

# Οπτικές Επικοινωνίες

*Προαιρετικά Θέματα 4ου Κεφαλαίου*



Αλέξανδρος Τζήκας

[alextzik@ece.auth.gr](mailto:alextzik@ece.auth.gr) - 8978

# Προαιρετικά Θέματα 4<sup>ο</sup> Κεφαλαίου

## Οπτικές Πηγές I: Laser & Laser Δίοδοι

### Απευθείας Διαμόρφωση Laser Διόδου

Σε αυτή την εργασία περιγράφεται η λειτουργία μιας laser διόδου. Αρχικά εξάγεται η DC χαρακτηριστική της αναλυτικά (με διάφορες παραδοχές και με αριθμητική επίλυση). Στην συνέχεια υπολογίζεται η απόκρισή της σε έναν μεμονωμένο παλμό ρεύματος και τέλος η απόκρισή της σε μια ψευδοτυχαία ακολουθία δεδομένων.

Σημειώνεται ότι η εκπομπή φωτός από μια laser δίοδο περιγράφεται με βάση τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{e} - \frac{N}{\tau_c} - \frac{g_0}{V}(N - N_0) \frac{1}{1 + \epsilon_{NL}P} P$$
$$\frac{dP}{dt} = \Gamma \frac{g_0}{V}(N - N_0) \frac{1}{1 + \epsilon_{NL}P} P - \frac{P}{\tau_p} + \Gamma \frac{\beta}{\tau_c} N$$

όπου  $N(t)$  είναι ο συνολικός αριθμός των φορέων και  $P(t)$  ο συνολικός αριθμός των φωτονίων.

#### Ερώτημα (α)

i)

Θεωρούμε  $\epsilon_{NL} = \beta = 0$ . Η ανάλυση φαίνεται παρακάτω.

Ισχύουν οι εξισώσεις:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{e} - \frac{N}{\tau_c} - \frac{g_0}{V}(N - N_0)P$$
$$\frac{dP}{dt} = \Gamma \frac{g_0}{V}(N - N_0)P - \frac{P}{\tau_p}$$

Για να παραχθεί οπτικό κύμα, για  $P \approx 0$  θα πρέπει  $\frac{dP}{dt} > 0$ . Άρα:

$$\Gamma \frac{g_0}{V}(N - N_0)P - \frac{P}{\tau_p} > 0$$
$$\Gamma \frac{g_0}{V}(N - N_0)P > \frac{P}{\tau_p}$$
$$\Gamma \frac{g_0}{V}(N - N_0) > \frac{1}{\tau_p} \Rightarrow N > \frac{V}{\Gamma g_0 \tau_p} + N_0$$
$$N_{th} = \frac{V}{\Gamma g_0 \tau_p} + N_0$$

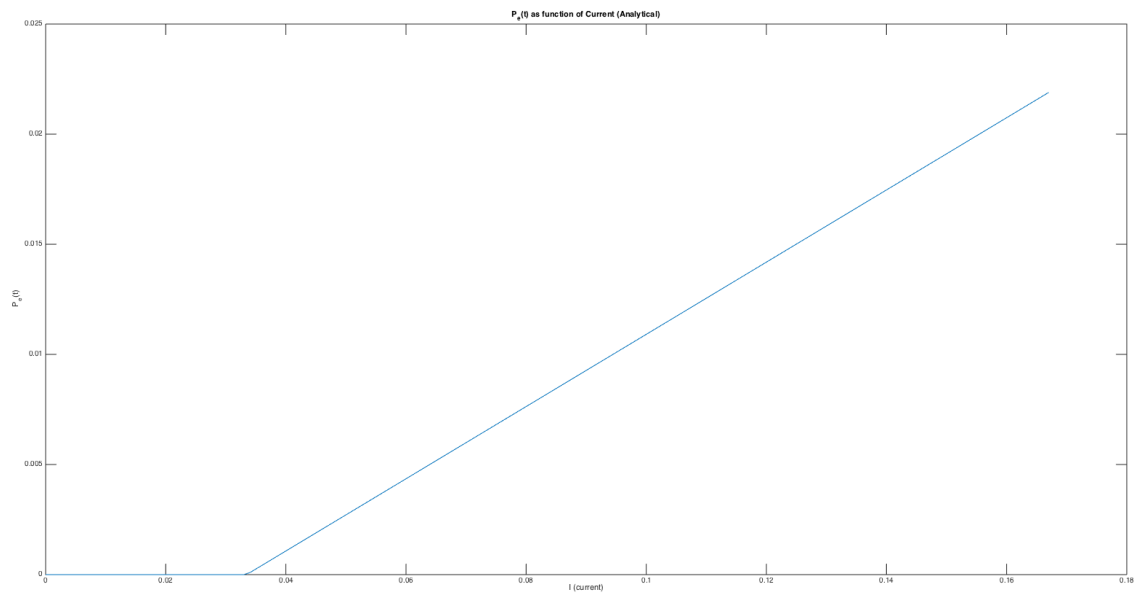
Για το κατώφλι ρεύματος, θα πρέπει για  $P = 0$  να ισχύει  $\frac{dN}{dt} > 0$ , εφόσον βέβαια υπάρχει ο απαιτούμενος αριθμός φορέων  $N = N_{th}$ . Άρα:

$$\frac{I}{e} - \frac{N_{th}}{\tau_c} \geq 0 \Rightarrow I \geq \frac{e N_{th}}{\tau_c} \Rightarrow I_{th} = \frac{e N_{th}}{\tau_c}$$

