

**Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique**

**Université Ferhat Abbas- Sétif 1**

**Institut : Optique et Mécanique de Précision**

**Département : Optique et photonique appliqué**

**Domaine : Sciences et Technologies**

**Filière : Optique et Mécanique de Précision**

**Spécialité : optique et photonique appliqué**

## Mémoire de Master

# Modélisation optique de miroir de Bragg

**Etudié par :**

**Moudaa Mebarka**

**Mamouni Sofia**

**Dirigé Par : Madoui Karima**

Devant le jury :

(Président) : Guechi

(Examineur) : Meguellati

Soutenue le : 04/07/2023

## Sommaire

### Résumé

|                            |   |
|----------------------------|---|
| Introduction générale..... | 1 |
|----------------------------|---|

### CHAPITRE I : GENERALITES SUR LE MIROIR DE BRAGG

|                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------|----|
| I.1. Historique.....                                             | 2  |
| I.2. Définition d'un miroir de Bragg .....                       | 3  |
| I.3. Différence entre un miroir métallique et diélectrique ..... | 4  |
| I.4. Principe de fonctionnement du miroir de Bragg.....          | 4  |
| I.5. Principe de conception du miroir de Bragg .....             | 6  |
| I.5.1. Description générale .....                                | 6  |
| I.5.2. Mécanisme de la pulvérisation cathodique RF .....         | 7  |
| I.6. Matériaux utilisés pour les miroirs de Bragg .....          | 7  |
| I.7. Effet de substrat .....                                     | 8  |
| I.7.1. Les différents types de substrats .....                   | 8  |
| I.8. Types et domaine d'application des miroirs de Bragg.....    | 9  |
| I.8.1. Filtrage.....                                             | 10 |
| I.8.2. Multiplexage et démultiplexage .....                      | 11 |
| I.8.3. Correction de la dispersion chromatique .....             | 11 |
| I.8.4. Sensibilité des capteurs à réseau de Bragg .....          | 12 |
| I.8.5. Réseau de Bragg comme transducteur.....                   | 12 |
| I.8.6. Fabry-Pérot .....                                         | 13 |
| I.8.7. Des lasers VCSEL .....                                    | 13 |

### CHAPITRE II : PROPRIETES OPTIQUES DES COUCHES MINCES

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| DIELECTRIQUES.....                                                               | 14 |
| II.1. Définition d'une couche mince .....                                        | 14 |
| II.2. Empilement des couches minces .....                                        | 14 |
| II.3. Propriétés optiques de miroir de Bragg .....                               | 14 |
| II.3.1. Intensité de réflectance et de transmittance par une interface .....     | 14 |
| II.3.1.1. Les coefficients de Fresnel à l'incidence normale .....                | 15 |
| II.3.1.2. Coefficient de Fresnel à l'incidence oblique .....                     | 16 |
| II.3.2. Intensité de réflectance complexe de la lumière par deux interfaces..... | 17 |
| II.3.2.1. Incidence normale .....                                                | 17 |
| II.3.2.2. Incidence oblique .....                                                | 18 |

|                                                                                                                     |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| II.3.3. Intensité de réflectance complexe de la lumière par plusieurs interfaces .....                              | 19        |
| II.3.3.1 Incidence normale.....                                                                                     | 20        |
| II.3.3.2. Sous incidence oblique.....                                                                               | 21        |
| <b>II.4. Condition zéro .....</b>                                                                                   | <b>21</b> |
| II.4.1. Zéro réflectance par une seule couche .....                                                                 | 21        |
| II.4.2. Deux couches quarts d'onde .....                                                                            | 24        |
| II.4.3. Multicouche quart d'onde .....                                                                              | 25        |
| <b>II.5. Système périodique de bicouches.....</b>                                                                   | <b>26</b> |
| II.5.1. Nombre de couche pair .....                                                                                 | 26        |
| II.5.2. Nombre de couche impair .....                                                                               | 27        |
| <b>CHAPITRE III : SIMULATION NUMERIQUE DU MIROIR DE BRAGG</b>                                                       |           |
| <b>III.1. Introduction .....</b>                                                                                    | <b>29</b> |
| <b>III.2. Logiciel MATLAB.....</b>                                                                                  | <b>29</b> |
| <b>III.3. Vérification de programme .....</b>                                                                       | <b>30</b> |
| <b>III.4. Effet de variation de l'épaisseur de monocouche <math>\lambda_1</math> et <math>\lambda_2</math>.....</b> | <b>31</b> |
| III.4.1. Effet d'augmentation d'épaisseur .....                                                                     | 33        |
| <b>III.5. Effet du motif « haut, bas » d'indice et « bas, haut » d'indice .....</b>                                 | <b>35</b> |
| III.5.1. L'effet d'augmentation l'épaisseur des couches du motif HB .....                                           | 36        |
| <b>III.6. Etude d'un miroir de Bragg .....</b>                                                                      | <b>38</b> |
| III.6.1. Effet d'augmentation du nombre de motifs .....                                                             | 39        |
| III.6.2. Effet d'augmentation des épaisseurs des couches.....                                                       | 40        |
| III.6.3. Effet de la variation de la nature de substrat .....                                                       | 41        |
| III.6.4. Effet de changement des matériaux .....                                                                    | 43        |
| <b>Conclusion générale .....</b>                                                                                    | <b>46</b> |
| <b>Bibliographie</b>                                                                                                |           |

