ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΚΑΛΥΜΜΕΝΩΝ ΑΓΩΓΩΝ: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΠΙΝΑΚΕΣ ΖΩΓΡΑΦΙΚΗΣ ΘΑΜΜΕΝΩΝ ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΝΕΩΤΕΡΑ ΣΤΡΩΜΑΤΑ

ΒΑΣΙΛΙΚΗ ΓΚΟΥΝΤΣΙΔΟΥ ΚΑΙ ΙΩΑΝΝΗΣ ΣΑΜΑΡΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ ΣΤΕΡΕΑΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ, ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ, Α.Π.Θ.
iakovou@auth.gr

Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια οι τεχνικές AC-ηλεκτρικών μετρήσεων εμφανίζουν θεαματική πρόοδο με την εισαγωγή Η/Υ στα μετρητικά συστήματα. Σ΄ αυτά τα πλαίσια η παρούσα εργασία διερευνά και προτείνει ένα τρόπο βελτίωσης στην ανίχνευση καλυμμένων ηλεκτρικών αγωγών με προσανατολισμό-εξειδίκευση στα καλυμμένα, ενδεχομένως, στρώματα ζωγραφικής και ορισμένων μικρού μεγέθους παλαιών επιγραφών. Η δεύτερη-θαμμένη- στρώση χρώματος που δεν εμφανίζει κάποια μετρήσιμη «ανάκλαση» στο ορατό φάσμα της Η/Μ ακτινοβολίας είναι δυνατό να συμμετέχει αξιόπιστα στη σύνθετη ηλεκτρική αντίσταση Z(f). Όταν η μέτρηση σε κάποιο σημείο του πίνακα δεν θα είναι αξιόπιστη, τότε το σημείο θα σημειώνεται κατάλληλα. Η συμβατική και πρόχειρη κατασκευή των δειγματοφορέων μας, που είναι τεσσάρων ηλεκτροδίων, συντελεί στο προσωρινό μειονέκτημα της χαμηλής επιφανειακής διακριτικής ικανότητας (ΕΔΙ) στα πλαίσια της αρχικής αυτής ανακοίνωσης. Ωστόσο η ΕΔΙ μπορεί να αυξηθεί μελλοντικά πολύ εύκολα με τεχνικές λιθογραφίας ώστε ο δειγματοφορέας AC-ηλεκτρικών μετρήσεων να γίνει μια ακίδα σε γραφίδα (μικρο-δειγματοφορέας) που να μετράει ηλεκτρικά μεγέθη στην περιοχή λίγων δεκάδων μικρομέτρων, ίσως και πολύ πιο χαμηλά με αύξηση του αριθμού των δειγματοφορέων ανά κεφαλή (Si, probe array) της γραφίδας ηλεκτρικών μετρήσεων. Επιπλέον, ο μικρο-δειγματοφορέας θα αυξήσει και την αξιοπιστία των ηλεκτρικών μετρήσεων με την αποφυγή ενδεχόμενων επιφανειακών ατελειών (cracks) στα υλικά ζωγραφικής που εμφανίζονται τυχαία ανάμεσα στα ηλεκτρόδια μέτρησης συμβατικών δειγματοφορέων. Η κατακόρυφη προσέγγιση του μικρο-δειγματοφορέα στα δοκίμια θα ρυθμίζεται αρχικά με τεχνικές υπέρηχων ή λέιζερ και οι ηλεκτρικές επαφές θα συμπληρώνονται μικρομετρικά με τεχνικές μηχανικής και ηλεκτρικής φύσεως γνωστές και από τα AFM και STM, ώστε η μέθοδος αυτή να ενταχθεί στην κατηγορία των μη καταστροφικών τεχνικών που είναι μια αναγκαία προυπόθεση στη μελέτη των έργων τέχνης. Τέλος, η εργασία αυτή ανοίγει προοπτικές νέων τρόπων επιστημονικής-καλλιτεχνικής μελέτης στην περιοχή των έργων ζωγραφικής και παρόμοιων κατασκευών με τη δυνατότητα εμφάνισης ηλεκτρικής φύσεως εικόνων από Η/Υ. Οι εικόνες αυτές τύπου «ηλεκτρικής τομογραφίας» σε συνθήκες υγρασίας και θερμοκρασίες δωματίου θα προκύψουν από το γεωμετρικό τόπο: 1)ίσης αντίστασης (Z-τρόπος) ή πιο πολύπλοκα, 2)ίσης τιμής του στοιχείου από το μοντέλο ισοδύναμου κυκλώματος αλλά και άλλων ακόμη συνθηκών.

1. Εισαγωγή

Οι υπάρχουσες τεχνικές ηλεκτρικής ανίχνευσης καλυμμένων αγωγών αφορούν μόνο πάρα πολύ απλές περιπτώσεις και περιορίζονται σημαντικά από τρεις κύριες παραμέτρους που είναι η χρήση 1)δύο μόνο ηλεκτροδίων 2)μερικών μόνο (spot) συχνοτήτων και 3)η χρήση πολύ απλών μοντέλων προσομοίωσης. Σήμερα, οι τεχνικές αυτές είναι δυνατόν να διευρυνθούν με τη χρήση τεσσάρων ηλεκτροδίων, με περιοχή συχνότητας την 10^{-3} -10^{-7} Hz, τουλάχιστον, αλλά και με τη χρήση πιο ρεαλιστικών μοντέλων προσομοίωσης. Ενα από τα σύγχρονα αντικείμενα των παραπάνω τεχνικών θα μπορούσε να είναι ακόμη και η

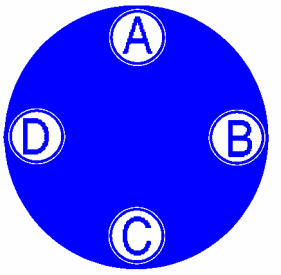
μελέτη παλαιών πινάκων[1]. Εδώ λοιπόν θα αναφέρουμε μια αρχική μελέτη βασιζόμενη στη δυνατότητα που μας προσφέρει, κατ΄αρχήν, το φυσικό μέγεθος της σύνθετης-μιγαδικής ηλεκτρικής αντίστασης Z. Άλλα, μη γραμμικά ηλεκτρικά μεγέθη, όπως και η αξιοποίηση των αρμονικών όρων $2^{ης}$ και ανώτερης τάξης στη Z μπορεί να προσφέρει πρόσθετες πληροφορίες, μελλοντικά. Η μέτρηση της σύνθετης ηλεκτρικής αντίστασης Z ως συνάρτηση της συχνότητας f και η απεικόνισή της με ηλεκτρικά στοιχεία μέσω προσομείωσης των δεδομένων Z(f) μπορεί να προσφέρει ένα επιπλέον διαγνωστικό εργαλείο στον τομέα της <u>μη καταστροφικής</u> μελέτης πινάκων ζωγραφικής $2^{ου}$ στρώματος. Κύριος περιοριστικός παράγοντας στη μέτρηση αυτή είναι ο λόγος $Z_i(f)/Z_{i+1}(f)$ να είναι πολύ πάνω από 3 τάξεις μεγέθους σε κάποια περιοχή συχνοτήτων f, όπου ο δείκτης αναφέρεται στις αντιστάσεις των στρώσεων. Τα σημεία της επιφάνειας του πίνακα όπου υπάρχει αδυναμία μέτρησης θα παραμείνουν κενά. Ωστόσο, το συνολικό αποτέλεσμα μπορεί να προσφέρει κάποια συμπληρωματικά στοιχεία στη μελέτη του προβλήματος ύπαρξης-απεικόνισης και $2^{ου}$ στρώματος σε έργα ζωγραφικής. Η ανακοίνωση αυτή αφορά μια μέθοδο που αποτελείται από δύο τεχνικά βήματα που είναι τελείως διαφορετικά. Στο $1^{ο}$ βήμα, που θα αναφέρουμε εδώ, γίνεται η ανίχνευση και ταυτοποίηση των ξεχωριστών στρώσεων ζωγραφικής με 3 ομάδες ηλεκτρικών κυκλωμάτων και αντιπροσωπεύουν **α)**την πιο πάνω στρώση χρώματος, που φαίνεται «διά γυμνού οφθαλμού», **β)**τη δεύτερη-θαμμένη- στρώση χρώματος που δεν εμφανίζει κάποια μετρήσιμη «ανάκλαση» στο ορατό φάσμα της Η/Μ ακτινοβολίας αλλά είναι δυνατό να συμμετέχει στη σύνθετη ηλεκτρική αντίσταση Z(f) και τέλος **γ)**τη διεπιφάνεια (interface) των στρώσεων που είναι συνήθως χωρητικής φύσεως. Το $2^{ο}$ τεχνικό βήμα θα γίνει αντικείμενο μελλοντικής ανακοίνωσης και θα αφορά ουσιαστικά στην επανάληψη του προηγούμενου βήματος για την κάλυψη όλης της επιφάνειας που θα απεικονίσουμε.

