

11/04/2025  
Χαιδελβέργη,  
Γερμανία

Αστέριος  
Καλογήρου  
ΑΕΜ : 15473

## Εισαγωγή :

Για την **πρώτη** άσκηση, πραγματοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές προσομοιώσεις για την ενδογενή συγκέντρωση ηλεκτρονίων στο Si (πυρίτιο), συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Για τη **δεύτερη** άσκηση, πραγματοποιήθηκε μία προσομοίωση για υλικό Si με προσμίξεις As (αρσενικού), συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Για μεγαλύτερη ευκολία και εξοικονόμηση χώρου θα δείξω **τέσσερα** συνολικά διαγράμματα.

## 1η Άσκηση :

Πριν από την υλοποίηση κάποιου πειράματος η κλίμακα της θερμοκρασίας μετατράπηκε σε K (Kelvin) άρα η καινούργια κλίμακα είναι :

$$23 \text{ [K]} \leq T \text{ [K]} \leq 1273 \text{ [K]}$$

**α)** Από την εκφώνηση δίνονται  $E_g = 1.12 \text{ [eV]}$ ,  $n_{i \text{ 300K}} = 10^{10} \text{ [cm}^{-3}]$  όπως και η τιμή του  $k = 8.62 * 10^{-5} \text{ [eV/K]}$ .

Πολύ απλά χρησιμοποιώντας αυτά τα δεδομένα, την καινούργια κλίμακα της θερμοκρασίας όπως και την **Σχέση 1** :

$$n_i = n_{i \text{ 300K}} * \sqrt{\left(\frac{T}{300}\right)^3} * \exp\left[\left(\frac{-E_g}{2k}\right) * \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{300}\right)\right] \quad (1)$$

Μπορούμε εύκολα να υπολογίσουμε και να σχεδιάσουμε την ενδογενή συγκέντρωση ηλεκτρονίων για κάθε θερμοκρασία. Επέλεξα για ταχύτερους υπολογιστικούς χρόνους να χωρίσω τα “βήματα” της θερμοκρασίας ανά 10 μονάδες Kelvin.

**β)** Από την εκφώνηση, τώρα μας δίνεται πως έχουμε μία έξτρα εξάρτηση, που αναφέρεται στην εξάρτηση του ενεργειακού χάσματος σε σχέση με τη θερμοκρασία.

Ο τύπος που μας δίνεται είναι η **Σχέση 2**:

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + b} \quad (2)$$

όπου  $E_g(0) = 1.166 \text{ [eV]}$ ,  $\alpha = 4.73 * 10^{-4} \text{ [eV]}$  και  $b = 636 \text{ [K]}$ .

Με τον ίδιο τρόπο όπως και στο **α)** υπολογίζουμε τα  $n_i$  με την **Σχέση 3**, τα αποθηκεύουμε και αργότερα θα τα σχεδιάσουμε όλα μαζί. Η **Σχέση 3** είναι απλά η **Σχέση 1** με χρονοεξαρτώμενη  $E_g$ .

$$n_i = n_{i\ 300K} * \sqrt{\left(\frac{T}{300}\right)^3} * \exp\left[\left(\frac{-E_g(T)}{2k}\right) * \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{300}\right)\right] \quad (3)$$

**γ)** Κρατώντας όλα τα υπόλοιπα από πριν, τώρα θα έχουμε και την θερμοκρασιακή εξάρτηση των  $N_C$  και  $N_V$  ( $N_C, N_V \propto T^{3/2}$ ).

Οπότε τώρα με αυτήν την καινούργια πληροφορία ξανά - υπολογίζουμε το  $n_i$  χρησιμοποιώντας την **Σχέση 4**

$$n_i = \sqrt{N_C * N_V} * \exp\left(\frac{-E_g(T)}{2kT}\right) \quad (4)$$

όπου :

$$N_C = N_C(300K) * (T/300)^{3/2} \text{ με } N_C(300K) = 2.8 * 10^{19} [\text{cm}^{-3}]$$

$$N_V = N_V(300K) * (T/300)^{3/2} \text{ με } N_V(300K) = 1 * 10^{19} [\text{cm}^{-3}]$$

και φυσικά έχουμε το χρονοεξαρτώμενο  $E_g(T)$  από την **Σχέση 2**.

