

Applicazioni oftalmiche delle Metalenti

Vittoria Baruzzu*

*CdL Ottica e Optometria, Dipartimento di Fisica, Università degli Studi di Torino.
Relatori: Prof.ssa Michela Greco, Dott. Luca Boarino.

Abstract: Le Metalenti, definite anche come lenti planari, permettono di focalizzare l'intero spettro visibile in un unico punto, eliminando così le aberrazioni cromatiche da cui sono affetti tutti i sistemi ottici. Le nanostrutture di cui sono composte sono progettate per manipolare la fase, l'ampiezza e la polarizzazione della luce. Lo spessore nanometrico e la modalità di interazione con la luce rendono queste lenti particolarmente adatte ad applicazioni nel campo oftalmico, come lenti correttive o lenti a contatto.

I. INTRODUZIONE

I recenti progressi nel campo dei metamateriali con la realizzazione delle Metalenti ad opera del fisico italiano Federico Capasso, professore di fisica applicata all'università di Harvard, sono nel settore dell'ottica un'importante innovazione e uno dei campi di ricerca in rapida crescita. Le Metalenti sono state premiate tra le dieci scoperte scientifiche più importanti del 2016 sulla rivista Science e sono una delle prime dieci tecnologie emergenti del 2019 secondo World Economic Forum e Scientific American. Queste speciali lenti hanno spessori dell'ordine dei nanometri, e grazie a questa loro caratteristica, potrebbero sostituire le lenti curve e più pesanti attualmente utilizzate nei dispositivi ottici. Negli ultimi anni le Metalenti hanno mostrato un grande potenziale per subentrare ai componenti ottici di elevato spessore in virtù delle loro caratteristiche ultrasottili e planari [Fan Z. B. et al., 2018]. Le Metalenti sono metasuperfici, superfici piatte e sottilissime, che utilizzano nanostrutture per focalizzare equamente le lunghezze d'onda della luce ed eliminare l'aberrazione cromatica. Le metasuperfici presentano un film di nanostrutture, progettato per manipolare la fase, l'ampiezza e la polarizzazione della luce. Le Metalenti focalizzano la luce come una lente e grazie alla particolare geometria della loro superficie, possono focalizzare tutte le lunghezze d'onda in posizioni specifiche [Mandel S., 2020]. Lo scopo di questo studio è presentare le fasi dello sviluppo e della produzione di una Metalente, mettendone in evidenza le peculiarità, in particolare relativamente all'interazione della luce con le nanostrutture, e indagare sulla possibilità di un suo impiego nel campo oftalmico, come lente correttiva o come lente a contatto.

II. METALENTI

La Metalente presenta sulla sua struttura dei minuscoli pilastri (nanopillar) che, in base alla loro distribuzione e specifica posizione, guidano la lunghezza d'onda incidente ad un punto focale. Questi pilastri, misurati in nanometri, hanno

strutture di dimensione inferiore alla lunghezza d'onda della radiazione elettromagnetica con cui interagiscono, e sono fatti di diversi possibili materiali come il biossido di titanio (TiO_2), il nitruro di silicio (Si_3N_4), il silicio amorfo (a-Si), il nitruro di gallio (GaN) ecc. Nella sua ricerca, Capasso definisce la struttura della Metalente come una superficie composta da sfasatori distanziati delle lunghezze d'onda in corrispondenza di un'interfaccia, che permettono un controllo senza precedenti sulle proprietà della luce e dispongono di una tecnologia ottica avanzata consentendo funzionalità versatili in una struttura planare [Capasso F. et al., 2016]. Le diverse lunghezze d'onda possono essere focalizzate in un dato punto modificando larghezza, altezza, distanza e forma dei nanopillar. Questi elementi controllano simultaneamente la velocità di lunghezze d'onda differenti e l'indice di rifrazione della superficie della Metalente. Ciò fornisce ritardi temporali variabili alle lunghezze d'onda che passano attraverso i diversi pillar, in modo che tutto lo spettro incidente arrivi al punto focale nello stesso momento. I ricercatori di Harvard, insieme al Prof. Capasso, hanno sviluppato Metalenti in grado di focalizzare tutto lo spettro di luce visibile in un punto particolare in alta risoluzione (fig.1). La lente da loro creata utilizza come guide d'onda delle nanopinne (nanofins) di biossido di titanio (TiO_2) che focalizzano tutte le lunghezze d'onda della luce allo stesso modo, eliminando l'aberrazione cromatica.