## Liste des figures

### Chapitre I : Généralité sur les miroirs de Bragg

|                                                                                                                                                                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure I.1</b> : Schéma de principe de la diffraction de Bragg sur une structure périodique [4]...                                                                                                                                         | 2  |
| <b>Figure I.2</b> : Schéma ou formule schématique de construction d'un miroir de Bragg [6]. ....                                                                                                                                              | 3  |
| <b>Figure I.3</b> : Spectre de réflexion d'un miroir de Bragg centré à 1 $\mu\text{m}$ [8]. ....                                                                                                                                              | 4  |
| <b>Figure I.4</b> : Principe de fonctionnement d'un miroir de Bragg [8]. ....                                                                                                                                                                 | 5  |
| <b>Figure I.5</b> : Spectres de réflectance en fonction du nombre de motifs $q$ , pour un couple de matériau $n_H = 2,4$ et $n_B = 1,45$ [6]. ....                                                                                            | 5  |
| <b>Figure I.6</b> : Spectres de réflectance en fonction de l'effet du contraste d'indice $\delta n$ pour 8 motifs[6]. ....                                                                                                                    | 6  |
| <b>Figure I.7</b> : Schéma de principe de la pulvérisation cathodique [10]. ....                                                                                                                                                              | 7  |
| <b>Figure I.8</b> : Modulations d'indice de différents types de réseaux. (a) Réseau uniforme, (b) réseau à pas variable, (c) réseau à amplitude variable, (d) réseau apodisé, (e) réseau à saut de phase, (f) réseau échantillonné [17]. .... | 10 |
| <b>Figure I.9</b> : Schéma d'un système de filtrage par un réseau de Bragg [17]. ....                                                                                                                                                         | 11 |
| <b>Figure I.10</b> : (a) et (b) Schéma d'un système de multiplexage et démultiplexage respectivement par un réseau de Bragg[17],[20]. ....                                                                                                    | 11 |
| <b>Figure I.11</b> : Schéma d'un système compensateur de dispersion chromatique par un réseau de Bragg [17]. ....                                                                                                                             | 12 |
| <b>Figure I.12</b> : Effet de la température sur la raie réfléchiée par capteur contenant un réseau de Bragg [22]. ....                                                                                                                       | 12 |

### chapitre II : propriétés optiques des couches minces diélectrique

|                                                                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure II.1</b> : L'intensité de la réflexion et de la transmission d'une onde électromagnétique par une interface sous incidence normal [25]. .... | 15 |
| <b>Figure II.2</b> : Incidence oblique de la lumière par deux milieux différents [25]. ....                                                            | 16 |
| <b>Figure II.3</b> : Intensité de réflexion et de transmission d'une onde électromagnétique par deux interfaces [25]. ....                             | 17 |
| <b>Figure II.4</b> : Réflectance de la lumière sous incidence oblique pour un champ électrique perpendiculaire[25]. ....                               | 20 |
| <b>Figure II.5</b> : Réflectance de la lumière sous incidence oblique pour un champ électrique parallèle[25]. ....                                     | 20 |
| <b>Figure II.6</b> : Zéro réflectance pour une couche d'indice $n_1$ , elle est entre deux milieux d'indice de réfraction $n_0$ et $n_2$ [25]. ....    | 22 |