Σε κατάσταση ισορροπίας ισχύει  $\frac{dN}{dt} = \frac{dP}{dt} = 0$ ,  $N = N_{th}$ . Άρα:

$$0 = \frac{I}{e} - \frac{N_{th}}{\tau_c} - \frac{g_0}{V} \left( \frac{V}{\Gamma g_0 \tau_p} \right) P \xrightarrow{I_{th} = \frac{e N_{th}}{\tau_c}} P(I) = \frac{\Gamma \tau_p}{e} (I - I_{th})$$
$$P_e(I) = \frac{1}{2} v_g \frac{1}{2L} \ln \left( \frac{1}{R_1 R_2} \right) P(I)$$

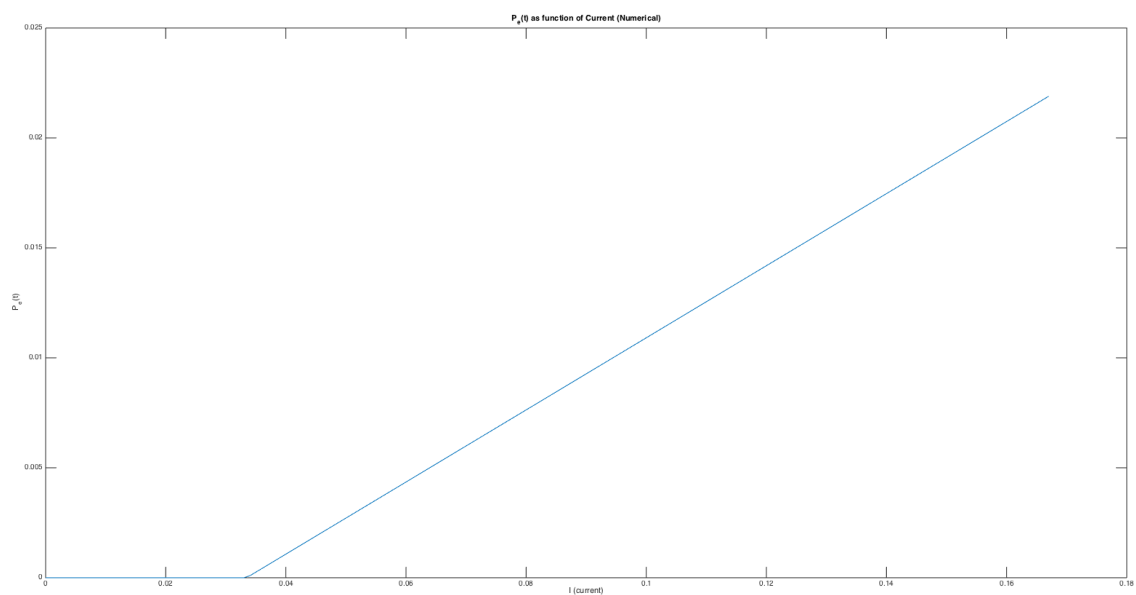
Το ζητούμενο διάγραμμα φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 1.1: Εξωτερικά Εκπεμπόμενη Ισχύς σαν συνάρτηση του Ρεύματος (Θεωρητική)