Αντιστοίχως με τα υπόλοιπα υποερωτήματα, υπολογίζουμε τα  $n_i$  τα αποθηκεύουμε και τα σχεδιάζουμε όλα μαζί στο κάτω γράφημα:

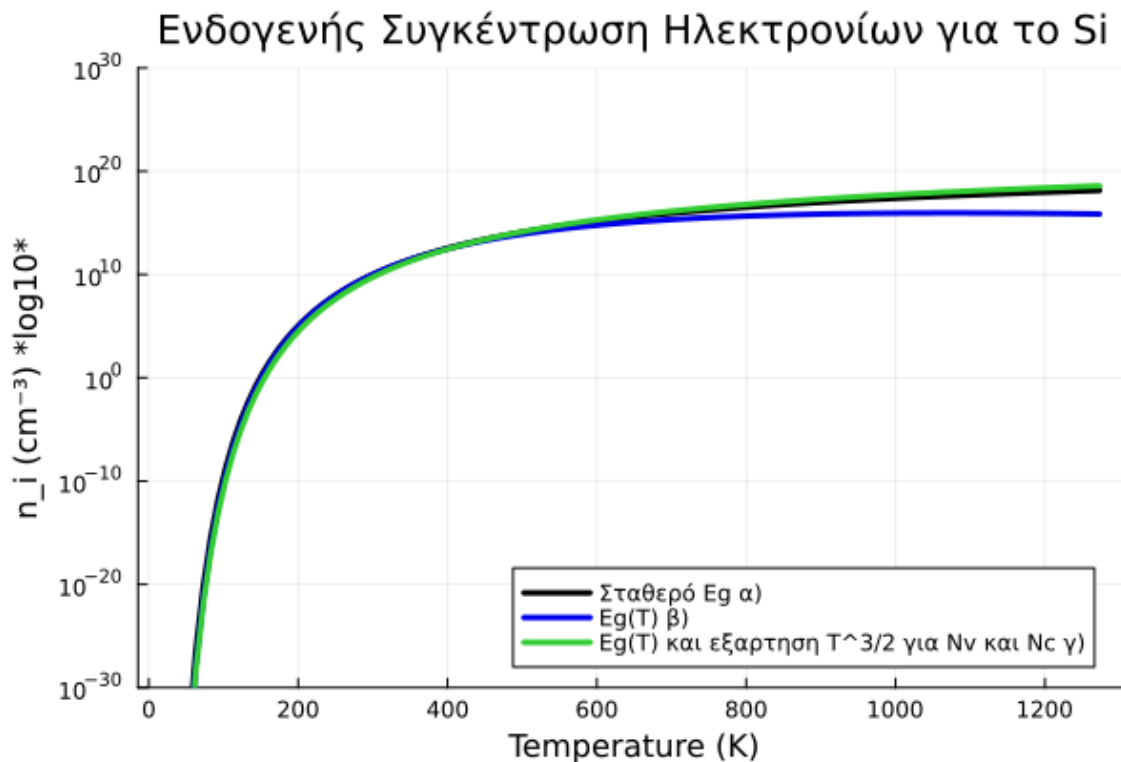


Figure 1: Ενδογενής Συγκέντρωση Ηλεκτρονίων και για τα τρία υποερωτήματα.

## 2η Άσκηση :

Σε αυτήν την άσκηση έχουμε προσμίξεις και εξετάζουμε το φαινόμενο “παγώματος των φορέων”.

Τα δεδομένα που μας δίνονται σε αυτήν την άσκηση (φυσικά ισχύουν και τα προηγούμενα δεδομένα οπότε δεν τα ξανά αναφέρω) είναι :

Προσμίξεις αρσενικού (As) συγκέντρωσης  $N_d = 10^{16} \text{ [cm}^{-3}\text{]}$ ,  
 $E_d = E_{C_{Si}} - 0.054 \text{ [eV]}$  δηλαδή  $0.054 \text{ [eV]}$  από το ελάχιστο όριο της ζώνης αγωγιμότητας του πυριτίου.

Με αυτά τα καινούργια δεδομένα και την **Σχέση 5**,

$$n_d = N_d \frac{1}{1 + 2e^{\frac{E_C - E_d}{k \cdot T}}} \quad (5)$$

που επίσης μας δίνεται υπολογίζουμε την συγκέντρωση ηλεκτρονίων λόγω προσμίξεων.

