

(19)



Οργανισμός
Βιομηχανικής
Ιδιοκτησίας (ΟΒΙ)



(21) Αριθμός αίτησης:

GR 20230100588

(12)

ΔΙΠΛΩΜΑ ΕΥΡΕΣΙΤΕΧΝΙΑΣ (B)

(41) Ημ/νία Δημοσίευσης: 17.01.2025

(11) Αριθμός Χορήγησης: 1010889

(22) Ημ/νία Κατάθεσης: 17.07.2023

(51) Διεθνής Ταξινόμηση (Int. Cl.):

G02B 6/10 (2024.01)

(43) Ημ/νία Δημοσίευσης της Αίτησης:
11.02.2025 EABI 1/2025

(45) Ημ/νία Δημοσίευσης της Χορήγησης:
14.03.2025 EABI 2/2025

(71) Αρχικός (οί) Καταθέτης (ες):
ΕΘΝΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΕΡΕΥΝΩΝ; Λεωφ. Βασιλέως
Κωνσταντίνου 48, 11635 ΑΘΗΝΑ (ΑΤΤΙΚΗΣ) - GR.

(72) Εφευρέτης (ες):
ΡΙΖΙΩΤΗΣ ΧΡΗΣΤΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ; , GR.

(73) Δικαιούχος (οί):

ΕΘΝΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΕΡΕΥΝΩΝ; Λεωφ. Βασιλέως Κωνσταντίνου
48, 11635 ΑΘΗΝΑ (ΑΤΤΙΚΗΣ) - GR.

(74) Πληρεξούσιος:

ΑΓΑΠΑΚΗ ΔΗΜΗΤΡΑ ΙΩΑΝΝΗ; Λεωφ. Βασιλέως
Κωνσταντίνου 48, 11635 ΑΘΗΝΑ (ΑΤΤΙΚΗΣ).

(54) Τίτλος (Ελληνικά)

ΣΥΖΕΥΞΗ ΦΩΤΟΣ ΜΕΤΑΞΥ ΝΑΝΟΚΑΛΩΔΙΟΥ ΚΑΙ ΟΠΤΙΚΟΥ ΚΥΜΑΤΟΔΗΓΟΥ ΜΕΣΩ ΦΩΤΟΝΙΚΟΥ ΝΑΝΟΠΙΔΑΚΑ ΜΙΚΡΟΣΦΑΙΡΙΔΙΟΥ

(54) Τίτλος (Αγγλικά)

LIGHT COUPLING BETWEEN NANOWIRE AND OPTICAL WAVEGUIDE BY MICROSPHERE PHOTONIC NANOWIRE

(57) Περίληψη

Η εφεύρεση παρουσιάζει και επιδεικνύει ένα νέο σύστημα σύζευξης φωτός και μια μέθοδο σχεδιασμού για εξαιρετικά αποτελεσματική σύζευξη νανοκαλωδίων ή νανοκαλωδίων με ενσωματωμένες κβαντικές τελείες (NVQDs) με οπτικούς κυματοδηγούς, και βασίζεται σε μια οπτική διάταξη που χρησιμοποιεί ένα οπτικό διηλεκτρικό μικροστοιχείο μεσοκλίμακας, όπως μια διηλεκτρική μικροσφαίρα (ή εναλλακτικά ημισφαίρα, κύλινδρος, ημικύλινδρος διαστάσεων μεσοκλίμακας) που τοποθετείται μεταξύ του νανοκαλωδίου και του οπτικού κυματοδηγού, κατάλληλα βελτιστοποιημένη ως προς: 1) Μέγεθος (διάμετρος) της μικροσφαίρας, 2) Δείκτης διάθλασης της μικροσφαίρας, 3) Απόσταση μεταξύ του νανοκαλωδίου και της μικροσφαίρας, 4) Απόσταση μεταξύ μικροσφαίρας και κυματοδηγού. Με τον κατάλληλο σχεδιασμό της οπτικής διάταξης, ο φωτονικός νανοπίδακας που εκπέμπεται από τη μικροσφαίρα η οποία φωτίζεται από το νανοκαλώδιο διεγείρει αποτελεσματικά τους υποστηριζόμενους ιδιορυθμούς διάδοσης του κυματοδηγού εισόδου, μεταφέροντας με βέλτιστο τρόπο φως με υψηλή απόδοση σύζευξης σε υποστηριζόμενους ρυθμούς διάδοσης του κυματοδηγού, χωρίς απώλειες. Η μέθοδος είναι ανθεκτική και ανεκτική όσον αφορά τις μετατοπίσεις, τις ατελείς ευθυγραμμίσεις και τις ατέλειες, δεδομένου επίσης ότι υπάρχουν σύγχρονα εργαλεία, όπως οι νανο/μικροχειριστές για τον ακριβή χειρισμό αυτών των στοιχείων (νανοκαλώδια, μικροσφαίρες). Η εφαρμογή της μεθόδου έχει επιδειχθεί με επιτυχία στην πιο απαιτητική περίπτωση των κυματοδηγών άμεσης εγγραφής με Laser με χαμηλή αντίθεση δείκτη διάθλασης σε πλατφόρμες πυριτίας και πυριτίας-επί-πυριτίου. Η εφεύρεση επιλύει ένα πολύ δύσκολο πρόβλημα και η λύση αναμένεται να έχει μεγάλο αντίκτυπο στην κβαντική τεχνολογία λόγω του ενδιαφέροντος για την ανάπτυξη οπτικών κβαντικών υπολογιστών που βασίζονται σε εξαιρετικά προσαρμοσμένα και κλιμακούμενα κβαντικά φωτονικά ολοκληρωμένα κυκλώματα.

GR 20230100588 9

ΣΥΖΕΥΞΗ ΦΩΤΟΣ ΜΕΤΑΞΥ ΝΑΝΟΚΑΛΩΔΙΟΥ ΚΑΙ ΟΠΤΙΚΟΥ ΚΥΜΑΤΟΔΗΓΟΥ ΜΕΣΩ ΦΩΤΟΝΙΚΟΥ ΝΑΝΟΠΙΔΑΚΑ ΜΙΚΡΟΣΦΑΙΡΙΔΙΟΥ

5 ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εφεύρεση παρουσιάζει και επιδεικνύει ένα νέο σύστημα σύζευξης φωτός και μια μέθοδο σχεδιασμού για εξαιρετικά αποτελεσματική σύζευξη νανοκαλωδίων ή νανοκαλωδίων με ενσωματωμένες κβαντικές τελείες (NWQDs) με οπτικούς κυματοδηγούς, και βασίζεται σε μια οπτική διάταξη που χρησιμοποιεί ένα οπτικό
10 διηλεκτρικό μικροστοιχείο μεσοκλίμακας, όπως μια διηλεκτρική μικροσφαίρα (ή εναλλακτικά ημισφαίρα, κύλινδρος, ημικύλινδρος διαστάσεων μεσοκλίμακας) που τοποθετείται μεταξύ του νανοκαλωδίου και του οπτικού κυματοδηγού, κατάλληλα βελτιστοποιημένη ως προς: 1) Μέγεθος (διάμετρος) της μικροσφαίρας, 2) Δείκτης διάθλασης της μικροσφαίρας, 3) Απόσταση μεταξύ του νανοκαλωδίου και της
15 μικροσφαίρας, 4) Απόσταση μεταξύ μικροσφαίρας και κυματοδηγού. Με τον κατάλληλο σχεδιασμό της οπτικής διάταξης, ο φωτονικός νανοπίδακας που εκπέμπεται από τη μικροσφαίρα η οποία φωτίζεται από το νανοκαλώδιο διεγείρει αποτελεσματικά τους υποστηριζόμενους ιδιορhythμούς διάδοσης του κυματοδηγού εισόδου, μεταφέροντας με βέλτιστο τρόπο φως με υψηλή απόδοση σύζευξης σε
20 υποστηριζόμενους ρhythμούς διάδοσης του κυματοδηγού, χωρίς απώλειες. Η μέθοδος είναι ανθεκτική και ανεκτική όσον αφορά τις μετατοπίσεις, τις ατελείς ευθυγραμμίσεις και τις ατέλειες, δεδομένου επίσης ότι υπάρχουν σύγχρονα εργαλεία, όπως οι νανο/μικροχειριστές για τον ακριβή χειρισμό αυτών των στοιχείων (νανοκαλώδια, μικροσφαίρες). Η εφαρμογή της μεθόδου έχει επιδειχθεί με επιτυχία
25 στην πιο απαιτητική περίπτωση των κυματοδηγών άμεσης εγγραφής με Laser με χαμηλή αντίθεση δείκτη διάθλασης σε πλατφόρμες πυριτίας και πυριτίας-επί-πυριτίου. Η εφεύρεση επιλύει ένα πολύ δύσκολο πρόβλημα και η λύση αναμένεται να έχει μεγάλο αντίκτυπο στην κβαντική τεχνολογία λόγω του ενδιαφέροντος για την ανάπτυξη οπτικών κβαντικών υπολογιστών που βασίζονται σε εξαιρετικά
30 προσαρμοσμένα και κλιμακούμενα κβαντικά φωτονικά ολοκληρωμένα κυκλώματα.

ΣΥΖΕΥΞΗ ΦΩΤΟΣ ΜΕΤΑΞΥ ΝΑΝΟΚΑΛΩΔΙΟΥ ΚΑΙ ΟΠΤΙΚΟΥ ΚΥΜΑΤΟΔΗΓΟΥ ΜΕΣΩ ΦΩΤΟΝΙΚΟΥ ΝΑΝΟΠΙΛΑΚΑ ΜΙΚΡΟΣΦΑΙΡΙΔΙΟΥ

5

ΤΕΧΝΙΚΟ ΠΕΔΙΟ ΤΗΣ ΕΦΕΥΡΕΣΗΣ

Η εφεύρεση σχετίζεται με την ενσωμάτωση πηγών μεμονωμένων (ή μονήρων) φωτονίων σε οπτικούς κυματοδηγούς για την ανάπτυξη υβριδικών κβαντικών οπτικών κυκλωμάτων και διατάξεων για τον κβαντικό χειρισμό και την επεξεργασία
10 μεμονωμένων φωτονίων προς την κατεύθυνση εφαρμογών κβαντικών υπολογιστών, επικοινωνιών και αισθητήρων. Μια σημαντική κατηγορία πηγών μεμονωμένων φωτονίων βασίζεται σε κβαντικές τελείες που είναι ενσωματωμένες σε οπτικά νανοκαλώδια ημιαγωγών και η παρούσα εφεύρεση περιγράφει μια μέθοδο για την αποτελεσματική σύζευξη φωτός από οπτικά νανοκαλώδια σε οπτικούς
15 κυματοδηγούς, η οποία αποτελεί κρίσιμο ζήτημα για την αποτελεσματική ενσωμάτωση κβαντικών πηγών και την ανάπτυξη κλιμακούμενων κβαντικών κυκλωμάτων με πολλαπλές πηγές μεμονωμένων φωτονίων και πολλαπλά κβαντικά δυφία (quantum bits - qubits) για κβαντικούς υπολογιστές, αισθητήρες και κβαντικά συστήματα επικοινωνίας.

20

ΤΕΧΝΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΤΗΣ ΕΦΕΥΡΕΣΗΣ

Τα ολοκληρωμένα οπτικά κυκλώματα είναι μια σημαντική φωτονική πλατφόρμα που επιτρέπει την κατασκευή οπτικών εξαρτημάτων και διατάξεων βασισμένων σε οπτικούς κυματοδηγούς ολοκληρωμένων σε ένα οπτικό κύκλωμα (chip-τσιπ) και
25 προσφέρουν μικροποιημένες διαστάσεις, επεκτασιμότητα, σταθερότητα σε οπτικές απώλειες και πληροφορία φάσης, σε αντίθεση με τα τυπικά ογκωδέστερα οπτικά συστήματα ελεύθερου χώρου. Η κβαντική φωτονική είναι η πλέον υποσχόμενη τεχνολογία στην ανάπτυξη συστημάτων κβαντικής πληροφορίας, καθώς και για κβαντικούς υπολογιστές, την κβαντική ανίχνευση και τα κβαντικά συστήματα
30 επικοινωνίας, η οποία υποστηρίζεται από την ανάπτυξη πλατφορμών κβαντικών φωτονικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (quantum photonic integrated circuit - QPIC) για την υλοποίηση των κβαντικών υπολογιστών γραμμικής οπτικής (linear

optics quantum computers LOQC). Τα φωτονικά ολοκληρωμένα κυκλώματα PIC (Photonic integrated circuits PIC) ενισχύουν τη λειτουργικότητά τους με τις προηγμένες οπτικές τεχνικές για τον χειρισμό των κβαντικών καταστάσεων του φωτός στο τσιπ, ωστόσο, η πρόκληση για την ανάπτυξη ενός πλήρους και αποτελεσματικού φωτονικού ολοκληρωμένου κυκλώματος παραμένει ανοιχτή. Ως εκ τούτου, οι περισσότερες προσεγγίσεις βασίζονται στην εφαρμογή διαφορετικών και εξειδικευμένων υλικών και εξαρτημάτων που σχηματίζουν μια μάλλον υβριδική πλατφόρμα, συνδυάζοντας διάφορα εξαρτήματα από διαφορετικές τεχνολογικές πλατφόρμες.

10

Ο σημαντικότερος σημερινός περιορισμός στην εφαρμογή της κβαντικής τεχνολογίας και των κβαντικών υπολογιστών είναι η έλλειψη κλιμακωσιμότητας ή επεκτασιμότητας. Ως εκ τούτου, τα QPIC απαιτούν είσοδο ή πολλαπλές εισόδους πολλαπλών μεμονωμένων φωτονίων, τα οποία παράγονται επί του παρόντος κυρίως με την εξαιρετικά αναποτελεσματική διαδικασία (και πιθανολογική στη φύση της) της παραμετρικής μετατροπής (προς τα κάτω) σε μη γραμμικούς οπτικούς κυματοδηγούς. Η ενσωμάτωση πηγών μεμονωμένων φωτονίων σε chip αποτελεί κρίσιμο βήμα για κλιμακούμενα - επεκτάσιμα κβαντικά κυκλώματα και υπολογιστές. Οι εξελίξεις στην έρευνα για πηγές μεμονωμένων φωτονίων οδήγησαν στην ενσωμάτωση κβαντικών τελειών - KT (ή κουκκίδων) ημιαγωγών (Quantum Dot - QD) στο τσιπ PIC, που λειτουργούν ως πηγές παραγωγής μεμονωμένων φωτονίων και διεμπλεγμένων (entangled) φωτονίων, στάσιμων qubits και κβαντικών πυλών που λειτουργούν με αιτιοκρατικό /ντετερμινιστικό τρόπο. Οι εν λόγω πηγές μεμονωμένων φωτονίων από KT (QD) είναι κατάλληλες για την ελεγχόμενη παραγωγή μεμονωμένων φωτονίων, καθώς διαθέτουν ένα πρόσθετο πλεονέκτημα για ηλεκτρική διέγερση στο τσιπ και εκπομπή διεμπλεγμένων φωτονίων με ρυθμιζόμενο μήκος κύματος και, επομένως, είναι ελκυστικές για κβαντικές οπτικές εφαρμογές στο τσιπ. Ωστόσο, λόγω του νανομετρικού τους μεγέθους υπάρχουν προφανείς προκλήσεις για την υλοποίηση της ντετερμινιστικής ενσωμάτωσης των QDs σε κβαντικά φωτονικά κυκλώματα.

30

Με την ενσωμάτωση της κβαντικής τελείας (QD) σε ένα φωτονικό νανοκαλώδιο - NK (Nanowire- NW), η εκπομπή της QD επιτυγχάνει σύζευξη με το θεμελιώδη ιδιορρυθμό διάδοσης του κυματοδηγού του νανοκαλωδίου οδηγώντας σε εκπομπή με

γκαουσιανό (Gaussian) προφίλ και καθιστώντας έτσι το νανοκαλώδιο, με ενσωματωμένη κβαντική τελεία (Nanowire Quantum Dot - NWQD) κατάλληλο για συγκεκριμένους τύπους PIC, καθώς μπορεί να συνδεθεί ενεργά εσωτερικά στο κύκλωμα ή με εξωτερικούς κυματοδηγούς. Τα νανοκαλώδια είναι σχεδόν

5 μονοδιάστατες δομές που αναπτύσσονται με μια τεχνική "από κάτω προς τα πάνω" που επιτρέπει την ελεγχόμενη ανάπτυξη μιας μεμονωμένης ετεροδομημένης κβαντικής τελείας στον άξονα ανάπτυξης των νανοκαλωδίων. Τα νανοκαλώδια - NWQD μπορούν να ενσωματωθούν αιτιοκρατικά σε φωτονικά κυκλώματα ως ολοκληρωμένοι υβριδικοί κβαντικοί εκπομποί, καθώς το μήκος τους είναι της τάξης

10 των λίγων έως αρκετών μικρομέτρων και έτσι είναι δυνατό ο χειρισμός τους με τυπικές διαθέσιμες τεχνικές διατάξεων μικροχειρισμού. Ωστόσο, η άμεση ενσωμάτωση νανοκαλωδίων NWQD έχει επιδειχθεί μέχρι σήμερα μόνο σε ολοκληρωμένες φωτονικές πλατφόρμες πυριτίου και νιτρίδιου του πυριτίου λόγω της συμβατότητας των αντίστοιχων διαστάσεων και δεικτών διάθλασης των

15 κυματοδηγών με τους κυματοδηγούς NWQD και, κατά συνέπεια, της ομοιότητας των διαστάσεων των προφίλ των κυκατοδηγούμενων ιδιορυθμών διαδοσής τους που έχουν ως αποτέλεσμα την αποτελεσματική επικάλυψη των αντίστοιχων πεδίων και την αποδοτική σύζευξη. Αυτή η συμβατότητα επιτρέπει την αποτελεσματική σύζευξη σε βαθμό >20%, ο οποίος είναι επαρκής για πρακτικές εφαρμογές. Το Σχήμα **1α** παρέχει

20 ένα σχηματικό διάγραμμα που δείχνει τη δομή ενός νανοκαλώδιο **1.1** με ενσωματωμένη κβαντική τελεία **1.2** τυπικών διαστάσεων. Στο Σχήμα **1β** παρουσιάζεται σχηματικά η διάδοση του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος του άξονα του νανοκαλωδίου μετά τη διέγερση της QD. Το Σχήμα **1γ** είναι ένα σχηματικό διάγραμμα που δείχνει τη διάταξη ενός νανοκαλωδίου (ή NWQD) **1.3**, στη θέση

25 εκπομπής φωτός και διέγερσης, σε σχέση με έναν κυλινδρικό κυματοδηγό **1.4** ενσωματωμένο σε ένα ομογενές μέσο που αντιπροσωπεύει τη γενική περίπτωση διάταξης οπτικής σύζευξης που εφαρμόζεται σε πλατφόρμες οπτικών ινών ή ολοκληρωμένων οπτικών κυκλωμάτων.

30 Ωστόσο, τα χαρακτηριστικά των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων ημιαγωγών είναι γενικά ασύμβατα με τις οπτικές ίνες με βάση το διοξείδιο του πυριτίου, προκαλώντας πολύ υψηλές απώλειες σύζευξης, οι οποίες περιορίζουν σημαντικά τις κβαντικές εφαρμογές. Επίσης, η διαδικασία κατασκευής με λιθογραφία με δέσμη ηλεκτρονίων (Electron Beam Lithography - EBL), εγχάραξης με εστιασμένη δέσμη ιόντων

(Focused Ion Beam -FIB), και εγχάραξη με αντιδρώντα/αντιδραστικά ιόντα (Reactive Ion Etching- RIE) θέτει αυστηρούς περιορισμούς στην ευελιξία κατασκευής, την ταχεία προσαρμογή της κατασκευής, και στην πολυπλοκότητα της πυκνότητας των στοιχείων στο τσιπ σε αντίθεση με άλλες πλατφόρμες όπως της πυριτίας (διοξείδιο του πυριτίου) επί πυριτίου (Silica on Silicon). Επομένως, παρά την πρόσφατη μερική μετάβαση υλοποιήσεων κβαντικών συστημάτων από την επιτραπέζια μορφή με συμπαγή οπτικά εξαρτήματα στην υλοποίηση με ολοκληρωμένα κυκλώματα, εξακολουθούν να υπάρχουν αρκετοί περιορισμοί στις τρέχουσες προσεγγίσεις. Σε πλατφόρμες πυριτίου έχουν επιδειχτεί κβαντικά κυκλώματα που λειτουργούν μόνο με μεμονωμένα φωτόνια που παράγονται από παραμετρική μετατροπή προς τα κάτω εκτός του τσιπ σε μη γραμμικούς οπτικούς κυματοδηγούς, περιορίζοντας έτσι την ευκρίνεια και την απόδοση των φωτονίων. Αυτό περιορίζει επίσης την επεκτασιμότητα, καθώς δεν παρέχει τρόπους για πολλαπλές ενσωματωμένες πηγές μεμονωμένων φωτονίων στο τσιπ.

15

Η ενσωμάτωση νανοκαλωδίων γενικά ή NWQD σε οπτικούς κυματοδηγούς από πυριτία ή πυριτία-επί-πυριτίου δεν είναι δυνατή μέχρι σήμερα λόγω σημαντικών προβλημάτων ασυμβατότητας μεταξύ των υλικών, των οπτικών και των ιδιοτήτων κυματοδήγησης των νανοκαλωδίων ημιαγωγών και των κυματοδηγών σε κυκλώματα με βάση την πυριτία. Επιπλέον, μια σημαντική μέθοδος κατασκευής οπτικών κυκλωμάτων με βάση την πυριτία είναι η άμεση εγγραφή με Laser (Direct Laser Writing - DLW), με Excimer Laser, femtosecond Laser, ή υπεριώδους (Ultraviolet) Laser, όπου η επαγόμενη από το Laser τροποποίηση του δείκτη διάθλασης ορίζει και εγγράφει τους οπτικούς κυματοδηγούς καναλιών, επιτρέποντας έτσι την ταχεία προσαρμογή και κατασκευή πολύπλοκων οπτικών κυκλωμάτων και τσιπ υψηλής λειτουργικότητας. Ωστόσο, αυτή η μέθοδος DLW δημιουργεί οπτικούς κυματοδηγούς χαμηλής αντίθεσης (Contrast) του δείκτη διάθλασης (τυπική αύξηση του δείκτη διάθλασης $<5 \times 10^{-3}$), με χαμηλό ή μεσαίο οπτικό περιορισμό (Confinement) και τυπική διάμετρο του ηλεκτρικού πεδίου του κυματοδηγούμενου ρυθμού διάδοσης μεγαλύτερη από 5 μm θέτοντας πρόσθετα ζητήματα ασυμβατότητας και περιορισμού για τη σύζευξη NWQD σε κυματοδηγούς εγγεγραμμένους με Laser. Παρόμοια χαρακτηριστικά κυματοδήγησης είναι επίσης εμφανή σε θαμμένους κυματοδηγούς (Buried waveguides) κατασκευασμένους μέσω διαδικασίας διάχυσης (In-diffusion) που κατασκευάζονται με άλλες χημικές και φυσικές τεχνικές διαφορετικές από τη

30

εγγραφή με Laser. Σε τέτοιους οπτικούς κυματοδηγούς χαμηλής αντίθεσης δείκτη διάθλασης και χαμηλού οπτικού περιορισμού (θαμμένοι κυματοδηγοί μέσω διάχυσης ή κυματοδηγοί εγγεγραμμένοι με Laser) τα χαρακτηριστικά των τρόπων κυματοδηγησης είναι πολύ διαφορετικά όσον αφορά το αριθμητικό άνοιγμα, το μέγεθος του πεδίου του ιδιορυθμού διάδοσης του κυματοδηγού, τον δείκτη διάθλασης και κατά συνέπεια είναι εξαιρετικά ασύμβατα με NWQD για αποτελεσματική σύζευξη.

Το σημερινό άλτο μέχρι σήμερα πρόβλημα, λόγω της ασυμβατότητας των NWQD με τέτοιους οπτικούς κυματοδηγούς καναλιών εγγεγραμμένων με Laser σε πυριτία, με χαμηλή αντίθεση δείκτη διάθλασης ή χαμηλό οπτικό περιορισμό, είναι η εξαιρετικά χαμηλής απόδοσης σύζευξη φωτός, από νανοκαλώδια γενικά ή NWQD, σε οπτικούς κυματοδηγούς καναλιών σε ποσοστό κάτω του 4%, καθιστώντας έτσι ανέφικτη την ενσωμάτωση πηγών μεμονωμένων φωτονίων σε τσιπ.

Ωστόσο, η διαθεσιμότητα τεχνικών μέσων για την ανάπτυξη εξαιρετικά προσαρμοσμένων και βέλτιστα σχεδιασμένων οπτικών κυκλωμάτων που κατασκευάζονται με τεχνικές ταχείας προσαρμογής, όπως η άμεση εγγραφή με Laser, θέτει υψηλή ζήτηση για τέτοια κυκλώματα στην κβαντική τεχνολογία και τους κβαντικούς υπολογιστές. Η χαμηλή αντίθεση του δείκτη διάθλασης στους κυματοδηγούς που εγγράφονται με Laser σε υλικά με βάση το διοξείδιο του πυριτίου δημιουργεί μια πρόκληση για την ενσωμάτωση NWQD σε τέτοιους κυματοδηγούς και η παρούσα εφεύρεση παρέχει μια λύση για την αποτελεσματική ενσωμάτωση και ανάπτυξη κβαντικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων με ενσωματωμένες πηγές μεμονωμένων φωτονίων.

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΕΦΕΥΡΕΣΗΣ

Η παρούσα εφεύρεση παρέχει μια νέα μέθοδο και περιγράφει ένα νέο σύστημα και μια νέα διάταξη για τη σύζευξη φωτός μεταξύ ενός οπτικού νανοκαλωδίου και ενός οπτικού κυματοδηγού με τη χρήση ενός οπτικού διηλεκτρικού μικροστοιχείου, το οποίο είναι κατά προτίμηση μία μικροσφαίρα ή μικροσφαιρίδιο, (ή άλλο οπτικό μικροστοιχείο που επιλέγεται από κύλινδρο, ή ημισφαίριο, ή ημικύλινδρο), το οποίο

- τοποθετείται μεταξύ του νανοκαλωδίου και του οπτικού κυματοδηγού, και κατά προτίμηση είναι ευθυγραμμισμένο με αυτά σε μια αξονική κατεύθυνση που ορίζεται από τον κεντρικό άξονα του οπτικού κυματοδηγού και τον κεντρικό άξονα του νανοκαλωδίου. Για ένα συγκεκριμένο οπτικό νανοκαλώδιο και έναν συγκεκριμένο
- 5 οπτικό κυματοδηγό καναλιού, το μικροστοιχείο μπορεί να σχεδιαστεί κατάλληλα, αφού παρασχεθούν υπολογισμοί σύζευξης φωτός μέσω αριθμητικών προσομοιώσεων του φυσικού μοντέλου του συστήματος σύζευξης φωτός, και να επιλεγεί από άποψη χαρακτηριστικών, όπως: i) δείκτης διάθλασης μικροστοιχείου, ii) διαστάσεις μικροστοιχείου, και να τοποθετηθεί κατάλληλα σε σχέση με τις ακόλουθες
- 10 παραμέτρους: iii) γεωμετρικού απόστασης διαχωρισμού μεταξύ του νανοκαλωδίου και της μικροσφαίρας, iv) γεωμετρικής απόστασης διαχωρισμού μεταξύ του μικροστοιχείου και του κυματοδηγού, ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη σύζευξη φωτός από το νανοκαλώδιο στον οπτικό κυματοδηγό.
- 15 Ο φωτισμός της μικροσφαίρας, ή ενός κατάλληλου οπτικού μικροστοιχείου, από το φως που εκπέμπεται (εκτοξεύεται) από το νανοκαλώδιο δημιουργεί μια μετασχηματισμένη δέσμη φωτός (στη σκιάδη πλευρά της μικροσφαίρας) που έχει κατάλληλα χωρικά χαρακτηριστικά και χαρακτηριστικά φωτεινής έντασης που επιτρέπουν τη διέγερση του οπτικού κυματοδηγού του καναλιού και την
- 20 αποτελεσματική σύζευξη φωτός ("σύζευξη φωτός" θα αναφέρεται για λόγους συντομίας και ως "σύζευξη" στο κείμενο που ακολουθεί) στον παρακείμενο κυματοδηγό που διαδίδεται ως θεμελιώδης ιδιορυθμός (ιδιοτρόπος) διάδοσης στον κυματοδηγό με χαμηλές απώλειες.
- 25 Η υπάρχουσα βιβλιογραφία υπαγορεύει ότι όταν το μέγεθος της σφαίρας είναι της τάξης του μήκους κύματος του φωτός, ούτε ο φορμαλισμός σκέδασης Rayleigh ούτε η προσέγγιση της γεωμετρικής οπτικής μπορούν να περιγράψουν με ακρίβεια την αλληλεπίδρασή τους με το φως. Ωστόσο, η θεωρία Mie παρέχει την πλήρη περιγραφή της αλληλεπίδρασης του φωτός με μήκος κύματος λ με σφαιρικά σωματίδια
- 30 (μικροσφαίρες) με αυθαίρετα μεγέθη. Επομένως, χρησιμοποιώντας τη θεωρία Mie μπορεί να αποδειχθεί ότι η ενίσχυση του πεδίου από διηλεκτρικές σφαίρες μετασχηματίζεται από μια δομή διπόλου στον περιοχή /καθεστώς σκέδασης Rayleigh ($R \ll \lambda$) σε μια δομή που μοιάζει με πίδακα σε σφαίρες μεσοκλίμακας (με ακτίνα R που εκτείνεται από 1λ - 30λ), και εμφανίζεται ως φωτονικός νανοπίδακας. Έχει

αποδειχθεί ότι υπό ορισμένους συνδυασμούς μεγέθους και δείκτη διάθλασης ενός οπτικού διηλεκτρικού μικροστοιχείου (σε σχήμα κυλίνδρου ή σφαίρας) και του μήκους κύματος του φωτός, όταν η δέσμη φωτός εστιάζεται ακριβώς πάνω ή κοντά στην επιφάνεια της "πλευράς σκιάς" του οπτικού διηλεκτρικού μικροστοιχείου, εμφανίζεται ένα φυσικό φαινόμενο που οφείλεται στις αλληλεπιδράσεις κοντινού πεδίου του ορίου του οπτικού μικροστοιχείου και της εστιασμένης δέσμης. Στην περίπτωση αυτή, δημιουργείται μια εξαιρετικά εντοπισμένη ηλεκτρομαγνητική δέσμη στην επιφάνεια της πλευράς σκιάς του οπτικού διηλεκτρικού μικροστοιχείου, η οποία ονομάζεται "φωτονικός νανοπίδακας" (Photonic nanojet). Τα χωρικά χαρακτηριστικά ενός φωτονικού νανοπίδακα μπορούν να ρυθμιστούν, καθώς εξαρτώνται από το μέγεθος της μικροσφαίρας, τους δείκτες διάθλασης της μικροσφαίρας και του περιβάλλοντος υλικού και το μήκος κύματος του φωτός. Οι φωτονικοί νανοπίδακες είναι ουσιαστικά σκεδαζόμενες δέσμες φωτός με κύριο λοβό υψηλής έντασης, ασθενή υπο-διαθλαστική ζώνη και πολύ χαμηλή γωνία απόκλισης, όπως φαίνεται σχηματικά στο Σχήμα 2, όπου μία μικροσφαίρα που φωτίζεται από ένα οπτικό επίπεδο κύμα παράγει μια χωρικά περιορισμένη οπτική δέσμη με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά όπως η διαμήκης απόσταση, το εγκάρσιο μήκος εξασθένησης και μια ακτινική κατεύθυνση της δέσμης.

Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται η σχηματική διάταξη του προτεινόμενου συστήματος σύζευξης φωτός της παρούσας εφεύρεσης, όπου φαίνεται η οπτική διάταξη μεταξύ ενός δεδομένου, συγκεκριμένου, νανοκαλωδίου (ή NWQD) 3.1 με το οποίο δημιουργείται μια φωτεινή δέσμη φωτός 3.2, μιας κατάλληλα σχεδιασμένης μικροσφαίρας 3.3 και ενός δεδομένου-καθορισμένου οπτικού κυματοδηγού καναλιού 3.5. Η απόσταση μεταξύ του ακραίου άκρου του νανοκαλωδίου (ή NWQD) και της παρακείμενης επιφάνειας της μικροσφαίρας είναι L , ενώ η απόσταση μεταξύ της επιφάνειας της μικροσφαίρας που γειτνιάζει με το άκρο του κυματοδηγού, και του κυματοδηγού είναι D . Για μια κατάλληλα σχεδιασμένη διάταξη, ο φωτονικός νανοπίδακας 3.4 που εκπέμπεται από τη μικροσφαίρα προκαλεί κατάλληλες συνθήκες εκπομπής κοντά στον οπτικό κυματοδηγό του παρακείμενου καναλιού που οδηγούν σε κατάλληλη διέγερση των υποστηριζόμενων οπτικών ρυθμών/τρόπων διάδοσης του κυματοδηγού με αποτέλεσμα την αποτελεσματική σύζευξη του εκπεμπόμενου φωτός του νανοκαλωδίου με το κυματοδηγούμενο φως του κυματοδηγού στο θεμελιώδη ή σε άλλους υψηλότερους ιδιορυθμούς διάδοσης.

Μέχρι σήμερα, στο τρέχον επίπεδο της τεχνικής, δεν είχε ποτέ συλληφθεί η ιδέα ή δεν είχε εφαρμοστεί στην πράξη η χρήση μικροσφαιριδίων (ή γενικότερα οπτικών διηλεκτρικών μικροστοιχείων) για τη δημιουργία φωτονικών νανοπιδάκων με σκοπό
5 την σύζευξη του φωτός σε κυματοδηγό, ή ακόμη πιο συγκεκριμένα για την σύζευξη του φωτός σε κυματοδηγό όταν φωτίζεται από νανοκαλώδιο ή νανοκαλώδιο με κβαντική τελεία ως πηγή μεμονωμένων φωτονίων. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι φωτονικοί νανοπίδακες μελετήθηκαν και επιδείχθηκαν έως τώρα μόνο στις ακόλουθες περιπτώσεις και εφαρμογές: Ενισχυμένη φασματοσκοπία Raman,
10 φωτολιθογραφία, ανίχνευση και χειρισμός νανοσωματιδίων, ενισχυμένη οπτική απορρόφηση σε φωτοβολταϊκά και φωτοδιόδους, επεξεργασία υλικών με Laser και ξηρός καθαρισμός με Laser, ανίχνευση φθορισμού, οπτική αποθήκευση δεδομένων υψηλής πυκνότητας και τέλος για καινοτόμο/πρωτότυπη μεταφορά φωτός σε γραμμικές συστοιχίες μικροσφαιριδίων και όχι για τη σύζευξη φωτός σε
15 κυματοδηγούς όπως περιγράφεται και επιδεικνύεται στην παρούσα εφεύρεση.

Το εφευρεθέν σύστημα και η εφευρεθείσα μέθοδος σύζευξης βασίζονται σε αυτή τη οπτική διέγερση των κυματοδηγών από τον επαγόμενο φωτονικό νανοπίδακα. Η μικροσφαίρα δεν λειτουργεί ως φακός εστίασης που συγκεντρώνει το φως σε ένα
20 μόνο σημείο, όπως συμβαίνει σε άλλες τεχνικές εστίασης όταν χρησιμοποιούνται σφαίρες εστίασης με διαστάσεις πολύ μεγαλύτερες των 30λ που προσδιορίζονται από τις αρχές της γεωμετρικής οπτικής με καλά καθορισμένο οπτικό σημείο εστίασης.

25 Ο φωτονικός νανοπίδακας δεν μπορεί να περιγραφεί από ένα μόνο εστιακό σημείο (θέση και διάσταση) καθώς πρόκειται για ηλεκτρομαγνητική δέσμη με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά χωρικής κατανομής και έντασης φωτός. Ως εκ τούτου, ο σχεδιασμός και η βελτιστοποίηση της σύζευξης μέσω ενός φωτονικού νανοπίδακα είναι επίσης εντελώς διαφορετική, όχι τετριμμένη, όχι προφανής, και εδώ στην παρούσα εφεύρεση
30 είναι η πρώτη φορά που χρησιμοποιείται ένας φωτονικός νανοπίδακας για τη σύζευξη του φωτός σε έναν οπτικό κυματοδηγό, όπως αποδεικνύεται σε συγκεκριμένες περιπτώσεις.

Λόγω της πολύπλοκης περιγραφής των χαρακτηριστικών του φωτονικού νανοπίδακα η διαδικασία διέγερσης των καθοδηγούμενων τρόπων στον δέκτη κυματοδηγό είναι επίσης πολύπλοκη και δεν μπορεί να περιγραφεί με απλούς κανόνες σχεδιασμού όπως στην περίπτωση της γεωμετρικής οπτικής με σφαιρικούς διηλεκτρικούς φακούς εστίασης. Η δημιουργία του φωτονικού νανοπίδακα και η αλληλεπίδραση στον κυματοδηγό μπορούν να περιγραφούν με ακρίβεια μέσω ηλεκτρομαγνητικών αριθμητικών προσομοιώσεων που βασίζονται σε μεθόδους πεπερασμένων διαφορών στο πεδίο του χρόνου (Finite Difference Time Domain - FDTD) ή πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Methods - FEM), όπου σε κατάλληλα διακριτοποιημένο πλέγμα ολόκληρης της φωτονικής δομής, και με κατάλληλες οριακές συνθήκες, υπολογίζεται με βάση τις ηλεκτρομαγνητικές εξισώσεις Maxwell, η διάδοση του φωτός ή η διάδοση υποστηριζόμενων ιδιορυθμών διάδοσης στη φωτονική δομή. Τέτοιες γνωστές τεχνικές FDTD και FEM χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη και την επικύρωση της εφευρεθείσας μεθόδου εδώ.

15

Ο σχεδιασμός της διάταξης των μικροσφαιρών ανάμεσα σε ένα νανοκαλώδιο (ή NWQD) και έναν συγκεκριμένο οπτικό κυματοδηγό βασίζεται κυρίως στον κατάλληλο σχεδιασμό και την επιλογή των ακόλουθων παραμέτρων: 1) Μέγεθος (διάμετρος) του οπτικού μικροστοιχείου (μικροσφαίρας), 2) Δείκτη διάθλασης του οπτικού μικροστοιχείου (μικροσφαίρας), 3) Απόσταση μεταξύ του νανοκαλωδίου και του οπτικού μικροστοιχείου (μικροσφαίρας), 4) Απόσταση μεταξύ του οπτικού μικροστοιχείου (μικροσφαίρας) και του κυματοδηγού. Η επιλογή των προαναφερόμενων παραμέτρων εξαρτάται από τον δείκτη διάθλασης, τις γεωμετρικές διαστάσεις και τα χαρακτηριστικά κυματοδήγησης του κυματοδηγού, τα χαρακτηριστικά του νανοκαλωδίου και του δείκτη διάθλασης των περιβαλλόντων μέσων.

Για τη μέτρηση του μεγέθους και του δείκτη διάθλασης των οπτικών διηλεκτρικών μικροσφαιριδίων μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες τεχνικές. Η δυναμική σκέδαση φωτός (DLS) είναι μια κοινή μέθοδος που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του μεγέθους, η οποία αναλύει τις διακυμάνσεις της έντασης του σκεδαζόμενου φωτός που προκαλούνται από την κίνηση Brown. Η αρχή Coulter, επίσης γνωστή ως μέθοδος ηλεκτρικής ζώνης ανίχνευσης, είναι μια άλλη τεχνική που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του μεγέθους. Περιλαμβάνει τη διέλευση του εναιωρήματος

30

μικροσφαιριδίων μέσω ενός μικρού ανοίγματος και τη μέτρηση της μεταβολής της ηλεκτρικής αντίστασης κατά τη διέλευση των μικροσφαιρών. Αυτό επιτρέπει τον υπολογισμό της κατανομής μεγέθους με βάση τον όγκο ή τον αριθμό των μικροσφαιριδίων. Επιπλέον, η οπτική μικροσκοπία και η ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM) είναι τεχνικές που βασίζονται στην απεικόνιση και επιτρέπουν την άμεση απεικόνιση και τη μέτρηση του μεγέθους των μικροσφαιρών μέσω ανάλυσης εικόνας και ακόλουθης στατιστικής ανάλυσης. Από την άλλη πλευρά, η μέτρηση του δείκτη διάθλασης μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη χρήση διαθλασίμετρου, το οποίο αναλύει τη συμπεριφορά του φωτός που διέρχεται μέσα από τα μικροσφαιρίδια ή αλληλεπιδρά με αυτά, ή με τεχνικές ελλειψομετρίας που μετρούν τις αλλαγές στην πόλωση του φωτός καθώς αυτό αλληλεπιδρά με τα μικροσφαιρίδια.

Επιπρόσθετες επίσης παράμετροι επηρεάζουν την απόδοση της σύζευξης φωτός στις προτεινόμενες μεθόδους και λαμβάνονται υπόψη για τον προσδιορισμό της μέγιστης σύζευξης σύμφωνα με τον ανάλογο σχεδιασμό. Οι παράμετροι αυτές καθορίζουν τις ανοχές του σχεδιασμού και είναι: 1) Βαθμός σφαιρικότητας της μικροσφαίρας, 2) Γωνία του άξονα του νανοκαλωδίου με τον κεντρικό άξονα της μικροσφαίρας που είναι ευθυγραμμισμένος με τον κεντρικό άξονα του κυματοδηγού, προκαλώντας έτσι μια ατελή ευθυγράμμιση, 3) Εγκάρσια (Z- κατεύθυνση) μετατόπιση του νανοκαλωδίου (NWQD), 4) Πλευρική (Y- κατεύθυνση) μετατόπιση του νανοκαλωδίου (NWQD).

Η προτεινόμενη μέθοδος είναι αξιόπιστη, στιβαρή και ανεκτική όσον αφορά τις προαναφερθείσες διάφορες ατέλειες, καθώς αποδεικνύεται πρακτικά εφικτός ο ακριβής προσδιορισμός και η επίτευξη των απαιτούμενων θέσεων της μικροσφαίρας, δεδομένων των σημερινών εργαλείων της τεχνολογίας, όπως οι νανο/μικροχειριστές για τον ακριβή χειρισμό τέτοιων στοιχείων, νανοκαλωδίων και μικροσφαιριδίων.

Στο Σχήμα 4 παρουσιάζεται σχηματικά η επιτυχής σύζευξη του φωτός σε κυματοδηγό με τη χρήση μιας βέλτιστα σχεδιασμένης διάταξης μεταξύ του νανοκαλωδίου (ή NWQD), της μικροσφαίρας και του κυματοδηγού (θεωρούμε μικροσφαίρα με διάμετρο $6\mu\text{m}$, δείκτη διάθλασης $n=1.9$ και απόσταση από το νανοκαλώδιο $L=0\mu\text{m}$). Στο Σχήμα 4α φαίνεται η δημιουργία του φωτονικού νανοπίδακα μετά τον φωτισμό από το NWQD στη μικροσφαίρα, η οποία απεικονίζεται ως κύκλος, και η σύζευξη

του φωτός στον κυματοδηγό για απόσταση διάδοσης 70μm. Το σχήμα **4β** δείχνει την αποτελεσματική σύζευξη και την χωρίς απώλειες διάδοση του συζευγμένου κατευθυνόμενου φωτός (Ρυθμός Transverse Electric - TE mode) για απόσταση 300μm στον κυματοδηγό. Λόγω της χρησιμοποιούμενης κλίμακας των διαστάσεων

5 δεν απεικονίζεται η μικροσφαίρα. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η χρωματική αναπαράσταση και η κλίμακα της έντασης είναι διαφορετική μεταξύ των δύο γραφικών παραστάσεων προκειμένου να αποκαλυφθούν οι λεπτομέρειες διάδοσης του ηλεκτρικού πεδίου.

10 Η εφευρεθείσα μέθοδος θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και να υλοποιηθεί σε διάφορες πλατφόρμες υλικών φωτονικής, όπως πυριτίας, πυριτίας επί πυριτίου, πυρίτιο, νιτρίδιο του πυριτίου, πυρίτιο επί μονωτή, πολυμερή, πεντοξείδιο του τανταλίου, νιοβικό λίθιο ή σε οποιουσδήποτε συνδυασμούς αυτών των υλικών, για την ενίσχυση της απόδοσης σύζευξης σε διάφορες γεωμετρίες ενσωμάτωσης NWQD.

15

Η προτεινόμενη ενσωμάτωση μικροσφαιριδίων θα μπορούσε επίσης να εφαρμοστεί σε διάφορους τύπους κυματοδηγών, διαφόρων μορφών και σχημάτων όπως κυματοδηγούς με υπερκείμενη ράβδωση, ή νεύρωση, ή λωρίδα, ή ταινία καθώς και σε θαμμένους κυματοδηγούς (Rib Waveguides, Ridge waveguides, Stripe

20 waveguides, buried waveguides). Μπορεί επίσης να εφαρμοστεί σε διάφορους τύπους κυματοδηγών που κατασκευάζονται με διαφορετικά μέσα, όπως: Μέσω άμεσης εγγραφής με Laser (Direct Laser Writing- DLW), Εγχάραξη μέσω αντιδρώντων ενεργών ιόντων (Reactive Ion Etching -RIE), Λιθογραφία με δέσμη ηλεκτρονίων (Electron Beam Lithography - EBL), λιθογραφία με εστιασμένη δέσμη ιόντων

25 (Focussed Ion Beam OFIB), με διαδικασία εσωτερικής διάχυσης (In-diffusion) κ.α.

Η εφευρεθείσα μέθοδος επιλύει ένα πολύ δύσκολο πρόβλημα και η λύση αναμένεται να έχει μεγάλο αντίκτυπο στην κβαντική τεχνολογία λόγω του ενδιαφέροντος για την ανάπτυξη οπτικών υπολογιστών που βασίζονται σε υβριδικά οπτικά κυκλώματα

30 υψηλής προσαρμοστικότητας.

Λόγω του γεγονότος ότι δεν μπορούν να παρασχεθούν γενικοί κανόνες σχεδιασμού για τη βέλτιστη επιλογή των μικροσφαιρών και τη βέλτιστη οπτική διάταξη της τριπλέτας των τριών φωτονικών στοιχείων **[Νανοκαλώδιο - Μικροσφαίρα -**

Κυματοδηγός], θα παρασχεθούν στην επόμενη ενότητα συγκεκριμένες περιπτώσεις για να καταδειχθεί η εφαρμοσιμότητα και η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης μεθόδου στην παρούσα εφεύρεση.

- 5 Η εφεύρεση επιλύει το θεμελιώδες πρόβλημα της σύζευξης του φωτός από ένα νανοκαλώδιο σε έναν οπτικό κυματοδηγό οπτικού καναλιού με ανόμοια και ασύμβατα χαρακτηριστικά κυματοδήγησης. Η ασυμβατότητα των νανοκαλωδίων σε κυματοδηγούς χαμηλής αντίθεσης δείκτη διάθλασης αποδίδεται στις διαστάσεις του νανοκαλωδίου και στο αντίστοιχο προφίλ κυματοδηγούμενου ρυθμού/τρόπου
- 10 διάδοσης στο ακραίο άκρο του νανοκαλωδίου το οποίο λειτουργεί ως πολύ στενός κυματοδηγός. Τα χαρακτηριστικά του τρόπου κυματοδήγησης εξαρτώνται από τα γεωμετρικά και υλικά χαρακτηριστικά του νανοκαλωδίου και όχι από την παρουσία ενσωματωμένου QD που προσφέρει μια πρόσθετη λειτουργικότητα σε κβαντικές εφαρμογές ως πηγή μεμονωμένων φωτονίων. Ως εκ τούτου, η παρούσα εφεύρεση
- 15 παρέχει μια λύση πρώτα, στη γενική περίπτωση μιας σύζευξης νανοκαλωδίων η οποία εφαρμόζεται στη συνέχεια σε διάφορα νανοκαλώδια με ή χωρίς κβαντικές τελείες που έχουν σημαντικό αντίκτυπο στις κβαντικές εφαρμογές.

- Συμπερασματικά**, η εφεύρεση αποκαλύπτει ένα σύστημα σύζευξης φωτός που
- 20 περιλαμβάνει ένα νανοκαλώδιο (ή ένα νανοκαλώδιο με ενσωματωμένη κβαντική τελεία), ένα οπτικό διηλεκτρικό μικροστοιχείο και έναν οπτικό κυματοδηγό καναλιού, όπου το οπτικό διηλεκτρικό μικροστοιχείο τοποθετείται, μεταξύ του νανοκαλωδίου και του οπτικού κυματοδηγού καναλιού, κατά προτίμηση ευθυγραμμισμένο στην αξονική κατεύθυνση του κεντρικού άξονα του οπτικού
- 25 κυματοδηγού καναλιού και του άξονα του νανοκαλωδίου, και το εν λόγω οπτικό διηλεκτρικό μικροστοιχείο είναι διαμορφωμένο ώστε να επιτρέπει τη σύζευξη και τη μεταφορά φωτός από το νανοκαλώδιο γενικά (ή ένα νανοκαλώδιο με ενσωματωμένη κβαντική τελεία) στον οπτικό κυματοδηγό καναλιού. Σε διαφορετικές υλοποιήσεις, οι εν λόγω οπτικοί κυματοδηγοί καναλιού μπορούν να σχετίζονται με κυματοδηγούς
- 30 που βασίζονται σε οπτικές ίνες ή σε επίπεδικά ολοκληρωμένους οπτικούς κυματοδηγούς. Σε διάφορες υλοποιήσεις, χρησιμοποιούνται διάφορα οπτικά διηλεκτρικά μικροστοιχεία, με κυκλική ή ημικυκλική διατομή, όπως μια διηλεκτρική μικροσφαίρα, ή με σχήματα όπως ένας κύλινδρος, ή μια ημισφαίρα ή ένας ημικύλινδρος με διαστάσεις μεσοκλίμακας που εκτείνονται από 1λ έως 30λ για

λειτουργία με φως σε μήκος κύματος ίσο με λ. Σε μια άλλη υλοποίηση ο δείκτης διάθλασης του οπτικού διηλεκτρικού μικροστοιχείου έχει τιμή μεταξύ 1.5 και 2.5 και μπορεί να κατασκευαστεί από άμεσα εμπορικά διαθέσιμα υλικά όπως το πολυστυρένιο ($n=1.6$), η αλουμίνα (Al_2O_3 , $n_{\text{Al}}=1.76$), το τιτανικό βάριο BaTiO_3 ($n_{\text{Ba}}=1.9, 2.2$) ή τιτανία -διοξείδιο του τιτανίου TiO_2 ($n_{\text{Ti}}=2.5$). Σε μια άλλη υλοποίηση όπου το οπτικό διηλεκτρικό μικροστοιχείο είναι μια διηλεκτρική μικροσφαίρα μπορεί να έχει διάμετρο μεταξύ 2 μm και 45 μm και κατά προτίμηση μεταξύ 3 μm και 15 μm . Το οπτικό διηλεκτρικό μικροστοιχείο συνδέει και μεταφέρει φως από ένα νανοκαλώδιο ημιαγωγού με μία ή περισσότερες κβαντικές τελείες ή χωρίς κβαντικές τελείες στον οπτικό κυματοδηγό καναλιού. Σε μια άλλη υλοποίηση ο οπτικός κυματοδηγός καναλιού κατασκευάζεται σε διαφορετικές πλατφόρμες υλικών, όπως από πυριτία, πυριτία επί πυρίτιου, πυρίτιο, πυρίτιο επί μονωτή, νιτρίδιο του πυρίτιου, νιοβικό λίθιο, πεντοξείδιο του τανταλίου, πολυμερή, ή σε οποιονδήποτε συνδυασμό αυτών σχηματίζοντας υβριδικές φωτονικές πλατφόρμες. Σε μια άλλη υλοποίηση υπάρχει μια συσκευή και μέθοδος σύζευξης φωτός όπου οι οπτικοί κυματοδηγοί καναλιού έχουν οποιοδήποτε από τα διαφορετικά σχήματα που επιλέγονται από τα ακόλουθα, όπως: κυματοδηγοί με υπερκείμενες ραβδώσεις, νευρώσεις, με λωρίδες, ταινίες καθώς και θαμμένους κυματοδηγούς. Σε μια άλλη υλοποίηση υπάρχει ένα σύστημα σύζευξης φωτός όπου οι οπτικοί κυματοδηγοί καναλιού έχουν κατασκευαστεί με οποιοδήποτε από τα μέσα κατασκευής, όπως η αντιδραστική εγχάραξη ιόντων, η εστιασμένη δέσμη ιόντων, η λιθογραφία δέσμης ηλεκτρονίων, η διάχυση, η άμεση εγγραφή με Laser ή με οποιονδήποτε συνδυασμό αυτών στο ίδιο οπτικό ολοκληρωμένο κύκλωμα ή σε υβριδικές οπτικές ολοκληρωμένες υλοποιήσεις. Σε μια άλλη υλοποίηση υπάρχει ένα σύστημα και μια μέθοδος σύζευξης φωτός όπου το νανοκαλώδιο είναι κατασκευασμένο από πυρίτιο, ημιαγωγό, διηλεκτρικό ή μεταλλικό υλικό που μπορεί να έχει επίσης διαφορετική λειτουργικότητα. Στην εν λόγω υλοποίηση, τα νανοκαλώδια ημιαγωγών μπορούν να βασίζονται σε διαφορετικά υλικά όπως GaAs, InP, GaAs, GaP, GaN, GaAs, GaN, ενώ τα νανοκαλώδια ημιαγωγών με ενσωματωμένες κβαντικές τελείες μπορούν να υλοποιηθούν από τα ακόλουθα ζεύγη συνδυασμού υλικών που αντιστοιχίζονται ως [κβαντική τελεία / νανοκαλώδιο]: InAs/GaAs, InAsP/InP, AlGaAs/GaAs, GaAsP/GaP, InGaN/GaN, InGaAs/GaAs, AlGaN/GaN. Τα εν λόγω νανοκαλώδια μπορούν να έχουν μήκος μεταξύ 1 μm και 20 μm , διάμετρο από 2 nm έως 800 nm και μήκος κύματος εκπομπής φωτός μεταξύ 800 nm και 2000 nm. Τα διηλεκτρικά

νανοκαλώδια μπορούν να κατασκευαστούν με κωνική μείωση της διαμέτρου των οπτικών ινών, ενώ τα μεταλλικά μπορούν να κατασκευαστούν από μεταλλικά σύρματα ή από σύνθετα συστήματα μετάλλου/γυαλιού που μπορούν να εφαρμοστούν σε πλασμονικές εφαρμογές, με ή χωρίς ενσωματωμένες κβαντικές τελείες. Σε μια

5 άλλη υλοποίηση υπάρχει ένα σύστημα σύζευξης φωτός, όπου ο οπτικός κυματοδηγός καναλιού κατασκευάζεται σε υλικό πυριτίας, ή σε συν-τηγμένη πυριτία (Fused Silica), ή σε ντοπαρισμένη (προσμεμιγμένη) πυριτία για τροποποίηση του δείκτη διάθλασης, όπως η πυριτία ντοπαρισμένη με γερμάνιο, σε μια πλατφόρμα φωτονικής όπως η δομή 3-στρωμάτων πυριτίας επί πυρίτιου (Silica on Silicon). Σε μια τέτοια

10 υλοποίηση ο οπτικός κυματοδηγός καναλιού μπορεί να έχει σχήμα προφίλ από οποιοδήποτε τύπο, όπως: κυκλικό, τετραγωνικό, ορθογώνιο σχήμα ανάλογα με τη διαδικασία κατασκευής, ενώ το πλάτος ή η διάμετρος του οπτικού κυματοδηγού καναλιού μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ 1μm έως 10μm, και η διαφορά του δείκτη διάθλασης σε σύγκριση με την καθαρή πυριτία μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ 10^{-4} και

15 10^{-1} . Σε μια άλλη υλοποίηση υπάρχει ένα σύστημα σύζευξης φωτός όπου η απόσταση μεταξύ του νανοκαλωδίου και του οπτικού διηλεκτρικού μικροστοιχείου ή η απόσταση μεταξύ της μικροσφαίρας και του κυματοδηγού είναι μεταξύ 0μm και 30μm. Μια άλλη πτυχή της εφεύρεσης είναι μια μέθοδος για τη σύζευξη φωτός από ένα νανοκαλώδιο σε έναν οπτικό κυματοδηγό που περιλαμβάνει τα εξής βήματα: i)

20 παροχή ενός συστήματος σύζευξης φωτός που αποτελείται από τα στοιχεία [Νανοκαλώδιο - Μικροσφαίρα - Κυματοδηγός] σύμφωνα με την προαναφερθείσα περιγραφή ii) εκτόξευση φωτός από ένα νανοκαλώδιο ή ένα νανοκαλώδιο με μία ή περισσότερες κβαντικές τελείες, iii) φωτισμός του οπτικού διηλεκτρικού μικροστοιχείου με το εν λόγω φως προκειμένου να παραχθεί φωτονικός νανοπίδακας

25 και iv) εκτόξευση του εν λόγω εκπεμπόμενου φωτονικού νανοπίδακα σε κυματοδηγό ή συγκεκριμένα σε οπτικό κυματοδηγό καναλιού προκειμένου να διεγερθούν οι αντίστοιχες υποστηριζόμενοι από τον κυματοδηγό (κυματοδηγούμενοι) ιδιορυθμοί διάδοσης και να επιτευχθεί η σύζευξη φωτός. Μια άλλη πτυχή της εφεύρεσης σχετίζεται με την προαναφερθείσα μέθοδο σύζευξης ενός νανοκαλωδίου σε έναν

30 οπτικό κυματοδηγό, όπου για ένα σύστημα σύζευξης φωτός με συγκεκριμένο νανοκαλώδιο και συγκεκριμένο κυματοδηγό, επιλέγεται η υψηλότερη τιμή σύζευξης φωτός από το νανοκαλώδιο στον οπτικό κυματοδηγό, με τη κατάλληλη διακύμανση και επιλογή των ακόλουθων παραμέτρων: 1) Μέγεθος του οπτικού μικροστοιχείου, 2) Δείκτης διάθλασης του οπτικού μικροστοιχείου, 3) Απόσταση μεταξύ του

νανοκαλωδίου και του οπτικού μικροστοιχείου, 4) Απόσταση μεταξύ του οπτικού μικροστοιχείου και του οπτικού κυματοδηγού καναλιού, επιλέγοντας κατάλληλα τις εν λόγω παραμέτρους προκειμένου να επιτευχθεί η μέγιστος βαθμός φωτεινής σύζευξης. Σε μια άλλη υλοποίηση με σύστημα σύζευξης φωτός και μέθοδο σύζευξης φωτός, το οπτικό διηλεκτρικό μικροστοιχείο είναι ένα μικροσφαιρίδιο (μικροσφαίρα) με δείκτη διάθλασης κατά προτίμηση στην περιοχή 1.5 έως 2.5, και με διάμετρο μεταξύ 2 μm και 45 μm και κατά προτίμηση μεταξύ 3 μm και 10 μm . Μια άλλη πτυχή της εφεύρεσης είναι η χρήση του συστήματος σύζευξης φωτός και των μεθόδων σύζευξης φωτός στην ανάπτυξη και υλοποίηση κβαντικών ολοκληρωμένων οπτικών κυκλωμάτων για εφαρμογές στην ανάπτυξη κλιμακούμενων κβαντικών υπολογιστών, κβαντικών αισθητήρων και συστημάτων κβαντικών επικοινωνιών.

ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ I

Αρχικά, εξετάζεται η γενική και απλουστευμένη περίπτωση ενός ομοιόμορφου ομοιογενούς κυλινδρικού οπτικού κυματοδηγού με κυκλικό προφίλ πυρήνα ενσωματωμένου σε ομοιογενές μέσο με χαμηλότερο δείκτη διάθλασης, όπως το διοξείδιο του πυριτίου. Ως πομπός μεμονωμένων φωτονίων θεωρείται ότι το NWQD αποτελείται από ένα III-V φωσφορούχο φωσφίδιο αρσενικούχου ινδίου (Indium Arsenide Phosphide InAsP) QD, ενσωματωμένο σε ένα νανοκαλώδιο NW φωσφιδίου ινδίου (InP), το οποίο αποτελεί τυπική περίπτωση NWQD. Το NW έχει μήκος 4 μm με διάμετρο 200 nm, ενώ η διάμετρος κωνική απόληξης στο άκρο του NW είναι 109 nm που αντιστοιχεί σε γωνία κωνικότητας 2° . Η θέση της QD είναι 200 nm από τη βάση του NW. Το εξεταζόμενο NWQD εκπέμπει φως στα 880 nm και ως εκ τούτου όλες οι προσομοιώσεις εξετάζονται σε αυτό το μήκος κύματος λειτουργίας. Ένα τυπικό NWQD παρουσιάζεται σχηματικά στο Σχήμα 1α, β μαζί με το προσομοιωμένο ηλεκτρικό πεδίο υπό διέγερση. Το εξεταζόμενο NWQD αποτελεί ενδεικτική περίπτωση νανοκαλωδίου με βάση ημιαγωγό με ενσωματωμένη QD επίσης με βάση ημιαγωγό, ενώ στη γενική περίπτωση θα μπορούσαν να εξεταστούν και άλλα νανοκαλώδια με βάση διαφορετικά συστήματα ημιαγωγών ή διηλεκτρικά νανοκαλώδια ή μεταλλικά πλασμονικά νανοκαλώδια για τη σύζευξη φωτός. Τα NWQD ημιαγωγών, όπως τα InAsP/InP ή InAs/GaAs, αποτελούν σήμερα την αιχμή του δόρατος των πηγών μεμονωμένων φωτονίων. Επίσης, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των NWQD InAsP/InP που εξετάζονται είναι επίσης ενδεικτικά, ενώ είναι διαθέσιμα και μεγαλύτερα NWQD με μήκος $>10 \mu\text{m}$ και με πολλαπλά QDs. Με

την εξέταση αυτών των NWQD τα αποτελέσματα ήταν παρόμοια με τα παρουσιαζόμενα στην παρούσα εφεύρεση και επομένως δεν υπήρχε ανάγκη να συμπεριληφθούν. Ο κυλινδρικός κυματοδηγός **1.4** όπως φαίνεται σχηματικά στο Σχήμα **1γ** έχει διάμετρο 3μm και έχει δείκτη διάθλασης 1.457 που αντιστοιχεί σε
5 διαφορά δείκτη διάθλασης $5 \cdot 10^{-3}$ σε σχέση με το διοξείδιο του πυριτίου με δείκτη διάθλασης 1.452 στα 880 nm. Μια διαφορά του δείκτη διάθλασης αυτής της τιμής παρέχει i) λειτουργία ενός μόνο ρυθμού διάδοσης TE/TM και ii) επαρκή περιορισμό πεδίου, ελαχιστοποιώντας έτσι τις επιδράσεις που οφείλονται στις τυχόν κατασκευαστικές ατέλειες.

10

Αρχικά, επιδεικνύεται ως αναφορά, η λειτουργία NWQD απευθείας συνδεδεμένου σε κυματοδηγό όπως φαίνεται στο Σχήμα **1γ**, χωρίς τη χρήση μικροσφαιριδίων αντιπροσωπεύοντας έτσι την τρέχουσα τεχνολογική στάθμη. Ο υπολογισμός της σύζευξης φωτός πραγματοποιείται με προσομοιώσεις FDTD. Το μοντέλο λαμβάνει
15 υπόψη την επικάλυψη πεδίων μεταξύ της ηλεκτρικής διπολικής ροπής της QD, ενσωματωμένης στο νανοκαλώδιο, και του πεδίου του θεμελιώδους ρυθμού (τρόπου) διάδοσης TE του κυματοδηγού για τον ακριβή υπολογισμό της σύζευξης φωτός. Στο Σχήμα **5α** παρουσιάζεται η εκτιμημένη σύζευξη φωτός από NWQD σε κυλινδρικό κυματοδηγό με απλή εγγύτητα χωρίς τη χρήση μικροσφαιριδίου, για ένα εύρος
20 απόστασης L που κυμαίνεται από 0 έως 5 μm. Στο Σχήμα **5β** παρουσιάζεται η διάδοση του φωτός, μέσω του ηλεκτρικού πεδίου TE στο επίπεδο XZ, που διαδίδεται στον άξονα X κατά μήκος του άξονα του κυματοδηγού μετά τη διέγερση από το NWQD, για $L=0\mu\text{m}$. Είναι προφανές ότι το μεγαλύτερο μέρος του φωτός που εκπέμπεται από το NWQD διαχέεται έξω από τον κυματοδηγό και μόνο ένα μικρό
25 μέρος αυτού μεταφέρεται στον θεμελιώδη ρυθμό διάδοσης TE του κυματοδηγού, μειώνοντας δραματικά την τιμή της σύζευξης του φωτός στο ~4%. Το εύρημα αυτό επιβεβαιώνει την αναποτελεσματική σύζευξη φωτός μεταξύ του NWQD και του οπτικού κυματοδηγού. Το διαδιδόμενο φως που αποτυπώνεται στο σχήμα είναι μόλις ορατό λόγω της αναποτελεσματικής σύζευξης.

30

Σε συνέχεια των προαναφερθέντων αποτελεσμάτων που αντιπροσωπεύουν την τρέχουσα τεχνολογική στάθμη, παρουσιάζεται εδώ η απόδοση σύζευξης με τη χρήση της μεθόδου ενσωμάτωσης μικροσφαιριδίων της παρούσας εφεύρεσης. Στο σχήμα **3** απεικονίζεται το προτεινόμενο γενικό φωτονικό σύστημα με την προσθήκη της

μικροσφαίρας **3.3**. Σε αυτή τη γενική παραμετρική διαμόρφωση, θεωρούμε ότι η μικροσφαίρα βρίσκεται σε απόσταση D από την εμπρόσθια όψη του κυματοδηγού, ενώ το L ορίζει την απόσταση μεταξύ της κωνικής κορυφής NWQD και της εμπρόσθιας επιφάνειας της μικροσφαίρας. Στη μελέτη που ακολουθεί υποθέτουμε για λόγους απλότητας $D=0$ μm . Για τη διατύπωση του προβλήματος θεωρούμε μικροσφαιρίδια με δείκτη διάθλασης που εκτείνεται από $n=1.6$ έως $n=2.5$, προσομοιώνοντας διαφορετικά υλικά μικροσφαιριδίων, όπως το πολυστυρένιο ($n=1.6$), η αλουμίνα (Al_2O_3 , $n_{\text{Al}}=1.76$), το τιτανικό βάριο ($n_{\text{Ba}}=1.9$ ή 2.2) ή η τιτανία (διοξείδιο του Τιτανίου) ($n_{\text{Ti}}=2.5$) που αντιστοιχούν σε εμπορικά διαθέσιμα μικροσφαιρίδια.

Η εφευρεθείσα μέθοδος είναι γενική και μπορεί να εφαρμοστεί σε διάφορες φωτονικές πλατφόρμες με υλικά υψηλότερων ή χαμηλότερων δεικτών διάθλασης από την πυριτία που εξετάστηκε στις θεωρούμενες περιπτώσεις. Ως εκ τούτου, οι δείκτες διάθλασης των βέλτιστων διηλεκτρικών μικροσφαιριδίων μπορούν να προσαρμοστούν σε χαμηλότερους ή υψηλότερους δείκτες διάθλασης ανάλογα με τη συγκεκριμένη περίπτωση.

Αρχικά, τονίζεται ο ρόλος των χαρακτηριστικών των μικροσφαιρών στο σχηματισμό των φωτονικών νανοπιδάκων, όπως ο δείκτης διάθλασης, η ακτίνα και η απόσταση από το νανοκαλώδιο- NWQD. Αρχικά μελετάται με προσομοιώσεις FDTD ένα αυτόνομο μικροσφαιρίδιο που φωτίζεται από το NWQD αμελώντας την επίδραση του κυματοδηγού και παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του σχηματιζόμενου φωτονικού νανοπίδακα και η διάδοσή του σε απόσταση 70 μm . Στο Σχήμα **6α**, παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά της δέσμης του φωτονικού νανοπίδακα για διαφορετικούς δείκτες διάθλασης των μικροσφαιρών, ενώ η διάμετρος των μικροσφαιρών διατηρείται σταθερή στα 6 μm και η απόσταση NWQD-μικροσφαιρών είναι σταθερή $L=0$ μm . Στο Σχήμα **6β** παρουσιάζεται ο σχηματισμός του φωτονικού νανοπίδακα για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις μικροσφαιριδίων με διαμέτρους $4\mu\text{m}$, $6\mu\text{m}$ και $8\mu\text{m}$, με $n=1.9$ και $L=0$ μm . Στο Σχήμα **6γ** παρουσιάζεται ο σχηματισμός του νανοπίδακα για την απόσταση NWQD-μικροσφαίρας ίση με $L=0$, 1 και 3 μm με δείκτη διάθλασης μικροσφαίρας $n=1.9$ και διάμετρο 6 μm .

Παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται ο λόγος του δείκτη διάθλασης της μικροσφαίρας προς το υπόβαθρο ($n=1.452$), ο σχηματισμός του φωτονικού νανοπίδακα εντοπίζεται πιο κοντά στην επιφάνεια της πλευράς της σκιάς ή ακόμα και μέσα στη μικροσφαίρα για αρκετά υψηλό δείκτη διάθλασης (π.χ. $n=2.5$), η επιμήκυνσή του κατά μήκος του άξονα διάδοσης μειώνεται, η ένταση της κορυφής αυξάνεται και το FWHM γίνεται στενότερο. Γενικά, παρατηρείται ότι η προσθήκη της μικροσφαίρας τροποποιεί τα χωρικά χαρακτηριστικά του εκπεμπόμενου φωτός από το NWQD, οπότε μπορεί να προσαρμοστεί σε υψηλό βαθμό, ρυθμίζοντας τον δείκτη διάθλασης, τη διάμετρο και την απόσταση, ώστε να επιτευχθεί αποτελεσματικότερη διέγερση του κυματοδηγού.

10 Ο σχεδιασμός και η προσαρμογή των φωτονικών νανοπιδάκων παρέχει τον τρόπο για βέλτιστες συνθήκες προς την κατεύθυνση της αποτελεσματικής σύζευξης με τον οπτικό κυματοδηγό του καναλιού.

Προκειμένου να αξιολογηθεί η επίδραση της μικροσφαίρας (**MΣ**) μεταξύ του νανοκαλωδίου (**NK**) και του κυματοδηγού (**KM**), πραγματοποιήθηκαν εκτεταμένοι υπολογισμοί FDTD στην πλήρη φωτονική δομή, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3, με διασταυρούμενη αλληλοσυσχέτιση των παραμέτρων: α) διάμετρος της μικροσφαίρας, β) δείκτης διάθλασης της μικροσφαίρας και γ) σχετική απόσταση L μεταξύ του NWQD και της μικροσφαίρας (**NK-MΣ**). Τα αποτελέσματα οργανώνονται σε ξεχωριστά γραφήματα (στα Σχήματα 7-13) που παρουσιάζουν την απόδοση σύζευξης για κάθε ξεχωριστή περίπτωση με συγκεκριμένο δείκτη διάθλασης n , μεταξύ 1.6 και 2.5, ως συνάρτηση των διαμέτρων και για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις απόστασης L (**NK-MΣ**).

25 Στο Σχήμα 7α παρουσιάζονται οι καμπύλες σύζευξης φωτός για μια μικροσφαίρα με $n=1.6$. Στο Σχήμα 7β παρουσιάζονται αντιπροσωπευτικές προσομοιώσεις διάδοσης, σε μήκος $120\ \mu\text{m}$, για συγκεκριμένες διαμέτρους και απόσταση $L=3\ \mu\text{m}$. Στο Σχήμα 7γ παρουσιάζεται λεπτομερώς ο μηχανισμός σύζευξης για τη βέλτιστη περίπτωση με μέγιστη σύζευξη φωτός με διάμετρο $5\ \mu\text{m}$ και $L=3\ \mu\text{m}$ σε μήκος διάδοσης $70\ \mu\text{m}$.

30 Πρέπει να σημειωθεί ότι σε αυτό το Σχήμα 7γ (και σε όλα τα αντίστοιχα γραφήματα (στα Σχήματα 7γ-13γ) η χωρική κλίμακα και η γραφική χρωματική αναπαράσταση έχει προσαρμοστεί και βελτιωθεί για να καταδειχθούν οι λεπτομέρειες της δημιουργίας και διάδοσης των φωτονικών νανοπιδάκων και να γίνει ορατή η περίμετρος των μικροσφαιρών σε σχέση με τον σχηματισμό των νανοπιδάκων.

Στο Σχήμα **8α** παρουσιάζονται οι καμπύλες σύζευξης για ένα μικροσφαιρίδιο με $n=1.7$. Στο Σχήμα **8β** παρουσιάζονται αντιπροσωπευτικές προσομοιώσεις διάδοσης, σε μήκος 120 μm , για συγκεκριμένες διαμέτρους και απόσταση $L=1\mu\text{m}$. Στο Σχήμα **8γ** παρουσιάζεται λεπτομερώς ο μηχανισμός σύζευξης για τη βέλτιστη περίπτωση με μέγιστη σύζευξη με διάμετρο 5 μm και $L=1\mu\text{m}$ σε μήκος διάδοσης 70 μm .

Στο Σχήμα **9α** παρουσιάζονται οι καμπύλες σύζευξης για μια μικροσφαίρα με $n=1.76$. Στο Σχήμα **9β** παρουσιάζονται αντιπροσωπευτικές προσομοιώσεις διάδοσης, σε μήκος 120 μm , για συγκεκριμένες διαμέτρους και απόσταση $L=1\mu\text{m}$. Στο Σχήμα **9γ** παρουσιάζεται λεπτομερώς ο μηχανισμός σύζευξης για τη βέλτιστη περίπτωση με μέγιστη σύζευξη με διάμετρο 6 μm και $L=1\mu\text{m}$ σε μήκος διάδοσης 70 μm .

Στο Σχήμα **10α** παρουσιάζονται οι καμπύλες σύζευξης για μια μικροσφαίρα με $n=1.9$. Στο Σχήμα **10β** παρουσιάζονται αντιπροσωπευτικές προσομοιώσεις διάδοσης, σε μήκος 120 μm , για συγκεκριμένες διαμέτρους και απόσταση $L=1\mu\text{m}$. Στο Σχήμα **10γ** παρουσιάζεται λεπτομερώς ο μηχανισμός σύζευξης για τη βέλτιστη περίπτωση με μέγιστη σύζευξη με διάμετρο 10 μm και $L=1\mu\text{m}$ σε μήκος διάδοσης 70 μm .

Στο Σχήμα **11α** παρουσιάζονται οι καμπύλες σύζευξης για μια μικροσφαίρα με $n=2.0$. Στο Σχήμα **11β** παρουσιάζονται αντιπροσωπευτικές προσομοιώσεις διάδοσης, σε μήκος 120 μm , για συγκεκριμένες διαμέτρους και απόσταση $L=0\mu\text{m}$. Στο Σχήμα **11γ** παρουσιάζεται λεπτομερώς ο μηχανισμός σύζευξης για τη βέλτιστη περίπτωση με μέγιστη σύζευξη με διάμετρο 9 μm και $L=0\mu\text{m}$ σε μήκος διάδοσης 70 μm .

Στο Σχήμα **12α** παρουσιάζονται οι καμπύλες σύζευξης για μια μικροσφαίρα με $n=2.2$. Στο Σχήμα **12β** παρουσιάζονται αντιπροσωπευτικές προσομοιώσεις διάδοσης, σε μήκος 120 μm , για συγκεκριμένες διαμέτρους και απόσταση $L=0\mu\text{m}$. Στο Σχήμα **12γ** παρουσιάζεται λεπτομερώς ο μηχανισμός σύζευξης για τη βέλτιστη περίπτωση με μέγιστη σύζευξη με διάμετρο 3 μm και $L=0\mu\text{m}$ σε μήκος διάδοσης 70 μm .

Στο Σχήμα **13α** παρουσιάζονται οι καμπύλες σύζευξης για μια μικροσφαίρα με $n=2.5$. Στο Σχήμα **13β** παρουσιάζονται αντιπροσωπευτικές προσομοιώσεις διάδοσης, σε μήκος 120 μm , για συγκεκριμένες διαμέτρους και απόσταση $L=3\mu\text{m}$. Στο Σχήμα **13γ**

παρουσιάζεται λεπτομερώς ο μηχανισμός σύζευξης για τη βέλτιστη περίπτωση με μέγιστη σύζευξη με διάμετρο $6\ \mu\text{m}$ και $L=3\ \mu\text{m}$ σε μήκος διάδοσης $70\ \mu\text{m}$.

- Είναι προφανές ότι η ενσωμάτωση της μικροσφαίρας ενισχύει δραστικά τη σύζευξη φωτός μεταξύ νανοκαλωδίου και κυματοδηγού με την επιλογή των κατάλληλων χαρακτηριστικών της μικροσφαίρας και της σχετικής απόστασης L . Πιο συγκεκριμένα, με ακριβή έλεγχο της σχετικής απόστασης L μπορούν να επιτευχθούν τιμές κατευθυντικής σύζευξης του τρόπου διάδοσης TE που φτάνουν το 40%-45% στην περίπτωση των μικροσφαιρών με δείκτες διάθλασης $n=1.76$, $n=1.9$ και $n=2$.
- Ωστόσο, η απόδοση της σύζευξης είναι πολύ ευαίσθητη στη σχετική απόσταση μεταξύ του νανοκαλωδίου και της μικροσφαίρας. Μικρές αποκλίσεις από τον βέλτιστο σχεδιασμό είναι δυνατόν να υποβαθμίσουν σταδιακά την αποδοτικότητα σύζευξης, ωστόσο οι σύγχρονες επιδόσεις συστημάτων μικροτοποθέτησης (με γωνιακή ακρίβεια καλύτερη από 1° και ακρίβεια απόστασης καλύτερη από $30\ \text{nm}$) μπορούν να παρέχουν επαρκή ακρίβεια σε επίπεδο νανομέτρου, αποφεύγοντας αυτά τα ζητήματα και εξασφαλίζοντας τη βέλτιστη τοποθέτηση σύμφωνα με τον σχεδιασμό. Συμπερασματικά, οι τιμές της απόδοσης σύζευξης φωτός που εξάγονται με τη βοήθεια μικροσφαιριδίου είναι πάνω από μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερες από εκείνες που λαμβάνονται χωρίς το μικροσφαιρίδιο με απλή γειτνίαση και οπτική διέγερση (butt-coupling) του νανοκαλωδίου με τον κυματοδηγό.

- Επιπλέον, προκειμένου να μελετηθεί περαιτέρω η αποδοτικότητα του προτεινόμενου μηχανισμού σύζευξης φωτός, παρουσιάζονται συμπληρωματικές προσομοιώσεις FDTD προκειμένου να καταδειχθούν οι ανοχές της προτεινόμενης μεθόδου σε διάφορες παραμέτρους:

- A. Επίδραση της απόστασης μικροσφαίρας - κυματοδηγού.** Παρουσιάζεται η περίπτωση όπου η μικροσφαίρα και ο κυματοδηγός δεν βρίσκονται πλέον σε επαφή, αλλά υπάρχει ένα κενό D μεταξύ τους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3. Σε αυτή την περίπτωση η απόσταση μεταξύ του νανοκαλωδίου (NK) και της μικροσφαίρας (ΜΣ) ορίζεται στα $0\ \mu\text{m}$, ενώ η απόσταση D μεταξύ της μικροσφαίρας και του κυματοδηγού (KM) αυξάνεται από $0\ \mu\text{m}$ σε $10\ \mu\text{m}$, $20\ \mu\text{m}$ και $30\ \mu\text{m}$. Σε αυτό το παράδειγμα ο δείκτης διάθλασης της μικροσφαίρας είναι $n=1.9$ και η διάμετρός του ορίζεται σε $6\ \mu\text{m}$. Στο Σχήμα 14α φαίνεται η επίδραση της απόστασης D μεταξύ της

5 μικροσφαίρας και του κυματοδηγού (ΜΣ-ΚΜ) στην απόδοση της σύζευξης αποδεικνύοντας ότι υπάρχει επαρκής ανοχή στην απόσταση, καθώς δεν επηρεάζει δραστικά την απόδοση της σύζευξης. Στο Σχήμα 14β παρουσιάζονται σχηματικά αντιπροσωπευτικά σχήματα των διαδιδόμενων ηλεκτρικών πεδίων για διάφορες περιπτώσεις της απόστασης παραμέτρου D για απόσταση διάδοσης 120 μm.

10 **Β. Επίδραση της ατελούς ευθυγράμμισης.** Η ακριβής τοποθέτηση του νανοκαλωδίου (ή NWQD) και η ευθυγράμμιση του άξονά του με τα υπόλοιπα φωτονικά στοιχεία (μικροσφαίρα και κυματοδηγό) πραγματοποιείται συνήθως με ακριβείς τεχνικές μεταφοράς, π.χ. με τη χρήση συστημάτων νανοχειρισμού με τυπική ακρίβεια καλύτερη από 1° γωνία και ακρίβεια τοποθέτησης καλύτερη από 30 nm. Ωστόσο, εδώ αξιολογείται η επίδραση τυχόν λανθασμένων ευθυγραμμίσεων λόγω επαγόμενης κλίσης υπό γωνίας φ σε σχέση με τον κεντρικό άξονα μιας μικροσφαίρας 15.2, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 15α. Εξετάστηκε μια διάταξη με L=0 μm και με 15 μία μικροσφαίρα με διάμετρο 8 μm και n=1.9. Το Σχήμα 15β δείχνει ότι παρά την κακή ευθυγράμμιση λόγω της γωνίας περιστροφής μεταξύ του νανοκαλωδίου και της μικροσφαίρας, η σύζευξη παραμένει αρκετά υψηλή, μειωμένη μόνο κατά 4% για μέγιστη γωνία περιστροφής 2°, επιδεικνύοντας την ανθεκτικότητα του συστήματος σε πειραματικά ζητήματα ατελούς ευθυγράμμισης. Οι σύγχρονες τεχνικές 20 μικροχειρισμού μπορούν να παρέχουν πολύ ακριβή έλεγχο της τοποθέτησης εξαλείφοντας τις κλίσεις σε γωνίες κάτω από 1 μοίρα, και επομένως η προτεινόμενη τεχνική είναι σχετικά ανεκτική και σε τέτοιες κλίσεις.

25 **Γ. Επίδραση της σφαιρικότητας.** Επιπλέον, εξετάζεται η συνολική αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου συστήματος σε σχέση με την απόκλιση του σχήματος της μικροσφαίρας από ένα τέλειο σφαιρικό σχήμα. Τα χημικά παραγόμενα μικροσφαιρίδια/μικροσφαίρες, συνήθως, έχουν υψηλό λόγο σφαιρικότητας. Ωστόσο, υπάρχει ένα μικρό ποσοστό μικροσωματιδίων που δεν είναι τέλειες σφαίρες, αλλά έχουν περισσότερο ελλειψοειδές σχήμα. Ποσοτικοποιούμε αυτή τη σφαιρική 30 παραμόρφωση θεωρώντας τη γενική περίπτωση ενός ελλειψοειδούς με B και A τη μεγάλη και τη μικρή αξονική διάμετρο του. Το "ποσοστό ελλειψοειδούς" ή «απόκλιση ελλειψοειδούς» (όπως στο Σχήμα 16) οριζόμενο ως $[(B-A)/A] \times 100\%$, όπου για τη σφαιρική περίπτωση έχει την τιμή μηδέν. Προσομοιώσεις FDTD πραγματοποιήθηκαν για την περίπτωση μιας μικροσφαίρας (n=1.9, διάμετρος 6μm)

μεταξύ του νανοκαλωδίου NWQD και του κυματοδηγού, η οποία επιμηκύνεται (παραμορφώνεται) είτε στον άξονα Y (ή ισοδύναμα στην κατεύθυνση Z λόγω συμμετρίας) είτε στον άξονα X και η διάδοση του φωτός παρακολουθείται κατά μήκος του άξονα X. Οι τιμές της απόδοσης σύζευξης παρουσιάζονται στο Σχήμα 16α

5 τόσο για επιμήκυνση κατά τον άξονα Y όσο και για επιμήκυνση κατά τον άξονα X. Αποδεικνύεται ότι η επίδραση του ελλειψοειδούς μικροσφαιρικού μέσου οδηγεί σε γραμμική μείωση της απόδοσης σύζευξης καθώς αυξάνεται η παραμόρφωση της σφαίρας και η απόκλιση ελλειψοειδούς. Στο Σχήμα 16β παρουσιάζεται το

10 διαδιδόμενο ηλεκτρικό πεδίο κατά μήκος του άξονα διάδοσης X για έναν αριθμό ελλειψοειδών μικροσφαιρών, για απόσταση 120 μm, αποδεικνύοντας την ανθεκτικότητα της μεθόδου σε τυχόν μικρές αποκλίσεις σφαιρικότητας.

Δ. Επίδραση του μήκους κύματος λειτουργίας του NWQD. Στην προαναφερθείσα περιγραφή, θεωρήθηκε ένας μόνο εκπομπός φωτονίων NWQD με μήκος κύματος

15 λειτουργίας τα 880 nm, ωστόσο, στα πρακτικά κυκλώματα PIC μπορούν να ενσωματωθούν μία ή περισσότερες πηγές εκπομπής που εκπέμπουν σε περισσότερα από ένα μήκη κύματος, και ως εκ τούτου η ευρωστία της προτεινόμενης διάταξης πρέπει να εξεταστεί για διαφορετικά μήκη κύματος εκπομπής εκτός του βέλτιστου. Η

20 απαίτηση είναι μία συγκεκριμένη μικροσφαίρα να μπορεί να συζεύξει φως από διαφορετικά νανοκαλώδια NWQD που εκπέμπουν σε διαφορετικά γειτονικά μήκη κύματος, διευκολύνοντας έτσι την κατασκευή υβριδικού κυκλώματος με τη χρήση, αν είναι δυνατόν, ενός μόνο τύπου και μεγέθους μικροσφαιριδίου σε

25 διαφορετικές/πολλαπλές θύρες εισόδου. Επιπλέον, οι νέες εξελίξεις στα NWQD επέτρεψαν την ενσωμάτωση πολλαπλών QDs σε ένα μόνο νανοκαλώδιο και επομένως, ένα μόνο βελτιστοποιημένο μικροσφαιρίδιο θα πρέπει ιδανικά να συζεύγει

30 αποτελεσματικά το φως στα πολλαπλά μήκη κύματος που αντιστοιχούν σε πολλαπλές QDs σε ένα μόνο νανοκαλώδιο. Θεωρούμε το τυπικό νανοκαλώδιο (που περιγράφεται παραπάνω) το οποίο εξετάζεται τώρα με QDs που εκπέμπουν στα μήκη κύματος 880 nm, 910 nm και 940 nm. Η διπολική εκπομπή του QD στον κυματοδηγό του ίδιου νανοκαλωδίου παρουσιάζει απόδοση σύζευξης (στο νανοκαλώδιο) ~70%

για το μήκος κύματος 880 nm, που πέφτει στο ~60% για τα 910 nm και στο ~50% για τα μήκη κύματος 940 nm. Μια μικροσφαίρα με δείκτη διάθλασης $n=1.9$ και διάμετρο 6 μm, εξετάζεται και πάλι όπως παραπάνω. Στο Σχήμα 17 παρουσιάζεται η απόδοση σύζευξης του NWQD με τον οπτικό κυματοδηγό του καναλιού σε διαφορετικά μήκη

κύματος φωτός, αποδεικνύοντας ότι η μείωση της σύζευξης αποδίδεται στην αναποτελεσματική σύζευξη της QD με την οπτική δομή κυματοδότησης των νανοκαλωδίων, ενώ η μικροσφαίρα λειτουργεί εξίσου αποτελεσματικά σε διαφορετικά μήκη κύματος υποδηλώνοντας την ανθεκτικότητα χρήσης της σε
5 διάφορα μήκη κύματος λειτουργίας.

ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ II

Η δεύτερη επιδεικνυόμενη περίπτωση αναφέρεται σε μια επιπεδική ολοκληρωμένη
10 φωτονική πλατφόρμα 3-στρωμάτων πυριτίας επί πυριτίου (Silica on Silicon) με ένα ενδιάμεσο φωτοευαίσθητο στρώμα πυρήνα συνήθως από γυαλί πυριτίας με ντοπάρισμα Γερμανίου. Τυπικά, αυτή η φωτονική πλατφόρμα που απεικονίζεται στο Σχήμα **18a** αποτελείται από ένα υπόστρωμα πυριτίου **18.1** ακολουθούμενο από ένα θερμικά εναποθεθειμένο στρώμα πυριτίας **18.2**, ενδεικτικά πάχους 15 μm για οπτική
15 απομόνωση. Το μεσαίο στρώμα **18.3** είναι ένα φωτοευαίσθητο στρώμα πυριτίας ντοπαρισμένο με γερμάνιο τυπικού πάχους 3 μm και σε αυτό το στρώμα θα μπορούσαν να οριστούν οπτικοί κυματοδηγοί καναλιών, όπως ο **18.5**, με τροποποίηση του δείκτη διάθλασης μετά από φωτισμό με υπεριώδες Laser. Μια επικάλυψη **18.4** τυπικού πάχους 15 μm προστατεύει και απομονώνει οπτικά το
20 κύκλωμα. Μια τυπική διαμόρφωση που χρησιμοποιεί την εφευρεθείσα συσκευή σύζευξης φωτός με τη χρήση μικροσφαίρας παρουσιάζεται στο σχήμα **18a**. Έχουν αναπτυχθεί αρκετά κβαντικά οπτικά κυκλώματα σε αυτή την πλατφόρμα, αλλά χωρίς ενσωματωμένες πηγές μεμονωμένων φωτονίων, ενώ η παρούσα εφεύρεση καταδεικνύει τη δυνατότητα ενσωμάτωσης NWQD σε αυτή τη ρεαλιστική και
25 τεχνολογικά επιθυμητή πλατφόρμα. Το Σχήμα **18b** είναι ένα σχηματικό διάγραμμα που δείχνει σε μεγέθυνση την τρισδιάστατη διάταξη του νανοκαλωδίου **18.6**, με την παραγόμενη δέσμη φωτός **18.7** που εκτοξεύεται στη μικροσφαίρα **18.8**, η οποία παράγει το φωτονικό νανοπίδακα **18.9**, που κατευθύνεται στον θαμμένο οπτικό κυματοδηγό καναλιού **18.10**.