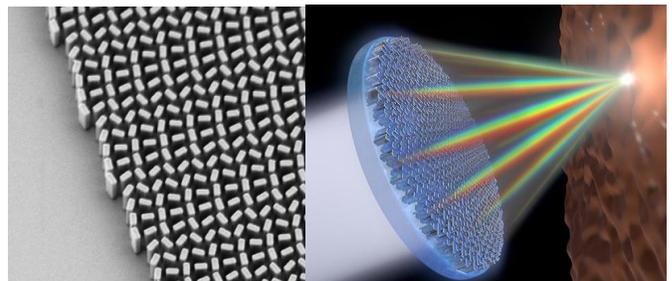


Figura 1a. Micrografia al microscopio elettronico a scansione (SEM) di una porzione della Metalente in TiO_2 . Tratta da (Capasso F. et al., 2016).

Figura 1b. Singola Metalente che focalizza l'intero spettro visibile della luce in un punto - Harvard University Center for Nanoscale Systems (CNS). Tratta da (Burrows L., 2018).

Una Metalente può focalizzare ugualmente tutti i colori in un unico punto. Finora, questo è stato possibile solo sovrapponendo due o più lenti tradizionali. La luce policromatica che attraversa un diotro, non possiede un singolo fuoco bensì diversi punti focali, questo fenomeno, che dà origine all'aberrazione cromatica, avviene principalmente perché lunghezze d'onda diverse vengono rifratte in maniera diversa. Tutti i dispositivi ottici sono affetti da aberrazioni e utilizzano due o più lenti curve con spessori distinti per attenuarle, aggiungendo così ingombro allo strumento. L'aberrazione cromatica può essere in parte corretta con l'utilizzo di un sistema multiplo di lenti (Doppio acromatico o Tripletto acromatico) ma non viene definitivamente eliminata. In questo modo si può portare il sistema ad avvicinare maggiormente i vari fuochi, riducendo la distorsione data dall'aberrazione cromatica. La metasuperficie delle lenti realizzate da Capasso e dalla sua équipe, permette di eliminare le aberrazioni cromatiche consentendo una focalizzazione unica della luce policromatica. Le Metalenti vengono perciò dette acromatiche. Il principio delle Metalenti è dunque il controllo del fronte d'onda mediante le nanostrutture di cui dispone in superficie. Anche le lenti correttive oftalmiche sono affette da aberrazioni tra cui quelle cromatiche assiali e extra-assiali. Ad oggi per ridurre le aberrazioni ottiche ci si serve di lenti dette asferiche, lenti più sottili rispetto alle tradizionali lenti sferiche, delimitate da una superficie parabolica. Le lenti asferiche riducono notevolmente le aberrazioni nonostante non vi sia la convergenza dei raggi in un unico punto, ma in diversi punti ravvicinati. In campo optometrico, per il futuro, sono stati proposti numerosi materiali prototipi per aiutare nella correzione visiva e nell'eliminazione delle distorsioni ottiche. Il prototipo di "Metalens" è una lente planare, di circa un micron di spessore. Anziché utilizzare un vetro omogeneo o un materiale polimerico, questa lente prototipo ha milioni di "nanopillar" in biossido di titanio, che sono disposti su misura, su un'unica superficie, per piegare lo spettro luminoso in modo da correggere l'ametropia. È dunque possibile che le lenti ingombranti e antiestetiche necessarie per la correzione di ametropie elevate siano sostituite da questa nuova generazione di lenti [Pillay R., 2020].

III. DESIGN

La nanostruttura in cui si organizza una Metalente è formata da piccoli pilastri (pillar) che piegano la luce quando attraversa la lente. Per il design si progetta una serie di nanopillar ad alta trasmittanza e piena copertura di fase 2π in un reticolo periodico. Esistono vari tipi di nano-pilastri dielettrici che possono essere presi in considerazione per la realizzazione di una Metalente, tra cui quelli a fenditura,

