

Réseaux résonnants pour la compression d'impulsions laser femtosecondes

A. Trisorio¹, M. Flury¹, N. Lyndin², A.V. Tishchenko¹ et S. Tonchev³

¹ *Laboratoire de Traitement du Signal et de l'Instrumentation, Université Jean Monnet, 42000 Saint-Étienne, France*

² *Institut de Physique Générale, 117942 Moscou, Russie*

³ *Institut de Physique du Solide, 1784 Sofia, Bulgarie*
e-mail : olivier.parriaux@univ-st-etienne.fr

Résumé. La compression d'impulsions laser femtosecondes est en général réalisée par une paire de réseaux métalliques moulés dans un film de résine. Ces derniers ont des performances intrinsèquement limitées en termes d'efficacité et de tenue au flux. Ceci est dû principalement à la présence du métal à la surface du réseau. Les réseaux résonnants démontrant un effet de diffraction de 100% d'efficacité pour l'ordre -1 sont une alternative intéressante. Deux types de réseaux hautes performances ont été modélisés. La configuration ainsi que les performances théoriques des deux systèmes modélisés sont présentées.

1. INTRODUCTION

La technique d'amplification à dérive de fréquence (Chirped Pulse Amplification) [1], utilisée dans les systèmes lasers à milieu amplificateur solide (Titane:Saphir, alexandrite, Nd:glass) a permis l'explosion des applications utilisant des impulsions ultra-courtes de haute énergie. Cette technique nécessite l'étirement puis la compression temporelle des impulsions grâce à des systèmes optiques diffractants. Ces derniers doivent avoir des performances les meilleures possibles en termes d'efficacité de diffraction et de tenue au flux.

La paire de réseaux habituellement utilisée fonctionne en polarisation TM (polarisation p). Les réseaux sont constitués d'un substrat et d'une couche de résine. Le profil du réseau est moulé dans la résine. Une couche d'or est ensuite déposée. Cette technologie de fabrication est bien au point. Ces réseaux ont une efficacité de diffraction η qui peut atteindre 95%. Toutefois, dans le cas typique d'un compresseur double passage, le faisceau est diffracté quatre fois par le réseau. Le rendement total est $\eta^4 = 82\%$. Un faible accroissement de l'efficacité du réseau engendre donc une augmentation importante du rendement total du compresseur. Il est donc primordial que l'efficacité du réseau soit aussi proche que possible de 100%. De plus, la tenue au flux de ces éléments est intrinsèquement limitée par la présence du métal en surface du support en résine.

Une approche nouvelle avec des réseaux résonnants est proposée. Le réseau fonctionne en polarisation TE (polarisation s). Une efficacité de diffraction de 100% est théoriquement possible sur une largeur de bande adaptable à l'application voulue. Une tenue au flux supérieure aux systèmes existants est également possible grâce à l'utilisation d'une structure et de matériaux diélectriques adéquats.

2. ACCUMULATION D'ÉNERGIE DANS UN MODE À FUTES

Les réseaux résonnants sont constitués de 3 éléments clés : un miroir plan métallique ou un diélectrique multicouches, une couche diélectrique et un réseau de diffraction. La figure 1 représente le schéma simplifié de la structure.

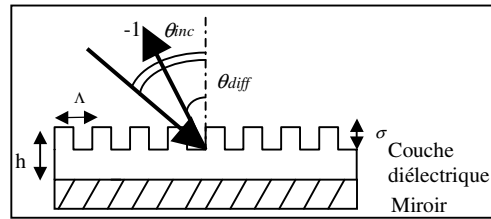


Figure 1. Schéma de la structure d'un réseau résonnant.

La période du réseau est choisie de manière à ce que seuls les ordres $m = 0$ et $m = -1$ existent, ce qui correspond à la condition : $2/3 < \lambda/\Lambda < 2$, où λ est la longueur d'onde de l'onde incidente et Λ la période du réseau. L'épaisseur de la couche diélectrique h doit être telle qu'un mode à fuites puisse s'y propager. La profondeur des sillons σ est ajustée de façon à annuler la réflexion de Fresnel.

La figure 2 illustre le principe de fonctionnement d'un réseau résonnant de haute efficacité. L'onde incidente (a) est réfléchiée par la surface supérieure de la couche (b). Elle excite aussi par réfraction un mode à fuites de la couche (b). Le mode à fuites accumule le champ incident (a), lequel fuit à son tour dans le milieu incident dans la direction de la réflexion de Fresnel. Il y a donc deux contributions à la réflexion de Fresnel : la réflexion directe par la surface supérieure de la couche (c) et la fuite du mode excité (d).

Ces deux contributions sont en opposition de phase puisque l'une d'elles est issue d'une résonance. Il ne reste qu'à ajuster leur module pour obtenir une interférence destructive dans la direction de la réflexion de Fresnel. Le réseau de diffraction (e) agit comme un régulateur du taux d'accumulation du champ dans le mode à fuites. Lorsque l'égalité des modules est réalisée, la réflexion de Fresnel est nulle. Ainsi, la puissance optique n'a pas d'autre issue que d'être diffractée à 100% dans la direction de l'ordre -1 (f) [2].

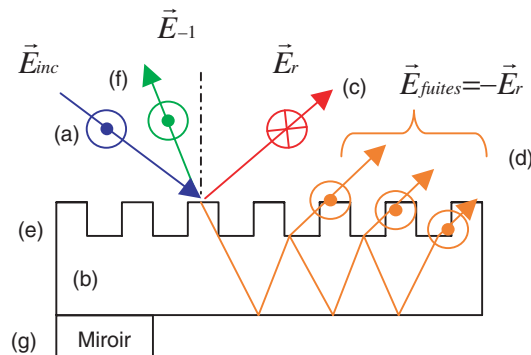


Figure 2. Excitation d'un mode à fuites visant à annuler la réflexion de Fresnel.

