

Μάθημα: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

Ακαδημαϊκό Έτος 2012-13

Α' Εξεταστική Χειμερινού εξαμήνου
Ημ. εξέτασης: 22/ 2 /2013

Θέμα 3^ο (5.0):

Έστω χωρητικό επιταχυνσιόμετρο που αποτελείται από μια μάζα πυριτίου η οποία αιωρείται μέσω δύο ελατηρίων σταθεράς $k=2 \text{ N/m}$. Οι δύο πυκνωτές που σχηματίζονται αποτελούνται από 5 ζεύγη ηλεκτροδίων ο καθένας. Το πάχος όλων των δομών είναι $t=15\mu\text{m}$, ενώ οι διαστάσεις της μάζας είναι $800 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$. Η αρχική απόσταση των ηλεκτροδίων ($\alpha=0$) είναι $d=2.5 \mu\text{m}$, $u=20\mu\text{m}$. Δίνονται: πυκνότητα του Si = $2,3 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, $\epsilon_0= 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$, $\epsilon_r = 1$, $l_1 = 160\mu\text{m}$, $l_2 = 5\mu\text{m}$

α) Να βρείτε τη συνολική χωρητικότητα του συστήματος για μηδενική επιτάχυνση

β) Να βρείτε τη συχνότητα συντονισμού

γ) Αν το συνολικό σήμα του αισθητήρα είναι $C_{\text{tot}} = C_1 + C_2$, να υπολογίσετε την ευαισθησία του συστήματος $\left| \frac{\partial C_{\text{tot}}}{\partial \lambda} \right|$ όπου λ η μετατόπιση της μάζας από την αρχική θέση (ποιοτική ανάλυση). Που γίνεται μέγιστη; Σχολιάστε. Δίνεται ότι η μέγιστη δυνατή μετατόπιση της μάζας δεν μπορεί να υπερβεί τα $5\mu\text{m}$.

δ) Ποιος είναι ο ρόλος των σταθερών δομών S_{up} και S_{down} . Να προτείνετε και να δικαιολογήσετε μια τιμή για την απόσταση s . Να αναφέρετε πιθανές σχεδιαστικές/λειτουργικές ατέλειες που εντοπίζετε στο συγκεκριμένο επιταχυνσιόμετρο.

$$l_3=2\mu\text{m}$$

$$F_{elec} = -\frac{1}{2} \frac{C(x)}{x} V^2$$

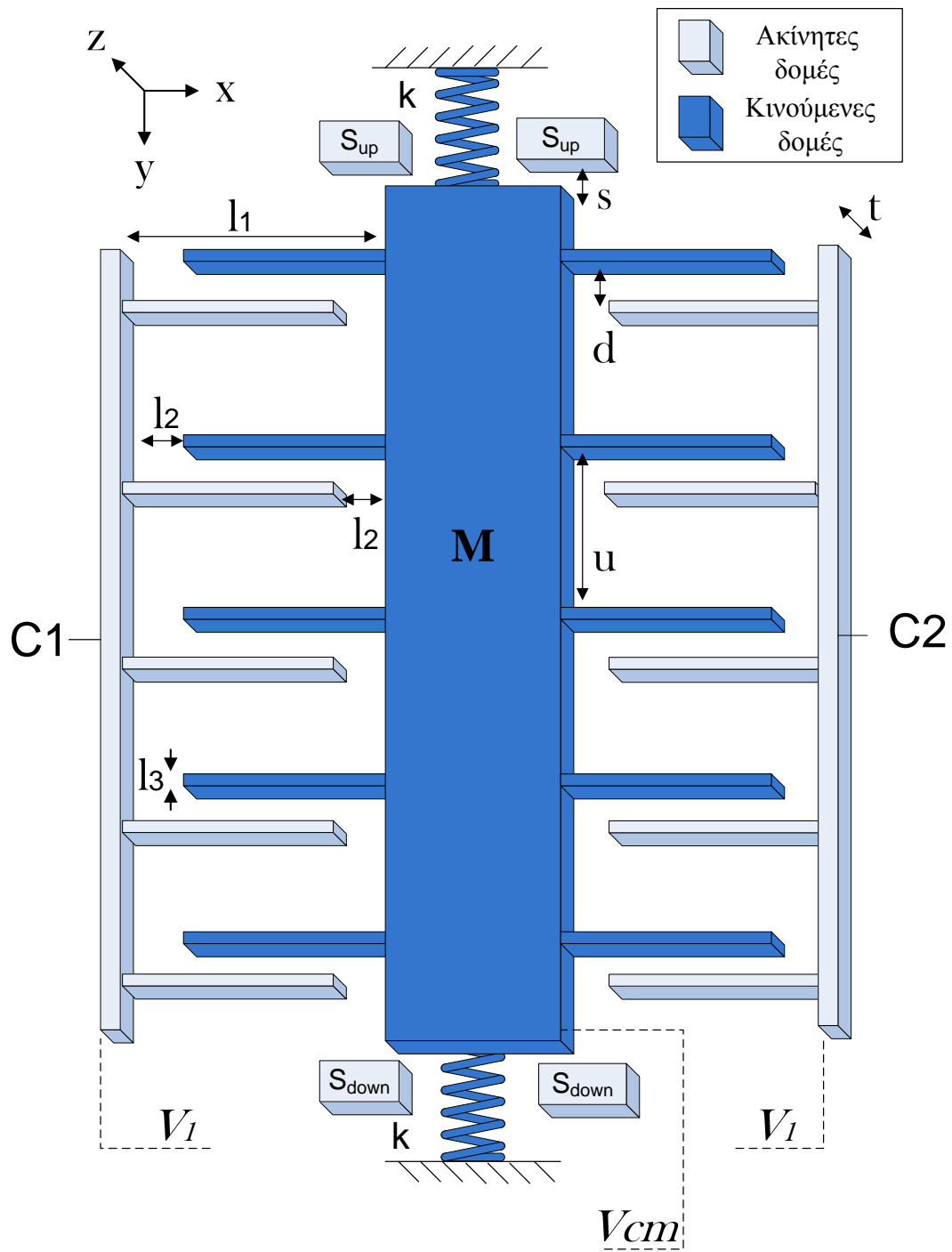
$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$x = \frac{1}{\omega_n^2} a$$