cuboidi, cilindrici ecc. In questa ricerca, per la produzione di una Metalente, si sono presi in considerazione dei nano elementi cilindrici. I pillar sono distanziati tra loro da un passo specifico e hanno un diametro che varia in base alla posizione in cui si trovano in modo da manipolare le onde luminose che vi passano attraverso. La disposizione geometrica dell'array dei nanopillar è il frutto di un algoritmo che ricerca una distanza focale unica per tutti i colori dello spettro visibile in modo da rendere la lente priva di aberrazione cromatica. Si costruisce così una mappa del ritardo di fase data da una mappatura dei diametri dei pillar. I nano-cilindri devono avere periodo minore dell'onda elettromagnetica che li attraversa, in modo da essere a loro volta delle nuove sorgenti puntiformi. Inoltre è importante che tutti i nano-pilastri abbiano fra loro la stessa altezza perché diversamente sarebbe difficile la loro fabbricazione, di conseguenza l'unica variazione possibile per ottenere la fase di trasmissione ritardata (cambiamento di fase da 0 a 2π) è quella del diverso raggio dei pillar [Dhamavarapu R., 2020].

IV. FABBRICAZIONE

Il campione oggetto di studio è stato realizzato nel seguente modo. In questa ricerca si è scelto come materiale per le nanostrutture, il silicio amorfo (a-Si).

Su un substrato di vetro viene depositato il silicio amorfo (a-Si) tramite *Deposizione Chimica da fase a Vapore Plasma Inattiva* (PECVD) per ottenere così una copertura uniforme su tutto il substrato e percentuali di impurità molto basse. La deposizione di a-Si è dello spessore di 270 nm.

La superficie del campione viene poi coperta da una pellicola sensibile agli elettroni, detta *resist*, fotosensibile. Questa deposizione avviene in camera pulita (Clean Room), tramite *Deposizione per Rotazione* (Spin). La Clean Room è un ambiente privo di impurità sospese in aria, come polveri o particelle inquinanti, che potrebbero depositarsi sul campione causando così difetti o una cattiva uniformità. L'applicazione del fotoresist avviene mettendo in rapida rotazione il campione, costituito da un substrato di vetro più silicio amorfo precedentemente depositato. Questa tecnica detta Spin Coating prevede l'inondazione del substrato del campione con una soluzione di resist tramite una pipetta. Si aziona quindi la Spin-machine a 3000 rotazioni per minuto (rpm). Questa rotazione a velocità costante viene mantenuta per 30 sec, fino a raggiungere la quasi completa evaporazione del solvente. Dopo la deposizione del resist il campione è stato riscaldato alla temperatura di 90 °C per 60 sec, per far evaporare il solvente residuo e temprare stress causati dal precedente spinning, questo al fine di migliorare l'adesione del resist al substrato.

Il resist è una sostanza liquida organica o polimerica che, se esposta alle radiazioni, varia le proprie caratteristiche chimiche, diventando più o meno solubile. Esistono due tipologie di fotoresist con comportamenti opposti, il resist positivo e il resist negativo, quest'ultimo utilizzato per la fabbricazione della Metalente. Nel caso della Metalente realizzata in laboratorio, si è utilizzato il resist negativo MNA2401. In questa tipologia di fotoresist, le parti esposte alla radiazione della Litografia subiscono un rafforzamento dei legami tra le molecole che lo compongono. Il resist negativo, in partenza solubile alla soluzione di sviluppo, diviene insolubile dopo l'irradiazione litografica. Dopo l'esposizione il composto fotosensibile assorbe l'energia luminosa e la trasforma in energia chimica, con conseguente formazione di legami chimici [Ferrara A., 2021].

Electron Beam Lithography (EBL):

La Litografia a fascio elettronico è il procedimento di trasferimento di una geometria su una superficie. Il fascio elettronico generato viene indirizzato verso il campione coperto di resist e guidato da un computer verso le regioni da impressionare. Un "pennello" di elettroni viene pilotato da un calcolatore riportando il design prestabilito della Metalente. L'irradiazione del fascio elettronico in un punto influenza anche le aree circostanti, è perciò necessario porre un limite alla distanza tra un componente e l'altro, scegliendo un passo reticolare appropriato e un corretto dosaggio di impressione. Il fascio di elettroni modifica la solubilità del resist negativo, consentendo la successiva rimozione selettiva delle regioni del resist non esposte alla radiazione. Questa tecnica ha tempi d'esposizione lunghi in base alla complessità e alla numerosità delle fitte geometrie da realizzare e al loro dosaggio. Il processo di litografia elettronica è stato svolto con l'utilizzo del microscopio elettronico a scansione (SEM).

