

Οργανισμός
Βιομηχανικής
Ιδιοκτησίας (ΟΒΙ)



(21) Αριθμός αίτησης:

GR 20230101081

(12)

ΔΙΠΛΩΜΑ ΕΥΡΕΣΙΤΕΧΝΙΑΣ (B)

(47) Ημ/νία Δημοσίευσης: 06.02.2025

(51) Διεθνής Ταξινόμηση (Int. Cl.):

(11) Αριθμός Χορήγησης: 1010873

G01N 21/552 (2024.01)

G01N 21/77 (2024.01)

(22) Ημ/νία Κατάθεσης: 28.12.2023

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

(73) Δικαιούχος (οι):

(71) Αρχικός (οί) Καταθέτης (ες):

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ-
ΕΙΔΙΚΟΣ ΛΟΓΑΡΙΑΜΟΣ ΚΟΝΔΥΛΙΩΝ ΕΡΕΥΝΑΣ; ΚΕΔΕΑ
3ης Σεπτεμβρίου, 54636 ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ (ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ) -
GR. ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ-ΕΙΔΙΚΟΣ ΛΟΓΑΡΙΑΣΜΟΣ
ΚΟΝΔΥΛΙΩΝ ΕΡΕΥΝΑΣ; Πανεπιστημιούπολη, 45110
ΙΩΑΝΝΙΝΑ - GR.

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ-
ΕΙΔΙΚΟΣ ΛΟΓΑΡΙΑΜΟΣ ΚΟΝΔΥΛΙΩΝ ΕΡΕΥΝΑΣ; ΚΕΔΕΑ
3ης Σεπτεμβρίου, 54636 ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ (ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ) -
GR. ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ-ΕΙΔΙΚΟΣ ΛΟΓΑΡΙΑΣΜΟΣ
ΚΟΝΔΥΛΙΩΝ ΕΡΕΥΝΑΣ; Πανεπιστημιούπολη, 45110
ΙΩΑΝΝΙΝΑ - GR.

(72) Εφευρέτης (ες):

ΠΛΕΡΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ; , GR. ΣΠΑΣΟΠΟΥΛΟΣ
ΔΗΜΟΣΘΕΝΗΣ; , GR. ΧΑΤΖΗΝΑΓΝΩΣΤΟΥ ΕΥΑΓΓΕΛΙΑ;
, GR. ΛΟΙΔΩΡΙΚΗΣ ΕΛΕΥΘΕΡΙΟΣ; , GR. ΛΑΜΠΑΔΑΡΙΟΥ
ΕΛΕΥΘΕΡΙΑ; , GR.

(74) Πληρεξούσιος:

ΠΕΤΣΗΣ ΧΡΗΣΤΟΣ; Κυπριασσίας 4-6, 54249 ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
(ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ).

(54) Τίτλος (Ελληνικά)

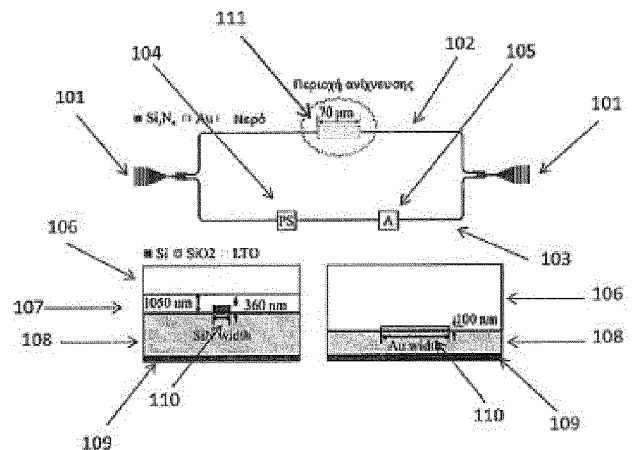
ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΚΗ ΟΠΤΙΚΗ ΣΥΣΚΕΥΗ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΗ ΣΕ ΦΩΤΟΝΙΚΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ

(54) Τίτλος (Αγγλικά)

OPTICAL INTERFEROMETRIC SENSING DEVICE IN PHOTONIC INTEGRATED CIRCUITS

(57) Περίληψη

Η εφεύρεση αφορά μια συμβολομετρική συσκευή ανίχνευσης οπτικού κυματοδηγού ολοκληρωμένη σε συστήματα φωτονικών κυκλωμάτων που αποτελείται από ένα στρώμα κυματοδηγού προορισμένο να λαμβάνει ένα οπτικό σήμα και να κυματοδηγεί το εν λόγω οπτικό σήμα σύμφωνα με έναν προκαθορισμένο οπτικό τρόπο διάδοσης, καθώς επίσης και μία επιφάνεια ενός μέσου δοκιμής σε επικοινωνία με το στρώμα κυματοδηγού το οποίο ανταποκρίνεται στο μέσο δοκιμής για να τροποποιεί τουλάχιστον ένα χαρακτηριστικό του οδηγούμενου οπτικού σήματος σε σχέση με μία δοθείσα παράμετρο του εν λόγω μέσου δοκιμής, μέσω του οποίου το τροποποιημένο χαρακτηριστικό του οδηγούμενου οπτικού σήματος καθίσταται μετρήσιμο εν όψει του προσδιορισμού της δοθείσας παραμέτρου του εν λόγω μέσου δοκιμής, όπου είναι αξιοσημείωτη από το ότι η ανωτέρω συσκευή περιλαμβάνει βιοαισθητήρες, αντιστοίχως φωτονικά και πλασμονικά στοιχεία (101, 102, 111) σε ειδικά σχεδιασμένα συμβολόμετρα MZI (101), ιδιαίτερα επιπέδους πλασμονικούς κυματοδηγούς (111), οι οποίοι είναι μονολιθικά ολοκληρωμένοι σε ολοκληρωμένα φωτονικά κυκλώματα, και από το ότι περιλαμβάνει πλασμονικούς κυματοδηγούς με φράγματα περίθλασης Bragg (402, 502, 602, 609), οι οποίοι είναι κοινά ολοκληρωμένοι με φωτονικούς κυματοδηγούς (102, 605, 606), και αποτελούνται από ολοκληρωμένους κυματοδηγούς όπου ένας μηχανισμός καθυστέρησης του φωτός ενσωματώνεται στη συσκευή και χρησιμοποιείται μέσω φραγμάτων περίθλασης Bragg (602) έτσι ώστε να ενισχύσει την ευαισθησία σε πρωτοφανή επίπεδα διατηρώντας μικρά μήκη μορφοτροπεία.



GR 20230101081 GR 1010873

ΠΕΡΙΛΗΨΗ**Τίτλος : ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΚΗ ΟΠΤΙΚΗ ΣΥΣΚΕΥΗ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΗ ΣΕ
ΦΩΤΟΝΙΚΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ**

5

Η εφεύρεση αφορά μια συμβολομετρική συσκευή ανίχνευσης οπτικού κυματοδηγού ολοκληρωμένη σε συστήματα φωτονικών κυκλωμάτων που αποτελείται από ένα στρώμα κυματοδηγού προορισμένο να λαμβάνει ένα οπτικό σήμα και να κυματοδηγεί το εν λόγω οπτικό σήμα σύμφωνα με έναν προκαθορισμένο οπτικό τρόπο διάδοσης, καθώς επίσης και μία επιφάνεια ενός μέσου δοκιμής σε επικοινωνία με το στρώμα κυματοδηγού το οποίο ανταποκρίνεται στο μέσο δοκιμής για να τροποποιεί τουλάχιστον ένα χαρακτηριστικό του οδηγούμενου οπτικού σήματος σε σχέση με μία δοθείσα παράμετρο του εν λόγω μέσου δοκιμής, μέσω του οποίου το τροποποιημένο χαρακτηριστικό του οδηγούμενου οπτικού σήματος καθίσταται μετρήσιμο εν όψει του προσδιορισμού της δοθείσας παραμέτρου του εν λόγω μέσου δοκιμής, όπου είναι αξιοσημείωτη από το ότι η ανωτέρω συσκευή περιλαμβάνει βιοαισθητήρες, αντιστοίχως φωτονικά και πλασμονικά στοιχεία (101, 102, 111) σε ειδικά σχεδιασμένα συμβολόμετρα MZI (101), ιδιαίτερα επιπέδους πλασμονικούς κυματοδηγούς (111), οι οποίοι είναι μονολιθικά ολοκληρωμένοι σε ολοκληρωμένα φωτονικά κυκλώματα, και από το ότι περιλαμβάνει πλασμονικούς κυματοδηγούς με φράγματα περίθλασης Bragg (402, 502, 602, 609), οι οποίοι είναι κοινά ολοκληρωμένοι με φωτονικούς κυματοδηγούς (102, 605, 606), και αποτελούνται από ολοκληρωμένους κυματοδηγούς όπου ένας μηχανισμός καθυστέρησης του φωτός ενσωματώνεται στη συσκευή και χρησιμοποιείται μέσω φραγμάτων περίθλασης Bragg (602) έτσι ώστε να ενισχύσει την ευαισθησία σε πρωτοφανή επίπεδα διατηρώντας μικρά μήκη μορφοτροπεία.

25

ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΚΗ ΟΠΤΙΚΗ ΣΥΣΚΕΥΗ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΗ ΣΕ ΦΩΤΟΝΙΚΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

5

Πεδίο της εφεύρεσης

Η παρούσα εφεύρεση αναφέρεται σε οπτικούς συμβολομετρικούς βιοαισθητήρες που βασίζονται σε επίπεδους πλασμονικούς κυματοδηγούς ενσωματωμένους σε φωτονικά ολοκληρωμένα κυκλώματα.

10

Υπόβαθρο της εφεύρεσης

Η βιολογική ανίχνευση παίζει σημαντικό ρόλο σε ένα ευρύ φάσμα πεδίων εφαρμογής που σχετίζονται στενά με την καθημερινή ζωή του ανθρώπου, συμπεριλαμβανομένων της διαγνωστικής ιατρικής, των φαρμακευτικών προϊόντων, της περιβαλλοντικής παρακολούθησης και της ασφάλειας των τροφίμων. Μεταξύ των διαφορετικών τεχνολογιών ανίχνευσης, οι οπτικοί αισθητήρες που βασίζονται σε ολοκληρωμένη οπτική τεχνολογία και συντονισμό επιφανειακού πλασμονίου (SPR) αντιπροσωπεύουν έναν εξαιρετικά ελκυστικό υποψήφιο που μπορεί να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις για γρήγορη και ακριβή ανίχνευση χημικών και βιολογικών στοιχείων. Ωστόσο, η ευρεία εμπορική εκμετάλλευση εξακολουθεί να παρεμποδίζεται λόγω των ογκωδών διατάξεων ζεύξης του φωτός βασιζόμενων σε πρίσματα που απαιτούνται για τους SPR αισθητήρες ή των μέτρων ευαισθησιών των ολοκληρωμένων φωτονικών αισθητήρων.

Δύο παράγοντες καθορίζουν την ευαισθησία των οπτικών αισθητήρων: η ευαισθησία του κυματοδηγού του μορφοτροπέα που αντιπροσωπεύει την αλλαγή του ενεργού δείκτη διάθλασης του τρόπου διάδοσης του πεδίου στον κυματοδηγό μετά από μια αλλαγή στον δείκτη διάθλασης της περιβάλλουσας υπό ανάλυση ουσίας και η ευαισθησία της συσκευής που εξαρτάται από τη συνολική αρχιτεκτονική του κυκλώματος του αισθητήρα. Για το σκοπό αυτό, η ενίσχυση της ευαισθησίας σε εξαιρετικά υψηλές τιμές απαιτεί τη βελτιστοποίηση και των δύο παραγόντων ευαισθησίας με βάση τη βέλτιστη επιλογή τόσο της δομής του κυματοδηγού όσο και της αρχιτεκτονικής του κυκλώματος.

Η πιο συνηθισμένη τεχνική για την ενίσχυση της ευαισθησίας της συσκευής σε συμβολομετρικές δομές είναι η αύξηση του μήκους του κυματοδηγού ανίχνευσης στην τάξη πολλών χιλιοστών ή ακόμα και εκατοστών, κάτι που έρχεται εις βάρος της συμπαγούς και λειτουργικής ευρωστίας. Μια άλλη τεχνική είναι η βελτιστοποίηση της διαφοράς στην οπτική διαδρομή μεταξύ των δύο βραχιόνων και η αύξηση της ελεύθερης φασματικής περιοχής (FSR) [1-3].