30

Μια τυπική τιμή του δείκτη διάθλασης για το διοξείδιο του πυριτίου είναι $n=1.452$, ενώ η πρόσμιξη του γερμανίου στο διοξείδιο του πυριτίου μπορεί να προσφέρει θετική μεταβολή του δείκτη διάθλασης έως και 2×10^{-2} , με πρόσθετη αύξηση του δείκτη διάθλασης κατά 5×10^{-3} όταν ακτινοβολείται με Laser. Η συνολική μεταβολή

του δείκτη διάθλασης στον οπτικό κυματοδηγό καναλιού, που αποτελεί τον πυρήνα κυματοδήγησης, μπορεί να επιτύχει τιμή $\Delta n = 2.5 \times 10^{-2}$ στην κατακόρυφη κατεύθυνση (Z) και $\Delta n = 5 \times 10^{-3}$ οριζόντια (Y). Έτσι, τελικά, στην εξεταζόμενη περίπτωση, το επίπεδο στρώμα πυρήνα ορίζεται σε $n = 1.472$ και ο οπτικός κυματοδηγός θαμμένου καναλιού με μεταγενέστερη επεξεργασία είναι $n = 1.477$. Ο κυματοδηγός από 5 γερμανό-πυριτικό γυαλί που εγγράφεται με υπεριώδη ακτινοβολία σχεδιάζεται ως ορθογώνιο με επιφάνεια διατομής $3 \times 3 \mu\text{m}^2$ για να διασφαλιστεί η μονότροπη λειτουργία. Στο Σχήμα **18γ** παρουσιάζεται σχηματικά ένα δισδιάστατο διάγραμμα με την άποψη YZ, με τα γεωμετρικά και οπτικά χαρακτηριστικά ενός εγγεγραμμένου / 10 κατασκευασμένου με Laser θαμμένου οπτικού κυματοδηγού καναλιού **18.15**, σε δομή πάνω σε υπόστρωμα πυριτίου **18.11**, με υπόστρωμα **18.12** από πυριτία πάχους $15 \mu\text{m}$, ένα στρώμα πυρήνα **18.13** πάχους $3 \mu\text{m}$ και ένα επικάλυμμα **18.14** πάχους $15 \mu\text{m}$. Το Σχήμα **18δ** δείχνει σε απλουστευμένη άποψη την οπτική διάταξη σε δύο διαστάσεις 2D σε σχέση με την τρισδιάστατη άποψη του Σχήματος **18α**. Υποθέτουμε στο Σχήμα 15 **18δ** μια κατακόρυφη τομή στο επίπεδο XZ στο μέσο του οπτικού κυματοδηγού καναλιού καθιστώντας έτσι ορατά στον αναγνώστη το υπόστρωμα πυριτίου **18.16**, το υπόστρωμα **18.17**, τον οπτικό κυματοδηγό καναλιού **18.18** και το άνω-στρώμα **18.19**. Για την πρόσβαση στον θαμμένο πυρήνα υποτίθεται ότι έχει ανοιχτεί ένα κατάλληλο φυσικό παράθυρο / άνοιγμα, με κατασκευαστικά μέσα της τρέχουσας στάθμης της 20 τεχνικής, όπως η αφαίρεση με Laser ή μέσω μεθόδου RIE, στο άνω στρώμα επικάλυψης προκειμένου να φιλοξενήσει το μικροσφαιρίδιο και το νανολώδιο ευθυγραμμισμένα με τον άξονα του οπτικού κυματοδηγού καναλιού, όπως φαίνεται στο παρόν Σχήμα **18δ**. Αυτό το φυσικό άνοιγμα, το οποίο είναι μια τάφρος, μπορεί να γεμίσει με κατάλληλο υλικό, όπως πολυμερές, σχηματίζοντας ένα επικάλυμμα **18.20**, 25 με δείκτη διάθλασης κοντά ή κατά προτίμηση ίσο με αυτόν τη πυριτίας, ώστε να επιτευχθεί μια συμμετρική δομή.

Η απόδοση σύζευξης ενός τυπικού NWQD με τον οπτικό κυματοδηγό του καναλιού εξετάζεται για την περίπτωση δύο αντιπροσωπευτικών περιπτώσεων μικροσφαιρών, 30 με δείκτες διάθλασης $n = 1.76$ και $n = 1.9$ ώστε να αντιστοιχούν στα εμπορικά διαθέσιμα μικροσφαιρίδια αλουμίνας και τιτανικού βαρίου αντίστοιχα, με υψηλό δείκτη διάθλασης. Για να διευκολυνθεί η διαδικασία προσομοίωσης, θεωρείται ότι αρχικά όλα τα οπτικά στοιχεία περιβάλλονται από διοξείδιο του πυριτίου ($n = 1.452$) ή από ένα πολυμερές με παρόμοιο δείκτη διάθλασης. Οι προσομοιώσεις (που δεν

παρουσιάζονται εδώ) έδειξαν ότι η σύζευξη χωρίς τη χρήση μικροσφαιριδίων είναι κάτω του 7%, το οποίο και πάλι είναι πολύ χαμηλό για πρακτικές εφαρμογές.

5 Για να αξιολογηθεί ο ρόλος της μικροσφαίρας στη σύζευξη φωτός NWQD-κυματοδηγού σε αυτή την πλατφόρμα 3-στρωμάτων, πραγματοποιήθηκαν εκτεταμένοι υπολογισμοί FDTD στην πλήρη φωτονική δομή, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα **18γ, δ**, με διασταυρούμενη συσχέτιση των παραμέτρων: α) διάμετρος της μικροσφαίρας, β) δείκτης διάθλασης μικροσφαίρας και γ) σχετική απόσταση L μεταξύ του NWQD και της μικροσφαίρας. Τα αποτελέσματα οργανώνονται σε 10 ξεχωριστά γραφήματα που παρουσιάζουν την απόδοση σύζευξης για κάθε ξεχωριστή περίπτωση με συγκεκριμένο δείκτη διάθλασης ($n=1.76$, ή 1.9), σε συνάρτηση με τις διαμέτρους και για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις απόστασης L .

Στο Σχήμα **19α** παρουσιάζονται οι καμπύλες σύζευξης για ένα μικροσφαιρίδιο με 15 $n=1.76$ σε μια δομή 3-στρωμάτων πυριτίας σε πυρίτιο για διάφορες διαμέτρους μικροσφαιρών που εκτείνονται από $2\ \mu\text{m}$ έως $10\ \mu\text{m}$ για αποστάσεις μεταξύ NWQD-μικροσφαίρας ίσες με $L=0\ \mu\text{m}$, $1\ \mu\text{m}$ και $3\ \mu\text{m}$. Στο Σχήμα **19β** παρουσιάζονται αντιπροσωπευτικές προσομοιώσεις διάδοσης, σε μήκος $120\ \mu\text{m}$, για συγκεκριμένες διαμέτρους και απόσταση $L=1\ \mu\text{m}$. Στο Σχήμα **19γ** παρουσιάζεται λεπτομερώς ο 20 μηχανισμός σύζευξης για τη βέλτιστη περίπτωση με μέγιστη σύζευξη με διάμετρο $5\ \mu\text{m}$ και $L=1\ \mu\text{m}$ σε μήκος διάδοσης $70\ \mu\text{m}$. Πρέπει να σημειωθεί ότι σε αυτό το Σχήμα **19γ** (και επίσης στο γράφημα στο Σχήμα **20γ**) η χωρική κλίμακα και η γραφική χρωματική αναπαράσταση έχουν τροποποιηθεί και ενισχυθεί για να καταδειχθούν οι λεπτομέρειες της δημιουργίας και διάδοσης των φωτονικών νανοπιδάκων και να γίνει 25 ορατό το ίχνος της περιμέτρου των μικροσφαιρών σε σχέση με τον σχηματισμό των φωτονικών νανοπιδάκων.

Στο Σχήμα **20α** παρουσιάζονται οι καμπύλες σύζευξης για ένα μικροσφαίριο με $n=1.9$ σε μια δομή 3-στρωμάτων πυριτίας σε πυρίτιο για διάφορες διαμέτρους 30 μικροσφαιρών που εκτείνονται από $2\ \mu\text{m}$ έως $10\ \mu\text{m}$ αποστάσεις μεταξύ NWQD-μικροσφαίρας ίσες με $L = 0\ \mu\text{m}$, $1\ \mu\text{m}$ και $3\ \mu\text{m}$. Στο Σχήμα **20β** παρουσιάζονται αντιπροσωπευτικές προσομοιώσεις διάδοσης, σε μήκος $120\ \mu\text{m}$, για συγκεκριμένες διαμέτρους και απόσταση $L= 0\ \mu\text{m}$. Στο Σχήμα **20γ** παρουσιάζεται λεπτομερώς ο

μηχανισμός σύζευξης για τη βέλτιστη περίπτωση με μέγιστη σύζευξη με διάμετρο 4 μm και $L=0\mu\text{m}$, σε μήκος διάδοσης 70 μm .

Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν παραπάνω δείχνουν ότι με τη ρύθμιση των
5 οπτικών και γεωμετρικών ιδιοτήτων της μικροσφαίρας και του κυματοδηγού, μπορεί να επιτευχθεί τιμή απόδοσης σύζευξης φωτός που φτάνει το 52%. Για μια διάταξη που χρησιμοποιεί μια μικροσφαίρα τιτανικού βαρίου BaTiO_3 ($n=1.9$), μια μικροσφαίρα διαμέτρου 4 μm σε απόσταση $L=0\mu\text{m}$ φαίνεται να είναι η βέλτιστη ως προς το βαθμό σύζευξης, ενώ για τη μικροσφαίρα αλουμίνας ($n=1.76$) η κορυφή
10 σύζευξης μετατοπίζεται σε μια ελαφρώς μεγαλύτερη σφαίρα με διάμετρο 5 μm και ενδιάμεση απόσταση $L=1\mu\text{m}$. Συγκρίνοντας τις καμπύλες και για τα δύο υλικά μικροσφαιρών, φαίνεται ότι καθώς αυξάνεται η απόσταση NWQD-μικροσφαιρών, η μέγιστη απόδοση σύζευξης επιτυγχάνεται σε μικροσφαίρες με μεγαλύτερη διάμετρο. Ωστόσο, η καλύτερη συνολική απόδοση σύζευξης λαμβάνει υπόψη και τον δείκτη
15 διάθλασης της μικροσφαίρας, με αποτέλεσμα να προκύπτουν υψηλότερες τιμές για τη περίπτωση μικροσφαίρας BaTiO_3 σε $L=0\mu\text{m}$, αλλά για μικροσφαίρα Al_2O_3 σε $L=1\mu\text{m}$.

Οι ανοχές της εφευρεθείσας διάταξης στη δομή 3-στρωμάτων, στις παραμέτρους
20 όπως α) απόσταση μικροσφαίρας - κυματοδηγού, β) κακή ευθυγράμμιση NWQD, γ) σφαιρικότητα δ) μήκος κύματος λειτουργίας NWQD, ακολουθούν τις ίδιες τάσεις με τις ανοχές που παρουσιάστηκαν στην ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ I του απλοποιημένου κυλινδρικού κυματοδηγού που είναι η πιο γενική περίπτωση. Η ανθεκτικότητα της προτεινόμενης λύσης ισχύει και σε αυτή την εξεταζόμενη Περίπτωση II.

ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΣΧΕΔΙΩΝ

Για την καλύτερη κατανόηση της εφεύρεσης και για να δειχθεί ο τρόπος με τον οποίο αυτή μπορεί να υλοποιηθεί, γίνεται τώρα ενδεικτική αναφορά στα συνοδευτικά
5 σχέδια στα οποία:

Το **Σχήμα 1α** είναι ένα σχηματικό διάγραμμα που δείχνει τη δομή ενός νανοκαλωδίου με ενσωματωμένη κβαντική τελεία (QD) με τις τυπικές διαστάσεις που εξετάζονται στο τμήμα της περιγραφής. Το Σχήμα **1β** είναι ένα διάγραμμα που
10 δείχνει σχηματικά τη διάδοση του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος του άξονα του νανοκαλωδίου μετά τη διέγερση της QD. Το Σχήμα **1γ** είναι ένα σχηματικό διάγραμμα που δείχνει τη διάταξη ενός νανοκαλωδίου NWQD, στη θέση διέγερσης, σε σχέση με έναν κυλινδρικό κυματοδηγό ενσωματωμένο σε ένα ομογενές μέσο.

15 Το **Σχήμα 2** είναι ένα σχηματικό διάγραμμα που δείχνει ένα φωτονικό νανοπίδακα που παράγεται από μια μικροσφαίρα.

Το **Σχήμα 3** είναι ένα σχηματικό διάγραμμα που δείχνει την οπτική διάταξη μεταξύ ενός νανοκαλωδίου NWQD, μιας μικροσφαίρας και ενός οπτικού κυματοδηγού. Η
20 απόσταση διαχωρισμού μεταξύ του άκρου του NWQD και της παρακείμενης επιφάνειας της μικροσφαίρας είναι L, ενώ η απόσταση διαχωρισμού μεταξύ της επιφάνειας της μικροσφαίρας που γειτνιάζει με το άκρο του κυματοδηγού και του κυματοδηγού είναι D.

25 Το **Σχήμα 4** είναι ένα γράφημα που δείχνει σχηματικά την επιτυχή σύζευξη φωτός σε κυματοδηγό με τη χρήση μιας βέλτιστα σχεδιασμένης διάταξης μεταξύ του NWQD, της μικροσφαίρας και του κυματοδηγού (μικροσφαίρα με διάμετρο 6μm, $n=1.9$ και απόσταση από το νανοκαλώδιο $L=0\mu\text{m}$). Στο Σχήμα **4α** φαίνεται η δημιουργία του φωτονικού νανοπίδακα μετά τον φωτισμό του NWQD στη μικροσφαίρα, η οποία
30 απεικονίζεται ως κύκλος, και η σύζευξη του φωτός στον κυματοδηγό για απόσταση διάδοσης 70μm. Στο Σχήμα **4β** φαίνεται η αποτελεσματική σύζευξη και η χωρίς απώλειες διάδοση του συζευγμένου φωτός για απόσταση 300 μm στον κυματοδηγό. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η χρωματική αναπαράσταση και η κλίμακα της έντασης

είναι διαφορετικές μεταξύ των δύο γραφικών παραστάσεων προκειμένου να αποκαλυφθούν οι λεπτομέρειες.

Το **Σχήμα 5α** είναι ένα γράφημα που δείχνει σχηματικά την εκτιμώμενη σύζευξη από νανοκαλώδιο NWQD (NK) σε κυλινδρικό κυματοδηγό (KM) με απλή εγγύτητα χωρίς τη χρήση μικροσφαίρας, για ένα εύρος απόστασης L που κυμαίνεται από 0 έως 5 μm . Το **Σχήμα 5β** είναι ένα γράφημα που δείχνει σχηματικά τη διάδοση της ισχύος κατά μήκος του κυματοδηγού μετά από διέγερση με το NWQD, για $L=0\mu\text{m}$. Το περιορισμένο φως στον κυματοδηγό είναι μόλις ορατό λόγω της αναποτελεσματικής σύζευξης.

Το **Σχήμα 6α** είναι ένα γράφημα που δείχνει σχηματικά τα χαρακτηριστικά της δέσμης του νανοπίδακα για διαφορετικούς δείκτες διάθλασης μικροσφαιρών, ενώ η διάμετρος των μικροσφαιρών διατηρείται σταθερή στα 6 μm και η απόσταση NWQD-μικροσφαιρών είναι σταθερή $L=0\mu\text{m}$. Στο **Σχήμα 6β** παρουσιάζεται ο σχηματισμός του φωτονικού νανοπίδακα για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις μικροσφαιρών με διαμέτρους 4 μm , 6 μm και 8 μm , με $n=1.9$ και $L=0\mu\text{m}$. Στο **Σχήμα 6γ** παρουσιάζεται ο σχηματισμός του νανοπίδακα για διάφορες αποστάσεις NWQD-μικροσφαίρας ίσες με $L=0, 1$ και 3 μm για μικροσφαίρας με δείκτη διάθλασης 1,9 και διάμετρο 6 μm .

Το **Σχήμα 7α** είναι ένα γράφημα που δείχνει σχηματικά τις καμπύλες σύζευξης φωτός για μία μικροσφαίρα (ΜΣ) με $n=1.6$. Στο **Σχήμα 7β** παρουσιάζονται αντιπροσωπευτικές προσομοιώσεις διάδοσης, σε μήκος 120 μm , για συγκεκριμένες διαμέτρους και απόσταση $L=3\mu\text{m}$. Στο **Σχήμα 7γ** παρουσιάζεται λεπτομερώς ο μηχανισμός σύζευξης για τη βέλτιστη περίπτωση με μέγιστη σύζευξη με διάμετρο 5 μm και $L=3\mu\text{m}$ σε μήκος διάδοσης 70 μm .

Το **Σχήμα 8α** είναι ένα γράφημα που δείχνει σχηματικά τις καμπύλες σύζευξης φωτός για μια μικροσφαίρα με $n=1.7$. Στο **Σχήμα 8β** παρουσιάζονται αντιπροσωπευτικές προσομοιώσεις διάδοσης, σε μήκος 120 μm , για συγκεκριμένες διαμέτρους και απόσταση $L=1\mu\text{m}$. Στο **Σχήμα 8γ** παρουσιάζεται λεπτομερώς ο μηχανισμός σύζευξης για τη βέλτιστη περίπτωση με μέγιστη σύζευξη με διάμετρο 5 μm και $L=1\mu\text{m}$ σε μήκος διάδοσης 70 μm .

Το **Σχήμα 9α** είναι ένα γράφημα που δείχνει σχηματικά τις καμπύλες σύζευξης φωτός για μια μικροσφαίρα με $n=1.76$. Στο **Σχήμα 9β** παρουσιάζονται αντιπροσωπευτικές προσομοιώσεις διάδοσης, σε μήκος $120\ \mu\text{m}$, για συγκεκριμένες διαμέτρους και απόσταση $L=1\ \mu\text{m}$. Στο **Σχήμα 9γ** παρουσιάζεται λεπτομερώς ο μηχανισμός σύζευξης για τη βέλτιστη περίπτωση με μέγιστη σύζευξη με διάμετρο $6\ \mu\text{m}$ και $L=1\ \mu\text{m}$ σε μήκος διάδοσης $70\ \mu\text{m}$.

Το **Σχήμα 10α** είναι ένα γράφημα που δείχνει σχηματικά τις καμπύλες σύζευξης για μια μικροσφαίρα με $n=1.9$. Στο **Σχήμα 10β** παρουσιάζονται αντιπροσωπευτικές προσομοιώσεις διάδοσης, σε μήκος $120\ \mu\text{m}$, για συγκεκριμένες διαμέτρους και απόσταση $L=1\ \mu\text{m}$. Στο **Σχήμα 10γ** παρουσιάζεται λεπτομερώς ο μηχανισμός σύζευξης για τη βέλτιστη περίπτωση με μέγιστη σύζευξη με διάμετρο $10\ \mu\text{m}$ και $L=1\ \mu\text{m}$ σε μήκος διάδοσης $70\ \mu\text{m}$.

Το **Σχήμα 11α** είναι ένα γράφημα που δείχνει σχηματικά τις καμπύλες σύζευξης για μια μικροσφαίρα με $n=2.0$. Στο **Σχήμα 11β** παρουσιάζονται αντιπροσωπευτικές προσομοιώσεις διάδοσης, σε μήκος $120\ \mu\text{m}$, για συγκεκριμένες διαμέτρους και απόσταση $L=0\ \mu\text{m}$. Στο **Σχήμα 11γ** παρουσιάζεται λεπτομερώς ο μηχανισμός σύζευξης για τη βέλτιστη περίπτωση με μέγιστη σύζευξη με διάμετρο $9\ \mu\text{m}$ και $L=0\ \mu\text{m}$ σε μήκος διάδοσης $70\ \mu\text{m}$.

Το **Σχήμα 12α** είναι ένα γράφημα που δείχνει σχηματικά τις καμπύλες σύζευξης για μια μικροσφαίρα με $n=2.2$. Στο **Σχήμα 12β** παρουσιάζονται αντιπροσωπευτικές προσομοιώσεις διάδοσης, σε μήκος $120\ \mu\text{m}$, για συγκεκριμένες διαμέτρους και απόσταση $L=0\ \mu\text{m}$. Στο **Σχήμα 12γ** παρουσιάζεται λεπτομερώς ο μηχανισμός σύζευξης για τη βέλτιστη περίπτωση με μέγιστη σύζευξη με διάμετρο $3\ \mu\text{m}$ και $L=0\ \mu\text{m}$ σε μήκος διάδοσης $70\ \mu\text{m}$.

Το **Σχήμα 13α** είναι ένα γράφημα που δείχνει σχηματικά τις καμπύλες σύζευξης για μια μικροσφαίρα με $n=2.5$. Στο **Σχήμα 13β** παρουσιάζονται αντιπροσωπευτικές προσομοιώσεις διάδοσης, σε μήκος $120\ \mu\text{m}$, για συγκεκριμένες διαμέτρους και απόσταση $L=3\ \mu\text{m}$. Στο **Σχήμα 13γ** παρουσιάζεται αναλυτικά ο μηχανισμός σύζευξης

για τη βέλτιστη περίπτωση με μέγιστη σύζευξη με διάμετρο 6 μm και $L=3 \mu\text{m}$ σε μήκος διάδοσης 70 μm .

5 Το **Σχήμα 14α** είναι ένα γράφημα που δείχνει σχηματικά την επίδραση της απόστασης D μεταξύ της μικροσφαίρας και του κυματοδηγού στην απόδοση σύζευξης για μια διάταξη με μικροσφαίρα με διάμετρο 6 μm και $n=1.9$. Στο **Σχήμα 14β** παρουσιάζονται σχηματικά αντιπροσωπευτικά σχήματα διάδοσης των ηλεκτρικών πεδίων διάδοσης για διάφορες περιπτώσεις του D για απόσταση 120 μm .

10 Το **Σχήμα 15α** είναι ένα σχηματικό διάγραμμα που δείχνει ένα ατελώς ευθυγραμμισμένο NWQD, λόγω μιας επαγόμενης κλίσης γωνίας φ σε σχέση με τον κεντρικό άξονα της μικροσφαίρας. Το **Σχήμα 15β** είναι ένα διάγραμμα που δείχνει σχηματικά την επίδραση της ατελούς ευθυγράμμισης στην απόδοση σύζευξης για μια διάταξη με μία μικροσφαίρα με διάμετρο 8 μm , $n=1.9$ και απόσταση $L=0 \mu\text{m}$.

15

Το **Σχήμα 16α** είναι ένα γράφημα που δείχνει σχηματικά την επίδραση του λόγου σφαιρικότητας στην απόδοση σύζευξης για μια διάταξη με μικροσφαίρα με διάμετρο 6 μm , $n=1.9$ και απόσταση $L=0 \mu\text{m}$. Στο **Σχήμα 16β** παρουσιάζονται σχηματικά αντιπροσωπευτικά σχήματα των διαδιδόμενων ηλεκτρικών πεδίων για διάφορες
20 περιπτώσεις απόκλισης (παραμόρφωσης) ελλειψοειδούς για απόσταση 120 μm .

Το **Σχήμα 17** είναι ένα γράφημα που δείχνει σχηματικά την επίδραση του μήκους κύματος λειτουργίας των NWQD, με την ενσωμάτωση διαφορετικών QDs συντονισμένων σε διαφορετικά μήκη κύματος, στην απόδοση σύζευξης φωτός για μια
25 διάταξη με μικροσφαίρα με διάμετρο 6 μm , $n=1.9$ και απόσταση $L=0 \mu\text{m}$.

Το **Σχήμα 18α** είναι ένα σχηματικό διάγραμμα που δείχνει μια δομή επίπεδης οπτικής κυματοδηγησης 3-στρωμάτων. Το **Σχήμα 18β** είναι ένα σχηματικό διάγραμμα που δείχνει μια μεγέθυνση της τρισδιάστατης διάταξης του νανοκαλωδίου και της
30 μικροσφαίρας στον οπτικό κυματοδηγό θαμμένου καναλιού. Το **Σχήμα 18γ** είναι ένα σχηματικό δισδιάστατο (2D) διάγραμμα που δείχνει τα γεωμετρικά και οπτικά χαρακτηριστικά ενός οπτικού κυματοδηγού καναλιού εγγεγραμμένου με Laser. Το **Σχήμα 18δ** είναι ένα σχηματικό δισδιάστατο διάγραμμα 2D που δείχνει σε απλουστευμένη άποψη την οπτική δομή και διάταξη.

Το **Σχήμα 19α** είναι ένα γράφημα που δείχνει σχηματικά τις καμπύλες σύζευξης για μία μικροσφαίρα με $n=1.76$ σε μια δομή 3-στρωμάτων πυριτίας σε πυρίτιο για διάφορες διαμέτρους μικροσφαιρών που εκτείνονται από 2 μm έως 10 μm σε απόσταση NWQD-μικροσφαίρας ίση με $L=0\ \mu\text{m}$, 1 μm και 3 μm . Το **Σχήμα 19β** είναι ένα γράφημα που δείχνει αντιπροσωπευτικές προσομοιώσεις διάδοσης, σε μήκος 120 μm , για συγκεκριμένες διαμέτρους και απόσταση $L=1\ \mu\text{m}$. Στο **Σχήμα 19γ** παρουσιάζεται λεπτομερώς ο μηχανισμός σύζευξης για τη βέλτιστη περίπτωση με μέγιστη σύζευξη για διάμετρο 5 μm και $L=1\ \mu\text{m}$ σε μήκος διάδοσης 70 μm .

10

Το **Σχήμα 20α** είναι ένα γράφημα που δείχνει σχηματικά τις καμπύλες σύζευξης για μία μικροσφαίρα με $n=1.9$ σε μια δομή 3-στρωμάτων πυριτίας σε πυρίτιο για διάφορες διαμέτρους μικροσφαιρών που εκτείνονται από 2 μm έως 10 μm σε απόσταση NWQD-μικροσφαίρας ίση με $L=0\ \mu\text{m}$, 1 μm και 3 μm . Στο **Σχήμα 20β** παρουσιάζονται αντιπροσωπευτικές προσομοιώσεις διάδοσης, σε μήκος 120 μm , για συγκεκριμένες διαμέτρους και απόσταση $L=0\ \mu\text{m}$. Στο **Σχήμα 20γ** παρουσιάζεται λεπτομερώς ο μηχανισμός σύζευξης για τη βέλτιστη περίπτωση με μέγιστη σύζευξη για διάμετρο 4 μm και $L=0\ \mu\text{m}$ σε μήκος διάδοσης 70 μm .

20

ΑΞΙΩΣΕΙΣ

- 5 **1.** Σύστημα σύζευξης φωτός που περιλαμβάνει ένα νανοκαλώδιο, ένα οπτικό διηλεκτρικό μικροστοιχείο και έναν οπτικό κυματοδηγό καναλιού, όπου το οπτικό διηλεκτρικό μικροστοιχείο τοποθετείται μεταξύ του νανοκαλωδίου και του οπτικού κυματοδηγού καναλιού και το οπτικό διηλεκτρικό μικροστοιχείο είναι διαμορφωμένο έτσι ώστε να επιτρέπει τη σύζευξη φωτός μεταξύ του νανοκαλωδίου και του οπτικού κυματοδηγού καναλιού με τα εξής διαδοχικά βήματα: εκπομπή φωτός από το νανοκαλώδιο, φωτισμός του οπτικού διηλεκτρικού μικροστοιχείου με το αναφερθέν φως ώστε να παραχθεί φωτονικός νανοπίδακας, και τέλος την κατευθυνόμενη εκτόξευση του εν λόγω εκπεμπόμενου φωτονικού νανοπίδακα σε έναν οπτικό κυματοδηγό καναλιού προκειμένου να διεγείρει τους υποστηριζόμενους ιδιορυθμούς διάδοσης και να επιτευχθεί τη σύζευξη φωτός.
- 10
- 15 **2.** Σύστημα σύζευξης φωτός σύμφωνα με την **αξίωση 1**, όπου το οπτικό διηλεκτρικό μικροστοιχείο έχει σχήμα που επιλέγεται από σφαίρα ή κύλινδρο ή ημισφαίρα ή ημικύλινδρο, και κατά προτίμηση το οπτικό διηλεκτρικό μικροστοιχείο είναι μία μικροσφαίρα.
- 20 **3.** Σύστημα σύζευξης φωτός σύμφωνα με την **αξίωση 2**, όπου το οπτικό διηλεκτρικό μικροστοιχείο έχει δείκτη διάθλασης οποιασδήποτε τιμής μεταξύ 1.5 και 2.5.
- 25 **4.** Σύστημα σύζευξης φωτός σύμφωνα με **οποιαδήποτε από τις προηγούμενες αξιώσεις**, όπου το οπτικό διηλεκτρικό μικροστοιχείο είναι μικροσφαίρα με διάμετρο μεταξύ 2 μm και 45 μm και κατά προτίμηση μεταξύ 3 μm και 15 μm .
- 30 **5.** Σύστημα σύζευξης φωτός σύμφωνα με **οποιαδήποτε από τις προηγούμενες αξιώσεις** που επιτρέπει τη σύζευξη φωτός μεταξύ ενός νανοκαλωδίου με μία ή περισσότερες ενσωματωμένες κβαντικές τελείες, ή χωρίς ενσωματωμένες κβαντικές τελείες, με έναν οπτικό κυματοδηγό καναλιού.