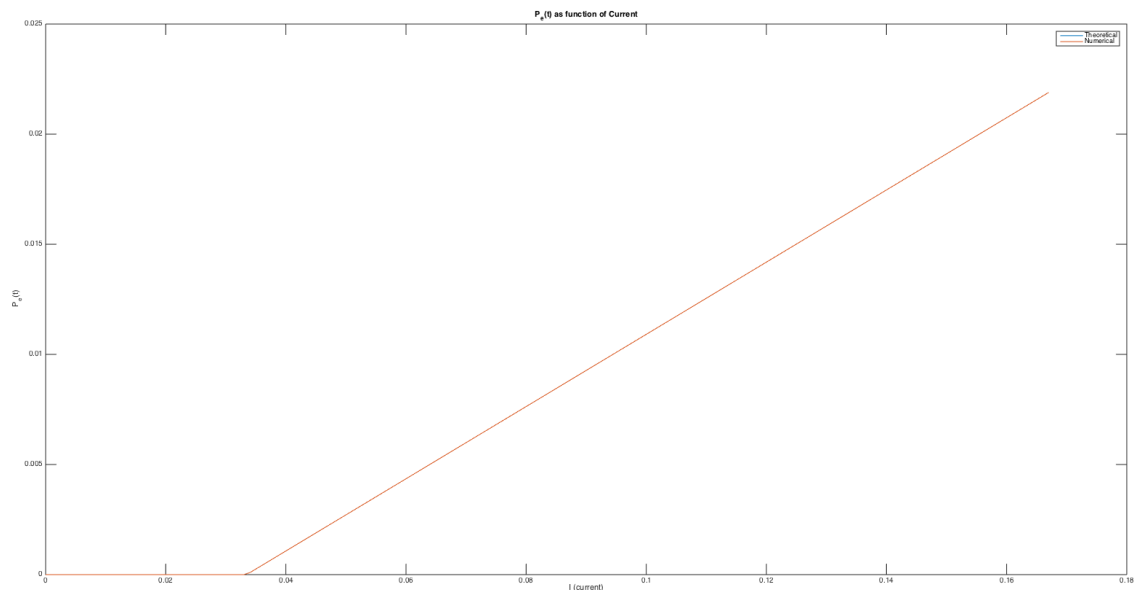
*ii)*

Ζητείται ο υπολογισμός της χαρακτηριστικής DC της διόδου laser με αριθμητική επίλυση των εξισώσεων. Θεωρώντας τις χρονικές παραγώγους ίσες με μηδέν (λόγω CW λειτουργίας) προκύπτει ένα ζευγάρι αλγεβρικών εξισώσεων που δίνουν τελικά το παρακάτω διάγραμμα για την εξωτερικά εκπεμπόμενη ισχύ.



Εικόνα 1.2: Εξωτερικά Εκπεμπόμενη Ισχύς σαν συνάρτηση του Ρεύματος (Αριθμητική)

Οι δύο καμπύλες (θεωρητική και αριθμητική) φαίνονται σε κοινό διάγραμμα παρακάτω. Παρατηρούμε ότι το επίπεδο διαφοράς των δύο είναι πάρα πολύ μικρό, γεγονός που υποδεικνύει την εγκυρότητα των προσεγγίσεων και υποθέσεών μας στην θεωρητική εξαγωγή των σχέσεων.

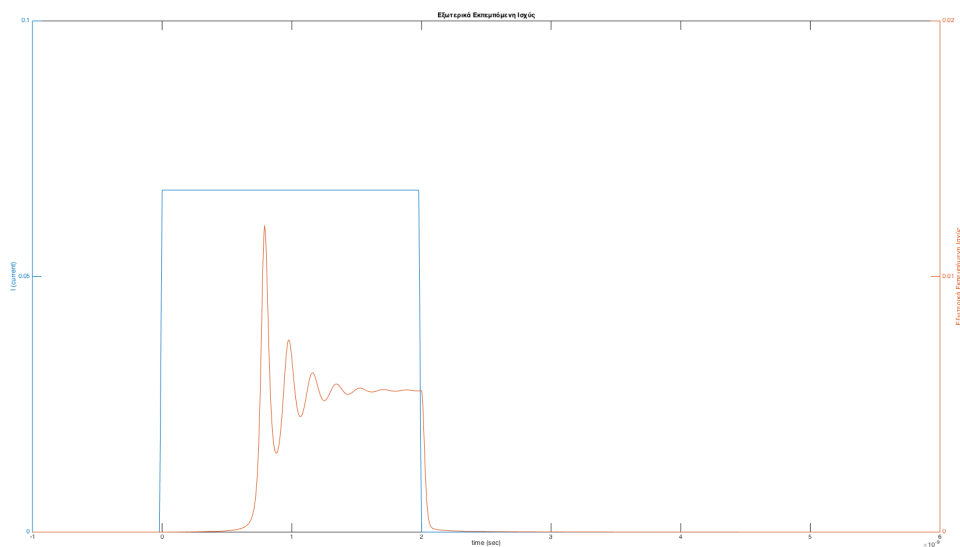


Εικόνα 1.3: Εξωτερικά Εκπεμπόμενη Ισχύς σαν συνάρτηση του Ρεύματος (Θεωρητική & Αριθμητική)

## Ερώτημα (β)

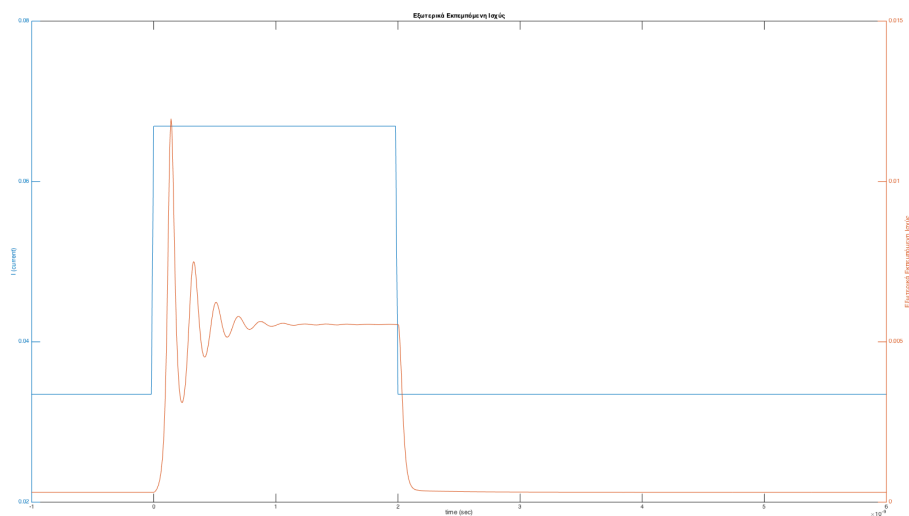
i)