35

Από την άλλη πλευρά, η χρήση κυματοδηγών με έντονο πεδίο διαφυγής, όπως φωτονικοί κυματοδηγοί που λειτουργούν με TM πόλωση, οι κυματοδηγοί διακένου, οι κυματοδηγοί φραγμάτων περίθλασης υπο-μήκους κύματος (SWG) και οι πλασμονικοί κυματοδηγοί, μπορούν να βελτιώσουν την ευαισθησία των κυματοδηγών. Ωστόσο, μεταξύ αυτών, οι φωτονικές δομές εξακολουθούν να απαιτούν μήκη ανίχνευσης σε κλίμακα εκατοστών προκειμένου να επιτευχθούν υψηλές ευαισθησίες [4-6].

Σε αυτό το πλαίσιο, η χρήση πλασμονικών μετατροπών μπορεί να προσφέρει σημαντικά οφέλη σε σύγκριση με τους φωτονικούς λόγω της βαθιάς έκθεσης των πλασμονικών τρόπων στο περιβάλλον που οδηγεί σε ισχυρότερη αλληλεπίδραση φωτός-ύλης. Αυτό το μοναδικό χαρακτηριστικό καθιστά τους πλασμονικούς αισθητήρες εξαιρετικά ευαίσθητους, αλλά σε βάρος των εγγενών μεγάλων απωλειών διάδοσης κάτι που θέτει σοβαρούς περιορισμούς στις λειτουργίες του τσιπ και των περιορισμένων δυνατοτήτων σμίκρυνσης λόγω των ογκωδών διατάξεων διέγερσης που βασίζονται στο πρίσμα που συνήθως απαιτούνται αναιρώντας μια συμπαγή δομή του συστήματος.

Η επιλεκτική ενσωμάτωση πλασμονικών κυματοδηγών στον βραχίονα ανίχνευσης φωτονικών συμβολομετρικών διατάξεων χαμηλών απωλειών έχει αναδειχθεί ως μια ελκυστική λύση που θα μπορούσε να εξισορροπήσει τους παραπάνω περιορισμούς αξιοποιώντας συνδυαστικά τα βελτιωμένα χαρακτηριστικά ανίχνευσης των πλασμονικών κυματοδηγών με το χαρτοφυλάκιο των παθητικών φωτονικών κυκλωμάτων χαμηλών απωλειών για την υλοποίηση υπερευαίσθητων φωτονικών αισθητήρων σε μικρότερα ίχνη.

Ακολουθώντας αυτή την προσέγγιση, ορισμένες προσεγγίσεις πλασμο-φωτονικών αισθητήρων έχουν παρουσιαστεί μέχρι στιγμής είτε σε διατάξεις αισθητήρων που βασίζονται στη διαμόρφωση της έντασης [7] είτε σε διατάξεις αισθητήρων που βασίζονται σε συμβολή [8-10]. Η πρώτη προσέγγιση προτείνει SPP μικρής εμβέλειας με ευαισθησία δείκτη διάθλασης ίση με 1365 dB/RIU, ενώ στη δεύτερη προσέγγιση χρησιμοποιούνται υβριδικοί κυματοδηγοί πλασμονικού διακένου [8,9] ή κοίλοι υβριδικοί πλασμο-φωτονικοί κυματοδηγοί [10], που αποδίδουν ευαισθησία δείκτη διάθλασης έως 1060 nm/RIU [9].

Με βάση το ίδιο σκεπτικό, ένας ολοκληρωμένος πλασμο-φωτονικός βιοαισθητήρας με πολύ-λειτουργικές δυνατότητες αποκαλύπτεται στο έγγραφο US20200003696A1 / WO2018150205A8 / GR20170100088A [3]. Συγκεκριμένα, ένας πλασμονικός κυματοδηγός, είτε λεπτού υμενίου είτε διακένου, είναι ενσωματωμένος στον βραχίονα ανίχνευσης ενός φωτονικού MZI. Προτείνονται δομικά στοιχεία για τη βέλτιστη συμβολή και για την εξισορρόπηση ισχύος σε συνδυασμό με ένα μεγάλο FSR προκειμένου να ενισχυθεί η ευαισθησία της συσκευής. Ωστόσο, απαιτείται ένα πολύ μεγάλο FSR άνω των 1000 nm προκειμένου να επιτευχθούν οι ισχυριζόμενες υψηλές ευαισθησίες, γεγονός που θέτει αρκετές προκλήσεις. Μια πρόκληση είναι ότι απαιτείται πολύ ακριβής έλεγχος της απαραίτητης εξαιρετικά μικρής διαφοράς οπτικής διαδρομής μεταξύ του βραχίονα ανίχνευσης και του βραχίονα αναφοράς και εξαιτίας αυτού πιθανές δομικές αποκλίσεις κατά την κατασκευή αναμένεται να έχουν αξιοσημείωτη επίδραση στην απόδοση του αισθητήρα. Επιπλέον, οι δομές εξαιρετικά υψηλού FSR μπορεί να παρεμποδίσουν τη διαδικασία μέτρησης, καθώς η πιθανότητα καμία από τις φασματικές βυθίσεις να μην βρίσκεται στην οπτική περιοχή του οργάνου μέτρησης αυξάνεται δραματικά. Τέλος, η επίδραση των

διακυμάνσεων της θερμοκρασίας γίνεται πιο έντονη σε διατάξεις με μεγάλα FSR απαιτώντας αυστηρότερο έλεγχο της θερμοκρασίας.

- 5 Η εργασία που παρουσιάζεται στην αναφορά [11] δείχνει την πειραματικά ληφθείσα απόδοση μιας κατασκευασμένης έκδοσης του βιοαισθητήρα που περιγράφεται στην παραπάνω ευρεσιτεχνία με FSR ίσο με 50 nm και μήκος πλασμονικής περιοχής ανίχνευσης ίση με 70 μm. Επιτεύχθηκε μια οπτική ευαισθησία ίση με 4764 nm/RIU, η οποία είναι πολύ χαμηλότερη από την τιμή που αποκαλύπτεται στο εν λόγω έγγραφο διπλώματος ευρεσιτεχνίας και την υπερσύγχρονη τιμή οπτικής ευαισθησία των 59.000 nm/RIU που επιτεύχθηκε από αισθητήρα τύπου SPR που αναφέρεται στο [12].
- 10 Η χρήση αργού φωτός σε κυματοδηγούς με φράγματα υπο-μήκους κύματος (SWG) έχει επίσης προταθεί ως μέσο για την αύξηση της ευαισθησίας των κυματοδηγών τόσο στις φωτονικές όσο και στις πλασμονικές δομές. Τα φράγματα υπο-μήκους κύματος με περίοδο Λ , μπορούν να συμπεριφέρονται ως ομοιογενή μεταϋλικά στην περιοχή μεγάλου μήκους κύματος ($\lambda \gg \Lambda$), ως καθρέφτες Bragg στην ζώνη χάσματος όπου η διάδοση απαγορεύεται ($\lambda \approx \Lambda$) ή ως κυματοδηγοί αργού φωτός κοντά στο άνω όριο μήκους κύματος της ζώνης χάσματος. Η περιοχή αργού φωτός χαρακτηρίζεται από έναν δείκτη διάθλασης ομάδας υψηλότερο σχεδόν κατά μία τάξη μεγέθους σε σύγκριση με έναν συμβατικό κυματοδηγό και μια αντίστοιχη χαμηλή ταχύτητα ομάδας -ή μεγάλη καθυστέρηση ομάδας-, η οποία σχετίζεται με αυξημένη αλληλεπίδραση φωτός-ύλης.
- 20 Στις αναφορές [13] και [14] παρουσιάζεται η σχεδίαση της διασποράς κυματοδηγών πυριτίου φράγματος περίθλασης υπο-μήκους κύματος σε μία διάσταση (1D) ώστε να λειτουργούν κοντά στη φωτονική ζώνη χάσματος προκειμένου να επιτραπεί η χαμηλή ταχύτητα ομάδας και η αυξημένη αλληλεπίδραση φωτός-ύλης. Ωστόσο, οι παραπάνω συσκευές δεν αξιολογήθηκαν ως αισθητήρες δείκτη διάθλαση (RI) ή βιο-αισθητήρες. Ομοίως στην αναφορά
- 25 [15], ένα πλασμονικό πλέγμα Bragg που βασίζεται σε μια δομή μετάλλου/αέρα/μετάλλου με διαμορφωμένο διάκενο μεταξύ των μετάλλων (πλασμονικό Bragg διακένου) έχει σχεδιαστεί ώστε να παρουσιάζει μια επίπεδη καμπύλη διασποράς που επιτρέπει αργή διάδοση φωτός του τρόπου λειτουργίας Bloch στο διάκενο. Ωστόσο, ο διερευνημένος πλασμονικός κυματοδηγός αργού φωτός δεν αξιολογήθηκε ως RI αισθητήρας ή βιοαισθητήρας. Αντίστοιχα,
- 30 στην αναφορά [16], ένας παρόμοιος πλασμονικός κυματοδηγός Bragg βασισμένος σε διάκενο, τοποθετημένος μεταξύ δύο συμβατικών κυματοδηγών διακένου (μέταλλο/διηλεκτρικό/μεταλλικό) προτείνεται ως αισθητήρας δείκτη διάθλασης υπομήκους κύματος ενισχυμένου αργού φωτός. Αποδεικνύεται ότι μπορεί να επιτευχθεί ενίσχυση της ευαισθησίας δείκτη διάθλασης περίπου 3,5 έως 3,9 φορές σε συνδυασμό με 2 έως 3 φορές μείωση στο απαιτούμενο μήκος ανίχνευσης. Ωστόσο, η προτεινόμενη δομή δεν έχει διερευνηθεί ως ενσωματωμένος μορφοτροπέας στον κλάδο ανίχνευσης συμβολόμετρων.
- 35 Στην αναφορά [17], ο βασισμένος σε διάκενο πλασμονικός κυματοδηγός Bragg που αναφέρεται στην προαναφερθείσα εργασία [16] «ενισχυμένοι μέσω αργού φωτός αισθητήρες δείκτη διάθλασης βασισμένοι σε πλασμονικούς κυματοδηγούς υποκύματος» ενσωματώνεται στον κλάδο ανίχνευσης ενός πλασμονικού συμβολόμετρου Mach-Zehnder που οδηγεί σε περίπου δύο φορές μεγαλύτερη ευαισθησία δείκτη διάθλασης από τον σκέτο πλασμονικό κυματοδηγό Bragg. Επιπρόσθετα, επιτυγχάνεται σχεδόν μια τάξη μεγέθους
- 40

αύξηση στην ευαισθησία δείκτη διάθλασης και επομένως στην ελάχιστη ανιχνεύσιμη μεταβολή του δείκτη διάθλασης, σε σύγκριση με έναν συμβολομετρικό αισθητήρα που χρησιμοποιεί έναν συμβατικό κυματοδηγό πλασμονικού διακένου.

5 Στην αναφορά [18], ένας φωτονικός κυματοδηγός αργού φωτός που βασίζεται σε έναν μονοδιάστατο (1D) φωτονικό κρύσταλλο (phC) ενσωματώνεται στον κλάδο ανίχνευσης ενός φωτονικού MZI με βάση το πυρίτιο. Μια πενταπλάσια βελτίωση ευαισθησίας δείκτη διάθλασης επιτεύχθηκε πειραματικά σε σύγκριση με έναν παραδοσιακό αισθητήρα MZI, συνοδευόμενη από 400 φορές μείωση του χωρικού αποτυπώματος. Ωστόσο, η επιτευχθείσα φασματική ευαισθησία των 103 nm/RIU είναι αρκετά χαμηλή.

10 Ένα μονοκάναλο διτροπικό συμβολόμετρο βασισμένο σε μονοδιάστατο φωτονικό κρύσταλλο (1D phC) που υποστηρίζει δύο ηλεκτρομαγνητικούς τρόπους ίδιας πόλωσης αλλά με μεγάλη διαφορά ταχύτητας ομάδας προτάθηκε στην αναφορά [19]. Η περιοδική δομή είναι βελτιστοποιημένη έτσι ώστε να υποστηρίζει έναν τρόπο λειτουργίας ανώτερης τάξης με σημαντικά μειωμένη ταχύτητα ομάδας -που ενεργεί ως ο τρόπος ανίχνευσης- σε σύγκριση με
15 τον θεμελιώδη τρόπο -που ενεργεί ως ο τρόπος αναφοράς-. Λόγω της χαμηλότερης ταχύτητας ομάδας, ο τρόπος ανώτερης τάξης είναι πιο ευαίσθητος σε αλλαγές στο δείκτη διάθλασης (RI) από το θεμελιώδη. Ομοίως με το προηγούμενο MZI με βάση το φωτονικό κρύσταλλο (phC), επιτεύχθηκε χαμηλή φασματική ευαισθησία ίση με 138,75 nm/RIU.

