

ΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ

Σχολή Εφαρμοσμένων Επιστημών

Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών Τ.Ε.



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Ανάπτυξη και Κατασκευή
Οπτοηλεκτρονικού Συστήματος
Μέτρησης της Συγκέντρωσης Αερίου
Βασισμένο στον Νόμο των Beer-Lambert**

Σπουδαστής

Επιβλέπων καθηγητής

Λιγοψυχάκης
Νικόλαος

Δρ. Πετρίδης
Κωνσταντίνος

ΧΑΝΙΑ 2014

Περίληψη

Στα πλαίσια της παρούσας πτυχιακής εργασίας, αναπτύχθηκε και κατασκευάστηκε μετρητικό σύστημα της συγκέντρωσης αερίου στο εργαστήριο, βασισμένο στον νόμο Beer-Lambert. Στο κείμενο, αναλύεται η έννοια της απορρόφησης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και δίνεται ο ορισμός της συγκέντρωσης ενός συστατικού που περιέχεται σε κάποιο μείγμα. Περιγράφονται διάφορες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στην μέτρηση της συγκέντρωσης με έμφαση σε αυτές που στηρίζονται στην φασματοσκοπία απορρόφησης. Γίνεται εκτενής αναφορά στην μεθοδολογία σχεδίασης, όπου περιλαμβάνονται, οι λόγοι εκλογής του όζοντος ως αερίου δοκιμής και του συγκεκριμένου σχεδιασμού που ακολουθήθηκε. Γίνεται εκτενής ανάλυση των κυκλωμάτων που συνθέτουν τις διάφορες μονάδες της συσκευής και παρουσιάζεται το πρόγραμμα ελέγχου της. Ο πειραματικός χαρακτηρισμός που πραγματοποιήθηκε, οδήγησε στα σχετικά συμπεράσματα που παρουσιάζονται. Στην ανάλυση των κυκλωμάτων δίνεται έμφαση στις τεχνικές (ανύψωσης της τάσης με τοπολογία Boost, χρήση πηγής σταθερού ρεύματος κ.α.) που χρησιμοποιήθηκαν στην υλοποίηση των μονάδων εκπομπής της UV ακτινοβολίας και της κεντρικής μονάδας, όπου χρησιμοποιήθηκε ένας μικροελεγκτής ως βασικό εξάρτημα.

Abstract

In the context of this thesis, developed and manufactured measuring system of the gas concentration in the laboratory, based in Beer-Lambert law. The text discusses the concept of absorption of electromagnetic radiation and is given the definition of the concentration of an ingredient contained in a mixture. Describe the different methods used to measure the concentration with emphasis on those based on absorption spectroscopy. Extensive reference is given to the design methodology, including the reasons of election the ozone gas as test. Also reference is given to the specific design that was followed. There is extensive analysis of circuits that make up the various units of the device and presents the control program. The experimental characterization carried out, leading to the presented conclusions. Emphasis is placed in the analysis of circuits on techniques (raising the voltage topology Boost, using a constant current source, etc.) used in the implementation of emission units of UV radiation and the central unit, which used a microcontroller as a key component.

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της πτυχιακής μου εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου Δρ. Πετρίδη Κωνσταντίνο για την άριστη συνεργασία που είχαμε και για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Σκουλάκη Αλέξανδρο γιατί χωρίς την πολύτιμη βοήθειά του δεν θα είχα καταφέρει να ολοκληρώσω την πτυχιακή μου εργασία. Επίσης ευχαριστώ τον κ. Παπαδουλή Θεόδωρο για την κατασκευή των μηχανικών και μεταλλικών μερών του οργάνου μέτρησης. Στις ευχαριστίες μου περιλαμβάνονται το εργαστήριο δομής της ύλης & φυσικής λέιζερ του Πολυτεχνείου Κρήτης και τα μέλη του, για την παροχή οπτοηλεκτρονικών εξαρτημάτων και την συμμετοχή στον πειραματικό χαρακτηρισμό.

Τέλος θα ήθελα να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου που με στήριξε καθ' όλη την διάρκεια της φοίτησής μου στο Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών του ΤΕΙ Κρήτης και θα ήθελα να αφιερώσω την πτυχιακή μου εργασία στην αγαπημένη μου Κουμουδέλη Θεοδώρα που είναι δίπλα μου όλα αυτά τα χρόνια.

Πίνακας περιεχομένων

Κεφάλαιο 1 ^ο	9
1 Εισαγωγή	9
1.1 Σκοπός	9
1.2 Βασικοί ορισμοί.....	9
Απορρόφηση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας	9
Συγκέντρωση	10
1.3 Οργάνωση της πτυχιακής εργασίας.....	12
Κεφάλαιο 2 ^ο	14
2 Θεωρητικό υπόβαθρο-Ιστορική ανάδρομη	14
2.1 Νόμος Beer-Lambert	14
Εισαγωγή - Ιστορική αναδρομή [7]	14
Παρουσίαση του νόμου	14
Περιορισμοί εφαρμογής του νόμου[7]	17
2.2 Φασματοσκοπία απορρόφησης.....	17
Εισαγωγή –φάσματα απορρόφησης.....	17
Μηχανισμοί διεύρυνσης [12].....	18
Μέθοδοι φασματοσκοπίας	19
Κεφάλαιο 3 ^ο	25
3 Περιγραφή μετρητικού συστήματος.....	25
3.1 Μεθοδολογία σχεδίασης	25
Εισαγωγή	25
Τεχνικές μέτρησης στο εργαστήριο	26
Εκλογή αερίου δοκιμής	27
3.2 Δυνατότητες συστήματος	28
Περιγραφή μονάδων.....	28
Τεχνικά χαρακτηριστικά.....	29
Τοπολογίες σύνδεσης.....	30
3.3 Ανάλυση μονάδων	35
Μονάδα εκπομπής της UV ακτινοβολίας.....	35
Μονάδα λήψης της UV ακτινοβολίας	40
Κεντρική μονάδα	41
Κεφάλαιο 4 ^ο	46
4 Αλγόριθμοι –Διαγράμματα ροής	46

4.1	Ανάλυση βαθμίδων μικροελεγκτή	46
	Unified Clock System (UCS)	46
	Direct Memory Access (DMA) Controller Module.....	48
	Watchdog Timer (WDT_A)	48
	Timer_A	48
	Timer_B	51
	ADC12_A.....	51
	Universal Serial Communication Interface – UART Mode.....	53
4.2	Βασικά διαγράμματα ροής.....	54
	Βασικός βρόγχος	54
	Ρουτίνα εξυπηρέτησης της διακοπής από την βαθμίδα DMA	55
	Ρουτίνα εξυπηρέτησης της διακοπής του timer A (compare match CCR1).....	55
	Ρουτίνα εξυπηρέτησης της διακοπής του timer A (compare match CCR2).....	55
	Ρουτίνα εξυπηρέτησης της διακοπής του timer A (compare match CCR3).....	55
	Ρουτίνα εξυπηρέτησης της διακοπής του timer A (overflow)	55
	Κεφάλαιο 5 ^ο	56
5	Πειραματικός χαρακτηρισμός και συμπεράσματα.....	56
	Βιβλιογραφικές αναφορές	58

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1: Σχηματική παράσταση του νόμου Beer-Lambert[8].	15
Εικόνα 2: Οπτικό φάσμα απορρόφησης (Fraunhofer lines) του ήλιου όπως παρατηρήθηκε από τον γερμανό φυσικό Joseph von Fraunhofer (1787–1826)[10].	18
Εικόνα 3: Διάγραμμα ενέργειας του μορίου, όπου περιλαμβάνονται οι electronic, vibrational και rotational στάθμες[11].	18
Εικόνα 4: Σύγκριση της μορφής των γραμμών Doppler, Lorentzian και Voigt Doppler. Ο συντελεστής α ορίζεται ως ο λόγος του εύρους FWHM (Full Width at Half Maximum) των Lorentzian και Doppler. Η κατανομή Voigt εμφανίζεται ανάμεσα σε αυτές που αντιστοιχούν στις Gaussian και Lorentzian και τείνει να τις προσεγγίσει όταν ο συντελεστής α παίρνει τις οριακές τιμές μηδέν και άπειρο, αντίστοιχα.	19
Εικόνα 5: Σχηματική παράσταση της μεθόδου FTIR[18].	21
Εικόνα 6: Σχηματική παράσταση της Multiaxial τεχνικής	22
Εικόνα 7: Σχηματική παράσταση της longpath τεχνικής	23
Εικόνα 8: Σχηματική παράσταση της cavity-enhanced τεχνικής.	23
Εικόνα 9: Ανασύσταση της ωφέλιμης ενεργού διατομής $\sigma'(\lambda)$ από το μεικτό σήμα $\sigma(\lambda)$ με την αφαίρεση της $\sigma_b(\lambda)$ που αποτελεί την “base line” από σκέδαση.	24
Εικόνα 10: Ενεργός διατομή απορρόφησης του όζοντος ως συνάρτηση του μήκους κύματος [66].	28
Εικόνα 11: φωτογραφία του οπτοηλεκτρονικού συστήματος μέτρησης της συγκέντρωσης του όζοντος	29
Εικόνα 12: Τοπολογία αυτόνομης λειτουργίας μονής δέσμης	31
Εικόνα 13: Τοπολογία αυτόνομης λειτουργίας διπλής δέσμης	32
Εικόνα 14: Τοπολογία λειτουργίας μονής δέσμης και σύνδεση του lock-in amplifier	33
Εικόνα 15: Τοπολογία λειτουργίας διπλής δέσμης και σύνδεση του lock-in amplifier	34
Εικόνα 16: Τοπολογία λειτουργίας μονής δέσμης και σύνδεση του Data acquisition	34
Εικόνα 17: Τοπολογία λειτουργίας διπλής δέσμης και σύνδεση του Data acquisition	35
Εικόνα 18: Σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος του πομπού	36
Εικόνα 19: Σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος του δέκτη	40
Εικόνα 20: Χαρακτηριστικά του μικροελεγκτή MSP430F5438A	42
Εικόνα 21: Διαγραμμα βαθμίδων της οικογένειας των μικροελεγκτών MSP430F54xx	42
Εικόνα 22: Σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος του μικροελεγκτή	43
Εικόνα 23: Σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος διασύνδεσης του πρωτοκόλλου USB	44
Εικόνα 24: Σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος του τροφοδοτικού	44
Εικόνα 25: Σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος απομονωμένων εξόδων	45
Εικόνα 26: Σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος του ψηφιακού απομονωτή	45
Εικόνα 27: Σχηματικό κυκλωματικό διάγραμμα της βαθμίδας UCS	47
Εικόνα 28: Σχηματικό κυκλωματικό διάγραμμα της βαθμίδας του Timer_A	49
Εικόνα 29: Σχηματική αναπαράσταση του Up mode	50
Εικόνα 30: Σχηματική αναπαράσταση του Continuous mode	50
Εικόνα 31: Σχηματική αναπαράσταση του Up/Down mode	51
Εικόνα 32: Σχηματική αναπαράσταση της βαθμίδας ADC12_A	52
Εικόνα 33: Διάγραμμα ροής ενεργειών του τρόπου «repeat-sequence»	53
Εικόνα 34: Απεικόνιση και περιγραφή του χαρακτήρα της ασύγχρονης επικοινωνίας	54

Εικόνα 35: Γραφική παράσταση της τάσης εξόδου από την μονάδα λήψης σε συνάρτηση του πλήθους των δειγμάτων, με χρονικό βήμα ενός δευτερόλεπτου και για παλμική λειτουργία(40 Hz).....	56
Εικόνα 36: Γραφική παράσταση της τάσης εξόδου από την μονάδα λήψης σε συνάρτηση του πλήθους των δειγμάτων, με χρονικό βήμα ενός δευτερόλεπτου και για συνεχή λειτουργία.	57

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1: Τοπολογίες συνδεσμολογίας του οπτοηλεκτρονικού συστήματος.....	31
Πίνακας 2: Περιγραφή των συναρτήσεων των ακροδεκτών (pins) του ολοκληρωμένου LM3431.....	36
Πίνακας 3: Τεχνικά χαρακτηριστικά του LED UVTOP255.....	40
Πίνακας 4: Τεχνικά χαρακτηριστικά του UV-TIAMO.....	41

Κεφάλαιο 1^ο

1 Εισαγωγή

1.1 Σκοπός

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η παρουσίαση της μεθοδολογίας ανάπτυξης, σχεδιασμού, και κατασκευής ενός μετρητικού συστήματος της συγκέντρωσης αερίου με δυνατότητα χρησιμοποίησης σε διάφορα εργαστηριακά πειράματα ποσοτικής ανάλυσης. Κατά την συγγραφή του κειμένου δόθηκε έμφαση στην τεχνική ανάλυση των κυκλωμάτων, αλλά δεν παραμελήθηκε και η παρουσίαση του σχετικού θεωρητικού υπόβαθρου. Όσο αφορά τις τοπολογίες που χρησιμοποιήθηκαν, αξίζει να σημειωθεί ότι υπήρξε η μέριμνα να καλυφθούν οι κατασκευαστικές προδιαγραφές μιας συσκευής προορισμένης για μετρήσεις στο εργαστήριο. Η χρήση της συσκευής προτείνεται για εκπαιδευτικούς σκοπούς, αφού δεν ακολουθήθηκαν πρότυπα κατασκευής και πιστοποίησης που θα απαιτούσε η ανάπτυξη ενός βιομηχανικού πρωτοτύπου.

1.2 Βασικοί ορισμοί

Απορρόφηση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

Η απορρόφηση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας αναφέρεται στη φυσική διεργασία της ενσωμάτωσης της ενέργειας των φωτονίων από την ύλη (άτομα και μόρια) και αποτελεί μέρος της αλληλεπίδρασής της με αυτή. Η μετατροπή μέρους της ενέργειας των κυμάτων σε άλλες μορφές, οδηγεί συνήθως στην αύξηση της εσωτερικής ενέργειας του μέσου απορρόφησης και την παραγωγή θερμότητας. Άλλα φαινόμενα που μπορούν να λάβουν χώρα, είναι τα διάφορα είδη σκέδασης, διασπάσεις μοριακών και χημικών δεσμών(π.χ. φωτόλυση) κ.α. Το αποτέλεσμα της απορρόφησης είναι η εξασθένηση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων(ελάττωση της έντασης τους) καθώς αυτά διαδίδονται μέσα στο μέσο απορρόφησης. Συνήθως η απορρόφηση δεν εξαρτάται από την ένταση των κυμάτων (γραμμική απορρόφηση)[1] και αντίστοιχα η εξασθένηση έχει γραμμική εξάρτηση (ανάλογη) με την ένταση αυτών. Στις ειδικές εκείνες περιπτώσεις, όπου η διαφάνεια του μέσου εξαρτάται από την ίδια την ένταση των κυμάτων που διαδίδονται σε αυτό, μπορεί να εμφανιστεί το φαινόμενο του κορεσμού της απορρόφησης (κορεσμένη απορρόφηση) με αποτέλεσμα τη μη γραμμική εξάρτηση της εξασθένησης από την ένταση.

Αν και η απορρόφηση περιγράφεται από τους νόμους της κβαντικής θεωρίας (π.χ. φάσματα απορρόφησης και εκπομπής των αερίων), για μονοχρωματική ακτινοβολία και για γραμμική απορρόφηση, ο αριθμός των φωτονίων που απορροφώνται εξαρτάται από: α) τον αριθμό των εισερχόμενων φωτονίων, β) τον αριθμό των συστατικών που απορροφούν (πυκνότητα) ανά μονάδα όγκου του μέσου, και γ) το μήκος της διαδρομής που διανύουν τα φωτόνια στο μέσο. Ποσοτικά, ο αριθμός dN των φωτονίων που απορροφώνται ανά μονάδα μήκους διαδρομής, σε ένα απειροστό τμήμα ds της διαδρομής της δέσμης της ακτινοβολίας μεταξύ των σημείων s και $s+ds$ είναι ανάλογος του αριθμού N των φωτονίων που διεισδύουν μέχρι το βάθος s , του αριθμού n των απορροφητών ανά μονάδα όγκου (αριθμητική πυκνότητα σε molecules cm^{-3}), και της ενεργού διατομής απορρόφησης σ [2].

$$\frac{dN}{ds} = -\sigma nN$$

Η ενεργός διατομή απορρόφησης εκφράζεται σε μονάδες $cm^2 molecule^{-1}$ (molecule = μόριο απορροφητή) και καθορίζει το πόσο ισχυρά απορροφά ένα συστατικό την ακτινοβολία σε κάποιο μήκος κύματος, και εκφράζει την πιθανότητα να συμβεί η απορρόφηση.

Συγκέντρωση

Στη χημεία, οι εκφράσεις περιεκτικότητας και συγκέντρωσης διαλυμάτων δείχνουν αριθμητικά την ποσότητα της ή των διαλυμένων ουσιών σε ορισμένη ποσότητα διαλύματος ή διαλύτη. Η έννοια της συγκέντρωσης μπορεί να περιγραφεί με διάφορες μαθηματικές εκφράσεις ανάλογα το πεδίο εφαρμογής. Μερικές από αυτές περιγράφονται παρακάτω[3]:

- **Συγκέντρωση μάζας**

Η συγκέντρωση μάζας ρ_i ορίζεται ως ο λόγος της μάζας m_i ενός περιεχόμενου συστατικού στο μίγμα με τον όγκο V που καταλαμβάνει αυτό.

$$\rho_i = \frac{m_i}{V}$$

Όπου στο SI εκφράζεται ως kg/m^3 .

- **Μοριακή συγκέντρωση**

Η μοριακή συγκέντρωση c_i ορίζεται ως ο λόγος του συνολικού αριθμού των γραμμομορίων (moles) n_i ενός περιεχόμενου συστατικού στο μίγμα με τον όγκο V που καταλαμβάνει αυτό.

$$c_i = \frac{n_i}{V}$$

Όπου στο SI εκφράζεται ως mol/m^3 .

- **Αριθμητική συγκέντρωση**

Η αριθμητική συγκέντρωση C_i ορίζεται ως ο λόγος του συνολικού αριθμού των στοιχειωδών οντοτήτων N_i (π.χ. άτομα, μόρια, σωματίδια κ.α.) ενός περιεχόμενου συστατικού στο μίγμα με τον όγκο V που καταλαμβάνει αυτό.

$$C_i = \frac{N_i}{V}$$

Όπου στο SI εκφράζεται ως $1/m^3$.

- **Συγκέντρωση κατά όγκο**

Η συγκέντρωση κατά όγκο φ_i ορίζεται ως ο λόγος του όγκου V_i ενός περιεχόμενου συστατικού με τον όγκο V του μίγματος που καταλαμβάνει αυτό.

$$\varphi_i = \frac{V_i}{V}$$

Όπου ο λόγος είναι αδιάστατος (καθαρός αριθμός) ή εκφράζεται ως εκατοστιαίο ποσοστό (%).

Πολλές φορές είναι αναγκαία η έκφραση της συγκέντρωσης να γίνεται με τρόπο ανεξάρτητο των μονάδων π.χ. στην σύγκριση συστατικών με διαφορετικό μοριακό βάρος. Έτσι χρησιμοποιούνται ευρέως οι εκφράσεις[4] «μέρη στο x»(parts per x), όπου το γράμμα x εκφράζει την ποσότητα αναφοράς (εκατομμύριο(million), δισεκατομμύριο(billion) κ.α.). Συνήθως η έκφραση συνοδεύεται και από το αναγνωριστικό «...κατά όγκο (... by volume)» ή «...κατά βάρος (... by weight)» για να υποδηλώσει τις διαφορετικές τιμές που έχουν η χωρική και μαζική συγκέντρωση αντίστοιχα. Για παράδειγμα, μία συγκέντρωση part per million (ppm) θα αναγράφεται ως (ppmv) ή (ppmw) όταν η ποσότητα αναφοράς είναι ο όγκος ή η μάζα αντίστοιχα.

Ειδικά στα αέρια, η μετατροπή από το μετρικό σύστημα γίνεται εύκολα θεωρώντας ότι ισχύουν οι καταστατικές εξισώσεις των ιδανικών αερίων. Για παράδειγμα, η μετατροπή της συγκέντρωσης κατά μάζα $C_{(Kgr/m^3)}$ σε $C_{(ppmv)}$ γίνεται με την παρακάτω σχέση[5]:

$$C_{(ppmv)} = 10^{-6} \frac{C_{(Kgr/m^3)}}{\rho_{(αερ.)}}$$

Όπου $\rho_{(αερ.)}$ είναι η πυκνότητα μάζας του αέριου συστατικού σε (Kgr/m^3) και υπολογίζεται ως εξής:

$$\rho_{(αερ.)} = \frac{M_{mol}P}{RT}$$

Όπου R είναι η παγκόσμια σταθερά των αερίων με τιμή $8,31 J K^{-1} mol^{-1}$ ή $m^3 Pa K^{-1} mol^{-1}$, M_{mol} είναι το μοριακό βάρος εκφρασμένο σε (Kgr/mol) , T είναι η απόλυτη θερμοκρασία εκφρασμένη σε βαθμούς Kelvin (K) και P είναι η πίεση εκφρασμένη σε Pascal (Pa).

Αντίστοιχα γίνεται και η μετατροπή της συγκέντρωσης κατά μάζα $C_{(Kgr/m^3)}$ σε $C_{(ppmw)}$:

$$C_{(ppmw)} = 10^{-6} \times \frac{C_{(Kgr/m^3)}}{\rho_{(Μειγ.)}}$$

Όπου $\rho_{(Μειγ.)}$ είναι η πυκνότητα μάζας του μείγματος σε (Kgr/m^3) και αν πρόκειται για αέριο (π.χ. αέρας) υπολογίζεται με τον ίδιο τρόπο με αυτόν του αναφέρθηκε.

Συνήθως η συγκέντρωση υπολογίζεται για τιμές θερμοκρασίας και πίεσης ίσες με 273,15 K ($0^\circ C$) και 100 kPa (1bar) αντίστοιχα (Standard Temperature and Pressure (STP)[6] ή Normal Temperature and Pressure (NTP)) και εκφράζεται ως $C_{(STP)}$ ή $C_{(NTP)}$.

1.3 Οργάνωση της πτυχιακής εργασίας

Η οργάνωση σε κεφάλαια του κειμένου της παρούσας πτυχιακής εργασίας έχει γίνει ως εξής:

- Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται η ανάλυση του σκοπού/στόχου της πτυχιακής εργασίας καθώς επίσης και η περιγραφή των βασικών εννοιών, όπως είναι η απορρόφηση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και της συγκέντρωσης ή περιεκτικότητας ενός συστατικού σε διάλυμα ή μίγμα, με έμφαση στα αέρια. Περιγράφονται οι μηχανισμοί αλληλεπίδρασης με την ύλη, οι μορφές απορρόφησης και δίνεται η μαθηματική έκφραση των παραπάνω εννοιών.
- Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια εκτενής αναφορά και περιγραφή του νόμου Beer-Lambert, μέσω του οποίου υλοποιήθηκε η μετρητική μέθοδος που ακολουθήθηκε. Ακόμα, αναλύεται η έννοια της φασματοσκοπίας από απορρόφηση και περιγράφονται διάφορες σύγχρονες μέθοδοι εφαρμογής της στην μέτρηση της συγκέντρωσης σε αέρια μίγματα.
- Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση του οπτοηλεκτρονικού συστήματος που κατασκευάστηκε. Ειδικότερα, η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε κατά τον σχεδιασμό περιελάμβανε: την εκλογή του αερίου δοκιμής και την περιγραφή αντίστοιχων μεθόδων μέτρησης της συγκέντρωσης, (όπως αυτές περιγράφονται στη διεθνή βιβλιογραφία) σύμφωνα με τις οποίες έγινε και η τελική εκλογή των μονάδων. Ακόμα περιγράφονται, οι δυνατότητες και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος, σύμφωνα με τις προδιαγραφές που τέθηκαν (για εφαρμογή εργαστηριακών μετρήσεων) και παρουσιάζονται οι τοπολογίες σύνδεσης της συσκευής. Τέλος, αναλύονται διεξοδικά τα κυκλώματα των βαθμίδων που απαρτίζουν τις διάφορες μονάδες.

- Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφεται η λειτουργία των περιφερικών μονάδων του μικροελεγκτή που αποτέλεσε την «καρδιά» του συστήματος, καθώς επίσης και των λειτουργικών μονάδων του προγράμματος που αναπτύχθηκε.
- Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα του πειραματικού χαρακτηρισμού της συσκευής, καθώς επίσης και τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από αυτά.

Κεφάλαιο 2^ο

2 Θεωρητικό υπόβαθρο-Ιστορική ανάδρομη

2.1 Νόμος Beer-Lambert

Εισαγωγή - Ιστορική αναδρομή [7]

Στη κυματική οπτική, ο νόμος Beer-Lambert, γνωστός και ως νόμος Beer-Lambert-Bouguer (που ονομάστηκε έτσι από τους August Beer, Johann Heinrich Lambert και Pierre Bouguer) αφορά την εξασθένηση του φωτός λόγω των ιδιοτήτων του υλικού μέσα στο οποίο ταξιδεύει.

Ο νόμος ανακαλύφθηκε από τον Pierre Bouguer πριν από το 1729. Συχνά όμως αποδίδεται στον Johann Heinrich Lambert, ο οποίος στο βιβλίο του "Photometria" (1760) αναφέρεται στην εργασία του Bouguer "Bouguer's Essai d'Optique sur la Gradation de la Lumiere", (Claude Jombert, Παρίσι, 1729) και παραθέτει αποσπάσματα από το βιβλίο αυτό. Πολύ αργότερα, το 1852 ο August Beer επέκτεινε την εκθετική εξασθένηση του νόμου για να συμπεριλάβει την συγκέντρωση των διαλυμάτων στον συντελεστή εξασθένησης.

Παρουσίαση του νόμου

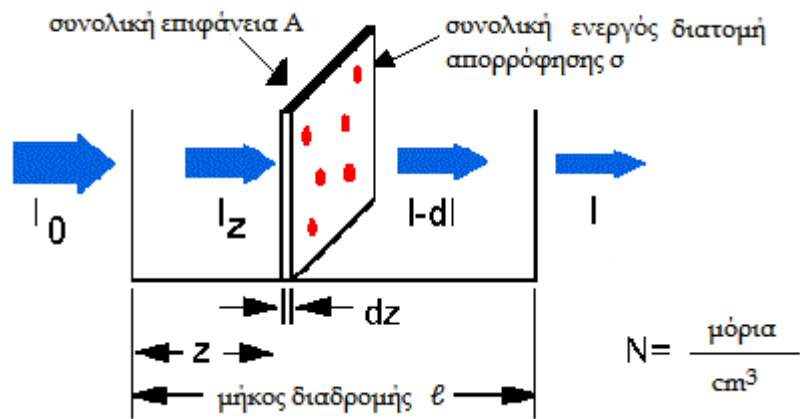
Αρχικά, ο νόμος Beer-Lambert για πρώτη φορά επινοήθηκε ανεξάρτητα από τους Lambert και Beer και παρουσιάστηκε αντίστοιχα[7], ως νόμος του Lambert ο οποίος αναφέρει ότι η απορρόφηση είναι ευθέως ανάλογη με το πάχος του δείγματος, και ως νόμος του Beer ο οποίος αναφέρει ότι η απορρόφηση είναι ανάλογη με τη συγκέντρωση του δείγματος. Η σύγχρονη παρουσίαση του νόμου των Beer-Lambert συνδυάζει τους δύο νόμους και συσχετίζει την απορρόφηση με τη συγκέντρωση, καθώς και με το πάχος (μήκος διαδρομής) του δείγματος.

Η φυσική έννοια του νόμου Beer-Lambert είναι σχετικά απλή στην παρουσίασή της. Αν χωρίσουμε το δείγμα σε λεπτά φύλλα, κάθετα προς την δέση του φωτός, τότε το φως που εξέρχεται από ένα φύλλο, επειδή μερικά από τα φωτόνια θα έχουν ενσωματωθεί από τα μόρια του δείγματος και δεν θα καταφέρουν να εξέλθουν από την άλλη πλευρά, θα έχει ελαφρώς μικρότερη ένταση σε σχέση με το φως που εισήλθε σε αυτό. Επειδή η φυσική περιγραφή του προβλήματος ανάγεται σε όρους διαφορών (ένταση πριν και μετά καθώς το φως περνά μέσα από το φύλλο) είναι εύκολο να περιγραφεί η εξασθένηση με ένα μοντέλο συνήθους διαφορικής εξίσωσης[7]:

$$dI = \beta I dz$$

Σε αυτήν ορίζεται, η διαφορά στην ένταση (dI), λόγω της εξασθένησης που δημιουργεί το φύλλο του υλικού, ως ένα ποσοστό (β) της έντασης του φωτός (I) που εισέρχεται σε αυτό. Το πάχος του φύλλου (dz) μπορεί να θεωρηθεί ως ο συντελεστής της κλίμακας του αριθμητικού εύρους όπου ορίζεται η ποσότητα της εξασθένησης. Αυτή η εννοιολογική επισκόπηση χρησιμοποιεί το β για να περιγράψει πόσο φως έχει εξασθενήσει. Το μόνο που είναι σίγουρο για την τιμή αυτής της σταθεράς είναι ότι θα είναι διαφορετική για κάθε υλικό και οι τιμές της θα πρέπει να περιορίζονται μεταξύ του -1 και του 0.

Η παράγραφος που ακολουθεί καλύπτει την έννοια της σταθεράς (β) και την περιγράφει με μεγαλύτερη λεπτομέρεια.



Εικόνα 1: Σχηματική παράσταση του νόμου Beer-Lambert[8].

Θεωρώντας ότι τα σωματίδια έχουν μια ενεργό διατομή εξασθένησης (δηλαδή, μια περιοχή) σ , κάθετη προς τη διαδρομή του φωτός μέσα στο διάλυμα, έτσι ώστε ένα φωτόνιο απορροφάται εάν συγκρουστεί με ένα σωματίδιο και διαδίδεται εάν όχι. Αρχικά ορίζουμε τον παράλληλο άξονα προς την διεύθυνση διάδοσης του φωτός ως (z), την επιφάνεια και το πάχος (κατά μήκος του άξονα z) των τριών διαστάσεων πλάκας του χώρου μέσω της οποίας διέρχεται το φως ως (A) και (dz) αντίστοιχα. Υποθέτουμε ότι το πάχος (dz) είναι αρκετά μικρό, έτσι ώστε ένα σωματίδιο μέσα στην πλάκα να μην επικαλύπτει κανένα άλλο όταν η κατεύθυνση παρατήρησης είναι κατά μήκος του z . Η συγκέντρωση των σωματιδίων στην πλάκα συμβολίζεται με N . Προκύπτει ότι το κλάσμα του πλήθους ελάττωσης των φωτονίων με εκείνο των φωτονίων που διέρχονται μέσω της πλάκας είναι ίσο με την συνολική αδιαφανή επιφάνεια των σωματιδίων στην πλάκα, $\sigma ANdz$, διαιρούμενο με το εμβαδόν της πλάκας A , δηλαδή σNdz . Εκφράζοντας τον αριθμό των φωτονίων με την μορφή της έντασης του φωτός I_z (συνάρτηση της απόστασης z), η προηγούμενη διαφορική εξίσωση δείχνει την ελάττωση της έντασης dIz ως εξής :

$$dI_z = -\sigma N I_z dz$$

Το αρνητικό πρόσημο υποδηλώνει αυτήν την ελάττωση της έντασης. Η λύση σε αυτή την απλή διαφορική εξίσωση επιτυγχάνεται με την ολοκλήρωση κατά μέλη:

$$\ln(I_z) = -\sigma N z + C$$

Η διαφορά των εντάσεων I_0 στο $z = 0$ και I_ℓ στο $z = \ell$, για μία πλάκα πραγματικού πάχους ℓ θα είναι σύμφωνα με την προηγούμενη εξίσωση:

$$\ln(I) - \ln(I_0) = (-\sigma \ell N + C) - (\sigma 0 N + C) = -\sigma \ell N$$

Αναδιατάσσοντας και υψώνοντας σε δυνάμεις η εξίσωση αποδίδει την διάδοση T :

$$T = \frac{I}{I_0} = e^{-\sigma \ell N} = e^{-\Sigma \ell}$$

Ακόμα ορίζονται οι έννοιες της απόσβεσης At και της απορρόφησης A ως εξής:

$$At = -\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = \Sigma \ell = \sigma \ell N$$

$$A = -\log_{10}\left(\frac{I}{I_0}\right) = \frac{\Sigma \ell}{2.303} = \Sigma' \ell$$

Η προηγούμενη ανάλυση υποθέτει ότι κάθε σωματίδιο εξασθενητής συμπεριφέρεται ανεξάρτητα σε σχέση με το φως και δεν επηρεάζεται από άλλα σωματίδια.

Όταν η διαδρομή είναι αρκετά μεγάλη, έτσι ώστε ο συντελεστής εξασθένησης να θεωρείται μη ομογενής, η αρχική εξίσωση πρέπει να τροποποιηθεί ως εξής:

$$T = \frac{I_\ell}{I_0} = e^{-\int_0^\ell \Sigma dz} = e^{-\sigma \int_0^\ell N dz}$$

Ως ποσότητα το Σ καλείται το σύνολο της μακροσκοπικής ενεργού διατομής εξασθένησης ή αλλιώς συντελεστής εξασθένησης, ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής (για παράδειγμα, χρησιμοποιείται ο πρώτος όρος στην θεωρία της μεταφοράς των κυμάτων και ο δεύτερος στην θωράκιση και προστασία από την ακτινοβολία). Ο συντελεστής εξασθένησης μπορεί να εκφραστεί και ως το γινόμενο της απορροφητικότητας (ϵ) του εξασθενητή με την συγκέντρωση (C) των συστατικών του, δηλαδή ως $\Sigma = \epsilon C$. Διάφορες μονάδες έχουν χρησιμοποιηθεί για την έκφρασή τους, όπως για παράδειγμα, εάν στο γινόμενο χρησιμοποιείται η μοριακή συγκέντρωση ($\text{mole}\cdot\text{L}^{-1}$), τότε η απορροφητικότητα (ονομάζεται και molar extinction coefficient[9]) εκφράζεται με τις μονάδες ($\text{L}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{mole}^{-1}$) και συνδέεται με την ενεργό διατομή της απορρόφησης (σ) (εκφρασμένη σε cm^2), μέσω της σταθεράς Avocadro N_A με την παρακάτω σχέση:

$$\sigma = 1000 \ln(10) \frac{\varepsilon}{N_A} = 3,82 \times 10^{-21} \varepsilon$$

Περιορισμοί εφαρμογής του νόμου[7]

Ο νόμος του Beer-Lambert ισχύει με τους εξής περιορισμούς:

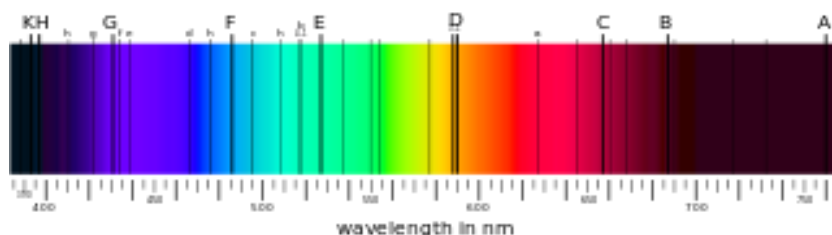
- ο μόνος μηχανισμός αλληλεπίδρασης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και της διαλυμένης ουσίας είναι η απορρόφηση,
- η προσπίπτουσα ακτινοβολία είναι μονοχρωματική,
- η απορρόφηση γίνεται σε ένα όγκο διαλύματος ομοιόμορφης διατομής,
- τα σωματίδια που απορροφούν δρουν ανεξάρτητα το ένα από το άλλο και άσχετα προς τον αριθμό και το είδος τους,
- τα διαλύματα δεν είναι πυκνά.
-

Ο νόμος του Beer-Lambert δεν ισχύει για πυκνά διαλύματα ($c > 0,01M$), διότι σε αυτά οι αποστάσεις μεταξύ των σωματιδίων που απορροφούν γίνονται τόσο μικρές ώστε καθένα από αυτά να επηρεάζει την κατανομή φορτίου στα γειτονικά σωματίδια και συνεπώς και την ικανότητα τους να απορροφούν ακτινοβολία ορισμένου μήκους κύματος. Σε πυκνά διαλύματα δεν παραμένει σταθερή η μοριακή απορροφητικότητα ε . Στην πράξη το είδος αυτό της απόκλισης από τον νόμο του Beer-Lambert σπανίως δημιουργεί πρόβλημα, γιατί συνήθως μετριέται η απορρόφηση αραιών διαλυμάτων.

2.2 Φασματοσκοπία απορρόφησης

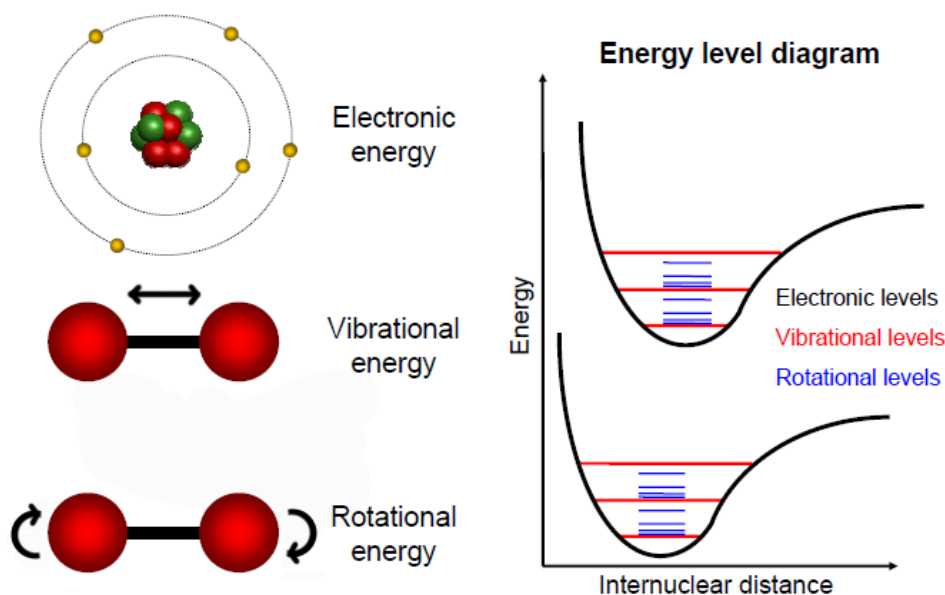
Εισαγωγή -φάσματα απορρόφησης

Η φασματοσκοπία απορρόφησης[10] αναφέρεται στις τεχνικές εκείνες με τις οποίες μπορούμε να μετρήσουμε την απορρόφηση της ακτινοβολίας όταν αυτή αλληλεπιδρά με την ύλη ως συνάρτηση του μήκους κύματος. Το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι το φάσμα απορρόφησης και δίνεται με την μορφή της έντασης ως συνάρτηση της συχνότητας. Το φάσμα αυτό αποτελεί το «δαχτυλικό αποτύπωμα» του μέσου απορρόφησης και όταν συνδυαστεί με τον νόμο Beer-Lambert μπορεί να δώσει πληροφορίες για την συγκέντρωση των συστατικών του (ποσοτική ανάλυση).



Εικόνα 2: Οπτικό φάσμα απορρόφησης (Fraunhofer lines) του ήλιου όπως παρατηρήθηκε από τον γερμανό φυσικό [Joseph von Fraunhofer](#) (1787–1826)[10].

Οι γραμμές απορρόφησης ταξινομούνται ανάλογα την φύση των κβαντικών μηχανισμών που λαμβάνουν χώρα μέσα στα άτομα ή στα μόρια. Υπάρχουν γραμμές του φάσματος που αντιστοιχούν στις περιστροφικές (rotational) αλλαγές των ατόμων ή των μορίων, γραμμές που αντιστοιχούν στις γραμμικές ταλαντώσεις (vibrational) και στις αλλαγές των καταστάσεων των ηλεκτρονίων (electronic). Οι πρώτες αντιστοιχούν τυπικά στο φάσμα των μικροκυμάτων, οι δεύτερες στο υπέρυθρο και οι τελευταίες στο ορατό και στο υπέρυθρο. Ακόμα μπορεί να υπάρξουν και γραμμές που οφείλονται στον συνδυασμό των προηγούμενων μεταβολών.

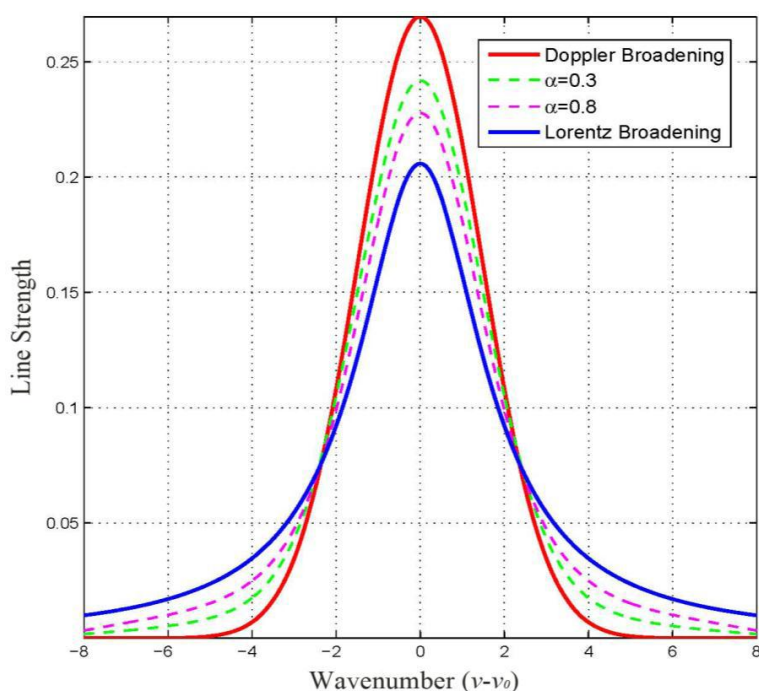


Εικόνα 3: Διάγραμμα ενέργειας του μορίου, όπου περιλαμβάνονται οι electronic, vibrational και rotational στάθμες[11].

Μηχανισμοί διεύρυνσης [12]

Η ενέργεια που προβλέπεται από τους κβαντικούς μηχανισμούς καθορίζει πρωτίστως και την συχνότητα των γραμμών του φάσματος, αλλά καμία γραμμή δεν εμφανίζεται απειροστά στενή. Διάφοροι μηχανισμοί συμβάλουν στην φασματική διεύρυνση όπως αυτή παρατηρείται και είναι για παράδειγμα οι ατέλειες των οργάνων μέτρησης, μηχανισμοί

επαναπορρόφησης και άλλοι που σχετίζονται με την ίδια την φύση της ακτινοβολίας. Μερικοί από αυτούς είναι οι παρακάτω: α) ο πιο βασικός μηχανισμός διεύρυνσης στηρίζεται στην Αρχή της αβεβαιότητας ενέργειας – χρόνου ($\Delta t \cdot \Delta E \geq \hbar$, όπου \hbar είναι η σταθερά του Planck), β) η διεύρυνση που οφείλεται στις συγκρούσεις μεταξύ των σωματιδίων, οι οποίες διαταράσσουν τον χρόνο μετάπτωσης στην μόνιμη κατάσταση γ) αυτή που οφείλεται στο φαινόμενο Doppler και δ) ο συνδυασμός του φαινομένου Doppler με την διεύρυνση λόγω συγκρούσεων ονομάζεται φαινόμενο Voigt και δίνει διεύρυνση με μορφή που αντιστοιχεί στο γινόμενο συνέλιξης τους. Η μορφή της διεύρυνσης των δύο πρώτων μηχανισμών είναι η συνάρτηση Lorentzian. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζονται οι μορφές των διευρύνσεων που περιγράφηκαν.



Εικόνα 4: Σύγκριση της μορφής των γραμμών Doppler, Lorentzian και Voigt Doppler. Ο συντελεστής α ορίζεται ως ο λόγος του εύρους FWHM (Full Width at Half Maximum) των Lorentzian και Doppler. Η κατανομή Voigt εμφανίζεται ανάμεσα σε αυτές που αντιστοιχούν στις Gaussian και Lorentzian και τείνει να τις προσεγγίσει όταν ο συντελεστής α παίρνει τις οριακές τιμές μηδέν και άπειρο, αντίστοιχα.

Μέθοδοι φασματοσκοπίας

Διάφορες μέθοδοι φασματοσκοπίας έχουν αναπτυχθεί με εφαρμογή στην ποιοτική και ποσοτική ανάλυση. Τα φάσμα που αναλύουν σχετίζεται με τον μηχανισμό απορρόφησης και η εκλογή του γίνεται ανάλογα με τη φύση της ύλης (στερεά, υγρά, αέρια), μίξη για το οποίο είναι σχεδιασμένες. Σήμερα υπάρχουν φασματόμετρα ή αναλυτές που χρησιμοποιούνται στην ποσοτική ανάλυση και λειτουργούν στο υπέρυθρο (Infrared Spectroscopy (IRS))[13] (ή συνήθως σε κάποια από τις περιοχές του, το μακρινό υπέρυθρο (far infrared),

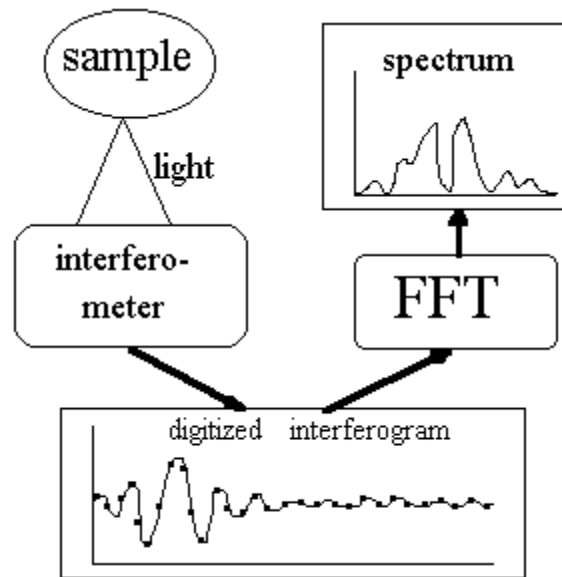
μέσο υπέρθυρο (mid-infrared) και κοντινό υπέρθυρο (near infrared)) και στο υπεριώδες (UV) σε συνδυασμό με το ορατό (visible) (Ultraviolet-Visible Spectroscopy (UV/Vis)). Πολλές παραλλαγές των βασικών μεθόδων έχουν αναπτυχθεί με σκοπό να καλυφτούν ιδιαιτερότητες όπως είναι το είδος του μείγματος το οποίο μπορεί να αποτελείται από γνωστά ή άγνωστα συστατικά, με αλληλεπίδραση μεταξύ τους όσο αφορά την απορρόφηση σε κοινό φάσμα, μικρή συγκέντρωση (ίχνος) του προς ανίχνευση συστατικού μέσα σε περιβάλλον θορύβου και διαταραχών (π.χ. ανίχνευση ρύπων στην ατμόσφαιρα). Άλλοι παράγοντες εκτός της απορρόφησης, όπως είναι η σκέδαση μπορεί να δημιουργήσουν σημαντικές αποκλίσεις από την πρόβλεψη που ορίζει ο νομός Beer-Lambert και θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στην εκλογή της μεθόδου μέτρησης.

Η κύρια βασική ταξινόμηση μπορεί να γίνει σύμφωνα με τον τρόπο παραγωγής και ανάλυσης του φάσματος λειτουργίας τους. Οι βασικές κατηγορίες που χωρίζονται είναι τρεις και περιλαμβάνουν αναλυτές που διαχωρίζουν το φάσμα χρησιμοποιώντας φράγματα περίθλασης ή πρίσματα και ονομάζονται φασματομέτρα διασποράς (dispersive), σε αυτούς που χρησιμοποιούν μετασχηματισμό Fourier για την ανασύσταση του πολυπλεγμένου φάσματος και σε εκείνους που δεν αναλύουν το φάσμα (non-dispersive).

