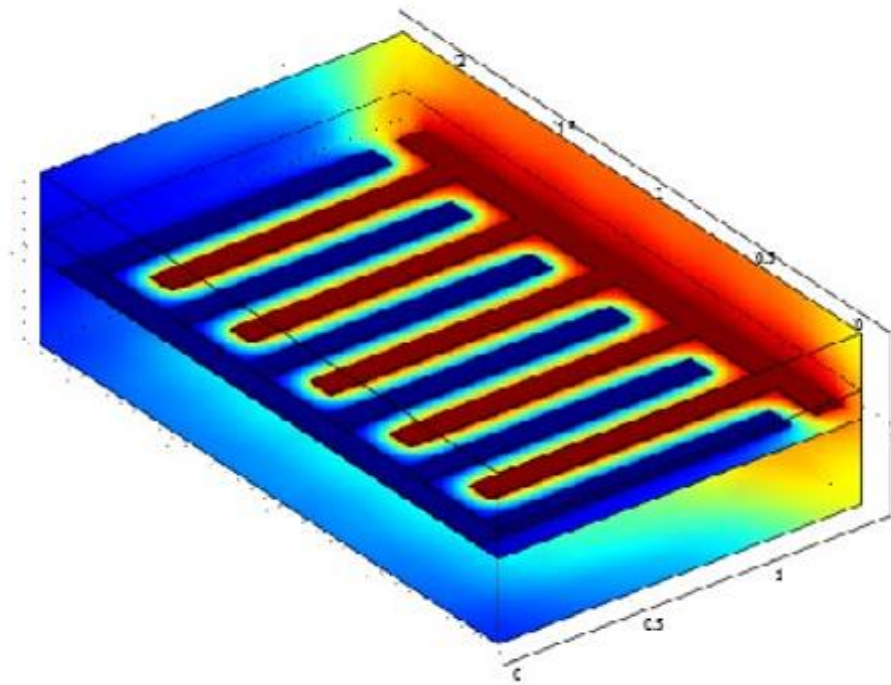


Τεχνολογία Αισθητήρων και  
Μικροσυστημάτων  
Θέμα : «Αισθητήρες Ενδοδιαπλεκόμενων  
Ηλεκτροδίων»

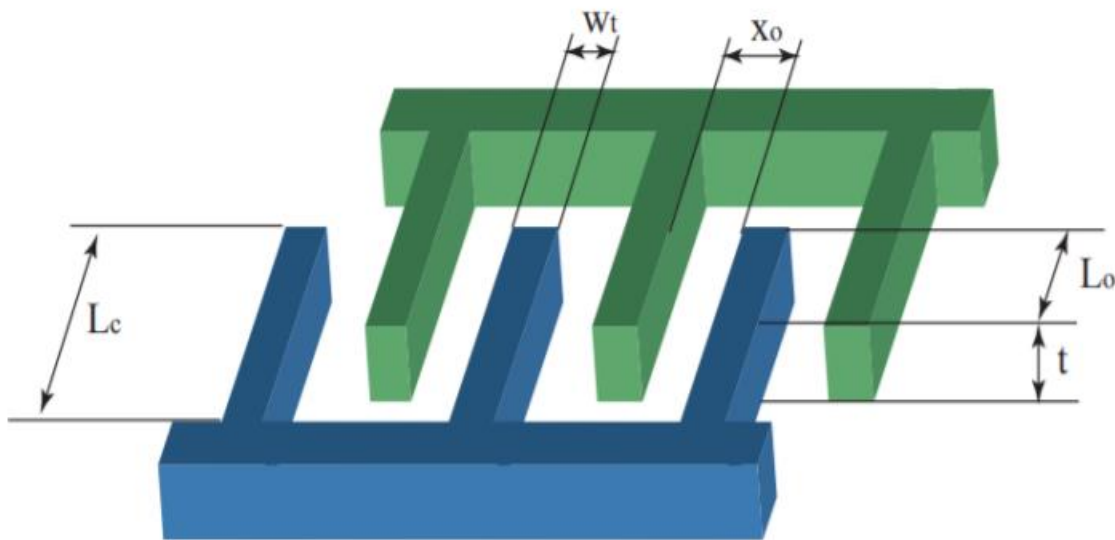


## Περιεχόμενα

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| Θεωρητικό Μέρος.....        | 3  |
| Πειραματικό Μέρος.....      | 5  |
| Θεωρητικοί υπολογισμοί..... | 5  |
| LCR meter.....              | 8  |
| 3d pen .....                | 11 |

