



ΜΚΕ για την διερεύνηση της συμπεριφοράς συνθετικών πολυμερικών ΗΤV SIR μονωτήρων σε εφαρμογές υπαίθριων εγκαταστάσεων Υψηλής Τάσης με χρήση της τεχνικής LIBS

Ο. Κοκκινάκη¹, Α. Κλίνη¹, Δ. Πυλαρινός², Ε. Θαλασσινάκης²,
Ν. Μαυρικάκης³, Κ. Σιδεράκης³, Ε. Κουδουμας³, Δ. Άγγλος², Κ. Καλπούζος²

¹Ινστιτούτο Ηλεκτρονικής Δομής και Λείζερ - Ίδρυμα Τεχνολογίας και Έρευνας, Ηράκλειο, Κρήτη (ΙΗΔΛ-ΙΤΕ)

²Διεύθυνση Διαχείρισης Νησιών, ΔΕΔΔΗΕ

³Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών, ΤΕΙ Κρήτης

1. Εισαγωγή

Οι μονωτήρες υψηλής τάσης αποτελούν έναν αδύναμο κρίκο για τα συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας καθώς βρίσκονται τοποθετημένοι σε όλο το μήκος του δικτύου, υπόκεινται σε ποικιλία διαφορετικών συνθηκών και η συμπεριφορά τους είναι έντονα συνδεδεμένη με τις υφιστάμενες καταπονήσεις και συνθήκες, σημαντικό μέρος των οποίων αποτελεί η άμεση και έμμεση επίδραση των καιρικών συνθηκών [1-4]. Έτσι οι δοκιμές που διενεργούνται στο εργαστήριο (π.χ. [5-7]) δύναται να αποδώσουν σημαντική γνώση για την αντοχή ή συμπεριφορά των μονωτήρων σε συγκεκριμένες καταπονήσεις, αλλά αδυνατούν να μοντελοποιήσουν επαρκώς τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας και να προβλέψουν επαρκώς την απόδοση του μονωτήρα στο δίκτυο. Το πρόβλημα είναι πιο έντονο για τους σύγχρονους συνθετικούς μονωτήρες καθώς το υλικό κατασκευής τους, τους προσδίδει επιπλέον παράγοντες αβεβαιότητας σε σχέση με τα υλικά κατασκευής των παραδοσιακών κεραμικών μονωτήρων (γυαλί και πορσελάνη). Παρ'όλα αυτά, τα συγκριτικά πλεονεκτήματα των συνθετικών μονωτήρων είναι αρκετά ισχυρά ώστε να θεωρούνται συνολικά ανώτερη λύση έναντι των κεραμικών και να υιοθετούνται σε συνεχώς αυξανόμενο βαθμό από τις ηλεκτρικές εταιρείες. Αυτό σημαίνει ότι παράλληλα αναπτύσσεται η ανάγκη μη επεμβατικών διαδικασιών ώστε να διερευνηθεί η συμπεριφορά των μονωτήρων αυτών σε βάθος χρόνου και υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Στην παρούσα φάση, οι διαδικασίες ελέγχου συμπεριλαμβάνουν κυρίως οπτικούς ελέγχους για σημάδια φθοράς [8-10], ενώ μόλις πρόσφατα (2014) εξετάστηκε η προτυποποίηση ορισμένων ιδιοτήτων τους [11].

Το κύριο πρόβλημα που επιδρά στην συμπεριφορά των μονωτήρων και είναι το πλέον δύσκολο εξεταζόμενο είναι η ρύπανση, όρος ο οποίος περιγράφει την εναπόθεση εν δυνάμει αγωγίμων σωματιδίων στην επιφάνεια του μονωτήρα (π.χ. αλάτι μεταφερόμενο από την θάλασσα σε παράκτιες περιοχές). Το φαινόμενο της ρύπανσης επηρεάζεται από πλήθος παραγόντων που αφορούν τόσο τους χρησιμοποιούμενους μονωτήρες (υλικό κατασκευής, γεωμετρία) όσο και τις συνθήκες λειτουργίας σε κάθε περιοχή. Ιδιαίτερα σημαντικές θεωρούνται οι καιρικές συνθήκες (άνεμος, υγρασία, θερμοκρασία, βροχόπτωση, θύελλες κλπ), η γεωγραφική τοποθεσία (υψόμετρο, απόσταση από θάλασσα, έρημο κλπ) καθώς και η όποια δραστηριότητα αφορά γειτονικές εγκαταστάσεις (εργοστάσια, αγροί που υφίστανται ψεκασμό κ.α.) [1-3]. Το πρώτο βήμα για την εκκίνηση του φαινομένου της ρύπανσης είναι η επικάλυψη ρύπων στην επιφάνεια. Σε επόμενο στάδιο οι ρύποι αυτοί υπό την παρουσία κάποιου μηχανισμού ύγρανσης σχηματίζουν ένα αγωγίμο διάλυμα στην επιφάνεια του μονωτήρα, το οποίο θα επιτρέψει τη ροή ρεύματος διαρροής. Το ρεύμα αυτό θερμαίνει ανομοιόμορφα τον μονωτήρα δημιουργώντας ξηρές ζώνες (περιοχές μεγάλης αντίστασης), με την τάση πλέον να εφαρμόζεται στα άκρα των ζωνών αυτών. Υπό ευνοϊκές συνθήκες, εκκενώσεις (τόξα) υπερπηδούν τις ζώνες αυτές, το φαινόμενο επεκτείνεται και μπορεί να φτάσει στην πλήρη υπερπήδηση του μονωτήρα [1-3].

Για την αντιμετώπιση του φαινομένου έχουν προταθεί και ακολουθηθεί αρκετές προσεγγίσεις. Όπου χρησιμοποιούνται κεραμικοί μονωτήρες, συνήθως καταρτίζεται ένα πρόγραμμα καθαρισμού (πλυσίματος) με βάση τα τοπικά χαρακτηριστικά. Η τακτική που φαίνεται να κερδίζει έδαφος όμως σαν συνολική λύση είναι η αντικατάσταση των παραδοσιακών κεραμικών μονωτήρων με συνθετικούς που βασίζονται σε ελαστομερή σιλικόνης. Σε επίπεδο γραμμών μεταφοράς, οι παραδοσιακοί κεραμικοί μονωτήρες αντικαθίστανται από συνθετικούς βασισμένους σε πολυμερή ελαστομερών της πολυδιμεθύλοξιλανής (PDMS) βουλκανισμένων σε υψηλές θερμοκρασίες [12-16]. Το υλικό αυτό, καθώς και οι μονωτήρες, χαρακτηρίζονται απλά ως ΗΤV SIR (High Temperature Vulcanization Silicone Rubber). Σε εφαρμογές υποσταθμών η αλλαγή των ήδη εγκατεστημένων μονωτήρων είναι μια περίπλοκη και κοστοβόρα διαδικασία (ακόμα και αν υποθεθεί ότι υπάρχουν στην αγορά αντίστοιχοι μονωτήρες) και έτσι συχνά επιλέγεται η χρήση επικαλύψεων (βασισμένων σε πολυμερή που έχουν ακολουθήσει διαδικασία βουλκανισμού σε θερμοκρασίες δωματίου—Room Temperature



Vulcanization Silicone Rubber ή RTV SIR) προς εφαρμογή στην επιφάνεια κεραμικών (γυάλινων ή πορσελάνινων) μονωτήρων [16-18].

Τα υλικά αυτά προσφέρουν υδρόφοβη συμπεριφορά με αποτέλεσμα η ύγρανση των επικαθίμενων ρύπων να μην οδηγεί σε δημιουργία αγωγίμου διαλύματος στην επιφάνεια, καθώς το προσπίπτον νερό διατηρείται σε μορφή σταγόνων [1-4]. Η υδρόφοβη ιδιότητα μεταδίδεται στους επικαθίμενους ρύπους μέσω ενός μηχανισμού μετανάστευσης μορίων χαμηλού μοριακού βάρους από το εσωτερικό του υλικού [19-20]. Δυστυχώς η συμπεριφορά των συγκεκριμένων υλικών δεν είναι ομοίμορφη κατά την λειτουργία τους. Αφενός παρουσιάζουν πεπερασμένο χρόνο ζωής και αφετέρου παρουσιάζουν κύκλους απώλειας και ανάκαμψης της υδροφοβίας τους [19-20], με τον ρυθμό και τον βαθμό επανάκαμψης να είναι άμεσα συναρτημένοι από τον βαθμό γήρανσης του υλικού. Μια χαρακτηριστική φωτογραφία παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.



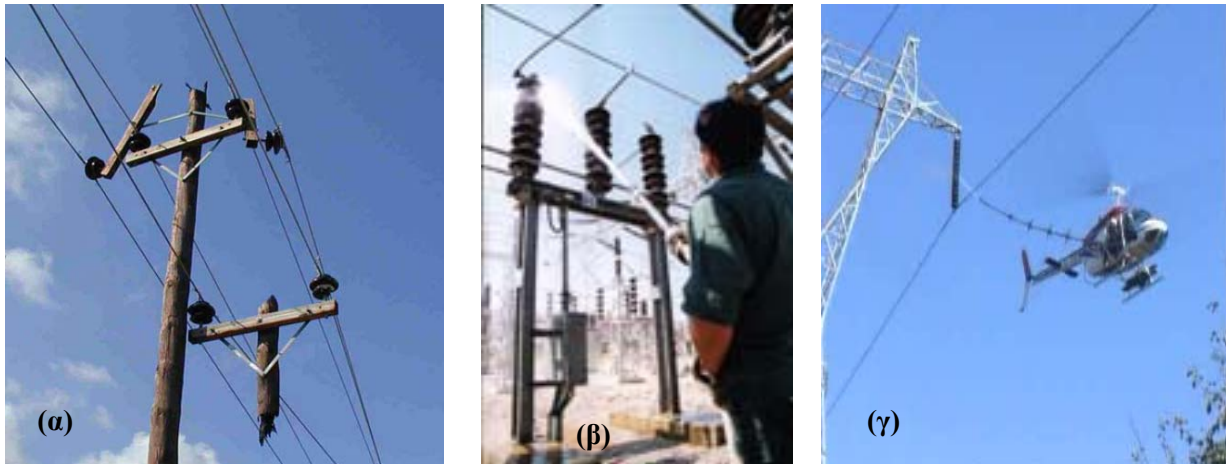
Εικόνα 1. Δύο συνθετικοί μονωτήρες με διαφορετικό βαθμό υδροφοβίας μετά την αφαίρεσή τους από το δίκτυο Κρήτης

