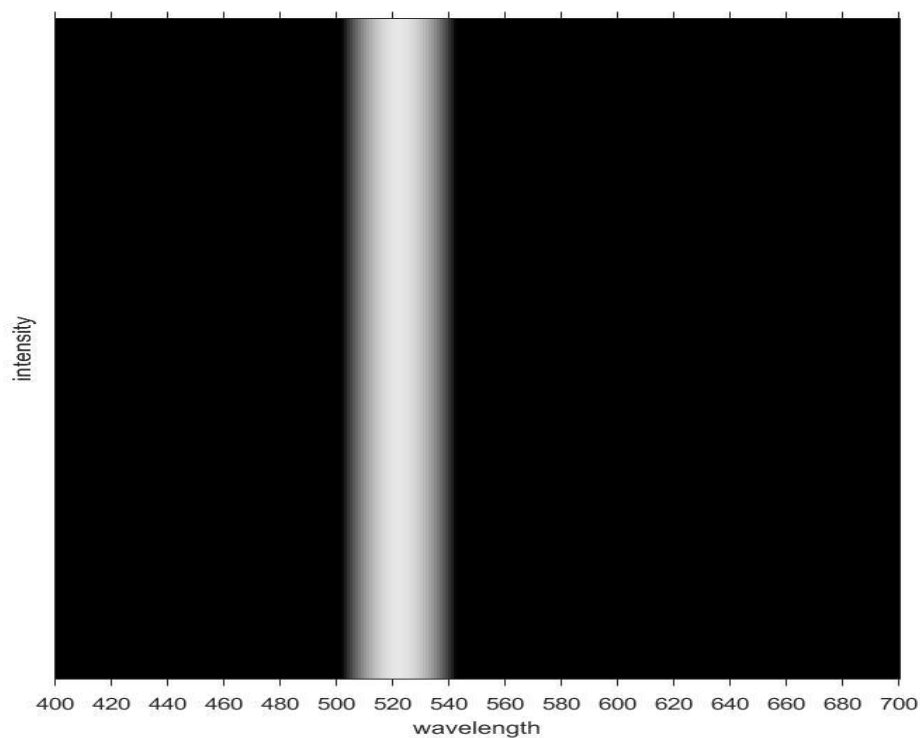


5.1.4 Φάσμα εξόδου στα 520 nm

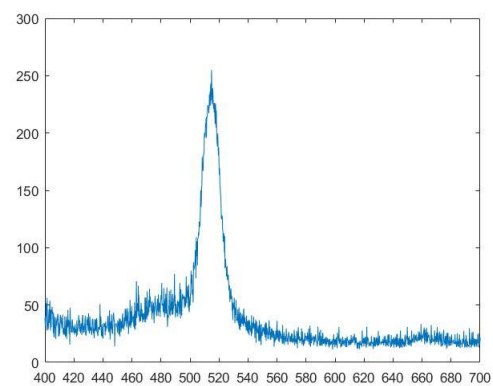
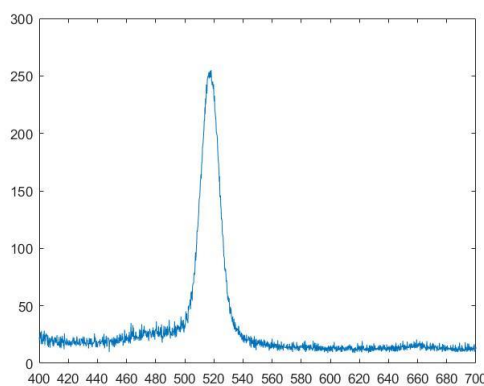
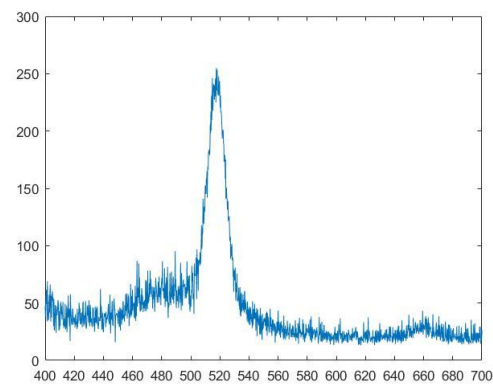
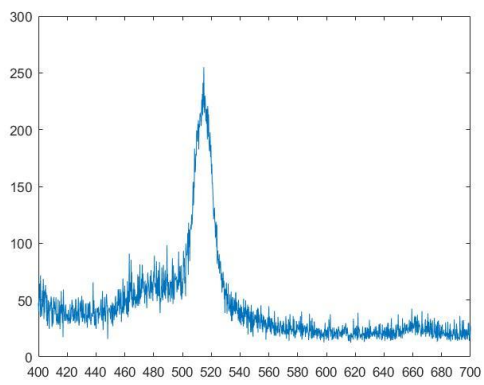
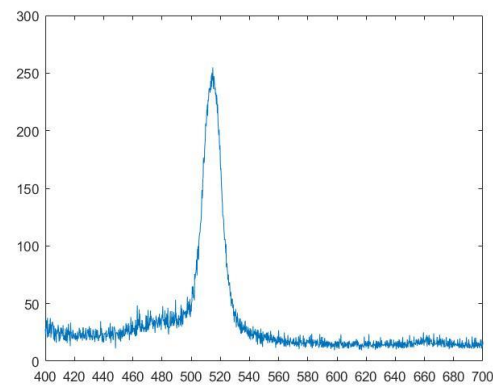
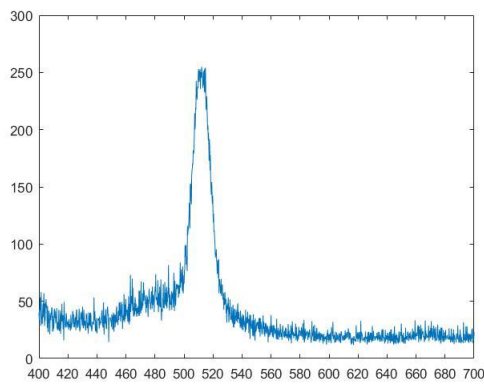
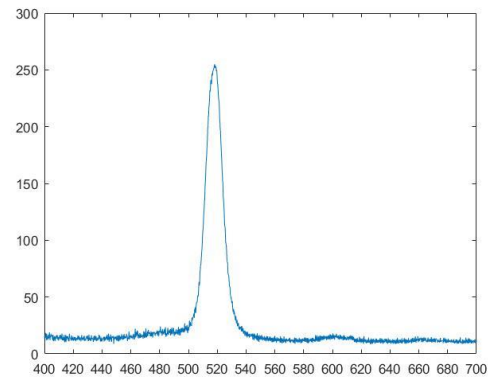
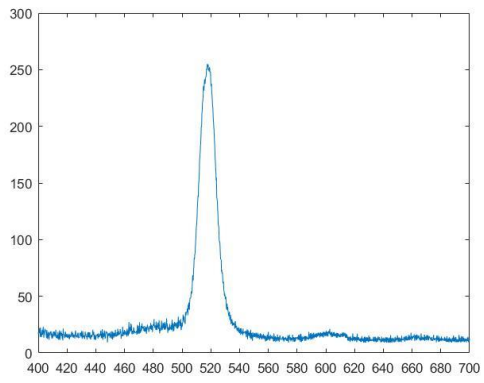
Η ζητούμενη φασματική καμπύλη και η ασπρόμαυρη εικόνα που παράγει το Matlab και στέλνεται στο DLP φαίνεται στις εικόνες Εικόνα 5.7 και Εικόνα 5.8 αντίστοιχα. Έπειτα ακολουθούν οι πειραματικές μετρήσεις που διεξήχθησαν για το συγκεκριμένο φάσμα.

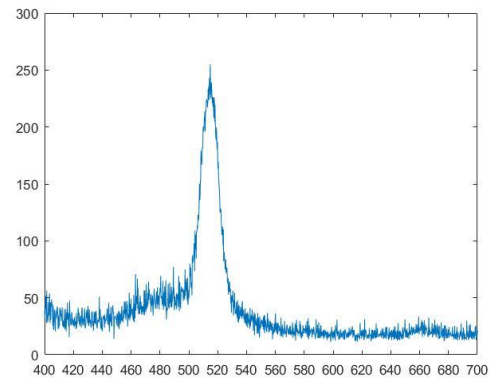
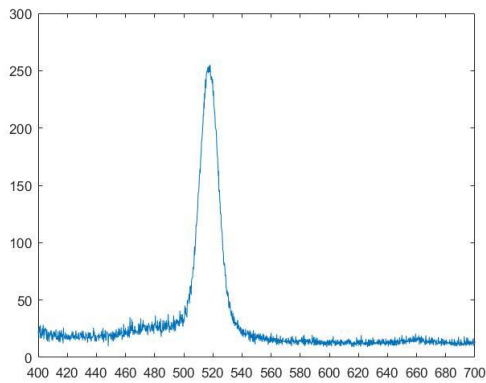


Εικόνα 5.7: Φασματική καμπύλη 520 nm



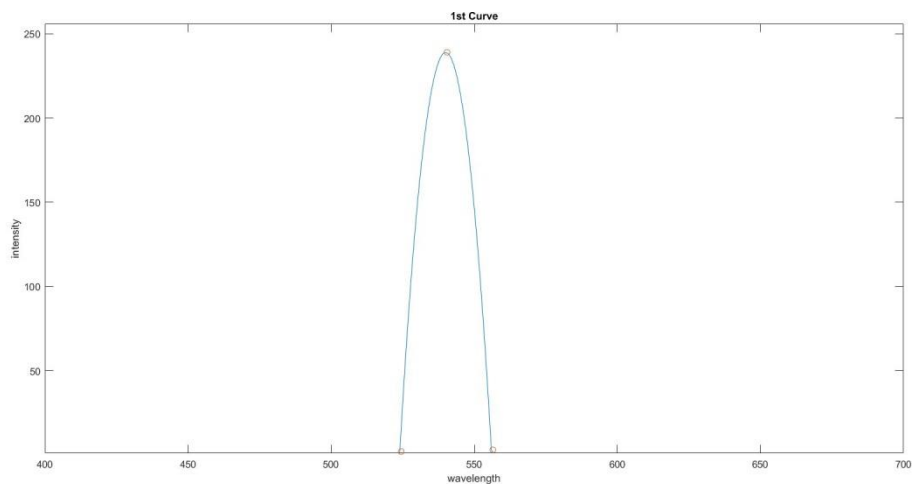
Εικόνα 5.8: Παραγόμενη εικόνα



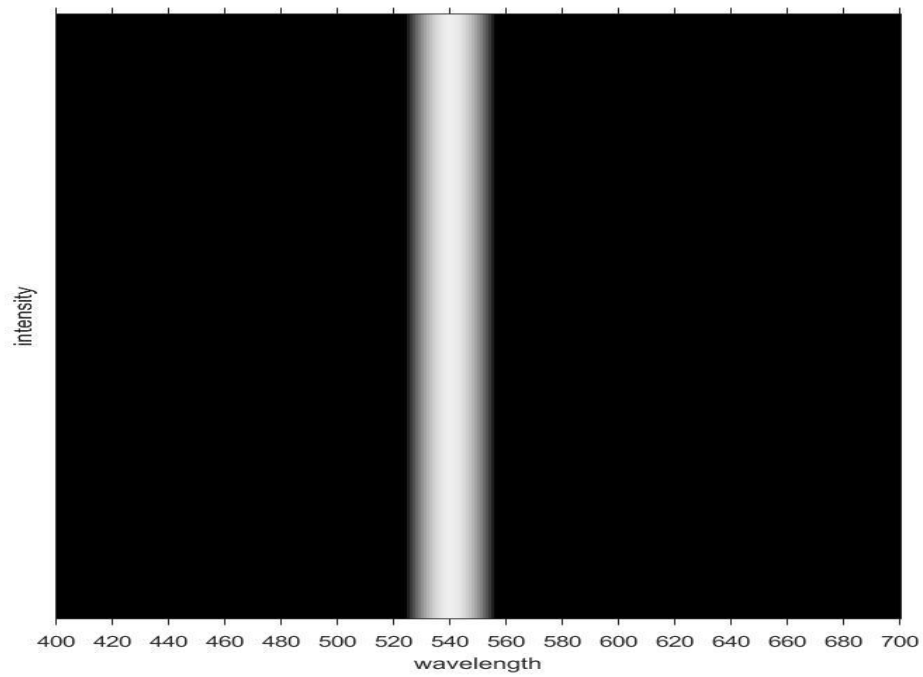


5.1.5 Φάσμα εξόδου στα 540 nm

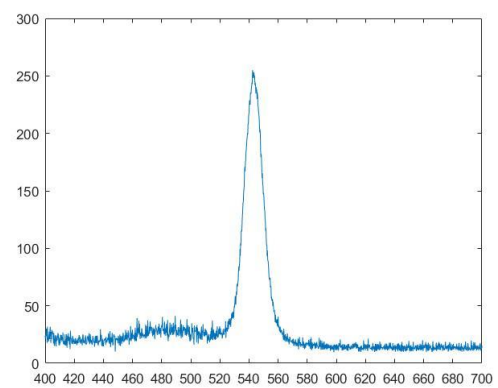
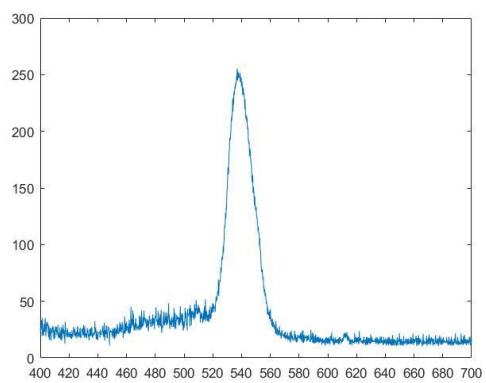
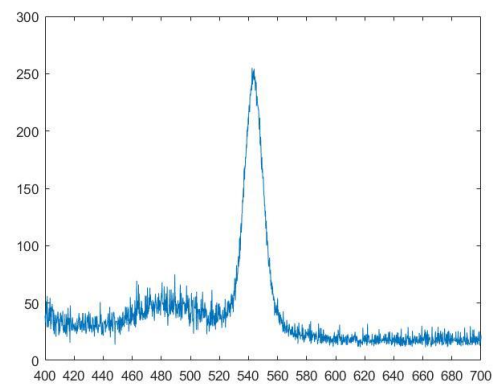
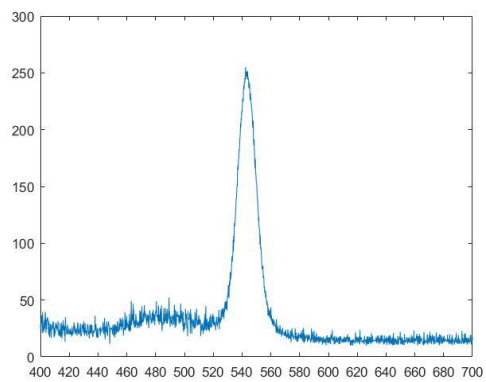
Η ζητούμενη φασματική καμπύλη και η ασπρόμαυρη εικόνα που παράγει το Matlab και στέλνεται στο DLP φαίνεται στις εικόνες Εικόνα 5.9 και Εικόνα 5.10 αντίστοιχα. Έπειτα ακολουθούν οι πειραματικές μετρήσεις που διεξήχθησαν για το συγκεκριμένο φάσμα.