2. Πειραματικά

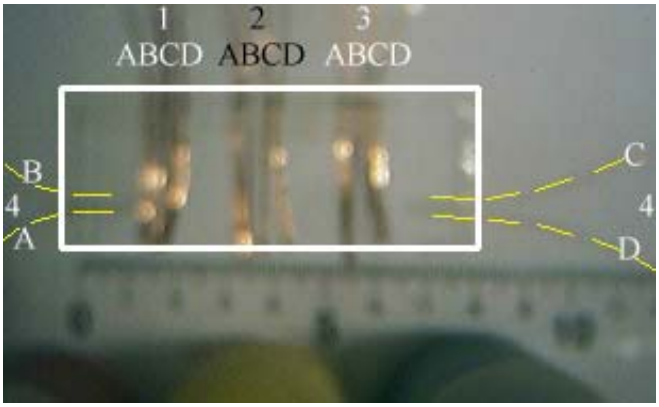
Τα εργαστηριακά χρώματα που χρησιμοποιήσαμε είχαν στόχο να γίνουν δοκιμαστικά δοκίμια που να προσεγγίζουν ανάλογα δοκίμια των έργων τέχνης. Μετά από έρευνα αγοράς ετοιμάσαμε δείγματα για να πειραματιστούμε αρχικά με σκόνες αγιογραφίας. Εργασθήκαμε με 4 ενδεικτικά χρώματα α)μαύρο, β)κίτρινο «λέμον», γ)κόκκινο «βερμιγιόν» και δ)μπλε «ούλτραμαριν» που είναι μερικά από τα χρώματα που χρησιμοποιούν οι ζωγράφοι αρκετά συχνά. Τοποθετήσαμε ίση ποσότητα (~5cm^3) από το κάθε χρώμα σε φιαλίδια των 50cm^3, προσθέσαμε αποσταγμένο νερό και αναδεύσαμε πολύ καλά για ~5min. Ετσι έχουμε ένα υδατικό «διάλυμα» σε μορφή υδατικού γαλακτώματος

για τα υλικά των υμενίων-χρωμάτων. Σε μια δεύτερη σειρά δοκιμίων-χρωμάτων προσθέσαμε μικρή ποσότητα (~0.5cm^3) ακριλικής κόλλας καπαρόλ στο υδατικό γαλάκτωμα κάθε χρώματος. Το καπαρόλ αυξάνει την μηχανική ευστάθεια των παραγομένων υμενίων, αλλά μειώνει την ηλεκτρική τους αγωγιμότητα γιατί είναι ένας μονωτής που περιβάλλει τους κόκκους των χρωμάτων στα υμένια. Από το υδατικό γαλάκτωμα κάθε χρώματος προετοιμάζαμε άνυδρα υμένια πάνω στα ίδια πάντοτε υπόβαθρα. Τα υπόβαθρα αυτά ήταν τυπικές υάλινες (αντικειμενοφόρες) πλάκες οπτικού μικροσκοπίου (σχ.2.1β), κοινά σε όλα τα εργαστηριακά δοκίμια. Προσαρμόζαμε 4 χάλκινα ηλεκτρόδια ανά χρώμα στα άκρα των υποβάθρων που θα συνδεθούν ηλεκτρικά με το χρώμα σε κατάλληλη διάταξη για μέτρηση της Z(f) κατά Van Der Pauw (σχ.2.1α). Πάνω στα υάλινα υπόβαθρα αφήναμε να πέσουν 4 με 5 σταγόνες χρώματος από τα φιαλίδια και μετά από παρέλευση ~2 ωρών είχαμε τα πρόδρομα δοκίμια (σχ.2.1γ), που ήταν τα έγχρωμα υμένια με ίχνη υγρασίας. Για πλήρη ξήρανση αφήναμε να περάσουν 24 ώρες σε συνθήκες δωματίου. Έτσι εξασφαλίζαμε μεσοπρόθεσμα τη μηχανική και ηλεκτρική ευστάθειά τους, ότι δηλαδή τα προς μέτρηση εργαστηριακά δοκίμια προσεγγίζουν τα ανάλογα μελλοντικά δοκίμια των έργων τέχνης. Πιο συγκεκριμένα προετοιμάσαμε τυπικά δοκίμια, που ήταν τα εξής έγχρωμα υμένια: 1)μαύρο χωρίς καπαρόλ (σχ.2.1γ), 2)μαύρο με καπαρόλ, 3)μπλε με καπαρόλ, 4)κίτρινο με καπαρόλ, 5)κόκκινο με καπαρόλ, 6)Μία στρώση μεγάλη μαύρο χωρίς καπαρόλ σαν υπόβαθρο και από επάνω σε σειρά τα τρία χρώματα : κόκκινο, κίτρινο και μπλε (σχ.2.1δ), 7) Μία στρώση μεγάλη μαύρο με καπαρόλ σαν υπόβαθρο και από επάνω σε σειρά το κόκκινο, το κίτρινο και το μπλε και 8)Μία στρώση μεγάλη μπλε με καπαρόλ και από επάνω σε σειρά το μαύρο το κόκκινο και κίτρινο. Οι μετρήσεις της εμπέδησης Z(f) έγιναν στην περιοχή συχνοτήτων $10^{-1} < f < 10^{-6}$ Hz. Επιπλέον οι μετρήσεις της Z(f) έγιναν με 4 ηλεκτρόδια κατά Van Der Pauw και με στόχο την κυκλική διάταξη επαφών (σχ.2.1α) σε κυκλικά δοκίμια (σχ.2.1δ, κόκκινο, κίτρινο και μπλε) με επαφές κοντά στην περιφέρεια. Συχνά έχουμε τη δυνατότητα κανονικοποίησης της εμπέδησης Z(f) σε ειδική εμπέδηση **z**(f) για συγκρίσεις υλικών. Οι AC ηλεκτρικές μετρήσεις της Z(f) έγιναν με το εμπορικό όργανο «Zahner Im6e» (σχ.2.1στ), που λειτουργεί στην περιοχή συχνοτήτων $10^{-5} < f < 10^{-6}$ Hz και έχει πολύ υψηλή αντίσταση εισόδου $Z_{i,real}$~10 G-ohm. Τα υμένια των χρωμάτων από σκόνες αγιογραφίας εμφανίζουν υψηλό πλάτος ειδικής αντίστασης και χωρητική συμπεριφορά, εκτός του μαύρου χρώματος που έχει χαμηλό πλάτος ειδικής αντίστασης και αρκετά