Fase di Sviluppo:

In Clean Room si procede a rimuovere la maschera di resist non impressionata. L'esposizione alla radiazione della Litografia ha reso delle aree con specifiche geometrie insolubili alla soluzione di sviluppo. Procedendo con l'immersione del campione in solvente acido, per un tempo di soli 10 sec, si assiste a una parziale rimozione del resist dal substrato. Solamente le geometrie dei futuri nanopillar di silicio amorfo sono ancora mascherate dal resist negativo MNA2401 (fig. 2).

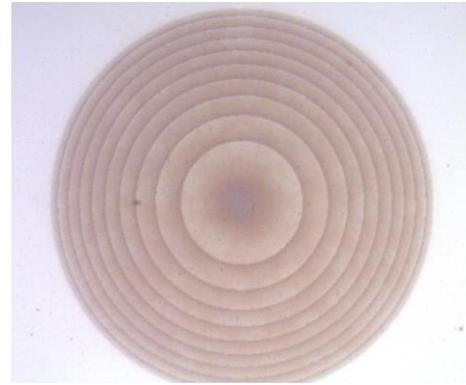


Figura 2. Metalens *a*-Si 272 nm sviluppata. Rilevata al Microscopio Ottico, Laboratorio NanoFacility Piemonte.

Attacco Chimico (Etching Chimico) da Plasma:

Va ad attaccare direttamente le porzioni di silicio amorfo (lo strato sottostante al resist) non mascherate dal resist e rimuove il restante resist negativo ancora presente dopo la fase di sviluppo, lasciando scoperte così le geometrie dei pilastri cilindrici della Metalente. L'attacco è il processo di rimozione di una parte di strato, definita per mezzo di una maschera: il risultato, ottenuto con meccanismi di tipo chimico, è il trasferimento di una figura sullo strato attraverso l'utilizzo del resist [Ferrara A., 2021]. Si usa l'Etching per rimuovere il resist sopravvissuto nella fase di sviluppo, reso insolubile dal fascio elettronico della Litografia. La parziale presenza di questo restante film di resist, serve a proteggere le strutture dei nanopillar in silicio amorfo, che non sono così attaccate chimicamente. L'Etching intacca inoltre le aree di silicio amorfo scoperte, non protette dal resist negativo, aree che non contribuiscono a formare la nanostruttura delle guide d'onda cilindriche.

La Metalente realizzata è mostrata in figura 3 e 4. Lo schema che riassume i processi di produzione è presentato in figura 5.

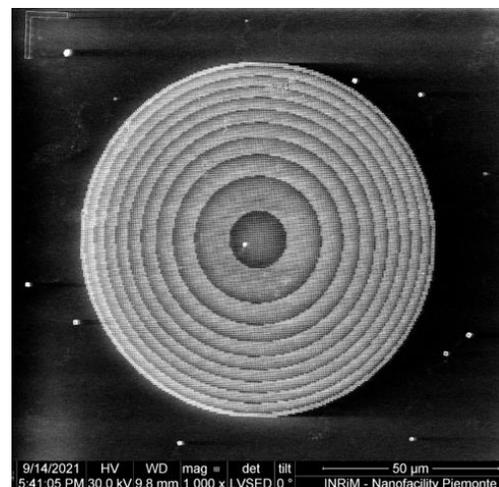


Figura 3. Micrografia della struttura della Metalente ($d = 100 \mu\text{m}$) realizzata in *a*-Si 270 nm, acquisita al SEM.

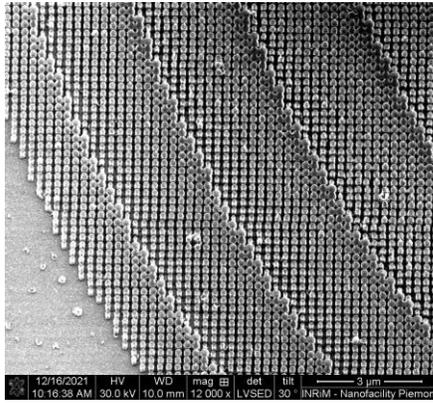


Figura 4. Micrografia della Metalente con un angolo di 30° per mostrare i nanopillar in silicio amorfo presenti in superficie e la loro altezza di 270 nm, acquisita al SEM.