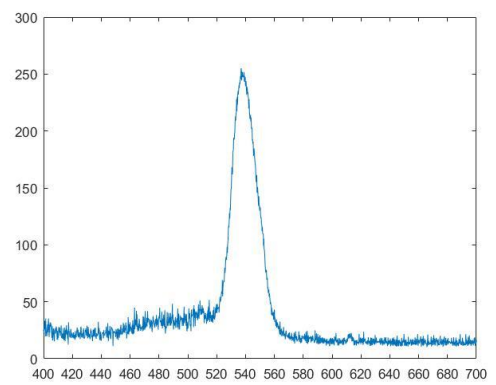
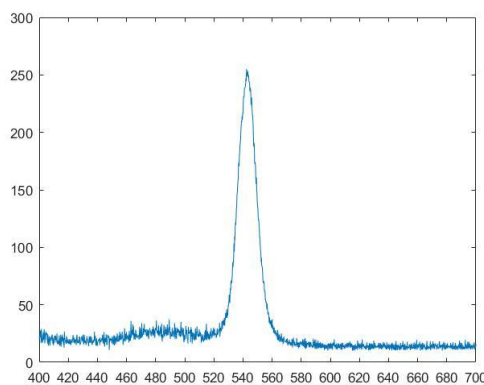
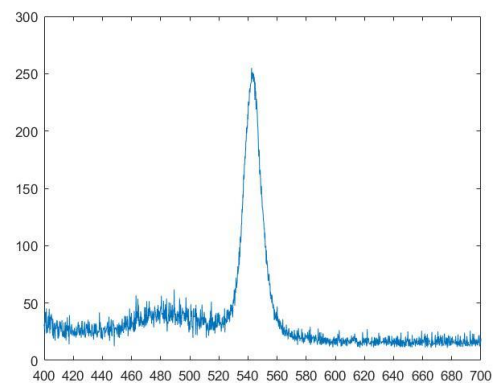
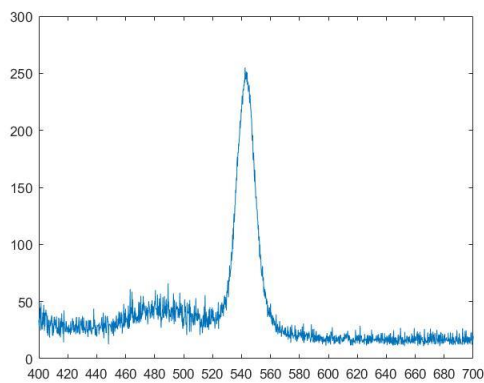
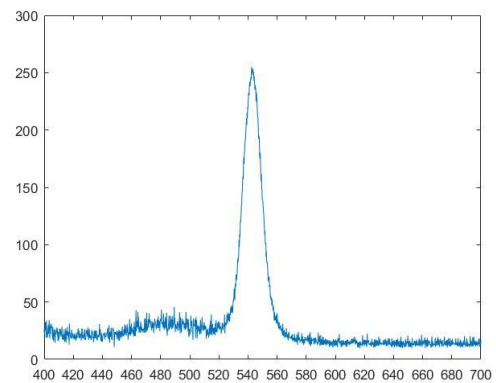
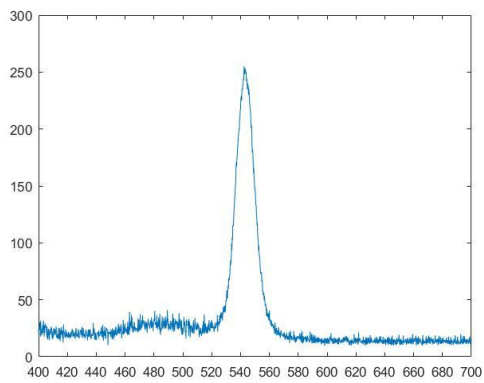


Εικόνα 5.9: Φασματική καμπύλη 540 nm



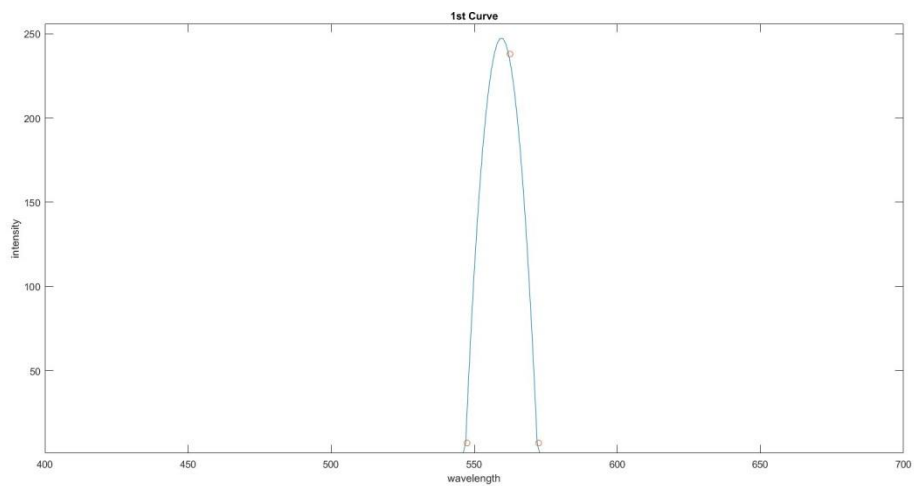
Εικόνα 5.10: Παραγόμενη εικόνα



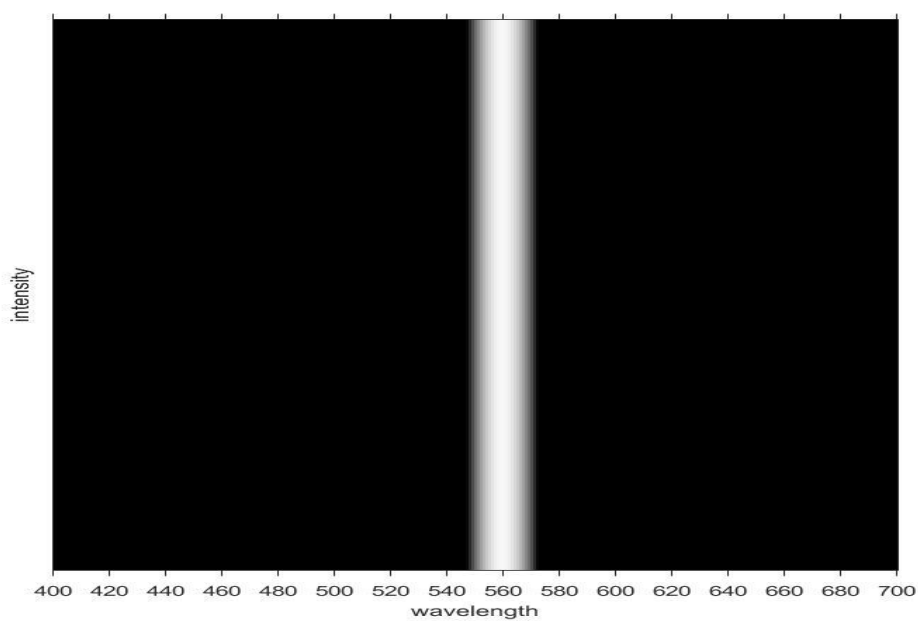


5.1.6 Φάσμα εξόδου στα 560 nm

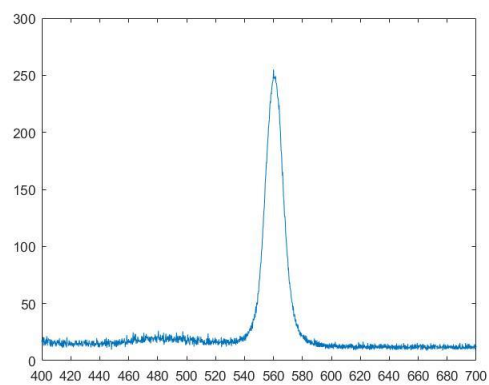
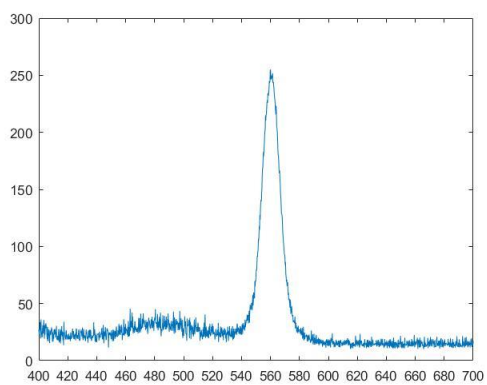
Η ζητούμενη φασματική καμπύλη και η ασπρόμαυρη εικόνα που παράγει το Matlab και στέλνεται στο DLP φαίνεται στις εικόνες Εικόνα 5.11 και Εικόνα 5.12 αντίστοιχα. Έπειτα ακολουθούν οι πειραματικές μετρήσεις που διεξήχθησαν για το συγκεκριμένο φάσμα.

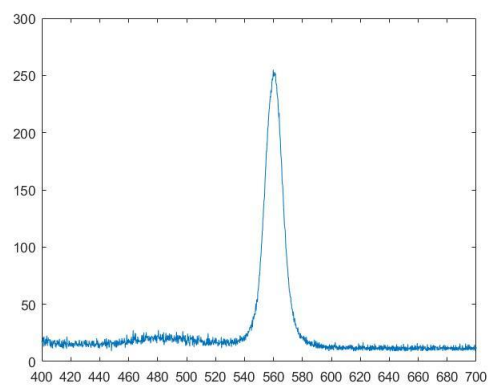
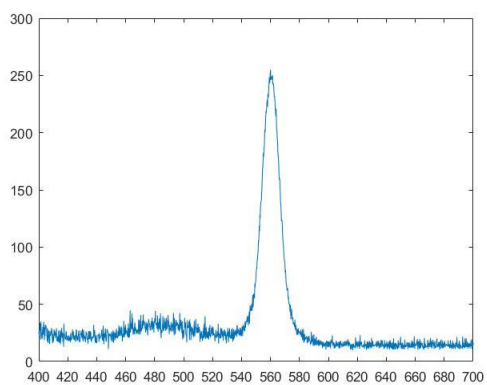
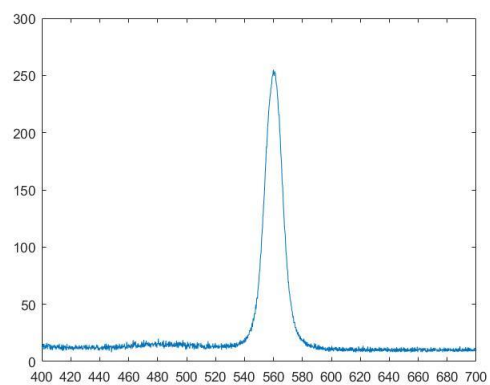
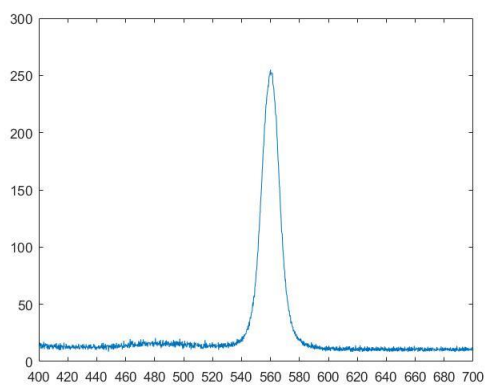
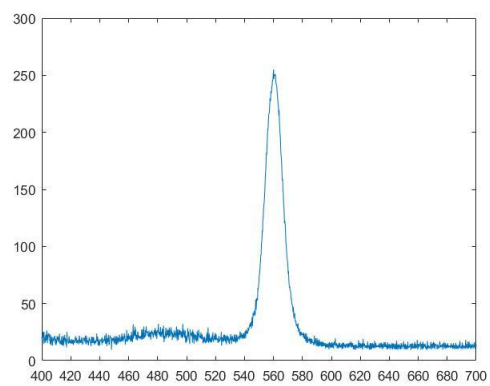
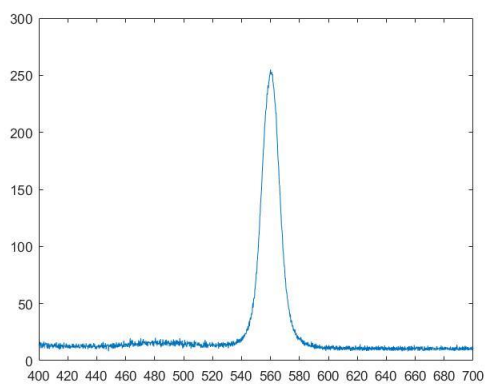
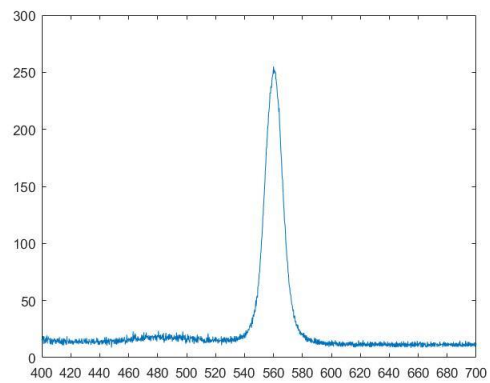
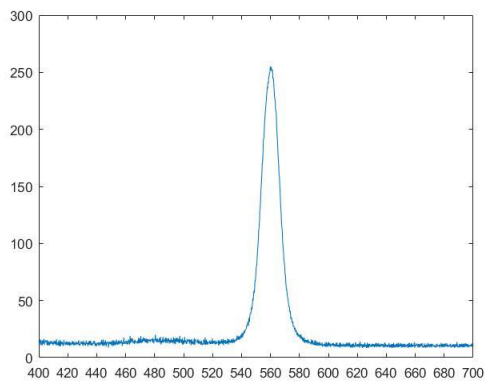