Ο μη καταστροφικός έλεγχος των εγκατεστημένων μονωτήρων υψηλής τάσης είναι ένα ισχυρό ζητούμενο για τις εταιρείες παραγωγής, μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Παρόλα αυτά, οι αντικειμενικές δυσκολίες της εφαρμογής δεν έχουν επιτρέψει μέχρι σήμερα την υλοποίηση μιας αποτελεσματικής, σε πραγματικές συνθήκες, τεχνικής. Προς αυτήν την κατεύθυνση διεξάγεται έρευνα από ακαδημαϊκά και ερευνητικά ιδρύματα σε συνεργασία με τις ενδιαφερόμενες εταιρείες. Στην παρούσα εργασία θα παρουσιαστεί η εν εξελίξει έρευνα που διεξάγουν το ΤΕΙ Κρήτης και το ΙΤΕ σε συνεργασία με τον ΔΕΔΔΗΕ, για την ανάπτυξη και δοκιμή μιας τεχνικής μη καταστροφικού ελέγχου για μονωτήρες υψηλής τάσης. Πρόκειται για την τεχνική φασματοσκοπίας πλάσματος επαγομένου από laser (Laser Induced Breakdown Spectroscopy-LIBS). Η έρευνα διεξάγεται στα πλαίσια του έργου POLYDIAGNO, 11ΣΥΝ-7-1503, της Δράσης ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑ 2011, της ΓΓΕΤ. Το έργο συγχρηματοδοτείται από την Ελλάδα και το Ευρωπαϊκό Ταμείο Περιφερειακής Ανάπτυξης της Ευρωπαϊκής Ένωσης στο Πλαίσιο του ΕΣΠΑ 2007-2013 και του Ε.Π. Ανταγωνιστικότητα και Επιχειρηματικότητα και των Π.Ε.Π. Κρήτης και Νήσων Αιγαίου και Π.Ε.Π. Αττικής. Το πρώτο βήμα για την ανάπτυξη και τον έλεγχο των αποτελεσμάτων της τεχνικής είναι η αφαίρεση από το δίκτυο μονωτήρων που έχουν υποστεί διαφορετικού βαθμού καταπόνηση, ώστε να ελεγχθεί αν η προτεινόμενη τεχνική δύναται να τους διακρίνει. Ο όρος «καταπόνηση» περιλαμβάνει εδώ τόσο τα έτη λειτουργίας όσο και τον βαθμό της υφιστάμενης ρύπανσης στην συγκεκριμένη περιοχή. Για να γίνει κατανοητή η επιλογή, στην συνέχεια θα γίνει μια σύντομη αναφορά στην περίπτωση της Κρήτης.

2. Η περίπτωση της Κρήτης

Το δίκτυο Κρήτης είναι αυτό που στον Ελλαδικό χώρο αντιμετωπίζει τα μεγαλύτερα προβλήματα ρύπανσης. Αυτά παρουσιάστηκαν από τα πρώτα βήματα ανάπτυξης του δικτύου (τότε 66 kV) στις αρχές της δεκαετίας του 1960 με πυρκαγιές στους ξύλινους στύλους λόγω ρευμάτων διαρροής [21-22]. Μία φωτογραφία από παρόμοιο (μεταγενέστερο) περιστατικό στο δίκτυο διανομής (20 kV), φαίνεται στην Εικόνα 2α. Με την ανάπτυξη του δικτύου των 150 kV, καταγράφηκαν και οι πρώτες υπερπηδήσεις λόγω ρύπανσης σε γραμμές μεταφοράς στην ανατολική πλευρά του νησιού [22-27] με την ρύπανση να αναφέρεται διαχρονικά ως κυρίαρχη αιτία σφαλμάτων [22-27]. Για την αντιμετώπισή της εφαρμόστηκαν διάφορες μέθοδοι, όπως το πλύσιμο των

μονωτήρων με σφουγγάρια (1978-1981), το πλύσιμο με νερό υπό πίεση εκτός τάσης (εισήχθη το 1985) (Εικόνα 2β) και το πλύσιμο υπό τάση με χρήση ελικοπτερού (εισήχθη το 1995) (Εικόνα 2γ) [22].



Εικόνα 2. (α) Κατεστραμμένος στύλος από πυρκαγιά λόγω ρύπανσης (β) πλύσιμο μονωτήρων σε υποσταθμό (γ) πλύσιμο μονωτήρων σε γραμμή μεταφοράς με ελικόπτερο.

Οι παράκτιες περιοχές θεωρούνται εν γένει περιβάλλοντα υφιστάμενα έντονη ρύπανση [1-3] αλλά στην περίπτωση της Κρήτης, πρόσθετοι τοπικοί παράγοντες επιβαρύνουν το πρόβλημα. Ενδεικτικά αναφέρονται: το επίμηκες σχήμα του νησιού (260 χλμ από το δυτικό μέχρι το ανατολικό άκρο με μέση απόσταση βόρειας και νότιας πλευράς 32 km), τα περισσότερα από 1000 km ακτογραμμής, οι δυνατοί άνεμοι, κυρίως βόρειοι και βορειοδυτικοί, η εκτεταμένη άνυδρη περίοδος πριν, κατά την διάρκεια αλλά μετά την καλοκαιρινή περίοδο, η παράκτια ανάπτυξη του δικτύου αλλά και του ίδιου του νησιού και τέλος το σχετικά υψηλό επίπεδο τάσης (150 kV). Το δίκτυο Κρήτης απεικονίζεται στην Εικόνα 3.



Εικόνα 3. Το δίκτυο Κρήτης. Προφανής η παράκτια ανάπτυξη του δικτύου

Συνθετικοί μονωτήρες στο δίκτυο Κρήτης χρησιμοποιούνται κυρίως στις γραμμές μεταφοράς. Ιστορικά, η πρώτη τοποθέτηση έγινε το 1979 με μονωτήρες TEFLON που εμφάνισαν προβλήματα μηχανικής αντοχής [26]. Νεώτεροι συνθετικοί μονωτήρες άρχισαν να τοποθετούνται σε δοκιμαστική βάση στο δίκτυο Κρήτης σε επιλεγμένους Πύργους στις γραμμές Μοΐρες-Ιεράπετρα (1993, 1994), Ιεράπετρα-Σητεία (1994), Λινοπεράματα-Ιεράπετρα (1993, 1994), Λινοπεράματα-Μοΐρες (1995, 1997, 1998) και Λινοπεράματα-Χανιά II (1997). Η τοποθεσία των επιλεγμένων πύργων φαίνεται στην Εικόνα 4. Η πρώτη ευρεία τοποθέτηση HTV SIR έγινε στις γραμμές Λινοπεράματα-Ιεράπετρα και Αθερινόλακκος-Ιεράπετρα το 2004. Πρόσφατα (2014-2015) εκτελέστηκε ένα ευρύ πρόγραμμα αντικατάστασης μονωτήρων στο δίκτυο με αποτέλεσμα πλέον το σύνολο των γραμμών να είναι εξοπλισμένο με μονωτήρες HTV SIR με την εξαίρεση των γραμμών Χανιά-Καστέλι και Μοΐρες-Ιεράπετρα. Αναλυτικά το κύριο είδος χρησιμοποιούμενων μονωτήρων και το έτος ευρείας τοποθέτησης

HTV SIR φαίνεται στον Πίνακα 1. Για λόγους πληρότητας, πρέπει να αναφερθεί ότι σε ορισμένους Πύργους του συστήματος έχουν εγκατασταθεί και κεραμικοί επικαλυμμένοι μονωτήρες ώστε να αντιμετωπιστούν ειδικά προβλήματα [28]. Οι περιπτώσεις αυτές δεν λαμβάνονται υπόψη στην παρούσα εργασία. Σε κάθε περίπτωση αφορούν πολύ περιορισμένη εφαρμογή με την γενική εικόνα να είναι αυτή που παρουσιάζεται στον Πίνακα 1.



Εικόνα 4. Οι πρώτες τοποθετήσεις συνθετικών SIR μονωτήρων στο δίκτυο Κρήτης

Πίνακας 1. Το είδος μονωτήρων στις ΓΜ του δικτύου Κρήτης

Γραμμή Μεταφοράς	Είδος (υλικό) μονωτήρων	Έτος ευρείας τοποθέτησης HTV SIR
Αθρινόλακκος-Ιεράπετρα	HTV SIR	2004
Αθρινόλακκος-Σητεία	HTV SIR	2014
Ηράκλειο II-Σύστημα	HTV SIR	2014
Ιεράπετρα-Σητεία	HTV SIR	2014
Λινοπεράματα-Ηράκλειο II	HTV SIR	2014
Λινοπεράματα-Ιεράπετρα	HTV SIR	2004
Λινοπεράματα-Μοίρες	HTV SIR	2014
Λινοπεράματα-Χανιά	HTV SIR	2014
Λινοπεράματα-Χανιά II	HTV SIR	2014
Ρέθυμνο-Σπήλι	HTV SIR	2014
Μοίρες-Ιεράπετρα	Γυαλί	
Χανιά-Καστέλι	Πορσελάνη, Γυαλί (τερματικοί πύργοι)	

3. Ρυπαντικός Χάρτης Κρήτης

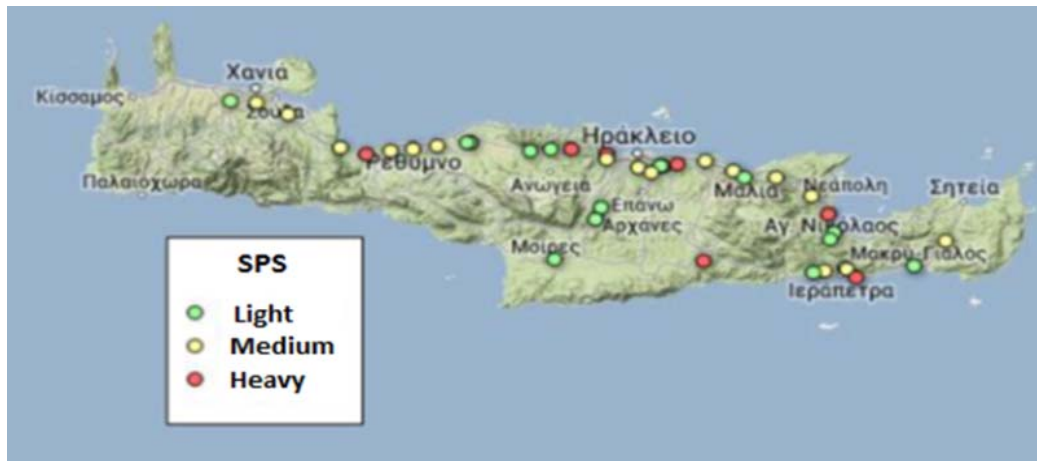
Για την αξιολόγηση της υφιστάμενης ρύπανσης σε συγκεκριμένες περιοχές, έχουν προταθεί συγκεκριμένες τεχνικές μέτρησης βάσει του προτύπου IEC 60815 [2]. Η πιο απλή τεχνική αφορά τον καθαρισμό μονωτήρων μιας δισκοειδούς αλυσίδας, βρισκόμενης εκτός τάσης, ανά τακτά χρονικά διαστήματα (διαφορετικά για κάθε μονωτήρα) και τη μέτρηση της αγωγιμότητας στο διάλυμα που προκύπτει. Η προσαρμογή της τιμής αυτής λαμβάνοντας υπόψη την θερμοκρασία, τον όγκο του νερού και την επιφάνεια του μονωτήρα δίνει την τιμή ισοδύναμης πυκνότητας επικάλυψης άλατος (Equivalent Salt Deposit Density ή ESDD). Η μέτρηση βάσει προτύπου οφείλει να καλύπτει χρονικό διάστημα τουλάχιστον ενός έτους ώστε να αποδώσει πιστότερα τον βαθμό ρύπανσης της περιοχής. Στην ουσία λαμβάνεται υπόψη μόνο η μεγαλύτερη μέτρηση και το μεγάλο χρονικό διάστημα καθώς και η συχνότητα των μετρήσεων υιοθετείται ώστε να μεγιστοποιηθεί η πιθανότητα η μέγιστη καταγεγραμμένη τιμή να είναι κοντά στην πραγματική μέγιστη, δεδομένου του δυναμικού χαρακτήρα του φαινομένου. Στην περίπτωση της Κρήτης, η ιδιομορφία της παρατεταμένης ξηράς περιόδου (κατά την οποία η ρύπανση γενικώς αυξάνεται) σημαίνει ότι μια μέτρηση προς το τέλος της ξηράς περιόδου και πριν την πρώτη βροχή αναμένεται να δώσει τιμή που να προσεγγίζει ικανοποιητικά την πραγματική μέγιστη. Για να αποφευχθούν τυχόν απρόβλεπτοι παράγοντες, η μέτρηση επαναλαμβάνεται το επόμενο ή για δύο επόμενα έτη. Με την παραδοχή αυτή, επιλέχθηκαν για τη διεξαγωγή της μέτρησης διάφοροι Πύργοι στο δίκτυο Κρήτης. Ο σκοπός των μετρήσεων αυτών ήταν η βελτιστοποίηση του χρόνου πλυσίματος και έτσι χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικοί μονωτήρες (πορσελάνινοι και γυάλινοι, δισκοειδείς και ομίχλης) ανάλογα με τους τότε χρησιμοποιούμενους στην περιοχή. Οι αλυσίδες μονωτήρων στηρίχθηκαν στο μεταλλικό σκελετό των Πύργων