20 Στάθμη της τεχνικής

Αρκετές αιτήσεις διπλωμάτων ευρεσιτεχνίας σχετίζονται με το πεδίο που προσδιορίστηκε παραπάνω, οι οποίες μπορούν να υποδιαιρεθούν σε διαφορετικές κατηγορίες, μεταξύ των
25 οποίων οι ακόλουθες αποκαλύπτουν συμβολομετρία, όπως οι WO2020128293, EP3264070, US2004257579, WO2010010527, US2020200972, US2022050246, WO2007011384, GB25392812929226N 64982, WO2018078404, WO2009115847, GB2437543, WO2021152345. Το κύριο χαρακτηριστικό αυτών των δημοσιεύσεων είναι η χρήση ενός συμβολόμετρου, όπως Mach-Zehnder (MZI), Fabry-Pérot, Michelson κ.λπ., αλλά χωρίς πλασμονικά υλικά και φράγματα περίθλασης Bragg που επομένως δεν χρησιμοποιούνται σε
30 αυτά, κάτι το οποίο τα διαφοροποιεί από τα επί του παρόντος επιδιωκόμενα προς ανάπτυξη στη συνέχεια.

Μια άλλη κατηγορία που περιλαμβάνει τις δημοσιεύσεις διπλωμάτων ευρεσιτεχνίας KR20120013821, KR20090006942, US2015308950, US2013329230, US2020278294, US2006045809, αποκαλύπτει πλασμονικά υλικά, όπως μεταλλικά υμένα ή νανοσωματίδια, αλλά ωστόσο χωρίς να χρησιμοποιείται συμβολομετρία και φράγματα περίθλασης Bragg, κάτι
35 το οποίο τα διαφοροποιεί και πάλι από την παρούσα επιδιωκόμενη ανάπτυξη.

Μια ακόμη κατηγορία περιλαμβάνει περαιτέρω δημοσιεύσεις διπλωμάτων ευρεσιτεχνίας όπως τις US2005018949, US2009214159, US2008056640, US2014218738, EP3988970, WO2018150205 που αποκαλύπτουν συμβολομετρία και πλασμονικά υλικά, καθώς επίσης και η δημοσίευση WO2018150205, από την οποία η παρούσα εφεύρεση διαφέρει με την

εισαγωγή των φραγμάτων περίθλασης Bragg και τον μηχανισμό αργού φωτός, όπως περαιτέρω ορίζεται παρακάτω.

5 Το έγγραφο CN113253403 αποκαλύπτει συμβολομετρία και πλέγματα περίθλασης Bragg. Το κύριο χαρακτηριστικό του είναι η ενσωμάτωση ενός συμβολόμετρου Mach-Zehnder (MZI) μαζί με φράγματα περίθλασης Bragg, στερείται όμως πλασματικών υλικών που δεν χρησιμοποιούνται σε αυτό και επομένως το διαφοροποιεί από την παρούσα ανάπτυξη.

10 Τέλος, η δημοσίευση WO2006122402 αποκαλύπτει συμβολομετρία, πλασματικά υλικά και πλέγματα περίθλασης Bragg, ενώ αυτό το συγκεκριμένο έγγραφο είναι το μόνο μεταξύ εκείνων που αναφέρονται παραπάνω που συνδυάζει αυτά τα χαρακτηριστικά που αποτελούνται από συμβολομετρία, πλασματικά υλικά και φράγματα περίθλασης Bragg. 15 Ωστόσο, οι βασικές διαφορές με την επιδιωκόμενη ανάπτυξη της παρούσας εφεύρεσης είναι ότι αφορά οπτικές ίνες και όχι ολοκληρωμένους κυματοδηγούς. Αυτό μεταφράζεται σε μεγαλύτερο μέγεθος, το οποίο αυξάνει την πολυπλοκότητα της κατασκευής και περιορίζει τον αριθμό των αισθητήρων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ταυτόχρονα σε μια μέτρηση, τα οποία αποτελούν και τα δύο σοβαρό μειονέκτημα.

Σκοπός της εφεύρεσης

20 Στόχος της εφεύρεσης είναι να αντιμετωπίσει τα προαναφερθέντα μειονεκτήματα, ιδίως με την ενσωμάτωση ενός μηχανισμού αργού φωτός με τη χρήση φραγμάτων περίθλασης Bragg, που έχει ως αποτέλεσμα μια στοχευμένη αύξηση της ευαισθησίας.

Συνοπτική περιγραφή της εφεύρεσης

25 Προτείνεται σύμφωνα με την εφεύρεση, μια συσκευή οπτικού συμβολομετρικού αισθητήρα, ιδιαιτέρως μια συσκευή βιο-αισθητήρα σε φωτονικά ολοκληρωμένα κυκλώματα που αποτελείται από ένα στρώμα κυματοδηγού προορισμένο να λαμβάνει ένα οπτικό σήμα και να κυματοδηγεί το εν λόγω οπτικό σήμα σύμφωνα με έναν προκαθορισμένο οπτικό τρόπο διάδοσης, καθώς επίσης και μία επιφάνεια ενός μέσου δοκιμής σε επικοινωνία με το στρώμα κυματοδηγού το οποίο ανταποκρίνεται στο μέσο δοκιμής για να τροποποιεί τουλάχιστον ένα 30 χαρακτηριστικό του οδηγούμενου οπτικού σήματος σε σχέση με μία δοθείσα παράμετρο του εν λόγω μέσου δοκιμής, μέσω του οποίου το τροποποιημένο χαρακτηριστικό του οδηγούμενου οπτικού σήματος καθίσταται μετρήσιμο εν όψει του προσδιορισμού της δοθείσας παραμέτρου του εν λόγω μέσου δοκιμής. Η εν λόγω συσκευή είναι αξισημείωτη στο γεγονός ότι περιλαμβάνει φωτονικά και πλασματικά στοιχεία σε ειδικά σχεδιασμένες διαμορφώσεις MZI, ιδιαιτέρως επίπεδους πλασματικούς κυματοδηγούς, οι οποίοι είναι 35 μονολιθικά ολοκληρωμένοι σε φωτονικά ολοκληρωμένα κυκλώματα, και στο γεγονός ότι περιλαμβάνει πλασματικούς κυματοδηγούς με βάση το πλέγμα Bragg, οι οποίοι είναι κοινά ολοκληρωμένοι με φωτονικούς κυματοδηγούς, οι οποίοι αποτελούνται από ενσωματωμένους κυματοδηγούς, όπου ένα μέσο μηχανισμού αργού φωτός είναι ενσωματωμένο στη συσκευή που χρησιμοποιείται με τα μέσα φραγμάτων περίθλασης Bragg.

- 5 Χάρη στη συσκευή που προτείνεται σύμφωνα με την εφεύρεση, η κατασκευαστική πολυπλοκότητα διατηρείται σε μέτριο επίπεδο, σε τέτοιο βαθμό ώστε ο αριθμός των αισθητήρων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ταυτόχρονα σε μια μέτρηση δεν είναι πολύ περιορισμένος, κάτι το οποίο είναι σημαντικό πλεονέκτημα. Επιπροσθέτως, ο μηχανισμός αργού φωτός που είναι ενσωματωμένος στη συσκευή χρησιμοποιείται με τα εν λόγω φράγματα περίθλασης Bragg, γεγονός που οδηγεί σε αξιοσημείωτη αύξηση στην ευαισθησία, ενώ ο εν λόγω μηχανισμός δεν αποκαλύπτεται σε καμία άλλη προγενέστερη δημοσίευση που αναφέρεται παραπάνω.
- 10 Συνεπώς, προτείνεται σύμφωνα με την παρούσα εφεύρεση μια εξαιρετικά ευαίσθητη συσκευή βιοαισθητήρα που περιλαμβάνει νέα φωτονικά και πλασμονικά στοιχεία σε ειδικά σχεδιασμένες διατάξεις MZI και πιο συγκεκριμένα, χάρη στην υιοθέτηση των πλασμονικών κυματοδηγών φορτισμένων με πλέγματα περίθλασης Bragg ως το μέσο για την αύξηση της ευαισθησίας του κυματοδηγού που ενισχύει τη συνολική ευαισθησία του αισθητήρα σε πρωτόγνωρα επίπεδα διατηρώντας μικρό μήκος μορφοτροπία.
- 15 Σύμφωνα με μια ειδική ενσωμάτωση της εφεύρεσης, η συσκευή περιλαμβάνει πλασμονικούς κυματοδηγούς βασισμένους σε πλέγμα Bragg κοινά ολοκληρωμένους με φωτονικούς κυματοδηγούς, με στόχο την ενίσχυση της απόδοσης ευαισθησίας σε τιμές $>130.000 \text{ nm}/\text{RIU}$ μειώνοντας ταυτόχρονα το συνολικό αποτύπωμα και τον θόρυβο. Η εν λόγω ελεύθερη φασματική περιοχή (FSR) επιλέγεται μεγαλύτερη από 100 nm , όπου το πλάτος του εν λόγω
- 20 φωτονικού κυματοδηγού βελτιστοποιείται σε συνδυασμό με ένα μεγάλο FSR, φέρνοντας με αυτόν τον τρόπο την ευαισθησία κοντά στις $130000 \text{ nm}/\text{RIU}$.
- 25 Αυτός ο οδικός χάρτης επιδιώκεται μέσω δύο παράλληλων προσεγγίσεων για την αύξηση τόσο της αρχιτεκτονικής (S_a) όσο και της ευαισθησίας του κυματοδηγού (S_{wg}), και δύο εναλλακτικών αρχιτεκτονικών διατάξεων, η πρώτη από τις οποίες συνίσταται στη βελτίωση της αρχιτεκτονικής ευαισθησίας, η οποία επιτυγχάνεται με την αύξηση του FSR και προσαρμόζοντας τη γεωμετρία του φωτονικού κυματοδηγού για να ληφθεί υπόψη η διασπορά 2^{ης} τάξης στους πλασμο-φωτονικούς κλάδους του MZI, χρησιμοποιώντας τις πρόσφατες προβολές που προέκυψαν από το πειραματικά επικυρωμένο θεωρητικό και αριθμητικό μοντέλο προσομοίωσης που παρουσιάζεται στο [20].
- 30 Η δεύτερη συνίσταται σε μια βελτίωση της ευαισθησίας κυματοδηγού, η οποία επιτυγχάνεται σύμφωνα με έναν εναλλακτικό τρόπο πραγμάτωσης της εφεύρεσης, με την υιοθέτηση πλασμονικών κυματοδηγών λεπτού υμενίου διακοσμημένων με πλέγματα περίθλασης Bragg, προσδοκώντας την εκμετάλλευση φαινομένων αργού φωτός για την αύξηση της αποτελεσματικής έκθεσης του πλασμονικού πεδίου στον υπερκείμενο αναλύτη.
- 35 Σύμφωνα με μια ειδική ενσωμάτωση της συσκευής της εφεύρεσης, οι διηλεκτρικές φορτώσεις ενσωματώνονται στην πάνω επιφάνεια της πλασμονικής λωρίδας για να παραχθεί μια διάταξη κοιλότητας Bragg που μεγιστοποιεί τον αποτελεσματικό χρόνο έκθεσης του πλασμονικού πεδίου. Οι προκαταρκτικές προσομοιώσεις της ενισχυμένης ευαισθησίας που ελήφθησαν με πλασμονικούς κυματοδηγούς λεπτού υμενίου διακοσμημένους με Pórot-Fabry
- 40 παρατίθενται παρακάτω.

Σύμφωνα με μια περαιτέρω ενσωμάτωση της συσκευής της εφεύρεσης, ένας κυματοδηγός πλασμονικής λωρίδας είναι ενσωματωμένος σε ένα μέσο φωτονικού αισθητήρα MZI.

5 Σύμφωνα με μια ακόμη περαιτέρω υλοποίηση της συσκευής της εφεύρεσης, ο εν λόγω κυματοδηγός πλασμονικής λωρίδας έχει πλάτος λίγων μικρομέτρων και μήκος μερικών δεκάδων μικρομέτρων.