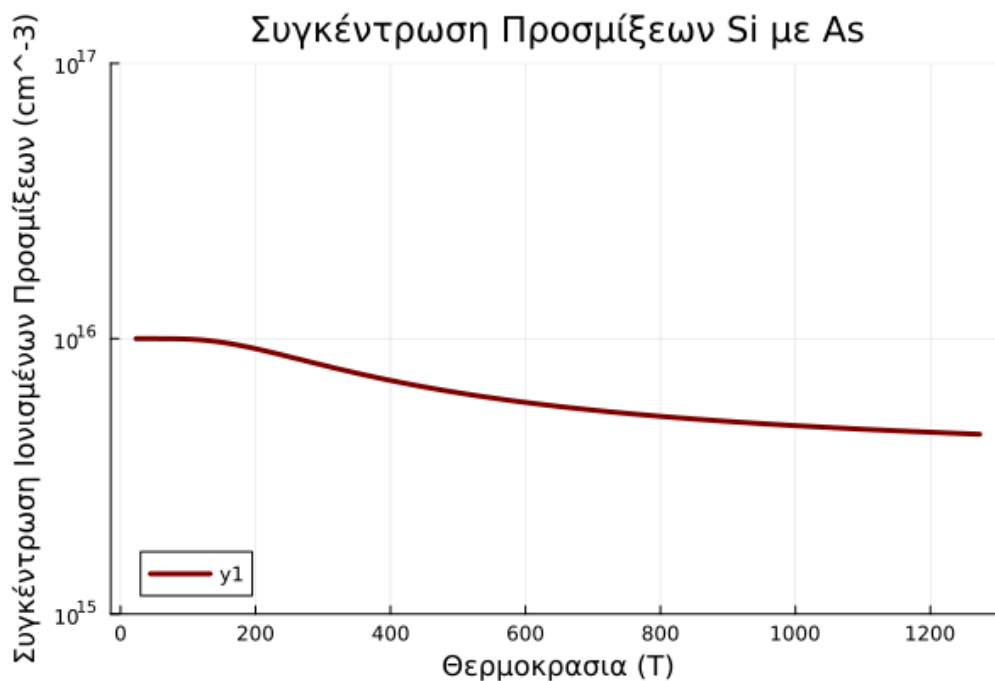
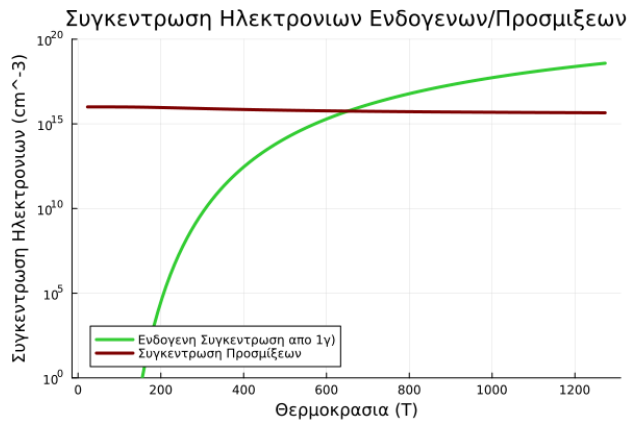
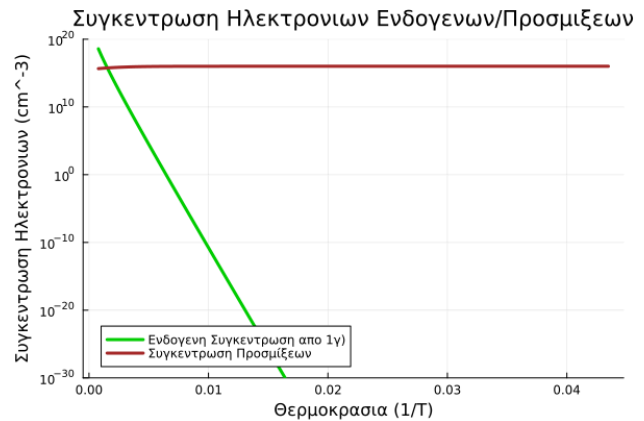


Figure 2: Συγκέντρωση Προσμίξεων Si με As.

Τέλος όπως ζητήθηκε και στην 2<sup>η</sup> Άσκηση, σχεδιάζουμε στο ίδιο σχήμα (και με δύο διαφορετικές θερμοκρασιακές κλίμακες) τον συνδιασμό, της καλύτερης προσέγγισης της συγκέντρωσης των ενδογενών ηλεκτρονίων με την συγκέντρωση των ηλεκτρονίων λόγω προσμίξεων.



Κανονική Κλίμακα Θερμοκρασίας



1/T Κλίμακα

## Σημείωση :

(Το αποτέλεσμα για την 2η άσκηση δεν μου φαίνεται σωστό παρόλα αυ'τα καθώς δεν καταλαβαίνω το λάθος μου σας στέλνω όλη την δουλεία μου.)

Για την ολοκλήρωση του πρώτου σετ ασκήσεων στο μάθημα χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα προγραμματισμού Julia όπου και έγιναν οι αναγκαίοι υπολογισμοί και γραφήματα. Το IDE που χρησιμοποιήθηκε είναι το VSCode και η γραφή της εργασίας γίνεται πάλι μέσα από το VSCode χρησιμοποιώντας την Typst εφαρμογή (αντιστοιχεί της LaTeX)