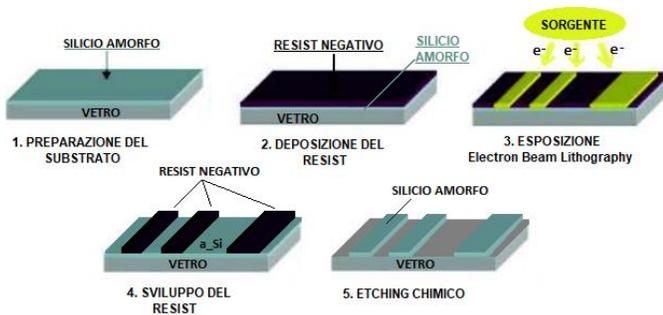


Figura 5. Schema dei processi di produzione della Metalente a-Si.

V. CARATTERIZZAZIONE

Abbiamo progettato una Metalente di diametro $d = 100 \mu\text{m}$ per focalizzare la luce con lunghezza d'onda $\lambda = 633 \text{ nm}$ (rosso) a una lunghezza focale di $200 \mu\text{m}$. Il passo reticolare di ciascun nanopillar è di 500 nm , il diametro dei pillar varia da 50 nm a 150 nm e l'altezza di questi pilastri è costante, rispettivamente a 270 nm . Per la misurazione della lunghezza focale si è utilizzato un banco ottico costituito da una sorgente laser monocromatica ($\lambda = 633 \text{ nm}$), una serie di lenti biconvesse, per la manipolazione del fascio, un obiettivo 10x per l'imaging della lente e infine una fotocamera con sensore fotografico per l'acquisizione ed elaborazione del segnale luminoso. La lunghezza focale è definita come la distanza della lente dal punto in cui il fascio ottico, che la attraversa, viene collimato. La misura di questa distanza è stata ottenuta in modo indiretto, posizionando il piano focale dell'obiettivo sulla lente e variandone la posizione fino al punto in cui risultava essere a fuoco lo spot luminoso prodotto dalla focalizzazione della Metalente. La variazione di posizione dell'obiettivo, così ottenuta, rappresenta la lunghezza focale della Metalente (fig. 6). I risultati ottenuti dalla misurazione della lunghezza focale della Metalente prodotta, si discostano dal valore di previsione iniziale ($200 \mu\text{m}$). La lente realizzata focalizza a circa $800 \mu\text{m}$. Tale variazione è dovuta alle proprietà ottiche della Metalente, che sono fortemente

sensibili alle variazioni geometriche dei nanopillar, quindi risentono molto di inaccuratezze nella fase di fabbricazione. Sarebbe dunque necessario continuare ad affinare i processi e le tecniche fino ad essere in grado di realizzare Metalenti identiche alle specifiche di progetto.

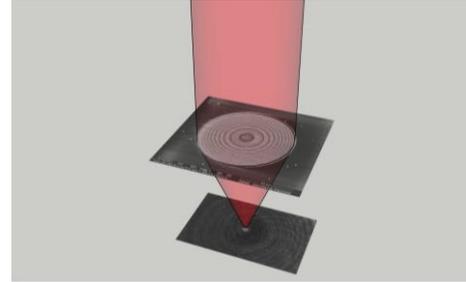


Figura 6. Riproduzione del fascio laser 633 nm collimato dalla Metalente a-Si 270 nm prodotta.