όπως φαίνεται στην Εικόνα 5. Οι μετρήσεις επαναλήφθηκαν για χρονικό διάστημα 3 ετών. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων υπογράμμισε την σημασία των πόλεων σαν πηγή ρύπανσης, επιβεβαίωσε την ισχυρή συσχέτιση με την απόσταση από την θάλασσα ενώ έδειξε και την ισχυρή επίδραση του φυσικού καθαρισμού με τις μετρήσεις δυτικά των Χανίων (όπου επικρατούν ισχυρότερες και συχνότερες βροχοπτώσεις) να εμφανίζουν χαμηλότερες τιμές σε σύγκριση με περιοχές στην υπόλοιπη Κρήτη με κατά τα άλλα παρόμοια χαρακτηριστικά [29]. Η τελική προσαρμογή των μετρήσεων στο μονωτήρα αναφοράς (γυάλινος δισκοειδής) έγινε με βάση μια σειρά συγκριτικών μετρήσεων που διεξήχθησαν στο Σταθμό Δοκιμών «ΤΑΛΩΣ» [30] και η πλέον πρόσφατη μορφή του ρυπαντικού χάρτη απεικονίζεται στην Εικόνα 6.



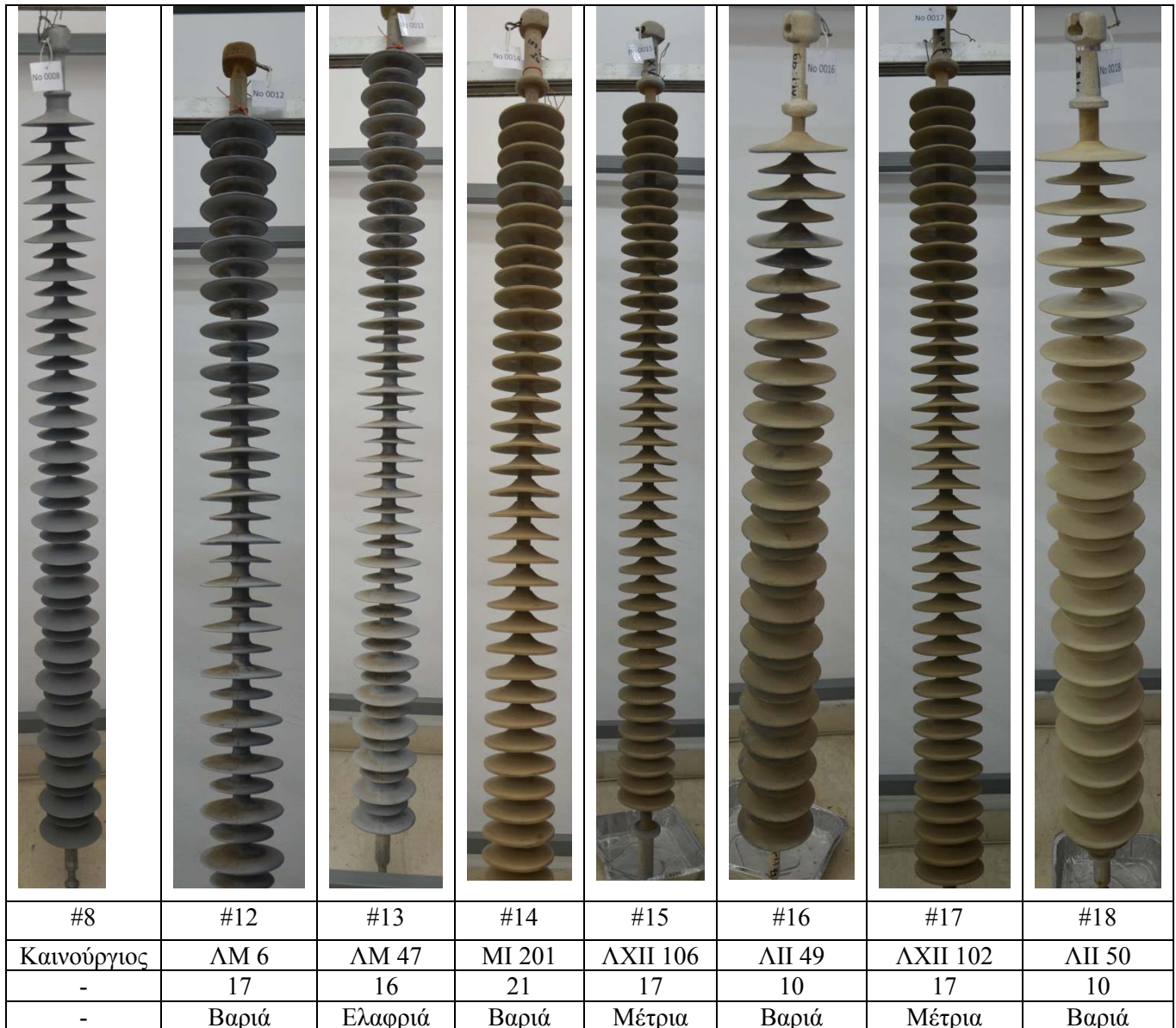
Εικόνα 5. Μονωτήρες εκτός τάσης για μετρήσεις ρύπανσης



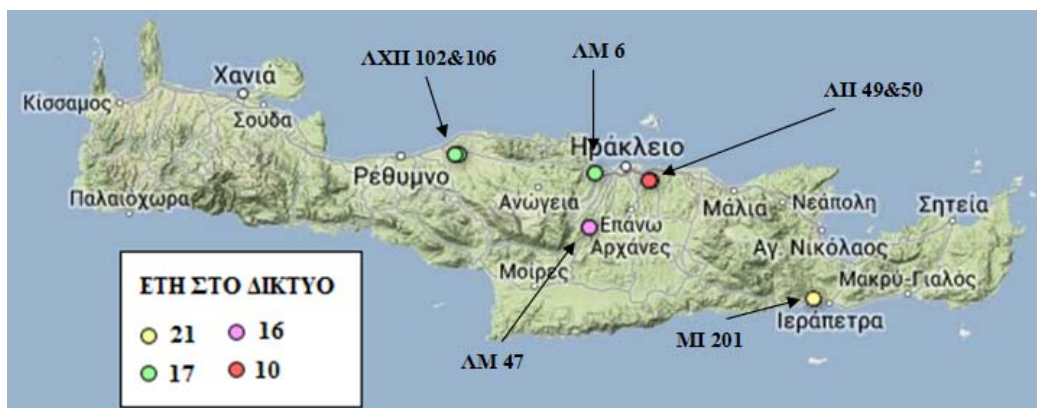
Εικόνα 6. Η πλέον πρόσφατη μορφή του ρυπαντικού χάρτη Κρήτης

4. Αφαίρεση μονωτήρων από το δίκτυο

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα και συνυπολογίζοντας και άλλους παράγοντες (π.χ. ζητήματα πρόσβασης), επιλέχθηκαν 7 Πύργοι του συστήματος μεταφοράς και από κάθε έναν από αυτούς αφαιρέθηκαν 3 συνθετικοί μονωτήρες. Οι δύο μονωτήρες από κάθε τριάδα δεσμεύθηκαν ώστε να αναρτηθούν στο ζυγό των 150 kV του Σταθμού Δοκιμών «ΤΑΛΩΣ» [31] ενώ οι εναπομείναντες 7 στάλθηκαν για εργαστηριακές δοκιμές στους συνεργαζόμενους φορείς (ΙΤΕ και ΤΕΙ). Για να επιτευχθεί η ζητούμενη ποικιλία στα έτη λειτουργίας επιλέχθηκαν μονωτήρες και από αυτούς που είχαν τοποθετηθεί κατά τη δοκιμαστική περίοδο όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο. Επιπροσθέτως, ελήφθησαν υπόψη οι μετρήσεις ρύπανσης και η εμπειρία από το δίκτυο. Οι μονωτήρες, τα χρόνια λειτουργίας τους στο δίκτυο και ο εκτιμώμενος βαθμός ρύπανσης στην περιοχή φαίνονται στην Εικόνα 7 ενώ η γεωγραφική θέση φαίνεται στην Εικόνα 8.



Εικόνα 7. Οι μονωτήρες, οι πύργοι από τους οποίους αφαιρέθηκαν, τα χρόνια λειτουργίας στο δίκτυο και ο εκτιμώμενος βαθμός ρύπανσης στην περιοχή. Ως αναφορά προστέθηκε και ο μονωτήρας Νο. 8.



Εικόνα 8. Η γεωγραφική θέση των Πύργων μεταφοράς από τους οποίους αφαιρέθηκαν μονωτήρες



5. Διαγνωστικές τεχνικές ελέγχου της λειτουργικότητας των συνθετικών μονωτήρων

Ο βασικός στόχος της οπτικής εξέτασης των μονωτήρων δικτύου είναι η μελέτη, ανάπτυξη και εφαρμογή κατάλληλης οπτικής διαγνωστικής τεχνικής για την αναγνώριση και αξιολόγηση της λειτουργικότητας και αξιοπιστίας τους. Οι διαγνωστικές τεχνικές με χρήση λέιζερ που έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία στην περίπτωση των συνθετικών μονωτήρων υψηλής τάσης, σύμφωνα με τη μέχρι τώρα βιβλιογραφία, αφορούν κυρίως τεχνικές φασματοσκοπίας φθορισμού επαγόμενου από λέιζερ (Laser Induced Fluorescence (LIF)) [32] και φασματοσκοπίας Raman [33].