10 Σύμφωνα με μια ακόμη περαιτέρω ενσωμάτωση της συσκευής της εφεύρεσης, αυτή αποτελείται από πλασμονικούς κυματοδηγούς CMOS με φράγματα περίθλασης Bragg κοινά ολοκληρωμένους με φωτονικούς κυματοδηγούς, κάτι το οποίο ενισχύει την απόδοση ως προς την ευαισθησία σε τιμές πάνω από 130000 nm/RIU ενώ ταυτόχρονα μειώνεται ο θόρυβος και το χωρικό αποτύπωμα, και το εν λόγω FSR επιλέγεται να είναι μεγαλύτερο από 100 nm, όπου το πλάτος του εν λόγω φωτονικού κυματοδηγού βελτιστοποιείται σε συνδυασμό με ένα μεγάλο FSR, και έτσι φέρνοντας την ευαισθησία σε κοντά στην τιμή των 130000 nm/RIU.

15 Σύμφωνα με έναν εναλλακτικό τρόπο πραγμάτωσης της συσκευής της εφεύρεσης, ενσωματώνονται πλασμονικοί κυματοδηγοί λεπτού υμενίου με φράγματα περίθλασης Bragg όπου εφαρμόζονται φαινόμενα καθυστέρησης του φωτός, αυξάνοντας με αυτό τον τρόπο την ενεργό έκθεση του πλασμονικού πεδίου στον αναλύτη ώστε να αυξηθεί η ευαισθησία κυματοδηγού και η αρχιτεκτονική ευαισθησία.

20 Σύμφωνα με έναν επιπλέον τρόπο πραγμάτωσης της συσκευής της εφεύρεσης, διηλεκτρικές φορτώσεις ενσωματώνονται επάνω στην εν λόγω πλασμονική λωρίδα, δημιουργώντας με αυτόν τον τρόπο μια κοιλότητα Bragg μεγιστοποιώντας τον ενεργό χρόνο έκθεσης του εν λόγω πλασμονικού πεδίου.

25 Σύμφωνα με έναν προτιμώμενο τρόπο πραγμάτωσης της συσκευής της εφεύρεσης, ενσωματώνονται πλασμονικά λεπτά υμένια διακοσμημένα με Perot-Fabry ενισχύοντας την ευαισθησία, όπου η διάδοση ενός τρόπου επιφανειακού πλασμονίου υποστηρίζεται από ένα μεταλλικό υμένιο αλουμινίου ενσωματωμένο σε ένα υδατικό διάλυμα, όπου επιπρόσθετα η ευαισθησία του πλασμονικού τρόπου (SPP) σε μία τροποποίηση της επιφάνειας αξιολογείται εφαρμόζοντας μια αλλαγή στο δείκτη διάθλασης, ιδιαιτέρως της τάξης του $\Delta n=0.2$ σε ένα στρώμα πάχους $d=20$ nm επάνω στην επιφάνεια του μεταλλικού υμενίου και για ένα πεπερασμένο μήκος διάδοσης L , περαιτέρω όπου για έναν τρόπο λεπτού υμενίου, η εν λόγω τροποποίηση της επιφάνειας αποδίδει μια αλλαγή φάσης $\Delta\varphi_F$ που αντιστοιχεί σε μια ευαισθησία φάσης του SPP τρόπου λεπτού υμενίου σε τροποποιήσεις της επιφάνειας ίση με

$$S_\varphi = \Delta\varphi / ((\Delta n d)L) = 7.2e-3 \text{ rad}/(\text{RIU}\cdot\text{nm})/\mu\text{m}$$

35 περαιτέρω όπου εφαρμόζοντας την ίδια τροποποίηση σε SPP τρόπους που διαδίδονται μέσω πλασμονικών κοιλοτήτων Perot-Fabry που αποτελούνται από καθρέφτες Bragg διηλεκτρικής φόρτισης, ιδίως με μια περίοδο ίση με 1.1 μm και ύψος 0.55 μm , αποδίδει μια ενισχυμένη αλλαγή φάσης $\Delta\varphi_C$ από την οποία προκύπτει ένα παράγοντας ενίσχυσης ευαισθησίας $\eta = \Delta\varphi_C / \Delta\varphi_F$ σε σχέση με μία διάταξη γυμνού λεπτού υμενίου.

Σύμφωνα με μια άλλη υλοποίηση της συσκευής της εφεύρεσης, εισάγονται περισσότερες περιόδους, ιδιαιτέρως 2 ή 3, διότι ο εν λόγω παράγοντας κλιμακώνεται με την ενίσχυση του

πεδίου μέσα στην κοιλότητα, και επιπρόσθετα εκεί όπου αναπτύσσονται συζευγμένες κοιλότητες με τους SPP τρόπους να μεταπηδούν από την μία κοιλότητα στην άλλη, δημιουργώντας μια βελτίωση της ευαισθησίας κατά μία τάξη μεγέθους οδηγώντας στην υπερυψηλή τιμή ευαισθησίας των 130000 nm/RIU, είτε με μικρότερα μήκη πλασματικού κυματοδηγού μειώνοντας το χωρικό αποτύπωμα και τις απώλειες, είτε με ένα μικρότερο FSR αποδίδοντας μια συσκευή με ενισχυμένη ανοχή.

Σύμφωνα με έναν επιπλέον ειδικό τρόπο υλοποίησης της συσκευής της εφεύρεσης, μια πρώτη διάταξη περιλαμβάνει ένα ισοσκελισμένο συμβολόμετρο Mach Zehnder MZI που έχει και στους δύο βραχίονες πανομοιότυπα τμήματα φωτονικού κυματοδηγού λωρίδας και πλασματικού κυματοδηγού λωρίδας, όπου διηλεκτρικές ράχες που βρίσκονται στην επάνω επιφάνεια των πλασματικών λωρίδων επιτρέπουν τη διάδοση αργού φωτός, και επιπλέον για να διευκολυνθεί η ανίχνευση, μόνο ένας από τους δύο πλασματικούς κυματοδηγούς ενεργοποιείται προκειμένου να χρησιμεύσει ως αισθητήριο μετατροπέας, ενώ ο αντίστοιχος πλασματικός κυματοδηγός στον βραχίονα αναφοράς είναι επικαλυμμένος με παράγοντες αποκλεισμού που χρησιμεύουν ως αναφορά, έτσι ώστε όταν το υγρό δείγμα ρέει και στους δύο βραχίονες, συμβάντα δέσμησης συμβαίνουν μόνο στον βραχίονα ανίχνευσης, οδηγώντας σε τοπικές αλλαγές τοπικού δείκτη διάθλασης (RI) που ανιχνεύονται από τον αισθητήριο κυματοδηγό· ιδιαίτερος δε προσθέτοντας τον ίδιο πλασματικό κυματοδηγό στον βραχίονα αναφοράς ενισχύεται η ευαισθησία και βελτιώνεται το όριο ανίχνευσης.

Οι παραπάνω προσεγγίσεις μπορούν να εφαρμοστούν σε δύο εναλλακτικές συμβολομετρικές διατάξεις που απεικονίζονται σχηματικά στα Σχήματα 6 και 7, αντίστοιχα. Η πρώτη διάταξη του Σχ. 6 περιλαμβάνει ένα συμβατικό, ισοσκελισμένο συμβολόμετρο Mach Zehnder MZI όπου και οι δύο βραχίονες φιλοξενούν πανομοιότυπα τμήματα φωτονικού και πλασματικού κυματοδηγού λωρίδας. Διηλεκτρικές ράχες βρίσκονται στην επάνω επιφάνεια των πλασματικών λωρίδων για να επιτρέπουν τη διάδοση αργού φωτός, όπως περιγράφηκε προηγουμένως. Για να διευκολυνθεί η ανίχνευση, μόνο ένας από τους δύο πλασματικούς κυματοδηγούς απαιτεί ενεργοποίηση προκειμένου να χρησιμεύσει ως ο αισθητήριο μετατροπέας, ενώ ο αντίστοιχος πλασματικός κυματοδηγός στον κλάδο αναφοράς πρέπει να επικαλυφθεί με παράγοντες αποκλεισμού για να εξυπηρετήσει ως αναφορά. Με αυτόν τον τρόπο, όταν το υγρό δείγμα ρέει πάνω και από τους δύο βραχίονες, συμβάντα δέσμησης συμβαίνουν μόνο στον βραχίονα ανίχνευσης, με αποτέλεσμα αλλαγές τοπικού δείκτη διάθλασης (RI) που μπορούν να ανιχνευθούν από τον αισθητήριο κυματοδηγό. Η προσθήκη του ίδιου πλασματικού κυματοδηγού στον βραχίονα αναφοράς προσφέρει δύο πλεονεκτήματα που συμβάλλουν στη βελτίωση της ευαισθησίας και στη βελτίωση του ορίου ανίχνευσης: πρώτον, οι οπτικές απώλειες μεταξύ των δύο κλάδων εξισορροπούνται, οδηγώντας σε υψηλό λόγο απόσβεσης στην έξοδο του συμβολόμετρου [1], [10]. Δεύτερον, ο θόρυβος που προέρχεται από διακυμάνσεις θερμοκρασίας, μη ειδική δέσμηση ή μεταβολές του δείκτη διάθλασης στον συνολικό όγκο κατά τη φόρτωση του δείγματος ακυρώνεται [20], [21]. Οι θερμοοπτικοί μετατοπιστές φάσης που χρησιμοποιούνται σε κάθε κλάδο του MZI, επιτρέπουν την ευθυγράμμιση του συντονισμού του MZI εντός του φασματικού παραθύρου της φωτεινής πηγής. Ο ανθεκτικός στον θόρυβο χαρακτήρα του ισορροπημένου MZI μαζί με πιο προηγμένες τεχνικές επεξεργασίας δεδομένων και ακύρωσης θορύβου που θα

χρησιμοποιούνται στο ηλεκτρονικό σύστημα ανάγνωσης αναμένεται στη συνέχεια να επιτρέπουν χαμηλότερες τιμές ορίου ανίχνευσης-LoD.

5 Σύμφωνα με έναν επιπλέον τρόπο ενσωμάτωσης της συσκευής της εφεύρεσης, οι οπτικές απώλειες μεταξύ των δύο κλάδων εξισορροπούνται, αποδίδοντας υψηλό λόγο σβέσης στην έξοδο του συμβολόμετρου, ή/και ο θόρυβος που προέρχεται από διακυμάνσεις θερμοκρασίας, μη ειδικές συνδέσεις ή μεταβολές του δείκτη διάθλασης κατά τη φόρτωση του δείγματος ακυρώνεται.

10 Σύμφωνα με έναν ακόμη περαιτέρω τρόπο ενσωμάτωσης της συσκευής της εφεύρεσης, οι θερμο-οπτικοί ολισθητές φάσης που χρησιμοποιούνται σε κάθε κλάδο του MZI επιτρέπουν την ευθυγράμμιση του συντονισμού του MZI εντός του φασματικού παραθύρου της οπτικής πηγής, ιδιαίτερα όπου ο ανθεκτικός στον θόρυβο χαρακτήρας του ισορροπημένου MZI μαζί με προηγμένες τεχνικές επεξεργασίας δεδομένων και ακύρωσης θορύβου που χρησιμοποιούνται στο ηλεκτρονικό σύστημα ανάγνωσης επιτρέπουν στη συνέχεια χαμηλές τιμές ορίου ανίχνευσης (LoD).

15 Σύμφωνα με έναν επιπλέον τρόπο ενσωμάτωσης της εφεύρεσης, μια 2η διάταξη μιας εναλλακτικής αρχιτεκτονικής ανθεκτικής στον θόρυβο περιλαμβάνει την ανάπτυξη ενός διτροπικού συμβολόμετρου, όπου παρέχονται δύο φωτονικοί κυματοδηγοί εισόδου που διαχωρίζονται από μια μεταλλική λωρίδα που βρίσκεται επάνω σε ένα λεπτότερο φωτονικό στρώμα, περαιτέρω όπου μια κοιλότητα Bragg αποτελούμενη από διηλεκτρικές φορτώσεις είναι ενσωματωμένη στην επάνω διεπαφή του πλασματικού κυματοδηγού λωρίδας, στην πλασματική περιοχή όπου 2 διεπαφές μετάλλου/διηλεκτρικού σχηματίζονται για να υποστηρίξουν τρόπους SPP, ιδιαιτέρως δε η κοιλότητα Bragg στην επάνω επιφάνεια έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να υποστηρίζει ένα πλασματικό Bloch τρόπο διάδοσης που παρουσιάζει αργή διάδοση του φωτός κάτι το οποίο ενισχύει την αλληλεπίδραση φωτός-ύλης και αυξάνει την ευαισθησία του κυματοδηγού, περαιτέρω όπου κατά τη διέγερση, αυτοί οι τρόποι συμβάλλουν στον φωτονικό κυματοδηγό εξόδου υλοποιώντας το στοχευόμενο συμβολόμετρο μονού βραχίονα, όπου περαιτέρω η εν λόγω άνω μεταλλική επιφάνεια χρησιμεύει ως ο βραχίονας ανίχνευσης, ενώ η κάτω επιφάνεια έχει το ρόλο του βραχίονα αναφοράς, δημιουργώντας έτσι μια διτροπική διάταξη που μειώνει το χωρικό αποτύπωμα του αισθητήρα.