VI. APPLICAZIONI

La capacità di progettare, a piacimento, come una lente risponde a diverse lunghezze d'onda, cosa impossibile con le tecnologie dei materiali delle lenti esistenti, avrà un impatto importante nella scienza e nelle applicazioni [Capasso F. et al., 2020]. Le Metalenti sono in grado di manipolare le onde elettromagnetiche proprio come le lenti tradizionali, ma sono più sottili di un foglio di carta. Questa tecnologia è di impatto per gli sviluppatori di molti settori e grazie alle dimensioni ridotte e al potenziale di questa lente, si ha la possibilità di rivoluzionare più applicazioni ottiche. Le Metalenti aprono a diverse possibilità di impiego. Queste lenti sono state proposte per l'uso in vari dispositivi ottici elettronici come fotocamere e display di smartphone, ma anche nell'ottica indossabile, in particolare la realtà virtuale e la realtà aumentata. Anche in campo medico, le capacità ottiche avanzate delle Metalenti possono consentire strumenti di imaging a risoluzione più elevata come endoscopi e nuovi obiettivi per microscopi [Coming A., 2019]. La Metalente avrà un ruolo importante anche nel campo della fotografia: la regolazione dinamica della lunghezza focale è di grande importanza nei dispositivi di zoom, come fotocamere, microscopi, telescopi ed endoscopi. Nei sistemi ottici convenzionali, lo zoom si ottiene combinando più obiettivi e modificando le loro distanze assiali reciproche. Le Metalenti possono superare questo concetto, la variazione della lunghezza focale può essere realizzata utilizzando un unico meta-obiettivo sintonizzabile dinamicamente, più piccolo e sottile [Chen M. K. et al., 2021]. Altre proprietà uniche di alcune Metalenti, come la capacità di un indice di rifrazione negativo ($\eta < 0$), vengono sfruttate nella ricerca come dispositivi di occultamento (cloaking) [MacInnis B., 2018]. Inoltre una lente piatta, dello spessore di nanometri, potrebbe rappresentare un sostanziale progresso per occhiali e lenti a

contatto. La tecnologia delle Metalenti potrebbe sostituire le attuali lenti impiegate per la correzione delle ametropie, rettificando e modellando in curve ottiche correttive, grazie a macchine specializzate, la radiazione ottica che colpisce occhiali e lenti a contatto [Wannan, O., 2016]. La realizzazione di questa lente da parte di Capasso e del suo team può portare allo sviluppo di dispositivi oftalmici su una scala mai vista prima, come ad esempio occhiali ultrasottili, piatti. Le serie di milioni di nanopinne della Metalente, verranno disposte in uno schema simile a un'iride, fatto di un materiale trasparente ad alto indice. L'array di nanopinne sarà costruito come sfasatore di fase, cambiando la vergenza del fronte d'onda per raggiungere un punto focale. In virtù della composizione (ad es. TiO_2), della forma, dell'orientamento, dell'altezza, della larghezza e della separazione di ciascuna nanopinna sull'array, potranno essere progettate e configurate Metalenti su misura, per un risultato sferico, torico, prismatico o multifocale desiderato [MacInnis B., 2018]. Inoltre è in progetto la realizzazione di un dispositivo oftalmico intraoculare con metasuperficie, che necessita di un materiale con caratteristiche di biocompatibilità. Essendo il biossido di titanio in precedenza utilizzato per altri dispositivi biomedici, risulterebbe pertanto sicuro, compatibile e antimicrobico. L'oftalmologo Brent MacInnis, detiene i brevetti su occhiali e dispositivi oftalmici che utilizzano Metalenti (fig. 7-8).

Un'altra importante applicazione delle Metalenti consiste nel loro utilizzo per la correzione della deuteranomalia. Un team di ricercatori dell'Università di Tel Aviv ha realizzato lenti a contatto rigide gas permeabili sulle quali sono state innestate metasuperfici ottiche ultrasottili. Queste lenti a contatto utilizzano come nanoelementi, presenti in superficie, ellissi d'oro nanoscopiche con una specifica disposizione. Si è dunque sviluppato un processo di fabbricazione per trasferire metasuperfici dal loro iniziale substrato piano anche ad altre superfici e substrati non piatti ma curvi, come le lenti a contatto. Nello studio condotto da Sharon Karepov, i risultati di un corretto ripristino del contrasto cromatico nei portatori di queste nuove lenti, non sono ancora confermati, ma è di rilevante importanza la possibile fabbricazione di lenti a contatto nanostrutturate [Karepov S. et al., 2020].

I ricercatori della Harvard John A. Paulson School of Engineering and Applied Sciences (SEAS) insieme al Dottor Capasso hanno sviluppato una Metalente sintonizzabile che può modificare la messa a fuoco in tempo reale (fig. 9), come un vero e proprio occhio. Questo è possibile grazie all'impiego di una Metalente combinata a muscoli artificiali controllati elettricamente. Questa tecnologia riproduce artificialmente il focus dinamico dell'occhio umano e inoltre