Μερικές από τις σύγχρονες μεθόδους – τεχνικές που χρησιμοποιούνται σήμερα για την μέτρηση της συγκέντρωσης των αερίων αναλύονται παρακάτω:

- **Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)**

Η φασματοσκοπία (FTIR) ανήκει στην κατηγορία έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως στην ποσοτική ανάλυση ρύπων στην ατμόσφαιρα [14,15]. Τα πλεονεκτήματά της σε σχέση με τις μεθόδους διασποράς περιλαμβάνουν την δυνατότητα μέτρησης πολλών ρύπων σύγχρονος και σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα, με μεγάλη ευαισθησία[16]. Ακόμα έχει την δυνατότητα να ανιχνεύσει ίχνη συστατικών με μικρή συγκέντρωση (στην περιοχή των ppbv) απαιτώντας σχετικά μικρό μέγεθος δείγματος. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το σκαρίφημα που περιγράφει την αρχή λειτουργίας της μεθόδου. Σε αυτό διακρίνονται τα βασικά μέρη που είναι το συμβολόμετρο (συνήθως χρησιμοποιείται το συμβολόμετρο (interferometer) Michelson[17] με το ένα του άκρο δονούμενο) το οποίο παράγει το φάσμα της έντασης ως συνάρτησης του χρόνου και η συσκευή μετατροπής στο πεδίο των συχνοτήτων (Fast Fourier Transform (FFT)).



Εικόνα 5: Σχηματική παράσταση της μεθόδου FTIR[18].

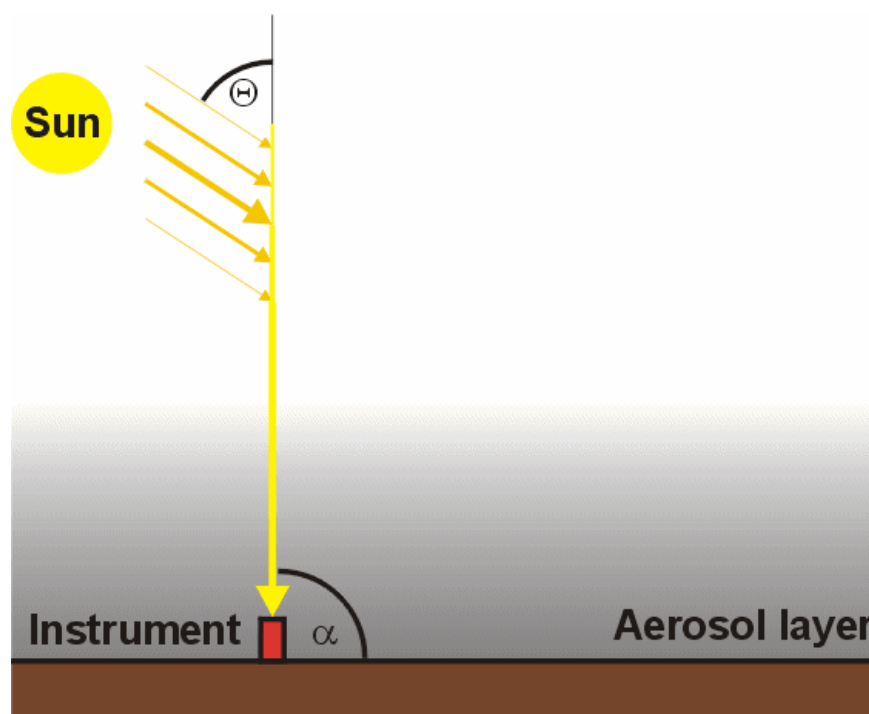
- **Laser Spectroscopy**

Χρησιμοποιώντας τον νόμο του Beer-Lambert μπορεί εύκολα να μετρηθεί η συγκέντρωση αερίων με την χρήση ενός Laser μονού τρόπου και ρυθμιζόμενου μήκους κύματος (tunable laser), σαρώνοντας σε μια συνεχή περιοχή από μήκη κύματος όπου υπάρχουν οι κορυφές απορρόφησης του εξεταζόμενου αερίου. Όταν ως Laser χρησιμοποιείται ένα διοδικό Laser η μέθοδος ονομάζεται **TDLAS (tunable diode laser absorption spectroscopy)** [19-22]. Η ακρίβεια της μέτρησης επηρεάζεται από την αστάθεια του τρόπου λειτουργίας του Laser καθώς επίσης και την παρουσία άλλων αερίων που αλληλεπιδρούν έτσι απαιτείται η χρήση σχετικά ακριβών Lasers που παρέχουν την απαιτούμενη σταθερότητα. Μία άλλη εναλλακτική μέθοδος που έχει αναπτυχθεί, εξαλείφει τις προηγούμενες επιδράσεις στην ακρίβεια παρέχοντας μέτρια ευαισθησία και ονομάζεται Correlation spectroscopy (COSPEC). Κάνοντας χρήση διοδικών Lasers πολλαπλού τρόπου λειτουργίας -Multimode diode laser (MDL)-[23-26], η μέθοδος στηρίζεται στην χρονική συσχέτιση (correlation) ανάμεσα στα σήματα απορρόφησης του εξεταζόμενου αερίου με αυτού που χρησιμοποιείται ως αναφορά με γνωστή συγκέντρωση. Το μειονέκτημα της είναι ο περιορισμός στην ευαισθησία λόγω φασματικού εύρους. Εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί Laser οπτικής ίνας πολλαπλού κύματος -Multi-wavelength fiber Laser- όπου παρέχει καλύτερη ευαισθησία και επιλεκτικότητα[27-29]. Ακόμα εξαιτίας της δυνατότητας ρύθμισης του μήκους κύματος σε μια ευρέα περιοχή, μπορούν να μετρηθούν ταυτόχρονα οι συγκεντρώσεις διαφορετικών αερίων.

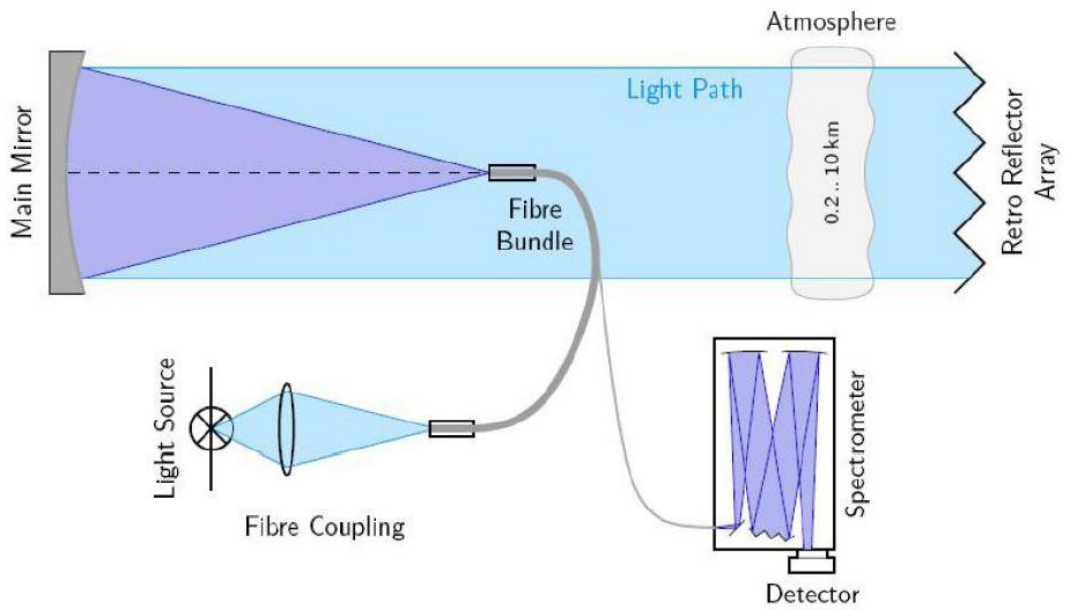
- **Differential Optical Absorption Spectrometry [30]**

Η μέθοδος DOAS χρησιμοποιείται στην ατμοσφαιρική χημεία για την μέτρηση της συγκέντρωσης αερίων που περιέχονται σε μικρή ποσότητα στην ατμόσφαιρα (ιχνη). Η μέθοδος αυτή όταν συνδυάζεται με τα συνήθη οπτικά φασματόμετρα όπως είναι τα πρίσματα ή τα φράγματα περίθλασης και με την χρήση αυτοματοποιημένων πλατφόρμων παρατήρησης, αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο μέτρησης. Τα όργανα υλοποίησης της τεχνικής αυτής χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες: Στα παθητικά όπου η πηγή του φωτός είναι ο ήλιος (π.χ. τα πολλαπλών αξόνων- MAX(Multiaxial -) και στα ενεργά, όπως είναι τα μεγάλου μήκους απόστασης -longpath(LP)- και τα ενίσχυσης με κοιλότητα -cavity-enhanced(CE)- συστήματα όπου περιλαμβάνουν την δική τους πηγή φωτός.

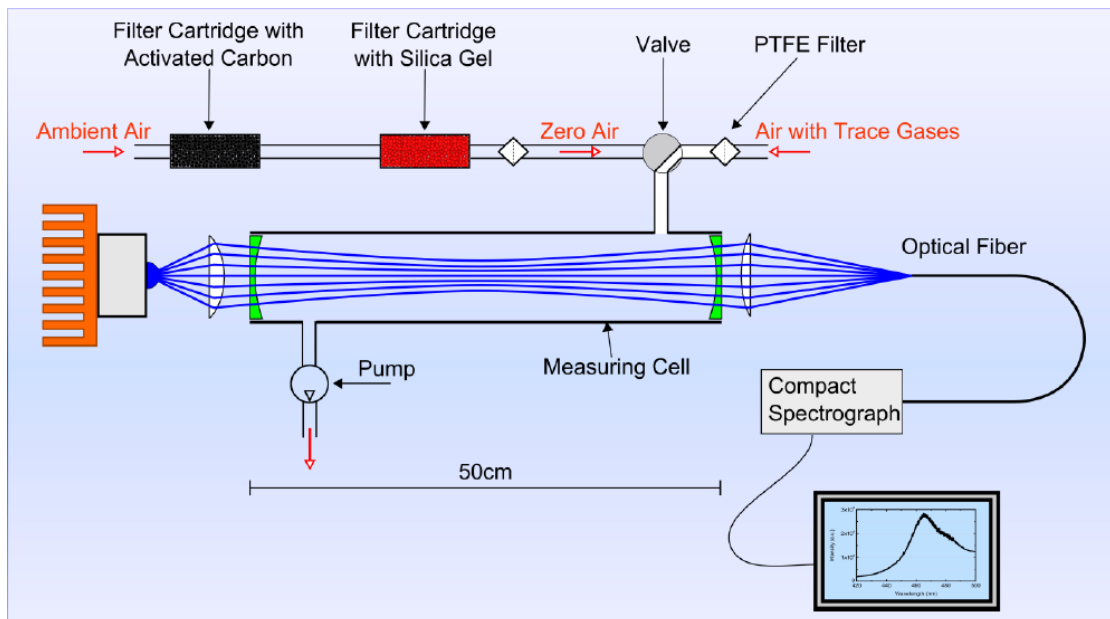
Η μέθοδος αυτή πλεονεκτεί έναντι άλλων στις περιπτώσεις όπου το μίγμα περιλαμβάνει και αέρια με ακαθόριστο «δαχτυλικό» φασματικό αποτόπωμα και επικρατούν συνθήκες με υψηλή σκέδαση.



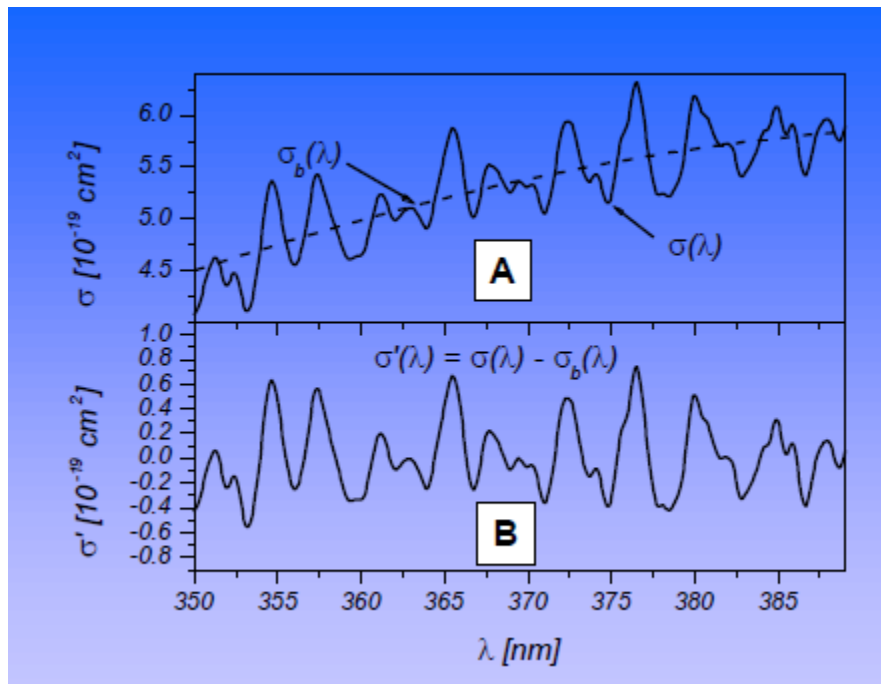
Εικόνα 6: Σχηματική παράσταση της Multiaxial τεχνικής



Εικόνα 7: Σχηματική παράσταση της longpath τεχνικής



Εικόνα 8: Σχηματική παράσταση της cavity-enhanced τεχνικής.



Εικόνα 9: Ανασύσταση της ωφέλιμης ενεργού διατομής $\sigma'(\lambda)$ από το μεικτό σήμα $\sigma(\lambda)$ με την αφαίρεση της $\sigma_b(\lambda)$ που αποτελεί την “base line” από σκέδαση.

Κεφάλαιο 3^ο

3 Περιγραφή μετρητικού συστήματος

3.1 Μεθοδολογία σχεδίασης

Εισαγωγή

Η μεθοδολογία σχεδίασης του μετρητικού συστήματος περιελάμβανε τα εξής βασικά στάδια:

- 1) Ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας σχετικά με τις τεχνικές μέτρησης της συγκέντρωσης στο εργαστήριο που οδήγησαν στην εκλογή του είδους του πομπού (LED) και του δέκτη (φωτοдиодος) και δυνατοτήτων όπως είναι: η αυτόνομη λειτουργία, η σύνδεση σε διαφόρων τύπων συστημάτων συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων.
- 2) Επιλογή του όζοντος ως αερίου εφαρμογής λόγω του μεγάλου ενδιαφέροντος που υπάρχει για την μελέτη του. Η εκλογή του κατάλληλου μήκους κύματος έγινε με γνώμονα την απόδοση (μεγάλη τιμή της ενεργού διατομής απορρόφησης), την μικρή αλληλεπίδραση με αλλά συστατικά (αέρια) του αέρα και την εκμετάλλευση της ανάπτυξης της τεχνολογίας κατασκευής των LEDs που επέτρεψε την λειτουργία σε μήκη κύματος της UV-C (<290nm) περιοχής.
- 3) Οι τοπολογίες των κυκλωμάτων έγινε με γνώμονα τον λόγο κόστος προς απόδοση. Μεγάλο βάρος δόθηκε στο κύκλωμα του πομπού όπου χρησιμοποιήθηκε ένας ολοκληρωμένος οδηγός του LED με δυνατότητα παροχής σταθερού ρεύματος, προστασία από υπερθέρμανση, αποφυγή υπερ-οδήγησης σε περίπτωση βλάβης κ.α. Για την υλοποίηση της κεντρικής μονάδας χρησιμοποιήθηκε μικροελεγκτής με ενσωματωμένες τις βαθμίδες ψηφιοποίησης του αναλογικού σήματος - analogue to digital converter (ADC)-, των σειριακών διασυνδέσεων - Universal Serial Communication Interface (USCI)- τις μνήμες αποθήκευσης του προγράμματος(τύπου Flash) και δεδομένων κ.α.

Τεχνικές μέτρησης στο εργαστήριο

Διάφορες μέθοδοι έχουν χρησιμοποιηθεί για την μέτρηση του όζοντος σε βιομηχανικές εφαρμογές, ανίχνευση επίγειων ρύπων και πειραματικές μετρήσεις στο εργαστήριο. Στις συμβατικές μεθόδους ανήκουν οι τεχνικές που χρησιμοποιούν αισθητήρες, οι οποίοι στηρίζονται στην αλλαγή της αγωγιμότητας σε ένα λεπτό φύλλο ημιαγωγού που περιέχει ZnO [31,32], In₂O₃ [33,34] και σε αυτές που χρησιμοποιούν γαλβανόμετρα [35]. Τα πλεονεκτήματα τους είναι η συμπαγή τους κατασκευή και το μικρό κόστος. Στα μειονεκτήματα ανήκει ο μικρός χρόνος ζωής (μικρότερος από ένα έτος) και η μικρή τους ακρίβεια $\pm 50\%$. Μεγάλη εφαρμογή βρίσκουν οι μέθοδοι που στηρίζονται στην απορρόφηση της υπεριώδους (UV) ακτινοβολίας. Για παράδειγμα, έχει χρησιμοποιηθεί στην αεροδιαστημική βιομηχανία [36,37] σύστημα με λυχνία ατμών υδραργύρου (Hg) με μέγιστο πλάτος εκπομπής στα 254nm. Διάφοροι ερευνητές έχουν χρησιμοποιήσει UV ακτινοβολία για την ανίχνευση του όζοντος στην ατμόσφαιρα με την μέθοδο της χημικής φωταύγειας [38]. Υπήρξαν προσπάθειες να χρησιμοποιηθούν οπτικές ίνες για την ανίχνευση [39]. Ωστόσο, υπάρχουν λίγες αναφορές σχετικά με τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης του όζοντος στον αέρα, όπου χρησιμοποιώντας συστήματα λυχνιών Hg, επιτεύχθηκε μία ακρίβεια στην μέτρηση της τάξης περίπου των $\pm 0,5\%$, με υψηλή ευαισθησία και διάρκεια ζωής αλλά με υψηλό κόστος και δυσκολία στην κατασκευή. Στις προσπάθειες που έγιναν για την επίτευξη υψηλής ευαισθησίας [40], χρησιμοποιήθηκε θάλαμος απορρόφησης μεγάλου μήκους. Ωστόσο, το κόστος αυτού του συστήματος ήταν πολύ υψηλό και παρουσίαζε αστάθειες. Η διάρκεια ζωής του λαμπτήρα Hg ήταν μόνο ένα έτος περίπου και το μέγεθος του συστήματος ήταν πολύ μεγαλύτερο από τους συμβατικούς αισθητήρες. Βασικό μειονέκτημα είναι ο ίδιος ο υδράργυρος που χρησιμοποιείται σε αυτές τις λυχνίες, αφού είναι ένα επιβλαβές μέταλλο, το οποίο έχει δυνητικά επιζήμιες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Τα τελευταία χρόνια, οι LEDs αποτελούν εναλλακτικές πηγές UV ακτινοβολίας και παρουσιάζουν τα παρακάτω πλεονεκτήματα έναντι των λυχνιών Hg: μικρότερο κόστος, συμπαγή δομή της κατασκευής τους, μεγάλο χρόνο ζωής, χρονική σταθερότητα και κατευθυντικότητα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας και τέλος την ασφαλέστερη χρήση, αφού δεν περιέχουν επικίνδυνα υλικά για την υγεία. Αν και τα LEDs έχουν χρησιμοποιηθεί στην μέτρηση της συγκέντρωσης του όζοντος ήδη από την δεκαετία του 80, αλλά σε μήκη κύματος που ανήκουν στο ορατό και στο υπέρυθρο [41], μόνο τα τελευταία χρόνια, η εξέλιξη της τεχνολογίας επέτρεψε την εφαρμογή τους στην UV-C περιοχή [42-47].

Εκλογή αερίου δοκιμής

Η εκλογή του όζοντος ως αερίου δοκιμής έγινε γιατί το συγκεκριμένο αέριο παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην ζωή του ανθρώπου και γενικότερα στην διατήρηση της ζωής στον πλανήτη. Από την μία μεριά η παρουσία του στην στρατόσφαιρα (12-30 km) αποτελεί μια ασπίδα προστασίας από την υπεριώδη (UV) ακτινοβολία και από την άλλη η συγκέντρωση του στην τροπόσφαιρα (<12 km) και στην γήινη επιφάνια παράγει τοξικό νέφος, επικίνδυνο για την ζωή[48]. Το όζον, αν και είναι ένα τοξικό αέριο βρίσκει εφαρμογή σε ένα ευρύ φάσμα βιομηχανικών εφαρμογών όπως: στον καθαρισμό του αέρα, στον καθαρισμό και την αποστείρωση βιοϋλικών, στην αποστείρωση των σωληνώσεων ύδρευσης και την λεύκανση και απόσπηση γενικότερα[49-51]. Το όζον έχει έγκριση για τον καθαρισμό του νερού στις πισίνες, ως μία κατάλληλη εναλλακτική μέθοδος αντικατάστασης των παραδοσιακών μέσων απολύμανσης (π.χ. χλώριο). Ακόμα έχει έγκριση για την χρήση του ως αντιμικροβιακός παράγοντας στα τρόφιμα [52-58] από τον Αμερικάνικο Οργανισμό Τροφίμων (FDA). Ωστόσο, η έκθεση σε μη ασφαλή επίπεδα συγκέντρωσης του όζοντος[59] συνδέεται με διάφορους κινδύνους για την υγεία, όπως είναι, η αλλεργία, το άσθμα, η δυσκολία στην αναπνοή, οι διάφορες φλεγμονές, η πρόωρη γήρανση των πνευμόνων και διάφοροι άλλοι ερεθισμοί στο ανθρώπινο σώμα. Υπάρχουν αναφορές τις επιδράσεις του ως προϊόν της διαδικασίας ξήρανσης σε ένα τυπογραφικό πιεστήριο που μπορεί να οδηγήσουν στην ανάπτυξη καρκίνου και ασθενειών που σχετίζονται με την καρδιά και το αίμα [60-64].

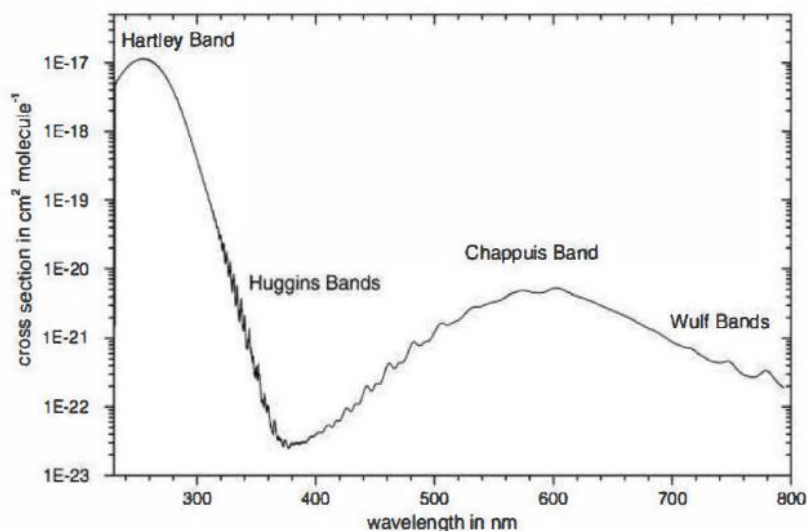
Από όλους αυτούς τους λόγους που προαναφέρθηκαν είναι προφανής η αναγκαιότητα της επιτήρησης και μέτρησης με ακρίβεια του όζοντος τόσο στην ατμόσφαιρα όσο και στην βιομηχανική εφαρμογή του.

Ειδικότερα:

- Η παρατήρηση του σχηματισμού και της εξέλιξης της τρύπας του όζοντος που υπάρχει στην Ανταρκτική.
- Η ανάγκη για βελτιωμένη ακρίβεια στις μετρήσεις με σκοπό την καλύτερη πρόγνωση των ατμοσφαιρικών φαινομένων που συμμετέχει.
- Επιτήρηση και έλεγχος της συγκέντρωσης του σε όλες τις βιομηχανικές εφαρμογές.
- Επιτήρηση για την αποφυγή της τοξικότητας του σε όλους τους χώρους της ανθρώπινης δραστηριότητας.