Η τεχνική LIF είναι ιδιαίτερα ελκυστική αφενός μεν λόγω του μή καταστρεπτικού χαρακτήρα της που επιτρέπει υψηλή ευαισθησία στις επιφανειακές ιδιότητες των υλικών, και αφετέρου δε, επειδή μπορεί σχετικά εύκολα να χρησιμοποιηθεί στο πεδίο, λόγω της απλότητας της απαιτούμενης οπτικής διάταξης. Συγκεκριμένα, έχουν αναφερθεί σημαντικές διαφοροποιήσεις στα φάσματα φθορισμού από την επιφάνεια μονωτήρων δικτύου, σε σύγκριση με τα φάσματα από καινούργιους μονωτήρες, λόγω της ανάπτυξης μικροοργανισμών (πχ. μούχλα, μύκητες κτλ) και άλλων βιολογικών επικαθήσεων στην επιφάνεια των μονωτήρων σε περιβάλλοντα της βόρειας Ευρώπης κυρίως. Παρομοίως, έχουν καταγραφεί φάσματα Raman μονωτήρων που έχουν υποστεί διηλεκτρική εκκένωση (dielectric breakdown) και άλλα φαινόμενα ηλεκτρικής δραστηριότητας που προκαλούν διάβρωση, στα οποία εμφανίζονται αρκετές διαφοροποιήσεις, ενδεικτικές των αλλαγών στη χημική τους σύσταση σε σχέση με φάσματα αναφοράς, καινούργιων, μη χρησιμοποιημένων μονωτήρων. Άλλες μελέτες έχουν δείξει ότι η φωτοαποδόμηση των μονωτήρων με λέιζερ μπορεί να εφαρμοστεί ως ένα εργαλείο για γρήγορη εκτίμηση της κατάστασης των μονωτήρων, διότι το βάθος του κρατήρα που δημιουργείται στο υλικό ως αποτέλεσμα της φωτοαποδόμησής του εξαρτάται από το βαθμό καταπόνησής τους [34].

Παρ' όλα αυτά, οι μονωτήρες του δικτύου της Κρήτης που εξετάστηκαν στα εργαστήρια του ΙΗΔΑ-ΙΤΕ, δεν έδειξαν αξιόλογες διαφορές στα φάσματα LIF και Raman, έναντι των φασμάτων των καινούργιων μονωτήρων, παρα μόνο μικρή ελάττωση της έντασης του σήματος. Από την άλλη μεριά, διερευνήθηκε και η τεχνική φασματοσκοπίας πλάσματος επαγόμενου από λέιζερ (Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS)) στο κατά πόσον μπορεί να παρέχει ξεκάθαρη πληροφορία για τη χημική σύσταση των μονωτήρων, ώστε να είναι άμεση και αποτελεσματική η αξιολόγηση και κατηγοριοποίησή τους ανάλογα με το είδος της καταπόνησης που έχουν υποστεί ή/και την ηλικία τους.

Η τεχνική LIBS είναι μια αναλυτική τεχνική που επιτρέπει τον προσδιορισμό της στοιχειακής σύστασης των υλικών, έχοντας ως βάση την χαρακτηριστική ατομική εκπομπή από το πλάσμα το οποίο παράγεται όταν ένας παλμός λέιζερ υψηλής ενέργειας εστιάζεται στο υλικό. Η τεχνική LIBS έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές για ποιοτική, ημι-ποσοτική και ποσοτική ανάλυση υλικών. Είναι ταχύτατη, μικρο-καταστρεπτική, παρέχει τη δυνατότητα ανάλυσης στην επιφάνεια του αντικειμένου χωρίς να απαιτεί δειγματοληψία και μπορεί να εφαρμοστεί επί-τόπου (in-situ) μέσω φορητού συστήματος LIBS [35]. Όλα αυτά τα στοιχεία καθιστούν την τεχνική LIBS ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα όσον αφορά σε αναλυτικές εφαρμογές στο πεδίο.

Αξίζει να σημειωθεί ότι φορητό σύστημα LIBS-LIDAR έχει χρησιμοποιηθεί [36] για την εξ' αποστάσεως ανίχνευση και αφαίρεση στρώματος άλατος από την επιφάνεια μονωτήρων υψηλής τάσεως, τύπου SIR, πράγμα που είναι πολύ σημαντικό για τη διασφάλιση της αξιοπιστίας μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα δίκτυο.

Όμως δεν υπάρχει μελέτη στη βιβλιογραφία που να παρουσιάζει την τεχνική LIBS ως μέθοδο ελέγχου της ποιότητας των συνθετικών μονωτήρων μέσω ανάλυσης των φασμάτων LIBS που ελήφθησαν από μονωτήρες δικτύου σε σχέση με καινούργιους μονωτήρες. Αυτό ακριβώς είναι το αντικείμενο της μελέτης των δειγμάτων μονωτήρων που εξετάστηκαν με την τεχνική LIBS στα εργαστήρια του ΙΗΔΑ-ΙΤΕ. Στόχος του έργου που επιτελείται είναι η εύρεση ενός κατάλληλου φασματικού δείκτη που να παρέχει ξεκάθαρη πληροφορία για την κατάσταση και τη λειτουργικότητα των μονωτήρων.

6. Η τεχνική LIBS – Πειραματική διαδικασία

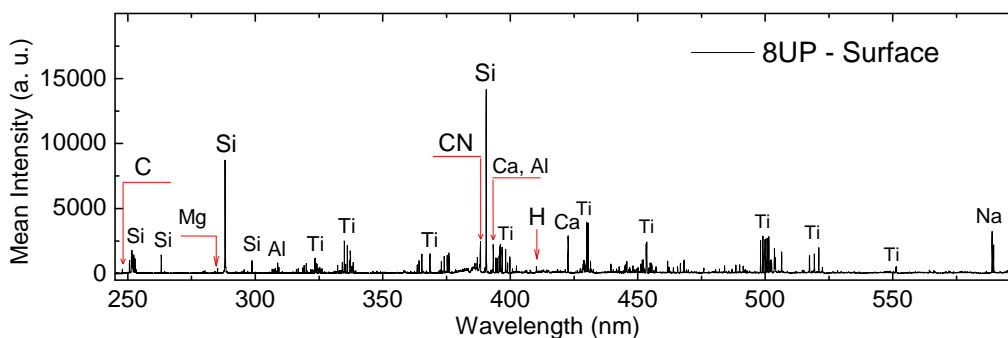
Η διαδικασία της ανάλυσης με την τεχνική LIBS αρχίζει με την ακτινοβολία μικρού όγκου υλικού (μικρότερου από 0.1 mm^3), μέσα σε πολύ μικρή χρονική περίοδο (5-20 ns). Αυτή η ταχύτατη εναπόθεση ενέργειας, επιτυγχάνεται με εστίαση του παλμού του λέιζερ στην επιφάνεια του προς ανάλυση υλικού, και επιφέρει, μέσα από μια σειρά διαδικασιών τη διάσπαση (τήξη, εξάτμιση, ατομοποίηση, ιονισμός) του υλικού και τη δημιουργία πλάσματος. Το πλάσμα αποτελείται από ηλεκτρόνια, ουδέτερα και ιονισμένα άτομα, μικρά μόρια και μεγαλύτερα ατομικά και μοριακά συσσωματώματα, και απομακρύνεται από την επιφάνεια του

δείγματος με ταχύτητες της τάξης των 0.5-50 km/s. Αμέσως μετά τον σχηματισμό του, το πλάσμα χαρακτηρίζεται από υψηλή θερμοκρασία και πυκνότητα ηλεκτρονίων, που έχει ως αποτέλεσμα να παρουσιάζει έντονη φασματική εκπομπή στην υπεριώδη και ορατή περιοχή που προέρχεται από υψηλά διεγερμένα άτομα και ιόντα. Η εκπομπή αυτή εξελίσσεται με το χρόνο και καθώς το πλάσμα ψύχεται, ένα φάσμα με έντονα οξείες κορυφές εκπομπής εμφανίζεται [37, 38, 39].

Χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικές πειραματικές διατάξεις έτσι ώστε να εξεταστεί η περίπτωση δημιουργίας πλάσματος στην επιφάνεια των μονωτήρων εστιάζοντας δέσμη λέιζερ τόσο στο υπεριώδες (KrF Excimer laser στα 248 nm; $f = +100$ mm; ίχνος δέσμης λέιζερ πάνω στο δείγμα: 5×10^{-4} cm²) όσο και στο υπέρυθρο (Nd:YAG laser στα 1064 nm; $f = +75$ mm; ίχνος δέσμης λέιζερ πάνω στο δείγμα: 3×10^{-4} cm²), επειδή ο συντελεστής απορρόφησης του ελαστομερούς σιλικόνης (SIR) είναι πολύ μεγαλύτερος στο υπεριώδες από ότι στο υπέρυθρο και αναμένουμε πιθανώς διαφορετικά αποτελέσματα. Η συλλογή της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας πλάσματος γίνεται μέσω οπτικής ίνας (διαμέτρου 25 μm) που είναι τοποθετημένη σε απόσταση περίπου 1 cm από την επιφάνεια του δείγματος. Στη συνέχεια το φως μεταφέρεται στο φασματογράφο (τύπου Mechelle, $\Delta\lambda = 0.1$ nm) για ανάλυση στα διαφορετικά μήκη κύματος, ενώ η καταγραφή του φάσματος γίνεται μέσω ανιχνευτή (κάμερα ICCD) που είναι τοποθετημένος στη σχισμή εξόδου του φασματογράφου. Οι κάμερες ICCD παρέχουν τη δυνατότητα ρύθμισης, με τη βοήθεια κατάλληλης γεννήτριας παλμών, του εύρους της χρονικής περιόδου παρακολούθησης της εκπομπής, επιτρέποντας βέλτιστη καταγραφή του φάσματος σε συγκεκριμένη χρονική καθυστέρηση (time delay, τ_D) μετά την άφιξη του παλμού του λέιζερ και για ορισμένο χρονικό διάστημα/ εύρος (time gate, τ_G) ανάλογα με τις εκάστοτε πειραματικές συνθήκες.

Η καταγραφή της εκπομπής του πλάσματος σε ένα φασματομέτρο για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα, έχει ως αποτέλεσμα την κατασκευή ενός φάσματος LIBS, το οποίο μετά από ανάλυση, παρέχει άμεση και σαφή πληροφορία που αφορά τη σύσταση του εξεταζόμενου υλικού. Πιο συγκεκριμένα, οι χαρακτηριστικές οξείες γραμμές ατομικής εκπομπής στο φάσμα, οδηγούν στην αναγνώριση των στοιχείων που περιέχονται στη μικροσκοπική αυτή ποσότητα ύλης που αφαιρέθηκε, και αντικατοπτρίζουν την τοπική στοιχειακή σύσταση του δείγματος (ποιοτική ανάλυση). Η ένταση των κορυφών ή το ολοκλήρωμα της εκπομπής, μπορεί εν γένει να συσχετισθεί με την αριθμητική πυκνότητα του καθενός από τα συστατικά του πλάσματος, και αυτό με τη σειρά του, με τη συγκέντρωση συγκεκριμένων στοιχείων στο αποδομημένο υλικό (ποσοτική ανάλυση) [37, 38].

Ένα τυπικό φάσμα LIBS από δείγμα καινούργιου μονωτήρα φαίνεται στην Εικόνα 9. Διακρίνεται έντονη η παρουσία των ατομικών γραμμών εκπομπής των Si, Ti, Al, Ca Na και σε μικρότερη ένταση οι γραμμές εκπομπής του C και Mg. Η ύπαρξη Ti και Al είναι ενδεικτική της παρουσίας προσμίξεων TiO₂ και Al₂O₃. Επίσης, διακρίνεται η μπάντα μοριακής εκπομπής του CN, που είναι ένα μόριο που σχηματίζεται στο πλάσμα κατά την αντίδραση του άνθρακα με το άζωτο της ατμόσφαιρας [40].