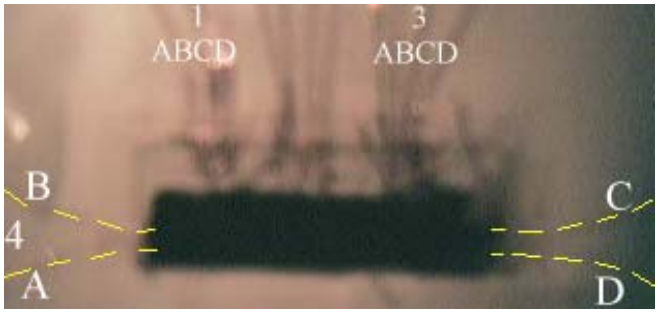
ωμική συμπεριφορά. Επομένως τα «σκούρα» παράγωγα χρώματα (μίγματα) από τα βασικά και το μαύρο θα έχουν ενδιάμεση συμπεριφορά.



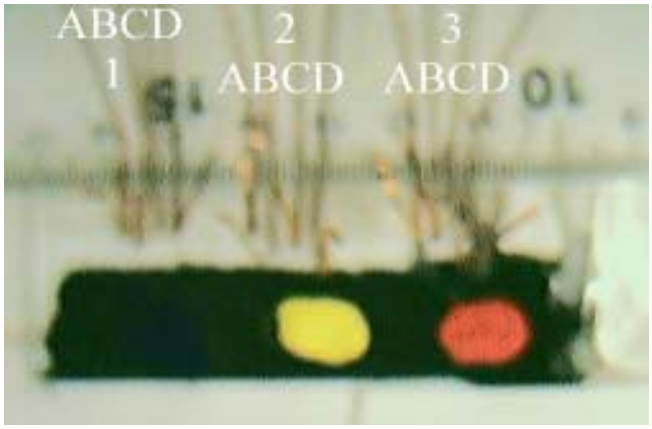
α) Διάταξη ηλεκτρικών επαφών για μέτρηση της Z κατά Van Der Pauw σε ιδανική κυκλική διάταξη των ηλεκτροδίων.



β) Ο πρόχειρος εργαστηριακός δειγματοφορέα όπου διαφαίνεται το υπόβαθρο (αντικ. πλάκα οπτικού μικροσκοπίου), και τα ηλεκτρόδια (πεπλατυσμένα σύρματα Cu, ψυχρής έλασης) των ηλεκτρικών επαφών.



γ) Διάταξη ηλεκτροδίων (4-ABCD) για μέτρηση μόνο της κάτω (2ης) στρώσης που είναι κοινή-ίδια για τα επόμενα 3 χρώματα (βλ. σχ. 2.1δ).



δ) Χρώματα και αρχική διάταξη των ηλεκτροδίων (1- ABCD μπλέ, 2- ABCD κίτρινο, 3- ABCD κόκκινο) για μέτρηση κυρίως της επάνω (1ης) στρώσης των 3 ενδεικτικών χρωμάτων αλλά και των διεπιφανειών τους με το μαύρο (χρήση 2 επαφών από το 4-ABCD).

στ) Οργανο μέτρησης (Zahner Im6e) της Z με 4 ηλεκτρόδια. Είναι ενσωματωμένο μέσα στον Η/Υ (κάρτες PC) που φαίνεται ενώ οδηγείται από άλλο Η/Υ (που δεν φαίνεται εδώ).

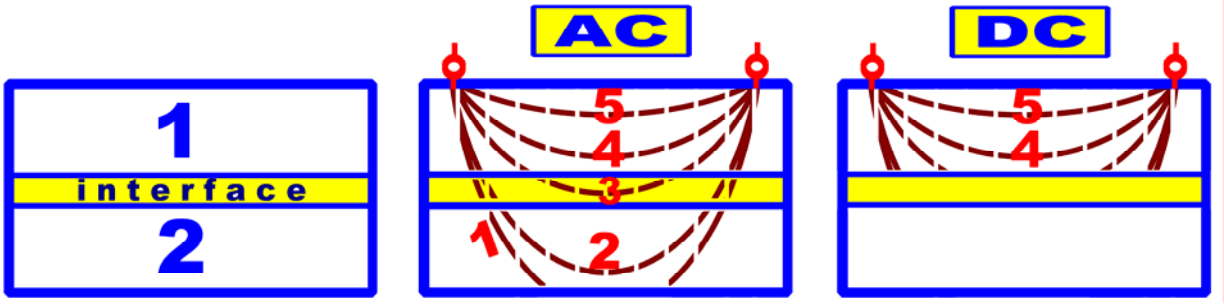
Σχήμα 2.1: Πειραματική διάταξη του πρόχειρου δειγματοφορέα μας. Φαίνονται επίσης τα

αρχικά εργαστηριακά δοκίμια δηλαδή του υποβάθρου, των χρωμάτων και των ηλεκτροδίων. Θεωρήσαμε αυτή τη πειραματική διάταξη για την προσομοίωση μιας υποθετικής εγκάρσιας «ηλεκτρικής» τομής του προς μέτρηση πίνακα.

3. Θεωρητική προσέγγιση

Η σύνθετη ηλεκτρική αντίστασης Z ή εμπέδηση ορίζεται ως ο λόγος των μεγεθών της διαφοράς δυναμικού ή τάσης V, όπου $V=V_o e^{(j\omega t+\varphi)}$ ως συνάρτηση της κυκλικής συχνότητας ω (=2πf) προς το ρεύμα I, όπου $I = I_o e^{(j\omega t)}$, δηλαδή έχουμε :

$$Z = V_o e^{(j\omega t+\varphi)} / I_o e^{(j\omega t)} = Z_o e^{(j\omega t+\varphi)} \quad (1)$$



(α) (β) (γ)

Σχήμα 3.1: Προσομοίωση επιλεγμένων γραμμών ροής του ηλεκτρικού ρεύματος σε μια εγκάρσιας τομή του πίνακα. Θεώρηση του προς μέτρηση στοιχείου του πίνακα δύο στρώσεων:

α) πριν τη διέλευση ρεύματος

β) κατά τη διέλευση AC ρεύματος όπου η ενδιάμεση στρώση της ενδοεπιφάνειας (διπλό $R_i//C_i$) θεωρείται οριακά ως «διαφανής» στην περιοχή των υψηλών συχνοτήτων και