Σύμφωνα με την μελέτη που προηγήθηκε για τις μεθόδους ανίχνευσης του όζοντος, εκλέχθηκε το μήκος κύματος που χρησιμοποιήθηκε στην υλοποίηση της συσκευής να είναι ίσο με 254nm, δηλαδή ίσο με εκείνο στο οποίο εμφανίζεται η μέγιστη τιμή της ενεργού διατομής απορρόφησης($\sim 1,17 \times 10^{-17}$ εκφρασμένη σε $\text{cm}^2 \cdot \text{molecule}^{-1}$). Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η τιμή της ενεργούς διατομής σε συνάρτηση με τις περιοχές του φάσματος που ονομάζονται (**Hartley band**), (**Huggins band**), (**Chappius band**), και (**Wulf band**) και καλύπτουν το εύρος από μήκη

κύματος ανάμεσα στα 240nm και 800nm. Σε αυτό το σχήμα φαίνονται καθαρά οι μέγιστες τιμές απορρόφησης που αντιστοιχούν στα μήκη κύματος 253,7nm και 603nm [65]. Για πρακτικούς λόγους, στον υπολογισμό της συγκέντρωσης χρησιμοποιήθηκε ο συντελεστής μοριακής απορροφητικότητας με τιμή ίση με 3000 ± 30 ($L \cdot cm^{-1} \cdot mole^{-1}$) για μήκος κύματος 253,7nm για κανονικές συνθήκες θερμοκρασίας 273K και πίεσης 101,3kPa[67].



Εικόνα 10: Ενεργός διατομή απορρόφησης του όζοντος ως συνάρτηση του μήκους κύματος [66].

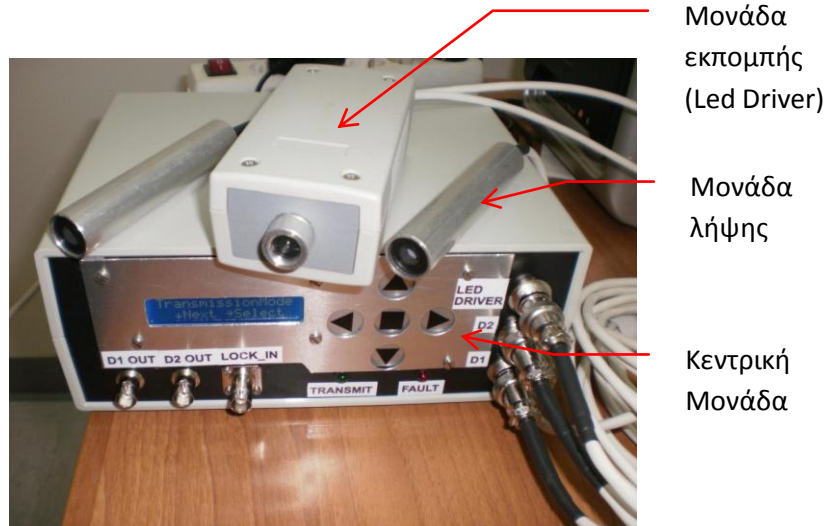
3.2 Δυνατότητες συστήματος

Περιγραφή μονάδων

Το σύστημα μέτρησης της συγκέντρωσης όζοντος αποτελείται από τις εξής παρακάτω μονάδες:

- Την μονάδα εκπομπής της UV ακτινοβολίας.
- Την μονάδα λήψης της UV ακτινοβολίας.
- Την μονάδα έλεγχου και επεξεργασίας.

Η κάθε μονάδα είναι σχεδιασμένη με τα κατάλληλα τεχνικά χαρακτηριστικά έτσι ώστε να καλύπτονται οι προδιαγραφές ασφαλείας και σταθερότητας στη λειτουργία καθώς επίσης η δυνατότητα με διάφορους τρόπους συνδεσιμότητας με υπάρχοντα μετρητικό εξοπλισμό.



Εικόνα 11: φωτογραφία του οπτοηλεκτρονικού συστήματος μέτρησης της συγκέντρωσης του όζοντος.

Τεχνικά χαρακτηριστικά

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά που παρουσιάζονται παρακάτω αναφέρονται στις βέλτιστες επιδόσεις λειτουργίας των κυκλωμάτων.

Σημείωση: Στον τελικό σχεδιασμό τροποποιήθηκαν τα μέγιστα όρια λειτουργίας και προσαρμόστηκαν στην συγκεκριμένη εφαρμογή.

Μονάδα εκπομπής της UV ακτινοβολίας

- Δυνατότητα οδήγησης ενός led (ή περισσότερων σε διάταξη string) με τάση από 5V έως 36V.
- Δυνατότητα λειτουργίας με τρεις διαφορετικούς τρόπους :Συνεχή εκπομπή(με κύκλο καθήκοντος $D=100\%$), Παλμική εκπομπή(και το μέγιστο παλμικό ρεύμα ρυθμίζονται σύμφωνα με το φύλλο δεδομένων του κατασκευαστή του LED) και Παλμική λειτουργία εξομοίωσης μηχανικού οπτικού chopper($D=50\%$ και $f_{ch}=1\text{Hz}-5000\text{Hz}$) (δυνατότητα χρήσης εξωτερικού Lock-in amplifier).
- Σταθεροποιητής ρεύματος υψηλής ακριβείας ($<1\%$).
- Συχνότητα dimming από 0Hz μέχρι 25kHz(διακοπτόμενη λειτουργία με λόγο αντίθεσης (contrast) μεγαλύτερο 1000:1(κύκλος εργασίας 0,1%) στις χαμηλές συχνότητες (τυπικά 200:1 στο 1KHz).
- Περιορισμό μέγιστου ρεύματος .
- Προστασία από υπέρταση εξόδου.
- Προστασία και ανίχνευση βραχυκυκλωμένου ή αποσυνδεδεμένου φορτίου(LED) .
- Παρακολούθηση της θερμοκρασίας του φορτίου(LED) και αυτόματη λειτουργία σε προγραμματιζόμενα όρια.
- Προστασία από υπερφόρτωση.
- Αυτόματη διακοπή λειτουργίας(shutdown) και ενημέρωση σε περίπτωση σφάλματος .
- AEC-Q100 Grade 1 Qualified (-40°C to 125°C).

- Προστασία από στατικό ηλεκτρισμό

Μονάδα λήψης της UV ακτινοβολίας

- Δυνατότητα οδήγησης μιας φωτοδιόδου ή φωτοτρανζίστορ ή ολοκληρωμένης μονάδας φωτοδιόδου με προενισχυτή.
- Περιλαμβάνει βαθμίδα ενίσχυσης με ρυθμιζόμενη απολαβή και αντιστάθμιση της τάσης σκότους και της θερμοκρασιακής ολίσθησης .
- Προστασία από στατικό ηλεκτρισμό της εξόδου.
- Προστασία του οπτικού δέκτη από υπέρταση.

Μονάδα έλεγχου και επεξεργασίας

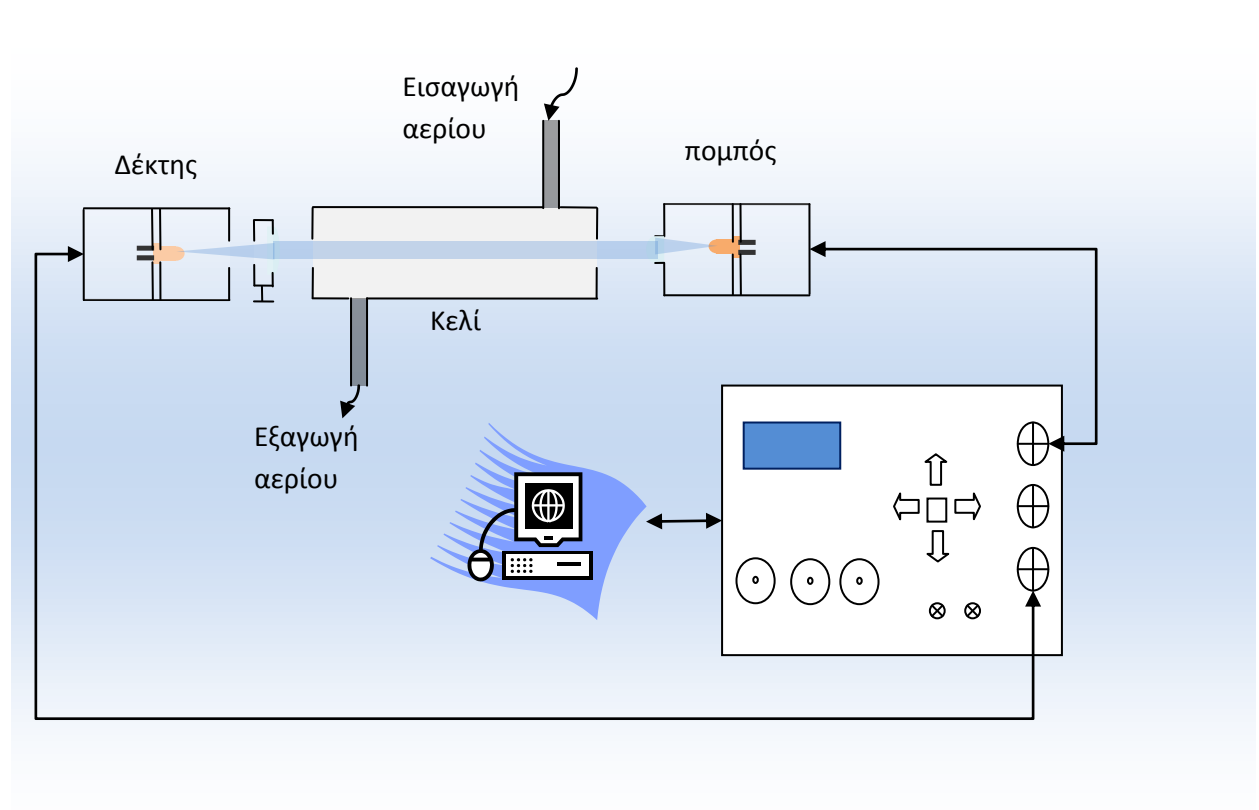
- Δυνατότητα σύνδεσης με **μία** μονάδα εκπομπής και **δύο** μονάδων λήψης (κύρια και αναφορά).
- Παρέχονται **δύο** αναλογικές έξοδοι με δυνατότητα απευθείας σύνδεσης σε σύστημα συλλογής δεδομένων.
- Παρέχεται μια έξοδος (BNC) για τον συγχρονισμό του εξωτερικού Lock-in amplifier.
- Αυτόνομη λειτουργία με δυνατότητα α) τον προγραμματισμό μέσω πληκτρολογίου , β)τον διαγνωστικό έλεγχο των μονάδων εκπομπής και λήψης, γ) τον υπολογισμό της πυκνότητας του όζοντος και δ) την απεικόνιση των μετρήσεων, των αποτελεσμάτων και των διαγνωστικών μηνυμάτων σε οθόνη υγρών κρυστάλλων (LCD).
- Τη δυνατότητα διασύνδεσης (USB 2.0 full speed) με ηλεκτρονικό υπολογιστή για την καταγραφή σε αρχείο κειμένου μέσω terminal α) των μετρήσεων, β) των αποτελεσμάτων και γ)των διαγνωστικών μηνυμάτων. Παρέχονται drivers (χωρίς δικαιώματα x86,x64) για τις πλατφόρμες windows (xp έως 8),Linux(Ubuntu 11.10),Mac (OS-8,OS-9,OS-x).

Τοπολογίες σύνδεσης

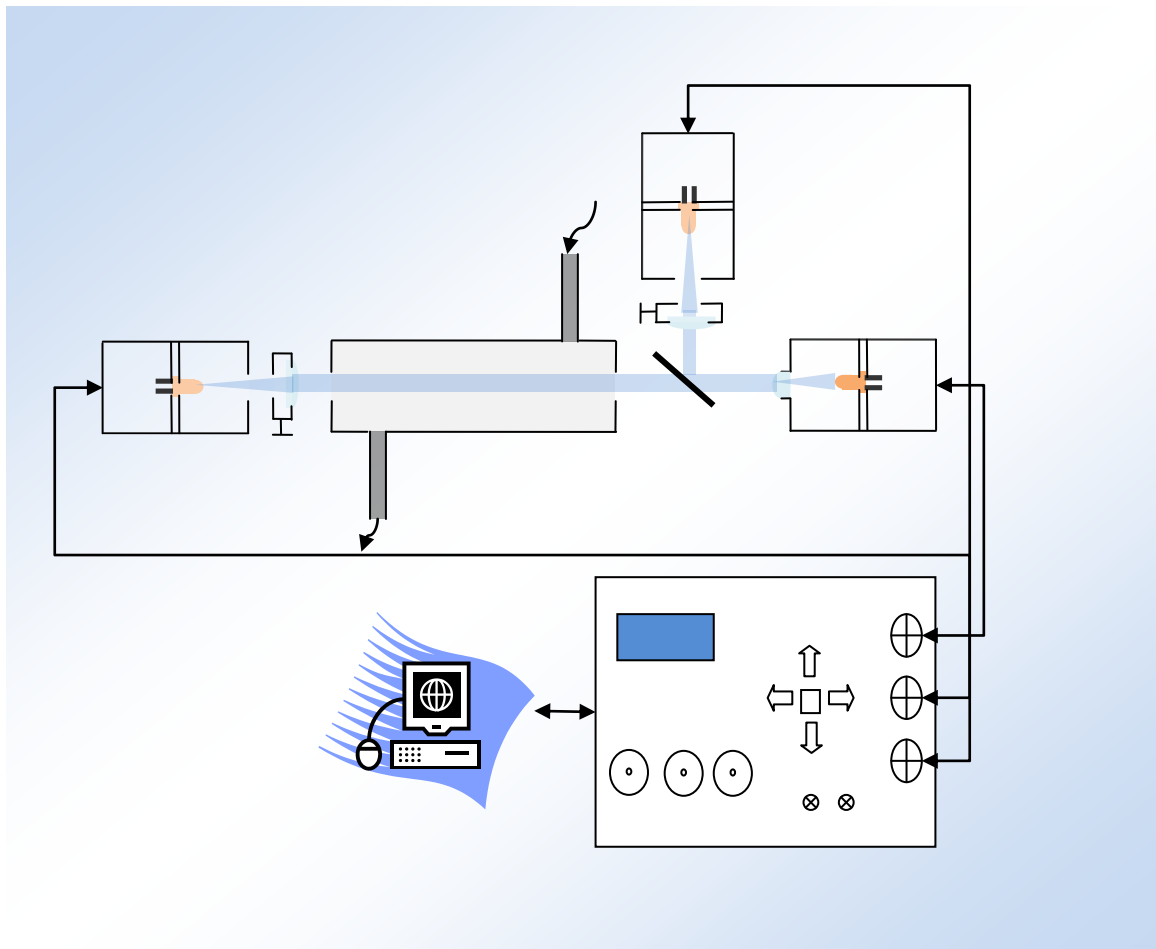
Στα παρακάτω σχήματα απεικονίζονται οι βασικοί τρόποι συνδεσμολογίας της συσκευής, είτε για αυτόνομη λειτουργία με μονή ή διπλή δέσμη, είτε ως μέρος ενός υπάρχοντος μετρητικού εξοπλισμού, όπως είναι η σύνδεση με lock-in amplifier ή διαφόρων τύπων συστημάτων συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων (data acquisition) με σκοπό την σύγκριση των μετρήσεων. Είναι προφανές ότι διάφοροι άλλοι συνδυασμοί στην συνδεσμολογία μπορούν να επιτευχθούν. Η κάθε συνδεσμολογία μπορεί να συνδυαστεί με ένα ή περισσότερους τρόπους εκπομπής (περιγράφονται στα τεχνικά χαρακτηριστικά της μονάδας εκπομπής) όπως αυτοί περιγράφονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 1: Τοπολογίες συνδεσμολογίας του οπτοηλεκτρονικού συστήματος.

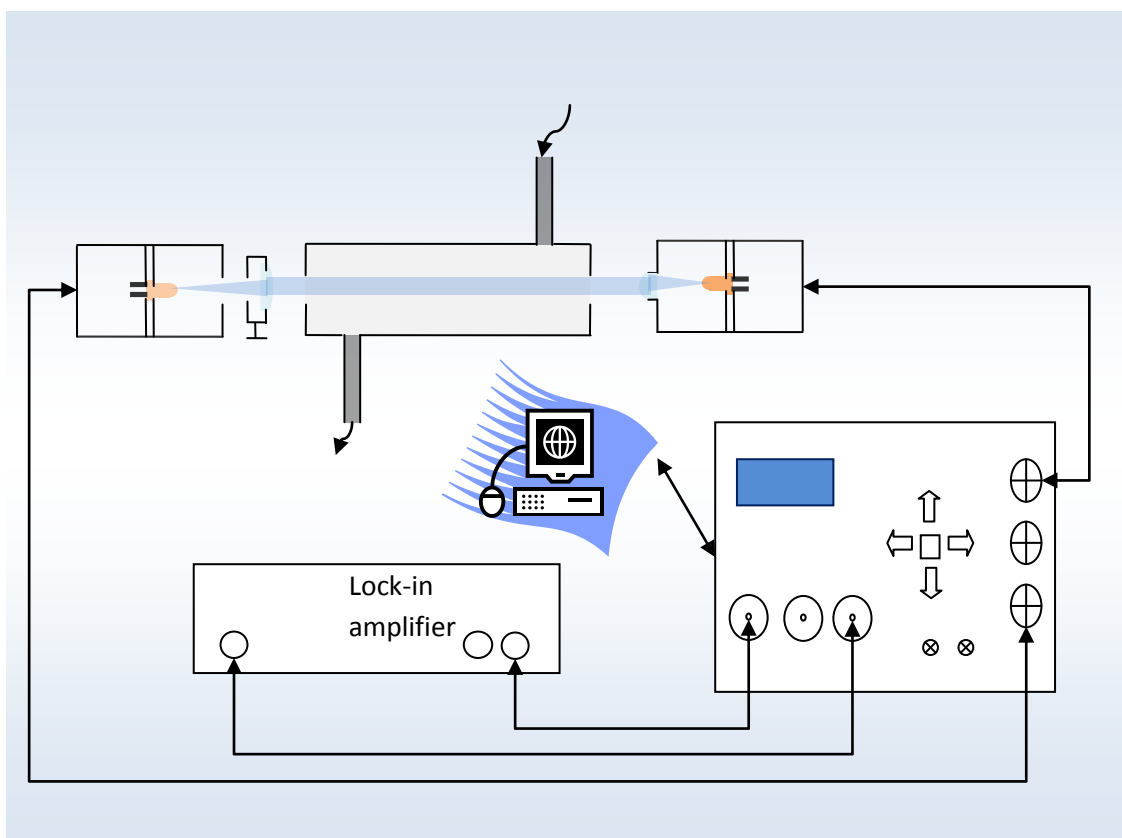
Τρόπος εκπομπής	Αυτόνομη λειτουργία (1 δέσμη)	Αυτόνομη λειτουργία (2 δέσμες)	Lock-in amplifier	Data acquisition
Συνεχής	x	x		x
Παλμικός(50% frequency =1-5000Hz, Duty cycle)	x	x	x	x
Παλμικός (1% frequency =1kHz, Duty cycle)	x	x		x



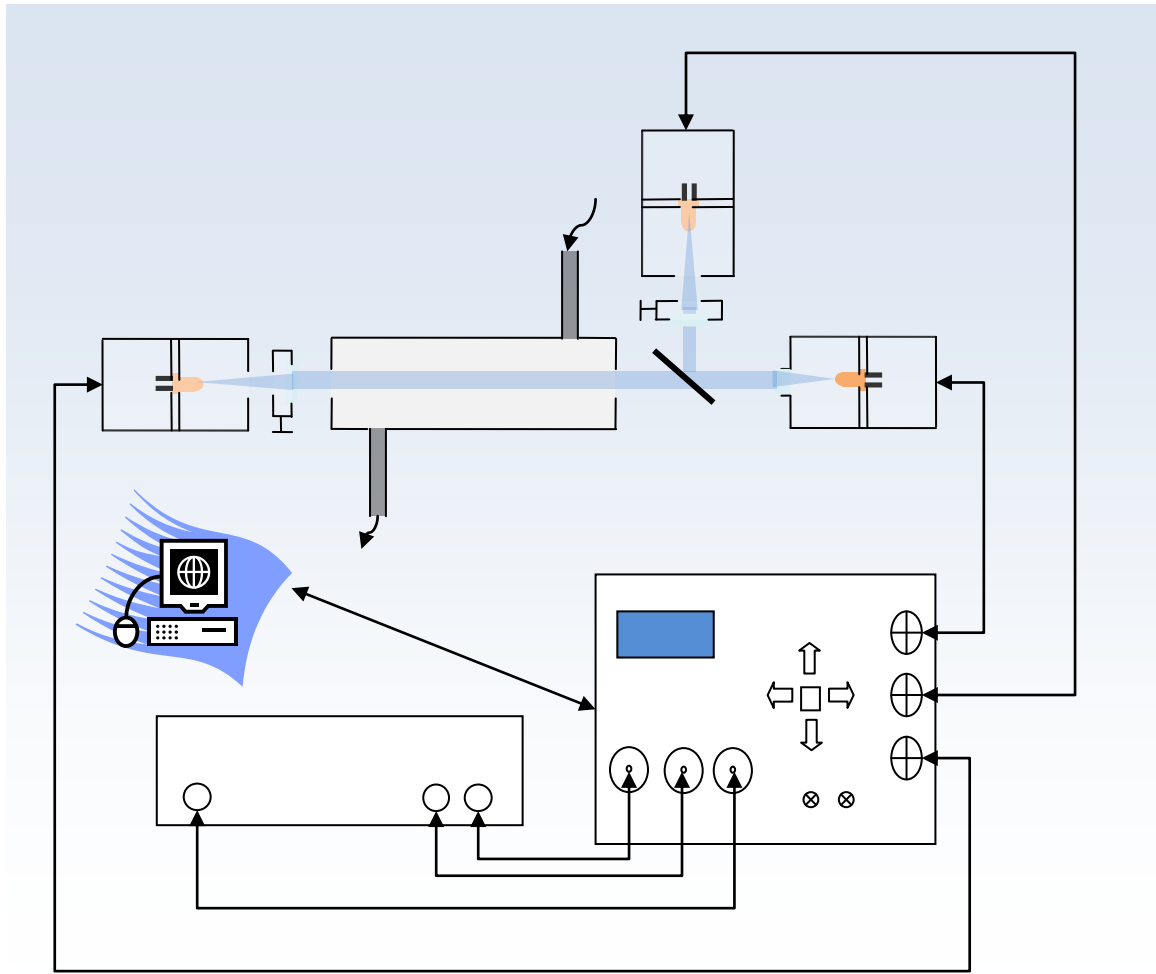
Εικόνα 12: Τοπολογία αυτόνομης λειτουργίας μόνης δέσμης