|                                                                                                                                                                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure II.7:</b> Système de multicouches constituées de bicouches répétés ayant des indices de réfraction $n_1$ et $n_2$ et d'épaisseur $d_1$ et $d_2$ et choisies pour que le chemin optique soit égal un quart de longueur d'onde central.[25]. | 27 |
| <b>Figure II.8 :</b> Multicouches constituent d'un nombre impair de couche quart d'onde des indices de réfraction $n_1$ et $n_2$ [25].                                                                                                               | 28 |
| <b>Chapitre III : simulation numérique du miroir de Bragg</b>                                                                                                                                                                                        |    |
| <b>Figure III.1 :</b> La figure (a) :l'intensité réflectance modélisée pour des monocouches des indices de réfraction différents. La figure (b) les résultats obtenus par la référence [25].                                                         | 31 |
| <b>Figure III.2 :</b> Spectre de réflexion pour monocouche de $TiO_2$ sous l'effet de la variation de phase. ....                                                                                                                                    | 32 |
| <b>Figure III.3 :</b> Spectre de réflexion pour monocouche de $SiO_2$ sous l'effet de la variation de phase.....                                                                                                                                     | 32 |
| <b>Figure III.4 :</b> Spectre de réflexion de monocouche $TiO_2$ sous l'effet de l'augmentation de l'épaisseur. ....                                                                                                                                 | 34 |
| <b>Figure III.5 :</b> Spectre de réflexion de monocouche $SiO_2$ sous l'effet de l'augmentation de l'épaisseur. ....                                                                                                                                 | 34 |
| <b>Figure III.6 :</b> Spectre de réflexion de couple d'indice haut bas sous l'effet de variation d'épaisseur de chaque couche. ....                                                                                                                  | 35 |
| <b>Figure III.7 :</b> Spectre de réflexion de couple d'indice bas haut sous l'effet de variation d'épaisseur de chaque couche. ....                                                                                                                  | 36 |
| <b>Figure III.8 :</b> Les pectres de réflexion de couple d'indice haut bas sous l'effet d'augmentation d'épaisseur pour chaque couche .....                                                                                                          | 38 |
| <b>Figure III.9 :(a) :</b> spectre de l'intensité de réflexion d'un miroir de Bragg centré à 550 nm. (b) :la courbe de référence pour 10 motifs.....                                                                                                 | 39 |
| <b>Figure III.10 :</b> Spectre de réflexion par augmentation du nombre de motif d'un miroir de Bragg centré à 550 nm. ....                                                                                                                           | 39 |
| <b>Figure III.11 :</b> Spectre de réflexion d'un miroir de Bragg de 10 motifs centré à 550 nm en fonction d'augmentation des épaisseurs des couches. ....                                                                                            | 40 |
| <b>Figure III.12 :</b> Spectre de réflexion d'un miroir de Bragg centré à 550 nm en fonction d'effet de changement la nature de substrat pour 4 motifs.....                                                                                          | 41 |
| <b>Figure III.13 :</b> Spectre de réflexion d'un miroir de Bragg centré à 550 nm en fonction de l'effet de changement la nature de substrat pour 10 motifs. ....                                                                                     | 42 |

|                                                                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure III.14 :</b> Spectre de réflexion d'un miroir de Bragg centré à 550 nm en fonction d'effet de changement la nature de substrat pour 4 motifs. .... | 42 |
| <b>Figure III.15:</b> Spectre de réflexion d'un miroir de Bragg centré à 550 nm en fonction d'effet de changement la nature de substrat pour 21 motifs. .... | 42 |
| <b>Figure III.16 :</b> Spectre de réflexion d'un miroir de Bragg centré à 550 nm en fonction de contraste d'indice pour 8 motifs[6]. ....                    | 43 |
| <b>Figure III.17:</b> Spectre de réflexion des miroirs de Bragg centré à 550 nm en fonction des différents couples des matériaux. ....                       | 44 |
| <b>Figure III.18 :</b> Spectre de réflexion des miroirs de Bragg centré à 980 nm en fonction des différents couples des matériaux. ....                      | 44 |