20

25

30

35 Συνοψίζοντας, η παρούσα εφεύρεση προτείνει μια συσκευή που περιλαμβάνει ειδικά σχεδιασμένους αισθητήρες MZI με ενσωματωμένα πλασματικά ανιχνευτικά στοιχεία βασισμένα σε πλέγμα Bragg που εκμεταλλεύονται έναν μηχανισμό συσσώρευσης φάσης που επιβάλλεται μέσω διάδοσης αργού φως. Η υιοθέτηση τέτοιων στοιχείων ανίχνευσης επιτρέπει εξαιρετικά υψηλή ευαισθησία με μικρότερα μήκη ανίχνευσης και μικρότερα FSR σε σύγκριση με το προγενέστερο ανωτέρω έγγραφο WO2018150205A8, όπου απαιτείται εξαιρετικά υψηλό FSR άνω των 1000 nm για την ισχυριζόμενη εξαιρετική ευαισθησία. Αυτό, παράλληλα με τα σχεδιασμένα με κατάλληλη διασπορά και τέλεια ισορροπημένα MZI ή διτροπικές διατάξεις, αποτελούν μια ολοκληρωμένη μέθοδο για την επίτευξη εξαιρετικά υψηλών ευαισθησιών και στιβαρής απόδοσης ανίχνευσης. Η παρούσα εφεύρεση συνδυάζει συμβολομετρία, πλασματικά υλικά και πλέγματα περίθλασης Bragg. Οι διαφορές της

40

παρούσας εφεύρεσης σε σχέση με αυτόν τον συνδυασμό είναι σημαντικές και εκτίθενται παρακάτω ανάλογα.

5 Περαιτέρω χαρακτηριστικά και ιδιότητες της συσκευής σύμφωνα με την εφεύρεση αποκαλύπτονται στην πιο λεπτομερή περιγραφή ενός κύριου υποδειγματικού τρόπου υλοποίησης της και στα σχέδια όπως επισυνάπτονται σε αυτήν.

Σύντομη περιγραφή των σχεδίων

10 Το Σχήμα 1 είναι μια σχηματική αναπαράσταση ενός πλασμο-φωτονικού αισθητήρα MZI μαζί με τις διατομές των συστατικών φωτονικών και πλασμονικών κυματοδηγών σύμφωνα με την εφεύρεση.

15 Το Σχήμα 2 είναι μια γραφική αναπαράσταση της ευαισθησίας ως συνάρτηση του FSR του MZI για διαφορετικά πλάτη φωτονικών κυματοδηγών λαμβάνοντας υπόψη τη διασπορά 2ης τάξης, περιλαμβάνοντας έτσι ένα σύνολο συμπαγών καμπυλών που δείχνουν τα θεωρητικά αποτελέσματα με διασπορά 2ης τάξης, τις αντίστοιχες κουκκίδες που δείχνουν αποτελέσματα αριθμητικής προσομοίωσης και τη διακεκομμένη καμπύλη που αντιστοιχεί στην περίπτωση χωρίς διασπορά.

Το Σχήμα 3 παρουσιάζει ένα γυμνό πλασμονικό λεπτό υμένιο από αλουμίνιο με στρώμα ενεργοποίησης.

20 Το Σχήμα 4 παρουσιάζει ένα πλασμονικό λεπτό υμένιο αλουμινίου ενισχυμένης ευαισθησίας διακοσμημένο με φράγματα περίθλασης Bragg με κοιλότητα καθρέφτη δύο περιόδων.

Το Σχήμα 5 δείχνει μια παρόμοια όψη ενός πλασμονικού λεπτού υμενίου αλουμινίου ενισχυμένης ευαισθησίας διακοσμημένο με φράγματα περίθλασης Bragg όπως στο Σχ. 4, αλλά με κοιλότητα καθρέφτη τριών περιόδων.

25 Τα Σχήματα 6 και 7 απεικονίζουν σχηματικά δύο προσεγγίσεις που θα εφαρμοστούν σε δύο εναλλακτικές συμβολομετρικές διατάξεις αντίστοιχα.

Αναλυτική Περιγραφή

30 Το Σχ. 2 απεικονίζει την απόδοση ευαισθησίας ως συνάρτηση του FSR του MZI όταν ενσωματώνεται ένας πλασμονικός κυματοδηγός τύπου λωρίδας πλάτους 7 μm και μήκους 70 μm σε έναν φωτονικό αισθητήρα τύπου MZI, όπως φαίνεται στο Σχ. 1, για διαφορετικές γεωμετρικές φωτονικών κυματοδηγών. Υποδεικνύεται ξεκάθαρα ότι όταν λαμβάνεται υπόψη η διασπορά 2^{ης} τάξης και το FSR είναι μεγαλύτερο από 100 nm, η ευαισθησία δεν ορίζεται μονοσήμαντα από το FSR, αλλά τα χαρακτηριστικά διασποράς των κυματοδηγών παίζουν επίσης σημαντικό ρόλο. Αξιοποιώντας αυτά τα ευρήματα, η ευαισθησία αναμένεται να φτάσει κοντά στα 130.000 nm/RIU απλά βελτιστοποιώντας το πλάτος του φωτονικού κυματοδηγού σε συνδυασμό με ένα μεγάλο FSR εκατοντάδων νανομέτρων.

35

5 Διηλεκτρικές φορτώσεις ενσωματώνονται στην κορυφή της πλασμονικής λωρίδας για να παραχθεί μια κοιλότητα Bragg που μεγιστοποιεί τον ενεργό χρόνο έκθεσης του πλασμονικού πεδίου. Οι προκαταρκτικές προσομοιώσεις που δείχνουν ενισχυμένη ευαισθησία και ελήφθησαν με πλασμονικά λεπτά υμένια διακοσμημένα με Pórot-Fabry απεικονίζονται στα

10 Σχήματα 4 και 5. Το Σχ. 3 απεικονίζει τη διάδοση ενός επιφανειακού πλασμονίου που υποστηρίζεται από ένα μεταλλικό φιλμ αλουμινίου ενσωματωμένο σε ένα υδατικό διάλυμα. Η ευαισθησία του πλασμονικού τρόπου SPP σε μία τροποποίηση επιφάνειας αξιολογείται εφαρμόζοντας μια μεταβολή του δείκτη διάθλασης $\Delta n = 0,2$ σε ένα στρώμα πάχους $d = 20$ nm πάνω από το μεταλλικό φιλμ σε ένα πεπερασμένο μήκος διάδοσης L . Για έναν τρόπο

15 λειτουργίας λεπτού υμενίου, μια τέτοια τροποποίηση επιφάνειας έχει ως αποτέλεσμα μια αλλαγή φάσης $\Delta\varphi_F$ που αντιστοιχεί σε μια ευαισθησία φάσης του SPP τρόπου λεπτού υμενίου σε τροποποιήσεις της επιφάνειας ίση με $S_\varphi = \Delta\varphi / ((\Delta n \cdot d) / L) = 7.2e-3 \text{ rad}/(\text{RIU} \cdot \text{nm})/\mu\text{m}$. Εφαρμόζοντας την ίδια προσέγγιση σε τρόπους SPP που μεταδίδονται μέσω πλασμονικών

20 κοιλοτήτων Pórot-Fabry που αποτελούνται από κάτοπτρα Bragg διηλεκτρικής φόρτισης - με περίοδο $= 1,1 \mu\text{m}$, ύψος $= 0,55 \mu\text{m}$ - με αναφορά στα Σχ. 4 & 5, έχουμε ως αποτέλεσμα μια αυξημένη αλλαγή φάσης $\Delta\varphi_C$ από την οποία προκύπτει ένα παράγοντας ενίσχυσης ευαισθησίας $\eta = \Delta\varphi_C / \Delta\varphi_F$ σε σχέση με μία διάταξη γυμνού λεπτού υμενίου. Αυτός ο παράγοντας κλιμακώνεται με ενίσχυση του πεδίου εντός της κοιλότητας όταν εισάγονται

25 περισσότερες περιόδους. Με την ανάπτυξη συζευγμένων κοιλοτήτων Bragg όπου οι SPP τρόποι μεταπηδούν από τη μια κοιλότητα στην άλλη, στοχεύεται μια βελτίωση της ευαισθησίας κατά μία τάξη μεγέθους που σημαίνει ότι η εξαιρετικά υψηλή ευαισθησία των $130.000 \text{ nm}/\text{RIU}$ μπορεί να επιτευχθεί με μικρότερα ($< 40 \mu\text{m}$) μήκη πλασμονικού κυματοδηγού που μειώνουν το αποτύπωμα και τις απώλειες ή μικρότερο FSR ($< 150 \text{ nm}$) με αποτέλεσμα μια συσκευή με

30 ενισχυμένη ανοχή.

35 Οι παραπάνω προσεγγίσεις μπορούν να εφαρμοστούν σε δύο εναλλακτικές συμβολομετρικές διατάξεις που απεικονίζονται σχηματικά στα Σχήματα 6 και 7 αντίστοιχα. Η πρώτη του Σχ. 6 περιλαμβάνει ένα συμβατικό, ισοσκελισμένο συμβολόμετρο Mach Zehnder MZI όπου και οι δύο βραχίονες φιλοξενούν πανομοιότυπα τμήματα φωτονικού και πλασμονικού

40 κυματοδηγού λωρίδας. Διηλεκτρικές ράχες 602 βρίσκονται στην επάνω επιφάνεια των πλασμονικών λωρίδων 608, 609 για να επιτρέπουν τη διάδοση σε αργό φως, όπως περιγράφηκε προηγουμένως. Για να διευκολυνθεί η ανίχνευση, μόνο ένας από τους δύο πλασμονικούς κυματοδηγούς 608 απαιτεί ενεργοποίηση προκειμένου να χρησιμεύσει ως ο αισθητήριος μετατροπέας, ενώ ο αντίστοιχος πλασμονικός κυματοδηγός 609 στον κλάδο αναφοράς 606 πρέπει να επικαλυφθεί με παράγοντες αποκλεισμού για να εξυπηρετήσει ως

45 αναφορά. Με αυτόν τον τρόπο, όταν το υγρό δείγμα ρέει πάνω και από τους δύο βραχίονες 605, 606, συμβάντα δέσμευσης συμβαίνουν μόνο στον βραχίονα ανίχνευσης 605, με αποτέλεσμα αλλαγές τοπικού δείκτη διάθλασης (RI) που μπορούν να ανιχνευθούν από τον αισθητήριο κυματοδηγό. Η προσθήκη του ίδιου πλασμονικού κυματοδηγού στον βραχίονα αναφοράς 606 προσφέρει δύο πλεονεκτήματα που συμβάλλουν στη βελτίωση της

50 ευαισθησίας και στη βελτίωση του ορίου ανίχνευσης όπου ειδικότερα πρώτον, οι οπτικές απώλειες μεταξύ των δύο κλάδων 605, 606 εξισορροπούνται, οδηγώντας σε υψηλό λόγο απόσβεσης στην έξοδο του συμβολόμετρου [1], [10] και δεύτερον, ο θόρυβος που προέρχεται από διακυμάνσεις θερμοκρασίας, μη ειδική δέσμευση ή μεταβολές του δείκτη διάθλασης

στον συνολικό όγκο κατά τη φόρτωση του δείγματος ακυρώνεται [20], [21]. Οι θερμοοπτικοί μετατοπιστές φάσης 603, 610 που χρησιμοποιούνται σε κάθε κλάδο MZI, επιτρέπουν την ευθυγράμμιση του συντονισμού MZI εντός του φασματικού παραθύρου της φωτεινής πηγής. Ο ανθεκτικός στον θόρυβο χαρακτήρα του ισορροπημένου MZI μαζί με πιο προηγμένες τεχνικές επεξεργασίας δεδομένων και ακύρωσης θορύβου που θα χρησιμοποιούνται στο ηλεκτρονικό σύστημα ανάγνωσης αναμένεται στη συνέχεια να επιτρέπουν φασματική διακριτικότητα 10 pm και ως εκ τούτου τιμή ορίου ανίχνευσης LoD χαμηλότερη από 10^{-8} .