Εικόνα 5.11: Φασματική καμπύλη 560 nm



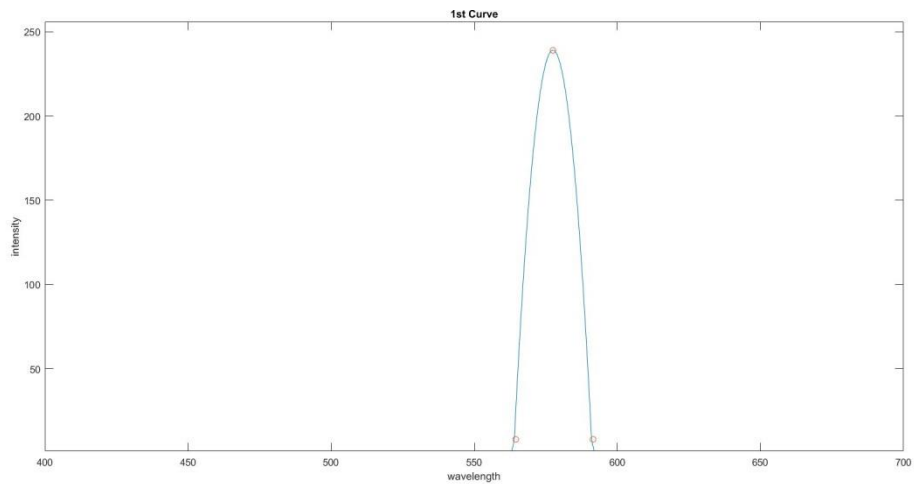
Εικόνα 5.12: Παραγόμενη εικόνα



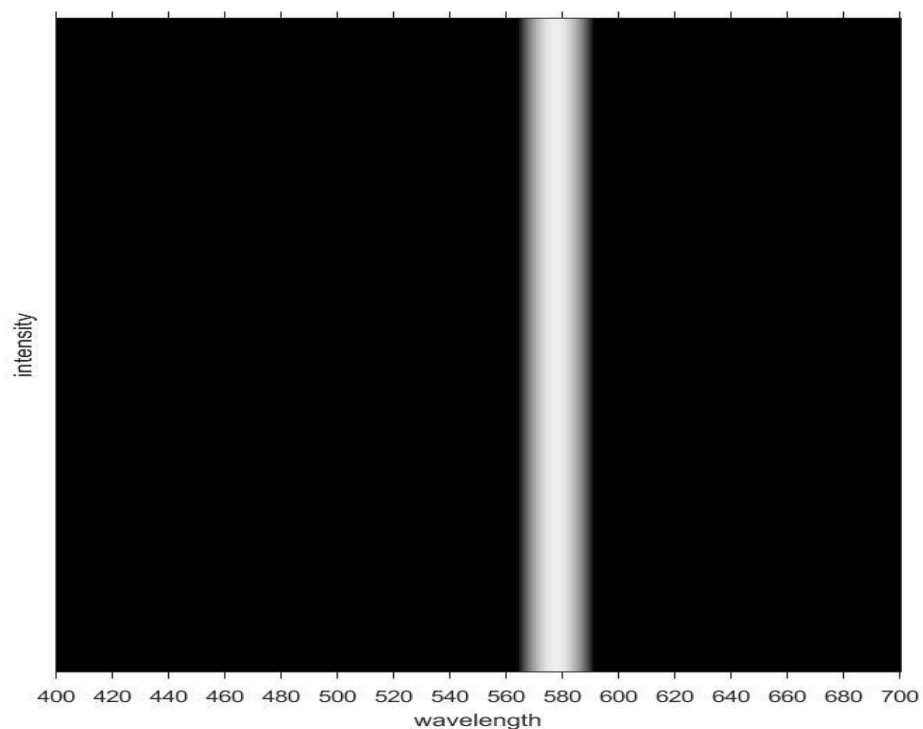


5.1.7 Φάσμα εξόδου στα 580 nm

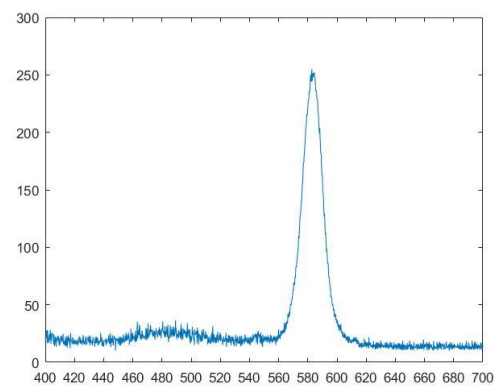
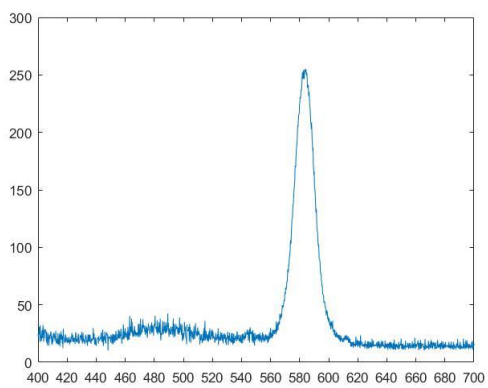
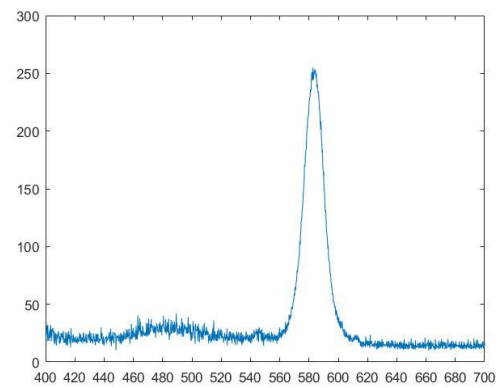
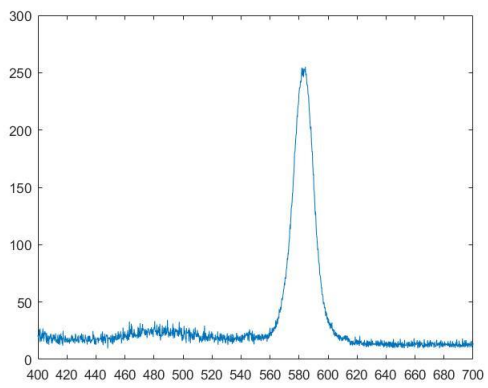
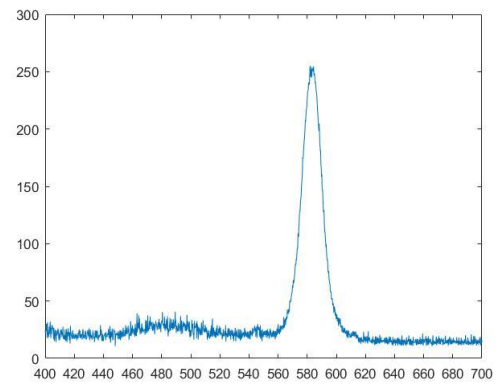
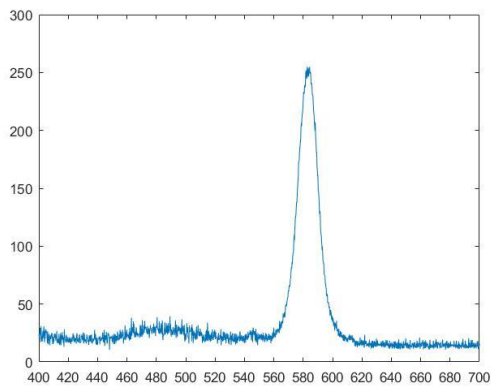
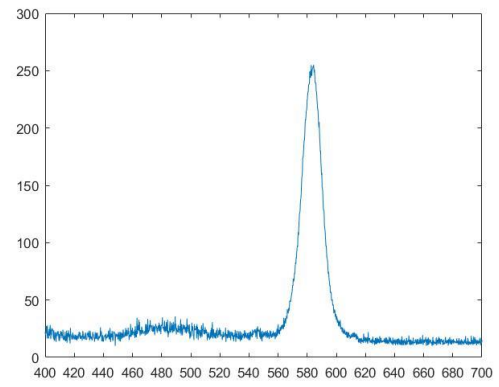
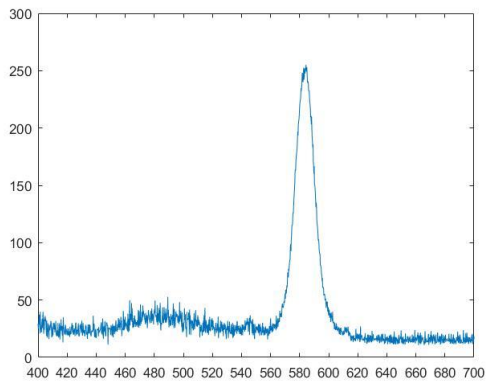
Η ζητούμενη φασματική καμπύλη και η ασπρόμαυρη εικόνα μου παράγει το Matlab και στέλνεται στο DLP φαίνεται στις εικόνες Εικόνα 5.13 και Εικόνα 5.14 αντίστοιχα. Έπειτα ακολουθούν οι πειραματικές μετρήσεις που διεξήχθησαν για το συγκεκριμένο φάσμα.

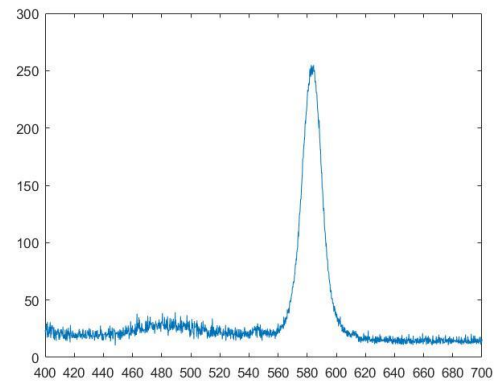
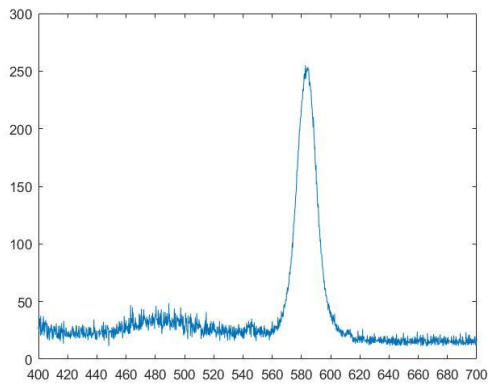