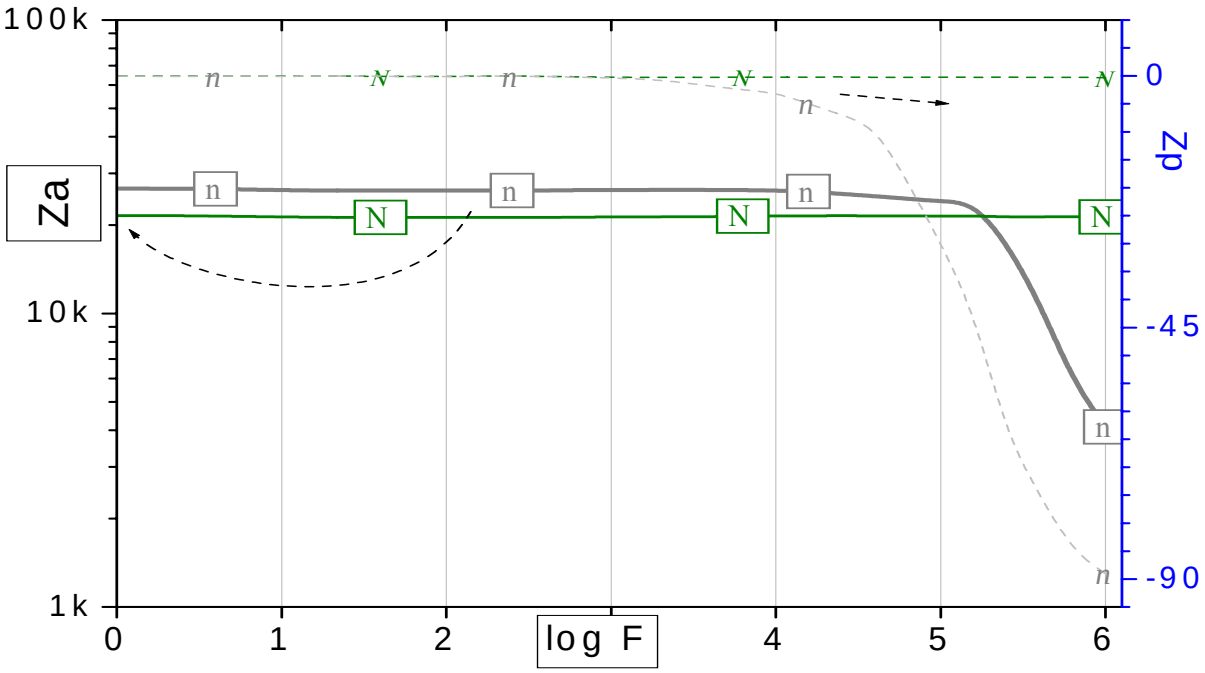
β) κατά τη διέλευση DC ρεύματος όπου η ενδιάμεση στρώση της ενδοεπιφάνειας (διπλό $R_i//C_i$) θεωρείται οριακά ως «αδιαφανής» στην περιοχή των πολύ χαμηλών συχνοτήτων.

Με 4 επιφανειακές ηλεκτρικές επαφές σε κυκλική γεωμετρία (σχ.2.1α) και χρήση της μεθόδου Van Der Pauw[2] έχουμε κάτω από προυποθέσεις μέτρηση της εμπέδησης Z και του λάθους E_Z. Στην απλή περίπτωση που μια διεπιφάνεια πίνακα 2 στρώσεων π.χ. με πλαστικό χρώμα πάνω σε λαδομπογιά που έγιναν σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, τότε έχουμε μια διάταξη από ηλεκτρική άποψη όπως στο σχ.3.1. με μια χωρητική διεπιφάνεια χρωμάτων που με χρήση εκτεταμένης περιοχής συχνότητας είναι δυνατό να έχουμε μετρήσεις από τη τη 2η στρώση (σχ.3.1β). Αντίθετα στο DC μετράμε μόνο την 1η στρώση (σχ.3.1γ). Στο σχ.4.5 θα δοθεί ένα πιο ρεαλιστικό μοντέλο ισοδύναμου κυκλώματος που προκύπτει από τα πειραματικά μας δεδομένα.

4. Αποτελέσματα

Μετρήσαμε την εμπέδηση μιας και μοναδικής στρώσης υμενίων-χρωμάτων πάνω σε ύαλο αντικειμενοφόρου πλάκας οπτικού μικροσκοπίου (ΑΠΟΜ) που προέρχονται από 4

γνωστές σκόνες αγιογραφίας και παρασκευάστηκαν όπως προαναφέραμε στην παρ.2. Η εμπέδηση 3 (από σύνολο 4) χρωμάτων, εκτός του μαύρου χρώματος, είναι σχεδόν πλήρως χωρητικής φύσεως ($Z \sim 0\text{-}j\omega C_x$). Ειδικά το κίτρινο/ΑΠΟΜ είναι καθαρά χωρητικό, ενώ το μπλέ/ΑΠΟΜ έχει και μια πολύ μικρή πραγματική συνιστώσα ενώ το κόκκινο/ΑΠΟΜ είναι ενδιάμεσα.



Σχήμα 4.1: Η εμπέδηση της 2ης στρώσης (μαύρο χρώμα δοκιμίου) όπου το πλάτος φαίνεται με σύμβολα-γράμματα μέσα σε πλαίσιο, ενώ η γωνία της εμπέδησης παρίσταται με πλάγια γράμματα. Εδώ φαίνονται δύο μετρήσεις που έγιναν όμως στο ίδιο δοκίμιο με τη μόνη διαφορά ότι αναφέρονται σε δύο καταστάσεις-συνθήκες, δηλαδή :

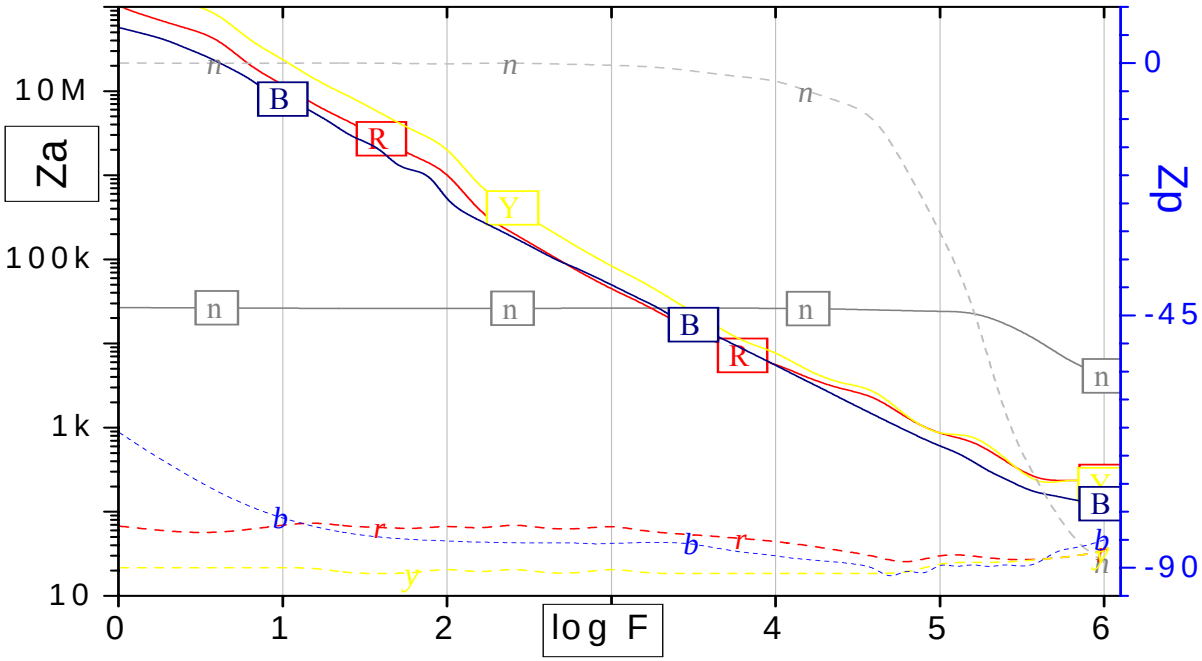
1) <u>πριν</u> την εναπόθεση της επάνω στρώσης δηλ. μόνο του σε υπόβαθρο ΑΠΟΜ (κεφαλαία γράμματα «**N**» και πράσινες καμπύλες) όπως φαίνεται το δοκίμιο στο σχ.2.1γ και

2) <u>μετά</u> την εναπόθεση της επάνω 1ης στρώσης (μικρά γράμματα «**n**» και μαύρες καμπύλες) των τριών χρωμάτων όπως φαίνεται το δοκίμιο στο σχ.2.1δ. Κάθε χρώμα στη επάνω (1η) στρώση των χρωμάτων αυξάνει λίγο την εμπέδηση της 2ης στρώσης.