porta alla correzione delle aberrazioni visive. I muscoli artificiali riproducono l'effetto dell'anello muscolare ciliare che modifica la forma e la curvatura del cristallino all'interno dell'occhio e combinati alle proprietà della Metalente, consentono la correzione dei difetti ottici e la messa a fuoco. I muscoli artificiali sono stati riprodotti dal Professor David R. Clarke utilizzando elastomeri dielettrici trasparenti che modificano la loro struttura grazie all'applicazione di un voltaggio elettrico tramite elettrodi. La contrazione e la distensione ad opera degli elastomeri cambia la posizione delle nanostrutture poste sulla superficie della Metalente. Nonostante questa tecnologia offra ottime prospettive future, un attuale e concreto utilizzo in campo oftalmico è ancora immaturo, ma può portare a un progresso medico nel settore [Vitelli M., 2018].

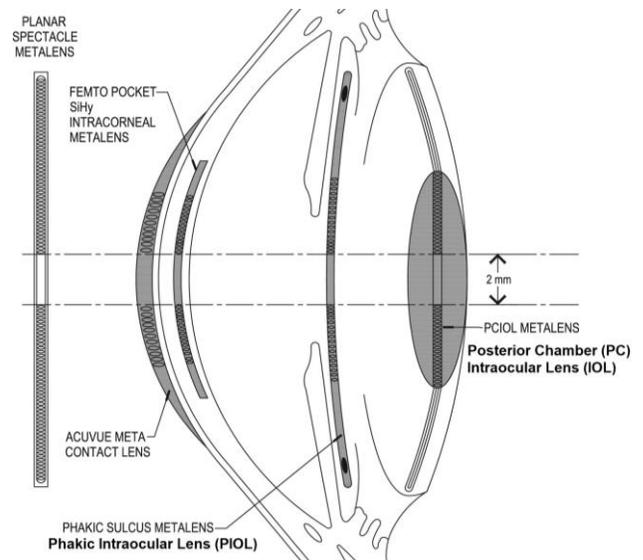


Figura 7. Dispositivi biomedici oftalmici e piattaforme per occhiali con Metalenti (in attesa di brevetto MacInnis). Tratta da (MacInnis B., 2018).

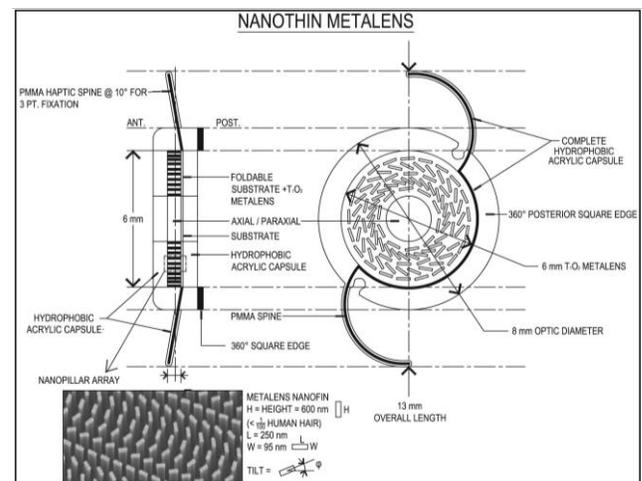


Figura 8. Design della lente intraoculare "Metalens" (in attesa di brevetto MacInnis). Tratta da (MacInnis B., 2018).

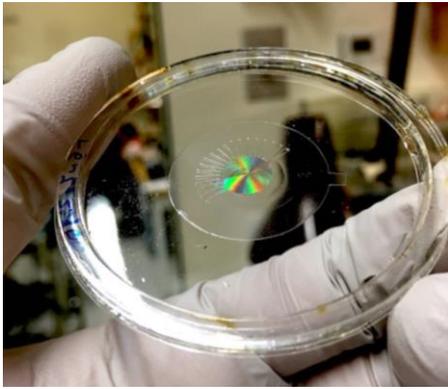


Figura 9. Occhio artificiale costruito con una Metalente adattativa e elastomeri dielettrici. Tratta da (Ciampelli J., 2018).