Εικόνα 5.13: Φασματική καμπύλη 580 nm



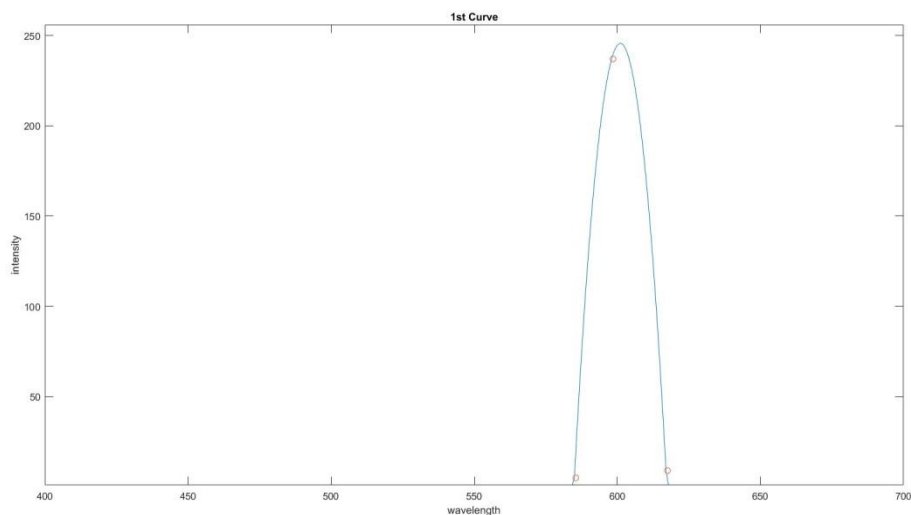
Εικόνα 5.14: Παραγόμενη εικόνα



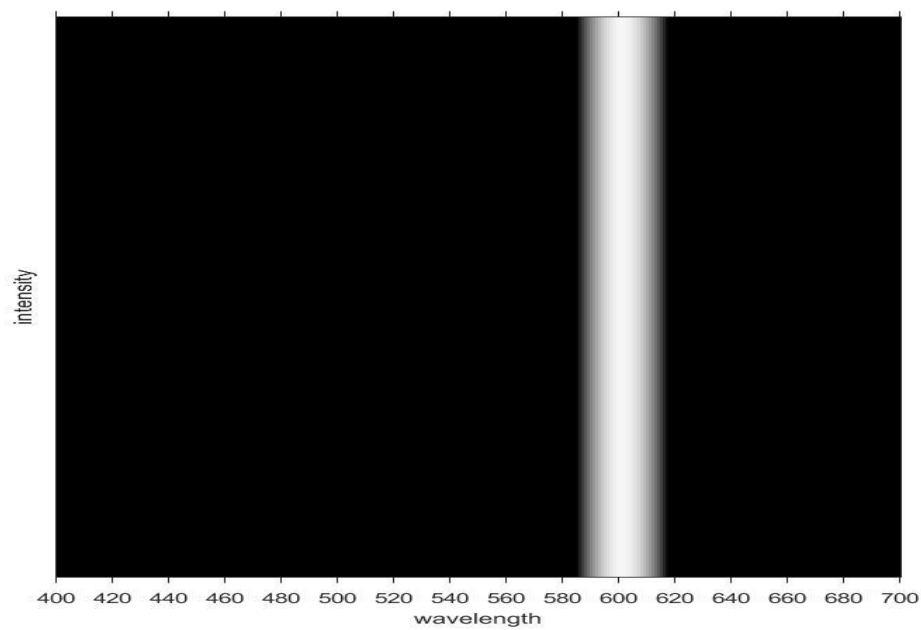


5.1.8 Φάσμα εξόδου στα 600 nm

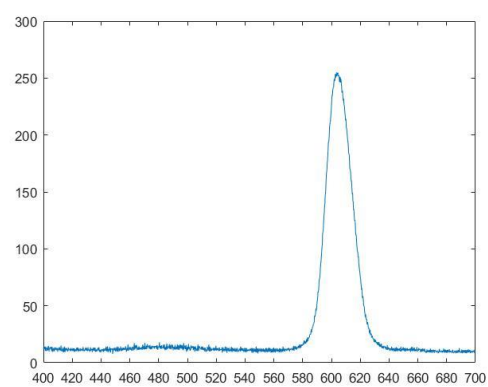
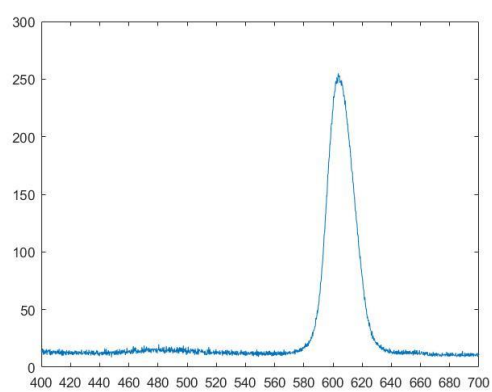
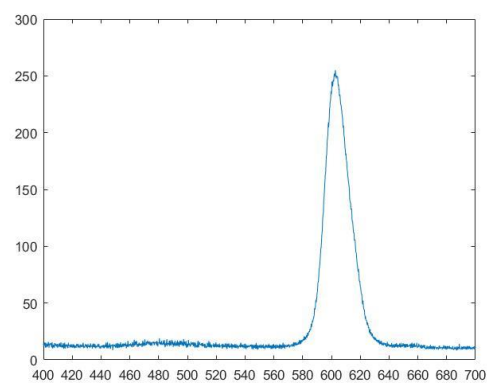
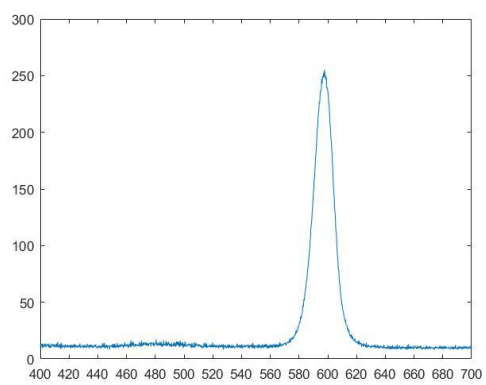
Η ζητούμενη φασματική καμπύλη και η ασπρόμαυρη εικόνα μου παράγει το Matlab και στέλνεται στο DLP φαίνεται στις εικόνες Εικόνα 5.15 και Εικόνα 5.16 αντίστοιχα. Έπειτα ακολουθούν οι πειραματικές μετρήσεις που διεξήχθησαν για το συγκεκριμένο φάσμα.

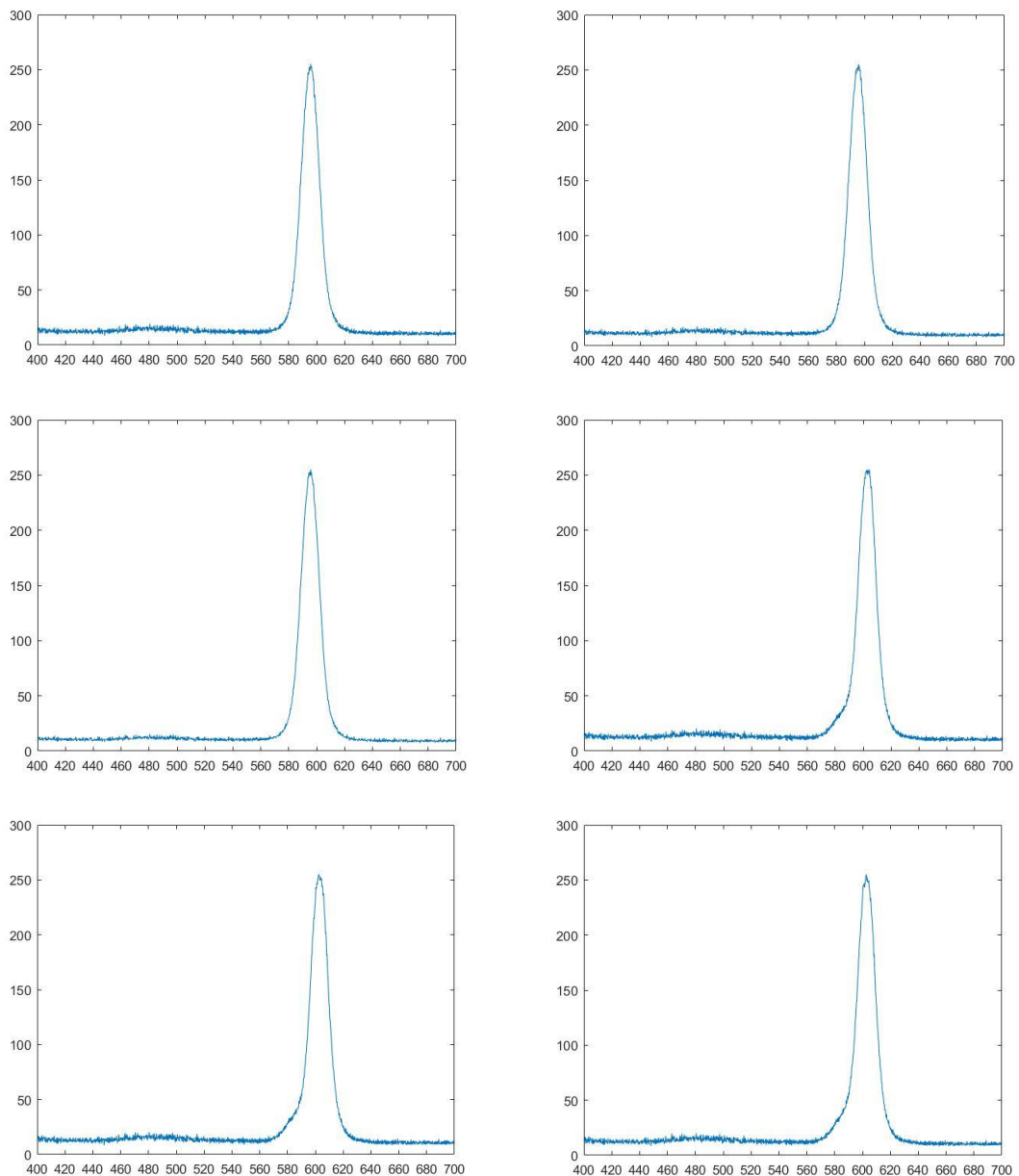


Εικόνα 5.15: Φασματική καμπύλη 600 nm



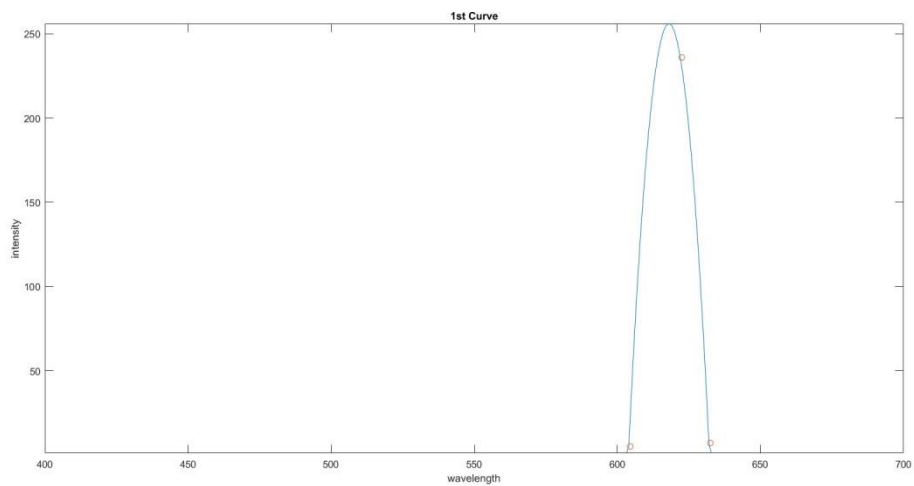
Εικόνα 5.16: Παραγόμενη εικόνα



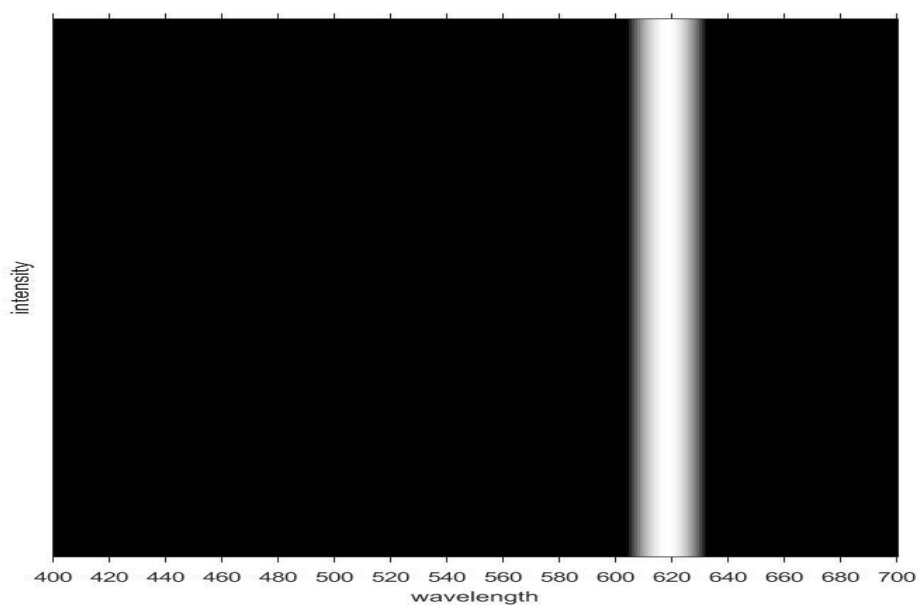


5.1.9 Φάσμα εξόδου στα 620 nm

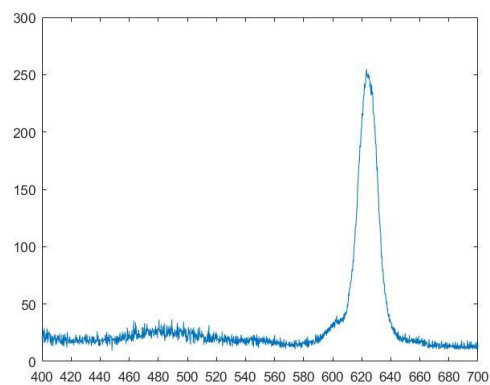
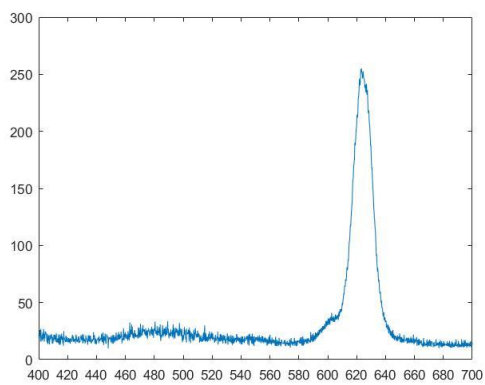
Η ζητούμενη φασματική καμπύλη και η ασπρόμαυρη εικόνα που παράγει το Matlab και στέλνεται στο DLP φαίνεται στις εικόνες Εικόνα 5.17 και Εικόνα 5.18 αντίστοιχα. Έπειτα ακολουθούν οι πειραματικές μετρήσεις που διεξήχθησαν για το συγκεκριμένο φάσμα.