## Θεωρητικό Μέρος

Οι πυκνωτές με δομή ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων αποτελούνται από δύο παράλληλες πλάκες και ένα πλήθος κτενιών τα οποία αλληλεπικαλύπτονται. Κατά την εφαρμογή μιας τάσης μεταξύ των στατικών και των κινούμενων κτενιών, αναπτύσσονται ελκτικές δυνάμεις οι οποίες προκαλούν την έλξη μεταξύ τους. Τα κτένια διατάσσονται έτσι ώστε να μην ακουμπάνε ποτέ μεταξύ τους, καθώς τότε δεν θα υπήρχε διαφορά δυναμικού. Η δύναμη που αναπτύσσεται είναι ανάλογη με την μεταβολή της χωρητικότητας μεταξύ των δύο κτενών και αυξάνεται με την αύξηση του αριθμού των κτενών, το κενό μεταξύ των δοντιών καθώς και με την αύξηση της τάσης. Μια αναπαράσταση ενός πυκνωτή ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων φαίνεται ακολούθως.



Σημαντικό για την κατασκευή ενός αισθητήρα, ο οποίος διαθέτει έναν πυκνωτή με δομή ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων είναι ο υπολογισμός των χαρακτηριστικών του πυκνωτή. Η χωρητικότητα του συγκεκριμένου πυκνωτή προκύπτει από το άθροισμα δύο υποχωρητικοτήτων, της χωρητικότητας που δημιουργείται ενδιάμεσα από τα ηλεκτρόδια  $C$  και από την χωρητικότητα που δημιουργείται από το τέλος του κάθε ηλεκτροδίου με την τοίχωμα  $C_f$ . Η χωρητικότητα  $C_f$  ονομάζεται Fringe Capacitance και χαρακτηριστικό της είναι ότι είναι εξαιρετικά μη γραμμική και αλλάζει με διαφορετικές αρχικές και οριακές συνθήκες. Για παράδειγμα εξαρτάται από το μήκος κάθε ηλεκτροδίου, καθώς και από το μήκος της επικαλυπτόμενης περιοχής  $L_o$ . Επιπλέον, όσο μεγαλώνει η απόσταση μεταξύ του ηλεκτροδίου από την άκρη, τόσο μειώνεται η χωρητικότητα  $C_f$ , διότι η χωρητικότητα ενός πυκνωτή είναι αντιστρόφως ανάλογη της απόστασης των δύο πλακών.

Συνεπώς η χωρητικότητα ενός τέτοιου πυκνωτή περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση:

$$C_{\text{total}} = C + C_f \quad (1)$$

Όπου  $C_f$  : η χωρητικότητα Fringe Capacitance

$C$  : η χωρητικότητα που περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση

$$C = \frac{\epsilon A}{x_0} = (N \epsilon_r \epsilon_0 L_0 t) / x_0 \quad (2)$$

Όπου  $\epsilon_0$  : η διηλεκτρική σταθερά του αέρα

$\epsilon_r$  : η σχετική διηλεκτρική σταθερά του υλικού ενδιάμεσα στο ηλεκτρόδια

$A$  : η συνολική επιφάνεια

$t$  : το πάχος των ηλεκτροδίων

$x_0$  : η απόσταση των ηλεκτροδίων μεταξύ τους

$L_0$  : το βάθος των επικαλυπτόμενων ηλεκτροδίων

$N$  : ο αριθμός των ηλεκτροδίων

## Πειραματικό Μέρος

Σε αυτό το μέρος της εργαστηριακής άσκησης γίνεται η σύγκριση μεταξύ θεωρητικών και πειραματικών μετρήσεων όπως αυτές υπολογίζονται με τις μεθόδους LCR meter και 3d pen.