$$\overline{a_B}(f) = \frac{\sqrt{4k_B T b}}{m}$$

$$\rho=m/V$$

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 A}{d}$$



Απάντηση:

α) Η χωρητικότητα δίνεται από τον τύπο $C = \frac{\epsilon \epsilon_0 A}{d}$. Θα πρέπει να υπολογιστεί η επιφάνεια

A μεταξύ των ηλεκτροδίων. Για ένα ζεύγος ηλεκτροδίων, για την κοινή τους επιφάνεια είναι $l_1 - 2 \cdot l_2 = 160 - 10 = 150 \mu\text{m}$.

Οπότε $A = 150 \mu\text{m} \cdot 15 \mu\text{m} = 2250 \mu\text{m}^2 = 2.25 \cdot 10^{-9} \text{m}^2$

Η χωρητικότητα για ένα ζεύγος ηλεκτροδίων με απόσταση $d = 2.5 \mu\text{m}$ είναι:

$$C_d = \frac{\epsilon \epsilon_0 A}{d} = 8.854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}} \cdot 2.25 \cdot 10^{-9} \text{m}^2 \cdot \frac{1}{2.5 \cdot 10^{-6} \text{m}} = 7.96 \cdot 10^{-15} \text{F} \approx 8 \text{fF}$$

Η δεύτερη απόσταση (έστω u') μεταξύ των ηλεκτροδίων είναι $u' = u - l_3 - d = 15 \mu\text{m}$. Οπότε η χωρητικότητα είναι:

$$C_u = \frac{\epsilon \epsilon_0 A}{u'} = 8.854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}} \cdot 2.25 \cdot 10^{-9} \text{m}^2 \cdot \frac{1}{15 \cdot 10^{-6} \text{m}} = 1.3 \text{fF}$$

Για τον πυκνωτή C_1

$$C_1 = 5 \cdot C_d + 4 \cdot C_u = 40 + 5.2 = 45.2 \text{fF}$$

Λόγω συμμετρίας ο C_2 είναι ίσος με τον C_1 , οπότε η συνολική χωρητικότητα του αισθητήρα είναι 90.4fF .

β) Η συχνότητα συντονισμού δίνεται από τον τύπο $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$. Θα πρέπει να υπολογιστεί η

μάζα του επιταχυνσιόμετρου.

Αρχικά υπολογίζεται ο όγκος της κύριας μάζας. Είναι

$$V = a \cdot b \cdot t = 100 \mu\text{m} \cdot 800 \mu\text{m} \cdot 15 \mu\text{m} = 1.2 \cdot 10^{-12} \text{m}^3$$

Η μάζα υπολογίζεται με βάση την πυκνότητα του Si: $\rho_{\text{Si}} = 2.3 \text{g/cm}^3 = 2300 \text{kg/m}^3$

$$m_1 = \rho \cdot V = 2300 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1.2 \cdot 10^{-12} \text{m}^3 = 2.76 \cdot 10^{-9} \text{kg}$$

$$\text{Είναι } \omega_n = \sqrt{\frac{k_{\text{total}}}{m_1}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 2 \text{N/m}}{2.76 \cdot 10^{-9} \text{kg}}} \approx 38000 \sqrt{\frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2 \cdot \text{m} \cdot \text{kg}}} = 38000 \text{s}^{-1} =$$

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{38000}{2\pi} = 6051 \text{Hz}$$

Όπου η συνολική σταθερά του ελατηρίου του συστήματος που χρησιμοποιήθηκε είναι $2 \cdot 2 = 4 \text{N/m}$.