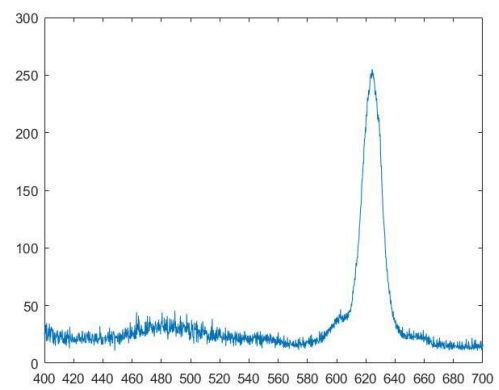
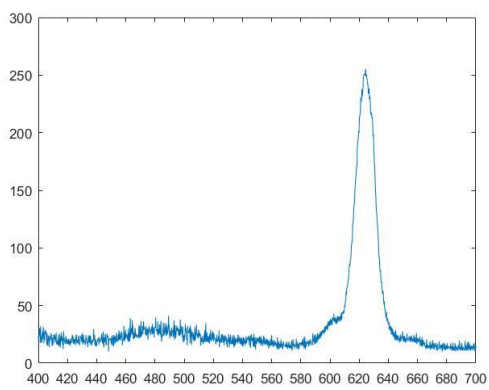
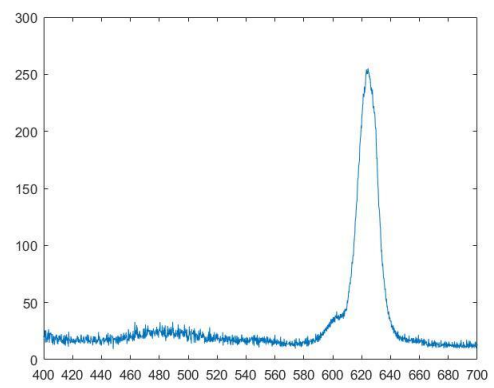
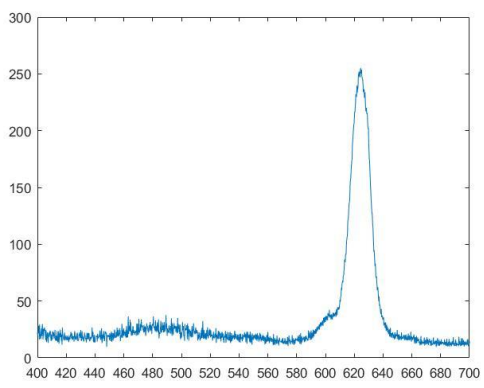
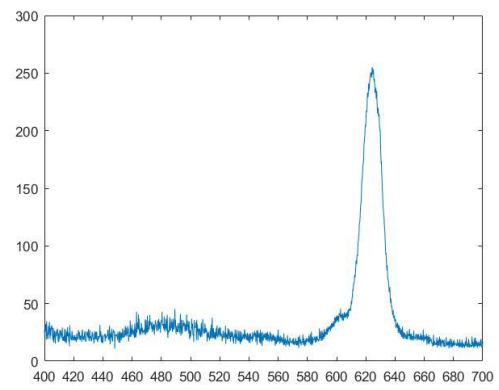
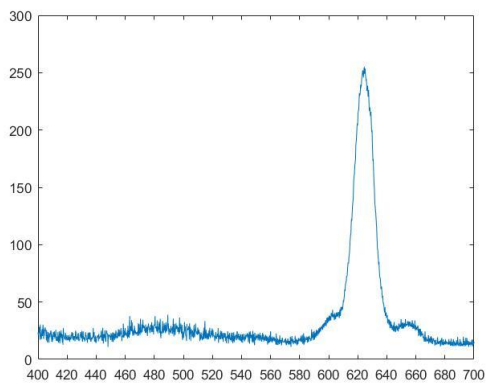
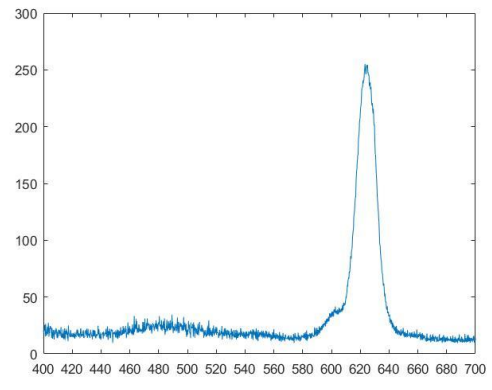
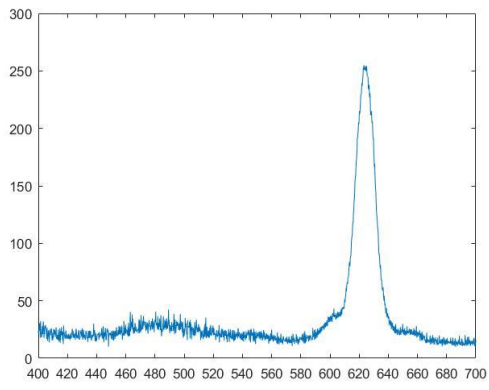


Εικόνα 5.17: Φασματική καμπύλη 620 nm



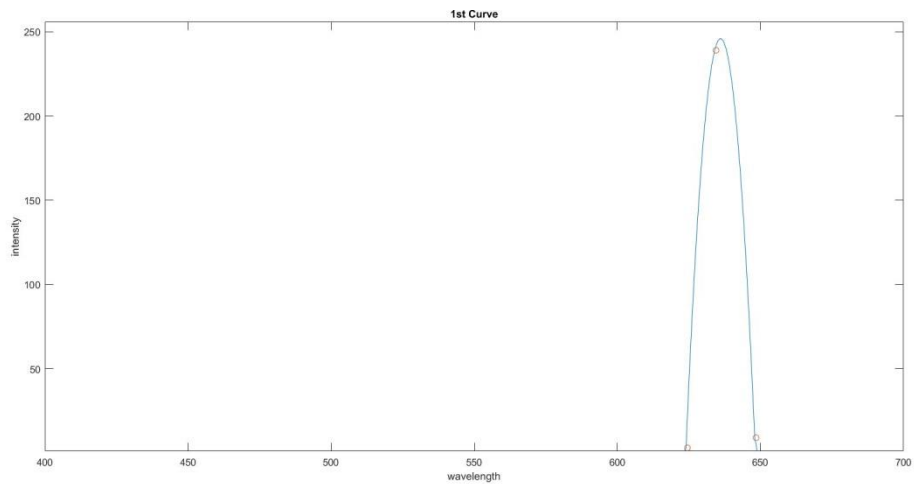
Εικόνα 5.18: Παραγόμενη εικόνα



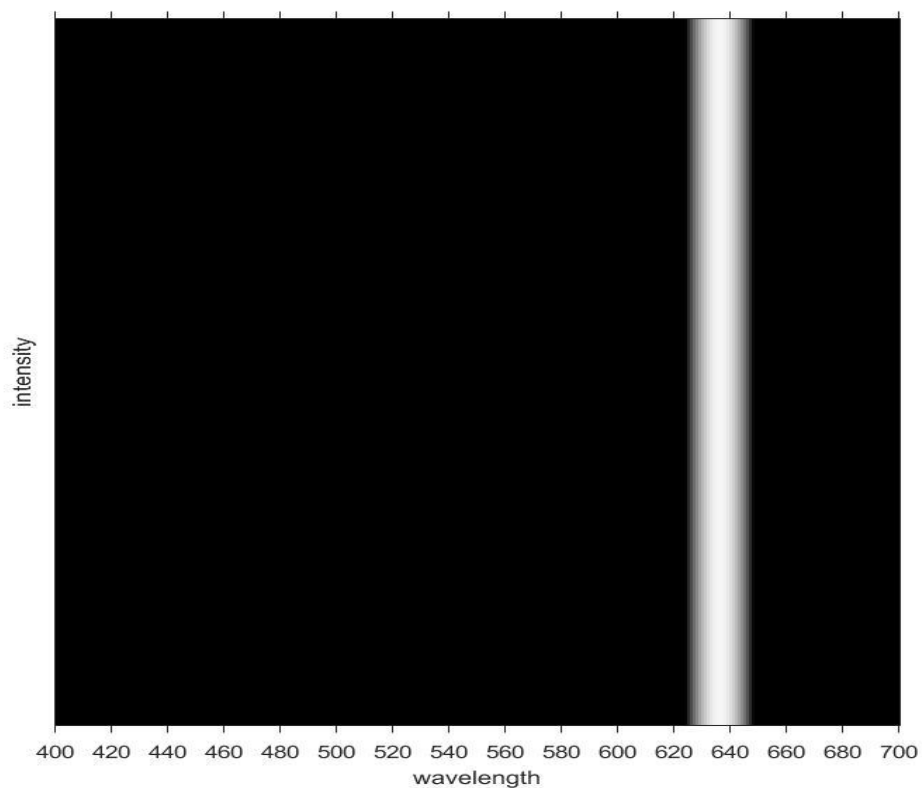


5.1.10 Φάσμα εξόδου στα 640 nm

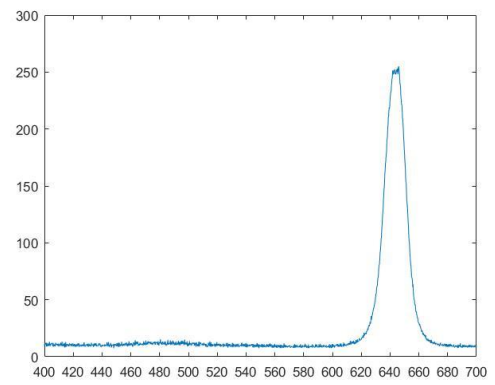
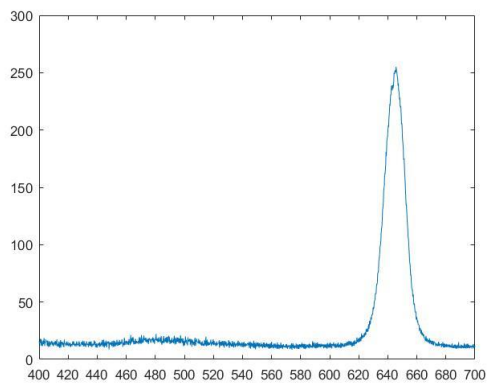
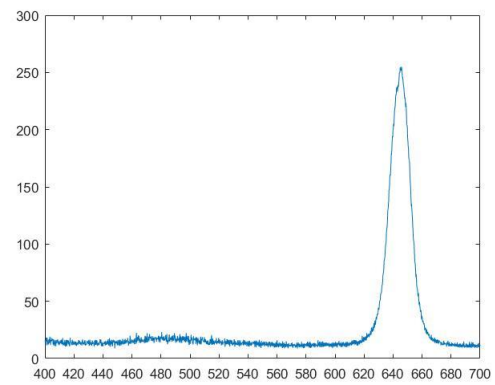
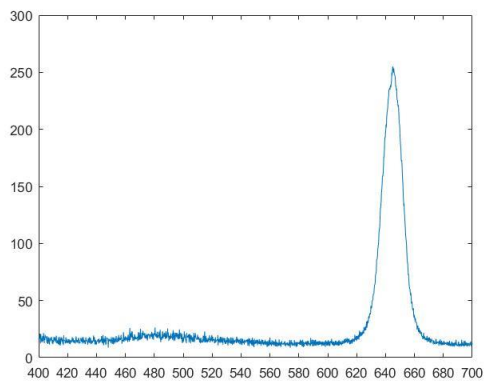
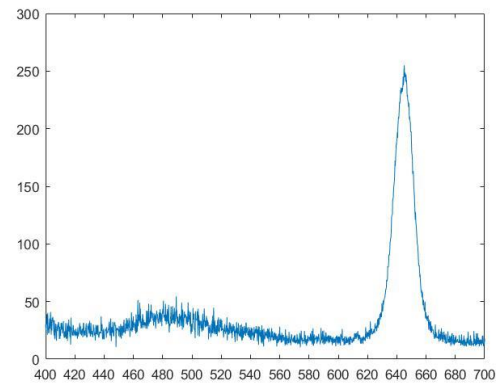
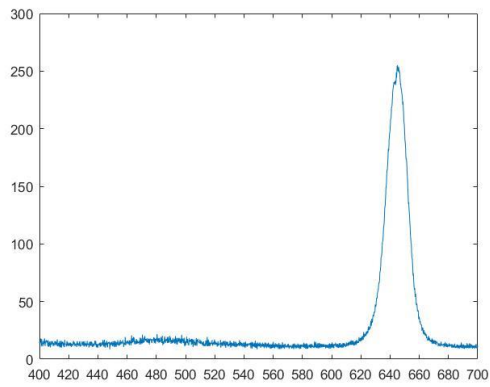
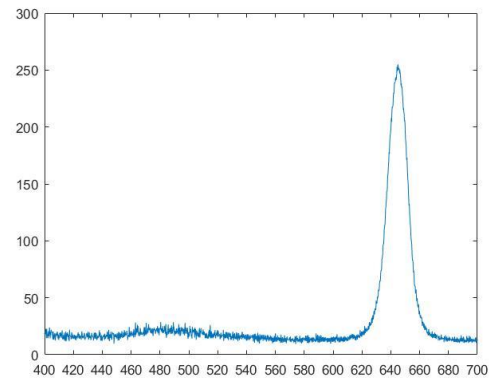
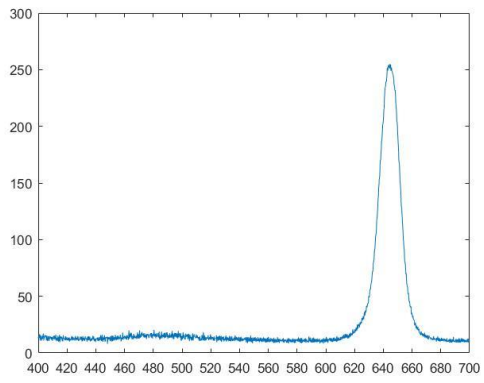
Η ζητούμενη φασματική καμπύλη και η ασπρόμαυρη εικόνα μου παράγει το Matlab και στέλνεται στο DLP φαίνεται στις εικόνες Εικόνα 5.19 και Εικόνα 5.20 αντίστοιχα. Έπειτα ακολουθούν οι πειραματικές μετρήσεις που διεξήχθησαν για το συγκεκριμένο φάσμα.