Εξετάζουμε την απόκριση της πηγής (ικανότητα ακολούθησης παλμού) σε έναν μεμονωμένο τετραγωνικό παλμό ρεύματος μεγάλης χρονικής διάρκειας (2 ns), με στόχο την ξεκάθαρη κατανόηση της συμπεριφοράς της. Αρχικά, θεωρούμε αμελητέο κορεσμό ( $\epsilon_{NL}=3.33 \cdot 10^{-8}$ ), με  $I_b=0$  (μηδενική πόλωση) και  $I_m=2I_{th}$ . Η απόκριση, όσο και το ρεύμα διέγερσης, φαίνονται παρακάτω.



Εικόνα 1.4: Εξωτερικά Εκπεμπόμενη Ισχύς ( $I_b=0$ ,  $I_m=2I_{th}$ )

Θεωρώντας αμελητέο κορεσμό ( $\epsilon_{NL}=3.33 \cdot 10^{-8}$ ), με  $I_b=I_{th}$  (μη-μηδενική πόλωση) και  $I_m=I_{th}$ , η απόκριση, όσο και το ρεύμα διέγερσης, προκύπτουν ως εξής.

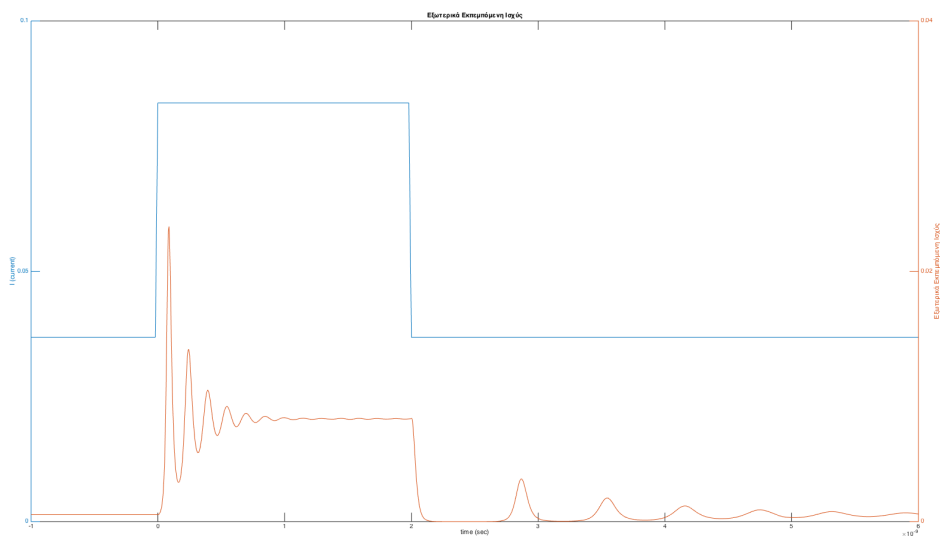


Εικόνα 1.5: Εξωτερικά Εκπεμπόμενη Ισχύς ( $I_b=I_{th}$ ,  $I_m=I_{th}$ )

Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση που η δίοδος είχε πολωθεί στο κατώφλι ρεύματος, η απόκρισή της ήταν πιο γρήγορη, ενώ στην περίπτωση μη πόλωσής της υπήρξε μια καθυστέρηση στην απόκρισή της. Επίσης, η τελική τιμή της απόκρισης (μέσα στο παράθυρο ρεύματος) είναι ίδια (αφού το ρεύμα κορυφής είναι ίδιο), ενώ δεν καταλήγουν στην ίδια τιμή (αν και η μετάβαση σε αυτήν συμβαίνει και στις δυο περιπτώσεις γρήγορα) μετά το πέρας του παλμού ρεύματος.