<u>Με την εναπόθεση</u> της επάνω 1ης στρώσης παρατηρείται πάντοτε αύξηση του πλάτους και της χωρητικής συμμετοχής στην εμπέδηση της 2ης στρώσης παρ' όλο που η μέτρηση γίνεται με τον ίδιο ακριβώς τρόπο, δηλαδή με τις ίδιες ηλεκτρικές επαφές (4-ABCD) της 2ης στρώσης.

Αντίθετα, η εμπέδηση του μαύρου χρώματος μιας και μοναδικής στρώσης είναι καθαρά ωμική στην περιοχή συχνοτήτων 1Hz-1MHz, όπως φαίνεται στο γράφημα που δείχνουμε με κεφαλαία γράμματα «**N**» του σχ.4.1. Αυτό φαίνεται από το σταθερό πλάτος $Z_{a,N}$ και φάση $Z_{p,N}$, όπου έχουμε και τιμή μηδενικής φάσης ($Z_{p,N}$=0). Παρόμοια συμπεριφορά

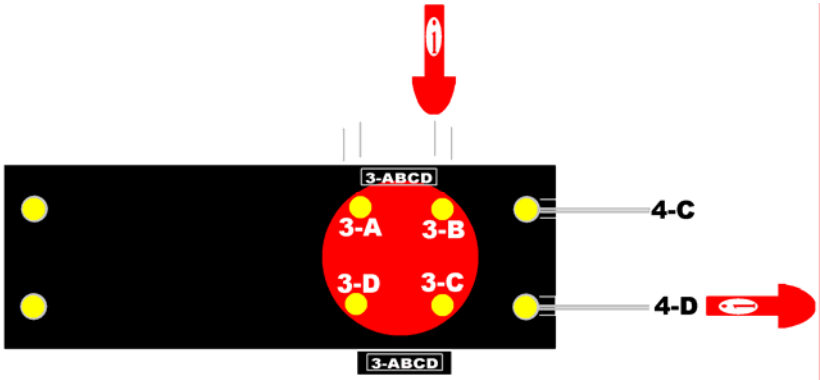
εμφανίζει και ο γραφιτικός άνθρακας π.χ. ράβδοι ή πλάκες ηλεκτροδίων γραφίτη. Όταν όμως εναποθέσουμε ένα από τα άλλα χρώματα, τότε αποκτά και μια μικρή χωρητική συνιστώσα , όπως φαίνεται στο γράφημα που δείχνουμε με μικρά γράμματα «n» του σχ.4.1.



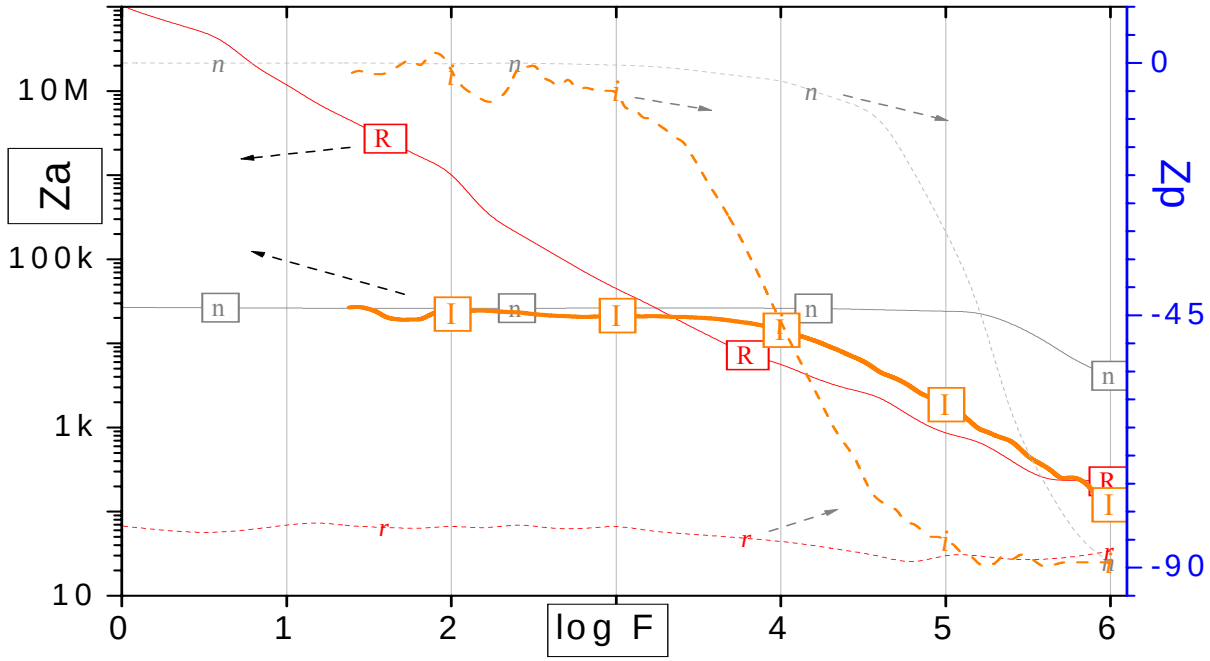
Σχήμα 4.2: Η εμπέδηση Z της $1^{ης}$ στρώσης (τρία διακριτά χρώματα) πάνω στην ίδια $2^{η}$ στρώση (μαύρο χρώμα δοκιμίου). Το πλάτος Za φαίνεται με σύμβολα-γράμματα μέσα σε πλαίσιο, ενώ η γωνία της εμπέδησης με πλάγια γράμματα. Εδώ φαίνονται οι μετρήσεις για τρία διακριτά χρώματα κίτρινο «Y» (Yellow), κόκκινο «R» (Red), και μπλε «B» (Blue) που έγιναν όλα πάνω στο ίδιο χρώμα-υπόβαθρο, το μαύρο χρώμα. Η εμπέδηση του υποβάθρου της $2^{ης}$ στρώσης («n», μαύρο χρώμα, σχ.4.2) εμφανίζεται για άμεση σύγκριση με την εμπέδηση της $1^{ης}$ στρώσης. Η σύγκριση αυτή και η Z-συσχέτιση μεταξύ $1^{ης}/2^{ης}$ στρώσης μπορεί να γίνει, αρχικά ποιοτικά (αλλά και με προσομοίωση), σε 3 συχνοτικές περιοχές: 1)χαμηλών, 2)μεσαίων και υψηλών συχνοτήτων. Η μεσαία περιοχή αποσαφηνίζεται σε επόμενο σχήμα.