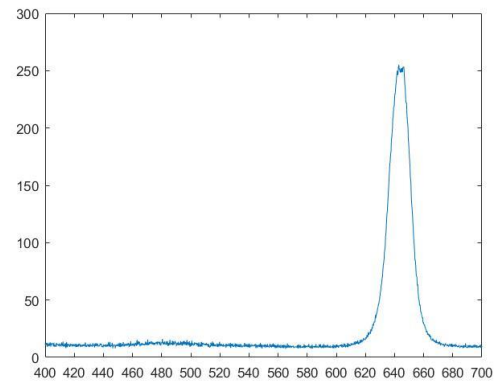
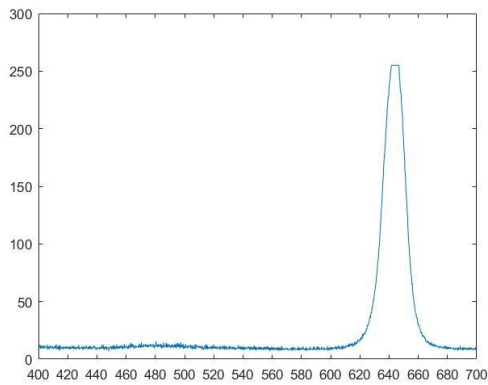


Εικόνα 5.19: Φασματική καμπύλη 640 nm



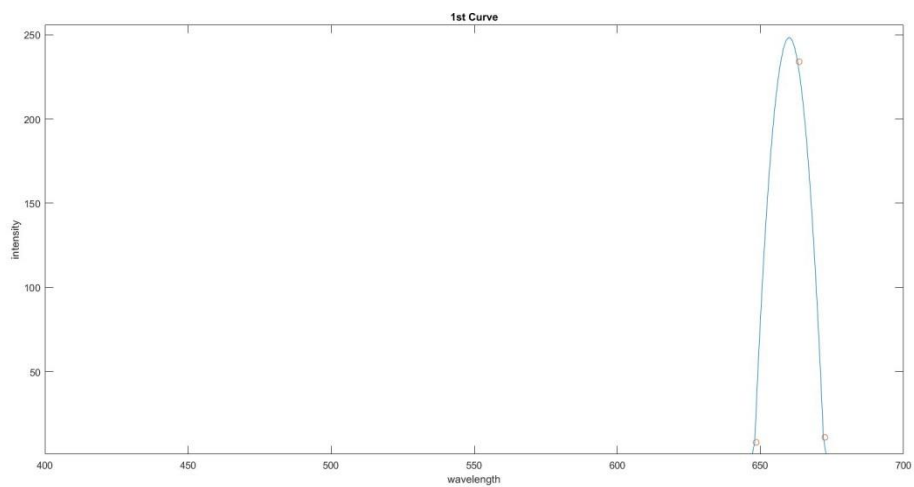
Εικόνα 5.20: Παραγόμενη εικόνα



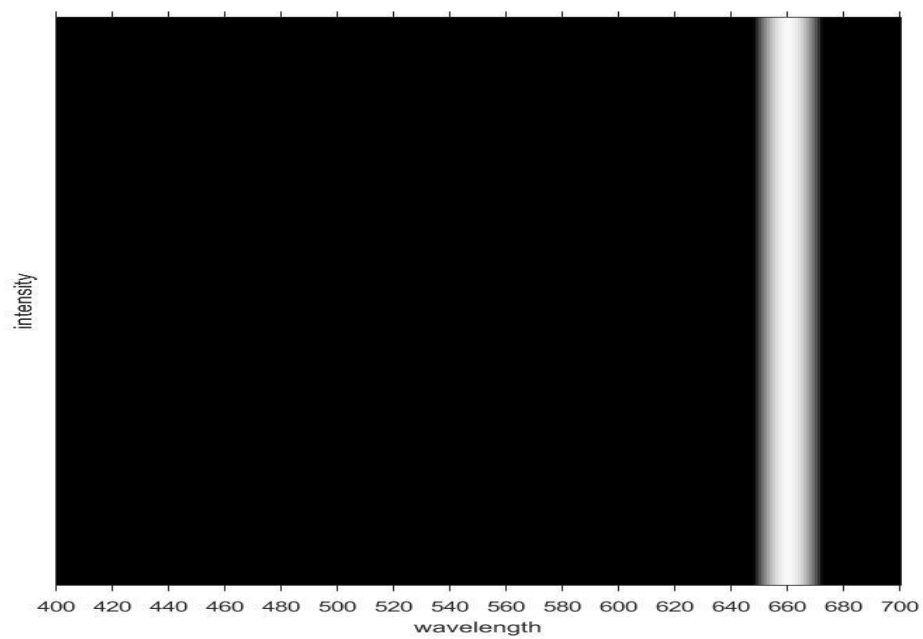


5.1.11 Φάσμα εξόδου στα 660 nm

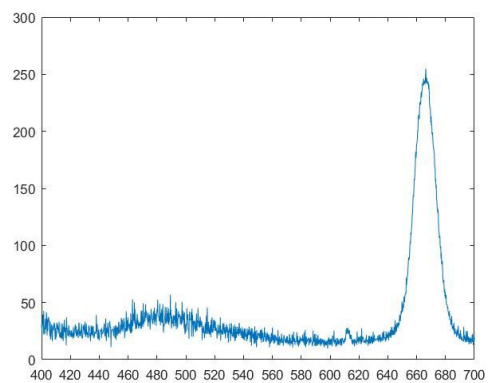
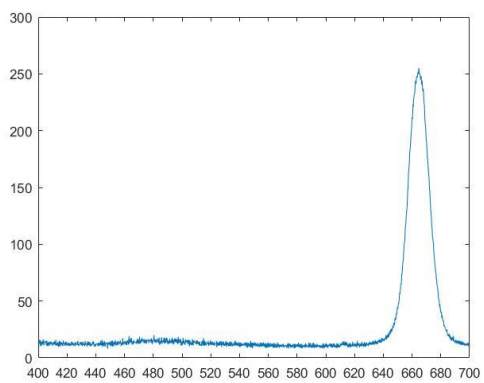
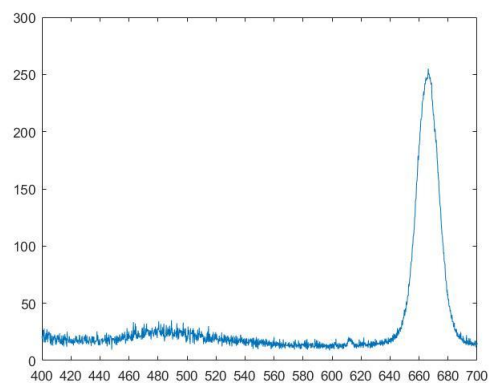
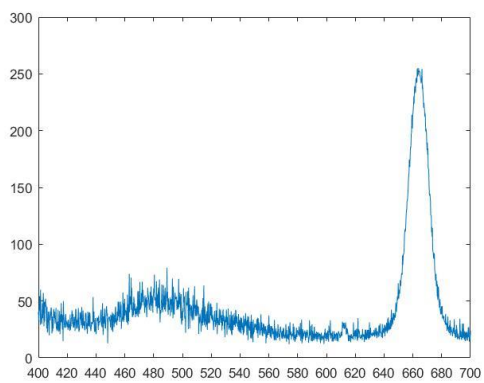
Η ζητούμενη φασματική καμπύλη και η ασπρόμαυρη εικόνα που παράγει το Matlab και στέλνεται στο DLP φαίνεται στις εικόνες Εικόνα 5.21 και Εικόνα 5.22 αντίστοιχα. Έπειτα ακολουθούν οι πειραματικές μετρήσεις που διεξήχθησαν για το συγκεκριμένο φάσμα.