- 5 6. Σύστημα σύζευξης φωτός σύμφωνα με **οποιαδήποτε από τις προηγούμενες αξιώσεις**, όπου ο οπτικός κυματοδηγός καναλιού είναι κατασκευασμένος από πυριτία, ή πυριτία επί πυριτίου, ή πυρίτιο, ή νιτρίδιο του πυριτίου, ή πυρίτιο επί μονωτή, ή πολυμερή, ή πεντοξείδιο του τανταλίου, ή νιοβικό λίθιο, ή οποιονδήποτε συνδυασμό αυτών των υλικών.
- 10 7. Σύστημα σύζευξης φωτός σύμφωνα με **οποιαδήποτε από τις προηγούμενες αξιώσεις**, όπου ο οπτικός κυματοδηγός καναλιού έχει σχήμα που επιλέγεται από κυματοδηγό τύπου ράβδωσης, ή νεύρωσης, ή λωρίδας, ή ταινίας, ή κυματοδηγό θαμμένου τύπου.
- 15 8. Σύστημα σύζευξης φωτός σύμφωνα με **οποιαδήποτε από τις προηγούμενες αξιώσεις** όπου ο οπτικός κυματοδηγός καναλιού κατασκευάζεται με εγχάραξη αντιδρώντων ενεργών ιόντων, ή λιθογραφία εστιασμένης δέσμης ιόντων, ή λιθογραφία δέσμης ηλεκτρονίων, ή μέσω διαδικασιών διάχυσης, μέσω άμεσης εγγραφή με Laser ή με οποιονδήποτε συνδυασμό αυτών.
- 20 9. Σύστημα σύζευξης φωτός σύμφωνα με **οποιαδήποτε από τις προηγούμενες αξιώσεις**, όπου το νανοκαλώδιο είναι κατασκευασμένο από ημιαγωγό, ή διηλεκτρικό, ή μεταλλικό υλικό.
- 25 10. Σύστημα σύζευξης φωτός σύμφωνα με **οποιαδήποτε από τις προηγούμενες αξιώσεις**, όπου το νανοκαλώδιο είναι κατασκευασμένο από ημιαγωγικό υλικό, κατά προτίμηση με μήκος μεταξύ 1 μm έως 20 μm , διάμετρο μεταξύ 2 nm και 800 nm, και λειτουργεί εκπέμποντας φως μήκους κύματος μεταξύ 800 nm και 2000 nm.
- 30 11. Σύστημα σύζευξης φωτός σύμφωνα με **οποιαδήποτε από τις προηγούμενες αξιώσεις**, όπου ο οπτικός κυματοδηγός του καναλιού κατασκευάζεται κατά προτίμηση από πυριτία ή ντοπαρισμένη πυριτία, έχει πλάτος ή διάμετρο μεταξύ 1 μm και 10 μm και διαφορά δείκτη διάθλασης, σε σύγκριση με την καθαρή πυριτία, μεταξύ 10^{-4} και 10^{-1} .

12. Σύστημα σύζευξης φωτός σύμφωνα με **οποιαδήποτε από τις προηγούμενες αξιώσεις**, όπου η απόσταση μεταξύ του νανοκαλωδίου και του οπτικού διηλεκτρικού μικροστοιχείου ή η απόσταση μεταξύ της μικροσφαίρας και του οπτικού κυματοδηγού καναλιού είναι μεταξύ 0 μm και 30 μm .

5

13. Μέθοδος σύζευξης φωτός από ένα νανοκαλώδιο σε έναν οπτικό κυματοδηγό καναλιού, η οποία περιλαμβάνει τα εξής βήματα: i) Παροχή του συστήματος σύζευξης φωτός σύμφωνα με **οποιαδήποτε από τις προηγούμενες αξιώσεις**, ii) Εκτόξευση φωτός από ένα νανοκαλώδιο, iii) Φωτισμός του διηλεκτρικού οπτικού μικροστοιχείου με το εν λόγω φως προκειμένου να παραχθεί ένας φωτονικός νανοπίδακας, και iv) Εκτόξευση του εν λόγω εκπεμπόμενου φωτονικού νανοπίδακα σε έναν οπτικό κυματοδηγό καναλιού προκειμένου να διεγερθούν οι υποστηριζόμενοι από τον οπτικό κυματοδηγό καναλιού ιδιορρυθμοί διάδοσης και να επιτευχθεί η σύζευξη φωτός.

10

15

14. Μέθοδος σύζευξης φωτός σύμφωνα με την **αξίωση 13**, όπου για ένα δεδομένο σύστημα σύζευξης φωτός σύμφωνα με οποιαδήποτε από τις **αξιώσεις 1-12**, επιλέγεται η υψηλότερη τιμή σύζευξης φωτός από το νανοκαλώδιο προς τον οπτικό κυματοδηγό καναλιού, με τη διακύμανση των ακόλουθων παραμέτρων: i) Μέγεθος του οπτικού διηλεκτρικού μικροστοιχείου, ii) Δείκτης διάθλασης του οπτικού διηλεκτρικού μικροστοιχείου, iii) Απόσταση μεταξύ του νανοκαλωδίου και του οπτικού διηλεκτρικού μικροστοιχείου, iv) Απόσταση μεταξύ του οπτικού διηλεκτρικού μικροστοιχείου και του οπτικού κυματοδηγού καναλιού.

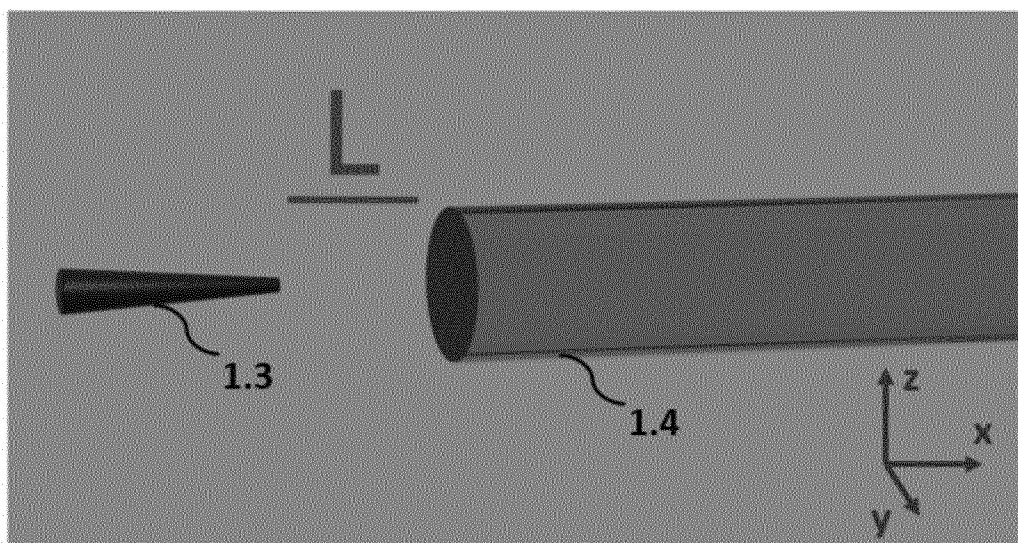
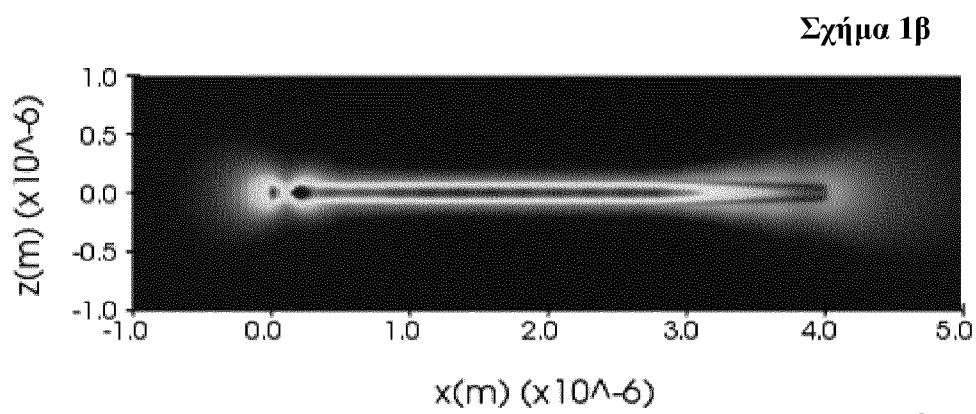
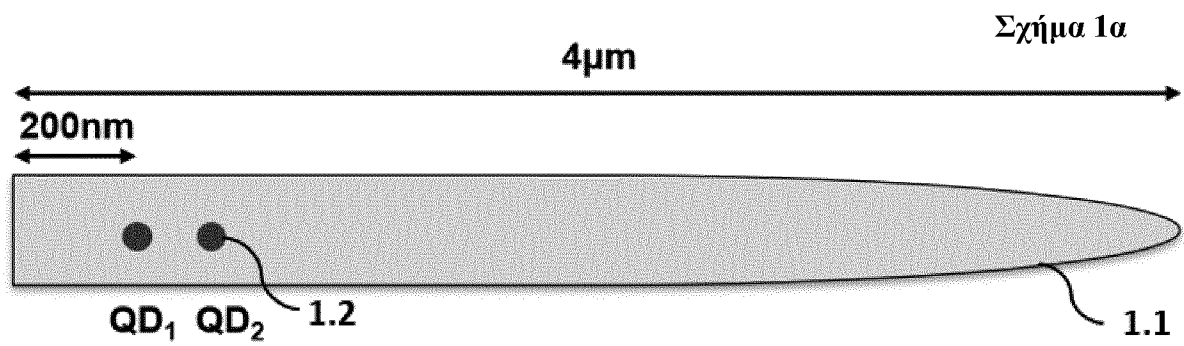
20

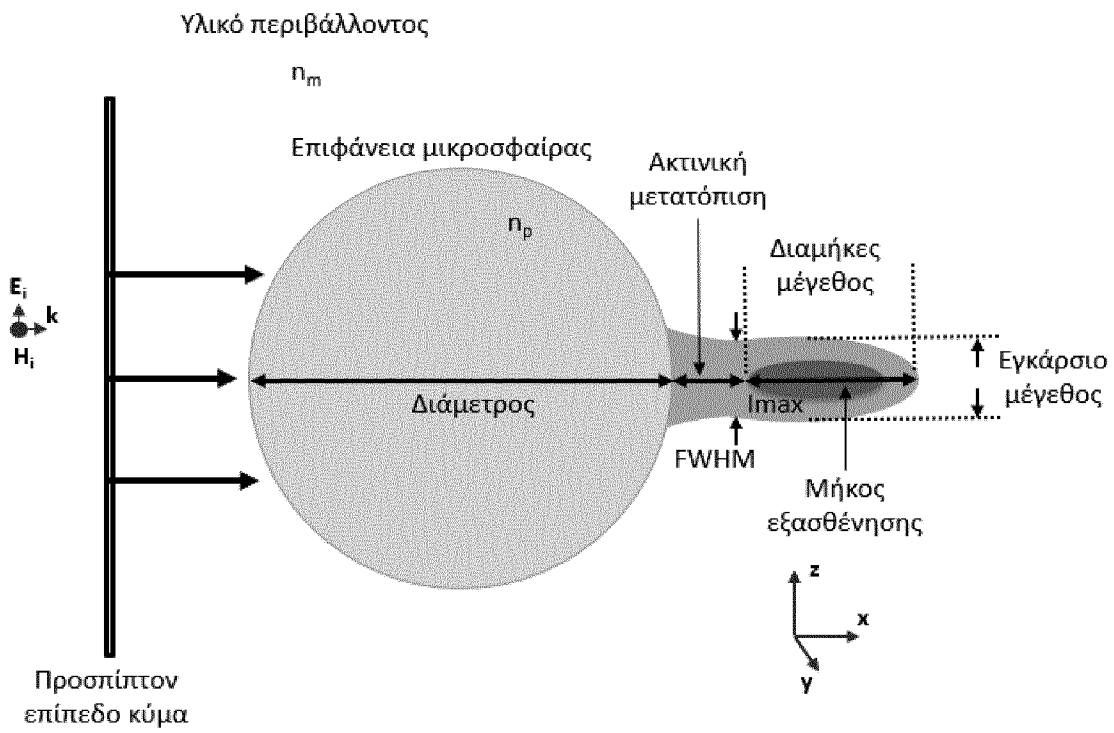
25

15. Μέθοδος σύζευξης φωτός **σύμφωνα με τις αξιώσεις 13 έως 14**, όπου το οπτικό διηλεκτρικό μικροστοιχείο είναι μία μικροσφαίρα, με δείκτη διάθλασης κατά προτίμηση στην περιοχή 1.5 έως 2.5, και με διάμετρο μεταξύ 2 μm και 45 μm , και κατά προτίμηση μεταξύ 3 μm και 15 μm .

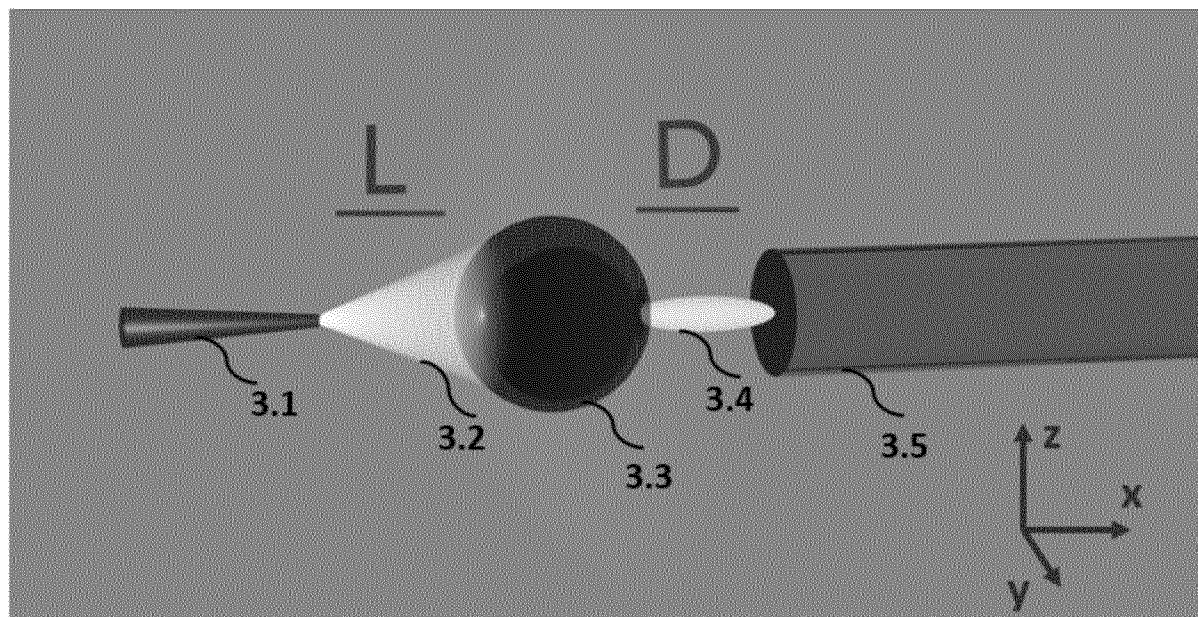
30

16. Η χρήση του συστήματος σύζευξης φωτός και της μεθόδου σύζευξης φωτός σύμφωνα με **οποιαδήποτε από τις αξιώσεις 1 έως 15** σε κβαντικά φωτονικά ολοκληρωμένα κυκλώματα, ή οπτικά συστήματα κβαντικών υπολογιστών ή κβαντικά συστήματα επικοινωνιών.