Η εναλλακτική, ανθεκτική στον θόρυβο διάταξη όπως φαίνεται στο Σχ. 7 αφορά την ανάπτυξη ενός διτροπικού συμβολόμετρου ενός βραχίονα. Αυτή η διάταξη χρησιμοποιεί δύο φωτονικούς κυματοδηγούς εισόδου 701, 707 που διαχωρίζονται από μια μεταλλική λωρίδα 705 που βρίσκεται επάνω σε ένα λεπτότερο φωτονικό στρώμα 704. Μια κοιλότητα Bragg αποτελούμενη από διηλεκτρικές φορτώσεις 703 είναι ενσωματωμένη στην επάνω διεπαφή του πλασμονικού κυματοδηγού λωρίδας 705. Στην πλασμονική περιοχή, σχηματίζονται 2 διεπαφές μετάλλου/διηλεκτρικού ικανές να υποστηρίξουν τρόπους SPP. Η κοιλότητα Bragg στην επάνω επιφάνεια έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να υποστηρίζει ένα πλασμονικό Bloch τρόπο διάδοσης που παρουσιάζει αργή διάδοση του φωτός κάτι το οποίο ενισχύει την αλληλεπίδραση φωτός-ύλης και αυξάνει την ευαισθησία του κυματοδηγού. Κατά τη διέγερση, αυτοί οι τρόποι συμβάλλουν στον φωτονικό κυματοδηγό εξόδου 707 υλοποιώντας το επιθυμητό συμβολόμετρο μονού βραχίονα. Η άνω μεταλλική επιφάνεια είναι εκτεθειμένη στο υπό έλεγχο δείγμα και χρησιμεύει ως ο βραχίονας ανίχνευσης, ενώ η κάτω επιφάνεια έχει το ρόλο του βραχίονα αναφοράς. Εκτός από την αποφυγή του θορύβου που προέρχεται από τη διαφορετική αντίληψη των περιβαλλοντικών διακυμάνσεων στην περίπτωση των χωρικά διαχωρισμένων σημάτων, η διτροπική διαμόρφωση μειώνει σημαντικά το χωρικό αποτύπωμα του αισθητήρα.

ΑΞΙΩΣΕΙΣ

- 5 **1.** Συμβολομετρική συσκευή ανίχνευσης οπτικού κυματοδηγού σε συστήματα ολοκληρωμένων φωτονικών κυκλωμάτων που αποτελείται από ένα στρώμα κυματοδηγού προορισμένο να λαμβάνει ένα οπτικό σήμα και να το κυματοδηγεί το εν λόγω οπτικό σήμα σύμφωνα με έναν προκαθορισμένο οπτικό τρόπο διάδοσης, καθώς επίσης και μία επιφάνεια ενός μέσου δοκιμής σε επικοινωνία με το στρώμα κυματοδηγού το οποίο ανταποκρίνεται σε ένα μέσο δοκιμής για να τροποποιεί τουλάχιστον ένα χαρακτηριστικό του οδηγούμενου οπτικού σήματος σε σχέση με 10 μία δοθείσα παράμετρο του εν λόγω μέσου δοκιμής, μέσω του οποίου το τροποποιημένο χαρακτηριστικό του οδηγούμενου οπτικού σήματος καθίσταται μετρήσιμο εν όψει του προσδιορισμού της δοθείσας παραμέτρου του εν λόγω μέσου δοκιμής, η οποία εν λόγω συσκευή περιλαμβάνει βιοαισθητήρες, αντιστοιχώς φωτονικά και πλασμονικά στοιχεία (101, 102, 111) σε ειδικά 15 σχεδιασμένα συμβολόμετρα MZI (101), ιδιαίτερα επίπεδους πλασμονικούς κυματοδηγούς (111), οι οποίοι είναι μονολιθικά ολοκληρωμένοι σε ολοκληρωμένα φωτονικά κυκλώματα, και περιλαμβάνει πλασμονικούς κυματοδηγούς με φράγματα περίθλασης Bragg (402, 502, 602, 609), οι οποίοι είναι κοινά ολοκληρωμένοι με φωτονικούς κυματοδηγούς (102, 605, 606), οι οποίοι 20 αποτελούνται από ολοκληρωμένους κυματοδηγούς, όπου ένας μηχανισμός καθυστέρησης του φωτός ενσωματώνεται στη συσκευή και χρησιμοποιείται μέσω φραγμάτων περίθλασης Bragg (602) έτσι ώστε να ενισχύσει την ευαισθησία σε πρωτοφανή επίπεδα διατηρώντας μικρά μήκη μορφοτροπέα, **η οποία χαρακτηρίζεται από το ότι** ενσωματώνονται στη συσκευή μέσα, δηλαδή μήκος του 25 φωτονικού κυματοδηγού στον ένα βραχίονα του MZI, ώστε να αυξηθεί το FSR (Ελεύθερη Φασματική Περιοχή) και να βελτιωθεί η αρχιτεκτονική ευαισθησία, καθώς επίσης και μέσα προσαρμογής για την προσαρμογή της φωτονικής γεωμετρίας λαμβάνοντας υπ' όψη τη διασπορά δεύτερης τάξης στους βραχίονες του πλασμο-φωτονικού MZI (605, 606), 30 **από το ότι** έχει ενσωματωμένους πλασμονικούς κυματοδηγούς λεπτού υμενίου (608, 609) με φράγματα περίθλασης Bragg όπου χρησιμοποιούνται φαινόμενα καθυστέρησης του φωτός, αυξάνοντας με αυτό τον τρόπο την ενεργό έκθεση του πλασμονικού πεδίου στον αναλύτη ώστε να αυξηθεί η ευαισθησία κυματοδηγού και η αρχιτεκτονική ευαισθησία, και 35 **από το ότι** διηλεκτρικές φορτώσεις ενσωματώνονται επάνω στην εν λόγω πλασμονική λωρίδα (111, 608, 609), δημιουργώντας με αυτόν τον τρόπο μια κοιλότητα Bragg (402, 502, 602, 703) μεγιστοποιώντας τον ενεργό χρόνο έκθεσης του εν λόγω πλασμονικού πεδίου.

2. Συσκευή σύμφωνα με τις προηγούμενες αξιώσεις 1, η οποία χαρακτηρίζεται από το ότι ένας πλασματικός κυματοδηγός τύπου λωρίδας (608, 609) ενσωματώνεται σε ένα φωτονικό MZI (101).

5 3. Συσκευή σύμφωνα με την προηγούμενη αξίωση 2, η οποία χαρακτηρίζεται από το ότι ο εν λόγω πλασματικός κυματοδηγός λωρίδας (111, 608, 609) έχει πλάτος μερικών μικρομέτρων και μήκος μερικών δεκάδων μικρομέτρων.

10 4. Συσκευή σύμφωνα με τις αξιώσεις 2 ή 3, η οποία χαρακτηρίζεται από το ότι αποτελείται από πλασματικούς κυματοδηγούς με φράγματα περίθλασης Bragg κοινά ολοκληρωμένους με φωτονικούς κυματοδηγούς, κάτι το οποίο ενισχύει την απόδοση ως προς την ευαισθησία σε τιμές πάνω από 130000 nm/RIU ενώ ταυτόχρονα μειώνεται ο θόρυβος και το χωρικό αποτύπωμα, και από το γεγονός ότι το FSR επιλέγεται να είναι μεγαλύτερο από 100 nm, όπου το πλάτος του εν λόγω φωτονικού κυματοδηγού (102) βελτιστοποιείται σε συνδυασμό με ένα μεγάλο FSR, και φέρνοντας την ευαισθησία κοντά στην τιμή των 130000 nm/RIU.

15

20 5. Συσκευή σύμφωνα με την αξίωση 1, η οποία χαρακτηρίζεται από το ότι ενσωματώνονται πλασματικά λεπτά υμένια διακοσμημένα με Perot-Fabry ενισχύοντας την ευαισθησία, όπου η διάδοση ενός τρόπου επιφανειακού πλασματικού υποστηρίζεται από ένα μεταλλικό υμένιο αλουμινίου ενσωματωμένο σε ένα υδατικό διάλυμα, επιπλέον όπου η ευαισθησία του πλασματικού τρόπου (SPP) σε μία τροποποίηση της επιφάνειας αξιολογείται εφαρμόζοντας μια αλλαγή στο δείκτη διάθλασης σε ένα στρώμα d επάνω στην επιφάνεια του μεταλλικού υμενίου και για ένα πεπερασμένο μήκος διάδοσης L .

25

30 6. Συσκευή σύμφωνα με την προηγούμενη αξίωση 5, η οποία χαρακτηρίζεται από το ότι για ένα τρόπο λεπτού υμενίου, η εν λόγω τροποποίηση της επιφάνειας αποδίδει μια αλλαγή φάσης $\Delta\varphi_F$ που αντιστοιχεί σε μια ευαισθησία φάσης του SPP τρόπου λεπτού υμενίου στην τροποποίηση επιφάνειας που δίνεται από τη σχέση $S_\phi = \Delta\varphi_F / ((\Delta n d)L)$, και/ή από το γεγονός ότι εφαρμόζοντας την ίδια τροποποίηση σε SPP τρόπους που διαδίδονται μέσω πλασματικών κοιλοτήτων Perot-Fabry που αποτελούνται από καθρέφτες Bragg διηλεκτρικής φόρτισης αποδίδει μια ενισχυμένη αλλαγή φάσης $\Delta\varphi_C$ από την οποία προκύπτει ένα παράγοντας ενίσχυσης ευαισθησίας $\eta = \Delta\varphi_C / \Delta\varphi_F$ σε σχέση με μία διάταξη γυμνού λεπτού υμενίου.

35

40 7. Συσκευή σύμφωνα με την αξίωση 5 ή 6, η οποία χαρακτηρίζεται από το ότι εισάγονται περισσότερες περιόδους διότι ο εν λόγω παράγοντας κλιμακώνεται με την ενίσχυση του πεδίου μέσα στην κοιλότητα, και επιπρόσθετα όπου εκεί αναπτύσσονται συζευγμένες κοιλοότητες με τους SPP τρόπους να μεταπηδούν από

5 την μία κοιλότητα στην άλλη, δημιουργώντας μια βελτίωση της ευαισθησίας κατά μία τάξη μεγέθους οδηγώντας στην υπερυψηλή τιμή ευαισθησίας των 130000 nm/RIU, είτε με μικρότερα μήκη πλασμονικού κυματοδηγού μειώνοντας το χωρικό αποτύπωμα και τις απώλειες, είτε με ένα μικρότερο FSR αποδίδοντας μια συσκευή με ενισχυμένη ανοχή.