Εικόνα 9. Τυπικό φάσμα LIBS που προέκυψε από το μέσο όρο 5 φασμάτων (ένα φάσμα για κάθε μία από 5 διαφορετικές περιοχές) στην επιφάνεια δείγματος από το άνω τμήμα του καινούργιου μονωτήρα #8 (80 J/cm² @ 248 nm; $\tau_D = 1.1$ μs, $\tau_G = 10$ μs).

7. PDMS και Silicon Rubber

Οι μονωτήρες που εξετάστηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Πρόκειται για:

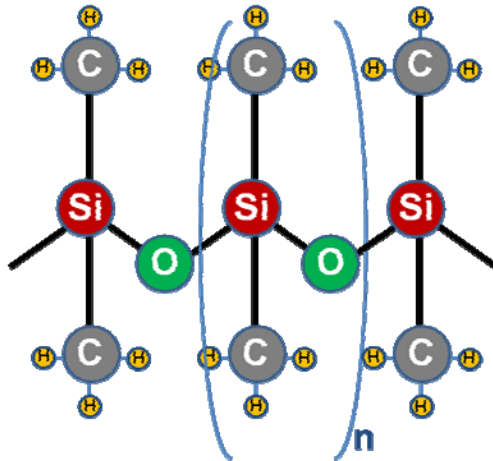
- μονωτήρες καινούργιους και αχρησιμοποίητους, όπως παρελήφθησαν από τον κατασκευαστή και
- μονωτήρες δικτύου που έχουν χρησιμοποιηθεί για πολλά χρόνια στις γραμμές του δικτύου της Κρήτης.



Το υλικό που χρησιμοποιείται για τη σύνθεση του περιβλήματος των μονωτήρων υψηλής τάσης εξωτερικού χώρου είναι το ελαστομερές σιλικόνης (silicone rubber/ SIR) η βάση του οποίου είναι το πολυμερές πολυδιμεθυλοσιλοξάνιο (PolyDiMethylSiloxane, PDMS).

Η μακροχρόνια υδροφοβικότητα που αναπτύσσεται στην επιφάνεια του PDMS και η ικανότητα διατήρησής της σε συνθήκες λειτουργίας βελτιώνει σημαντικά την ικανότητα μόνωσης, αυξάνοντας την αξιοπιστία του ενεργειακού συστήματος. Επιπλέον, το σύνθετο αυτό υλικό είναι ελαφρό και η χρήση του προσφέρει μικρότερο βαθμό ελέγχου της κατάστασής του, μειώνοντας σημαντικά το κόστος εγκατάστασης και συντήρησης μονωτήρων που είναι κατασκευασμένοι από SIR. Επίσης, έχει καλές διηλεκτρικές ιδιότητες, υψηλή αντοχή στη θερμική καταπόνηση, χημική αδράνεια σε πλήθος οξειδωτικών ουσιών και χαμηλή τοξικότητα και περιβαλλοντική επικινδυνότητα.

Η κύρια αλυσίδα του PDMS (Εικόνα 10) αποτελείται από άτομα πυριτίου που συνδέονται κατά μήκος της αλυσίδας εναλλάξ με άτομα οξυγόνου (ενέργεια σύνδεσης 445 kJ/mol) και πλευρικά με άτομα άνθρακα (ενέργεια σύνδεσης 318 kJ/mol). Η μεγάλη διαφορά ηλεκτραρνητικότητας που αναπτύσσεται στο δεσμό Si-O εξασφαλίζει θερμική ευστάθεια και υψηλή ανθεκτικότητα της αλυσίδας. Τα άτομα του άνθρακα ενώνονται με άτομα υδρογόνου σχηματίζοντας μεθύλια, τα οποία τείνουν να προσκολλώνται στην αλυσίδα, ως αποτέλεσμα της πόλωσης που υφίστανται από το άτομο του πυριτίου που είναι λιγότερο ηλεκτραρνητικό από το άτομο του άνθρακα και έλκει περισσότερο τα ηλεκτρόνια.



Εικόνα 10. Το δομικό στοιχείο της κύριας αλυσίδας του πολυμερούς PDMS που επαναλαμβάνεται n φορές.

Σε πραγματικές συνθήκες πεδίου τα συνθετικά υλικά που χρησιμοποιούνται στις υπαίθριες μονώσεις περιέχουν και πληθώρα προσμίξεων, όπως είναι η ένυδρη αλουμίνα ($Al_2O_3 \cdot H_2O$ -ATH) ή/και το διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2 , silica). Ο λόγος χρήσης των προσμίξεων είναι η ανάγκη ενίσχυσης της αντίστασης των υλικών ενάντια στην επιφανειακή ηλεκτρική δραστηριότητα, που εμφανίζεται σαν αποτέλεσμα της παροδικής απώλειας της υδροφοβίας τους, λόγω της σταδιακής γήρανσης και καταπόνησής τους. Ουσιαστικά, τα προσθετικά ενίσχυσης διαχειρίζονται και απομακρύνουν την ποσότητα ενέργειας που διοχετεύεται στο υλικό, λόγω της έντονης ηλεκτρικής δραστηριότητας που εξελίσσεται στην επιφάνειά τους. Χαρακτηριστικά φαινόμενα επιφανειακής ηλεκτρικής δραστηριότητας που προκαλούν σημαντικές αλλαγές στη χημική δομή ενός μονωτήρα είναι ο σχηματισμός αγωγίμων καναλιών άνθρακα (tracking) και η διάβρωση (erosion). Επίσης, διάφορες προσμίξεις χρησιμοποιούνται κατά τη διαδικασία βουλκανισμού του SIR.

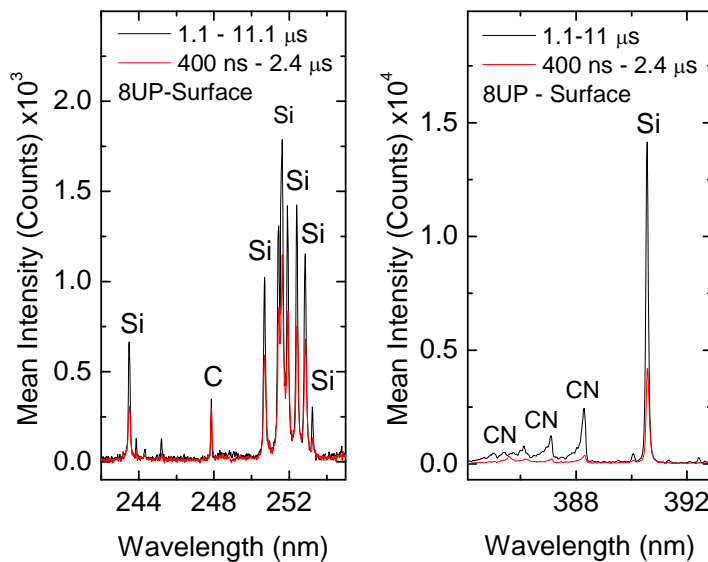
Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι η κάμερα ICCD που χρησιμοποιείται στα πλαίσια αυτής της εργασίας έχει πολύ χαμηλή κβαντική απόδοση στο εγγύς υπέρυθρο, τα φάσματα αναλύονται με βάση τις γραμμές εκπομπής του πυριτίου, του άνθρακα και του υδρογόνου, αλλά όχι του οξυγόνου (στα 777.2 nm), το οποίο εξάλλου βρίσκεται σε αφθονία στον ατμοσφαιρικό αέρα με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατός ο διαχωρισμός του από το οξυγόνο του PDMS.

8. Βελτιστοποίηση συνθηκών καταγραφής φάσματος LIBS

Για τη βελτιστοποίηση του σήματος ως προς το θόρυβο έγινε λεπτομερής μελέτη της μεταβολής της έντασης των παρατηρούμενων γραμμών εκπομπής με τη χρονική καθυστέρηση καταγραφής του φάσματος ως προς τη στιγμή άφιξης του παλμού λέιζερ. Στην Εικόνα 11 επιλέγονται οι φασματικές περιοχές που παρουσιάζουν



ενδιαφέρον λόγω της παρουσίας Si, C και CN και παρατηρείται ότι τη χρονική περίοδο 1.1–11 μs ο λόγος του σήματος κάθε γραμμής της μπάντας της μοριακής εκπομπής του CN προς θόρυβο είναι μεγαλύτερος απ'ότι στην περίπτωση της περιόδου 400 ns-2.4 μs. Παρομοίως και για τη γραμμή εκπομπής του Si στα 390.55 nm. Όσον αφορά τη γραμμή εκπομπής του C στα 247.85 nm, επιλέχθηκε να μη ληφθεί υπόψη στην ποσοτική ανάλυση, γιατί σε αυτήν την περιοχή η κβαντική απόδοση της κάμερας ICCD είναι χαμηλή. Επομένως, επιλέχθηκαν για ανάλυση η γραμμή εκπομπής του Si στα 390.55 nm και η κεφαλή της μπάντας της μοριακής εκπομπής του CN στα 388.34nm ($B^2\Sigma^+ - X^2\Sigma^+$, $v'=0$, $v''=0$).



Εικόνα 11. Φάσματα LIBS που κατεγράφησαν σε διαφορετικές χρονικές περιόδους κατά την εξέταση δείγματος από το άνω τμήμα του καινούργιου μονωτήρα #8 (80 J/cm² @ 248 nm).

9. Ο Φασματικός Δείκτης LIBS – Κριτήριο λειτουργικότητας μονωτήρων

Το ολοκλήρωμα της έντασης της γραμμής εκπομπής του Si στα 390.55 nm και της κορυφής του CN στα 388.34 nm παρουσιάζει έντονη διακύμανση με τον αριθμό των διαδοχικών παλμών σε μια περιοχή ακτινοβολήσης, καθώς και από περιοχή σε περιοχή επανω στο δείγμα. Αυτό είναι ένα συνηθισμένο πρόβλημα σε μετρήσεις LIBS που τις περισσότερες φορές αντιμετωπίζεται υπολογίζοντας το λόγο των ολοκληρωμένων εντάσεων των δύο κορυφών. Στην προκειμένη περίπτωση ο λόγος αυτός σταθεροποιείται μετά τους πρώτους πέντε παλμούς. Επομένως, για την επίτευξη καλής στατιστικής υπολογίζεται η μέση τιμή των λόγων που προκύπτουν από πέντε διαφορετικές περιοχές ακτινοβολήσης. Ο κάθε λόγος προκύπτει από ένα φάσμα που είναι άθροισμα 10 παλμών (6^{ος}-15^{ος} παλμός).