Η εμπέδηση των άλλων χρωμάτων, εκτός του μαύρου χρώματος, σαν $2^{η}$ στρώση πάνω στο μαύρο, που συνιστά το νέο υπόβαθρο, παραμένει γενικά αρκετά χωρητικής φύσεως, όπως φαίνεται στο διάγραμμα του σχ.4.2. Ωστόσο, μπορούμε να διακρίνουμε τη μικρή επίδραση της $2^{ης}$ στρώσης. Για το σκοπό αυτό είναι χρήσιμο να διαχωρήσουμε, ποιοτικά, 3 περιοχές συχνοτήτων δηλαδή των 1)χαμηλών, 2)μεσαίων και 3)υψηλών συχνοτήτων. Στην $1^{η}$ και την $3^{η}$ περιοχή συχνοτήτων παρατηρούμε ποιοτικά αλλά εμφανώς την απομάκρυνση των τιμών της φάσης από τις -90 ^{o}, που είχαν τα χρώματα αυτά σε συνθήκες μιας και μοναδικής στρώσης πάνω σε ύαλο-ΟΜ. Στην $1^{η}$ περιοχή των χαμηλών συχνοτήτων το ρεύμα διαρρέει τις ΩΜΙΚΕΣ αντιστάσεις του μοντέλου στο σχ.4.5β. Στην

$3^{η}$ περιοχή των υψηλών συχνοτήτων το ρεύμα περνά, ΧΩΡΗΤΙΚΑ, από τους πυκνωτές του μοντέλου στο σχ.4.5β. Η μεσαία-οριακή περιοχή καθορίζεται από το μέγεθος και τον χαρακτήρα (ωμικό, χωρητικό, επαγωγικό κ.α.) της εμπέδησης στην $1^{η}$ («Y», «R», «B») και $2^{η}$ («n») στρώση καθώς και από τη σταθερή χρόνου ($τ_o$=1/f_o~1/10kHz) της ενδοεπιφάνειας (interface) μεταξύ $1^{ης}$/$2^{ης}$ στρώσης που αποσαφηνίζεται στο σχήμα. 4.4.



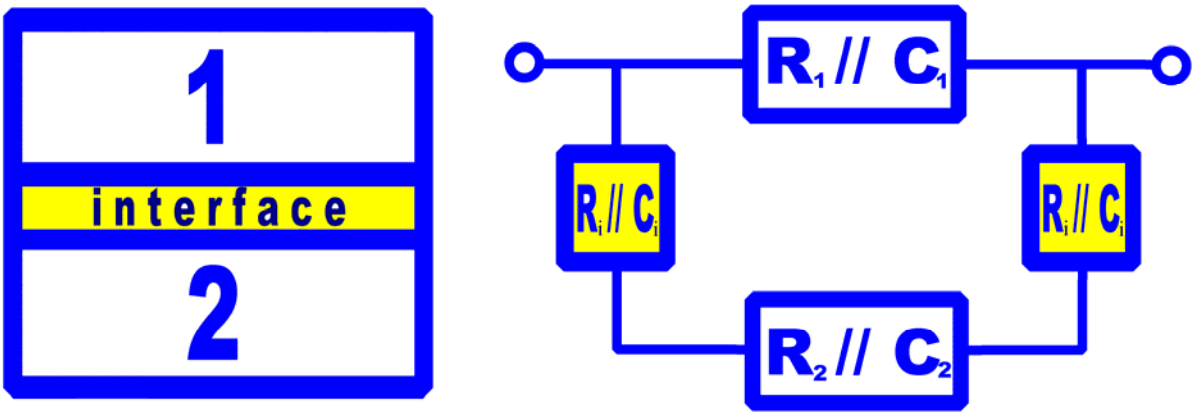
Σχήμα 4.3 :
Σκαρίφημα με βάση το σχ.2.1δ. Η εμπέδηση Z της ενδοεπιφάνειας (interface) μεταξύ της $1^{ης}$ στρώσης (κόκκινο) με τη $2^{η}$ στρώση (μαύρο-υπόβαθρο) προσεγγίζεται από την ακόλουθη μέτρηση: Ρεύμα από τα ηλεκτρόδια 3-B,4-D και μέτρηση τάσης στα 3-C,4-C.



Σχήμα 4.4: Η εμπέδηση Z της ενδοεπιφάνειας (interface) μεταξύ της $1^{ης}$ στρώσης (πορτοκαλλί καμπύλη «i») με τη βάση τα σχ.2.1δ. και σχ.4.4. Το πλάτος Za φαίνεται με σύμβολα-γράμματα μέσα σε πλαίσιο, ενώ η γωνία της εμπέδησης με πλάγια γράμματα. Εδώ φαίνονται για σύγκριση και οι μετρήσεις για το κόκκινο-«R» και το μαύρο-υπόβαθρο-«n» από τα προηγούμενα σχήματα Η σύγκριση αυτή και η Z-συσχέτιση μεταξύ $1^{ης}$/$2^{ης}$ στρώσης μπορεί να γίνει, αρχικά ποιοτικά (αλλά και με προσομοίωση), σε 3 συχνοτικές περιοχές: 1)χαμηλών (κυριαρχεί η ωμική $2^{η}$ στρώση), 2)μεσαίων και υψηλών (κυριαρχεί η χωρητική $1^{η}$ στρώση) συχνοτήτων. Η μεσαία-οριακή περιοχή καθορίζεται από το μέγεθος και τον χαρακτήρα (ωμικό, χωρητικό, επαγωγικό κ.α.) της εμπέδησης στην $1^{η}$ («R») και $2^{η}$ («n»)

στρώση καθώς και από τη σταθερή χρόνου της ενδοεπιφάνειας (interface) μεταξύ $1^{ης}/2^{ης}$ στρώσης είναι στη περιοχή των 0.1ms ($\tau_o=1/f_o\sim1/10kHz$) κοντά 1/10kHz.

Στο σχ.3.1 προβλέψαμε τη δυνατότητα μέτρησης των στρώσεων και της διεπιφάνειας αλλά στο σχ.4.4 έχουμε πειραματικά δεδομένα που επιβεβαιώνουν τη δυνατότητα άμεσης πρόσβασης στις ηλεκτρικές ιδιότητες της διεπιφάνειας. Επιπλέον επιβεβαιώνουμε πειραματικά τη δυνατότητα ηλεκτρικής ανίχνευσης στη $2^η$ στρώση των χρωμάτων (σχ.4.3) που, ενδεικτικά, ήταν 4 γνωστές σκόνες αγιογραφίας. Στο σχ.4.5 προτείνεται ένα αρκετά ρεαλιστικό μοντέλο ισοδύναμου κυκλώματος που προκύπτει από τα παραπάνω πειραματικά μας δεδομένα και καλύπτει τις 3 περιοχές συχνοτήτων (πειραματικά δεδομένα στο σχ.4.5). Η μεσαία περιοχή συχνοτήτων έχει μια σταθερή χρόνου (λόγω $R_i//C_i$) της ενδοεπιφάνειας (interface) μεταξύ $1^{ης}/2^{ης}$ στρώσης που είναι στην περιοχή των 0.1ms. Τα άλλα $R_1//C_1$ και $R_2//C_2$ μπορούν να μετρηθούν από προσομοίωση[3] της εμπέδησης κάθε χρώματος (σχ.4.3) με τη βοήθεια Η/Υ.