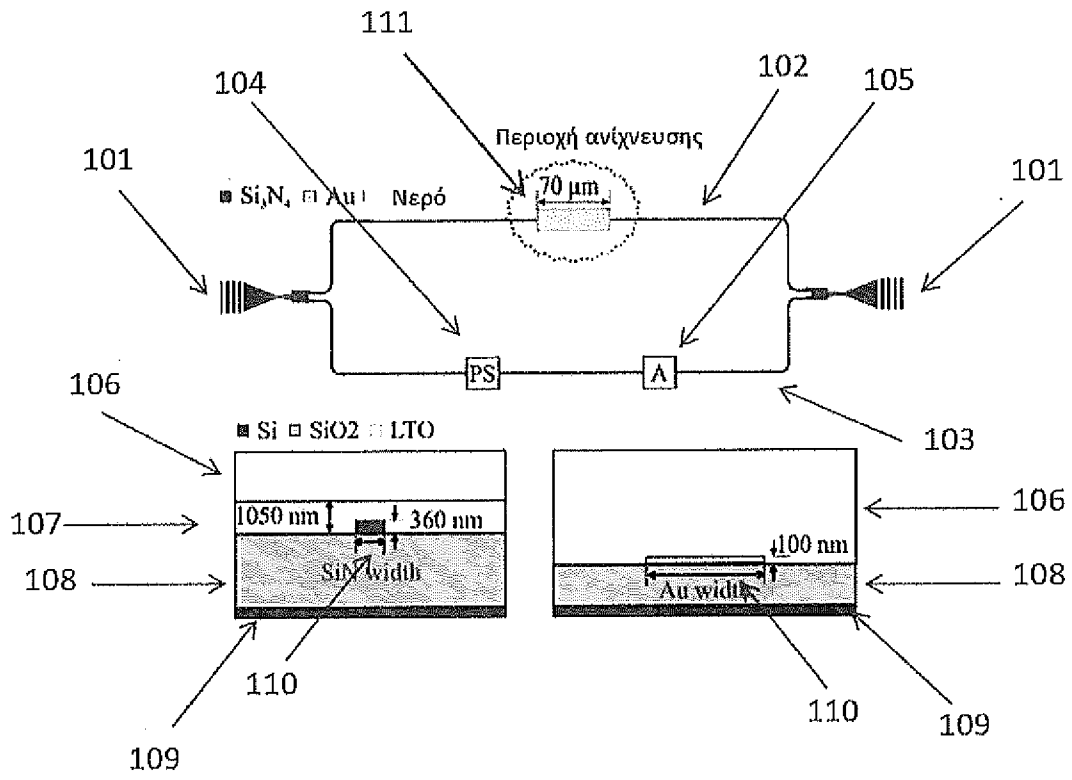
10 **8.** Συσκευή σύμφωνα με μία από τις προηγούμενες αξιώσεις 1 ή 5 έως 7, η οποία χαρακτηρίζεται από το ότι μια πρώτη διάταξη περιλαμβάνει ένα ισοσκελισμένο συμβολόμετρο Mach Zehnder (MZI) που έχει και στους δύο βραχίονες πανομοιότυπα τμήματα φωτονικού κυματοδηγού λωρίδας και πλασμονικού κυματοδηγού λωρίδας, όπου διηλεκτρικές ράχες (602) που βρίσκονται στην επάνω επιφάνεια των πλασμονικών λωρίδων (608, 609) επιτρέπουν τη διάδοση αργού φωτός, και επιπλέον όπου για να διευκολυνθεί η ανίχνευση, μόνο ένας από τους 15 δύο πλασμονικούς κυματοδηγούς (608, 609) ενεργοποιείται προκειμένου να χρησιμεύσει ως αισθητήριο μετατροπέας, ενώ ο αντίστοιχος πλασμονικός κυματοδηγός (609) στον βραχίονα αναφοράς (606) είναι επικαλυμμένος με παράγοντες μπλοκαρίσματος που χρησιμεύουν ως αναφορά, έτσι ώστε όταν το υγρό δείγμα ρέει και στους δύο βραχίονες (605, 606), συμβάντα δέσμευσης 20 συμβαίνουν μόνο στον βραχίονα ανίχνευσης (605), οδηγώντας σε τοπικές αλλαγές τοπικού δείκτη διάθλασης (RI) που ανιχνεύονται από τον αισθητήριο κυματοδηγό (608), και όπου ειδικότερα προσθέτοντας τον ίδιο πλασμονικό κυματοδηγό στον βραχίονα αναφοράς (609) ενισχύεται η ευαισθησία και βελτιώνεται το όριο ανίχνευσης.

25 **9.** Συσκευή σύμφωνα με την προηγούμενη αξίωση 8, η οποία χαρακτηρίζεται από το ότι οι οπτικές απώλειες μεταξύ των δύο κλάδων (605, 606) εξισορροπούνται, αποδίδοντας υψηλό λόγο σβέσης στην έξοδο του συμβολόμετρου, ή/και από το ότι ο θόρυβος που προέρχεται από διακυμάνσεις θερμοκρασίας, μη ειδικές συνδέσεις ή μεταβολές του δείκτη διάθλασης κατά τη φόρτωση του δείγματος ακυρώνεται.

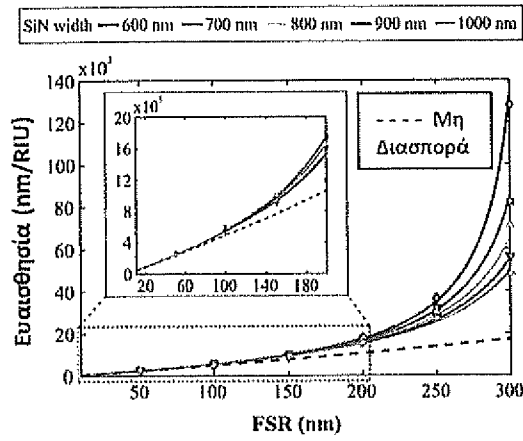
30 **10.** Συσκευή σύμφωνα με την προηγούμενη αξίωση 9, η οποία χαρακτηρίζεται από το ότι οι θερμο-οπτικοί ολισθητές φάσης που χρησιμοποιούνται σε κάθε κλάδο του MZI (605,606), επιτρέπουν την ευθυγράμμιση του συντονισμού του MZI εντός του φασματικού παραθύρου της οπτικής πηγής, ιδιαίτερα όπου ο ανθεκτικός στον 35 θόρυβο χαρακτήρας του ισορροπημένου MZI μαζί με προηγμένες τεχνικές επεξεργασίας δεδομένων και ακύρωσης θορύβου που χρησιμοποιούνται στο ηλεκτρονικό σύστημα ανάγνωσης επιτρέπουν στη συνέχεια χαμηλές τιμές ορίου ανίχνευσης (LoD).

40 **11.** Συσκευή σύμφωνα με την αξίωση 1, η οποία χαρακτηρίζεται από το ότι μια 2η διάταξη μιας εναλλακτικής αρχιτεκτονικής ανθεκτικής στον θόρυβο περιλαμβάνει

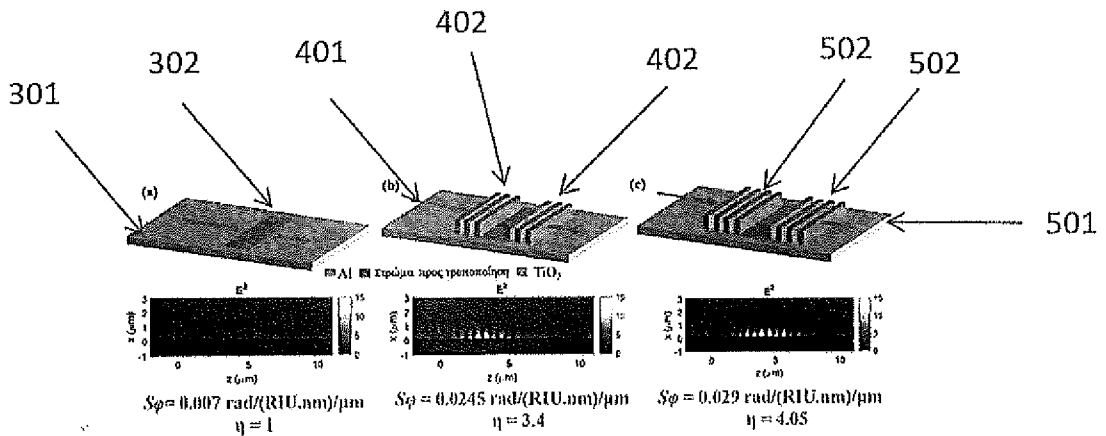
5 την ανάπτυξη ενός διτροπικού συμβολόμετρου (701), όπου παρέχονται δύο φωτονικοί κυματοδηγοί εισόδου που διαχωρίζονται από μια μεταλλική λωρίδα (705) που βρίσκεται επάνω σε ένα λεπτότερο φωτονικό στρώμα (704), περαιτέρω όπου μια κοιλότητα Bragg αποτελούμενη από διηλεκτρικές φορτώσεις (703) είναι ενσωματωμένη στην επάνω διεπαφή (707) του πλασματικού κυματοδηγού λωρίδας (705), στην πλασματική περιοχή όπου 2 διεπαφές μετάλλου/διηλεκτρικού σχηματίζονται για να υποστηρίξουν τρόπους SPP, ειδικότερα όπου η κοιλότητα Bragg στην επάνω επιφάνεια έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να υποστηρίζει ένα πλασματικού Bloch τρόπο διάδοσης που παρουσιάζει αργή διάδοση του φωτός 10 κάτι το οποίο ενισχύει την αλληλεπίδραση φωτός-ύλης και αυξάνει την ευαισθησία του κυματοδηγού, περαιτέρω όπου κατά τη διέγερση, αυτοί οι τρόποι συμβάλλουν στον φωτονικό κυματοδηγό εξόδου υλοποιώντας το στοχευόμενο συμβολόμετρο μονού βραχίονα, και όπου επιπλέον η εν λόγω άνω μεταλλική επιφάνεια 15 χρησιμεύει ως ο βραχίονας ανίχνευσης, ενώ η κάτω επιφάνεια έχει το ρόλο του βραχίονα αναφοράς, δημιουργώντας έτσι μια διτροπική διάταξη που μειώνει το χωρικό αποτύπωμα του αισθητήρα.



ΣΧ. 1



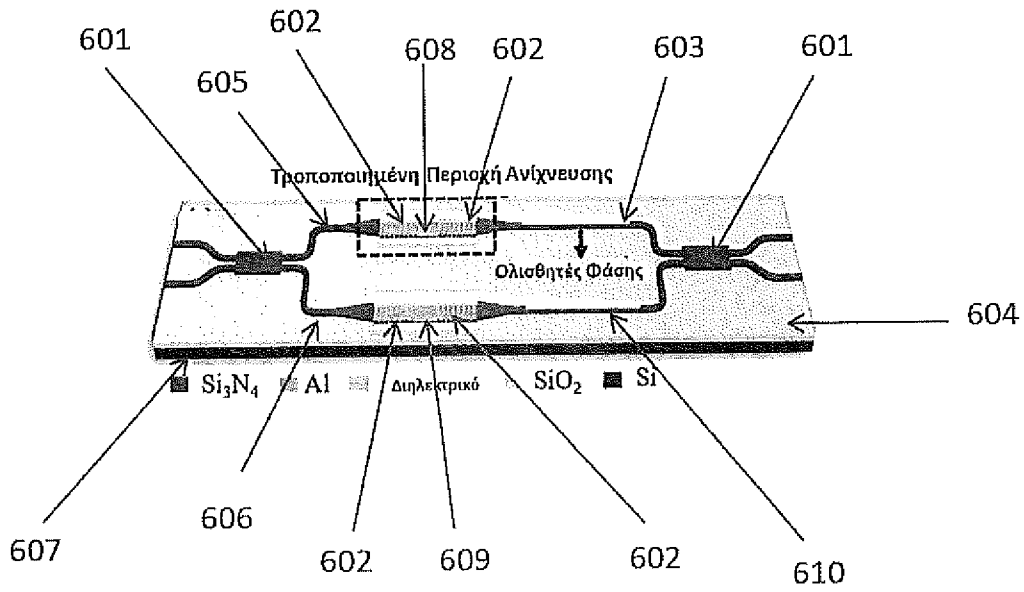
ΣΧ. 2



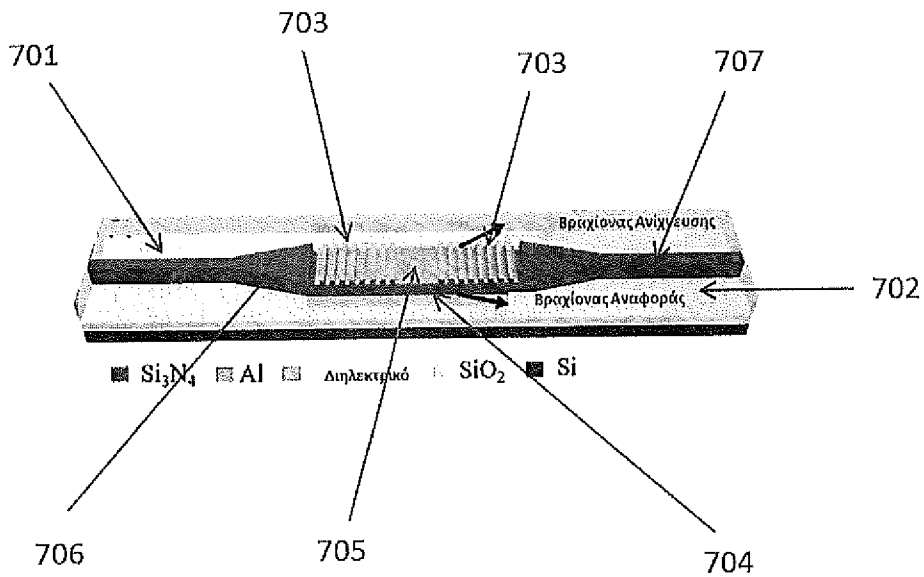
ΣΧ. 3

ΣΧ. 4

ΣΧ. 5



ΣΧ. 6



ΣΧ. 7



ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΙΔΙΟΚΤΗΣΙΑΣ
(Ο.Β.Ι.)