### Θεωρητικοί υπολογισμοί

Σε αυτό το μέρος γίνονται οι θεωρητικοί υπολογισμοί για 3 πυκνωτές ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων με διαστάσεις :

- **Πυκνωτής Α** :  $1.8 \times 0.8 \text{ cm}^2$  ,  $N = 8$
- **Πυκνωτής Β** :  $2.4 \times 1 \text{ cm}^2$  ,  $N = 10$
- **Πυκνωτής Γ** :  $4.3 \times 4.3 \text{ cm}^2$  ,  $N = 50$

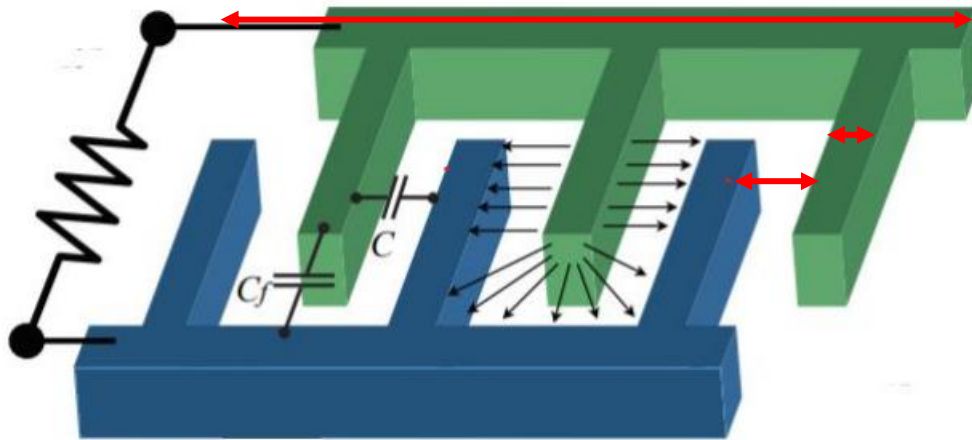
Από τα δεδομένα της εκφώνησης δίνεται ότι για τον υπολογισμό της χωρητικότητας του κάθε πυκνωτή θα χρησιμοποιηθεί ο απλοποιημένος τύπος υπολογισμού της χωρητικότητας, κατά τον οποίο δεν συνυπολογίζεται η fridge χωρητικότητα  $C_f$ . Άρα, η σχέση (1) εκφυλίζεται στην ακόλουθη σχέση :

$$C_{\text{total}} = C = \frac{\epsilon A}{x_0}$$

Από τη νέα μορφή της σχέσης οι παράμετροι που είναι γνωστές είναι οι ακόλουθες :

- Η συνολική επιφάνεια  $A$  δίνεται σε διαστάσεις  $\text{cm}^2$  ( ισοδύναμα  $10^{-4}\text{m}^2$  )
- Η διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$

Άρα, από την σχέση αυτή φαίνεται ότι η μόνη παράμετρος, που μένει για να υπολογίσουμε τη χωρητικότητα είναι η απόσταση  $x_0$  των ηλεκτροδίων μεταξύ τους. Για τον υπολογισμό της γίνεται η εξής παρατήρηση όπως φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα.



Η παρατήρηση, που έγινε δηλαδή, είναι ότι η 1<sup>η</sup> διάσταση του μήκους του πυκνωτή περιγράφεται σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση :

$$\text{Μήκος}_1 = (2N - 1)(\text{Width} + x_0) + \text{Width}$$

Επιπλέον δίνεται ότι το πλάτος κάθε ηλεκτροδίου ισούται με την απόσταση μεταξύ 2 ηλεκτροδίων, δηλαδή ισχύει ότι  $\text{Width} = x_0$ . Άρα, ο παραπάνω τύπος παίρνει την ακόλουθη μορφή :

$$x_0 = \frac{\text{Μήκος}_1}{4N - 1}$$

Άρα, οι θεωρητικές τιμές για τις χωρητικότητες των πυκνοτήτων για τα διάφορα υλικά είναι :

**Στον αέρα :**

Ισχύουν οι εξής τιμές για τις παραμέτρους :

$$\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{F}{m}$$

$$\epsilon_r = 1$$

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \Leftrightarrow \epsilon = 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{F}{m}$$