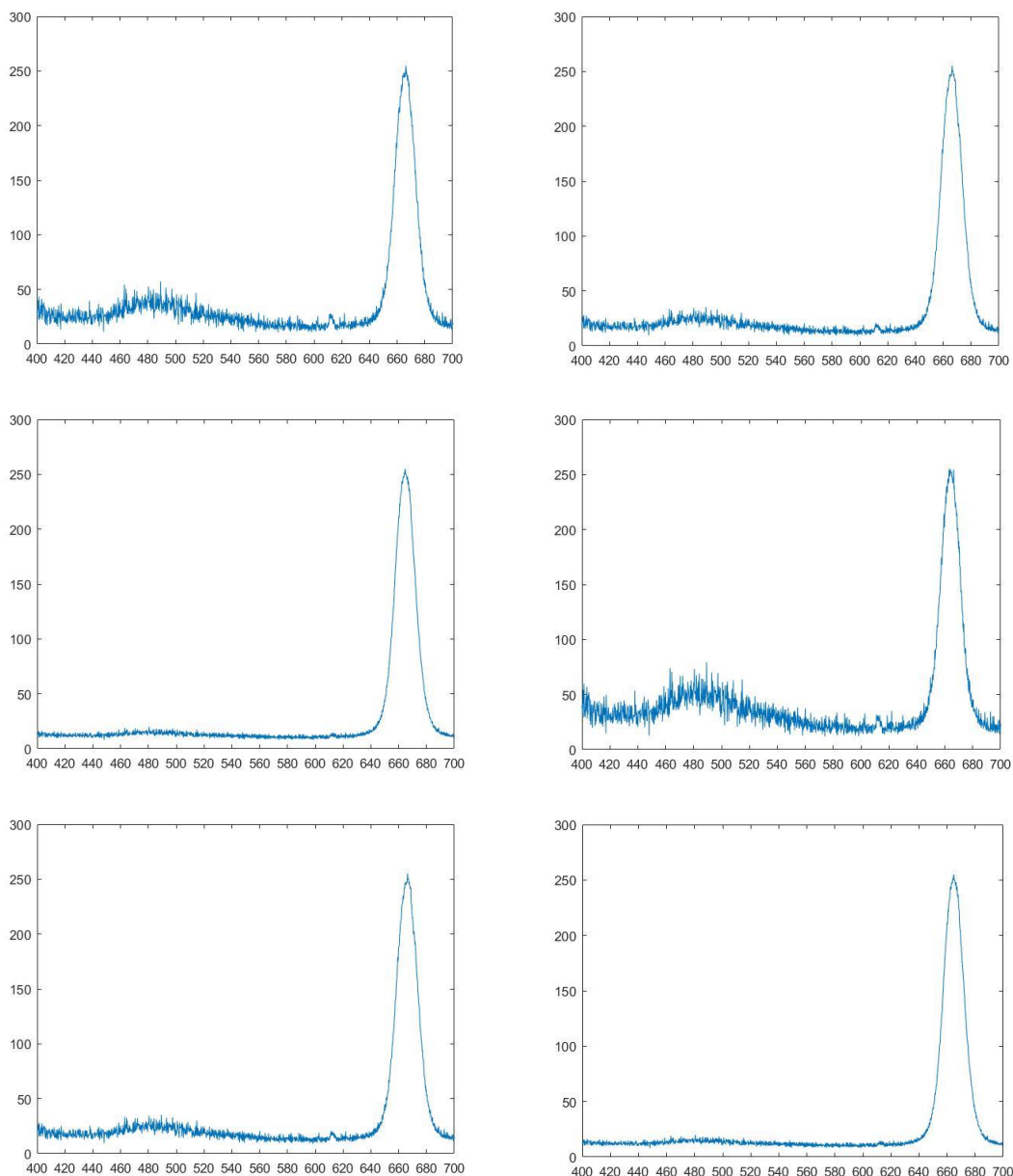


Εικόνα 5.21: Φασματική καμπύλη 660 nm



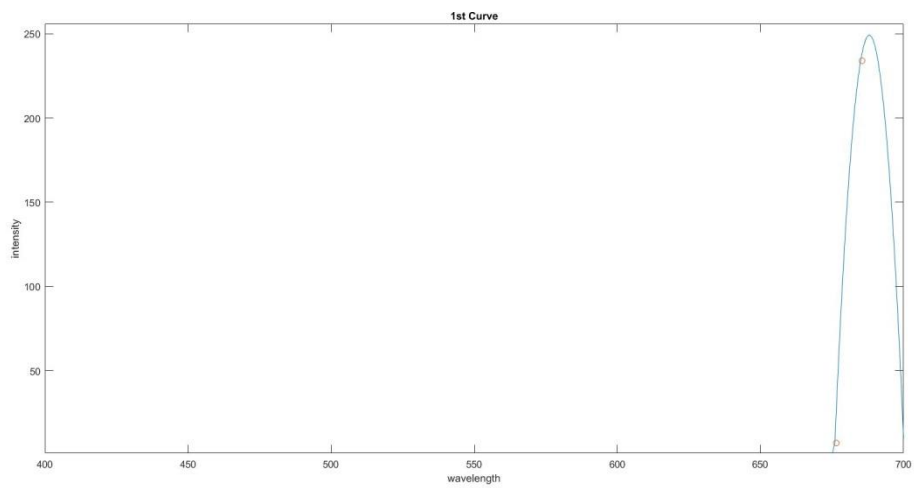
Εικόνα 5.22: Παραγόμενη εικόνα



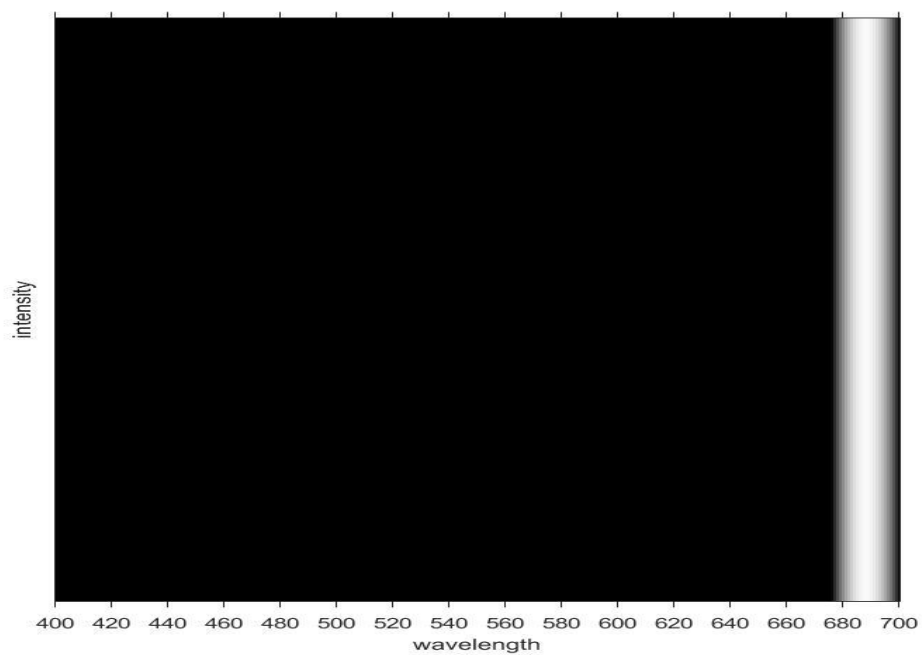


5.1.12 Φάσμα εξόδου στα 690 - 700 nm

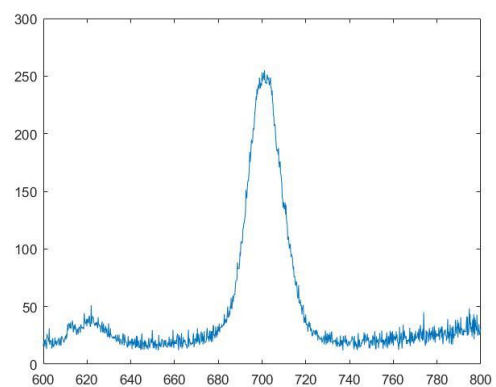
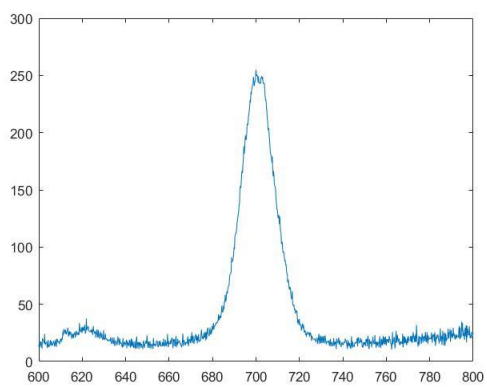
Η ζητούμενη φασματική καμπύλη και η ασπρόμαυρη εικόνα που παράγει το Matlab και στέλνεται στο DLP φαίνεται στις εικόνες Εικόνα 5.23 και Εικόνα 5.24 αντίστοιχα. Έπειτα ακολουθούν οι πειραματικές μετρήσεις που διεξήχθησαν για το συγκεκριμένο φάσμα.

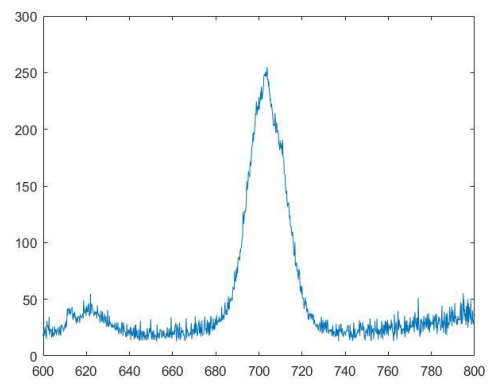
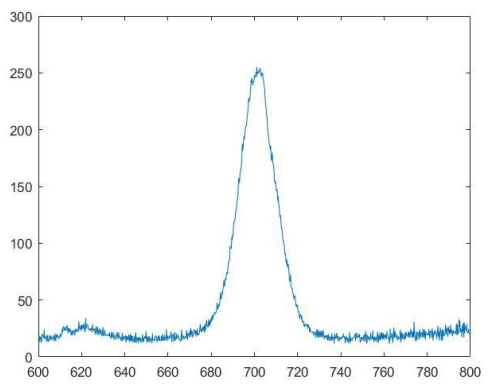
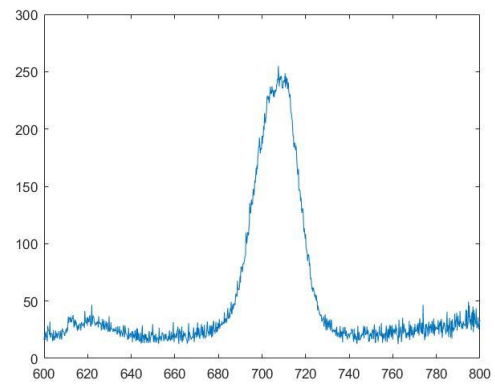
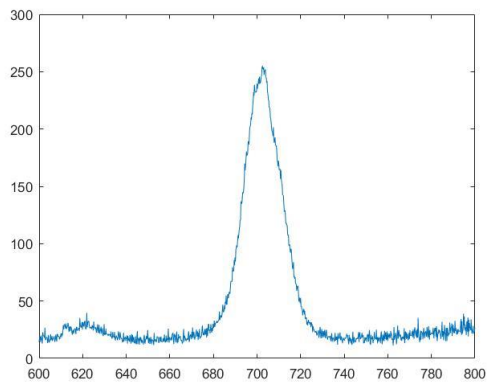
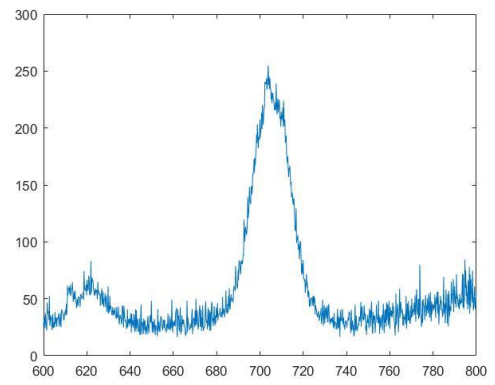
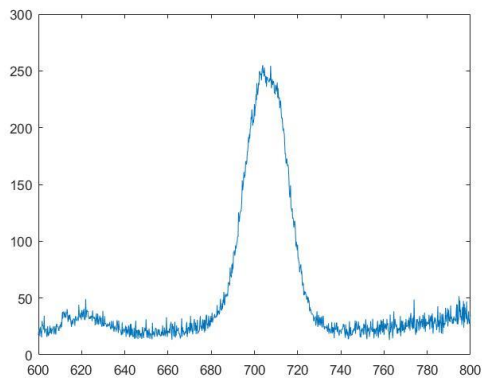
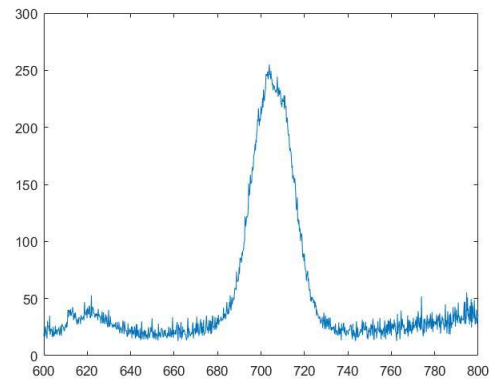
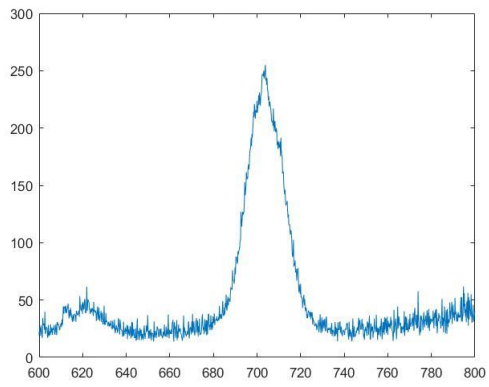


Εικόνα 5.23: Φασματική καμπύλη 690-700 nm



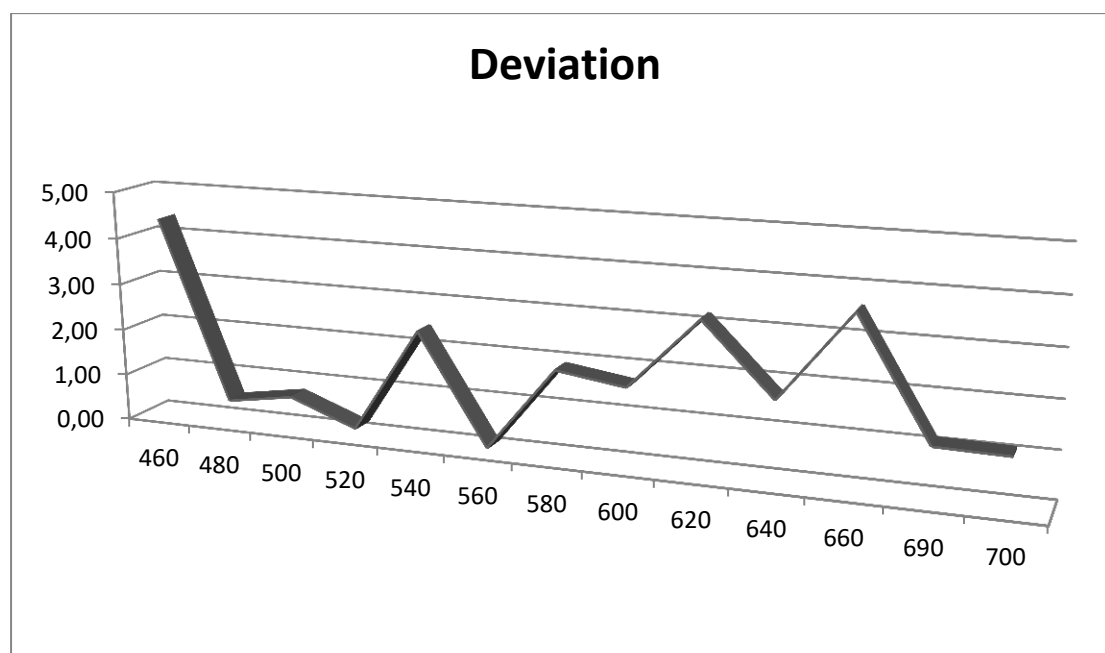
Εικόνα 5.24: Παραγόμενη εικόνα





5.1.13 Σχολιασμός μετρήσεων

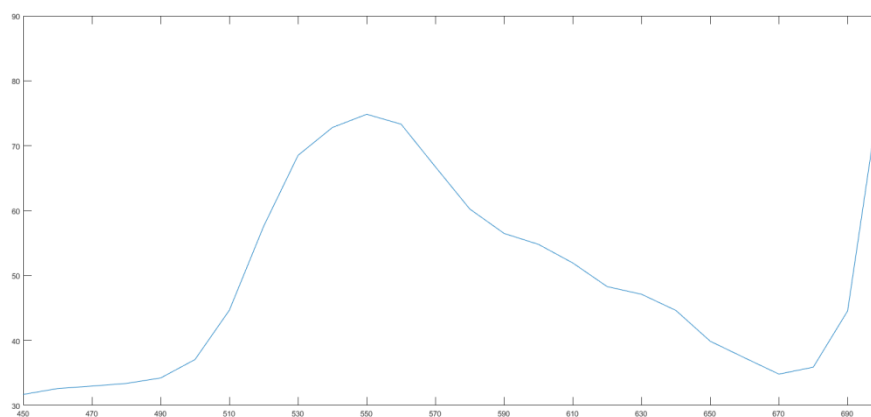
Ολοκληρώνοντας την διαδικασία των μετρήσεων έγινε υπολογισμός της απόκλισης που είχαν τα ζητούμενα φάσματα από εκείνα που μας έδινε το φασματόμετρο. Αυτό έγινε υπολογίζοντας τον μέσο όρο των κορυφών από τα αποτελέσματα των δέκα μετρήσεων κάθε φασματικής καμπύλης που σχεδιάστηκε. Οι αποκλίσεις κυμάνθηκαν σε λογικά επίπεδα, με την μικρότερη να βρίσκεται στα 0,10 nm για καμπύλη στα 560 nm και την μεγαλύτερη στα 4,2 nm για καμπύλη στα 460 nm. Ακολουθούν πιο αναλυτικά τα αποτελέσματα στο Σχήμα 5.1.



Σχήμα 5.1: Απόκλιση φασμάτων

5.2 Προβολή χλωροφύλλης και δέρματος

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναπαρασταθεί το φάσμα του ανθρώπινου δέρματος και το φάσμα της χλωροφύλλης. Στην Εικόνα 5.25 αναπαριστάται η φασματική καμπύλη της χλωροφύλλης στην Εικόνα 5.26 φαίνεται η αναπαράσταση της προβαλλόμενης εικόνας που φτάνει στο DLP και τέλος στην Εικόνα 5.27 η χρωματική αναπαράστασή της. Το τελικό αποτέλεσμα που προβάλλει η συσκευή είναι ίδιο χρωματικά με αυτό της χλωροφύλλης.