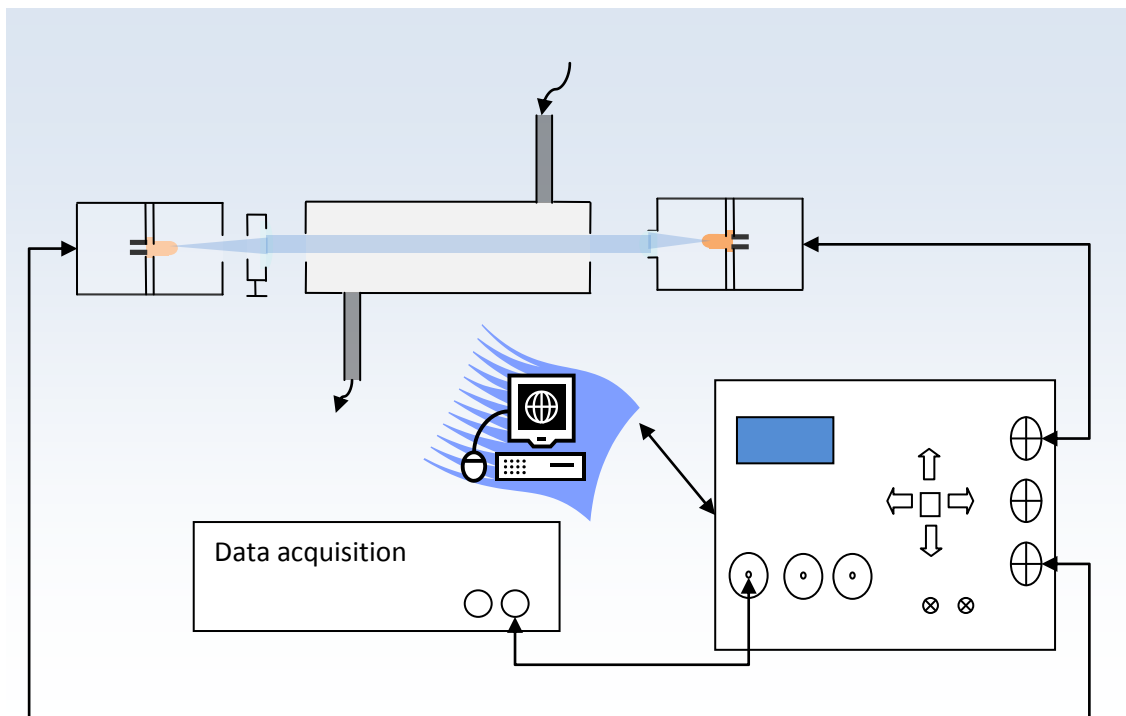
Εικόνα 13: Τοπολογία αυτόνομης λειτουργίας διπλής δέσμης



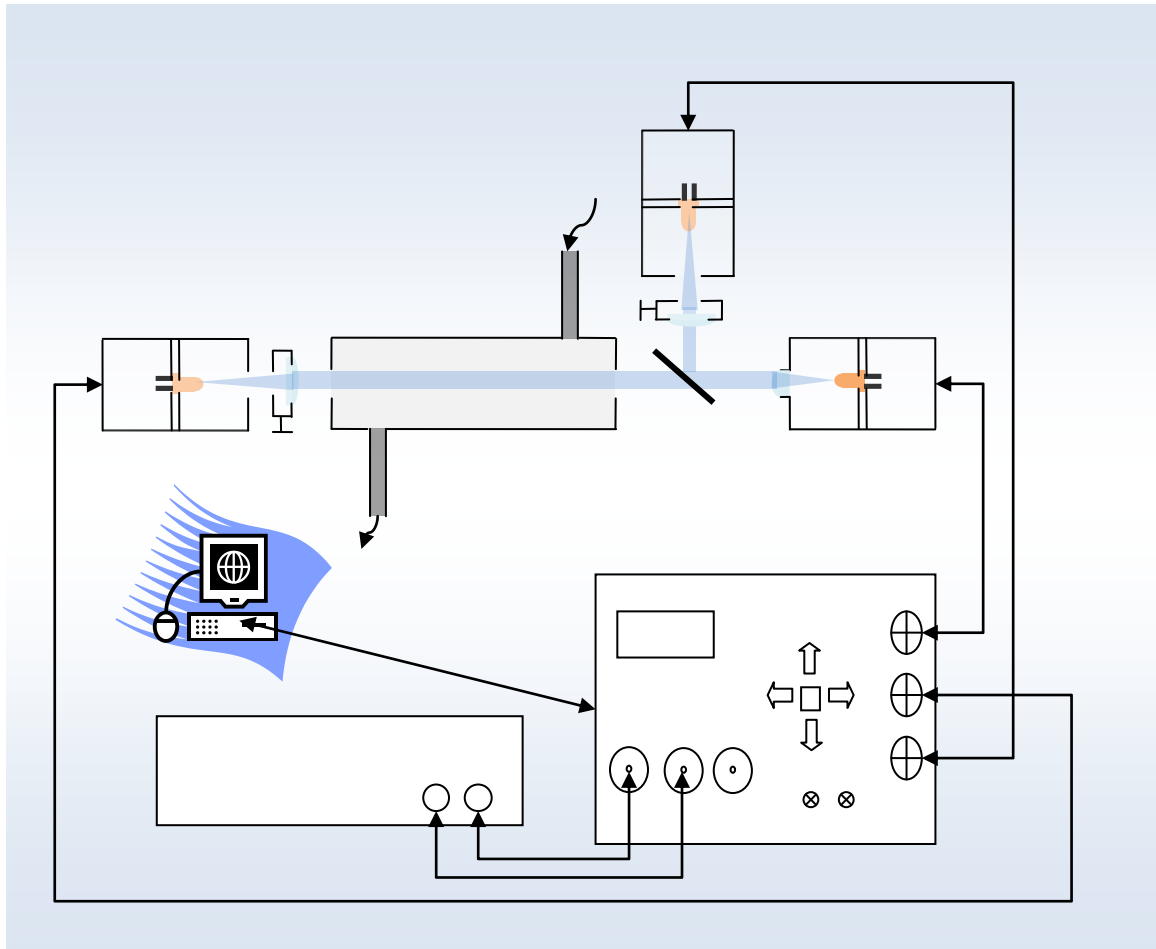
Εικόνα 14: Τοπολογία λειτουργίας μονής δέσμης και σύνδεση του lock-in amplifier.



Εικόνα 15: Τοπολογία λειτουργίας διπλής δέσμης και σύνδεση του lock-in amplifier.



Εικόνα 16: Τοπολογία λειτουργίας μονής δέσμης και σύνδεση του Data acquisition.



Εικόνα 17: Τοπολογία λειτουργίας διπλής δέσμης και σύνδεση του Data acquisition.

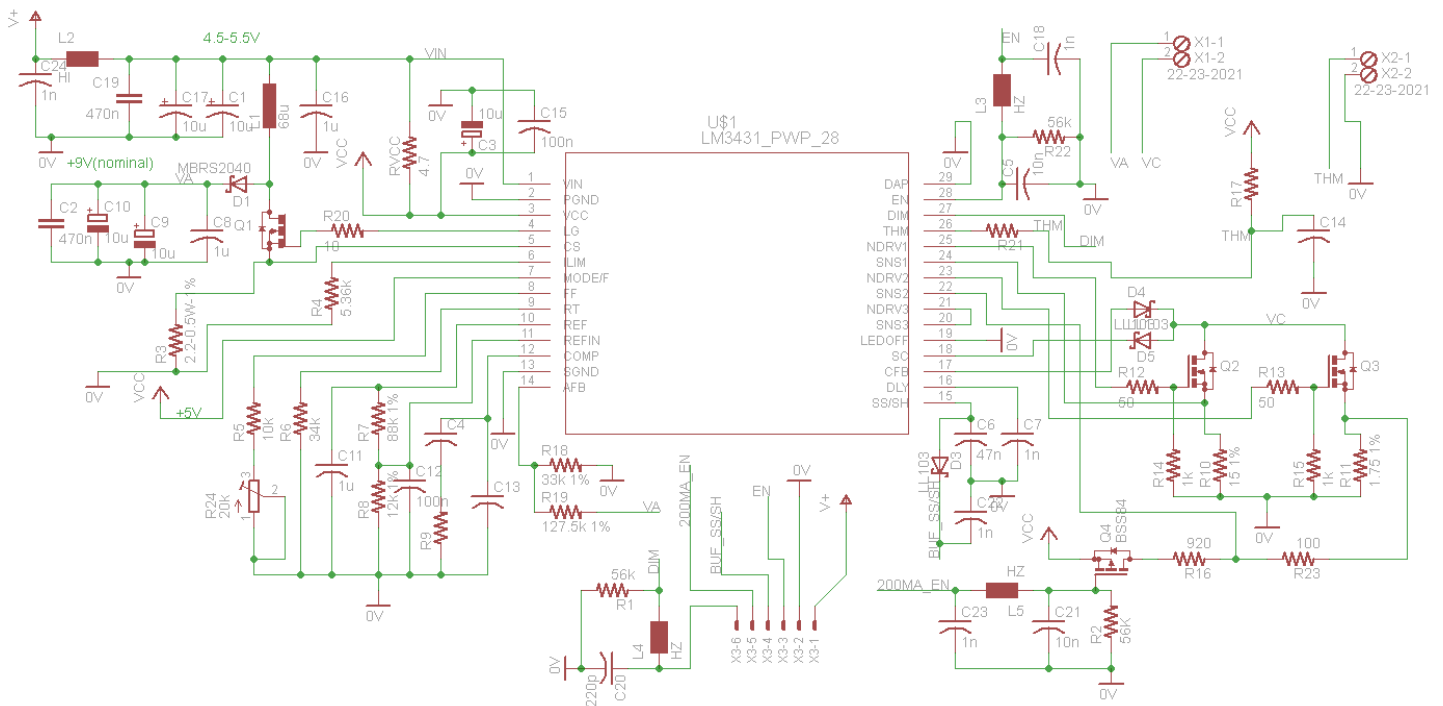
3.3 Ανάλυση μονάδων

Μονάδα εκπομπής της UV ακτινοβολίας

Η μονάδα εκπομπής υλοποιήθηκε με το ολοκληρωμένο LM3431 της εταιρίας Texas Instrument, το οποίο όπως αναφέρεται και στο φύλλο δεδομένων του [68] αποτελεί ένα τριών καναλιών γραμμικό ελεγκτή ρεύματος (linear current controller), συνδυασμένο με ένα ελεγκτή μετατροπέα συνεχούς σε συνεχές (DC - DC controller) σε τοπολογία boost switching, ιδανικό για οδήγηση LED. Ειδικότερα, μπορεί να οδηγήσει 3 διαφορετικά τρανζίστορ τύπου NPN ή MOSFETs για να παρέχει μεγάλης ακριβείας σταθερό ρεύμα σε αντίστοιχες 3 «σειρές» (strings) από Leds. Ο boost controller οδηγεί ένα εξωτερικό διακόπτη (τυπικά ένα NFET) για να πετύχει την υπερύψωση (step-up) της τάσεως εξόδου που εφαρμόζεται στις ανόδους των πρώτων LEDs του κάθε string (common anode). Ακόμα η τάση της καθόδου του κάθε τελευταίου LED σε όλα τα strings παρακολουθείται με μια διάταξη totem έτσι ώστε να ρυθμίζεται το εύρος της τάσης εξόδου έτσι ώστε να αυξάνεται η απόδοση. Η

μέθοδος ρύθμισης της φωτεινότητας, η προστασία της εξόδου από υπέρταση καθώς και άλλα χαρακτηριστικά εποπτείας αναφέρονται στην ενότητα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά καθώς επίσης και στο φύλλο δεδομένων.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος και η ανάλυση του γίνεται στον πίνακα που ακολουθεί ως συνάρτηση των ακροδεκτών (pins) του ολοκληρωμένου.



Εικόνα 18: Σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος του βομπού.

Πίνακας 2: Περιγραφή των συναρτήσεων των ακροδεκτών (pins) του ολοκληρωμένου LM3431

Pin No.	Pin name	Περιγραφή	Σχετιζόμενο δικτύωμα
1	VIN	Είσοδος της τάσης τροφοδοσίας.	Φίλτρο εξομάλυνσης της τάσης V+=5V με τα C1,C17,C19,C24 και L2
2	PGND	Γείωση ισχύος .	Στο PCB συνδέονται τα στοιχεία ισχύος.
3	VCC	Έξοδος εσωτερικής πηγής αναφοράς(Vcc=5V) με σκοπό σύνδεσης πυκνωτή σταθεροποίησης.	Πυκνωτές εξομάλυνσης C3 και C15. Αντίσταση pull-up RVCC (αναφορά από φύλλο δεδομένων)
4	LG	Οδηγός πύλης του mosfet του boost controller.	Ο controller υλοποιείται από τα στοιχεία L1, D1,Q1,C8,C9,C10,C2,R20 και R3.

5	CS	Ακροδέκτης μέτρησης του ρεύματος του boost controller.	Ανιχνεύει την τάση στα άκρα της R3 με σκοπό την ρύθμιση του μέγιστου ρεύματος του controller σύμφωνα μια τιμή κατωφλίου.
6	ILIM	Ακροδέκτης σύνδεσης της αντίστασης ρύθμισης του κατωφλίου του ρεύματος του boost controller.	Το κατώφλι του μέγιστου ρεύματος του controller αντιστοιχεί στην τάση που αναπτύσσεται στα άκρα της R4.
7	MODE/F	Ακροδέκτης επιλογής του τρόπου ρύθμισης της φωτεινότητας	Συνδέεται στην Vcc (υψηλό δυναμικό) για την επιλογή του ψηφιακού PWM ως τρόπου ρύθμισης της φωτεινότητας (το LED άγει στην υψηλή στάθμη του σήματος που εφαρμόζεται στον ακροδέκτη DIM (pin no. 27).
8	FF	Ακροδέκτης σύνδεσης της αντίστασης επιτάχυνσης του βρόγχου ανάδρασης . Ρυθμίζει την μορφή του παλμού οδήγησης των mosfets των LEDs .	Υλοποιείται από τα στοιχεία R5 και R24 (ροοστάτης 20kΩ).
9	RT	Ακροδέκτης ρύθμισης της συχνότητας του booster.	Υλοποιείται από την αντίσταση R6.
10	REF	Παρέχει την πηγή τροφοδοσίας του διαιρέτη τάσεως δημιουργίας της τάσης αναφοράς των συγκριτών ρεύματος των LEDs.	Υλοποιείται από τις αντιστάσεις R7 και R8, ο πυκνωτής C11 αποτελεί το φίλτρο εξομάλυνσης του διαιρέτη τάσης.
11	REFIN	Ακροδέκτης εισόδου της τάσεως αναφοράς των συγκριτών ρεύματος των LEDs.	Λαμβάνεται από τα άκρα της αντίστασης R8. Ο πυκνωτής C12 αποτελεί το φίλτρο εξομάλυνσης.
12	COMP	Έξοδος σύνδεσης του δικτύματος αντιστάθμισης που αποτελεί τμήμα του βρόγχου ανάδρασης για την σταθερή και την βέλτιστη μεταβατική κατάσταση κατά την λειτουργία του boost controller.	Υλοποιείται από τα στοιχεία C4,C13 και R9.
13	SGND	Γείωση σήματος.	Συνδέονται τα στοιχεία που είναι ευαίσθητα στον θόρυβο.
14	AFB	Ακροδέκτης ανάδρασης της τάσεως ανόδου. Η τάση ανόδου ρυθμίζεται κατά την περίοδο που τα LEDs δεν άγουν σύμφωνα με την στάθμη αυτή.	Λαμβάνεται από τον διαιρέτη τάσης που υλοποιούν οι αντιστάσεις R18 και R19.
15	SS/SH	Ακροδέκτης ρύθμισης του χρόνου ομαλής εκκίνησης (Soft-start) και δειγματοληψίας -συγκράτησης	Συνδέεται ο πυκνωτής C6. Η διάδος D3 με τον πυκνωτή C22 έχουν προστεθεί για την

		της τάσεως AFB κατά την χρονική διάρκεια αγωγής των LEDs.	μέτρηση της τάσης αυτής.
16	DLY	Ακροδέκτης ρύθμισης του χρόνου απενεργοποίησης λόγω ανίχνευσης σφάλματος στην λειτουργία.	Συνδέεται ο πυκνωτής C7.
17	CFB	Ακροδέκτης ανάδρασης της τάσης της καθόδου του κάθε τελευταίου LED(μέσω αντίστοιχου αριθμού διόδων) σε όλα τα strings. Ανιχνεύεται εάν κάποιο string άγει σωστά.	Υλοποιείται από την διόδο D4.
18	SC	Ακροδέκτης ανίχνευσης βραχυκυκλώματος κάποιου string.	Υλοποιείται από την διόδο D5.
19	LEDOFF	Ακροδέκτης με διπλή λειτουργία. Χρησιμοποιείται στην σύνδεση περισσότερων strings ή στην επανεκκίνηση μετά από ανίχνευση σφάλματος.	Συνδέεται στην γείωση για αυτόματη επανεκκίνηση.
20	SNS3	Ακροδέκτης ανάδρασης για το κανάλι 3. Η ανίχνευση γίνεται με την μέτρηση της τάσης στα άκρα της αντίστασης ρεύματος του αντίστοιχου οδηγού του LED. Συγκρίνεται με την τάση REFIN για την σταθεροποίηση του ρεύματος του LED.	Δεν χρησιμοποιείται (συνδέεται απευθείας στην έξοδο οδήγησης NDRV3 του αντίστοιχου οδηγού).
21	NDRV3	Έξοδος οδήγησης του οδηγού του καναλιού 3(mosfet).	Δεν χρησιμοποιείται (συνδέεται απευθείας στην έξοδο οδήγησης NDRV3 του αντίστοιχου οδηγού).
22	SNS2	Ακροδέκτης ανάδρασης για το κανάλι 2. Η ανίχνευση γίνεται με την μέτρηση της τάσης στα άκρα της αντίστασης ρεύματος του αντίστοιχου οδηγού του LED. Συγκρίνεται με την τάση REFIN για την σταθεροποίηση του ρεύματος του LED.	Υλοποιείται με την αντίσταση R11 που ανιχνεύει το ρεύμα του mosfet Q3(άγει μόνο στον τρόπο λειτουργίας 1kHz με DutyC.=1%). Το Q4 παρέχει την δυνατότητα απενεργοποίησης του συγκεκριμένου οδηγού.
23	NDRV2	Έξοδος οδήγησης του οδηγού του καναλιού 2(mosfet).	Οδηγεί την βάση του Q3 μέσω της αντίστασης R13. Η αντίσταση R15 μειώνει τον θόρυβο κατά την μεταβατική κατάσταση.
24	SNS1	Ακροδέκτης ανάδρασης για το κανάλι 1. Η ανίχνευση γίνεται με την μέτρηση της τάσης στα άκρα της αντίστασης ρεύματος του αντίστοιχου οδηγού του LED. Συγκρίνεται με την τάση REFIN	Υλοποιείται με την αντίσταση R10 που ανιχνεύει το ρεύμα του mosfet Q2(άγει σε όλους τους τρόπους εκπομπής).

		για την σταθεροποίηση του ρεύματος του LED.	
25	NDRV1	Έξοδος οδήγησης του οδηγού του καναλιού 1(mosfet).	Οδηγεί την βάση του Q2 μέσω της αντίστασης R12. Η αντίσταση R14 μειώνει τον θόρυβο κατά την μεταβατική κατάσταση.
26	THM	Ακροδέκτης επιτήρησης της θερμοκρασίας του LED μέσω θερμίστορ. Όταν η τάση πέσει κάτω από την στάθμη των 1,2V η συσκευή εισέρχεται σε κατάσταση αναμονής (standby mode).	Υλοποιείται από τον διαιρέτη τάσης R17 και το θερμίστορ που συνδέεται στην κλέμα X2. Η αντίσταση R21 ρυθμίζει την χρονική υστέρηση επανεκκίνησης μετά την κατάσταση αναμονής (πρακτικά ρυθμίζει την θερμοκρασία επανεκκίνησης)
27	DIM	Ακροδέκτης ρύθμισης της φωτεινότητας. Δέχεται σήματα τετραγωνικού παλμού (PWM) ή αναλογική τάση ρύθμισης του κύκλου εργασίας της εσωτερικής γεννήτριας. Η εκλογή του τρόπου λειτουργίας γίνεται μέσω του ακροδέκτη MODE/F όπως προαναφέρθηκε.	Οδηγείται απευθείας μέσω δικτύματος προστασίας που υλοποιείται από τα στοιχεία L4 και C20 και την R1 ως αντίσταση “pull-down”.
28	EN	Ακροδέκτης επίτρεψης. Όταν συνδέεται σε δυναμικό μεγαλύτερο του under voltage lockout (UVLO) αρχίζει η διαδικασία ομαλής εκκίνησης (Soft-start). Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επιτήρηση της τάσεως εισόδου.	Οδηγείται απευθείας μέσω δικτύματος προστασίας που υλοποιείται από τα στοιχεία L3 και C18 ,την R22 ως αντίσταση “pull-down” και τον C5 ως πυκνωτή εξομάλυνσης.
EP	DAP	Μεταλλική βάση του ολοκληρωμένου για την αποβολή της θερμότητας (Exposed pad). Συνδέεται με το SGND.	Στο PCB οι ακροδέκτες PGND, SGND και DAP συνδέονται ηλεκτρικά μεταξύ τους.

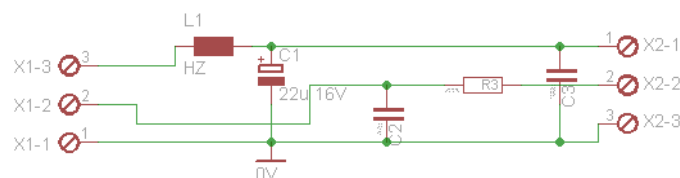
Ο υπολογισμός των στοιχείων του κυκλώματος έγινε με την βοήθεια των σχέσεων που περιέχονται στο φύλλο δεδομένων του ολοκληρωμένου LM3431. Οι προδιαγραφές στον υπολογισμό, τέθηκαν σύμφωνα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά του LED που χρησιμοποιήθηκε. Στον παρακάτω πίνακα αναγράφονται μερικά από αυτά για το LED UVTOP255 [69]της εταιρίας Roithner LaserTechnik GmbH.

Πίνακας 3: Τεχνικά χαρακτηριστικά του LED UVTOP255.

Παράμετρος	Συνθήκη	Τιμή
Κεντρικό μήκος κύματος εκπομπής (λρ)	Για θερμοκρασία λειτουργίας $T_a=25\text{ }^\circ\text{C}$ και ρεύμα λειτουργίας $I_F=20\text{ mA}$	255nm έως 265nm
Τιμή τάσης ορθής φοράς (UF)	Για θερμοκρασία λειτουργίας $T_a=25\text{ }^\circ\text{C}$ και ρεύμα λειτουργίας $I_F=20\text{ mA}$	6,5V έως 8V
Φασματικό εύρος (Δλ)	Για θερμοκρασία λειτουργίας $T_a=25\text{ }^\circ\text{C}$ και ρεύμα λειτουργίας $I_F=20\text{ mA}$	12nm έως 15nm
Μέγιστη τιμή συνεχούς (DC) ρεύματος ορθής φοράς (IF)	Για θερμοκρασία λειτουργίας $T_a=25\text{ }^\circ\text{C}$	30mA
Μέγιστη τιμή παλμικού ρεύματος ορθής φοράς (IFP)	Για θερμοκρασία λειτουργίας $T_a=25\text{ }^\circ\text{C}$ και για συχνότητα λειτουργίας 1kHz με κύκλο εργασίας 1%	200mA
Θερμοκρασία λειτουργίας (TOPR)		-30 $^\circ\text{C}$ έως +55 $^\circ\text{C}$

Μονάδα λήψης της UV ακτινοβολίας

Η μονάδα λήψης κατασκευάστηκε για να υποστηρίξει το ολοκληρωμένο UV-TIAMO[70] της εταιρίας Roithner LaserTechnik GmbH το οποίο αποτελεί έναν φωτοανιχνευτή στο UV με ενσωματωμένο προενισχυτή, με δυνατότητα να παρέχει 2V κατά προσέγγιση για ένταση ακτινοβολίας ίση με $10\text{mW}/\text{cm}^2$. Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του είναι η απόρριψη διαταραχών στο σήμα λόγω υγρασίας H/M θορύβου. Στο σχηματικό διάγραμμα που φαίνεται παρακάτω, η τροφοδοσία του ολοκληρωμένου καθώς και η λήψη της μέτρησης γίνεται μέσω της κλέμας X1 ενώ η σύνδεση του γίνεται στην κλέμα X2.



Εικόνα 19: Σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος του δέκτη

Στον παρακάτω πίνακα αναγράφονται μερικά από τα χαρακτηριστικά του για θερμοκρασία λειτουργίας $T=25^{\circ}\text{C}$.

Πίνακας 4: Τεχνικά χαρακτηριστικά του UV-TIAMO.