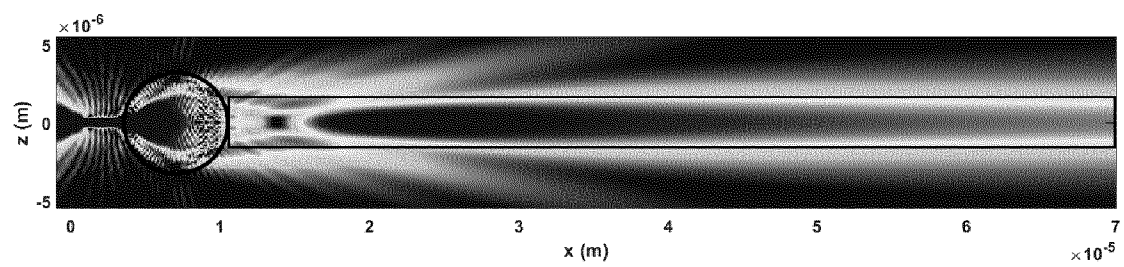




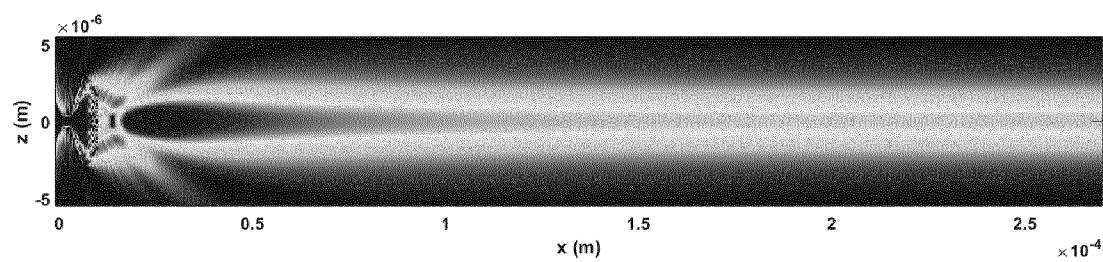
Σχήμα 2



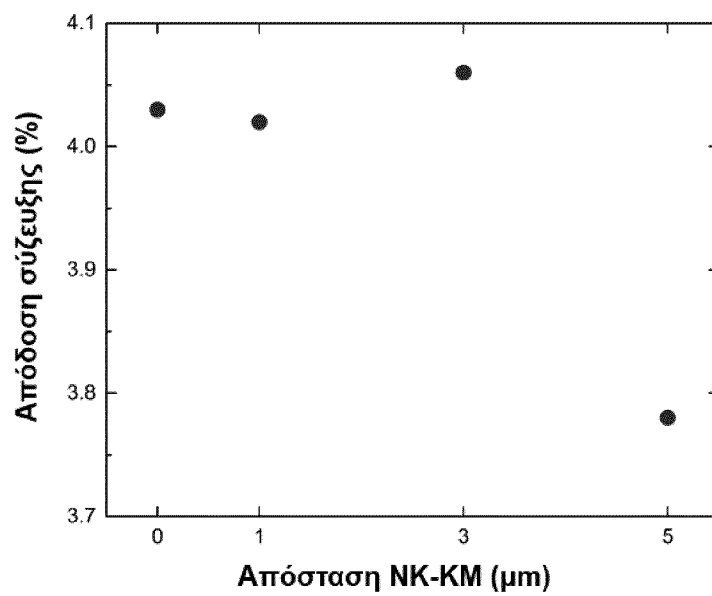
Σχήμα 3



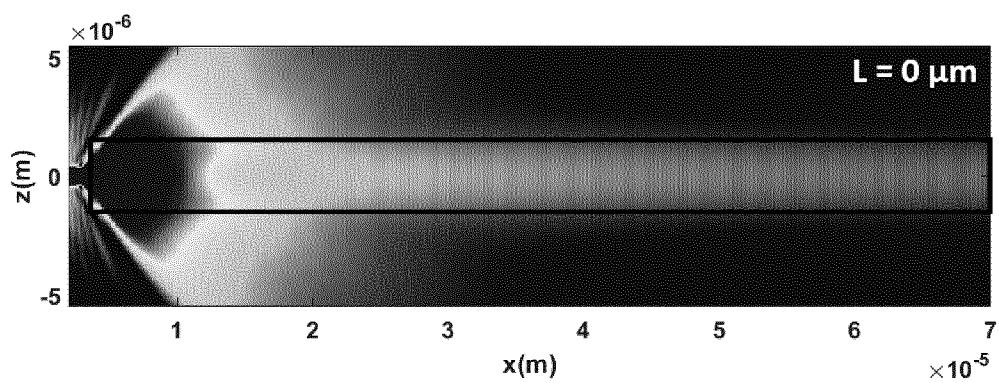
Σχήμα 4α



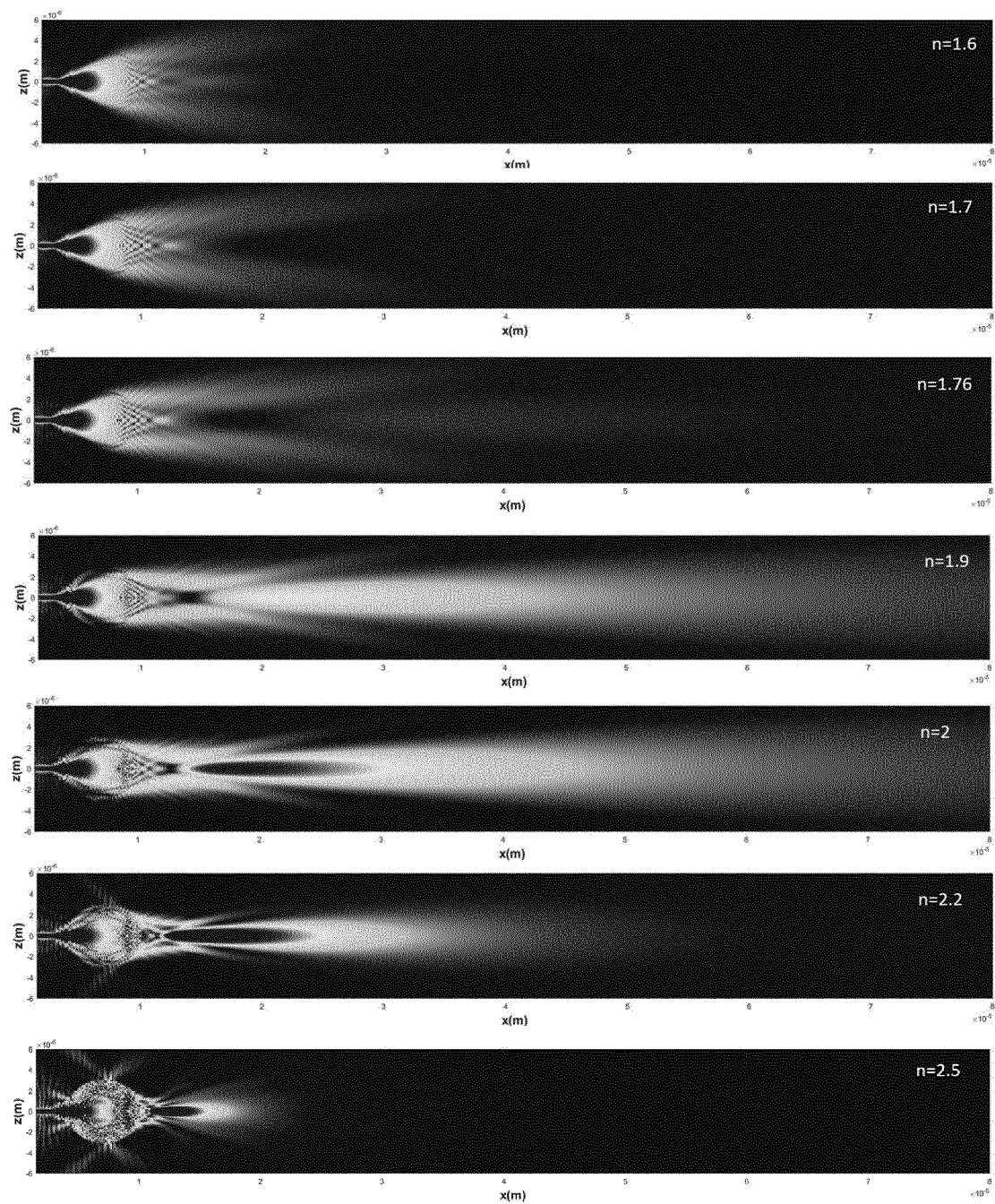
Σχήμα 4β



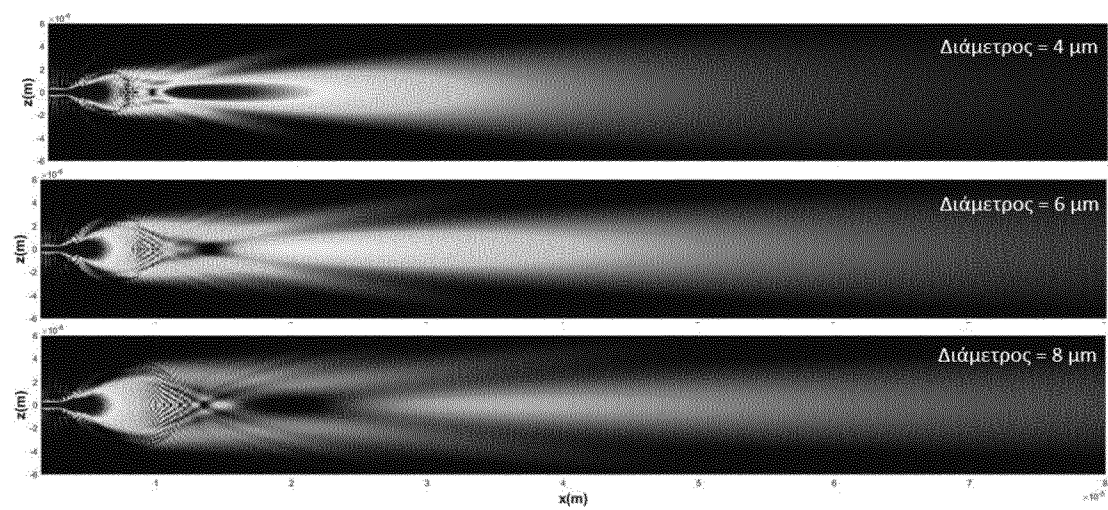
Σχήμα 5α



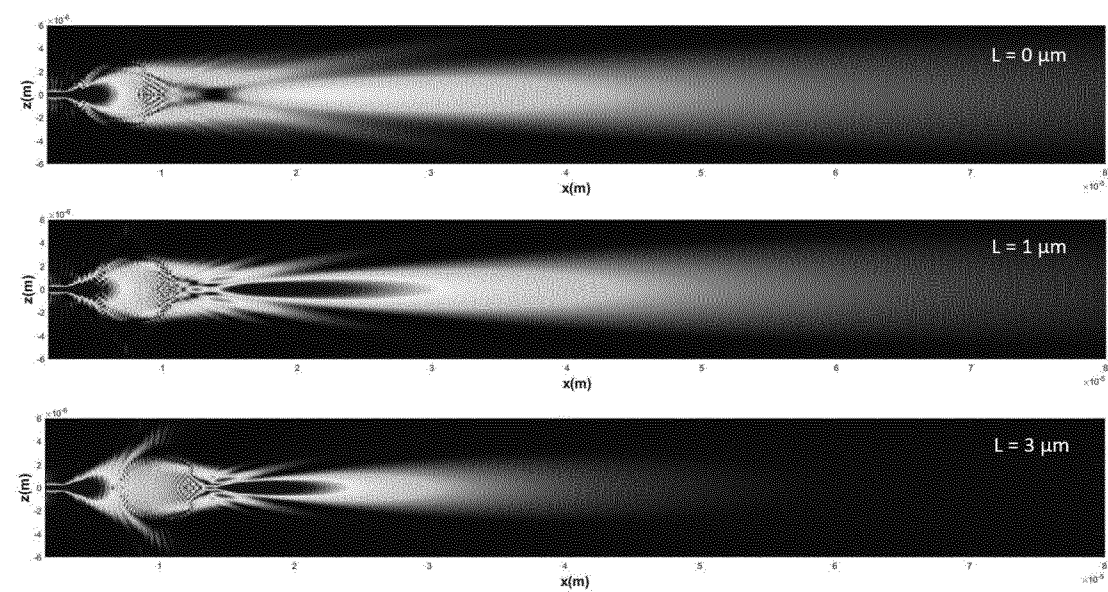
Σχήμα 5β



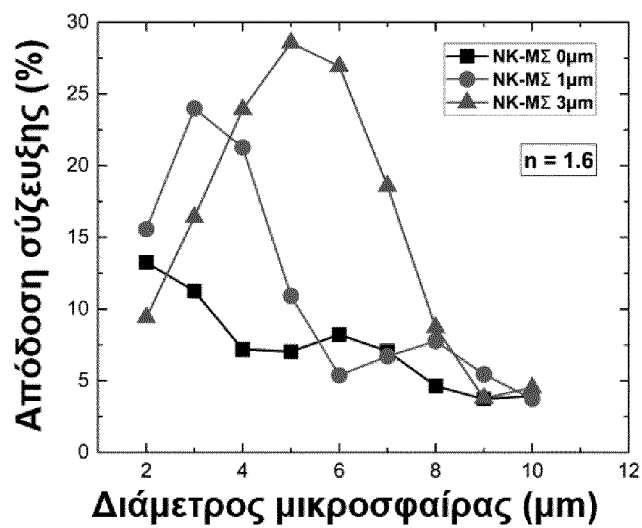
Σχήμα 6α



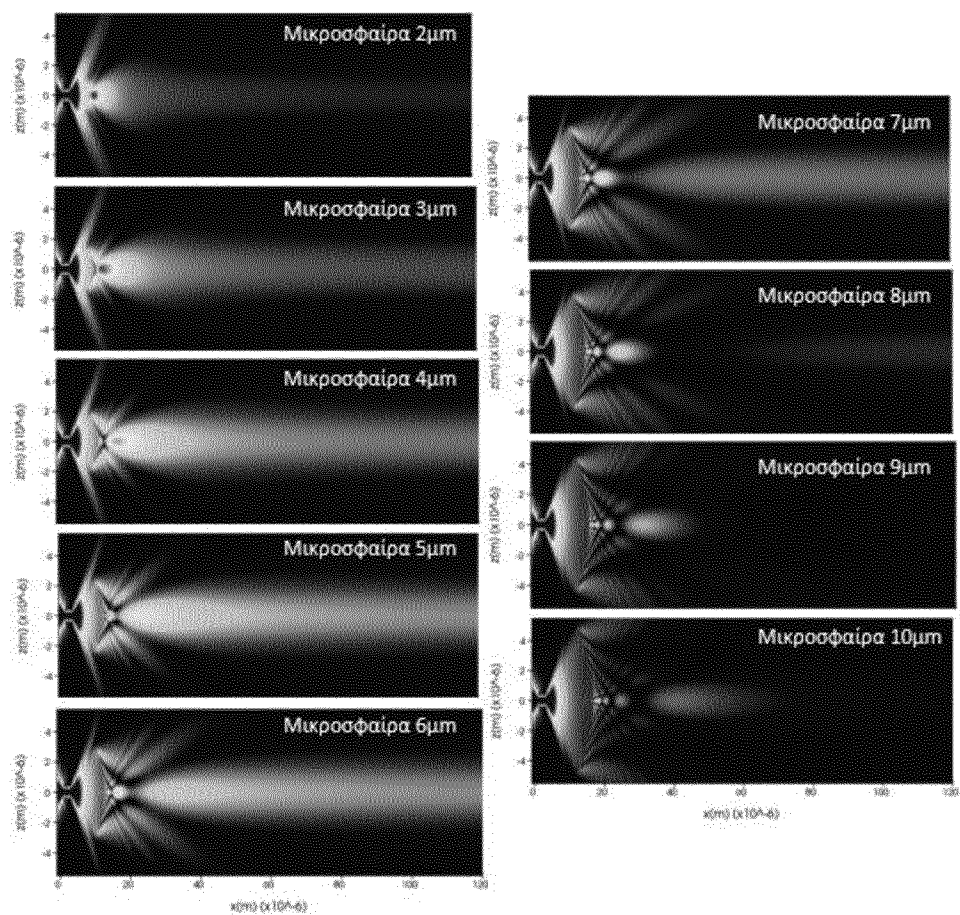
Σχήμα 6β



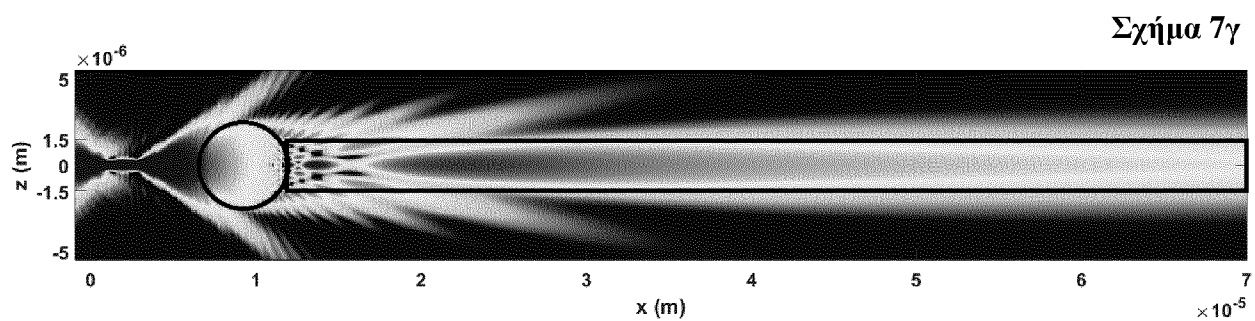
Σχήμα 6γ



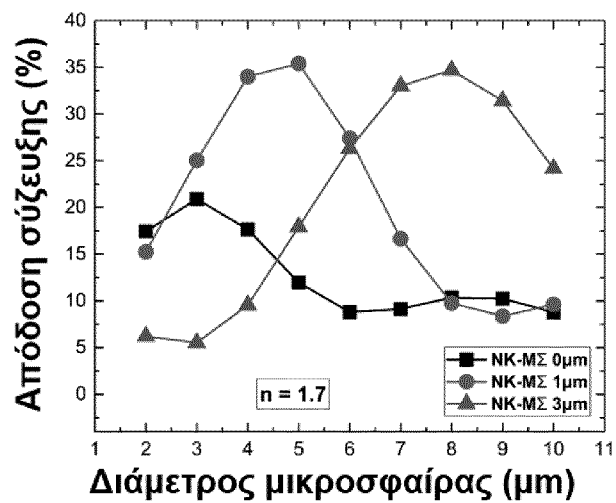
Σχήμα 7α



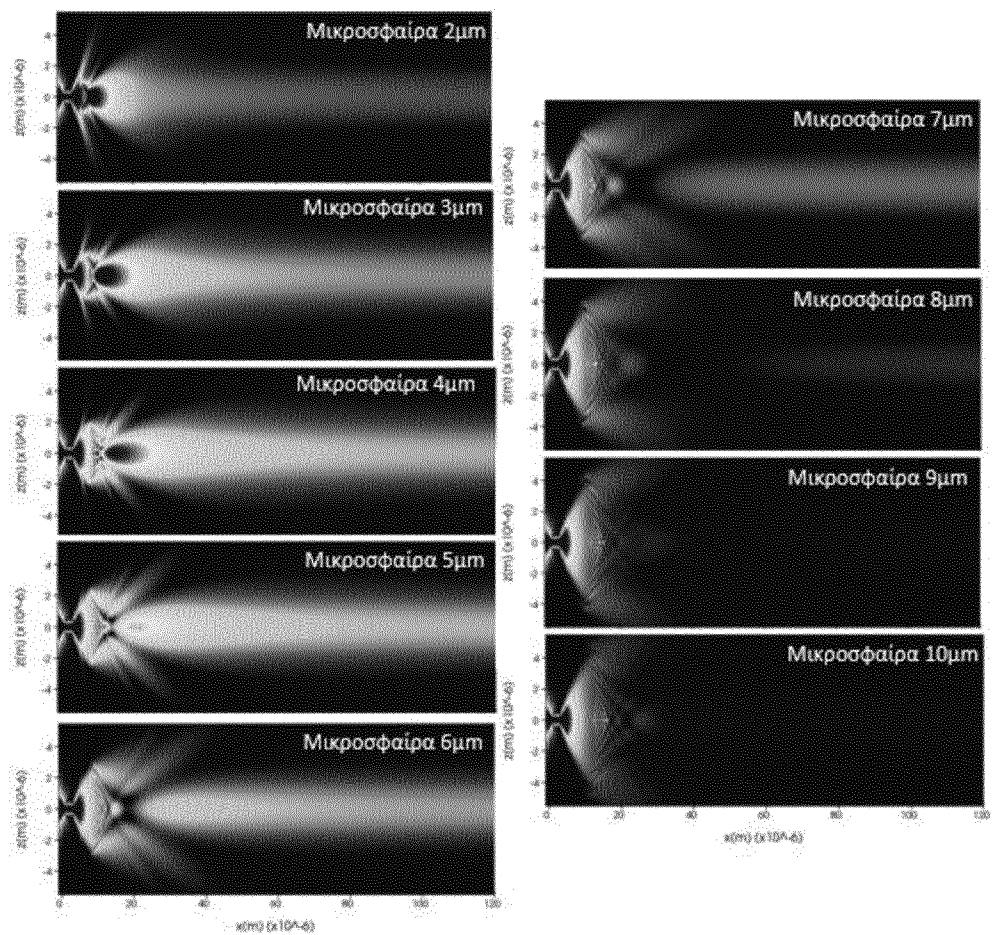
Σχήμα 7β



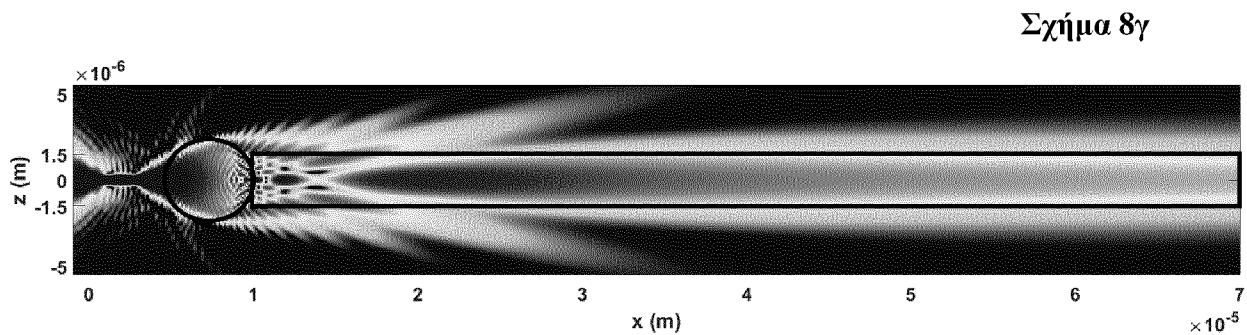
Σχήμα 7γ



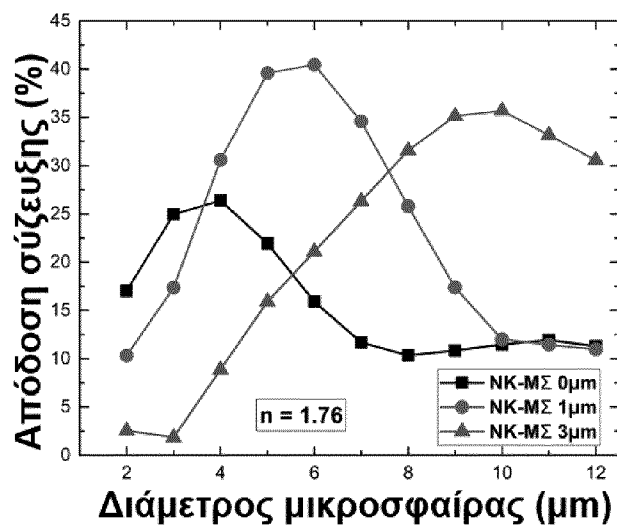
Σχήμα 8α



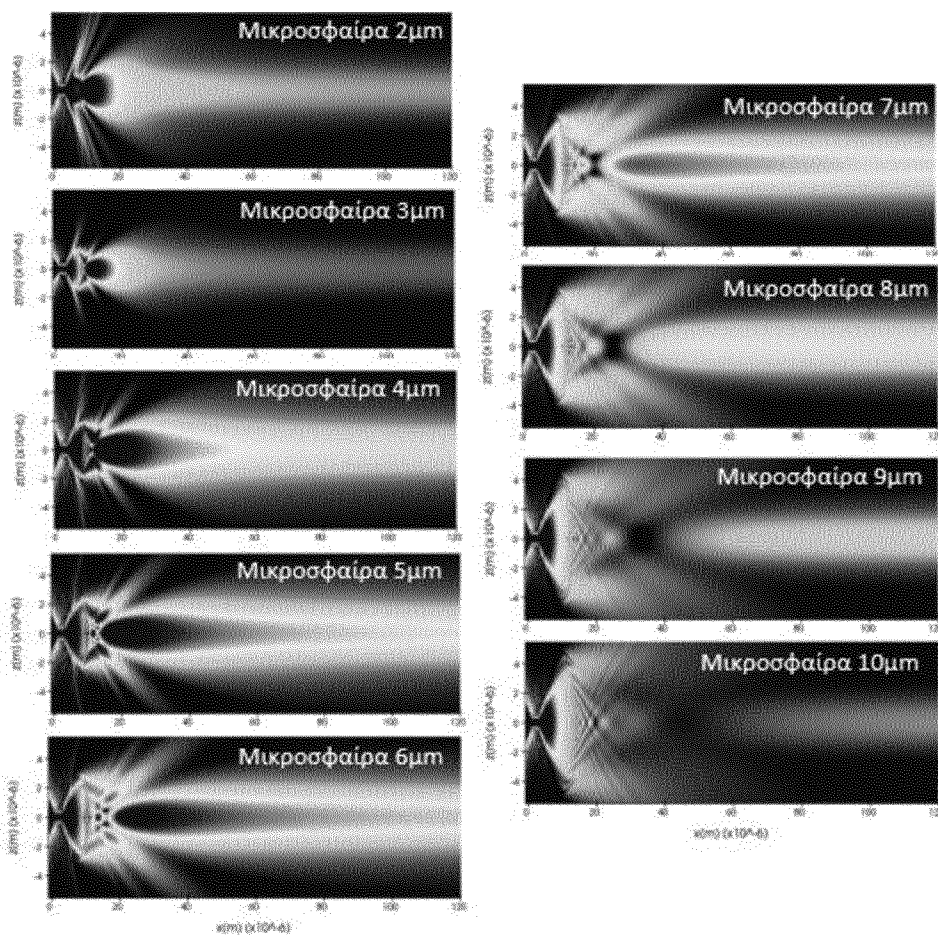
Σχήμα 8β



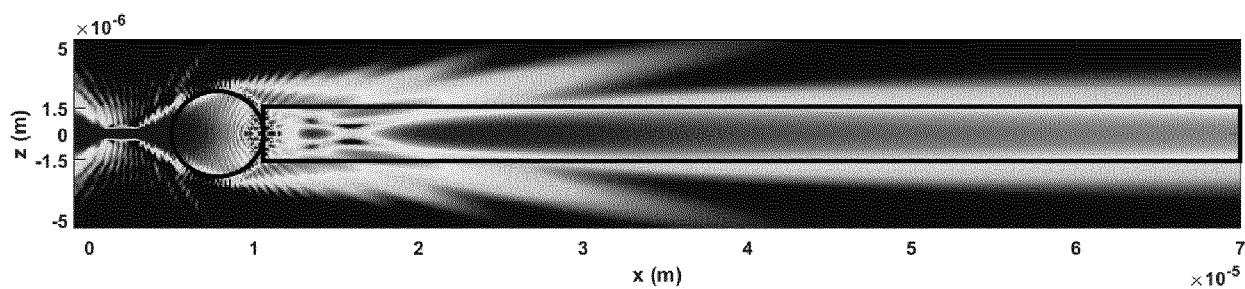
Σχήμα 8γ



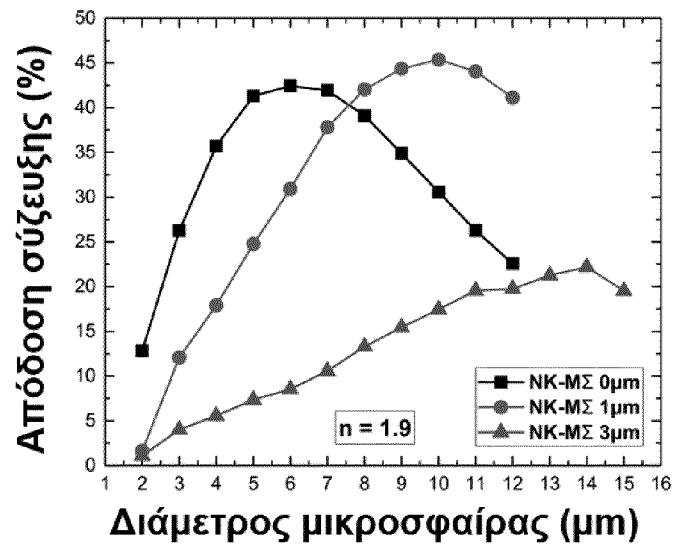
Σχήμα 9α



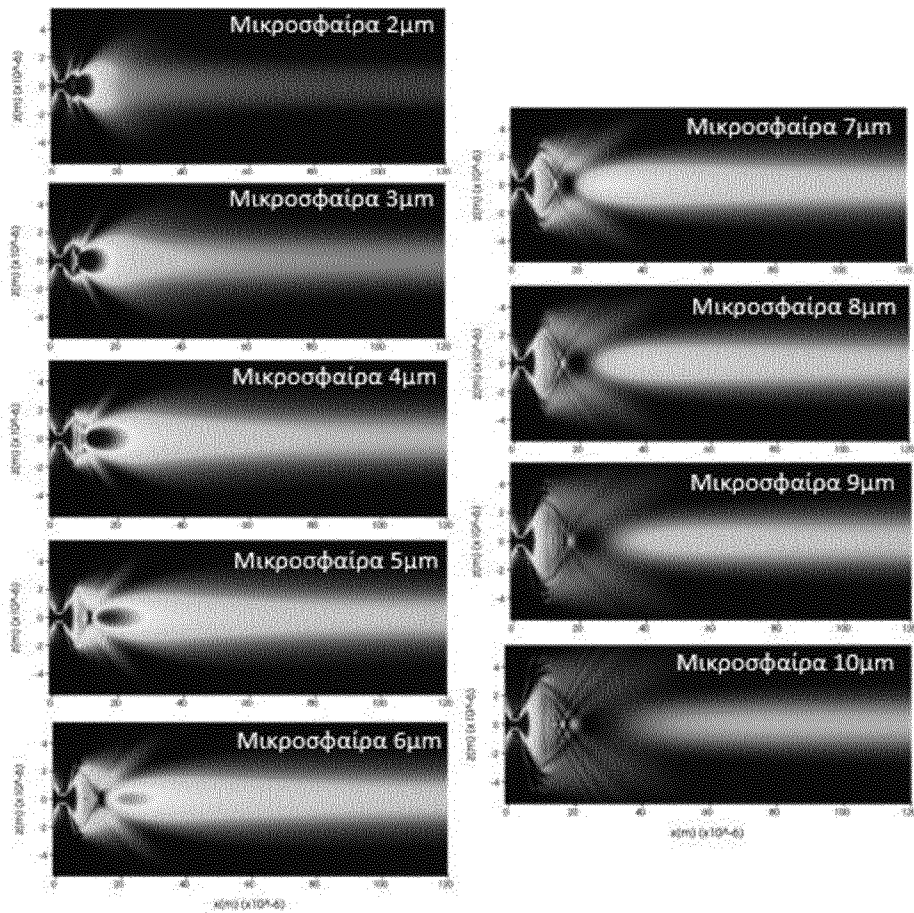
Σχήμα 9β



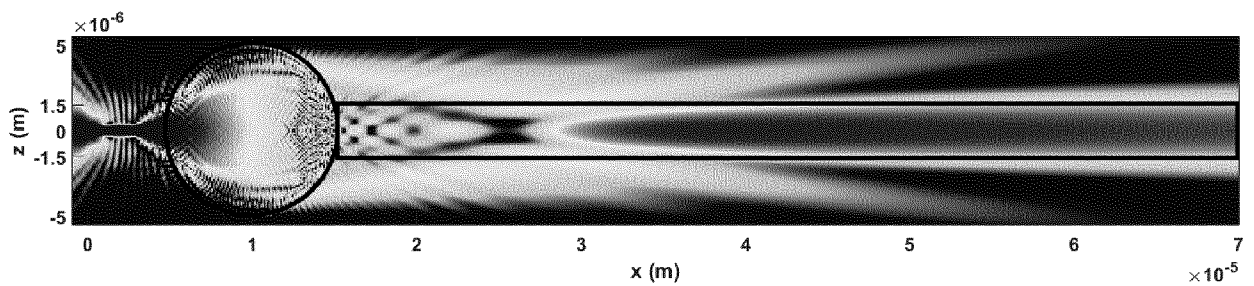
Σχήμα 9γ



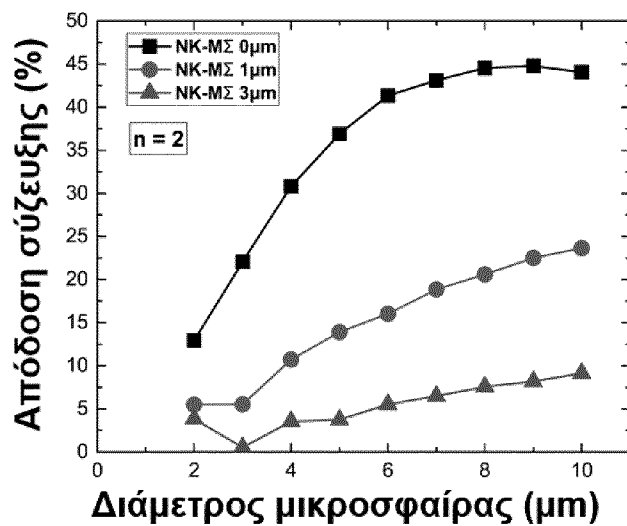
Σχήμα 10α



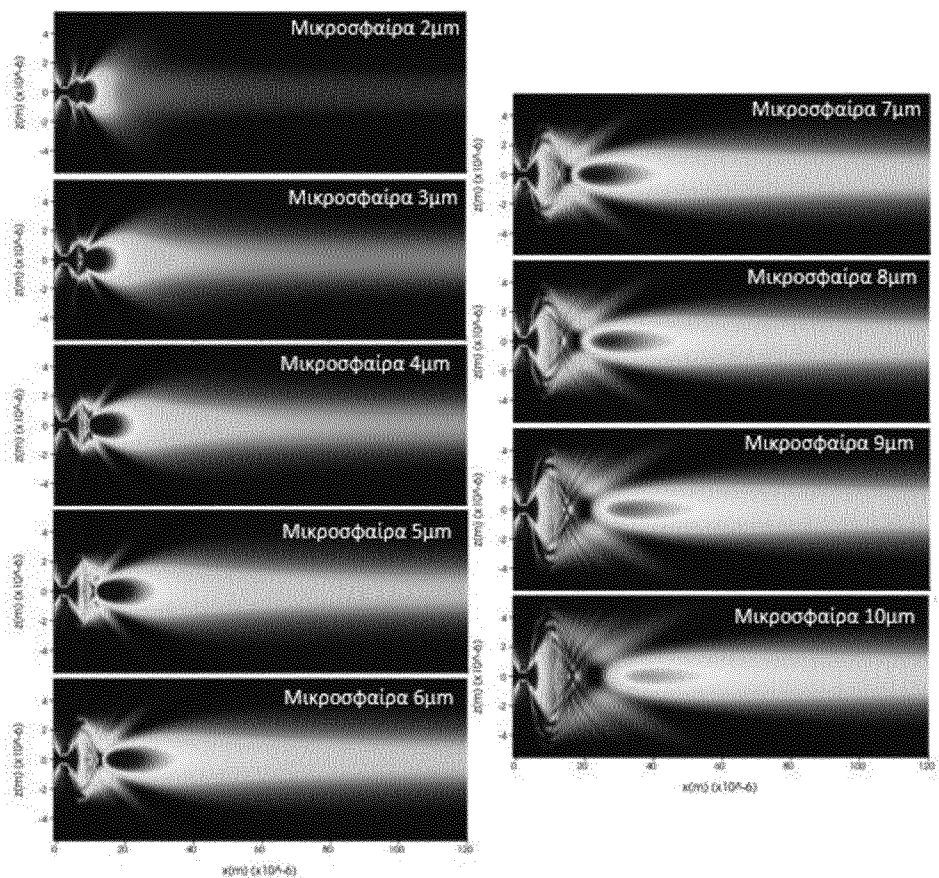
Σχήμα 10β



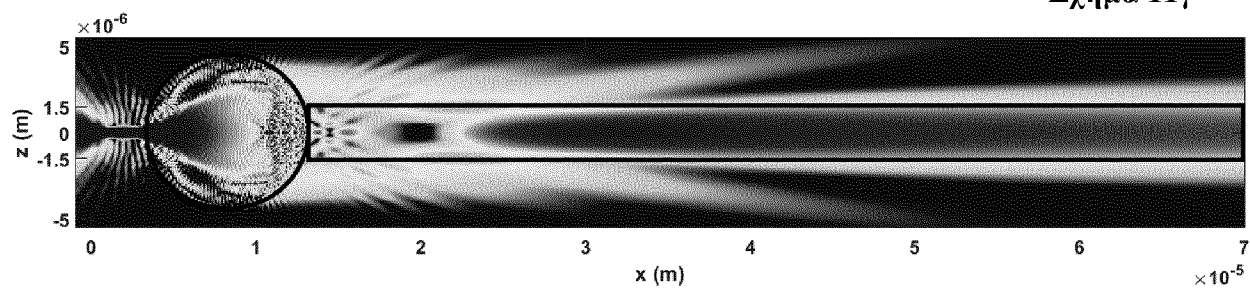
Σχήμα 10γ



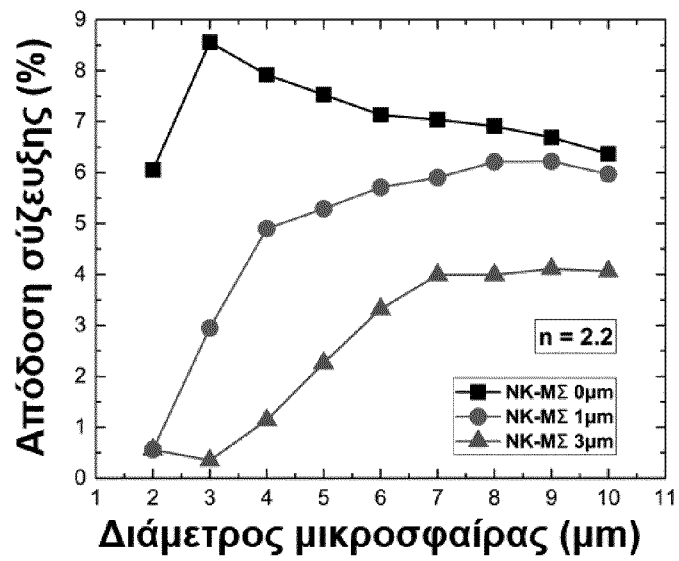
Σχήμα 11α



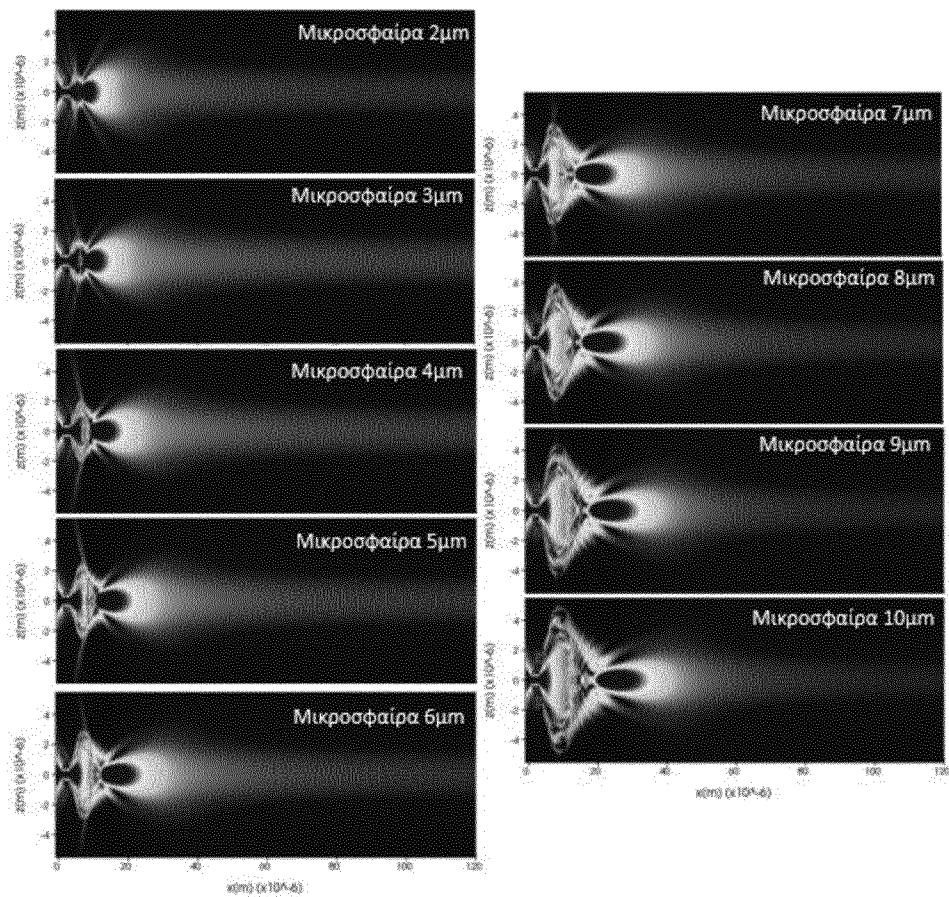
Σχήμα 11β



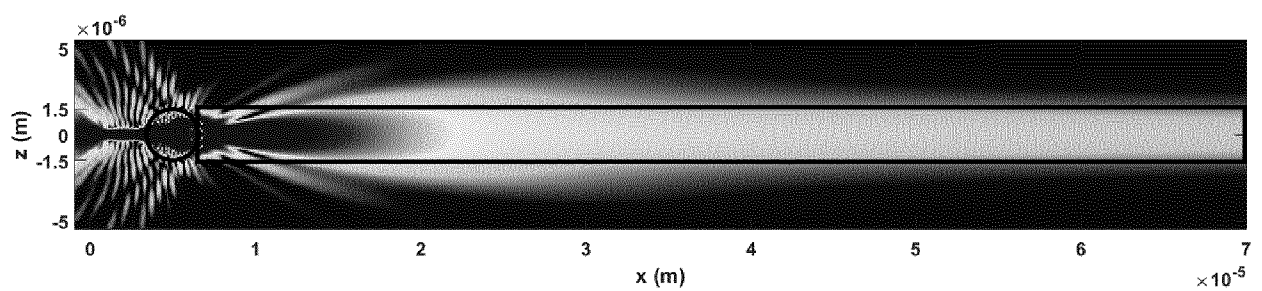
Σχήμα 11γ



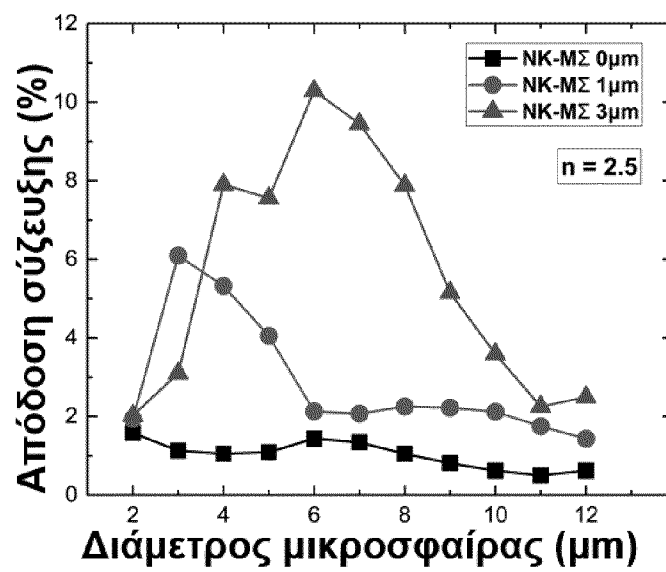
Σχήμα 12α



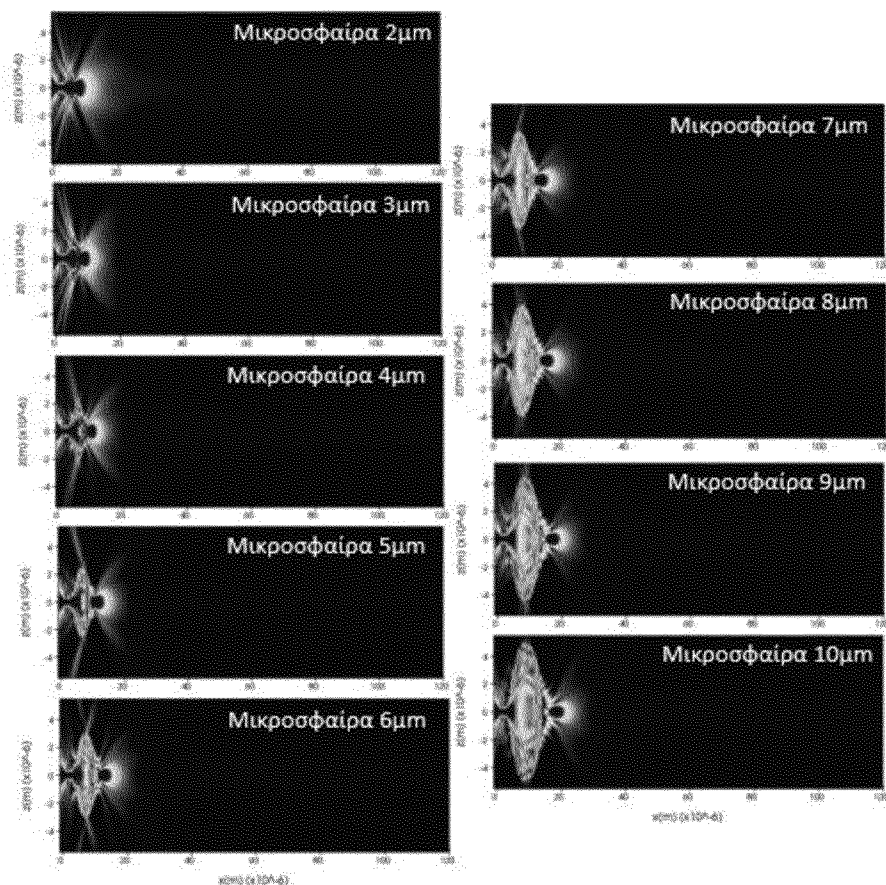
Σχήμα 12β



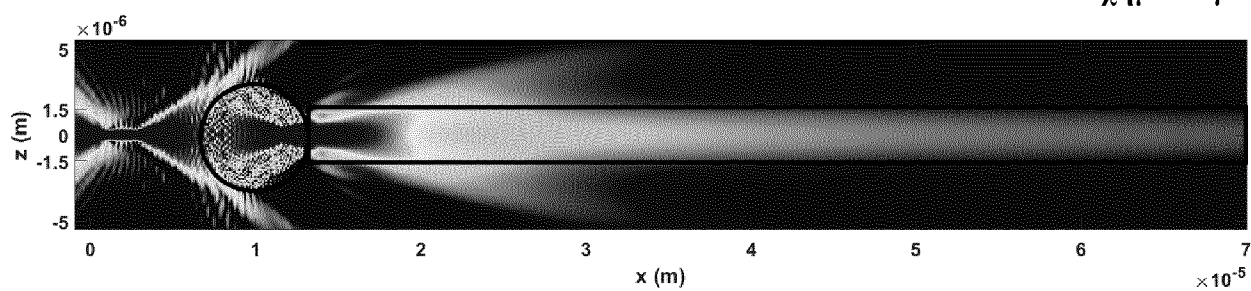
Σχήμα 12γ



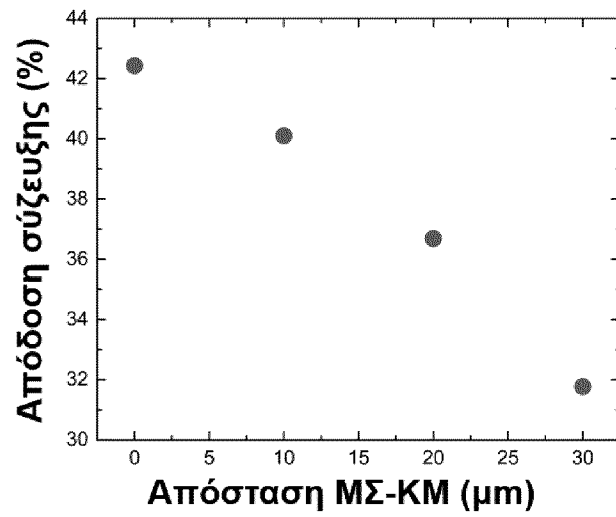
Σχήμα 13α



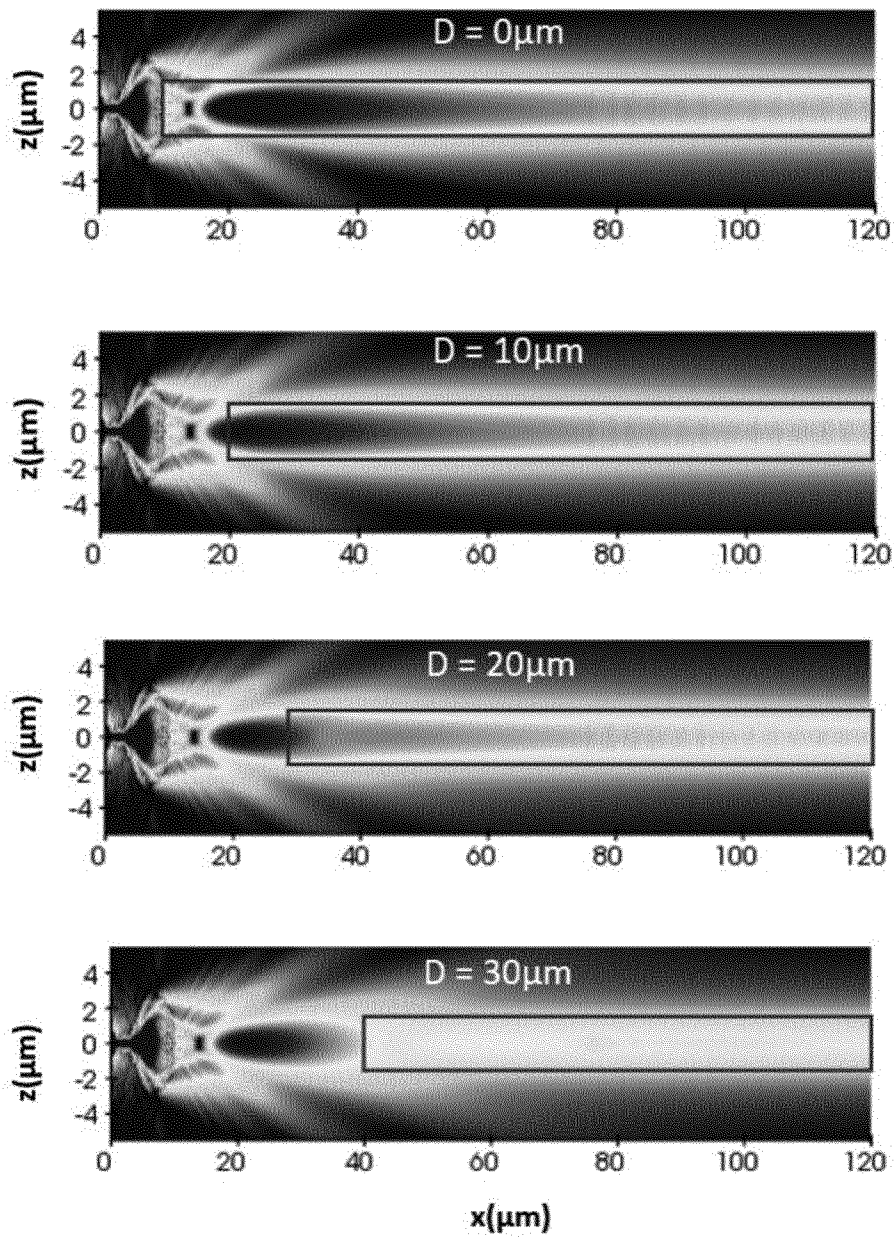
Σχήμα 13β



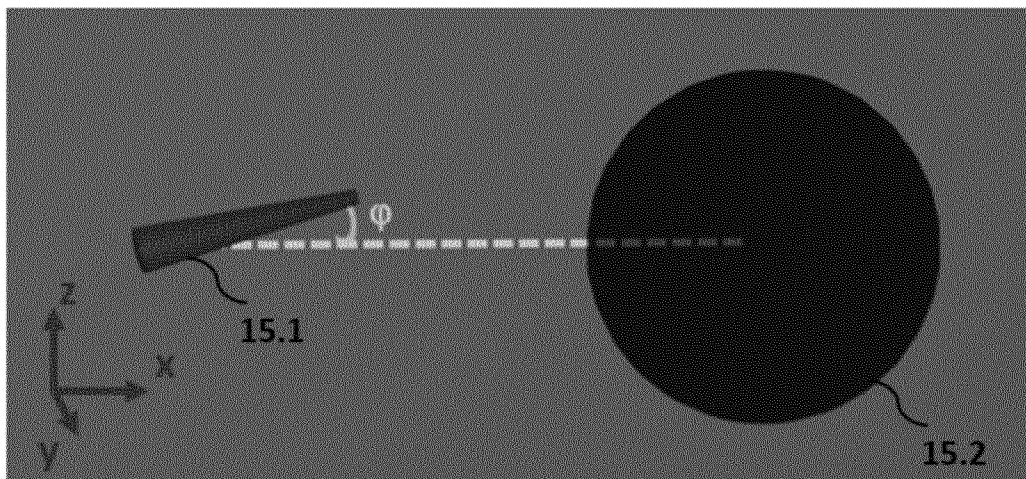
Σχήμα 13γ



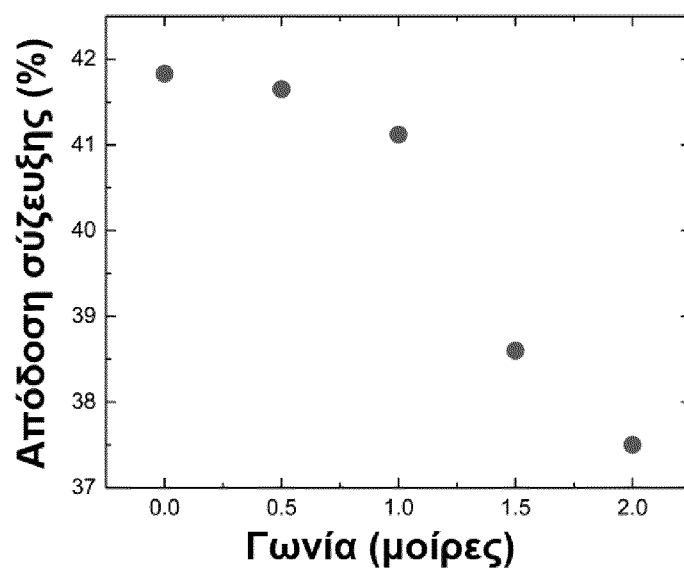
Σχήμα 14α



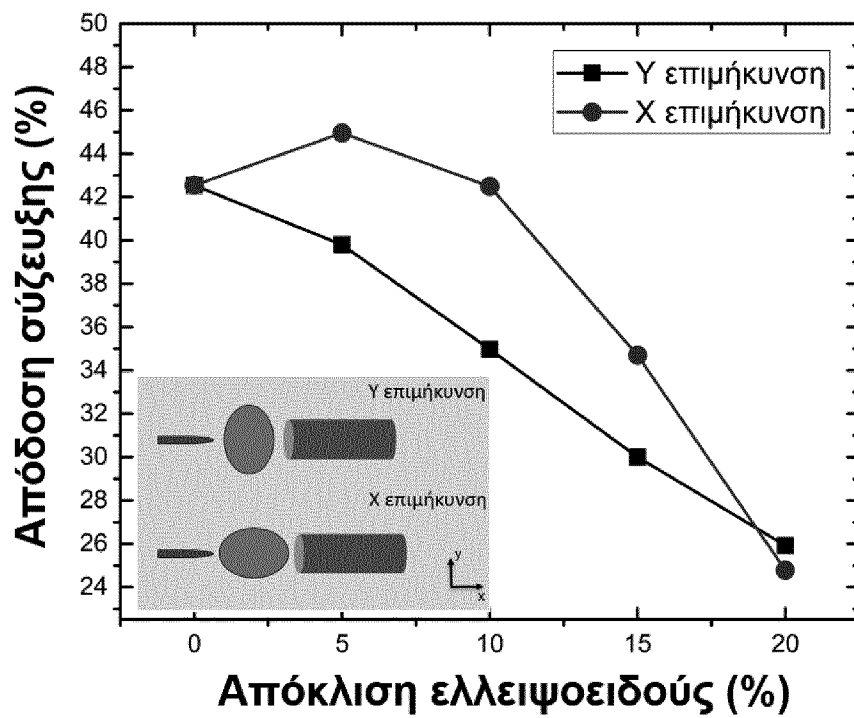
Σχήμα 14β



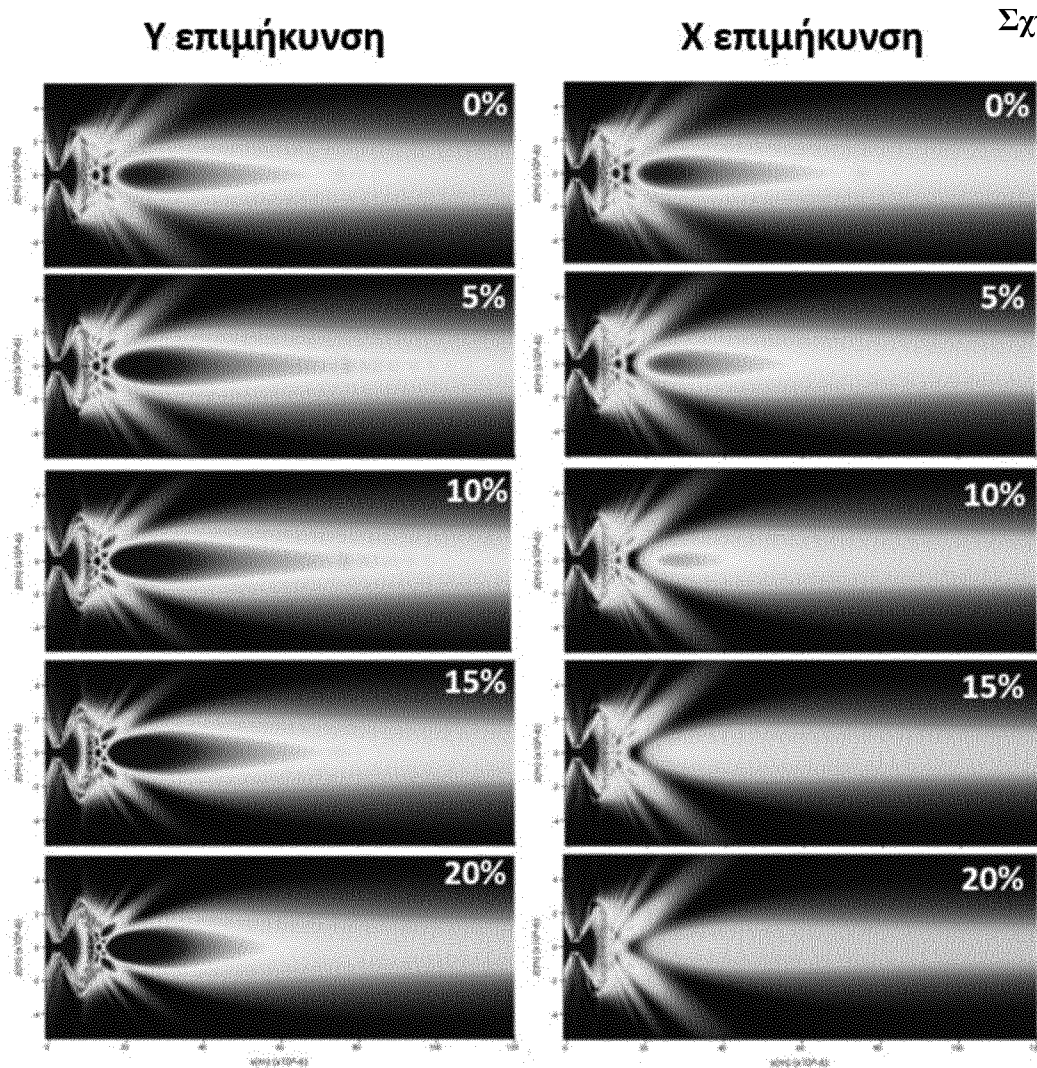
Σχήμα 15α



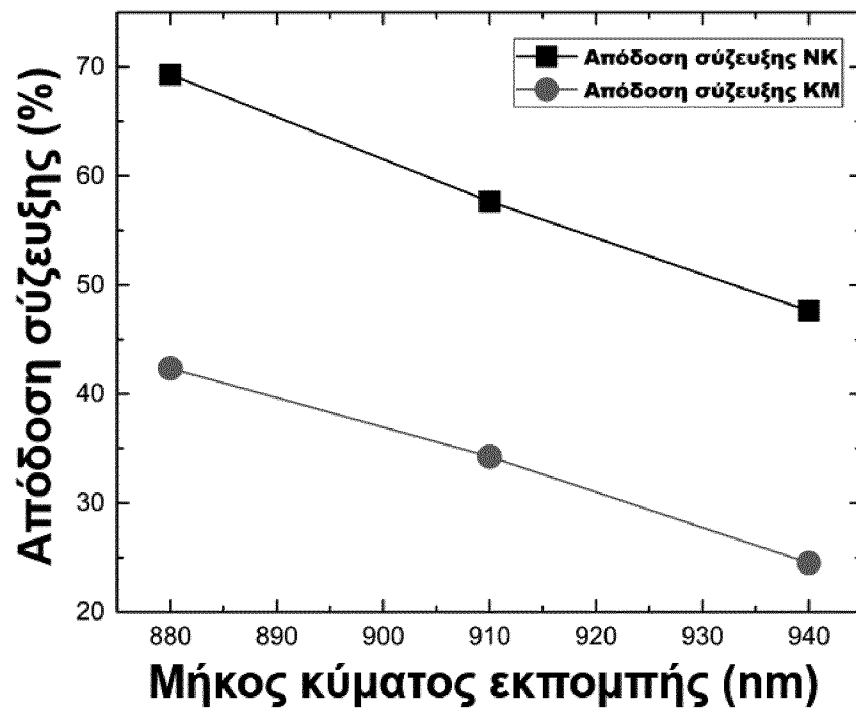
Σχήμα 15β



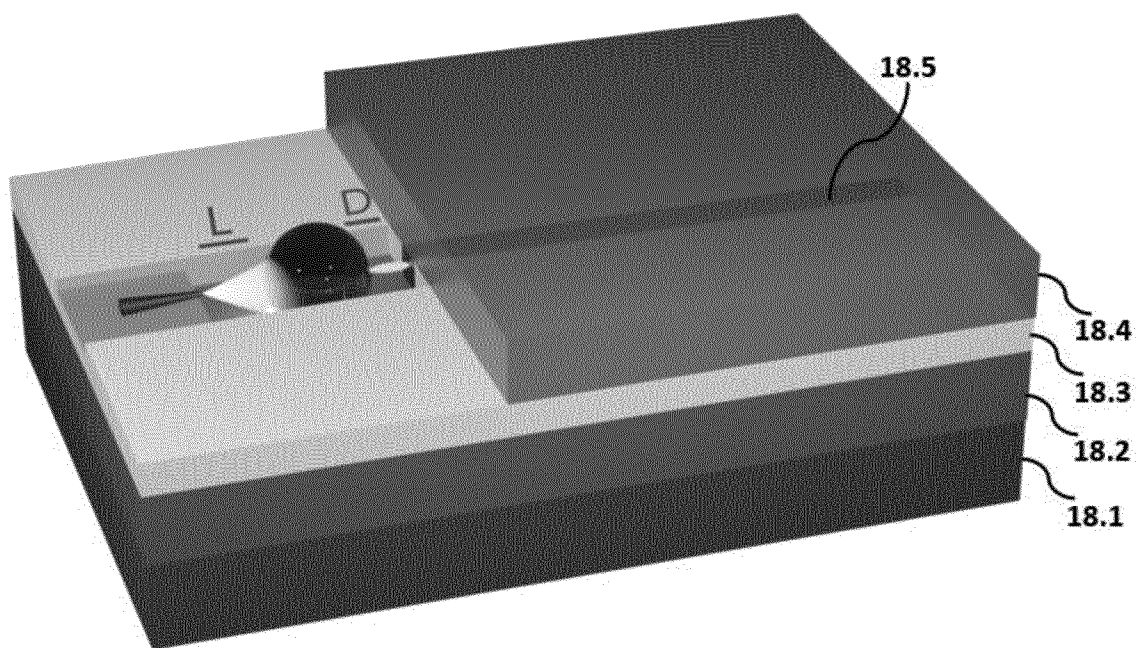
Σχήμα 16α



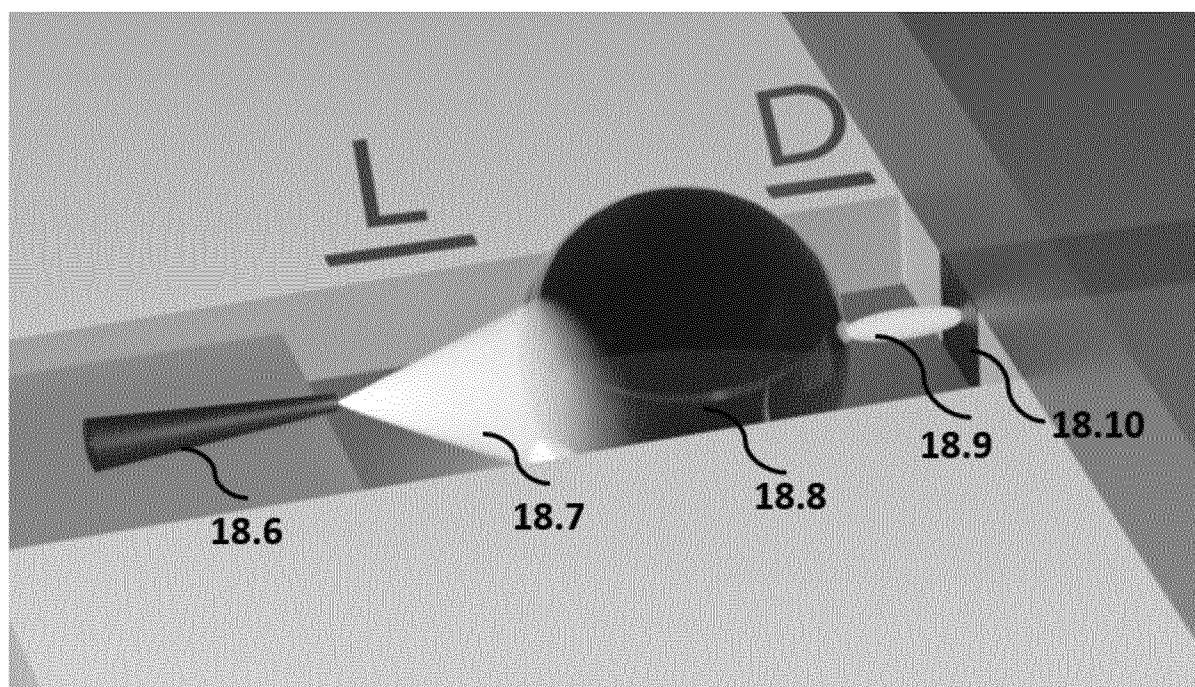
Σχήμα 16β



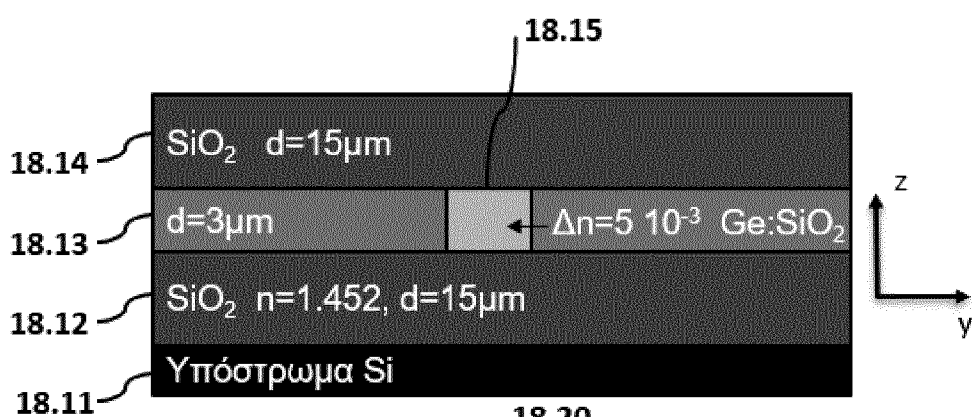
Σχήμα 17



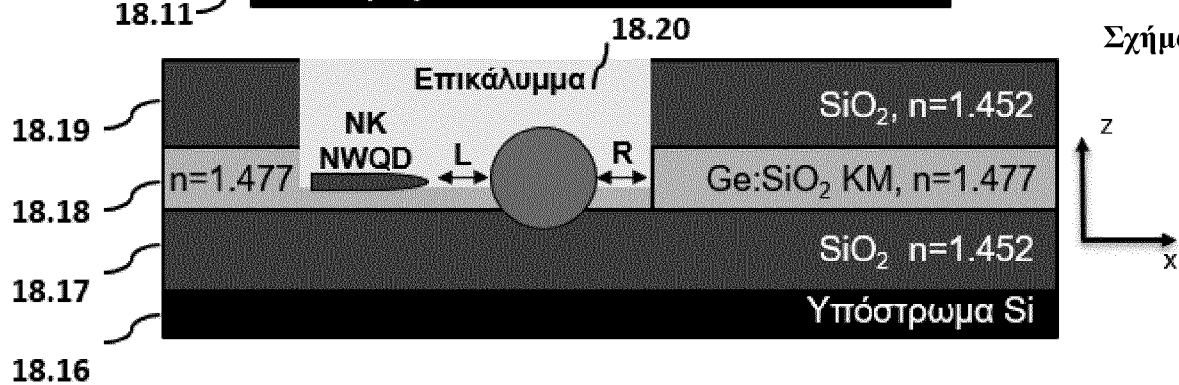
Σχήμα 18α



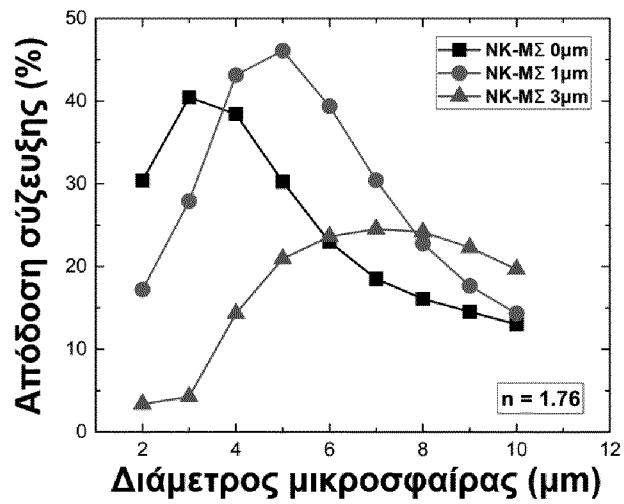
Σχήμα 18β



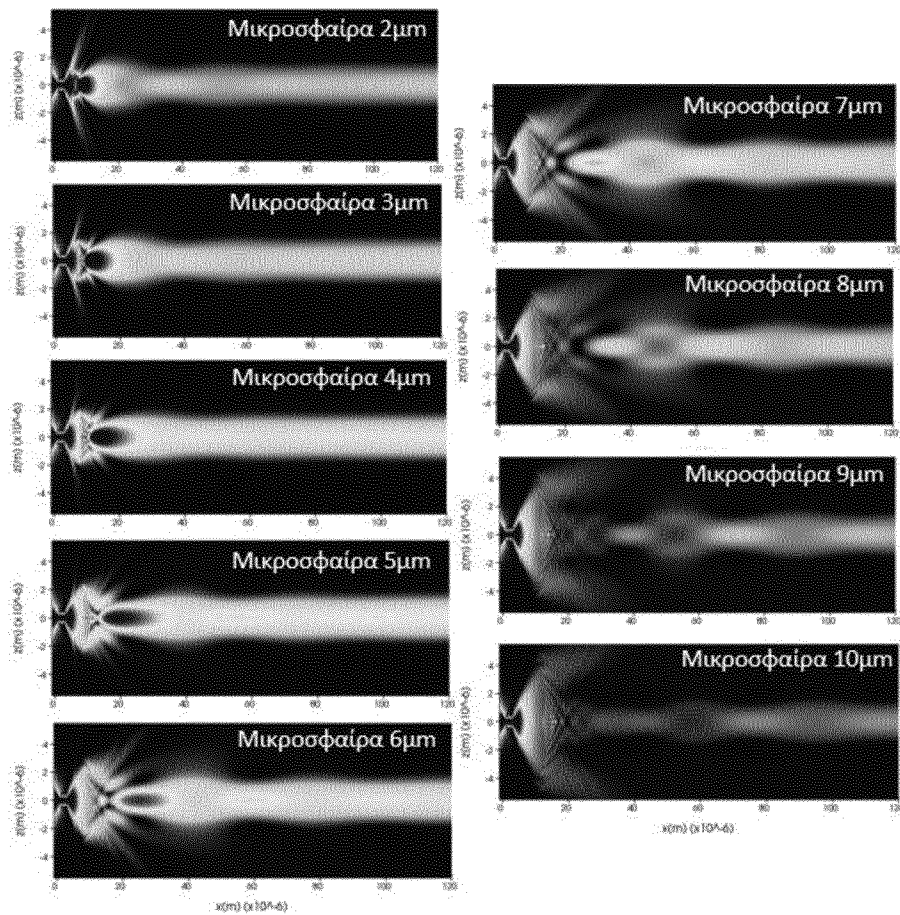
Σχήμα 18γ



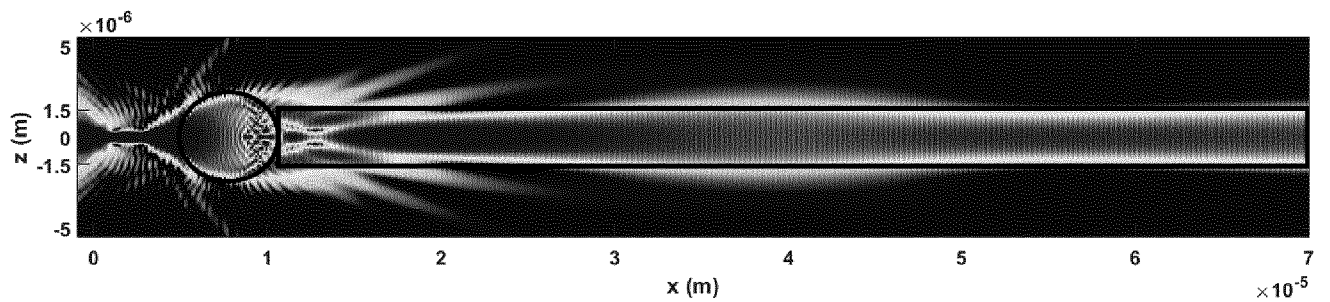
Σχήμα 18δ



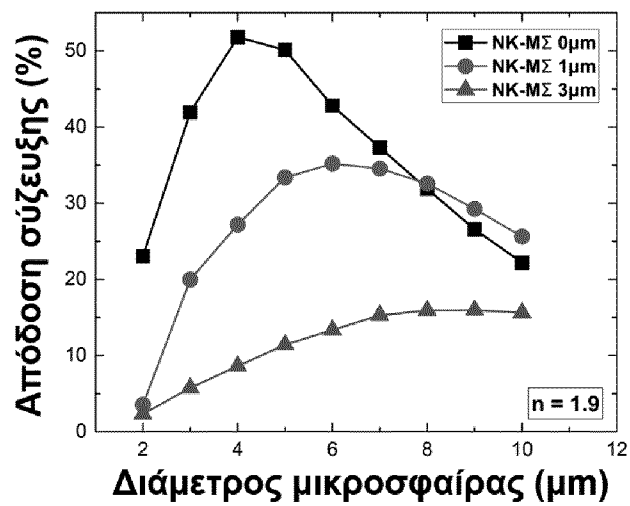
Σχήμα 19α



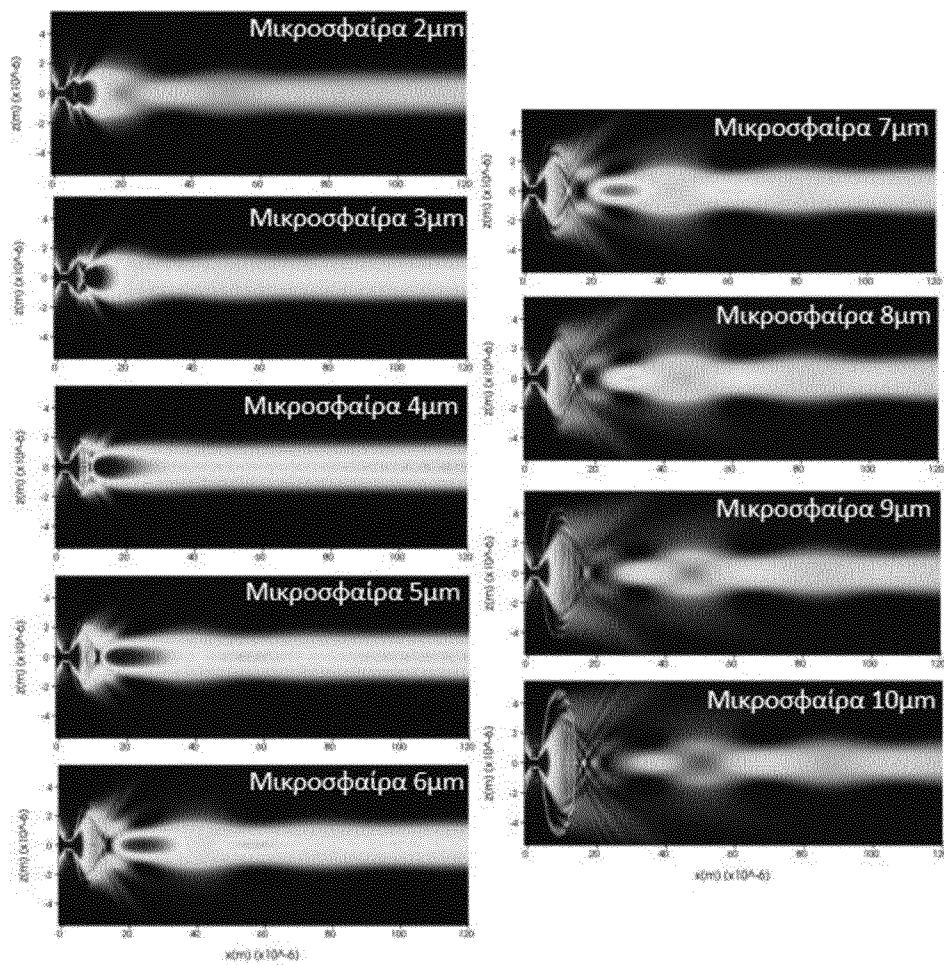
Σχήμα 19β



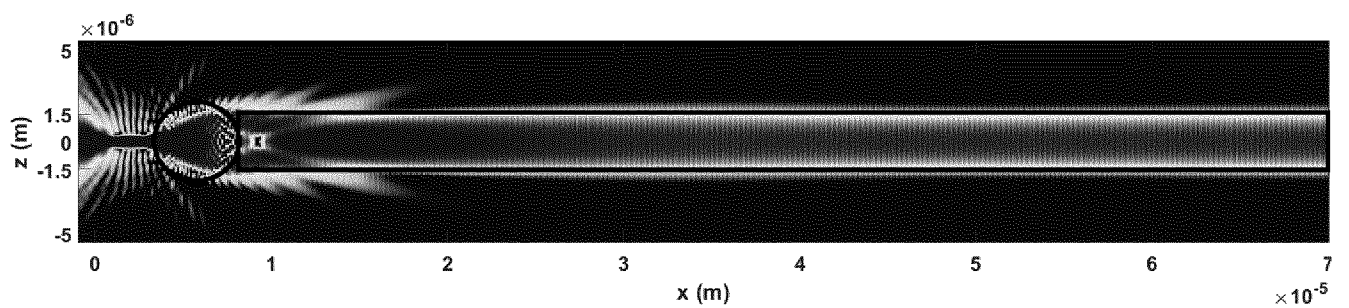
Σχήμα 19γ



Σχήμα 20α



Σχήμα 20β



Σχήμα 20γ



ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΙΔΙΟΚΤΗΣΙΑΣ
(Ο.Β.Ι.)

ΤΕΛΙΚΗ ΕΚΘΕΣΗ ΕΡΕΥΝΑΣ

Αριθμός αίτησης
20230100588

ΕΓΓΡΑΦΑ ΘΕΩΡΟΥΜΕΝΑ ΩΣ ΣΧΕΤΙΚΑ			
Κατηγορία	Σχετικό έγγραφο με επισήμανση, όπου χρειάζεται, των σχετικών παραγράφων	Σχετικό με αξίωση	Διεθν. Ταξινόμηση Int. Cl. 01/01/2025(AL)
A	XP034395036 / TSINTZOS SIMEON I ET AL 2/7/2023 "Design and Fabrication Challenges of Integrated Optical Circuits for Quantum Computing Applications", 2023 23RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON TRANSPARENT OPTICAL NETWORKS (ICTON), IEEE, σελίδες 1-4, DOI: 10.1109/ ICTON59386.2023.10207396 *σχέδια 1,3*	1-16	G02B 6/10
A	XP031306374 / YURY P RAKOVICH ET AL 22/6/2008 "Mode manipulation in small microsphere systems", TRANSPARENT OPTICAL NETWORKS, 2008. ICTON 2008, 10TH ANNIVERSARY INTERNATIONAL CONFERENCE ON, IEEE, PISCATAWAY, NJ, USA, σελίδες 23-26, ISBN: 978-1-4244-2625-6 *σελίδα 6, τελευταία παράγραφος*	1-16	Τεχνικά πεδία που ερευνήθηκαν
A	US2015/355227A1 / GLUCKSTAD JESPER 10/12/2015 *παράγραφοι [0130], [0131], σχέδια 8A, 8B*	1-16	G02B
A	CN105116491A / UNIV SOUTHEAST 2/12/2015 *σχέδιο 1*	1-16	
A	XP081134171 / MUHAMMAD RODLIN BILLAH ET AL 9/2/2018 "Hybrid intergration of silicon photonics circuits and InP lasers by photonic wire bonding",	1-16	
Ημερομηνία περάτωσης της έρευνας : 03/02/2025			
ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΔΗΛΟΥΜΕΝΩΝ ΕΓΓΡΑΦΩΝ			
X: ιδιαίτερα σχετικό αν ληφθεί μεμονωμένα Y: ιδιαίτερα σχετικό αν συνδυαστεί με άλλο έγγραφο της ίδιας κατηγορίας A: τεχνολογικό υπόβαθρο O: μη έγγραφη αποκάλυψη P: ενδιάμεσο έγγραφο		T: βασική θεωρία ή αρχή στην οποία βασίζεται η εφεύρεση E: προγενέστερο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας, το οποίο δημοσιεύτηκε την ημερομηνία κατάθεσης ή μετά από αυτήν D: έγγραφο αναφερόμενο στην αίτηση L: έγγραφο αναφερόμενο για άλλους λόγους B: μέλος της ίδιας οικογένειας ευρεσιτεχνιών, αντίστοιχο έγγραφο	

ΔΥΥ.1/Ε.21_Έκδοση05_140910

Ο.Β.Ι., ΠΑΝΤΑΝΑΣΣΗΣ 5, 151 25 ΠΑΡΑΔΕΙΣΟΣ ΑΜΑΡΟΥΣΙΟΥ - ΤΗΛ.: 2106183595 - FAX: 2106819231
<http://www.obl.gr>

ΣΤΑΦΥΛΑΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ
Διευθυντής Ελέγχου Τίτλων



ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΙΔΙΟΚΤΗΣΙΑΣ
(O.B.I.)

ΤΕΛΙΚΗ ΕΚΘΕΣΗ ΕΡΕΥΝΑΣ

Αριθμός αίτησης
20230100588

ΕΓΓΡΑΦΑ ΘΕΩΡΟΥΜΕΝΑ ΩΣ ΣΧΕΤΙΚΑ			
Κατηγορία	Σχετικό έγγραφο με επισήμανση, όπου χρειάζεται, των σχετικών παραγράφων	Σχετικό με αξίωση	Διεθν. Ταξινόμηση Int. Cl. 01/01/2025(AL)
A	ARXIV.ORG, CORNELL UNIVERSITY LIBRARY, 201 OLIN LIBRARY CORNELL UNIVERSITY ITHACA, NY 14853, DOI: 10.1364/OPTICA.5.000876 *σχέδιο 2*		
A	XP055358176 / ALEXANDER HEIFETZ ET AL 1/9/2009 "Photonic Nanojets", JOURNAL OF COMPUTATIONAL AND THEORETICAL NANOSCIENCE, τόμος 6, No 9, σελίδες 1979-1992, US, ISSN: 1546-1955, DOI: 10.1166/jctn.2009.1254 *περίληψη* *σελίδες 6-9*	1-16	G02B 6/10