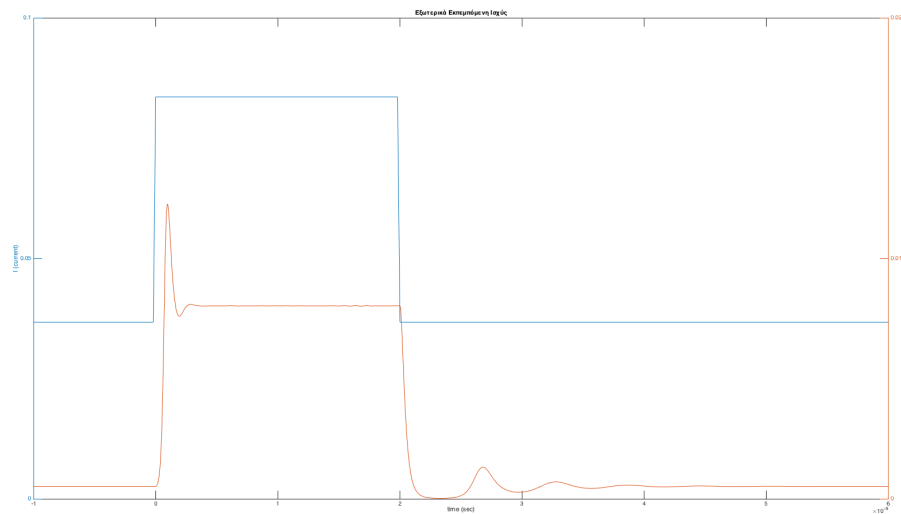
ii)

Στην συγκεκριμένη περίπτωση θεωρούμε αμελητέα την συμμετοχή της αυθόρμητης εκπομπής ( $\beta=0$ ) και  $I_b=1.1I_{th}$ ,  $I_m=1.4I_{th}$ . Αρχικά θεωρούμε αμελητέο κορεσμό ( $\epsilon_{NL}=3.33 \cdot 10^{-8}$ ). Η απόκριση και το ρεύμα φαίνονται παρακάτω.



Εικόνα 1.6: Εξωτερικά Εκπεμπόμενη Ισχύς (αμελητέος κορεσμός,  $I_b=1.1I_{th}$ ,  $I_m=1.4I_{th}$ )

Τώρα θεωρούμε ονομαστικό κορεσμό ( $\epsilon_{NL}=3.33 \cdot 10^{-7}$ ). Η απόκριση και το ρεύμα φαίνονται παρακάτω.



Εικόνα 1.6: Εξωτερικά Εκπεμπόμενη Ισχύς (ονομαστικός κορεσμός,  $I_b=1.1I_{th}$ ,  $I_m=1.4I_{th}$ )

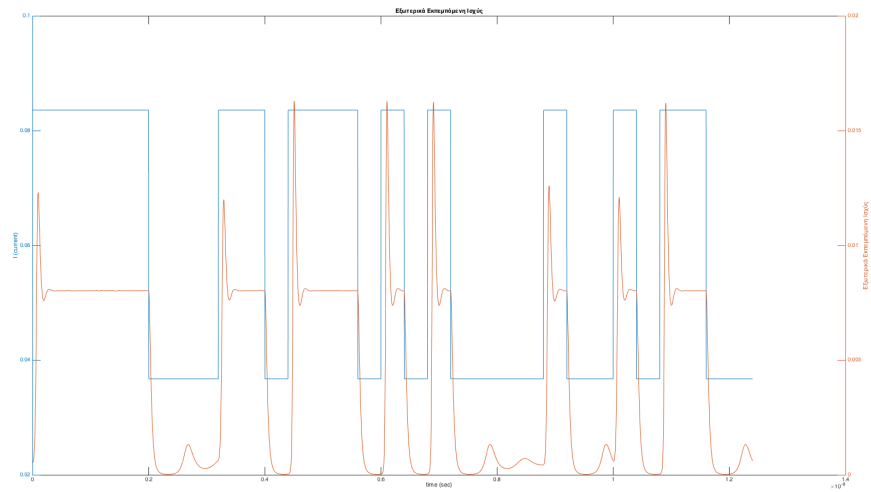
Στην περίπτωση της αμελητέας αυθόρμητης εκπομπής και ονομαστικού κορεσμού παρατηρείται έλλειψη κυμάτωσης κατά την διάρκεια του παλμού ρεύματος, γρήγορη μετάβαση σε σταθερή κατάσταση στο ίδιο παραθύρο και μια ελαφρά κυμάτωση μετά την γρήγορη μετάβαση στην τελική κατάσταση με το πέρας του παραθύρου. Αντίθετα, στην περίπτωση αμελητέας αυθόρμητης εκπομπής και αμελητέου κορεσμού παρατηρείται έντονη κυμάτωση εντός και εκτός του παραθύρου ρεύματος. Η σταθερή τιμή εντός του παραθύρου είναι ίδια και στις δύο περιπτώσεις, ενώ η χρήση dc πόλωσης οδηγεί σε γρήγορη απόκριση της διόδου και στα δυο διαγράμματα.