Παράμετρος	Τιμή
Ενεργή επιφάνεια (A_{chip})	$0,22\text{mm}^2$
Τάση τροφοδοσίας (V_{supply})	2,5V έως 5V
Εύρος Ζώνης (-3dB)	15Hz
Μήκος κύματος με την μέγιστη ευαισθησία (λ_{max})	280nm
Ευαισθησία στο κεντρικό μήκος κύματος (S_{max})	200mV/mW/cm^2

Σημειώνεται ότι η ευαισθησία $S_{255\text{nm}}$ στο μήκος κύματος 255nm είναι σύμφωνα με την καμπύλη φασματικής απόκρισης ίση με $0,77 \times S_{\text{max}}$.

Άρα για μια ελάχιστη εκπεμπόμενη ισχύ (P_o) από το LED ίση με $100\mu\text{W}$ που εστιάζεται στην ενεργό επιφάνεια (A_{chip}) με ένα συντελεστή 0,5, η τάση εξόδου θα είναι: $V_o = S_{255\text{nm}} * P_o / A_{\text{chip}} \approx 4,5\text{V}$.

Κεντρική μονάδα

Για την υλοποίηση της κεντρικής μονάδας χρησιμοποιήθηκε ο μικροελεγκτής MSP430f5438A της εταιρίας Texas Instruments. Ο μικροελεγκτής αυτός αναφέρεται ως μεικτού σήματος και σύμφωνα με το φύλλο δεδομένων του [71] έχει χαρακτηριστικά και εσωτερική οργάνωση, όπως αυτά παρουσιάζονται παρακάτω. Μια πλήρης περιγραφή σχετικά με τις μονάδες του περιλαμβάνεται στον οδηγό χρήσης SLAU208[72].

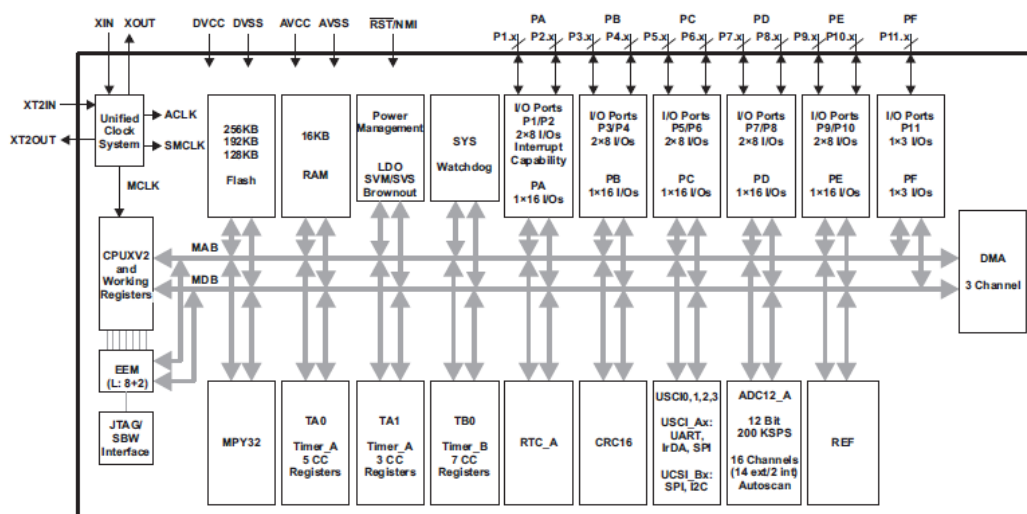
MIXED SIGNAL MICROCONTROLLER

FEATURES

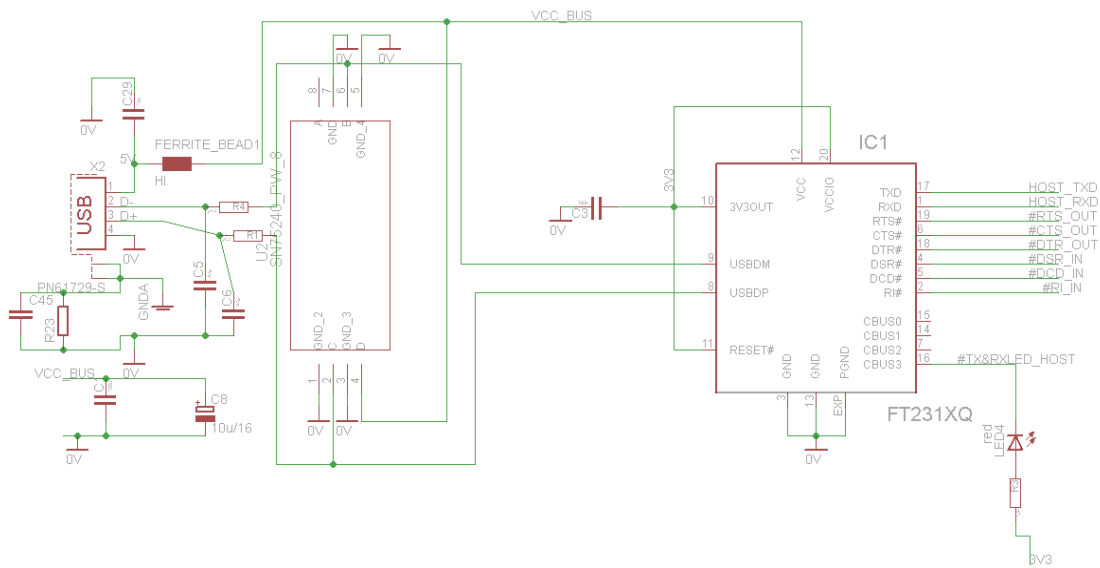
- Low Supply Voltage Range: 3.6 V Down to 1.8 V
- Ultralow Power Consumption
 - Active Mode (AM): All System Clocks Active 230 µA/MHz at 8 MHz, 3.0 V, Flash Program Execution (Typical) 110 µA/MHz at 8 MHz, 3.0 V, RAM Program Execution (Typical)
 - Standby Mode (LPM3): Real-Time Clock With Crystal , Watchdog, and Supply Supervisor Operational, Full RAM Retention, Fast Wake-Up: 1.7 µA at 2.2 V, 2.1 µA at 3.0 V (Typical) Low-Power Oscillator (VLO), General-Purpose Counter, Watchdog, and Supply Supervisor Operational, Full RAM Retention, Fast Wake-Up: 1.2 µA at 3.0 V (Typical)
 - Off Mode (LPM4): Full RAM Retention, Supply Supervisor Operational, Fast Wake-Up: 1.2 µA at 3.0 V (Typical)
 - Shutdown Mode (LPM4.5): 0.1 µA at 3.0 V (Typical)
- Wake-Up From Standby Mode in 3.5 µs (Typical)
- 16-Bit RISC Architecture
 - Extended Memory
 - Up to 25-MHz System Clock
- Flexible Power Management System
 - Fully Integrated LDO With Programmable Regulated Core Supply Voltage
 - Supply Voltage Supervision, Monitoring, and Brownout
- Unified Clock System
 - FLL Control Loop for Frequency Stabilization
 - Low-Power/Low-Frequency Internal Clock Source (VLO)
 - Low-Frequency Trimmed Internal Reference Source (REFO)
 - 32-kHz Crystals
 - High-Frequency Crystals up to 32 MHz
- 16-Bit Timer TA0, Timer_A With Five Capture/Compare Registers
- 16-Bit Timer TA1, Timer_A With Three Capture/Compare Registers
- 16-Bit Timer TB0, Timer_B With Seven Capture/Compare Shadow Registers
- Up to Four Universal Serial Communication Interfaces
 - USCI_A0, USCI_A1, USCI_A2, and USCI_A3 Each Supporting
 - Enhanced UART supporting Auto-Baudrate Detection
 - IrDA Encoder and Decoder
 - Synchronous SPI
 - USCI_B0, USCI_B1, USCI_B2, and USCI_B3 Each Supporting
 - I²C™
 - Synchronous SPI
- 12-Bit Analog-to-Digital (A/D) Converter
 - Internal Reference
 - Sample-and-Hold
 - Autoscan Feature
 - 14 External Channels, 2 Internal Channels
- Hardware Multiplier Supporting 32-Bit Operations
- Serial Onboard Programming, No External Programming Voltage Needed
- Three Channel Internal DMA
- Basic Timer With Real-Time Clock Feature
- Family Members are Summarized in Table 1
- For Complete Module Descriptions, See the MSP430x5xx and MSP430x6xx Family User's Guide (SLAU208)

Εικόνα 20: Χαρακτηριστικά του μικροελεγκτή MSP430F5438A

Functional Block Diagram
MSP430F5438AIPZ, MSP430F5436AIPZ, MSP430F5419AIPZ,
MSP430F5438AIZQW, MSP430F5436AIZQW, MSP430F5419AIZQW



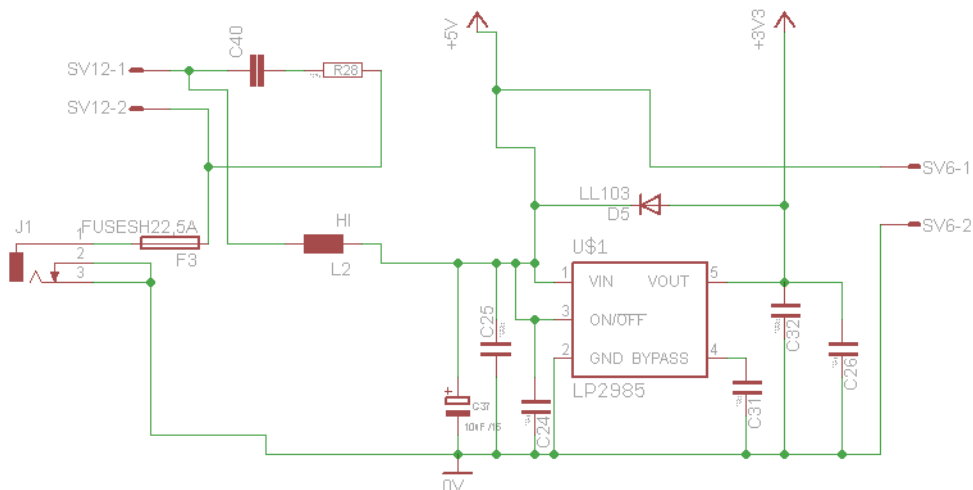
Εικόνα 21: Διαγραμμα βαθμίδων της οικογένειας των μικροελεγκτών MSP430F54xx.



Εικόνα 23: Σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος διασύνδεσης του πρωτοκόλλου USB

- Βαθμίδα του τροφοδοτικού

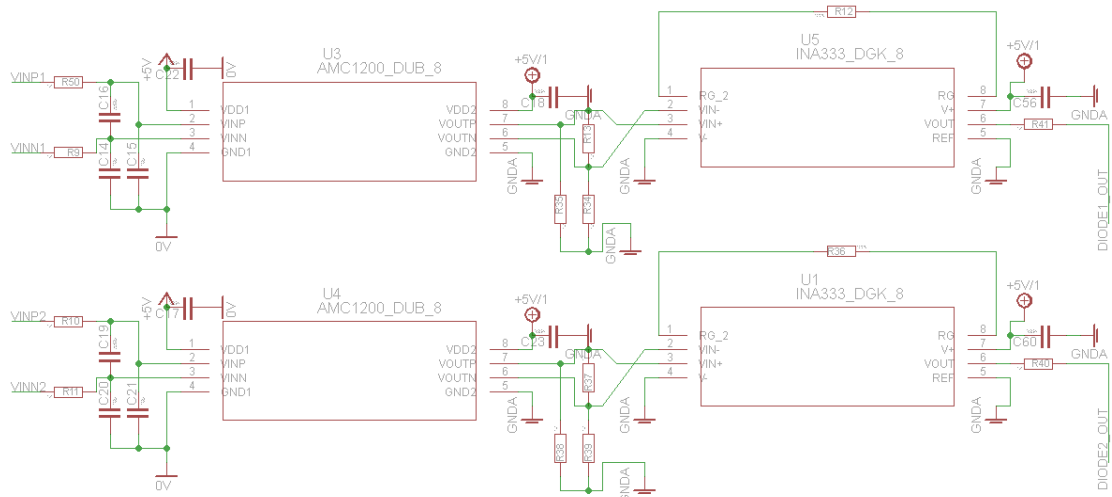
Ως πηγή τάσης χρησιμοποιήθηκε ένα εξωτερικό τροφοδοτικό 5V το οποίο συνδέεται στην είσοδο τύπου jack όπως φαίνεται και στο σχηματικό. Για την δημιουργία της τάσης τροφοδοσίας του μικροελεγκτή χρησιμοποιήθηκε ο γραμμικός σταθεροποιητής LP2985 [76] της εταιρίας Texas Instruments.



Εικόνα 24: Σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος του τροφοδοτικού

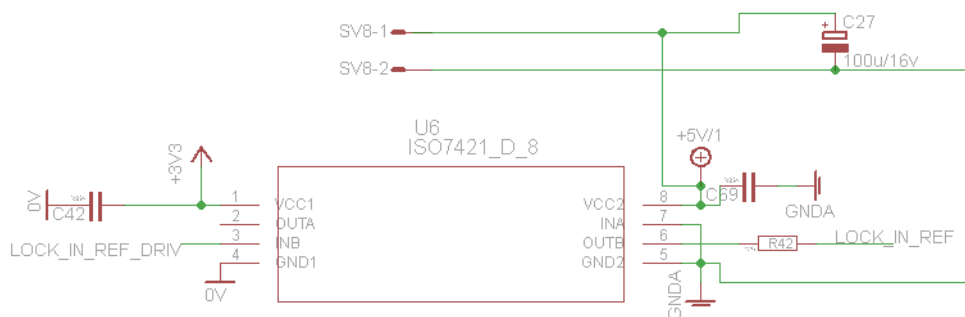
- **Βαθμίδες απομονωμένων εξόδων**

Σε αυτές τις βαθμίδες περιλαμβάνονται τα κυκλώματα των αναλογικών εξόδων παροχής των σημάτων από τις βαθμίδες λήψης και της ψηφιακής εξόδου συγχρονισμού του lock-in amplifier. Όπως φαίνεται και στο σχηματικό διάγραμμα, η αναλογική βαθμίδα υλοποιήθηκε με τον πλήρη και απομονωμένο διαφορικό ενισχυτή σταθερής απολαβής AMC1200[77] συνδεδεμένου ως προενισχυτή και τον διαφορικό ενισχυτή INA333[78] με μεταβλητή απολαβή, της εταιρίας Texas Instruments.



Εικόνα 25: Σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος απομονωμένων εξόδων

Ως ψηφιακός απομονωτής χρησιμοποιήθηκε το ολοκληρωμένο ISO7421[79] της εταιρίας Texas Instruments.



Εικόνα 26: Σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος του ψηφιακού απομονωτή

Κεφάλαιο 4^ο

4 Αλγόριθμοι -Διαγράμματα ροής

4.1 Ανάλυση βαθμίδων μικροελεγκτή

Unified Clock System (UCS)

Η βαθμίδα Unified Clock System (UCS) παρέχει τα σήματα χρονισμού της συσκευής. Η βαθμίδα UCS είναι ένα χαμηλού κόστους και κατανάλωσης σύστημα. Χρησιμοποιώντας τρία διαφορετικά σήματα χρονισμού ο χρήστης μπορεί να επιλέξει ανάμεσα στην χαμηλή κατανάλωση και στα καλύτερα χαρακτηριστικά. Η βαθμίδα αυτή μπορεί να επιλεγεί να λειτουργήσει χωρίς κανένα εξωτερικό εξάρτημα, με ένα ή δύο εξωτερικούς κρυστάλλους ή συντονιστές κάτω από τον πλήρη έλεγχο του προγράμματος.

Η βαθμίδα UCS περιλαμβάνει τις πέντε παρακάτω πηγές παραγωγής σημάτων χρονισμού:

- Τον εξωτερικό ταλαντωτή χαμηλών (32768Hz) ή υψηλών (4 MHz έως 32 MHz) συχνοτήτων **XT1CLK** ανάλογα το είδος του κρυστάλλου που θα συνδεθεί.
- Τον εσωτερικό ταλαντωτή πολύ χαμηλής κατανάλωσης και συχνότητας (τυπικά 10 kHz) **VLOCLK**.
- Τον ελεγχόμενο εσωτερικό ταλαντωτή **REFOCLK** χαμηλών συχνοτήτων (32768 Hz).
- Τον εσωτερικό ταλαντωτή **DCOCLK** ο οποίος ελέγχεται ψηφιακά -digitally-controlled oscillator (**DCO**)-.
- Τον προαιρετικό εξωτερικό ταλαντωτή υψηλών (4 MHz έως 32 MHz) συχνοτήτων **XT2CLK**.

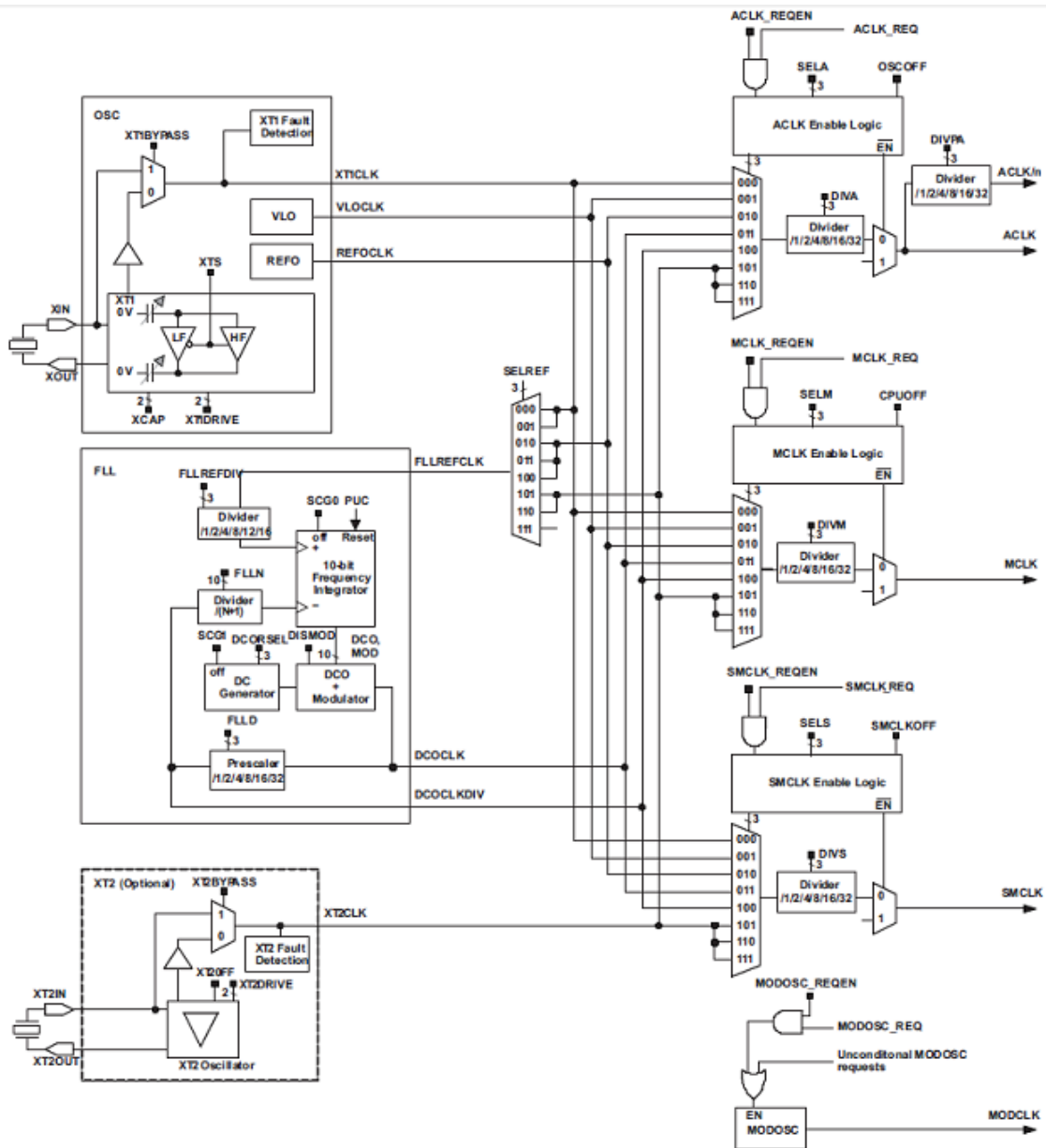
Τα τρία σήματα χρονισμού που παρέχονται από την μονάδα είναι τα εξής:

- Το επικουρικό σήμα -Auxiliary clock (**ACLK**)-. Το **ACLK** μπορεί να επιλεγεί ως σήμα εξόδου από τους XT1CLK, REFOCLK, VLOCLK, DCOCLK, DCOCLKDIV και, XT2CLK (αν υπάρχει) ταλαντωτές. Είναι διαθέσιμο σε ένα άκρο εξόδου ως **ACLK/n** και σε διάφορες βαθμίδες περιφερειακών.
- Το κύριο σήμα -Master clock (**MCLK**)-. Το **MCLK** μπορεί να επιλεγεί ως σήμα εξόδου από τους XT1CLK, REFOCLK, VLOCLK, DCOCLK, DCOCLKDIV και, XT2CLK (αν υπάρχει)

ταλαντωτές. Χρησιμοποιείται κυρίως από την CPU και το σύστημα.

- Το σήμα του υποσυστήματος -Sub-Master clock (SMCLK)- . Το SMCLK μπορεί να επιλεγεί ως σήμα εξόδου από τους XT1CLK, REFOCLK, VLOCLK, DCOCLK, DCOCLKDIV και, XT2CLK (αν υπάρχει) ταλαντωτές. Χρησιμοποιείται από διάφορες βαθμίδες περιφερειακών.

Ο ταλαντωτής DCO μπορεί να ελεγχθεί από ένα σύστημα βρόγχου κλειδωμένης συχνότητας - Frequency Locked Loop (FLL)- το οποίο μπορεί να τροφοδοτηθεί με ένα από τους προαναφερθέντες ταλαντωτές. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το κυκλωματικό διάγραμμα της βαθμίδας UCS



Εικόνα 27: Σχηματικό κυκλωματικό διάγραμμα της βαθμίδας UCS

Direct Memory Access (DMA) Controller Module

Ο ελεγκτής άμεσης προσπέλασης της μνήμης -direct memory access (DMA) controller- παρέχει την δυνατότητα μεταφοράς δεδομένων από μια διεύθυνση σε άλλη (μνήμη ή περιφερικό) χωρίς την εμπλοκή της CPU.

Watchdog Timer (WDT_A)

Ο χρονιστής επιτήρησης «watchdog timer» είναι ένας 32-bit μετρητής που κύριο σκοπό έχει την παραγωγή ενός σήματος αρχικοποίησης (εκτελείται η ρουτίνα Reset) στην περίπτωση δυσλειτουργίας. Ο χρήστης θα πρέπει να τον απενεργοποιεί κάθε φορά που εκκινεί ο μικροελεγκτής ή να τον μηδενίζει σε τακτά χρονικά διαστήματα πριν συμπληρωθεί το χρονικό διάστημα ενεργοποίησης της αρχικοποίησης.