Άρα, η χωρητικότητα του πυκνωτή Α θα είναι :

$$A = 1.44 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$x_0 = \frac{1.8}{4 \cdot 8 - 1} \Leftrightarrow x_0 = 0.058 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

$$C_A = \frac{\epsilon A}{x_0} \Leftrightarrow$$

$$C_A = \frac{8.85 \cdot 10^{-12} \cdot 1.44 \cdot 10^{-4}}{0.058 \cdot 10^{-2}} \Leftrightarrow$$

$$C_A = 2.199 \text{ pF}$$

Άρα, η χωρητικότητα του πυκνωτή Β θα είναι :

$$A = 2.4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$x_0 = \frac{2.4}{4 \cdot 10 - 1} \Leftrightarrow x_0 = 0.062 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

$$C_B = \frac{\epsilon A}{x_0} \Leftrightarrow$$

$$C_B = \frac{8.85 \cdot 10^{-12} \cdot 2.4 \cdot 10^{-4}}{0.062 \cdot 10^{-2}} \Leftrightarrow$$

$$C_B = 3.45 \text{ pF}$$

Άρα, η χωρητικότητα του πυκνωτή Γ θα είναι :

$$A = 18.49 * 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$x_0 = \frac{4.3}{4*50-1} \Leftrightarrow x_0 = 0.022*10^{-2} \text{ m}$$

$$C_{\Gamma} = \frac{\varepsilon A}{x_0} \Leftrightarrow$$

$$C_{\Gamma} = \frac{8.85*10^{-12}*18.49*10^{-4}}{0.022*10^{-2}} \Leftrightarrow$$

$$C_{\Gamma} = 74.38 \text{ pF}$$

**Στο απεσταγμένο νερό :**

Ισχύουν οι εξής τιμές για τις παραμέτρους :

$$\varepsilon_0 = 8.85*10^{-12} \frac{F}{m}$$

$$\varepsilon_r = 78.5$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \Leftrightarrow \varepsilon = 694.725*10^{-12} \frac{F}{m}$$

Άρα, η χωρητικότητα του πυκνωτή Α θα είναι :

$$A = 1.44 * 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$x_0 = \frac{1.8}{4*8-1} \Leftrightarrow x_0 = 0.058*10^{-2} \text{ m}$$

$$C_A = \frac{\varepsilon A}{x_0} \Leftrightarrow$$

$$C_A = \frac{694.725*10^{-12}*1.44*10^{-4}}{0.058*10^{-2}} \Leftrightarrow$$

$$C_A = 172.5 \text{ pF}$$



Άρα, η χωρητικότητα του πυκνωτή Β θα είναι :

$$A = 2.4 * 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$x_0 = \frac{2.4}{4 * 10^{-1}} \Leftrightarrow x_0 = 0.062 * 10^{-2} \text{ m}$$

$$C_B = \frac{\epsilon A}{x_0} \Leftrightarrow$$

$$C_B = \frac{694.725 * 10^{-12} * 2.4 * 10^{-4}}{0.062 * 10^{-2}} \Leftrightarrow$$

$$C_B = 268.92 \text{ pF}$$

Άρα, η χωρητικότητα του πυκνωτή Γ θα είναι :

$$A = 18.49 * 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$x_0 = \frac{4.3}{4 * 10^{-1}} \Leftrightarrow x_0 = 0.022 * 10^{-2} \text{ m}$$

$$C_\Gamma = \frac{\epsilon A}{x_0} \Leftrightarrow$$

$$C_\Gamma = \frac{694.725 * 10^{-12} * 18.49 * 10^{-4}}{0.022 * 10^{-2}} \Leftrightarrow$$

$$C_\Gamma = 5.83 \text{ nF}$$

Συγκεντρωτικά, οι θεωρητικές τιμές, που προέκυψαν είναι :