Σημείωση: Σε ακριβέστερη προσέγγιση, η συνολική κινούμενη μάζα αποτελείται από την m_1 που υπολογίστηκε συν την μάζα των fingers. Σε αυτή την περίπτωση, αντί για m_1 , χρησιμοποιείται η μάζα $m_1 + 10 m_f = m_1 + 0.13 \cdot 10^{-9} \text{ kg}$.

(Όπου $m_f = \rho \cdot V_f = 2300 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 5.8 \cdot 10^{-15} \text{ m}^3 = 1.33 \cdot 10^{-11} \text{ kg}$ η μάζα του ενός finger)

Όπως παρατηρείται, η συνεισφορά των fingers στη συνολική μάζα είναι της τάξης του 5%. Η συχνότητα συντονισμού προκύπτει 5.92kHz. Η διαφοροποίηση των συχνοτήτων είναι της τάξης του 2.5%.

γ) Λόγω συμμετρίας, είναι

$$C_{\text{tot}} = C_1 + C_2 = 2 C_1 = 10 \cdot C_d + 8 \cdot C_u \text{ (με βάση το ερώτημα α)}$$

Το C_d εξαρτάται από την «μικρή» απόσταση μεταξύ των fingers (d αρχικά 2.5μm), ενώ το C_u από την «μεγάλη» (u' αρχικά 15μm). Η όποια μετατόπιση λ , η οποία αυξάνει τη μία απόσταση θα μειώνει την άλλη.

Έστω λοιπόν μια μετατόπιση λ . Είναι

$$C_d = \epsilon \epsilon_0 A \frac{1}{d + \lambda} \text{ και } C_u = \epsilon \epsilon_0 A \frac{1}{u' - \lambda}$$

Παραγωγίζοντας λοιπόν ως προς τη μετατόπιση προκύπτει ότι το $\frac{\partial C_d}{\partial \lambda}$ είναι ανάλογο του

$$\frac{1}{(d + \lambda)^2}, \text{ ενώ το } \frac{\partial C_u}{\partial \lambda} \text{ είναι ανάλογο του } \frac{1}{(u' - \lambda)^2}.$$

$$\text{Καθώς αρχικά } d < u', \text{ ισχύει ότι } \frac{1}{(d + \lambda)^2} > \frac{1}{(u' - \lambda)^2} \text{ (α1).}$$

Αυτή η ανίσωση ισχύει για $d + \lambda < u - \lambda$ που με αντικατάσταση των τιμών δίνει $\lambda < 6.25 \mu\text{m}$. Επειδή δίνεται από την εκφώνηση ότι $\lambda < 5 \mu\text{m}$, συμπεραίνεται ότι η ανίσωση (α1) ισχύει γενικά. Βέβαια, όπως αναφέρεται στο επόμενο ερώτημα, η δυνατή μετατόπιση της μάζας περιορίζεται σε ακόμα χαμηλότερες τιμές.

Επιπλέον, προφανώς η μέγιστη ευαισθησία προκύπτει για $\lambda \rightarrow -d$, όταν δηλαδή η απόσταση μεταξύ των fingers τείνει στο μηδέν. Στην περίπτωση αυτή, και η χωρητικότητα του συστήματος αλλά και η ευαισθησία αυτού τείνουν στο άπειρο. Όπως ωστόσο προκύπτει από το επόμενο ερώτημα, στην πράξη αυτό το φαινόμενο δεν θα παρατηρηθεί.

δ) Οι δομές S_{up} και S_{down} λειτουργούν ως stoppers, ώστε να εμποδίσουν την επαφή των fingers μεταξύ τους, κάτι που θα προκαλούσε βραχυκύκλωμα. Στην περίπτωση αυτή, προφανώς η απόσταση s πρέπει να είναι μικρότερη των 2.5μm.

Σε μια πιο αναλυτική προσέγγιση, οι stoppers μπορούν να τοποθετηθούν έτσι ώστε να αποφευχθεί το φαινόμενο του pull-in, εκεί δηλαδή όπου οι ηλεκτρικές δυνάμεις γίνονται μεγαλύτερες από τις μηχανικές δυνάμεις επαναφοράς του ελατηρίου. Στην περίπτωση

αυτή, η οριακή τιμή της παραμέτρου s , θα γίνει ακόμα μικρότερη, περίπου στο ένα τρίτο των 2.5 μm .