### Ερώτημα (γ)

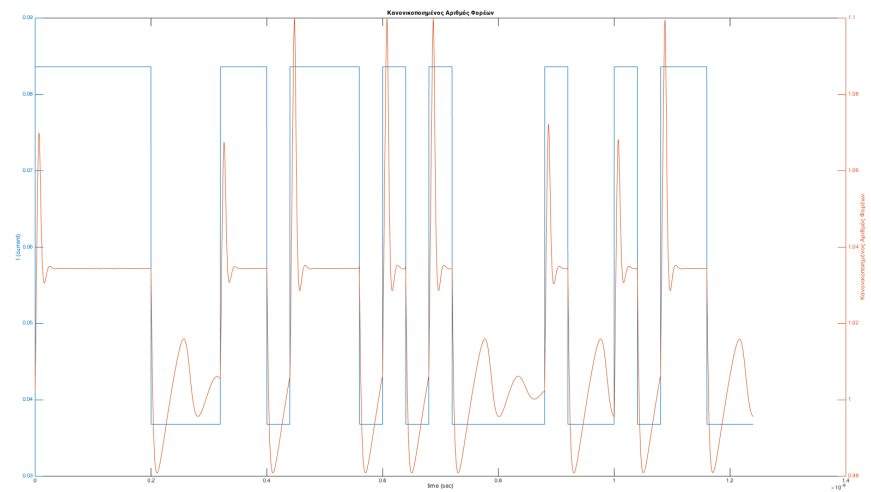
Στο ερώτημα αυτό εξετάζουμε την απόκριση της laser διόδου σε παλμοσειρά ρεύματος που έχει ως στόχο την μετάδοση μιας δεδομένης ψευδοτυχαίας ακολουθίας δεδομένων. Θεωρούμε αμελητέα αυθόρμητη εκπομπή ( $\beta=0$ ) και  $I_b=1.1I_{th}$ ,  $I_m=1.4I_{th}$ .

ι)

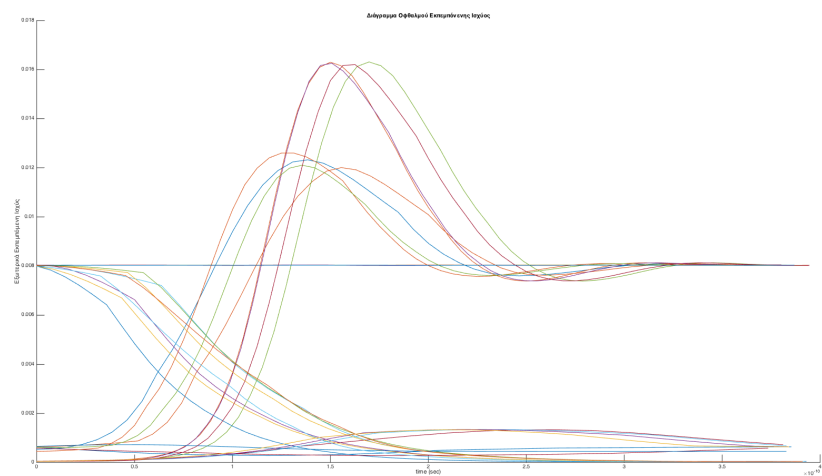
Θεωρούμε ρυθμό μετάδοσης δεδομένων  $B_T=2.5$  Gbps. Παρακάτω παρατίθενται η εκπεμπόμενη οπτική ισχύς, ο αριθμός των φορέων  $N$  κανονικοποιημένος ως προς τον αριθμό φορέων κατωφλίου  $N_{th}$  και το διάγραμμα οφθαλμού της οπτικής ισχύος. Στα πρώτα δυο διαγράμματα φαίνεται και η παλμοσειρά εισόδου (ρεύματος).



Εικόνα 1.7: Εξωτερικά Εκπεμπόμενη Ισχύς ( $B_T=2.5$  Gbps)



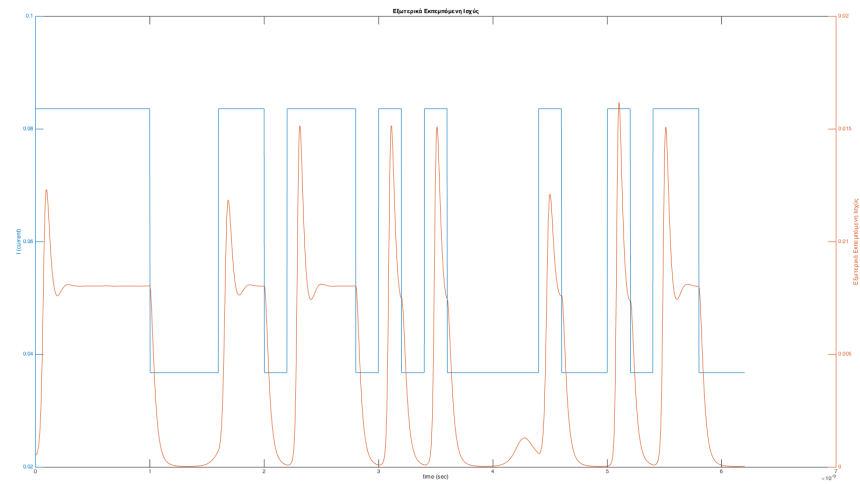
Εικόνα 1.8: Κανονικοποιημένος Αριθμός Φορέων ( $B_T=2.5$  Gbps)