**Liste des tableaux :**

**Chapitre I : Généralité sur les miroirs de Bragg**

**Tableau I.1 :** Matériaux diélectrique utilisé pour la réalisation d'un miroir de Bragg. .... 8

**Tableau I.2 :** Matériaux semi-conducteur utilisé pour la réalisation d'un miroir de Bragg [15].  
..... 8

**Tableau I.3 :** Matériaux utilisés pour le substrat d'un miroir de Bragg..... 9

**Chapitre III : simulation numérique de miroir de Bragg**

**Tableau III.1:** la largeur de la bande spectrale en fonction de couple d'indice haut bas  $\lambda B = 500 \text{ nm}$ . .... 43

**Tableau III.2:** la largeur de la bande spectrale en fonction des couples d' indices haut bas à  $\lambda B = 500 \text{ nm}$ . .... 45

**Tableau III.3 :** la largeur de la bande spectrale en fonction des couples d'indices haut bas à  $\lambda B = 980 \text{ nm}$ . .... 45

### Résumé

Les miroirs de Bragg jouent un rôle important dans le domaine de l'optique. Ils servent à générer des interférences constructives afin de donner des réflexions maximales proches de 100% pour les longueurs d'onde de Bragg, et en dehors de la zone de réflexion les interférences deviennent destructives et la réflexion chute à zéro.

Ces miroirs ont été largement développés grâce aux progrès de la technologie des couches minces par pulvérisation cathodique sur une face de substrat.

Nous limitons notre étude au miroir de Bragg de forme schématique (air/couche mince/sub). Dans ce travail, nous avons simulé un modèle mathématique de miroir de Bragg pour un empilement de plusieurs couches.

Utilisation d'un modèle mathématique basé sur la réflexion des ondes électromagnétiques pour des miroirs de Bragg de forme schématique (air/couche mince/sub) permet d'analyser les spectres de réflectance et connaître quelle sont les conditions optimales à fin d'obtenir un miroir hautement réfléchissant.

### Abstract

Bragg mirrors play an important role in the field of optics. They are used to generate constructive interference in order to give maximum reflections close to 100% for the Bragg wavelengths, and outside the reflection zone the interference becomes destructive and the reflection drops to zero.

These mirrors have been widely developed thanks to advances in the technology of thin layers by sputtering on one face of the substrate. We study to Bragg mirrors of schematic form (air/thin layer/sub).

In this work, we simulated Bragg mirror models for multilayer stacking.

Use of a mathematical model based on the reflection of electromagnetic waves for Bragg mirrors of schematic form (air/thin film/sub) makes it possible to analyze the spectra of reflectance and to know what are the optimal conditions in order to obtain a highly reflective mirror.

### Introduction générale

L'interaction de la lumière avec une interface provoque un phénomène plus connu qui est la réflectivité, due au changement d'indice de réfraction au cours de passage de la lumière par ces interfaces [1]. Les miroirs de Bragg hautement réfléchissant jouent un rôle primordial [2], du fait que l'on retrouve dans un large domaine d'application [3].

Le domaine des couches minces est intéressé par la conception et la fabrication des miroirs de Bragg par multicouches, qu'elles doivent être pulvérisées sur le substrat sur une seule face. La conception d'un miroir de Bragg consiste sur la formule schématique des couches, qui adaptent aux propriétés spectrales du miroir choisis, pour ce faire on a optimisé par une simulation numérique pour savoir ses propriétés spectrales ; afin de connaître les facteurs influents sur ses propriétés et comment améliorer la réflexion de ce miroir.

L'optimisation par simulation, vu qu'elle suit un modèle mathématique du système réel, elle a l'avantage d'être facile, ne coûtant pas cher et nous pouvons prédire les paramètres optimaux qui contribuent à la fabrication d'un miroir de Bragg d'une réflexion à une longueur d'onde choisis.

L'objectif de ce travail est d'étudier les spectres de réflexion de la lumière par les miroirs de Bragg pour différents types de matériaux et aussi de trouver les conditions optimales pour les réaliser.

Le travail étudié dans ce mémoire se présente de la façon suivante :

Dans le premier chapitre, nous décrivons une notion générale sur les miroirs de Bragg, les différents types et son domaine d'application.

Le second chapitre concerne la structure et les propriétés optiques des miroirs de Bragg.

Le troisième chapitre est l'extrait de notre travail ; inclut les résultats de la simulation sous logiciel de MATLAB par les formules mathématiques et schématiques choisis pour les miroirs de Bragg.

Enfin ce mémoire s'achève avec une conclusion où sont rappelés les résultats obtenus.