Εικόνα 5.25: Φασματική καμπύλη χλωροφύλλης

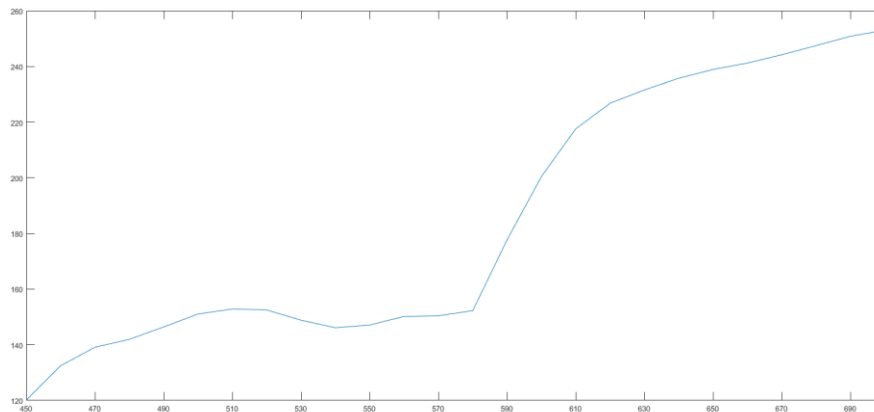


Εικόνα 5.26: Παραγόμενη εικόνα φάσματος χλωροφύλλης

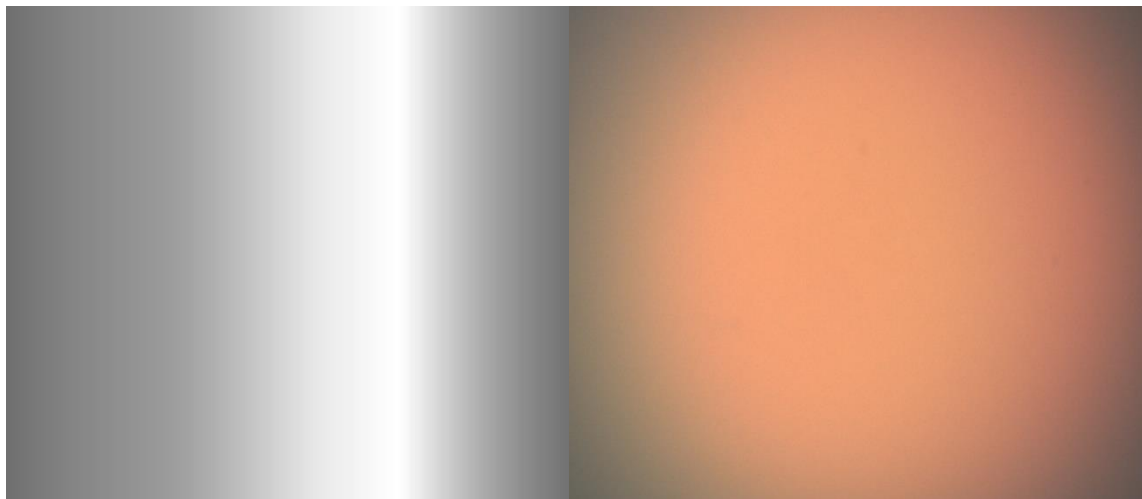


Εικόνα 5.27: Χρωματικό αποτέλεσμα χλωροφύλλης

Έπειτα με παρόμοια διαδικασία αναπαραστάθηκε το ανθρώπινο δέρμα. Στην Εικόνα 5.28 φαίνεται η φασματική καμπύλη του δέρματος, έπειτα στην Εικόνα 5.29 η αναπαράστασή του όπως στέλνεται προς προβολή στο DLP και τέλος στην εικόνα 5.30 το χρωματικό αποτέλεσμα που είναι ίδιο με αυτό του δέρματος.



Εικόνα 5.28: Φασματική καμπύλη δέρματος

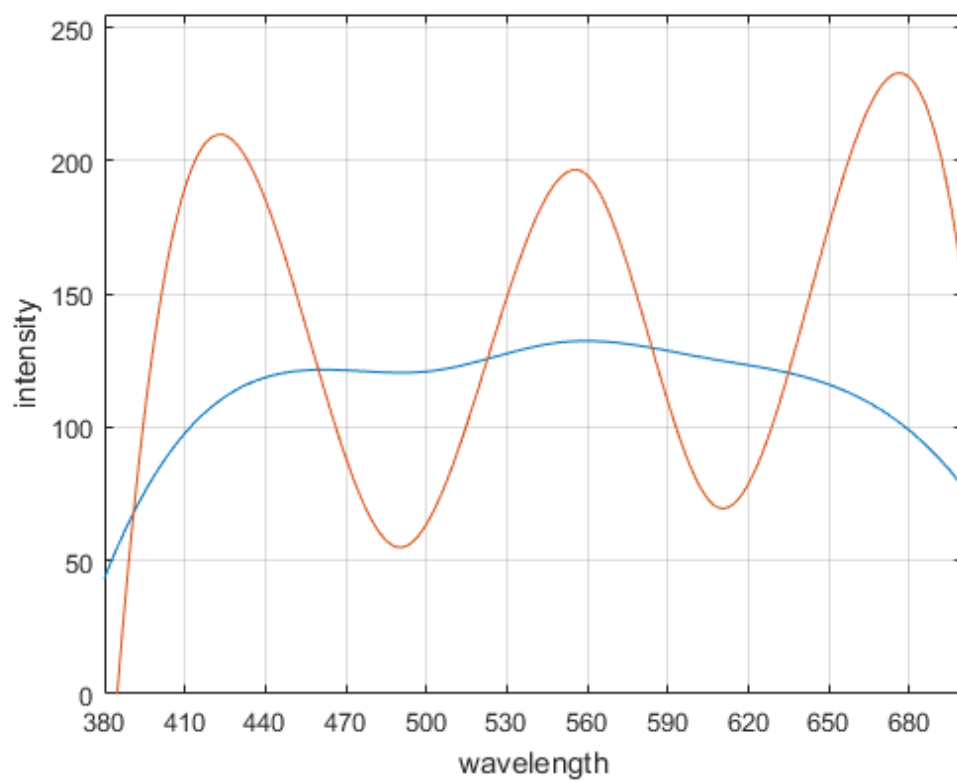


Εικόνα 5.29: Παραγόμενη εικόνα φάσματος
δέρματος

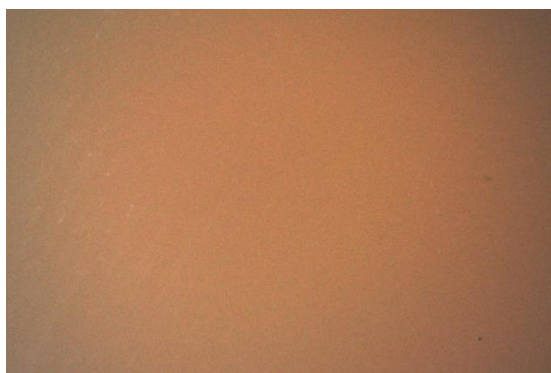
Εικόνα 5.30: Χρωματικό αποτέλεσμα
δέρματος

5.3 Προβολή μεταμερικού ζεύγους

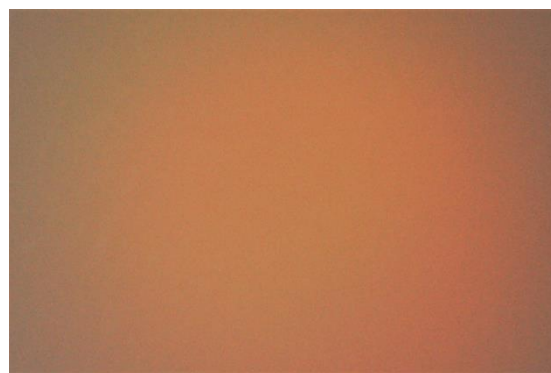
Μεταμερισμός είναι το φαινόμενο όπου δυο χρώματα φαίνεται να ταιριάζουν κάτω από μια πηγή φωτός, αλλά όχι αν αυτή η πηγή αλλάξει. Δυο τέτοια χρώματα αποτελούν ένα μεταμερικό ζευγάρι και οι φυσικές φασματικές τους καμπύλες τέμνονται τουλάχιστον τρεις φορές. Στην Εικόνα 5.31 παρατηρείται αυτό το φαινόμενο στις φυσικές φασματικές τους καμπύλες που δημιουργήσαμε και τέλος στις Εικόνες 5.32-33 τα προβαλλόμενα χρώματα που δείχνουν να είναι σχεδόν ίδια.



Εικόνα 5.31: Φασματικές καμπύλες μεταμερικού ζεύγους



Εικόνα 5.32: Χρώμα 1



Εικόνα 5.33: Χρώμα 2

6

Μελλοντική εργασία

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάστηκε ουσιαστικά ένας οπτικός διαμορφωτής πλήρως ελεγχόμενος από τον χρήστη μέσω υπολογιστή, με δυνατότητα προβολής οποιουδήποτε φάσματος χωρίς κανέναν περιορισμό. Έχει πολύ καλή απόδοση και χαμηλό κόστος, χαρακτηριστικά που θα την κάνουν ένα εξαιρετικά ανταγωνιστικό προϊόν. Μέχρι σήμερα είναι η μόνη συσκευή σε όλο τον κόσμο που έχει αυτές της δυνατότητες. Η καινοτόμα αυτή συσκευή δημιουργήθηκε εξ ολοκλήρου εντός του εργαστηρίου οπτοηλεκτρονικής, χρησιμοποιώντας διαθέσιμο εξοπλισμό όπως ο 3D printer για την δημιουργία της βάσης και το φασματόμετρο για τις μετρήσεις. Επίσης έγινε έρευνα και αγορά απαραίτητων οπτικών στοιχείων για την ολοκλήρωση της, όπως οπτικές ίνες και φίλτρα. Η έρευνα ήταν απαραίτητη πριν προχωρήσουμε στην αγορά των στοιχείων για να εξασφαλίσουμε την καλύτερη απόδοση και αναβάθμιση της συσκευής.

Όλα αυτά συντέλεσαν στην περάτωση της εργασίας αυτής και έπειτα από την ολοκλήρωση και του τελευταίου σταδίου των μετρήσεων καταλήξαμε σε ορισμένα συμπεράσματα και σκέψεις για μελλοντική εξέλιξη. Όσον αφορά το λογισμικό που πλακισιώνει την οπτική συσκευή θα μπορούσε να υλοποιηθεί και σε κάποια άλλη γλώσσα όπως C/C++ για καλύτερη ταχύτητα κατά την λειτουργία της. Παρόλα αυτά θα μπορούσε να αναβαθμιστεί και να βελτιστοποιηθεί ο ήδη υπάρχον κώδικας στο Matlab, χρησιμοποιώντας διαφορετικές τεχνικές και δομή που θα επέφερε πιο γρήγορα αποτελέσματα, αν και ήδη αναφερόμαστε σε μια σχετικά γρήγορη εκτέλεση.

Μια εξαιρετικά ενδιαφέρουσα εξέλιξη της παρούσας μελέτης είναι ότι μπορεί να μετατραπεί σε μια οπτική διάταξη που θα είναι ικανή να προβάλει το επιθυμητό φάσμα στον τοίχο χωρίς την παρουσία οπτικής ίνας, κερδίζοντας με αυτόν τον τρόπο σημαντική οπτική ισχύ. Όσον αφορά τις δυνατότητές της ως προς το φασματικό εύρος προς προβολή, έχει όλες τις προοπτικές εξέλιξης για να διευρυνθεί και να καλύψει πλέον από UV έως NI.

Μια ακόμη μελλοντική τροποποίηση της είναι η δημιουργία μιας υβριδικής πηγής LED αλογόνου που θα εκπέμπει από το πιο κοντινό UV έως το πιο κοντινό NI. Είναι μια συσκευή που έχει δυνατότητες και ευελιξία ως προς την χρήση της και σίγουρα μπορεί να γίνει αντικείμενο για εφαρμογές σε πολλούς επιστημονικούς κλάδους.

Αναφορές

- [1] https://science.nasa.gov/ems/02_anatomy
- [2] <http://www.zimzamphysics.gr/>
- [3] <http://www.physics.ntua.gr/~cchrist/SIMEIOSEIS/TECH.PEIR.FYS.2004.PDF>
- [4] Beeckman, J; Neyts, K & Vanbrabant, P (2011). "Liquid-Crystal Photonic Applications"
- [5] Peng, Yankun & Lu, Renfu. "An LCTF-Based Multispectral Imaging System for Estimation of Apple Fruit Firmness: Part II: Selection of Optimal Wavelengths and Development of Prediction Models"
- [6] Morris, H; Hoyt, C & Treado, P. "Imaging Spectrometers for Fluorescence and Raman Microscopy: Acousto-Optic and Liquid Crystal Tunable Filters"
- [7] Yasuhiro, Shoji; Takashi, Yoshikawa; Yuji, Sakamoto; Yukihiro, Takahashi & Kazuya, Yoshida.
- [8] Srinivasarao, M. (1999). "Nano-Optics in the Biological World: Beetles, Butterflies, Birds, and Moths". Chemical Reviews.
- [9] Kinoshita, S.; Yoshioka, S.; Miyazaki, J. (2008). "Physics of structural colors". Reports on Progress in Physics.
- [10] Kenneth R. Spring - Scientific Consultant, Lusby, Maryland, 20657.
- [11] Thomas J. Fellers and Michael W. Davidson - National High Magnetic Field Laboratory, 1800 East Paul Dirac Dr., The Florida State University, Tallahassee, Florida,
- [12] http://www.ipet.gr/digitech2/index.php?option=com_content&task=view&id=96&Itemid2
- [13] <https://www.techopedia.com/definition/17178/lcd-projector>
- [14] <https://www.lifewire.com/lcd-video-projector-basics-4076777>
- [15] <https://www.techopedia.com/definition/3027/digital-light-processing-dlp>
- [16] <https://www.lifewire.com/dlp-video-projector-basics-4076660>
- [17] https://www.projectorcentral.com/lcd_dlp_comparison.htm
- [18] <https://promwad.com/publications/dlp-lightcrafter-texas-instruments>
- [19] Spatial light modulator based light source with controlled spectral emission, Diploma Thesis by Kyriakopoulos G. Kosmas
- [20] <https://www.schott.com/>
- [21] <https://dolan-jenner.com/>
- [22] <https://www.oceaninsight.com/>