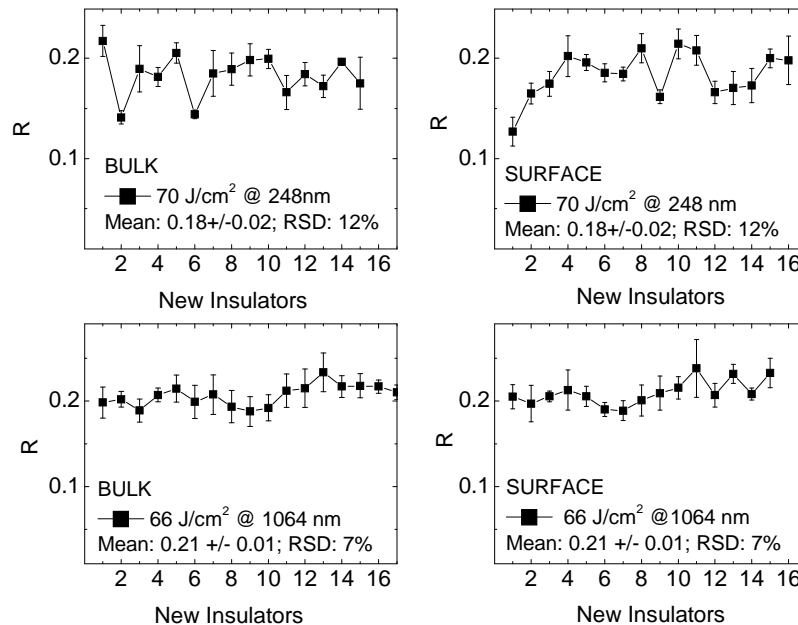
Στη συνέχεια παραθέτονται μετρήσεις από δείγματα 5 καινούργιων και αχρησιμοποίητων μονωτήρων που έχουν αφαιρεθεί και από τα τρία τμήματα (άνω, μεσαίο, κάτω) των μονωτήρων. Κάθε δείγμα ακτινοβολείται σε 5 διαφορετικές περιοχές στην επιφάνεια (surface) αλλά και στο εσωτερικό (bulk) του. Στην Εικόνα 12 φαίνονται οι μετρήσεις του λόγου ($R = I_{CN388} / I_{Si390}$) του ολοκληρώματος της έντασης της γραμμής εκπομπής του CN στα 388.34 nm προς το ολοκλήρωμα της έντασης της γραμμής εκπομπής του Si στα 390.55 nm. Φαίνεται ότι ο λόγος παραμένει σταθερός και η τιμή του είναι ίδια ($R=0.20 \pm 0.01$) τόσο στην επιφάνεια όσο και στο εσωτερικό του μονωτήρα και για τα δύο ξεχωριστά πειράματα LIBS (στο υπεριώδες και στο υπέρυθρο). Στο εξής ο συγκεκριμένος λόγος θα αναφέρεται ως φασματικός δείκτης, αποκτώντας έτσι την έννοια του δείκτη

ελέγχου της κατάστασης του μονωτήρα. Επίσης, ορίζεται ως $\Delta R = 100 \frac{R_{Surf} - R_{Bulk}}{R_{Bulk}}$ η ποσοστιαία μεταβολή

του φασματικού δείκτη στην επιφάνεια σε σχέση με το εσωτερικό, όπου R_{Surf} και R_{Bulk} ο φασματικός δείκτης στην επιφάνεια και στο εσωτερικό του μονωτήρα αντίστοιχα. Επομένως, ο φασματικός δείκτης παραμένει

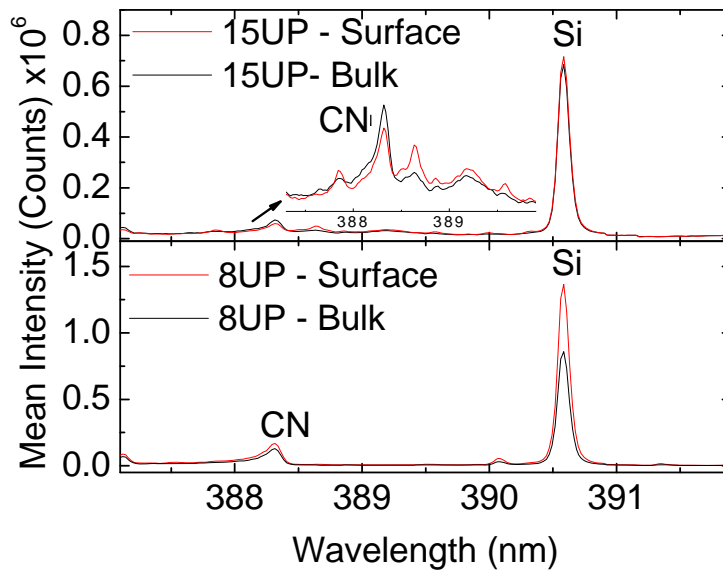


σταθερός στην επιφάνεια και στο εσωτερικό των καινούργιων μονωτήρων, αποτέλεσμα που αναμένετο καθώς, το υλικό είναι το ίδιο τόσο στην επιφάνεια όσο και στο εσωτερικό.



Εικόνα 12. Οι τιμές του φασματικού δείκτη (R) για 15 διαφορετικά δείγματα καινούργιων μονωτήρων στο εσωτερικό και στην επιφάνεια κατά την ακτινοβόληση στο υπεριώδες και στο υπέρυθρο.

Από την άλλη μεριά, στην περίπτωση των μονωτήρων δικτύου η τιμή του φασματικού δείκτη στην επιφάνεια αναμένεται ότι θα διαφέρει από ότι στο εσωτερικό, γιατί η επιφάνεια είναι που υφίσταται τη μεγαλύτερη καταπόνηση λόγω των ρευμάτων διαρροής. Στην Εικόνα 13 φαίνονται τα φάσματα που κατεγράφησαν από δείγμα του άνω τμήματος του μονωτήρα #15 (17 χρόνια στο δίκτυο) και του μονωτήρα #8 (καινούργιος) (Εικόνα 7). Η ένταση της γραμμής του Si εμφανίζεται ότι είναι σχεδόν σταθερή για το μονωτήρα δικτύου, ενώ η ένταση της κορυφής του CN είναι λίγο μειωμένη. Υπολογίζοντας τη μεταβολή του φασματικού δείκτη για τον μονωτήρα #15 έχουμε $R(\#15)=55\pm 16\%$. Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται οι μετρήσεις του φασματικού δείκτη για όλους τους υπό εξέταση μονωτήρες δικτύου (#14-#18) πλην των μονωτήρων #12 και #13 οι οποίοι αποδείχτηκαν ότι δεν είναι τύπου SIR (πιθανότητα κατά τις δοκιμαστικές τοποθετήσεις είχαν σταλθεί από μονωτήρες δείγματα από διαφορετικό υλικό). Συγκεκριμένα, στα φάσματα LIBS βρέθηκε ελάχιστο Si με αποτέλεσμα ο φασματικός δείκτης να παίρνει εξαιρετικά μεγάλες τιμές ($R\sim 2-10$). Εν γένει σημειώνεται ότι η τιμή του φασματικού δείκτη στο εσωτερικό των μονωτήρων δικτύου είναι μικρότερη από την αντίστοιχη τιμή στον καινούργιο μονωτήρα, εκτός από την περίπτωση του μονωτήρα #18, που πιθανώς να δικαιολογείται από το γεγονός ότι οι μονωτήρες δικτύου είναι διαφορετικού κατασκευαστή. Επίσης, όσον αφορά τους μονωτήρες δικτύου οι τιμή του φασματικού δείκτη στην επιφάνεια είναι μικρότερη από ότι στο εσωτερικό, αποτέλεσμα που αντανακλά κυρίως μείωση του ποσοστού του άνθρακα, αφού το σήμα του Si παραμένει σχεδόν σταθερό, και έρχεται σε συμφωνία με τους μηχανισμούς απώλειας της επιφανειακής υδροφοβίας [19-20], η οποία οφείλεται στην ύπαρξη των πλευρικών μεθυλίων στην αλυσίδα του PDMS. Τέλος, η μεταβολή του φασματικού δείκτη είναι μεγαλύτερη από 20-30% στην περίπτωση των μονωτήρων δικτύου. Αυτά τα αποτελέσματα έχουν επιβεβαιωθεί πολλές φορές. Επομένως, τα αποτελέσματα οδηγούν στο εξής κριτήριο ελέγχου της λειτουργικότητας των μονωτήρων: Αν $\Delta R=0-10\%$ τότε ο μονωτήρας είναι καινούργιος ή/και σε καλή κατάσταση, ενώ αν $\Delta R>20-30\%$ τότε πρόκειται για παλιό και καταπονημένο μονωτήρα.



Εικόνα 13. Τα φάσματα LIBS που αντιστοιχούν σε δείγματα από το άνω τμήμα καινούργιου μονωτήρα (#8) και μονωτήρα δικτύου (#15). Κάθε φάσμα προέκυψε ως η μέση τιμή πέντε φασμάτων, από πέντε διαφορετικές περιοχές του κάθε δείγματος ($80 \text{ J/cm}^2 @ 248 \text{ nm}$).

Πίνακας 2. Οι τιμές του φασματικού δείκτη για τις περιπτώσεις ακτινοβολήσης των μονωτήρων στο υπεριώδες (R_{UV}) και στο υπέρυθρο (R_{IR}).

# Μονωτήρα (*)	Χρόνια στο Δίκτυο	$80 \text{ J/cm}^2 @ 248 \text{ nm}$		$\Delta R_{UV} (\%)$	$40 \text{ J/cm}^2 @ 1064 \text{ nm}$		$\Delta R_{IR} (\%)$
		R_{SURF}	R_{BULK}		R_{SURF}	R_{BULK}	
8	0	0.18 ± 0.01	0.20 ± 0.02	10 ± 11	0.19 ± 0.01	0.20 ± 0.02	-6 ± 12
14	21	0.03 ± 0.01	0.07 ± 0.01	-64 ± 24	0.07 ± 0.01	0.08 ± 0.01	-13 ± 20
15	17	0.03 ± 0.01	0.07 ± 0.01	-55 ± 16	0.05 ± 0.01	0.12 ± 0.01	-59 ± 9
16	17	0.05 ± 0.01	0.07 ± 0.01	-24 ± 16	0.09 ± 0.02	0.14 ± 0.03	-32 ± 18
17	10	0.04 ± 0.01	0.07 ± 0.01	-38 ± 7	0.10 ± 0.02	0.16 ± 0.03	-38 ± 16
18	10	0.23 ± 0.02	0.22 ± 0.01	8 ± 8	0.10 ± 0.02	0.20 ± 0.04	-52 ± 14

(*) Οι μονωτήρες #14 έως #16 και #8 είναι κατασκευής SEFAG και ISOELECTRIC αντίστοιχα. Ο κατασκευαστής των μονωτήρων #17 και #18 είναι άγνωστος.