(α) (β)

Σχήμα 4.5 : Θεώρηση μιας εγκάρσιας τομής του πίνακα :

α) Ένα προς μέτρηση στοιχείο του πίνακα με δύο στρώσεις ζωγραφικής και η ενδιάμεση στρώση της ενδοεπιφάνειας

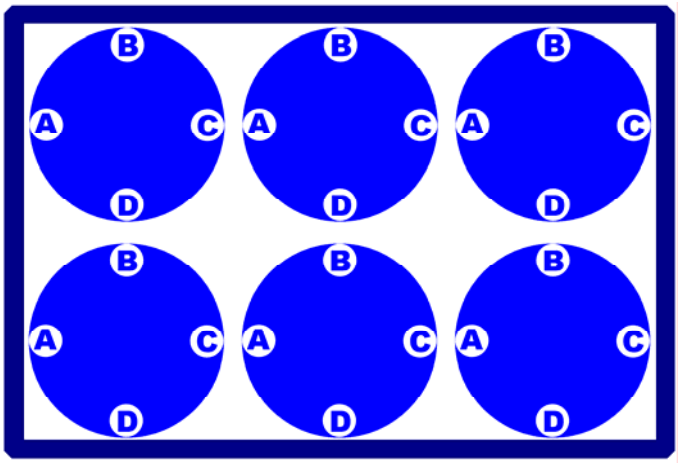
β) Ένα απλό ισοδύναμο ηλεκτρικό δικτύωμα όπου το υλικό του χρώματος κάθε στρώσης απεικονίζεται[3] με ένα R//C και η ενδιάμεση στρώση της ενδοεπιφάνειας με ένα άλλο διπλό $R_i//C_i$.

5. Συζήτηση

Στο χώρο των ηλεκτρικών μετρήσεων αντιμετωπίζουμε, συχνά, το πρόβλημα της επίδρασης κάποιας παράλληλης αγωγιμότητας σαν παράσιτη αγωγιμότητα που οφείλεται ενδεχόμενα στο δειγματοφορέα ή αν έχουμε υμένια τότε έχουμε μεγάλη συμμετοχή από το υπόβαθρό τους. Στις υψηλές συχνότητες έχουμε ανάλογο πρόβλημα στους

συμβατικούς πυκνωτές ή πηνία. Στους πυκνωτές, με επαφή στη μια άκρη του ηλεκτροδίου έχουμε ωμική συμμετοχή που οφείλεται συχνά στην μερική αγωγιμότητα από το απέναντι ηλεκτρόδιο. Αν προσθέσουμε και το επιδερμικό φαινόμενο τότε έχουμε εμφάνιση ταλαντώσεων. Γι΄ αυτό έχουμε ειδική κατηγορία ηλεκτρικών στοιχείων κατάλληλων στις υψηλές συχνότητες. Εδώ προσεγγίζουμε το θέμα μας εξετάζοντας κυρίως το συμπληρωματικό του παραπάνω προβλήματος, οπότε τα «προβλήματα» που προαναφέραμε είναι το κύριο αντικείμενό μας για την ανίχνευση της $2^{ης}$ στρώσης.

Η ανίχνευση της $2^{ης}$ στρώσης μπορεί όμως να γίνει κάτω από ορισμένες προυποθέσεις. Στο σχ.4.4 έχουμε ανίχνευση της $2^{ης}$ στρώσης αρκεί οι αντιστάσεις των στρώσεων να είναι σε κάποια πλαίσια, γιατί αλλιώς η προσομοίωση στα μοντέλλα δεν μπορεί να συγκλίνει ικανοποιητικά. Κύριος περιοριστικός παράγοντας στη μέτρηση αυτή είναι ο λόγος $Z_i(f)/Z_{i+1}(f)$ να είναι πολύ πάνω από 3 με 4 τάξεις μεγέθους σε κάποια περιοχή συχνοτήτων f, όπου ο δείκτης αναφέρεται στις αντιστάσεις των στρώσεων. Τα σημεία της επιφάνειας του πίνακα όπου υπάρχει αδυναμία μέτρησης θα παραμείνουν κενά. Οστόσο, το συνολικό αποτέλεσμα μπορεί να προσφέρει κάποια συμπληρωματικά στοιχεία στη μελέτη του προβλήματος ύπαρξης-απεικόνισης και $2^{ου}$ στρώματος σε έργα ζωγραφικής.



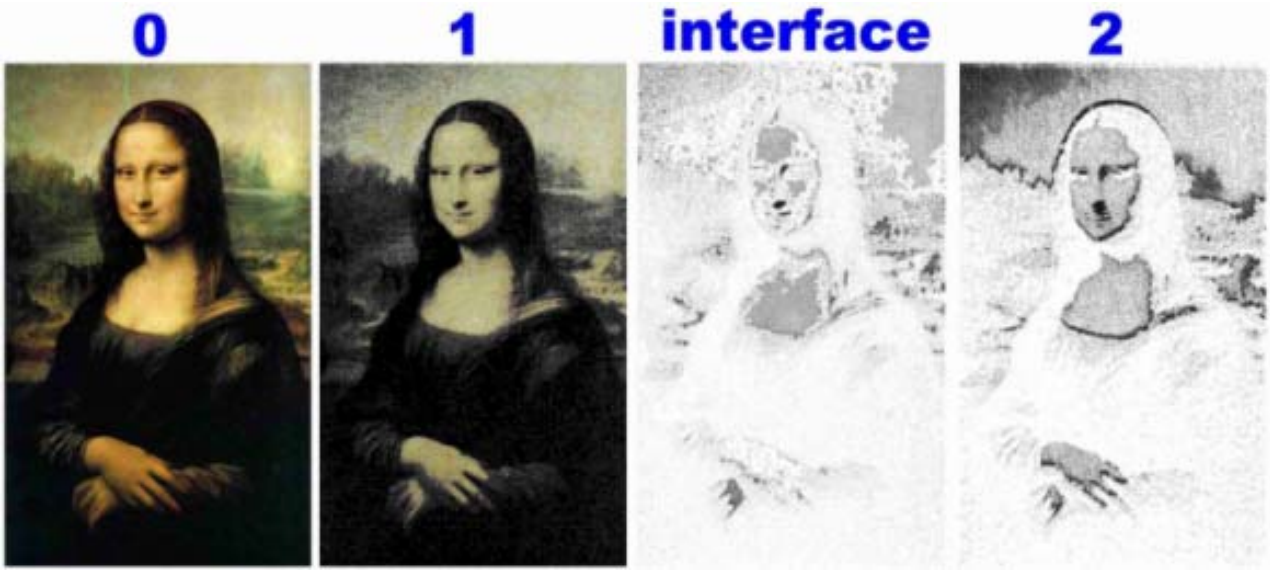
Σχήμα 5.1: Εικόνα από αναμενόμενη συσκευή ψηφιοποίησης ενός έργου τέχνης :

α) Μελλοντική συσκευή ηλεκτρικής μέτρησης του έργου τέχνης που το ικανού μεγέθους μηχανικό τμήμα χρησιμοποιείται ήδη σε ανάλογες συσκευές οπτικής ψηφιοποίησης αλλά αντί οπτικής θα μπορεί να προσαρμοσθεί κατάλληλη ηλεκτρική «γραφίδα» με

β) κεφαλή δειγματοφορέα (σε μέγεθος κεφαλής καρφίτσας) που θα έχει πολλαπλές θέσεις μέτρησης σε διάταξη πίνακα π.χ. 6 στοιχείων (2x3-ABCD) με δυνατότητα πρόσθεσης ίσως και παραπάνω αριθμού στοιχείων (VdP array).