CONCLUSIONI

In questo studio si è effettuata un'analisi delle nuove lenti create da Federico Capasso, descrivendone i processi di fabbricazione, le principali caratteristiche e le possibili applicazioni. La ricerca condotta all'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRiM), si è trattata in un'attività di progettazione, realizzazione e caratterizzazione di una lente piana con metasuperficie in silicio amorfo. Il progetto è nato dalla volontà di riprodurre la tecnologia delle Metalenti per studiare il principio d'azione e le interazioni tra luce e lente. Le Metalenti, concentrando tutte le lunghezze d'onda in un unico punto focale, hanno rispetto alle lenti in vetro una qualità d'immagine molto più elevata, nitida ed esente da aloni o bordi colorati. La capacità della Metalente di eliminare l'aberrazione cromatica e di focalizzare l'intero spettro visibile in punto ad alta definizione, è resa possibile dalla distribuzione, secondo precise leggi fisiche, delle nanostrutture come nanopillar o nanofins poste sulla superficie della lente. Dati gli innumerevoli vantaggi in termini di dimensioni e l'ampia gamma di applicazioni, le Metalenti possono essere considerate elementi indispensabili per la conduzione di futuri dispositivi ottici [Borja A. L., 2017]. Le realizzazioni di occhiali, lenti a contatto, cheratoprotesi, lenti intraoculari fache (IOL), IOL con chirurgia della cataratta e persino telescopi intraoculari, con metasuperfici, sono tutte possibili applicazioni della tecnologia delle Metalenti e sono in attesa di brevetto da parte del Dottor MacInnis. Per rispondere alla domanda cui questa ricerca verte, vi è, in accordo con le evidenze scientifiche, la concreta possibilità di un futuro impiego di queste metastrutture in campo oftalmico. Occhiali e lenti a contatto potranno avvalersi di queste particolari lenti con guide d'onda disposte in schemi, correggendo i diversi errori refrattivi. Studiare le applicazioni delle Metalenti su portatori affetti da ametropie e confrontare i risultati con le tradizionali lenti correttive ad oggi sul mercato, sarà oggetto di ricerca nei prossimi anni.

BIBLIOGRAFIA

- Borja A. L. (2017). *Metamaterials - Devices and Applications*. InTechOpen.
- Burrows L. (2018). *Ground-breaking lens focuses entire spectrum of light to single point*. Harvard Gazette.
- Capasso F. et al. (2016). *Metalenses at visible wavelengths: Diffraction-limited focusing and subwavelength resolution imaging*. Science, 352(6290), 1190–1194.
- Capasso F. et al. (2020). *Controlling dispersion in multifunctional metasurfaces*. APL Photonics, 5(5), 056107.
- Chen M. K. et al. (2021). *Principles, Functions, and Applications of Optical Meta-Lens*. Advanced Optical Materials, 9(4), 2001414.
- Ciampelli J. (2018) *Artificial-Eye-Built-With-Adaptive-Metalens*. [Fotografia]. *Un Occhio Artificiale per i dispositivi ottici del futuro*. Biomed CuE. Close-up Engineering.
- Corning A. (2019). *Going Meta: How Metalenses are Reshaping the Future of Optics*. Radiant Vision Systems.
- Dharmavarapu R. (2020). *How to design a Metalens/Metasurface? Metasurfaces tutorial and MetaOptics software demo* [Video].
- Fan Z. B. et al. (2018). *Silicon Nitride Metalenses for Close-to-One Numerical Aperture and Wide-Angle Visible Imaging*. Physical Review Applied, 10(1).
- Ferrara A. (2021). *Litografia e Attacco Chimico* [Slides]. Files/Litografia.Pdf.
- Karepov S. & Ellenbogen T. (2020). *Metasurface-based contact lenses for color vision deficiency*. Optics Letters, 45(6), 1379.
- MacInnis B. (2018). *Metalens ophthalmic devices: the new world of optics is flat*. Canadian Journal of Ophthalmology, 53(2), 91–93.
- Mandel S. (2020). *Dispersion engineering method results in multifunctional metasurfaces*. Scilight, 2020(21), 211112.
- Pillay R. et al. (2020). *Historical Development, Applications and Advances in Materials Used in Spectacle Lenses and Contact Lenses*. Clinical Optometry, Volume 12, 157–167.
- Vitelli M. (2018). *Occhio artificiale: un team crea l'artificial eye con Metalenti e muscoli artificiali*. Ailr Associazione Italiana per la Lotta al Retinoblastoma.
- Wannan, O. (2016). *Lenses at the nano-scale*. Association of Optometrists.
- Zhao M. et al., (2021). *Phase characterisation of metalenses*. Light: Science & Applications, 10(1).