**Στον αέρα :**

$$C_A = 2.199 \text{ pF}$$

$$C_B = 3.45 \text{ pF}$$

$$C_\Gamma = 74.38 \text{ pF}$$

**Στο νερό :**

$$C_A = 172.5 \text{ pF}$$

$$C_B = 268.92 \text{ pF}$$

$$C_\Gamma = 5.83 \text{ nF}$$

## LCR meter

Σε αυτό το μέρος γίνεται ο πειραματικός υπολογισμός της χωρητικότητας των πυκνωτών σε κάθε περίπτωση με χρήση του LCR meter. Οι πειραματικοί υπολογισμοί που προέκυψαν σε κάθε περίπτωση είναι :

### Στον αέρα :

$$C_A = 0.1 \text{ pF}$$

$$C_B = 3.7 \text{ pF}$$

$$C_\Gamma = 58 \text{ pF}$$

### Στο νερό :

$$C_A = 80 \text{ nF}$$

$$C_B = 140 \text{ nF}$$

$$C_\Gamma = 2.2 \text{ }\mu\text{F}$$

Συγκρίνοντας τις παραπάνω πειραματικές τιμές με τις θεωρητικές τιμές, που υπολογίστηκαν στο προηγούμενο ερώτημα, προκύπτουν τα αντίστοιχα ζεύγη τιμών.

| LCR        | Αέρας     |             | Απεσταγμένο Νερό |                   |
|------------|-----------|-------------|------------------|-------------------|
|            | Θεωρητική | Πειραματική | Θεωρητική        | Πειραματική       |
| $C_A$      | 2.199 pF  | 0.1 pF      | 172.5 pF         | 80 nF             |
| $C_B$      | 3.45 pF   | 3.7 pF      | 268.92 pF        | 140 nF            |
| $C_\Gamma$ | 74.38 pF  | 58 pF       | 5.83 nF          | 2.2 $\mu\text{F}$ |

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι οι θεωρητικές μετρήσεις διαφέρουν από τις πειραματικές, ενώ στην περίπτωση του αέρα διαφέρουν λιγότερο από ότι στην περίπτωση του απεσταγμένου νερού, στην οποία και σημειώνονται μεγάλες αποκλίσεις. Αυτές οι αποκλίσεις προκύπτουν λόγω της διηλεκτρικής σταθεράς, η οποία αυξάνεται από τη μία στην άλλη περίπτωση, καθώς και στην παραδοχή ότι η χωρητικότητα  $C_f$  θεωρείται αμελητέα.

### 3d pen

Σε αυτό το μέρος γίνεται ο πειραματικός υπολογισμός της χωρητικότητας των πυκνωτών σε κάθε περίπτωση με χρήση του 3d pen. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται ένα 3d pen για να σχηματιστεί ένα πηγάδι στην επιφάνεια του πυκνωτή. Έστερα, χρησιμοποιείται μια πιπέτα για να τοποθετηθούν συγκεκριμένα  $\mu\text{L}$  απεσταγμένου νερού και μετριέται η χωρητικότητα για κάθε  $\mu\text{L}$  απεσταγμένου νερού, που τοποθετήθηκαν. Οι πειραματικοί υπολογισμοί που προέκυψαν είναι :

$$C_{5\mu\text{L}} = 27 \text{ nF}$$

$$C_{10\mu\text{L}} = 37 \text{ nF}$$

$$C_{20\mu\text{L}} = 37 \text{ nF}$$

Από τις παραπάνω τιμές, που προέκυψαν πειραματικά, φαίνεται ότι η χωρητικότητα του πυκνωτή Α αυξάνεται με την προσθήκη απεσταγμένου νερού μέχρι να φτάσει ένα συγκεκριμένο κατώφλι χωρητικότητας. Πειραματικά αυτό το κατώφλι χωρητικότητας φαίνεται να είναι στα  $C = 37 \text{ nF}$ , καθώς περαιτέρω προσθήκη απεσταγμένου νερού δεν φαίνεται να επιφέρει επιπρόσθετη αύξηση στην χωρητικότητα του πυκνωτή. Αυτό συμβαίνει γιατί από ένα σημείο και μετά έχει καλυφθεί ολόκληρη η επιφάνεια του πηγαδιού με το νερό, με αποτέλεσμα οποιαδήποτε μεταβολή στον όγκο του απεσταγμένου νερού να μην επηρεάζει τη χωρητικότητα του πυκνωτή.