ΤΕΛΙΚΗ ΕΚΘΕΣΗ ΕΡΕΥΝΑΣ

Αριθμός αίτησης
20230101081

ΕΓΓΡΑΦΑ ΘΕΩΡΟΥΜΕΝΑ ΩΣ ΣΧΕΤΙΚΑ			
Κατηγορία	Σχετικό έγγραφο με επισήμανση, όπου χρειάζεται, των σχετικών παραγράφων	Σχετικό με αξίωση	Διεθν. Ταξινόμηση Int. Cl. 01/01/2024(AL)
A	XP011610431 / HUANG YIN ET AL 1/6/2016 "Design of Compact Mach-Zehnder Interferometer-Based Slow-Light-Enhanced Plasmonic Waveguide Sensors", JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, IEEE USA, τόμος 34, No 11, σελίδες 2796 - 2803 ISSN: 0733 - 8724, DOI: 10.1109/JLT.2016.2546317 [ανακτήθηκε στις 18-05-2016] *περίληψη, σχέδιο 1* *σελίδα 2796, δεξιά στήλη, γραμμή 43 - σελίδα 2797, αριστερή στήλη, γραμμή 18*	1-11	G01N 21/552 G01N 21/77
A	WO2018/150205A1 / ARISTOTLE UNIV OF THESSALONIKI RESEARCH COMMITTEE E.L.K.E. ET AL 23/8/2018 *σελίδα 7, γραμμές 17-19, πίνακας 1*	1-11	Τεχνικά πεδία που ερευνήθηκαν
A	XP060035143 / HUANG Y ET AL 7/3/2014 "Slow-light enhanced nanoscale plasmonic waveguide sensors and switches", PROCEEDINGS OF SPIE, IEEE, US, τόμος 8988, σελίδες 89880V - 89880V, DOI: 10.1117/12.2041057 ISBN: 978 - 1 - 62841 -730 - 2 *ολόκληρο το έγγραφο*	1-11	
A	XP093191226 / QIN KUN ET AL 5/2/2016 "Slow Light -Mach-Zehnder Interferometer as Label-free Biosensor with Scalable Sensitivity", OPTICS LETTERS, τόμος 41, No. 4,	1-11	G01N G02B B82Y
Ημερομηνία περάτωσης της έρευνας :		19/12/2024	
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 &: 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
(Ο.Β.Ι.)

ΤΕΛΙΚΗ ΕΚΘΕΣΗ ΕΡΕΥΝΑΣ

Αριθμός αίτησης
20230101081

ΕΓΓΡΑΦΑ ΘΕΩΡΟΥΜΕΝΑ ΩΣ ΣΧΕΤΙΚΑ			
Κατηγορία	Σχετικό έγγραφο με επισήμανση, όπου χρειάζεται, των σχετικών παραγράφων	Σχετικό με αξίωση	Διεθν. Ταξινόμηση Int. Cl. 01/01/2024(AL)
A	σελίδες 753 - 756, US, ISSN: 0146 - 9592 Ανακτήθηκε από το Διαδίκτυο: URL:https:// doi.org/10.1364/OL.41.000753> *ολόκληρο το έγγραφο*	1-11	G01N 21/552 G01N 21/77
A	XP093191213 / HUANG YIN ET AL 1/6/2015 "Slow-light enhanced subwavelength plasmonic waveguide refractive index sensors", OPTICS EXPRESS, τόμος 23, No 11, σελίδα 14922, US, ISSN: 1094 -4087, DOI: 10.1364/OE.23.014922 Ανακτήθηκε από το Διαδίκτυο: URL:https://opg.optica.org/directpdfaccess/c5cc1fbc-6d58-412b-8bfd38f8bfa4e66_319126/oe-23-11-14922.pdf?da=1&id=319126&seq=0&mobile=no> *ολόκληρο το έγγραφο*	1-11	Τεχνικά πεδία που ερευνήθηκαν G01N G02B B82Y
A	XP060129025 / CHATZIANAGNOSTOU E ET AL 26/2/2020 "High-sensitivity plasmophotonic interferometric sensors on a chip", SPIE PROCEEDINGS; [PROCEEDINGS OF SPIE ISSN: 0277-786X], SPIE, US, τόμος 11284, σελίδες 112841V-112841V, DOI: 10.1117/12.2543547 ISBN: 978-1-5106-3673-6 *ολόκληρο το έγγραφο*	1-11	
A	WO2006/122402A1 / ECOLE POLYTECH, KASHYAP RAMAN ET AL	1-11	
Ημερομηνία περάτωσης της έρευνας :		19/12/2024	
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 &: 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
(Ο.Β.Ι.)

ΤΕΛΙΚΗ ΕΚΘΕΣΗ ΕΡΕΥΝΑΣ

Αριθμός αίτησης
20230101081

ΕΓΓΡΑΦΑ ΘΕΩΡΟΥΜΕΝΑ ΩΣ ΣΧΕΤΙΚΑ			
Κατηγορία	Σχετικό έγγραφο με επισήμανση, όπου χρειάζεται, των σχετικών παραγράφων	Σχετικό με αξίωση	Διεθν. Ταξινόμηση Int. Cl. 01/01/2024(AL)
	23/11/2006 *ολόκληρο το έγγραφο*		G01N 21/552 G01N 21/77
			Τεχνικά πεδία που ερευνήθηκαν
			G01N G02B B82Y
Ημερομηνία περάτωσης της έρευνας :		19/12/2024	
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 &: μέλος της ίδιας οικογένειας ευρεσιτεχνιών, αντίστοιχο έγγραφο	

ΣΤΑΦΥΛΑΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ
Διευθυντής Ελέγχου Τίτλων

ΑΙΤΙΟΛΟΓΗΜΕΝΗ ΓΝΩΜΗ

Αρ. φακέλου:	Ημερομηνία κατάθεσης (ημέρα/μήνας/έτος) 28-12-2023	Ημερομηνία προτεραιότητας (ημέρα/μήνας/έτος)	Αρ. αίτησης: 20230101081
Διεθνής Ταξινόμηση Ευρεσιτεχνιών (IPC) G01N21/552, G01N21/77			
Αιτών ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ – ΕΛΚΕ, ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ - ΕΛΚΕ			

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

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: 19/12/2024	Συντάκτης: Γ.ΟΙΚΟΝΟΜΙΔΗΣ
------------------------	--------------------------

ΑΙΤΙΟΛΟΓΗΜΕΝΗ ΓΝΩΜΗ

Πλαίσιο αρ. I **Θεμελίωση της παρούσας γνώμης**

1. Η παρούσα γνώμη θεμελιώθηκε με βάση το τελευταίο αποδεκτό σύνολο αξιώσεων που κατατέθηκε την έναρξη της 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

Πλαίσιο αρ. V **Αιτιολογημένη δήλωση αναφορικά με το νέο, το εφευρετικό βήμα ή τη βιομηχανική εφαρμογή· αναφορές και επεξηγήσεις της δήλωσης**

1.	Δήλωση			
	Νέο (N)	Ναι:	Αξιώσεις	1-11
		Όχι:	Αξιώσεις	...
	Εφευρετικό βήμα (EB)	Ναι:	Αξιώσεις	1-11
		Όχι:	Αξιώσεις	...
	Βιομηχανική εφαρμογή (BE)	Ναι:	Αξιώσεις	1-11
		Όχι:	Αξιώσεις	...

ΑΙΤΙΟΛΟΓΗΜΕΝΗ ΓΝΩΜΗ

Σχετικά με το Αντικείμενο V

Αιτιολογημένη δήλωση σε σχέση με το νέο, το εφευρετικό βήμα ή τη βιομηχανική εφαρμογή
- παραπομπές και επεξηγήσεις που δικαιολογούν τέτοια δήλωση

1. Γίνεται αναφορά στα ακόλουθα έγγραφα:

D1	XP011610431	HUANG YIN ET AL	(01.06.2016)
D2	WO 2018/150205 A1	ARISTOTLE UNIV OF THESSALONIKI RESEARCH COMMITTEE ELKE [GR] ET AL	(23.08.2018)

2. Νέον της εφεύρεσης (N.1733/1987, άρθρο 5 παρ.1 & 3).

Το έγγραφο D1 αναφέρεται σε [D1: περίληψη· σχήμα 1· ενότητα I. Εισαγωγή]:

Διάταξη συμβολομετρικής ανίχνευσης οπτικού κυματοδηγού σε φωτονική διάταξη ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, περιλαμβάνουσα στρώμα κυματοδηγού για λήψη οπτικού σήματος και διάδοση του εν λόγω οπτικού σήματος σε συμφωνία με προκαθορισμένο τρόπο διάδοσης οπτικού κυματοδηγού [D1: σχήμα 1(α)], και επιφάνεια μέσου εξέτασης σε επικοινωνία με το στρώμα κυματοδηγού και αποκρινόμενο σε μέσο εξέτασης [D1: σχήμα 1(α)] για τροποποίηση τουλάχιστον ενός χαρακτηριστικού του διαδιδόμενου οπτικού σήματος σε σχέση με δοθείσα παράμετρο του εν λόγω μέσου εξέτασης, όπου το τροποποιημένο χαρακτηριστικό του διαδιδόμενου οπτικού σήματος είναι μετρήσιμο από την σκοπιά του προσδιορισμού της δοθείσας παραμέτρου του εν λόγω μέσου εξέτασης, χαρακτηριζόμενη από το ότι η εν λόγω διάταξη περιλαμβάνει βιοαισθητήρες, αντίστοιχα φωτονικά και πλασματικά εξαρτήματα σε ειδικώς σχεδιασμένες MZI διαμορφώσεις, ιδίως επίπεδους πλασματικούς κυματοδηγούς, τα οποία είναι μονολιθικώς ολοκληρωμένα σε φωτονικά ολοκληρωμένα κυκλώματα, και από το ότι περιλαμβάνει πλασματικούς κυματοδηγούς βασιζόμενους σε διάφραγμα Bragg [D1: σχήμα 1(β)], οι οποίοι είναι συνολικώς ολοκληρωμένοι με φωτονικούς κυματοδηγούς, οι οποίοι αποτελούνται από ολοκληρωμένους κυματοδηγούς, όπου στη διάταξη είναι ολοκληρωμένο τεχνικό μέσο βραδέως μηχανισμού φωτός [D1: περίληψη· σχήματα 1(β), 1(γ)] χρησιμοποιούμενο με τεχνικό μέσο φραγμού περίθλασης Bragg [D1: σχήμα 1(β)], προκειμένου να ενισχυθεί η ευαισθησία σε άνευ προηγουμένου επίπεδα διατηρώντας βραχύ

ΑΙΤΙΟΛΟΓΗΜΕΝΗ ΓΝΩΜΗ

μήκος μεταλλάκτη [D1: σελίδα 2796, δεξιά στήλη, γραμμή 43 – σελίδα 2797, αριστερή στήλη, γραμμή 18].

Το έγγραφο **D1** δεν εμπεριέχει **όλα τα ουσιώδη** τεχνικά χαρακτηριστικά της κύριας αξίωσης 1 της προς εξέταση εφεύρεσης. Παρατηρείται ότι δεν υπάρχει τίποτε στη διαθέσιμη στάθμη της τεχνικής που να προτείνει διάταξη όπου: *διηλεκτρικά φορτία ενσωματώνονται πάνω στην εν λόγω πλασμονική λωρίδα δημιουργώντας έτσι διαμόρφωση κοιλότητας Bragg, για αύξηση του χρόνου έκθεσης του πλασμονικού πεδίου σε αναλύτη και έτσι για την εξασφάλιση ενισχυμένης ευαισθησίας.*

Ως εκ τούτου, το αντικείμενο αυτών των αξιώσεων θεωρείται ότι ενέχει εφευρετικό βήμα. Ως εκ τούτου η κύρια ανεξάρτητη αξίωση 1 καθώς και οι εξαρτημένες αξιώσεις 2-11 **είναι νέες και εφευρετικές.**

3. Βιομηχανική εφαρμογή (N.1733/1987, άρθρο 5 παρ. 1 & 5).

Το αντικείμενο της κύριας αξίωσης 1 ικανοποιεί τις διατάξεις του N.1733/1987, άρθρο 5, παρ. 1 & 5, καθώς μπορεί να εφαρμοσθεί στον τομέα των φωτονικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.