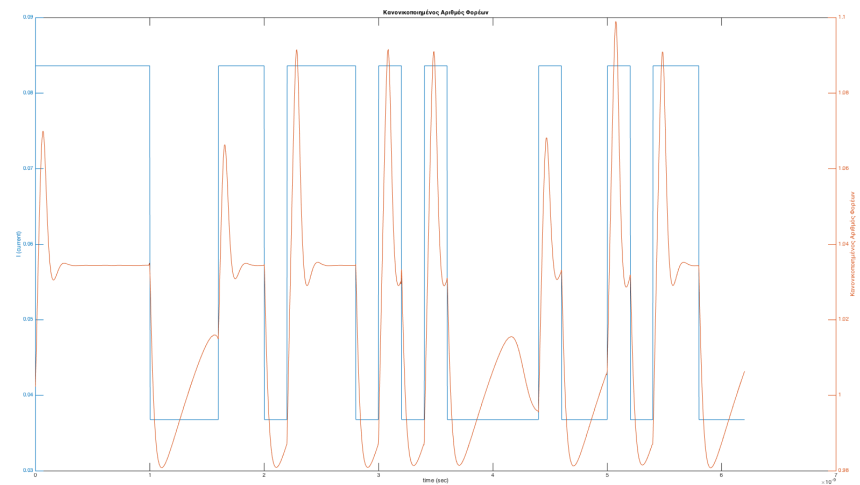
Εικόνα 1.9: Διάγραμμα Οφθαλμού ( $B_T=2.5$  Gbps)

ii)

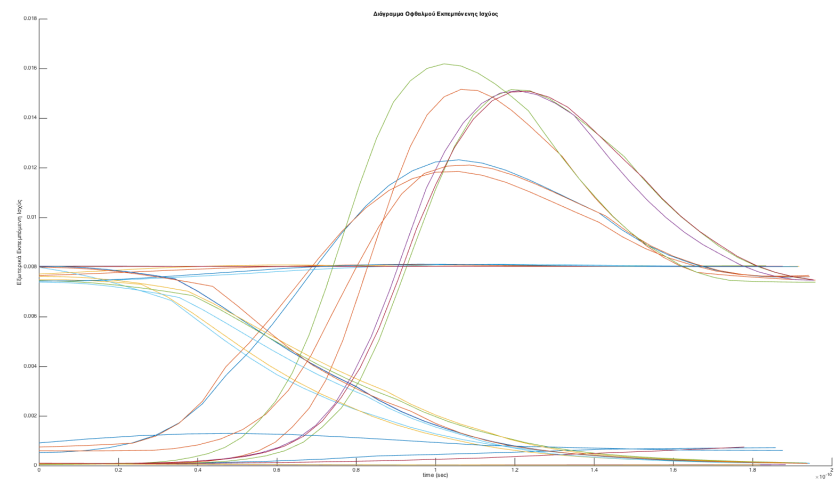
Θεωρούμε ρυθμό μετάδοσης δεδομένων  $B_T=5$  Gbps και παράγουμε τα αντίστοιχα διαγράμματα.



Εικόνα 1.10: Εξωτερικά Εκπεμπόμενη Ισχύς ( $B_T=5$  Gbps)



Εικόνα 1.11: Κανονικοποιημένος Αριθμός Φορέων ( $B_T=5$  Gbps)

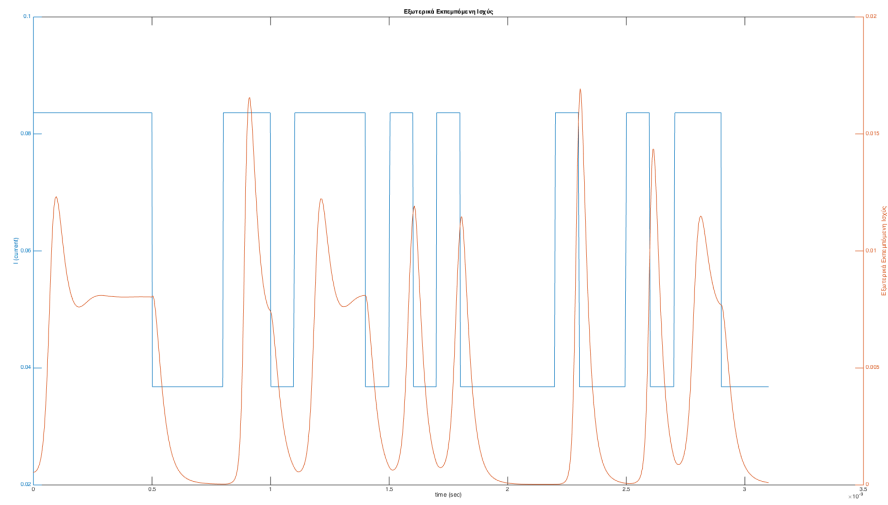


Εικόνα 1.12: Διάγραμμα Οφθαλμού ( $B_T=5$  Gbps)