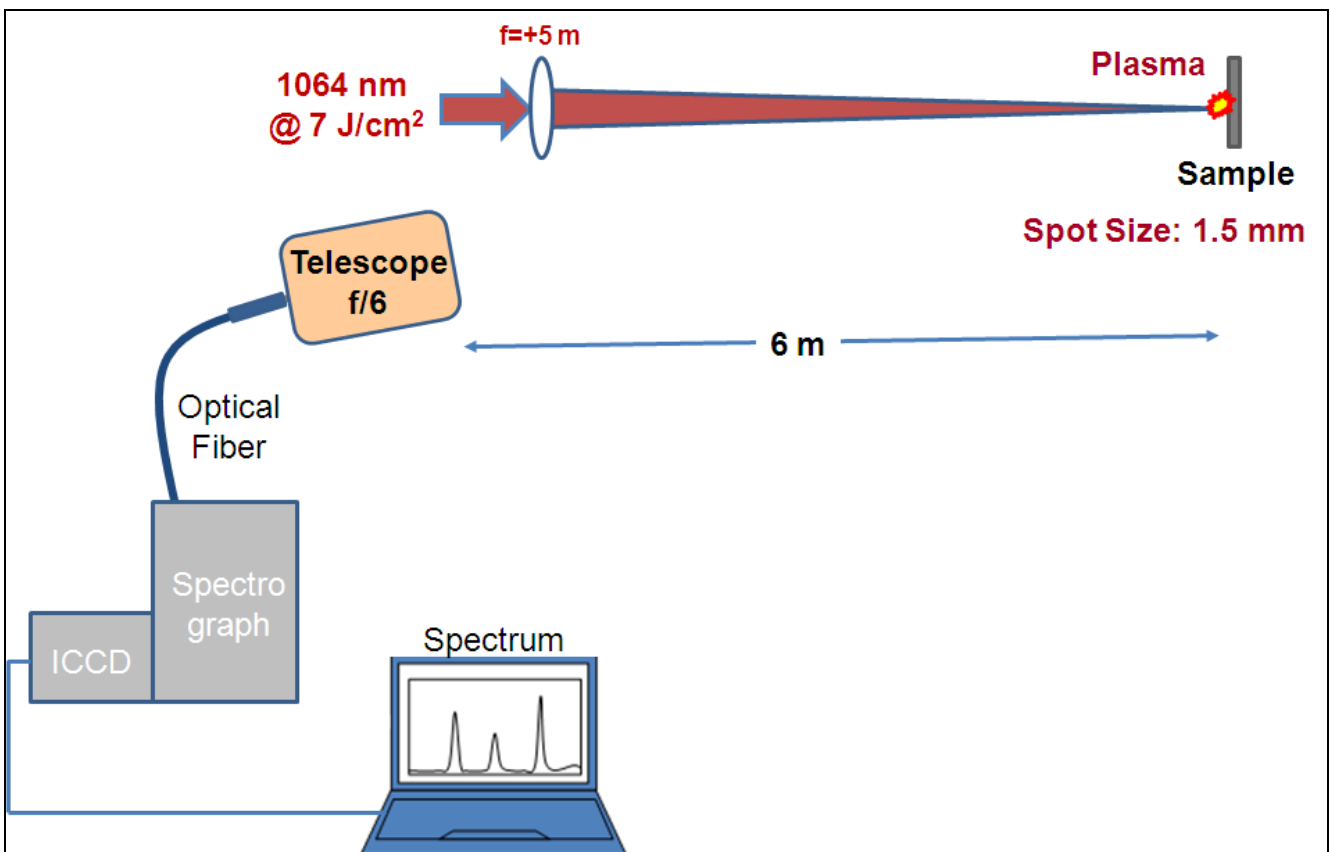
10. Εξ' αποστάσεως ανάλυση LIBS

Ο επόμενος στόχος στην εξέταση των μονωτήρων με την τεχνική LIBS είναι η καταγραφή μεταβολής στο φασματικό δείκτη LIBS (ΔR) όταν η δέσμη του λέιζερ εστιάζεται από απόσταση, ώστε να είναι εφικτή η μέτρηση στο πεδίο. Για αυτόν το σκοπό χρησιμοποιείται το Nd:YAG λέιζερ, που μπορεί σχετικά εύκολα να μεταφερθεί σε εξωτερικό χώρο, με μήκος κύματος εκπομπής στα 1064 nm, ώστε η ενέργεια της δέσμης λέιζερ να είναι η μέγιστη δυνατή. Προς το παρόν οι μετρήσεις γίνονται στο εργαστήριο και η δέσμη του λέιζερ εστιάζεται στην επιφάνεια του δείγματος, με φακό εστιακής απόστασης $f = +5 \text{ m}$ (Εικόνα 14). Το πλάσμα που σχηματίζεται στο δείγμα συλλέγεται από ένα τηλεσκόπιο (κατοπτρικό Νευτώνιο, $f/6$) που είναι τοποθετημένο κοντά στο φακό εστίασης, σε απόσταση περίπου 6 m από το δείγμα. Στην εστία του τηλεσκοπίου τοποθετείται οπτική ίνα, διαμέτρου περίπου 200 μm , που στέλνει το φως σε φασματογράφο για ανάλυση και καταγραφή του φάσματος μέσω ανιχνευτή ICCD. Το μέγεθος του ίχνους της δέσμης του λέιζερ που σχηματίζεται στο δείγμα είναι περίπου 1.5mm. Ένα τόσο μεγάλο μέγεθος της περιοχής ακτινοβολήσης στο δείγμα αναγκαστικά



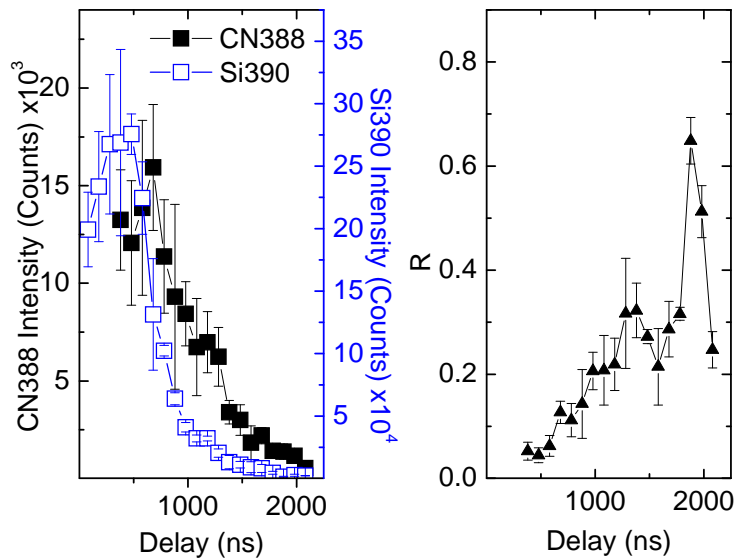
περιορίζει την τιμή της μέγιστης πυκνότητας ενέργειας λέιζερ που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ($\sim F_{\text{LASER,MAX}} \sim 7 \text{ J/cm}^2$). Παρ' όλο που υπάρχει τρόπος να μειωθεί το μέγεθος της δέσμης λέιζερ στην εστία με τη χρήση τηλεσκοπίου και ομογενοποιητή δέσμης, σε αυτό το πρωταρχικό στάδιο προτιμάται η διερεύνηση πρώτα της περίπτωσης επιτυχίας με μια απλή πειραματική διάταξη και αργότερα ο έλεγχος πιο πολύπλοκων οπτικών συστημάτων.

Αρχικά επανεξετάζεται η χρονική περίοδος καταγραφής του φάσματος επειδή η πυκνότητα ενέργειας έχει μειωθεί σε σχέση με το συμβατικό LIBS κατά 6 φορές. Στην Εικόνα 15 φαίνεται η εξάρτηση της έντασης της γραμμής εκπομπής του CN στα 388.34 nm, της γραμμής εκπομπής του Si στα 390.55 nm, καθώς και του φασματικού δείκτη με το χρόνο καθυστέρησης καταγραφής του φάσματος σε σχέση με το χρόνο άφιξης του παλμού λέιζερ. Για αυτήν τη μελέτη, η οπτική ίνα είναι τοποθετημένη σε απόσταση 1 cm από το δείγμα, αλλά ο φακός εστίασης παραμένει στα 5m. Καθώς εξελίσσεται το πλάσμα στο χρόνο, η γραμμή εκπομπής του Si εμφανίζεται ήδη από τα 200 ns ενώ η μοριακή εκπομπή του CN ξεκινάει στα 400 ns. Σε χρόνους μεγαλύτερους από 500 ns το σήμα και των δύο γραμμών μειώνεται, με αποτέλεσμα η τιμή του φασματικού δείκτη να αυξάνεται, γι' αυτό επιλέγεται η καταγραφή των φασμάτων το χρονικό διάστημα 500-1500 ns. Στην Εικόνα 16 φαίνονται τυπικά φάσματα LIBS δείγματος καινούργιου μονωτήρα όπως κατεγράφησαν χρησιμοποιώντας τη διάταξη για μετρήσεις από απόσταση 6m.

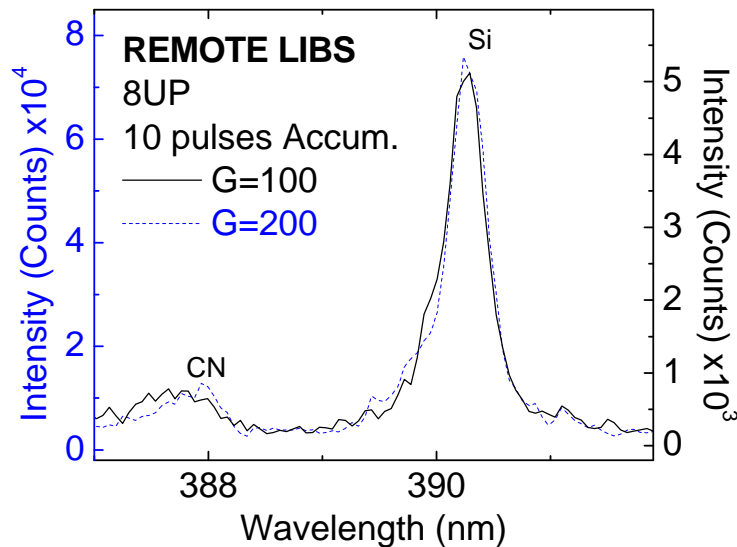


Εικόνα 14. Πειραματική διάταξη LIBS για ανάλυση εξ' απόστασως: Συλλογή ακτινοβολίας πλάσματος από μακρινό στόχο (σε απόσταση περίπου 6 m) με χρήση τηλεσκοπίου (κατοπτρικό Νευτώνειο, f/6).

Η ανάλυση των φασμάτων όπως στην περίπτωση του συμβατικού LIBS έχει σαν αποτέλεσμα ο φασματικός δείκτης για τους καινούργιους μονωτήρες να έχει μικρότερη τιμή $R_{\text{new}}=0.15\pm 0.03$, που δικαιολογείται από το γεγονός ότι τα φάσματα καταγράφονται σε νωρίτερο στάδιο εξέλιξης του πλάσματος. Επίσης, οι φασματικοί δείκτες των μονωτήρων δικτύου παρουσιάζουν ακόμη μικρότερη τιμή ($R_{\text{old}}=0.10\pm 0.01$), που είναι ίδια στο εσωτερικό και στην επιφάνειά τους. Αυτή η αποτυχία ανεύρεσης μη μηδενικής διαφοράς στο ΔR συμβαίνει και στην περίπτωση ακτινοβολίας από απόσταση 5 m, αλλά συλλογής του πλάσματος σε απόσταση 1 cm. Αυτό σημαίνει ότι απαιτείται περαιτέρω μελέτη και βελτιστοποίηση των συνθηκών καταγραφής της ακτινοβολίας πλάσματος από απόσταση 5 m, ώστε να έχουμε αξιόπιστες μετρήσεις ελέγχου της λειτουργικότητας των μονωτήρων.



Εικόνα 15. Η μεταβολή της έντασης των γραμμών εκπομπής Si στα 390.55 nm, CN στα 388.34 nm και του φασματικού δείκτη με το χρόνο καθυστέρησης καταγραφής του φάσματος από τη στιγμή άφιξης του παλμού λέιζερ ($7 \text{ J/cm}^2 @ 1064 \text{ nm}$; $\tau_G = 100 \text{ ns}$).



Εικόνα 16. Φάσματα LIBS δείγματος καινούργιου μονωτήρα που κατεγράφησαν από απόσταση 6 μέτρων για δύο διαφορετικές τιμές ενίσχυσης της κάμερας ICCD. Κάθε φάσμα είναι αποτέλεσμα αθροίσματος 10 φασμάτων που κατεγράφησαν κατά την ακτινοβολήση μιας περιοχής του δείγματος με 10 διαδοχικούς παλμούς λέιζερ (6^{0^5} - 15^{0^5} παλμός).