Η προτεινόμενη μέθοδος αποτελείται από δύο τεχνικά βήματα που είναι τελείως διαφορετικά. Στο $1^{ο}$ βήμα, που αναφέρουμε εδώ, γίνεται η ανίχνευση και ταυτοποίηση των ξεχωριστών στρώσεων ζωγραφικής (σχ. 5.3) και αντιπροσωπεύουν **α)**την πιο πάνω

στρώση χρώματος, που φαίνεται «δια γυμνού οφθαλμού» (σχ. 5.3(0)), **β)**τη δεύτερη-θαμμένη- στρώση χρώματος (σχ. 5.3(2)) που δεν εμφανίζει κάποια μετρήσιμη «ανάκλαση» στο ορατό φάσμα της Η/Μ ακτινοβολίας αλλά είναι δυνατό να συμμετέχει στη σύνθετη ηλεκτρική αντίσταση Z(f) και τέλος **γ)**τη διεπιφάνεια (interface) των στρώσεων (σχ. 5.3) που είναι συνήθως χωρητικής φύσεως. Το 2^{ο} τεχνικό βήμα θα γίνει αντικείμενο μελλοντικής ανακοίνωσης και θα αφορά ουσιαστικά στην επανάληψη του προηγούμενου βήματος για την κάλυψη όλης της επιφάνειας που θα απεικονίσουμε. Ετσι, με την τμηματική σάρωση (scanning) της επιφάνειας του πίνακα (σχ 5.1.α) και με γραμμικά βήματα του δειγματοφορέα περίπου ίσα με το μήκος των ηλεκτρικών επαφών του, που είναι κυρίαρχος περιοριστικός παράγοντας μήκους για τη γραμμική ευκρίνεια της απεικόνισης, θα έχουμε δυνατότητα απεικόνισης όλων των στρώσεων. Άμεσο κριτήριο αξιοπιστίας της απεικόνισης των στρώσεων θα είναι το μέγεθος και η έκταση των σφαλμάτων απεικόνισης της επιφανειακής-ορατής στρώσης που θα προκύπτει από τη σύγκρισή της με την οπτική εικόνα (σχ 5.2-0,1). Το ελάχιστο μήκος των ηλεκτρικών επαφών είναι σήμερα της τάξης του 1mm. Το μήκος αυτό όμως είναι δυνατό να γίνει μελλοντικά πολύ μικρότερο με τεχνικές λιθογραφίας σχ 5.1β. Έτσι επιβεβαιώσαμε



Σχήμα 5.2: Μια προοπτική εικόνα από ένα υποθετικά δύο στρώσεων πίνακα όπου μπορούμε να πάρουμε μια ιδέα για την αναμενόμενη ηλεκτρική εικόνα. Από τα αριστερά φαίνεται με τη σειρά :(0) η γνωστή οπτική εικόνα της Μόνα Λίζα, και μια αναμενόμενη υποθετική εικόνα (1)της πρώτης στρώσης, της ενδιάμεσης, επιφάνειας (διεπιφάνεια, interface) των στρώσεων και (2)της δεύτερης στρώσης.

πειραματικά τη δυνατότητα ηλεκτρικής ανίχνευσης στρώσεων υλικών-χρωμάτων που, ενδεικτικά, ήταν 4 γνωστές σκόνες αγιογραφίας. Ένα μοντέλο με στρώσεις και δι-επιφάνεια που αντιστοιχούν σε απλά στοιχεία R-C είναι αρκετά ρεαλιστικό για τις σκόνες

αγιογραφίας που εξετάσαμε. Αν κατανοήσουμε τη μέθοδο αυτή σε βάθος τότε μπορεί να γίνει ένα εργαλείο στην κατεύθυνση : από μέτρηση υλικών-χρωμάτων σε ηλεκτρικά μεγέθη και μοντέλα. Αν ακολουθήσουμε την αντίστροφη διαδικασία τότε είναι δυνατό να ανιχνεύσουμε ακόμη και να χαρακτηρίσουμε από ηλεκτρικής απόψεως άγνωστα υλικά-χρωμάτων με τη δημιουργία ενός πίνακα αντιστοίχισης ηλεκτρικών μεγεθών και ψευδοχρωμάτων. Επομένως, η εργασία αυτή αποτελεί μια αρχική διερεύνηση για μια μελλοντική πρόταση μιας νέας συμπληρωματικής μεθόδου για μη καταστροφική μελέτη διδιάστατων έργων τέχνης σε συνθήκες συντήρησης ή αποθήκευσής τους.. Η σύγχρονη τεχνολογία επιτρέπει αφ΄ ενός τα ηλεκτρικά σήματα της μεθόδου αυτής να είναι πολύ χαμηλής ισχύος, στην περιοχή των nW (~mV*μA) και αφ΄ετέρου την εκλεπτυσμένη μηχανική σάρωση της κεφαλής της γραφίδας του ηλεκτρικού δειγματοφορέα (electrical probe) ώστε να μετράμε χωρίς να καταστρέφεται το δοκίμιο. Ετσι, είναι δυνατό να έχουμε μια ηλεκτρικής φύσεως τομογραφία ενός έργου τέχνης που στηρίζεται σε πρωτογενή ηλεκτρικά μεγέθη όπως της εμπέδησης (Z-mode), της αγωγιμότητας, της διηλεκτρικής σταθεράς κ.λ.π. ή σε μοντέλα. Η τομογραφία του υποβάθρου ή κάποιας επίστρωσής τους ενδεχόμενα να προσφέρει χρήσιμες πληροφορίες και βέβαια, στην ειδική περίπτωση ενδεχόμενης ύπαρξης $2^{ης}$ στρώσης, η μέθοδος αυτή ανάγεται σε ένα νέο εργαλείο μελέτης.

5. Συμπεράσματα

Επιβεβαιώσαμε πειραματικά τη δυνατότητα ηλεκτρικής ανίχνευσης στρώσεων υλικών-χρωμάτων που, ενδεικτικά, ήταν 4 γνωστές σκόνες αγιογραφίας. Ένα μοντέλο με στρώσεις και διεπιφάνεια που αντιστοιχούν σε απλά στοιχεία R-C είναι αρκετά ρεαλιστικό για τις σκόνες αγιογραφίας που εξετάσαμε. Αν κατανοήσουμε τη μέθοδο αυτή σε βάθος τότε μπορεί να γίνει ένα εργαλείο στην κατεύθυνση: από υλικά χρωμάτων σε ηλεκτρικά μεγέθη και μοντέλα. Αν ακολουθήσουμε την αντίστροφη διαδικασία τότε είναι δυνατό να ανιχνεύσουμε ακόμη και να χαρακτηρίσουμε από ηλεκτρικής απόψεως άγνωστα υλικά-χρωμάτων με τη δημιουργία ενός πίνακα αντιστοίχισης ηλεκτρικών μεγεθών και ψευδοχρωμάτων. Επομένως, η εργασία αυτή αποτελεί μια αρχική διερεύνηση για μια μελλοντική πρόταση μιας νέας συμπληρωματικής μεθόδου, <u>μη καταστροφικής</u> μελέτης δισδιάστατων έργων τέχνης σε συνθήκες συντήρησης ή αποθήκευσής τους με ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην περίπτωση ύπαρξης $2^{ης}$ στρώσης.

Βιβλιογραφία

[1] M.E.Wright, "X-**rays illuminate ancient writings:Hidden Archimedes text comes to light in a physics lab**", Nature:news -18 May 2005; http://npg.nature.com/news/2005/050516/full/050516-8.html

[2] L.J. Van der Pauw, Philips Research Reports Vol.13, No.1 (1958)

[3] L Zekri, N Zekri and J P Clerc 2004 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **37** 535-539, "**Modelling of impedance spectroscopy of composites by electrical networks**"