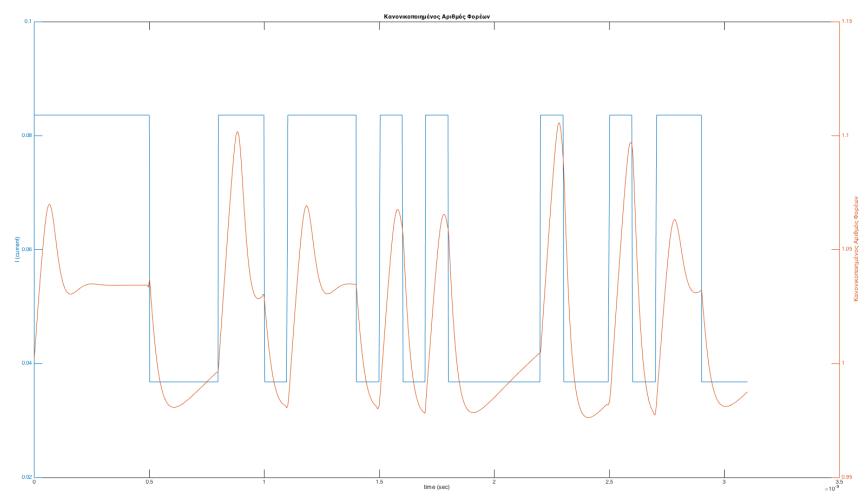


iii)

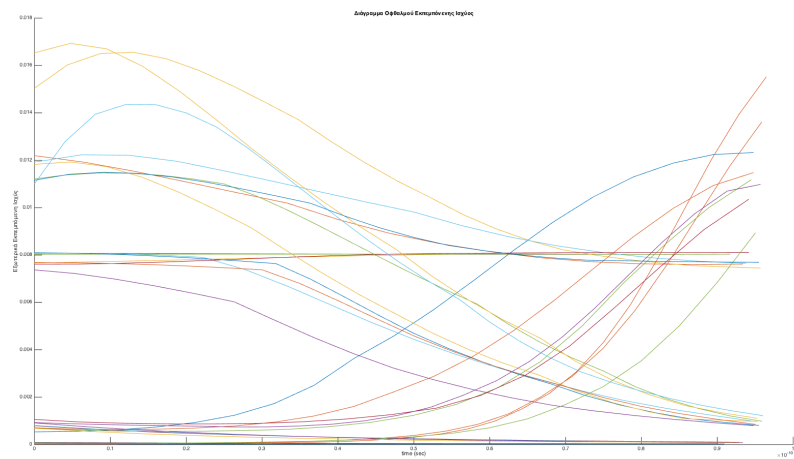
Θεωρούμε ρυθμό μετάδοσης δεδομένων  $B_T=10$  Gbps και παράγουμε τα αντίστοιχα διαγράμματα.



Εικόνα 1.13: Εξωτερικά Εκπεμπόμενη Ισχύς ( $B_T=10$  Gbps)



Εικόνα 1.14: Κανονικοποιημένος Αριθμός Φορέων ( $B_T=10$  Gbps)



Εικόνα 1.15: Διάγραμμα Οφθαλμού ( $B_T=10$  Gbps)

Παρατηρούμε εύκολα ότι τα πιο καθαρά διαγράμματα οφθαλμού εμφανίζονται για τους ρυθμούς μετάδοσης 2.5Gbps και 5Gbps. Αυτό σημαίνει ότι στις περιόδους συμβόλου η απόκριση του laser λαμβάνει ξεκάθαρα κάποια τιμή με βάση το bit της συγκεκριμένης περιόδου και είναι εύκολη η ανίχνευση του bit αυτού. Στο διάγραμμα οφθαλμού για 10Gbps φαίνεται να μην ισχύει το παραπάνω αφού μοιάζει να εμφανίζεται κάτι σαν διασυμβολική παρεμβολή. Αυτό συμβαίνει διότι με τον δεδομένο ρυθμό μετάδοσης δεν προλαβαίνει το laser στην περίοδο συμβόλου να λάβει την τιμή που αντιστοιχεί στο bit της περιόδου αυτής. Αυτό προκαλεί περιπτώσεις που το laser οδηγείται σε μηδενισμό για κάποιο bit 0 αφού όμως έχει παρέλθει η περίοδος του συμβόλου αυτού, με αποτέλεσμα να υπάρχει μηδενισμός σε περίοδο όπου το bit είναι 1 και αντίστροφα. Λόγω των παραπάνω συμπεραίνουμε ότι σε ρυθμούς στην περιοχή των 10 Gbps δεν μπορεί το laser να αποκριθεί αποτελεσματικά και να ακολουθήσει σωστά την είσοδο. Αυτό φαίνεται και από τα διαγράμματα πέραν των διαγραμμάτων οφθαλμού.