A	XP060086358 / DARAFSHEH ARASH ET AL 16/2/2017 "Photonic nanojet properties of dielectric microcylinders", PROCEEDINGS OF SPIE, [PROCEEDINGS OF SPIE, ISSN: 0277-786X VOLUME 10524], SPIE, US, τόμος 10106, σελίδες 101061U-101061U, DOI: 10.1117/12.2252758 ISSN: 978-1-5106-1533-5 *περίληψη, σχέδιο 1*	1-16	Τεχνικά πεδία που ερευνήθηκαν G02B
Ημερομηνία περάτωσης της έρευνας : 03/02/2025			
ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΔΗΛΟΥΜΕΝΩΝ ΕΓΓΡΑΦΩΝ			
X: ιδιαίτερα σχετικό αν ληφθεί μεμονωμένα Y: ιδιαίτερα σχετικό αν συνδυαστεί με άλλο έγγραφο της ίδιας κατηγορίας A: τεχνολογικό υπόβαθρο O: μη έγγραφο αποκάλυψη P: ενδιάμεσο έγγραφο T: βασική θεωρία ή αρχή στην οποία βασίζεται η εφεύρεση E: προγενέστερο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας, το οποίο δημοσιεύτηκε την ημερομηνία κατάθεσης ή μετά από αυτήν D: έγγραφο αναφερόμενο στην αίτηση L: έγγραφο αναφερόμενο για άλλους λόγους S: μέλος της ίδιας οικογένειας ευρεσιτεχνιών, αντίστοιχο έγγραφο			

ΔΥΥ.1/Ε.21_Εκδοση05_140910

Ο.Β.Ι., ΠΑΝΤΑΝΑΣΣΗΣ 5, 151 25 ΠΑΡΑΔΕΙΣΟΣ ΑΜΑΡΟΥΣΙΟΥ - ΤΗΛ.: 2106183595 - FAX: 2106819231
<http://www.obl.gr>

ΣΤΑΦΥΛΑΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ
Διευθυντής Ελέγχου Τίτλων

ΑΙΤΙΟΛΟΓΗΜΕΝΗ ΓΝΩΜΗ

Αρ. φακέλου:	Ημερομηνία κατάθεσης (ημέρα/μήνας/έτος)	Ημερομηνία προτεραιότητας (ημέρα/μήνας/έτος)	Αρ. αίτησης: 20230100588
Διεθνής Ταξινόμηση Ευρεσιτεχνιών (IPC) G02B6/10			
Αιτών ΕΘΝΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΕΡΕΥΝΩΝ			

Η παρούσα γνώμη περιέχει επισημάνσεις αναφερόμενες στα ακόλουθα:

- ☒ Πλαίσιο αρ. I Θεμελίωση της γνώμης
- ☐ Πλαίσιο αρ. II Προτεραιότητα
- ☐ Πλαίσιο αρ. III Μη θεμελίωση της γνώμης όσον αφορά το νέον, το εφευρετικό βήμα και τη βιομηχανική εφαρμογή
- ☐ Πλαίσιο αρ. IV Έλλειψη ενότητας στην εφεύρεση
- ☒ Πλαίσιο αρ. V Αιτιολογημένη δήλωση αναφορικά με το νέον, το εφευρετικό βήμα ή τη βιομηχανική εφαρμογή· αναφορές και επεξηγήσεις της δήλωσης
- ☐ Πλαίσιο αρ. VI Ορισμένα αναφερόμενα έγγραφα
- ☒ Πλαίσιο αρ. VII Ορισμένες ελλείψεις στην αίτηση
- ☒ Πλαίσιο αρ. VIII Ορισμένες παρατηρήσεις στην αίτηση

3/9/2025

ΑΙΤΙΟΛΟΓΗΜΕΝΗ ΓΝΩΜΗ

Πλαίσιο αρ. I Θεμελίωση της παρούσας γνώμης

1. Η παρούσα γνώμη θεμελιώθηκε με βάση το τελευταίο αποδεκτό σύνολο αξιώσεων που κατατέθηκε πριν την έναρξη της Έρευνας/Τελικής Έκθεσης Έρευνας (Αρ. 8, παρ. 3 & 5Α, Ν.1733/1987)
2. Αναφορικά με αλληλουχίες νουκλεοτιδίων και/ή αμινοξέων οι οποίες αποκαλύπτονται στην αίτηση, η παρούσα γνώμη θεμελιώθηκε με βάση:
 - α. Τύπος του υλικού
 - ☐ κατάλογος αλληλουχιών
 - ☐ πίνακας(ες) αναφερόμενος(οι) στον κατάλογο αλληλουχιών
 - β. Διαμόρφωση του υλικού
 - ☐ έντυπη
 - ☐ σε ηλεκτρονική μορφή
 - γ. Χρόνος κατάθεσης/παροχής
 - ☐ περιέχεται στην αίτηση όπως κατατέθηκε
 - ☐ κατατέθηκε μαζί με την αίτηση σε ηλεκτρονική μορφή
 - ☐ παρασχέθηκε στη συνέχεια για την έρευνα
3. ☐ Επιπλέον, στην περίπτωση κατάθεσης ή παροχής καταλόγου αλληλουχιών και/ή πίνακα που αναφέρεται σ' αυτόν σε περισσότερες από μία εκδόσεις ή περισσότερα από ένα αντίγραφα, παρασχέθηκαν αναλόγως οι απαιτούμενες δηλώσεις ότι οι πληροφορίες στα επακόλουθα ή επιπρόσθετα αντίγραφα ταυτίζονται με αυτές στην αίτηση όπως κατατέθηκε ή ότι δεν επεκτείνονται πέραν της αίτησης όπως κατατέθηκε.
4. Επιπλέον σχόλια:

ΑΙΤΙΟΛΟΓΗΜΕΝΗ ΓΝΩΜΗ

Σχετικά με το Αντικείμενο V

Αιτιολογημένη γνώμη σχετικά με το νέο, το εφευρετικό βήμα ή τη βιομηχανική εφαρμογή· παραπομπές και επεξηγήσεις που δικαιολογούν τέτοια δήλωση

- 1 Γίνεται αναφορά στα ακόλουθα έγγραφα:
 - D1 TSINTZOS SIMEON I ET AL: "Design and Fabrication Challenges of Integrated Optical Circuits for Quantum Computing Applications", 2023 23RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON TRANSPARENT OPTICAL NETWORKS (ICTON), IEEE, 2 Ιουλίου 2023 (02-07-2023), σελίδες 1-4, XP034395036, DOI: 10.1109/ICTON59386.2023.1020796 [ανακτηθέν στις 08-08-2023]
 - D2 YURY P RAKOVICH ET AL: "Mode manipulation in small microsphere systems", TRANSPARENT OPTICAL NETWORKS, 2008. ICTON 2008. 10TH ANNIVERSARY INTERNATIONAL CONFERENCE ON, IEEE, PISCATAWAY, NJ, USA, 22 Ιουνίου 2008 (22-06-2008), σελίδες 23-36, XP031306374, ISBN: 978-1-4244-2625-6
 - D3 US 2015/355227 A1 (GLÜCKSTAD) 10 Δεκεμβρίου 2015
 - D4 CN 105 116 491 A (UNIV SOUTHEAST) 2 Δεκεμβρίου 2015
 - D5 MUHAMMAD RODLIN BILLAH ET AL: "Hybrid integration of silicon photonics circuits and InP lasers by photonic wire bonding", ARXIV.ORG, CORNELL UNIVERSITY LIBRARY, 201 OLIN LIBRARY CORNELL UNIVERSITY ITHACA, NY 14853, 9 Φεβρουαρίου 2018 (09-02-2018), XP081134171, DOI: 10.1364/OPTICA.5.000876,
 - D6 ALEXANDER HEIFETZ ET AL: "Photonic Nanojets", JOURNAL OF COMPUTATIONAL AND THEORETICAL NANOSCIENCE, vol. 6, no. 9, 1 Σεπτεμβρίου 2009 (01-09-2009), σελίδες 1979-1992, XP055358176, US ISSN: 1546-1955, DOI: 10.1166/jctn.2009.1254
 - D7 DARAFSHEH ARASH ET AL: "Photonic nanojet properties of dielectric microcylinders", PROCEEDINGS OF SPIE; [PROCEEDINGS OF SPIE ISSN 0277-786X VOLUME 10524], SPIE, US, vol. 10106, 16 Φεβρουαρίου 2017 (16-02-2017), σελίδες 101061U-101061U, XP060086358, DOI: 10.1117/12.2252758 ISBN: 978-1-5106-1533-5