11. Συμπεράσματα

Το συνθετικό υλικό SIR χρησιμοποιείται ευρέως σήμερα ως περίβλημα στους μονωτήρες υψηλής τάσεως σε εφαρμογές υπαίθριων εγκαταστάσεων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, λόγω των μοναδικών ιδιοτήτων που παρουσιάζει, όπως η έντονη επιφανειακή υδροφοβία και η υψηλή του ανθεκτικότητα στην επίδραση του περιβάλλοντος. Οι ιδιότητες αυτές, όμως, είναι δυνατόν να υποβαθμιστούν σημαντικά με την πάροδο του χρόνου, λόγω της συγκέντρωσης ρύπων στην επιφάνεια των μονωτήρων. Ο συνδυασμός της ρύπανσης στην επιφάνεια των μονωτήρων με υγρασία, ομίχλη ή βροχή και άλλες ακαθόριστες περιβαλλοντικές συνθήκες,



έχουν ως αποτέλεσμα το σχηματισμό επιφανειακής αγωγίμης επίστρωσης που προκαλεί την ανάπτυξη ηλεκτρικής δραστηριότητας, η οποία υποβαθμίζει σημαντικά τη λειτουργικότητα των μονωτήρων. Είναι επομένως επιτακτική η ανάγκη να αναπτυχθούν κατάλληλες διαγνωστικές μέθοδοι, ικανές να εντοπίσουν έγκαιρα την καταπόνηση των μονωτήρων και την ενδεχόμενη αστοχία της μόνωσης.

Η τεχνική LIBS μπορεί να αποτελέσει ένα αρκετά βοηθητικό εργαλείο για τη γρήγορη διάγνωση της κατάστασης των συνθετικών μονωτήρων υψηλής τάσεως. Όπως προέκυψε κατά την εργαστηριακή εξέταση καινούριων και παλιών μονωτήρων μπορεί να οριστεί ως φασματικός δείκτης ελέγχου της κατάστασης των μονωτήρων ο λόγος της έντασης της κεφαλής της μπάντας της μοριακής εκπομπής του CN ως προς την ένταση της γραμμής εκπομπής του Si στα 390.55 nm. Στους καινούργιους μονωτήρες η τιμή του φασματικού δείκτη είναι ίδια τόσο στην επιφάνεια όσο και στο εσωτερικό τους, ενώ στους παλιούς μονωτήρες δικτύου η τιμή του φασματικού δείκτη είναι μικρότερη στην επιφάνεια και η ποσοστιαία διαφορά του από την τιμή στο εσωτερικό είναι μεγαλύτερη από περίπου 20-30%. Αυτά τα κριτήρια παρέχουν μία ξεκάθαρη, αξιόπιστη και γρήγορη πρώτη εκτίμηση της κατάστασης των μονωτήρων. Περαιτέρω μελέτες θα επικεντρωθούν στην επίτευξη αντιστοιχών κριτηρίων που θα ισχύουν και στην περίπτωση ανάλυσης LIBS από απόσταση, που θα είναι πολύ σημαντικό για την επιτυχή εφαρμογή της τεχνικής στο πεδίο.

Βιβλιογραφία

- [1] CIGRE Taskforce 33.04.01, Polluted insulators: A review of current knowledge, CIGRE brochure No 158, 2000.
- [2] IEC/TS 60815, Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions, 2008.
- [3] CIGRE WG C4.303, Outdoor insulation in polluted conditions: Guidelines for selection and dimensioning Part 1: General principles and the a.c. case, CIGRE Technical Brochure No 361, 2008.
- [4] IEC 62073, Guidance on the measurement of wettability of insulator surfaces, Edition 1, 2003.
- [5] IEC 60507, Artificial pollution tests on high-voltage insulators to be used on a.c. systems.
- [6] IEC 62217, Polymeric insulators for indoor and outdoor use with a nominal voltage > 1000 V – General definitions, test methods and acceptance criteria, (IEC, 2005).
- [7] IEC 60587, Electrical insulating materials used under severe ambient conditions-Test methods for evaluating resistance to tracking and erosion, (IEC, 2007).
- [8] STRI Guide 3, Composite Insulators Status Program: Field Inspection of Composite Line Insulators, 2005.
- [9] STRI Guide 5, Guide for Visual Identification of Deterioration & Damages on Suspension Composite Insulators, 2005.
- [10] EPRI, Field Guide-Visual Inspection of NCI, Technical Report, 2004.
- [11] CIGRE WG D1.27, Fingerprinting of Polymeric Insulating Materials for outdoor use, 2014.
- [12] R. Hackam, “Outdoor HV composite polymeric insulators”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 6, No. 5, pp. 557-585, 1999.
- [13] J. S. T. Looms, Insulators for High Voltages, IET, 1988.
- [14] K. O. Papailiou, F. Schmuck, Silicone Composite Insulators: Materials, Design, Applications, Springer, 2013.
- [15] W. L. Vosloo, R. E. Macey, C. de Tourreil, The practical guide to Outdoor High Voltage Insulators, ESKOM, 2006.
- [16] K. Siderakis, D. Pylarinos, E. Thalassinakis, E. Pyrgioti, I. Vitellas, “Pollution maintenance techniques in coastal high voltage installations”, Eng. Technol. Appl. Sci. Res, Vol. 1, No. 1, pp. 1-7, 2011.
- [17] E.A. Cherney, “RTV Silicone - A high tech solution for a dirty insulator problem”, IEEE Electr. Insul. Mag., Vol. 11, No. 6, pp 8-14, 1995.
- [18] IEEE Guide for the Application, Maintenance, and Evaluation of Room Temperature Vulcanizing (RTV) Silicone Rubber Coatings for Outdoor Ceramic Insulators, IEEE Standard 1523, 2002.
- [19] J. Kim, “Hydrophobicity loss and recovery of silicone HV insulation”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 6, No. 5, pp. 695-702, 1999.
- [20] S. H. Kim, E. A. Cherney, R. Hackam, “The loss and recovery of hydrophobicity of RTV silicone rubber insulator coatings”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 3, pp. 1491-1500, 1990.
- [21] K. Siderakis, J. Stefanakis, E. Thalassinakis, D. Agoris, E. Dialynas, “Coastal Contamination of the High Voltage Insulators in the Cretan Power System”, 2nd Mediterranean Conference on Power Generation,



Transmission, Distribution and Energy Conversion, IEE Conference Med Power 2000, Herzlia, Israel, November 13-15, 2000.

[22] J. Stefanakis, E. Thalassinakis, K. Siderakis, D. Agoris, E. Dialynas, "Fighting Pollution in the Cretan Transmission System. 25 Years Experience", Contamination Issues on High Voltage Installations, Heraklion 2001.

[23] E. Thalassinakis, J. Stefanakis, K. Siderakis, D. Agoris, "Measures and Techniques Against Pollution in the Cretan Transmission System", The second IASTED European Conference on Power and Energy Systems (EuroPES), Crete, Greece, June 25-28, 2002.

[24] E. Thalassinakis, K. Siderakis, D. Agoris, "Experience with New Solutions to Combat Marine Pollution in the Power System of the Greek Islands", INMR World Congress on Insulators, Arresters and Bushings, 2003. "Greek Utility Battles Pollution Affecting Island Transmission System", INMR Issue 78, Volume 15, Number 4, Page 24, 2007.

[25] S. Gubanski, "Greek Power Company Evaluates Alternatives to Combat Pollution in Transmission System on Crete", INMR Issue 58, Volume 10, Number 4, p. 30, 2002.

[26] K. Siderakis, D. Agoris, E. Thalassinakis, J. Stefanakis, "Evaluation of the pollution performance of SIR materials in the Cretan Transmission System in correlation to the pollution model of Crete", 3rd Mediterranean Conference and Exhibition on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion, MED POWER 2002, Athens, Greece, November 4-6, 2002.

[27] D. Agoris, K. Siderakis, E. Thalassinakis, "Influence of the Environment to the Pollution Performance of RTV Silicone Rubber Coatings in Crete", XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering, ISH 2003, Netherlands, 2003.

[28] D. Pylarinos, K. Siderakis, E. Thalassinakis, "Comparative Investigation of Silicone Rubber Composite and RTV Coated Glass Insulators Installed in Coastal Overhead Transmission Lines", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 31, No. 2, pp. 23-29, 2015.

[29] D. Pylarinos, K. Siderakis, I. Pellas, E. Thalassinakis, "Assessing Pollution of Outdoor Insulators in the Cretan Power System", 18th International Conference on Circuits, Systems, Communications and Computers (CSCC 2014), Santorini, Greece, July 17-21, 2014.

[30] M. Dimitropoulou, D. Pylarinos, K. Siderakis, E. Thalassinakis, M. Danikas, "Comparative Investigation of Pollution Accumulation and Natural Cleaning for Different HV Insulators", Engineering, Technology & Applied Science Research, Vol. 5, No. 2, pp. 764-774, 2015.

[31] TALOS High Voltage Test Station, www.talos-ts.com

[32] A. Larsson, A. Roslund, S. Kroll, A. Dernfalk, "In-situ diagnostics of HV insulators using Laser-Induced Fluorescence spectroscopy", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 9, No 2, pp. 274-281, 2002

[33] A. S. Vaughan, S. J. Dodd, S. J. Sutton, "A Raman microprobe study of electrical treeing in polyethylene", Journal of Materials Science, Vol. 39, pp. 181-191, 2004

[34] I. L. Hosier, M. S. Abd Rahman, A. S. Vaughan, A. Krivda, X. Kornmann, L. E. Schmidt, "Comparison of laser ablation and inclined plane tracking tests as a means to rank materials for outdoor HV insulators", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 20, No. 5, pp. 1808-1819, 2013

[35] J. Goujon, A. Giakoumaki, V. Piñon, O. Musset, D. Anglos, E. Georgiou, J. P. Boquillon, "A compact and portable laser-induced breakdown spectroscopy instrument for single and double pulse applications", Spectrochimica Acta B, Vol. 63, pp. 1091-1096, 2008

[36] M. Bengtsson, R. Gronlund, M. Lundqvist, A. Larsson, S. Kroll, A. Svanberg, "Remote Laser-Induced Breakdown Spectroscopy for the detection and removal of salt on metal and polymeric surfaces", Applied Spectroscopy, Vol. 60, No. 10, pp.1188-1191, 2006

[37] E. Tognoni, V. Palleschi, M. Corsi, G. Cristoforetti, "Quantitative microanalysis by laser induced breakdown spectroscopy: a review of experimental approaches", Spectrochimica Acta B, Vol. 57, pp. 1115-1030, 2002

[38] W. B. Lee, J. Y. Yu, J. Sneddon, "Recent applications of laser-induced breakdown spectrometry: A review of material approaches", Applied Spectroscopy Reviews, Vol. 39, pp. 27-97, 2004

[39] D. Anglos, "Laser-Induced Breakdown Spectroscopy in Art and Archaeology", Applied Spectroscopy, Vol. 55, pp. 186A-205A, 2001

[40] L. St-Onge, R. Sing, S. Béchar, M. Sabsabi, "Carbon emissions following 1.064 μm laser ablation of graphite and organic samples in ambient air", Applied Physics A, Vol. 69, No. 1, pp. S913-S916, 1999