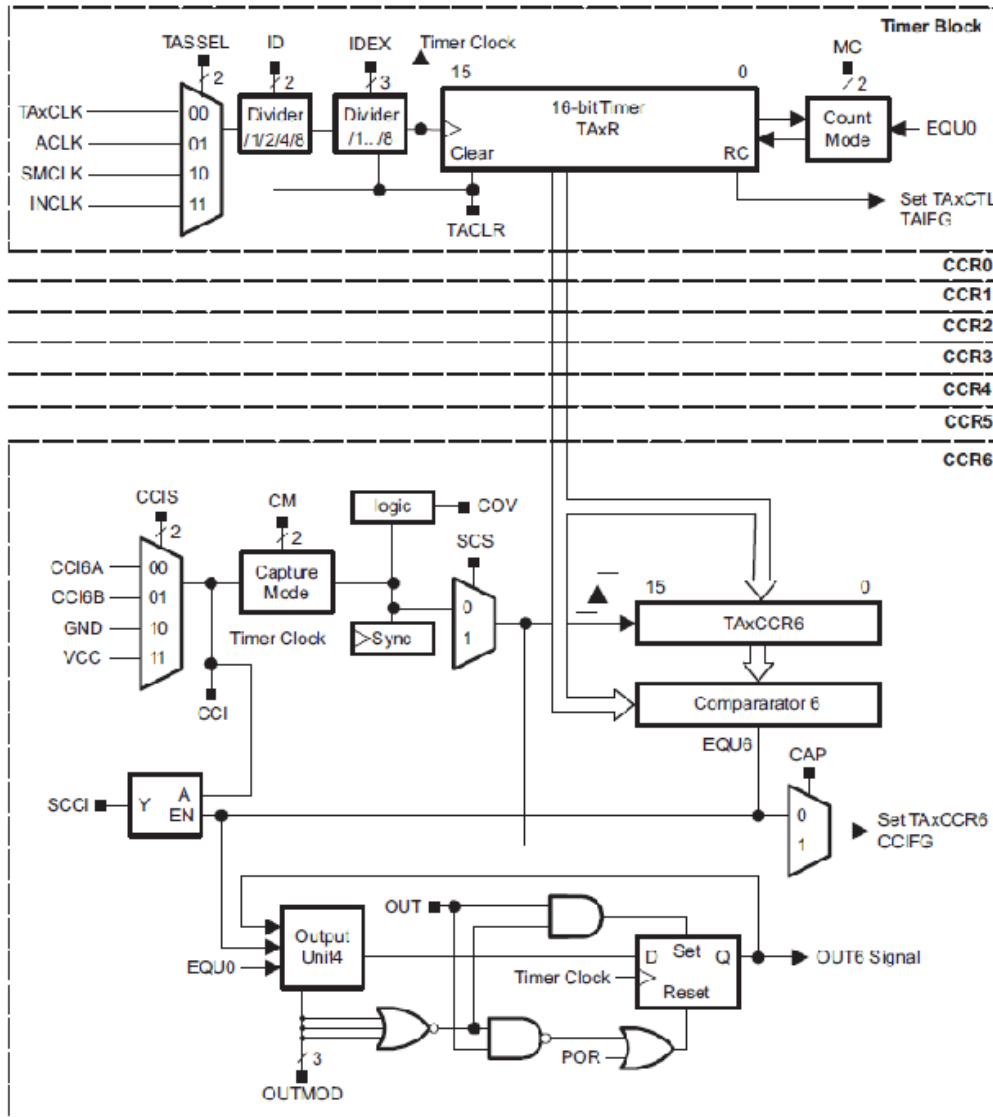
Timer_A

Ο χρονιστής A (Timer_A) είναι ένας 16-bit χρονιστής/μετρητής που περιέχει επτά καταχωρητές σύλληψης και συγκράτησης (capture) / σύγκρισης (compares). Μπορεί να παρέχει πολλαπλές μορφές PWM κυματομορφών σε διάφορες εξόδους και με διάφορα χρονικά διαστήματα.

Ο χρονιστής A περιλαμβάνει:

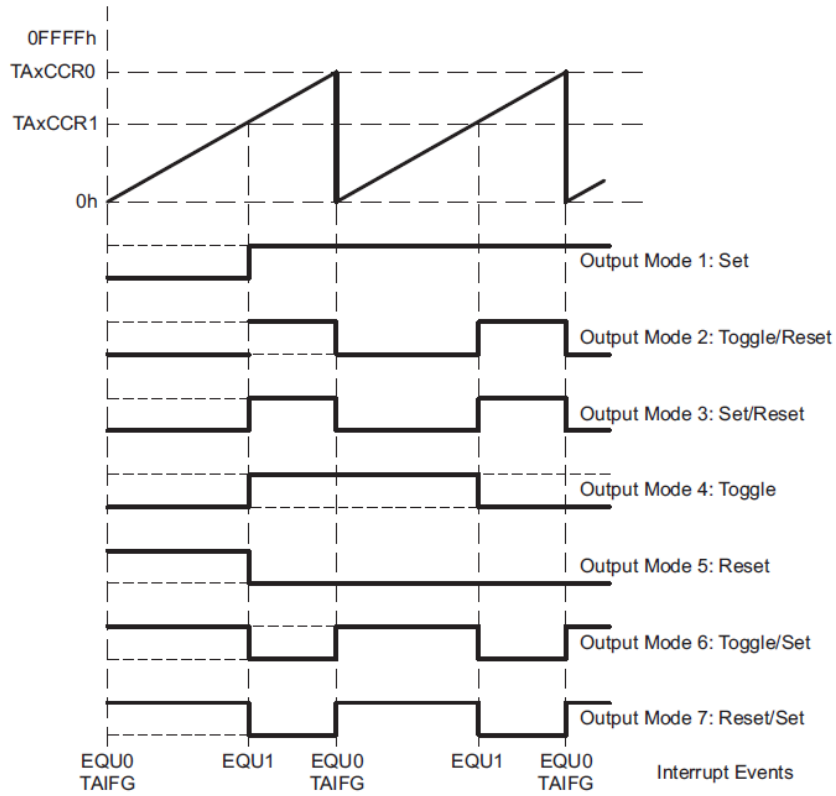
- Έναν ασύγχρονο 16-bit χρονιστή/μετρητή με τέσσερις τρόπους λειτουργίας.
- Δυνατότητα επιλογής και τροποποίησης της πηγής του.
- Επτά καταχωρητές (TA0CCRn, n=1,2,...,7) σύλληψης και συγκράτησης (capture) / σύγκρισης (compare).
- Ασύγχρονη συγκράτηση της εισόδου και της εξόδου.
- Έναν καταχωρητή διανυσμάτων των διακοπών (Interrupts) που παράγονται από τις διάφορες συγκρίσεις, συλλήψεις και την υπερχείλιση του μετρητή.

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται το κυκλωματικό του διάγραμμα.

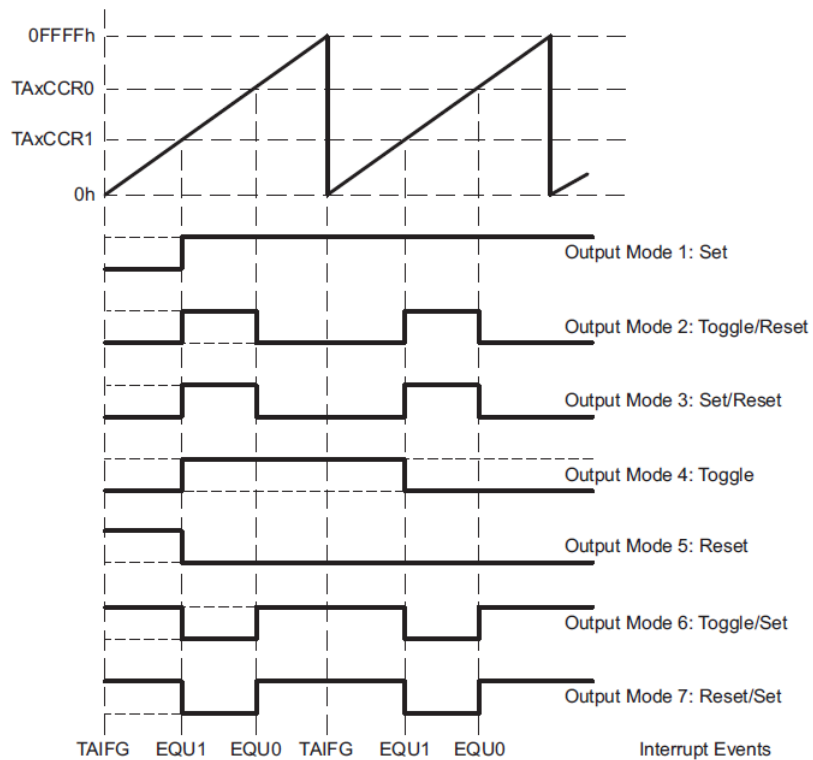


Εικόνα 28: Σχηματικό κυκλωματικό διάγραμμα της βαθμίδας του Timer_A

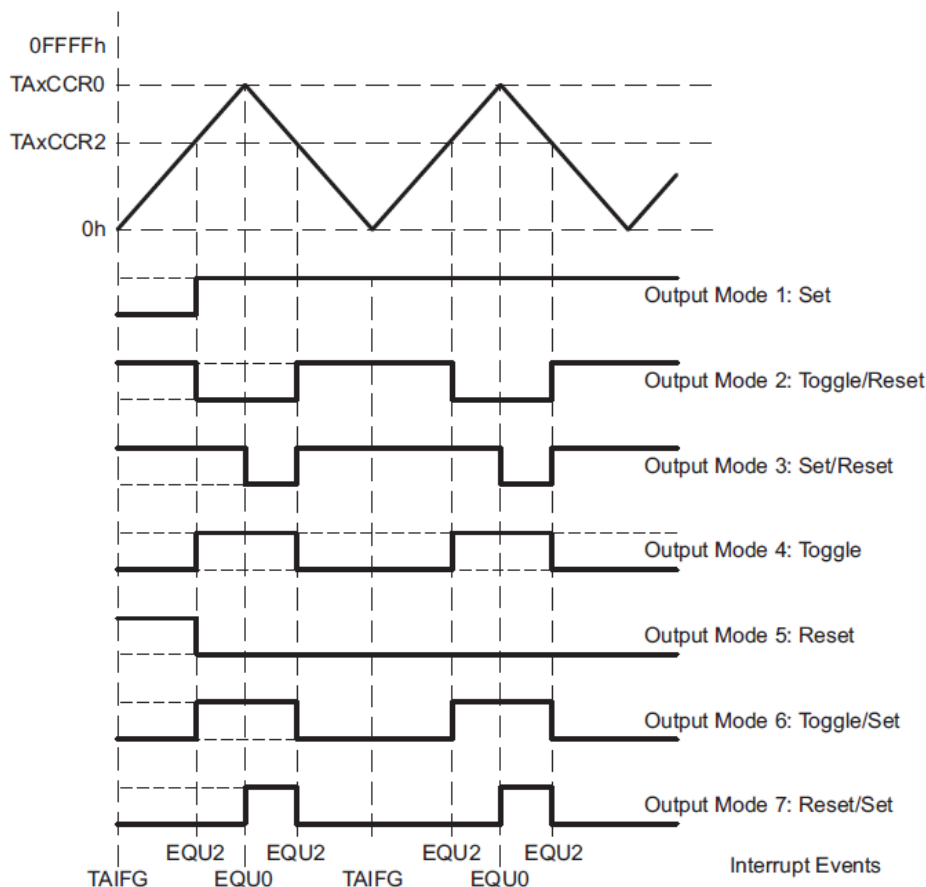
Οι τρόποι (modes) λειτουργίας του είναι οι εξής: α) το **Stop mode** όπου σταματάει το μέτρημα, β) το **Up mode** όπου ο μετρητής μετράει επαναλαμβανόμενα από το μηδέν έως την τιμή του καταχωρητή TA0CCR0, $n=1,2,..,7$, γ) το **Continuous mode** όπου ο μετρητής μετράει επαναλαμβανόμενα από το μηδέν έως την τιμή 0FFFFh και δ) το **Up/Down mode** όπου ο μετρητής επαναλαμβανόμενα αυξάνεται από το μηδέν έως την τιμή του καταχωρητή TA0CCR0 και στην συνέχεια μειώνεται ξανά προς το μηδέν. Στα παρακάτω σχήματα απεικονίζονται οι κυματομορφές εξόδου για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς και για όλους τους τρόπους λειτουργίας αντιστοίχα.



Εικόνα 29: Σχηματική αναπαράσταση του Up mode



Εικόνα 30: Σχηματική αναπαράσταση του Continuous mode



Εικόνα 31: Σχηματική αναπαράσταση του Up/Down mode

Timer_B

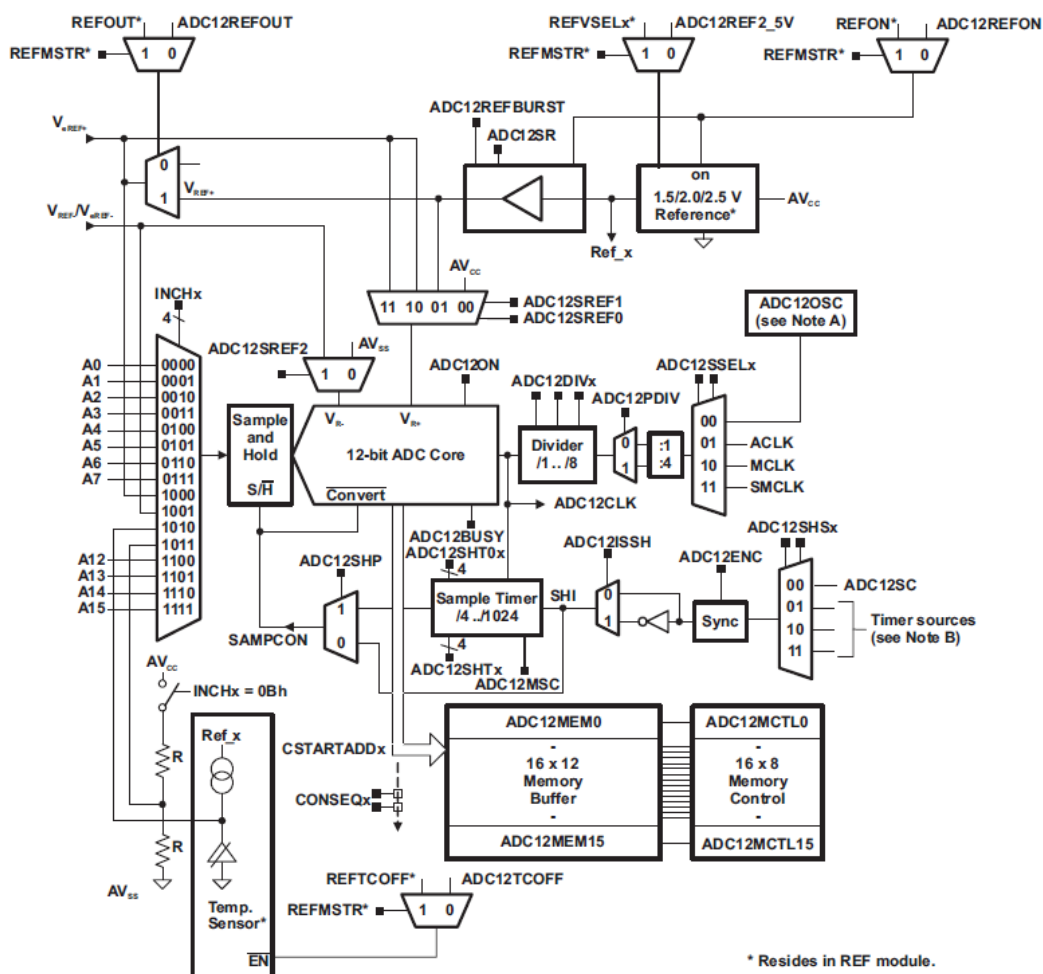
Ο χρονιστής B (Timer_B) είναι παρόμοιος με τον χρονιστή A αλλά με περισσότερες δυνατότητες στις διαδικασίες σύλληψης και σύγκρισης. Ακόμα παρέχει την δυνατότητα επιλογής του πλήθους των ψηφίων του (8 ή 12 ή 16 bits).

ADC12_A

Η βαθμίδα ADC12_A αποτελεί έναν υψηλών προδιαγραφών μετατροπέα 12-bit από αναλογικό σε ψηφιακό - analog-to-digital converter (ADC)-. Η βαθμίδα μετατροπής υλοποιείται από έναν πυρήνα SAR, έναν ελεγκτή ελέγχου της δειγματοληψίας, μία γεννήτρια παραγωγής της τάσης αναφοράς και έναν απομονωτή 16 λέξεων για τα αποτελέσματα 16 ανεξάρτητων μετατροπών χωρίς την εμπλοκή της CPU. Η βαθμίδα έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Μέγιστο ρυθμό μετατροπής μεγαλύτερο από 200-ksps.
- Μονότονο 12-bit μετατροπέα για την αποφυγή απώλειας της κωδικοποίησης.

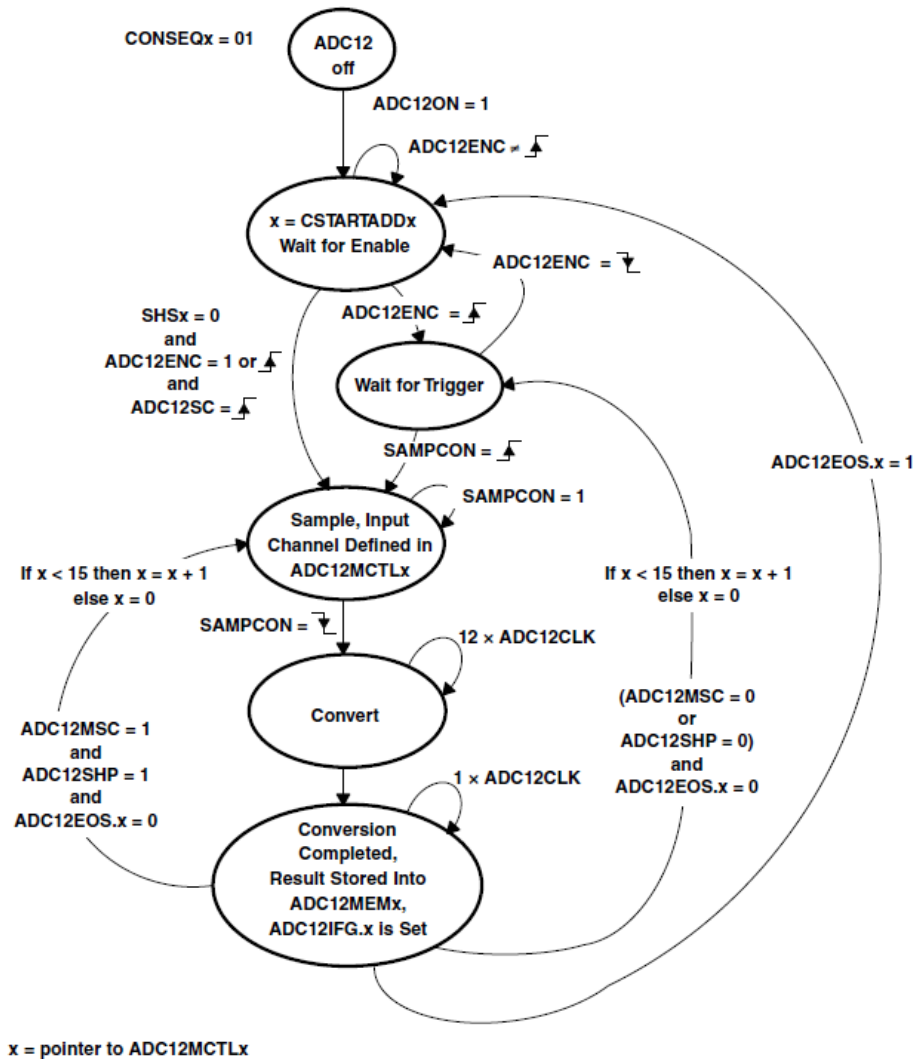
- Δειγματοληψία και συγκράτηση με προγραμματιζόμενη περίοδο, ελεγχόμενη από το πρόγραμμα ή από τους μετρητές.
- Επιλογή της τιμής της τάσεως αναφοράς από την γεννήτρια ανάμεσα στις τιμές 1,5V, 2V ή 2,5V.
- Επιλογή της εσωτερικής ή εξωτερικής τάσης αναφοράς.
- Μέχρι 12 ανεξάρτητα ρυθμιζόμενα εξωτερικά κανάλια εισόδου.
- Επιλογή της πηγής χρονισμού.
- Τρόποι λειτουργίας μονού καναλιού (**Single-channel**), επαναλαμβανόμενου μονού καναλιού (**repeat-single-channel**), ακολουθίας καναλιών (**sequence (autoscan)**) και επαναλαμβανόμενης ακολουθίας καναλιών (**repeat-sequence**).



Εικόνα 32: Σχηματική αναπαράσταση της βαθμίδας ADC12_A

Ο τρόπος λειτουργίας που επιλέχθηκε είναι ο «επαναλαμβανόμενης ακολουθίας καναλιών (**repeat-sequence**)» με τα bits multiscan (**ADC12MSC**) και αυτού (**ADC12SHP**) που ρυθμίζει την χρονική διάρκεια της δειγματοληψίας, μέσω του εσωτερικού timer, να είναι σε υψηλή στάθμη (=1). Η διαδικασία ενεργοποίησης αρχίζει με την τοποθέτηση σε υψηλή στάθμη του bit (**ADC12ON = 1**) και την θετική μετάβαση του bit επίτρεψης (**ADC12ENC**).

Η διαδικασία μετατροπής ξεκινάει με την ενεργοποίηση του bit πυροδότησης (ADC12SC) και συνεχίζεται για όλη την λίστα των καναλιών που έχουν επιλεγεί (ανίχνευση του bit τερματισμού(ADC12EOS.x = 1)). Ο κύκλος επαναλαμβάνεται για κάθε νέα μετάβαση από μηδέν σε ένα του bit πυροδότησης (ADC12SC) αρκεί το bit επίτρεψης (ADC12ENC) να παραμένει σε υψηλή στάθμη.

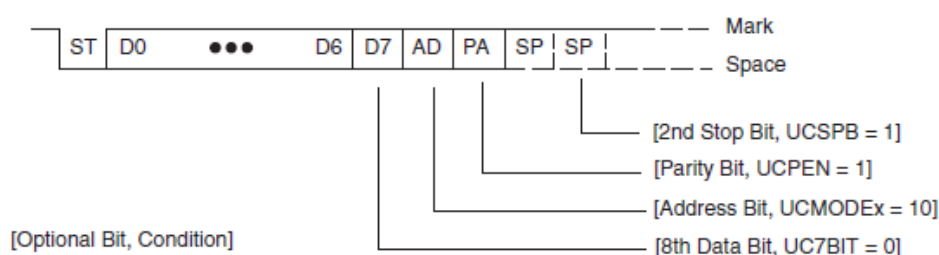


Εικόνα 33:Διάγραμμα ροής ενεργειών του τρόπου «repeat-sequence».

Universal Serial Communication Interface - UART Mode

Η επικοινωνία μέσω αυτού του ασύγχρονου τρόπου υλοποιείται με τους εξωτερικούς ακροδέκτες UCAxRXD και UCAxTXD για την λήψη και εκπομπή αντίστοιχα. Η μορφή του χαρακτήρα επικοινωνίας απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα και περιλαμβάνει ένα start bit, μήκος δεδομένων 7-bit ή 8-bit, ένα bit ισοτιμίας και ένα ή δύο stop bits. Το address bit χρησιμοποιείται

μόνο στην περίπτωση όπου στο κανάλι επικοινωνίας συνδέονται πάνω από δύο συσκευές.



Εικόνα 34: Απεικόνιση και περιγραφή του χαρακτήρα της ασύγχρονης επικοινωνίας

Η μορφή του χαρακτήρα που εκλέχθηκε είναι ένα start bit, μήκος δεδομένων 8-bit, χωρίς bit ισοτιμίας και stop bit. Το baud rate εκλέχθηκε ίσο με 57600 kbs.

4.2 Βασικά διαγράμματα ροής

Βασικός βρόγχος

Ο βασικός βρόγχος του προγράμματος εκτελείται κάθε φορά που αρχικοποιείται ο μικροελεγκτής (ρουτίνα εξυπηρέτησης της διακοπής Reset) και περιλαμβάνει τις παρακάτω διεργασίες, όπου εκτελούνται με την αντίστοιχη σειρά.

- Η ρύθμιση του watchdog timer με χρονικό διάστημα 2 δευτερολέπτων.
- Αρχικοποίηση της βαθμίδας που παρέχει τα σήματα χρονισμού της συσκευής.
- Ο ορισμός των ακροδεκτών για λειτουργία ως εισόδων ή εξόδων.
- Αρχικοποίηση της οθόνης LCD και εμφάνιση της πρώτης σελίδας.
- Αρχικοποίηση της σειριακής πόρτας UART.
- Αρχικοποίηση του ρολογιού πραγματικού χρόνου RTC (Χρησιμοποιείται ο timer A ως βάση χρόνου).
- Αρχικοποίηση της βαθμίδας DMA για μεταφορά των μετατροπών του ADC_12 στην μνήμη RAM.
- Αρχικοποίηση του ADC_12.
- Ενεργοποίηση του χρονιστή B για την δημιουργία βάσης χρόνου επανάληψης της διαδικασίας μετατροπής από την βαθμίδα ADC_12.
- Περιοδικός μηδενισμός του watchdog timer μέσα σε ατέρμονο βρόγχο.