- 2 Το D1 αποκαλύπτει με ιδιαίτερη αναφορά στα σχ. 1 και 3 ένα σύστημα σύζευξης φωτός (σχ. 1γ, σχ. 3β) που περιλαμβάνει νανοσύρμα (NWQD, λεζάντες των σχ. 1&3), ~~οπτικό-διηλεκτρικό μικροστοιχείο και οπτικό κυματοδηγό διαύλου («κυματοδηγός» λεζάντες των σχ. 1 & 3), όπου το οπτικό-διηλεκτρικό μικροστοιχείο είναι τοποθετημένο μεταξύ του νανοσύρματος και του οπτικού κυματοδηγού διαύλου και το οπτικό-διηλεκτρικό μικροστοιχείο είναι διαμορφωμένο να επιτρέπει τη σύζευξη φωτός μεταξύ του νανοσύρματος και του οπτικού κυματοδηγού διαύλου μέσω των διαδοχικών σταδίων: εκτόξευση φωτός από το νανοσύρμα, φωτισμό του οπτικού-διηλεκτρικού μικροστοιχείου με το εν λόγω φως προκειμένου να παραχθεί φωτονικός νανοπίδακας, και τέλος εκτόξευση του εν λόγω εκπεμφθέντος φωτονικού νανοπίδακα μέσα σε οπτικό κυματοδηγό διαύλου προκειμένου να διεγερθούν~~

ΑΙΤΙΟΛΟΓΗΜΕΝΗ ΓΝΩΜΗ

υποστηριζόμενοι από οπτικό κυματοδηγό διαύλου ιδιοτρόποι και να διευκολυνθεί η σύζευξη φωτός.

Το αντικείμενο της αξίωσης 1 διαφέρει ως εκ τούτου από αυτό το γνωστό σύστημα σύζευξης φωτός κατά τη διαγραφέντα χαρακτηριστικά:

- (i) προβλέπεται οπτικό διηλεκτρικό μικροστοιχείο
- (ii) το οπτικό διηλεκτρικό μικροστοιχείο είναι τοποθετημένο μεταξύ του νανοσύρματος και του οπτικού κυματοδηγού διαύλου
- (iii) σύζευξη φωτός μεταξύ του νανοσύρματος και του κυματοδηγού διαύλου καθίσταται δυνατή μέσω των ακόλουθων σταδίων: εκτόξευση φωτός από το νανοσύρμα, φωτισμό του οπτικού διηλεκτρικού μικροστοιχείου με το εν λόγω φως προκειμένου να παραχθεί φωτονικός νανοπίδακας, και τέλος εκτόξευση του εν λόγω εκπεμφθέντος φωτονικού νανοπίδακα μέσα σε οπτικό κυματοδηγό διαύλου προκειμένου να διεγερθούν υποστηριζόμενοι από οπτικό κυματοδηγό διαύλου ιδιοτρόποι και να διευκολυνθεί η σύζευξη φωτός.

Το αντικείμενο της αξίωσης 1 είναι ως εκ τούτου νέο.

- 3 Το αντικείμενο της αξίωσης 1 διαφέρει από το D3 (σχ. 8A: νανοσύρματα 150, οπτικό διηλεκτρικό μικροστοιχείο 1404, κυματοδηγός 1406. Σύμφωνα με το D3 [0130], το οπτικό διηλεκτρικό μικροστοιχείο 1404 είναι στοιχείο διαφυγής φωτονίων, σύμφωνα με την αξίωση 1 είναι στοιχείο εισαγωγής φωτονίων) κατά τα χαρακτηριστικά (iii).
- 4 Το αντικείμενο της αξίωσης 1 διαφέρει από το D3 (σχ. 8B: νανοσύρματα 150a, 150b, οπτικό διηλεκτρικό μικροστοιχείο 804, κυματοδηγός 1406. Σύμφωνα με το D3 [0131], το οπτικό διηλεκτρικό μικροστοιχείο 804 είναι δικατευθυνόμενο στοιχείο σύζευξης) κατά τα χαρακτηριστικά (iii).
- 5 Το αντικείμενο της αξίωσης 1 διαφέρει από το D4 (σχ. 1: νανοσύρμα 1, οπτικό διηλεκτρικό μικροστοιχείο 2, κυματοδηγός 3) κατά τα χαρακτηριστικά (iii).
- 6 Το αντικείμενο της αξίωσης 1 διαφέρει από το D5 (σχ. 2: νανοσύρματα «Si νανοσύρμα», οπτικό διηλεκτρικό μικροστοιχείο «Si κώνος», κυματοδηγός «WG τμήμα») κατά τα χαρακτηριστικά (iii).
- 7 Καθένα των D1, D3 σχ. 8B και D4 θα μπορούσε να θεωρηθεί ως η εγγύτερη στάθμη της τεχνικής (D3 σχ. 8A και D5 αποκλίνουν περισσότερο καθώς λειτουργούν στην αντίθετη κατεύθυνση), ενώ η λειτουργικότητα και η διαμόρφωση του D1 υποδεικνύει ότι αυτό είναι η εγγύτερη.
- 8 Το πρόβλημα προς επίλυση από την παρούσα εφεύρεση μπορεί να θεωρηθεί ως η βελτίωση της σύζευξης μεταξύ νανοσύρματος και κυματοδηγού, καθώς το τεχνικό αποτέλεσμα είναι ότι ο φωτονικός νανοπίδακας επιτρέπει περισσότερο φως να

ΑΙΤΙΟΛΟΓΗΜΕΝΗ ΓΝΩΜΗ

συζευχθεί από το νανοσύρμα στον κυματοδηγό μέσω επαγωγής κατάλληλων συνθηκών εκτόξευσης και έτσι επιτρέπει ορθή διέγερση των καθοδηγούμενων τρόπων κυματοδηγού, δείτε για παράδειγμα τα σχήματα αποτελεσματικότητας σύζευξης στην παρούσα αίτηση και τη σελίδα 5, σειρές 26-30.

- 9 Η λύση σε αυτό το πρόβλημα όπως προτείνεται στην αξίωση 1 της παρούσας αίτησης θεωρείται ότι ενέχει εφευρετικό βήμα για τους ακόλουθους λόγους. Όπως αναγνωρίζεται στην παρούσα αίτηση, είναι γνωστό στη στάθμη της τεχνικής πως να δημιουργηθούν φωτονικοί νανοπίδακες με χρήση οπτικών διηλεκτρικών μικροστοιχείων, όπως μικροσφαιριδίου. Δείτε για παράδειγμα D2, D6 και D7. Ωστόσο, τα D1-D4 δεν υποδεικνύουν παροχή πεδίου φωτός του τύπου φωτονικού νανοπίδακα ούτε τα D2, D6 και D7 διδάσκουν σύζευξη νανοσύρματος με κυματοδηγό. Το D6 αποκαλύπτει πολυάριθμες εφαρμογές φωτονικών νανοπιδάκων στις σελίδες 6-9, ωστόσο καμία δεν σχετίζεται με νανοσύρματα και κυματοδηγούς. Το D2 είναι το εγγύτερο, και αποκαλύπτει στην τελευταία σελίδα, στην ενότητα Συμπερασμάτων:
- «Οι φωτονικοί νανοπίδακες θα επιτρέψουν σύζευξη φωτός από την PM σε άλλη φωτονική μικρο ή νανοδομή όπως συζευγμένους συντονισμένους οπτικούς κυματοδηγούς ή νανοδομές όπως νανοομοαξονικά καλώδια [14], τα οποία είναι οπτικοί κυματοδηγοί υπό του μήκους κύματος»
- Αυτό ωστόσο είναι τόσο ασαφής διδαχή για τον εκπαιδευμένο που με τις γνώσεις εκείνης της στιγμής δεν θα έπαιθε τον εκπαιδευμένο να συνδυάσει ως κάτι προφανές τα D1 και D2 για να καταλήξει στο αντικείμενο της αξίωσης 1.
- 10 Οι αξιώσεις 2-6 εξαρτώνται από μία ή περισσότερες ανεξάρτητες αξιώσεις των οποίων το αντικείμενο θεωρείται ως νέο και εφευρετικό, όπως σχολιάστηκε παραπάνω, και ως εκ τούτου οι εν λόγω εξαρτημένες αξιώσεις επίσης πληρούν τις απαιτήσεις σε σχέση με το νέο και το εφευρετικό βήμα.

Σχετικά με το Αντικείμενο VII **Ορισμένες ατέλειες στη διεθνή αίτηση**

- 11 Η σχετική τεχνική υποβάθρου όπως αποκαλύπτεται στα D1-D7 δεν αναφέρεται στην περιγραφή, ούτε αυτά τα έγγραφα ταυτοποιούνται εντός αυτής.
- 12 Τα χαρακτηριστικά των αξιώσεων δίδονται χωρίς σημεία αναφοράς εντός παρενθέσεων.

Σχετικά με το Αντικείμενο VIII **Ορισμένες παρατηρήσεις πάνω στη διεθνή αίτηση**

- 13 Η περιγραφή της εφεύρεσης στη σελίδα 4, σειρές 10-14 καθώς και στη σελίδα 9, σειρές 8-11 δεν συμφωνούν με την εφεύρεση της αξίωσης 1, καθώς η διατύπωση και τα χαρακτηριστικά διαφέρουν.