Ρουτίνα εξυπηρέτησης της διακοπής από την βαθμίδα DMA

Υπολογισμός της μέσης τιμής από τα πολυπλεγμένα δείγματα των τάσεων των μονάδων λήψης.

Ρουτίνα εξυπηρέτησης της διακοπής του timer A (compare match CCR1)

Υπολογισμός της τοπικής απόκλισης της τάσης που αντιστοιχεί στην ισχύ αναφοράς.

Ρουτίνα εξυπηρέτησης της διακοπής του timer A (compare match CCR2)

Υπολογισμός της τιμής του όζοντος.

Ρουτίνα εξυπηρέτησης της διακοπής του timer A (compare match CCR3)

Αποστολή δεδομένων μέσω της σειριακής πόρτας.

Ρουτίνα εξυπηρέτησης της διακοπής του timer A (overflow)

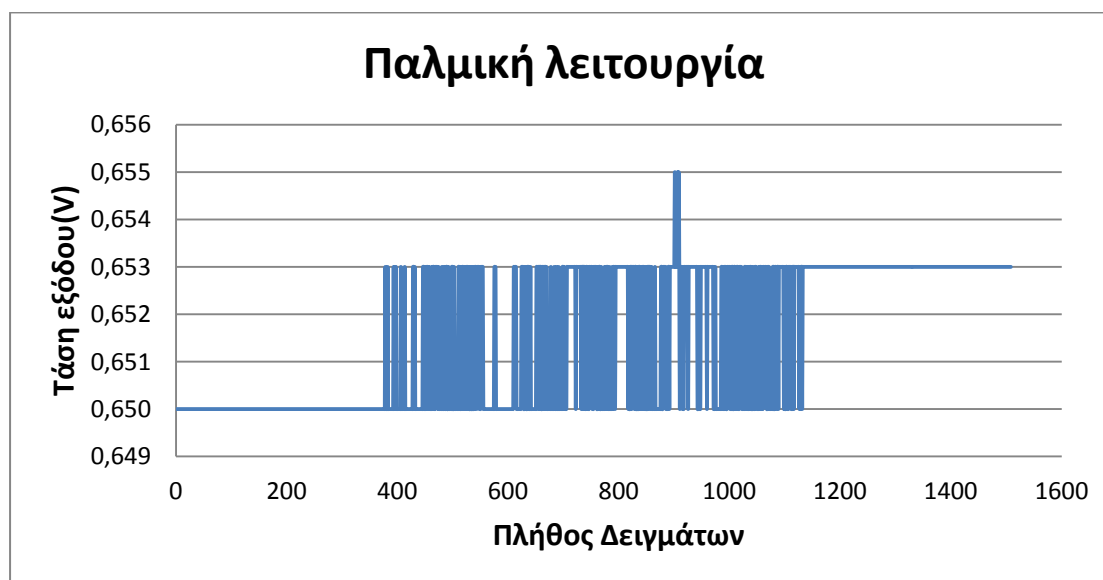
- Εξυπηρέτηση ηλεκτρολογίου με την μέθοδο polling.
- Ενημέρωση του ρολογιού RTC.
- Εκτέλεση των ρουτινών της εφαρμογής με διάφορες βάσεις χρόνου.

Κεφάλαιο 5^ο

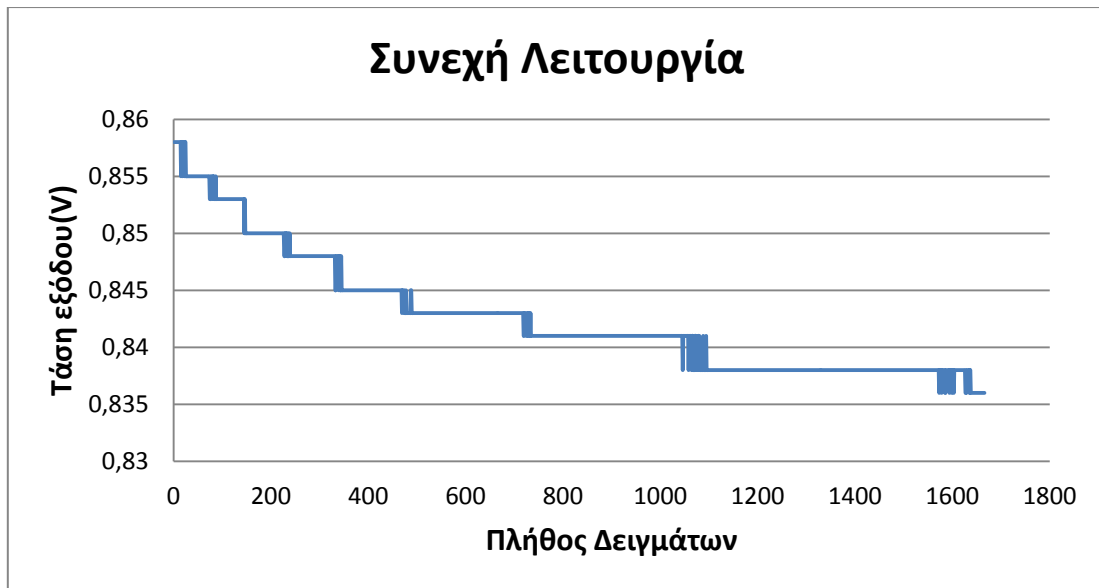
5 Πειραματικός χαρακτηρισμός και συμπεράσματα

Ο πειραματικός χαρακτηρισμός της συσκευής έγινε με σκοπό τον έλεγχο καλής λειτουργίας και ευστάθειας. Χρησιμοποιήθηκαν διάφοροι συνδυασμοί όπως μονή ή διπλή δέσμη, μικρά ή μεγάλα χρονικά διαστήματα υπολογισμού της τυπικής απόκλισης, κ.α.

Στα παρακάτω σχήματα φαίνεται μία τυπική κυματομορφή της τάσεως εξόδου από την βαθμίδα λήψης, η οποία χαραχθηκε ως συνάρτηση του πλήθους των δειγμάτων (Sample Rate=1 sample per second), όπως αυτά ελήφθησαν από το αρχείο καταγραφής και για τους συνεχή και παλμικό τρόπο εκπομπής. Από αυτά τα σχήματα φαίνεται καθαρά η σταθερότητα του συστήματος όσον αφορά την εκπεμπόμενη ισχύ και λήψη. Κατά την λειτουργία με τον παλμικό τρόπο παρατηρήθηκε καλύτερη σταθεροποίηση αφού η μέγιστη εκατοστιαία απόκλιση της τάσης είναι μικρότερη από 0,5% σε σχέση με αυτή που παρουσιάζει ο συνεχής τρόπος εκπομπής, όπου η μέγιστη εκατοστιαία απόκλιση είναι περίπου 1,5% (αλλά με τάση σταθεροποίησης).



Εικόνα 35: Γραφική παράσταση της τάσης εξόδου από την μονάδα λήψης σε συνάρτηση του πλήθους των δειγμάτων, με χρονικό βήμα ενός δευτερόλεπτου και για παλμική λειτουργία(40 Hz).



Εικόνα 36: Γραφική παράσταση της τάσης εξόδου από την μονάδα λήψης σε συνάρτηση του πλήθους των δειγμάτων, με χρονικό βήμα ενός δευτερόλεπτου και για συνεχή λειτουργία.

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την ανάλυση των πειραματικών μετρήσεων είναι τα εξής:

- ✓ Η συσκευή παρουσιάζει την απαιτούμενη σταθερότητα, όπως αυτή τέθηκε από τις προδιαγραφές λειτουργίας ως εργαστηριακό όργανο μέτρησης μη εμπορικής σχεδίασης.
- ✓ Η ακρίβεια που επιλέχθηκε να είναι της τάξης του τρίτου δεκαδικού ψηφίου θεωρείται ότι καλύπτει τις ανάγκες για μετρήσεις στο εργαστήριο, σε σχετικά υψηλές συγκεντρώσεις (περιοχή των ppm).
- ✓ Η ανοχή που έδειξε η συσκευή στον βιομηχανικό θόρυβο είναι εφάμιλλη εμπορικών οργάνων μέτρησης.
- ✓ Η πιθανή-μελλοντική τροποποίηση της συσκευής σύμφωνα με εμπορικά και βιομηχανικά πρότυπα κρίνεται σχετικά εύκολη.

Βιβλιογραφικές αναφορές

1. [http://en.wikipedia.org/wiki/Absorption_\(electromagnetic_radiation\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Absorption_(electromagnetic_radiation))).
2. http://lap.physics.auth.gr/pms/upload/Atmospheric%20Physics_2011.pdf
3. <http://en.wikipedia.org/wiki/Concentration>.
4. http://en.wikipedia.org/wiki/Parts-per_notation.
5. <http://www.lenntech.com/calculators/ppm/convert-part-per-million.htm>.
6. A. D. McNaught and A. Wilkinson (1997). *IUPAC. Compendium of Chemical Terminology* (2nd ed.). Oxford: Blackwell Scientific Publications. ISBN 0-9678550-9-8. "Standard conditions for gases: Temperature, 273.15 K [...] and pressure of 10^5 pascals. The previous standard [absolute pressure](#) of 1 atm (equivalent to 1.01325×10^5 Pa) was changed to 100 [kPa](#) in 1982. IUPAC recommends that the former pressure should be discontinued."
7. http://en.wikipedia.org/wiki/Beer%E2%80%93Lambert_law.
8. <http://elchem.kaist.ac.kr/vt/chem-ed/spec/beerslaw.htm>.
9. http://en.wikipedia.org/wiki/Molar_absorptivity.
10. http://en.wikipedia.org/wiki/Absorption_spectroscopy.
11. Material from Laser-based combustion diagnostic course. 2010.
12. Bo Zhou, « Spatially resolved temperature and concentration determination in flames using FTIR emission spectroscopy combined with HITRAN/HITEMP database», MASTER OF SCIENCE, Division of Combustion Physics, Department of Physics, Lund University, March 2011.
13. http://en.wikipedia.org/wiki/Infrared_spectroscopy.
14. Hanst, P.L., Wong, N.W., and Bragin, J. (1982) A long-path infra-red study of Los Angeles smog Atmos. Environ.,16(5), 969-981.
15. Tuazon, E.C., Graham, R.A., Winer, A.M., Easton, R.R., Pitts, J.N., and Hanst, P.L. (1978) A kilometer pathlength Fourier-transform infrared system for the study of trace pollutants in ambient air and synthetic atmospheres. Atmos. Environ., (12), 865-875.
16. Mao, Z., Demirgian, J., Mathew, A., and Hyre, R. (1995) Use of Fourier transform infrared spectrometry as a continuous emission monitor. Waste Management, 15(8), 567-577.
17. Albert Michelson, Edward Morley (1887). "[On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether](#)". *American Journal of Science* **34** (203): 333–345.
18. Denise Louise McMaster, Measurements of Ground Level Air Pollution in Central Ontario by Fourier Transform Infrared Spectroscopy, Watershed Ecosystems M.Sc. Program, May 2002.

19. Bergamaschi, P., M. Schupp, and G. W. Harris, "High-precision direct measurements of $^{13}\text{CH}_4/^{12}\text{CH}_4$ and $^{12}\text{CH}_3\text{D}/^{12}\text{CH}_4$ ratios in atmospheric methane sources by means of a long-path tunable diode laser absorption spectrometer" ,*Appl. Optics*, Vol. 33, 7704-7716, 1994.
20. Roller, C., K. Namjou, J. D. Jeffers, M. Camp, A. Mock, P. J. McCann, and J. Grego, "Nitric oxide breath testing by tunable-diode laser absorption spectroscopy: Application in monitoring respiratory inflammation", *Appl. Optics*, Vol. 41, 6018-6029, 2002.
21. Guan, Z., M. Lewander, and S. Svanberg, "Quasi zero-background tunable diode laser absorption spectroscopy employing a balanced Michelson interferometer", *Opt. Express*, Vol. 16, 21714-21720, 2008.
22. Galais, A., G. Fortunato, and P. Chavel, "Gas concentration measurement by spectral correlation: Rejection of interferent species", *Appl. Optics*, Vol. 24, 2127-2134, 1985.
23. Somesfalean, G., M. Sjöholm, L. Persson, H. Gao, T. Svensson, and S. Svanberg, "Temporal correlation scheme for spectroscopic gas analysis using multimode diode lasers", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 86, 184102, 2005.
24. Lou, X. T., G. Somesfalean, F. Xu, Y. G. Zhang, and Z. G. Zhang, "Gas sensing by tunable multimode diode laser using correlation spectroscopy", *Appl. Phys. B*, Vol. 93, 671-676, 2008.
25. Lou, X. T., G. Somesfalean, B. Chen, and Z. G. Zhang, "Oxygen measurement by multimode diode lasers employing gas correlation spectroscopy," *Appl. Optics*, Vol. 48, 990-997, 2009.
26. Zhang, Z. G., X. T. Lou, G. Somesfalean, B. Chen, Y. G. Zhang, H. Wang, S. Wu, and Y. Qin, "Simultaneous detection of multiple gas species by correlation spectroscopy using a multi-mode diode laser," *Opt. Lett.*, Vol. 35, 1749-1751, 2010.
27. Macho, S., R. Boque, M. S. Larrechi, and F. X. Rius, "Multivariate determination of several compositional parameters related to the content of hydrocarbon in naphtha by MIR spectroscopy", *Analyst*, Vol. 124, 1827-1831, 1999.
28. Forina, M., S. Lanteri, M. C. Cerrato Oliveros, and C. Pizarro Millan, "Selection of useful predictors in multivariate calibration", *Anal. Bioanal. Chem.*, Vol. 380, 397-418, 2004.
29. Barton, F. E., J. D. Barger, G. R. Gamble, D. L. Mcalister, and E. Hequet, "Analysis of Sticky Cotton by Near-Infrared Spectroscopy", *Appl. Spectrosc.*, Vol. 59, 1388-1392, 2005.
30. Udo Frieß, Remote Sensing of Atmospheric Trace Gases, Institute of Environmental Physics University of Heidelberg, Germany, Summer School 2013 Lecture B, Wednesday, July 17.
31. G. Kenanakis, D. Vernardou, E. Koudoumas, G. Kiri-akidis and N. Katsarakis, "Ozone Sensing Properties of ZnO Nanostructures Grown by the Aqueous Chemical Growth Technique," *Sensors and Actuators*, Vol. B124, No. 1, 2007, pp. 187-191.

32. M. Suche, N. Katsurakis, S. Christoulakis, S. Niko-lopoulou and G. Kiriakidis, "Low Temperature Indium Oxide Gas Sensors," *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol. 118, No. 1-2, 2006, pp. 135-141. doi:10.1016/j.snb.2006.04.020
33. J. Li, Q. Li, J. V. Dyke and P. K. Dasgupta, "Atmospheric Ozone Measurement with an Inexpensive and Fully Automated Porous Tube Collector-Colorimeter," *Talanta*, Vol. 74, No. 4, 2008, pp. 958-964. doi:10.1016/j.talanta.2007.08.002
34. R. Frycek, M. Jelinck, T. Kocourek, P. Fitl, M. Vrnata, V. Myskik and M. Vrbova, "Thin Organic Layers Prepared by MSPLE for Gas Sensor Application," *Thin Solid Films*, Vol. 495, No. 1-2, 2006, pp. 308-311. doi:10.1016/j.tsf.2005.08.178
35. S. Suzuki and K. Nagashima, "A Galvanic Solid-State Sensor for Monitoring Ozone and Nitrogen Dioxide," *Analytica Chimica Acta*, Vol. 144, 1982, pp. 261-266. doi:10.1016/S0003-2670(01)95542-4
36. E. Trakhovsky, "Ozone Amount Determined by Transmittance Measurements in the Solar-Blind Ultraviolet Spectral Region," *Applied Optics*, Vol. 24, No. 21, 1985, pp. 3519-3522. doi:10.1364/AO.24.003519
37. L. M. Garrison, D. D. Doda and A. E. S. Green, "Total Ozone Determination by Spectroradiometry in the Middle Ultraviolet," *Applied Optics*, Vol. 18, No. 6, 1979, pp. 850-855. doi:10.1364/AO.18.000850
38. T. Takayanagi, X.-L. Su, P. K. Dasgupta and R. W. Shaw, "Chemiluminometric Measurement of Atmospheric Ozone with Photoactivated Chromotropic Acid," *Analytical Chemistry*, Vol. 75, No. 21, 2003, pp. 5916-5925.
39. S. O'Keeffe, C. Fitzpatrick and E. Lewis, "An Optical Fiber Based Ultra Violet and Visible Absorption Spectroscopy System for Ozone Concentration Monitoring," *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol. 125, No. 2, 2007, pp. 372-378. doi:10.1016/j.snb.2007.02.023
40. E. M. Weinstock, C. M. Schiller and J. G. Anderson, "In Situ Stratospheric Ozone Measurements by Long Path UV Absorption: Developments and Interpretation," *Journal of Geophysical Research, Atmospheres*, Vol. 91, No. D4, 1986, pp. 5237-5248. doi:10.1029/JD091iD04p05237
41. M Fowles and R P Waynet, "Ozone monitor using an LED source", *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, Vol. 14, 1981. Printed in Great Britain.
42. M. Degner, H. Ewald, E. Lewis, "LED Based Spectroscopy - a Low Cost Solution for High Resolution Concentration Measurements e.g. for Gas Monitoring Applications", *Fifth International Conference on Sensing Technology*, 2011.
43. Krishnan R. Parameswaran and David M. Sonnenfroh, "Compact Ozone Photometer Based on UV LEDs", This work was funded by NASA through contract number NNX09CC20P and Program Manager Dr. Robert Chatfield.

44. Yoshinobu Aoyagi¹, Misaichi Takeuchi, Kaoru Yoshida, Masahito Kurouchi, Tsutomu Araki, Yasushi Nanishi, Hiroyasi Sugano, Yumi Ahiko, Hirotaka Nakamura, " High-Sensitivity Ozone Sensing Using 280 nm Deep Ultraviolet Light-Emitting Diode for Detection of Natural Hazard Ozone ", *Journal of Environmental Protection*, 2012, 3, 695-699.
45. M. Degner, N. Damaschke, H. Ewald, E. Lewis," High Resolution LED-Spectroscopy for Sensor Application in Harsh Environment", *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, 2010 IEEE.
46. Degner, M. ; Damaschke, N. ; Ewald, H. ; O'Keefe, S. ; Lewis, E. ," UV LED-based Fiber Coupled Optical Sensor for Detection of Ozone in the ppm and ppb Range", *Sensors*, 2009 IEEE.
47. A. L. Gomez and E. P. Rosen," Fast response cavity enhanced ozone monitor", *Atmos. Meas. Tech.*, 6, 487-494, 2013.
48. G. Sonnemann, *Ozon*, Akademie-Verlag, Berlin, 1992.
49. Y. Aoyagi, M. Takeuchi, K. Yoshida, M. Kurouchi, T. Araki, Y. Nanishi, H. Sugano, Y. Ahiko, and H. Nakamura, "High-Sensitivity Ozone Sensing Using 280 nm Deep Ultraviolet Light-Emitting Diode for Detection of Natural Hazard Ozone. *Journal of Environmental Protection*, Vol. 3 No. 8, pp. 695-699. August, 2012.
50. S. O'Keefe, C. Fitzpatrick, and E. Lewis, "Ozone Measurement Using Optical Fibre Sensors in the Visible Region," *Proceedings of the Fourth IEEE Conference on Sensors*, 2005, pp 758-761.
51. H. Itoh, I.M. Rusinov, K. Omiya, and S. Suzuki, "Improvement of a Measurement System for Surface Loss Rate of Ozone," *Ozone: Science & Engineering: The Journal of the International Ozone Association*. Volume 34, Issue 5, pp 370-377. February, 2012
52. M. Bataller, E. Veliz, R. Pcrez-Rey, L. A. Femhdez, M. Gutierrez, and A. Mkquez, "Ozone Swimming Pool Water Treatment under Tropical Conditions," *Ozone: Science and Engineering*. Volume 22, Issue 6, pp 677 - 682. 2000.
53. R. Rice, "Ozone in the United States of America. State of art," *Proceedings 13 Ozone World Congress*, 1. Kyoto, Japan, 1997, p. S A-S.
54. R. Larocque, "Ozone application in Canada: A start of the art review," *Proceedings 13" Ozone World Congress*, 1. Kyoto, Japan 1997, p.SA-7.
55. Bohme, "Ozone technology in Germany Industrial Enterprise," *Proceedings 13" Ozone World Congress*, I. Kyoto, Japan, 1997, p. S A-3.
56. L. XU, "Use of Ozone to Improve the Safety of Fresh Fruits and Vegetables," *FOOD Technology*, Vol. 53, No. 10. October, 1999.
57. Food and Drug Administration. Secondary direct food additives permitted in food for human consumption. *Fed Reg* 66(123):33829-30. 2001.
58. A. Garcia, J. R. Mount, and P. M. Davidson, "Ozone and Chlorine Treatment of Minimally Processed Lettuce," *Journal of Food Science* Volume 68, Issue 9, pages 2747-2751, November 2003.
59. https://www.osha.gov/dts/chemicalsampling/data/CH_259300.html

60. G. Yu, J. Lin, and F. Qian, "Measurement of Ozone in the Printing Process," *Advanced Materials Research* Vol. 380, pp 201-204, 2012.
61. M. Degner, N. Darnaschke, H. Ewald, S. O'Keeffe, and E. Lewis, "UV LED-based fiber coupled optical sensor for detection of ozone in the ppm and ppb range," *Proceedings of IEEE Sensors*, 2009 pp. 95-99.
62. Air Quality Guidelines for Europe. WHO Regional Publications, European Series, Second Edition, No. 91. 2000. http://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0005/747321E7I922.pdf. pp 181, 182.
63. E. Hawe, G. Dooly, P. Chambers, C. Fitzpatrick, and E. Lewis, "Gas detection using an Integrating Sphere as a Multipass Absorption Cell," *Proceedings of SPIE - Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, v 6379, 2006, Photonic Applications for Aerospace, Transportation, and Harsh Environments.
64. M. A. Gondal, A. Dastageer, & Z. H. Yamani, "Laser-induced photo acoustic detection of ozone at 266 nm using resonant cells of different configuration," *Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, v 44, n 13, p 1457-1464. October, 2009.
65. S. O'Keeffe, C. Fitzpatrick, E. Lewis, "An optical fibre based ultra violet and visible absorption spectroscopy system for ozone concentration monitoring," *Sensors and Actuators B: Chemical* Volume 125, Issue 2, Pages 372-378. August, 2007.
66. J.P. Burrows, A. Richter, A. Dehn, B. Deters, S. Himmelmann, S. Voigt, and J. Orphal, "Atmospheric remote-sensing reference data from GOME, Part 2, Temperature-dependent absorption cross-sections of O₃ in the 231-794 NM range," *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, v 61, n 4, pp 509-517. March, 1999.
67. AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION RESEARCH FOUNDATION AND COMPAGNIE GENERALE DES EAUX, "Ozone in Drinking Water Treatment: Application and Engineering", Langlais B., Reckhow A., Brink D.R., Editors (Chelsea,MI: CRC Press/Lewis Publishing, 1991, 569 pp.
68. <http://www.ti.com.cn/cn/lit/ds/symlink/lm3431.pdf>
69. http://www.roithner-laser.com/datasheets/led_deepuv/uvtop255.pdf.
70. <http://www.roithner-laser.com/datasheets/pd/uv/uv-tiamo-s.pdf>
71. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/msp430f5438a.pdf>
72. <http://www.ti.com/lit/ug/slau208n/slau208n.pdf>
73. http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT231X.pdf
74. <http://en.wikipedia.org/wiki/RS-232>
75. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn75240.pdf>
76. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lp2985-n.pdf>
77. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/amc1200.pdf>
78. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina333.pdf>
79. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/iso7420.pdf>