3. RÉSULTATS DE LA MODÉLISATION

Pour un profil de réseau de type binaire, l'épaisseur h de la couche diélectrique, la profondeur σ des sillons, le rapport ligne/espace du réseau ainsi que les épaisseurs des différentes couches du miroir diélectrique ont été optimisées. La condition clef étant tout d'abord que h satisfasse la condition d'excitation d'un mode à fuites. C'est à cette condition seulement que l'accumulation d'énergie peut se faire dans la couche et que la réflexion de Fresnel peut être annulée.

Le réseau est gravé dans une couche supérieure de HfO_2 ou de Ta_2O_5 . Le choix du matériau détermine les valeurs optimales des paramètres précédents. La modélisation de chaque structure a été réalisée en utilisant la méthode des sources généralisée [3] et la méthode modale [4]. La phase d'optimisation finale de chaque design a été menée grâce à un code développé par N. Lyndin utilisant la méthode d'optimisation de Davidon-Fletcher-Powell [5]. Deux exemples de design aux caractéristiques bien différentes ont été produits. Tous deux correspondent à un angle d'incidence de 60 degrés et à une période du réseau de 536 nm.

Le premier design est un réseau à très large bande spectrale. Il est destiné à la compression d'impulsions de durées inférieures à 100 femtosecondes, de haute énergie et de faible puissance moyenne. Il est constitué d'un miroir plan métallique réalisé avec un bon métal optique (de l'argent de préférence) sur lequel est déposé une couche mince diélectrique. Un réseau de diffraction est ensuite gravé dans cette couche. Les résultats théoriques donnent une efficacité maximale de 97%. La bande passante à 2% du maximum est de 276 nanomètres, comme le montre le graphique de la figure 3.

La largeur de la bande passante est due à la non-sélectivité en longueur d'onde du miroir métallique. L'utilisation de la polarisation TE (polarisation s) est avantageuse : le risque d'exciter des plasmons par des imperfections de la surface du métal est réduit. De plus, le champ électrique est quasiment nul à la frontière métal-diélectrique. Nous avons vérifié que la réflexion de Fresnel est bien annulée au point de maximum d'efficacité. C'est donc l'absorption dans le métal (environ 3%) qui est responsable de la diminution de l'efficacité maximale par rapport à la valeur théorique de 100% avec un métal idéal sans pertes. Ce réseau est destiné à des applications avec des impulsions très courtes, de haute énergie et de faible cadence où un large spectre est requis.

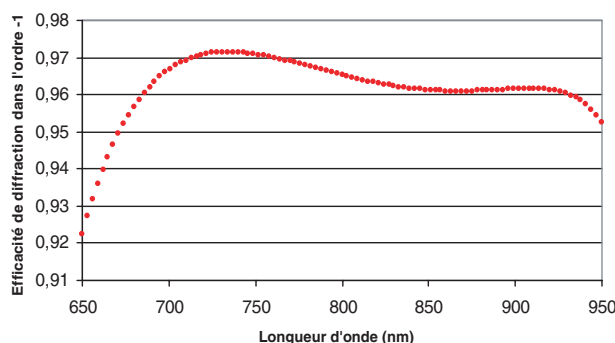


Figure 3. Efficacité de diffraction d'un système large bande en fonction de la longueur d'onde.

Le second design est un réseau à très haute efficacité destiné à la compression d'impulsions de durées supérieures à 100 femtosecondes, de relativement faible énergie mais de haute cadence, et donc de haute puissance moyenne. Il fonctionne également en polarisation TE (polarisation s). Il est constitué d'un miroir diélectrique multicouches. Ce miroir doit être réalisé avec des matériaux ayant un seuil de dommage optique élevé. Un réseau de diffraction est ensuite gravé dans la couche supérieure. Les résultats théoriques donnent une efficacité maximale de 99,99%. La bande passante à 1% du maximum est de 20 nanomètres. Elle est aussi symétrique de part et d'autre de la longueur d'onde centrale comme le montre le graphique de la figure 4.

Le maximum d'efficacité sur la bande passante est réalisé grâce à l'optimisation fine de l'épaisseur de chaque couche du miroir diélectrique et de la profondeur du réseau. Ainsi, l'interférence est parfaitement destructive dans la direction de la réflexion de Fresnel pour toutes les longueurs d'ondes comprises entre 790 nm et 810 nm. La faible largeur de la bande passante est due à la dépendance en longueur d'onde de la phase du champ réfléchi par le miroir diélectrique multicouches.

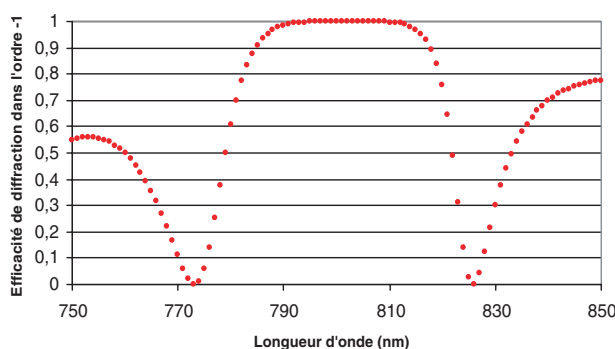


Figure 4. Efficacité de diffraction d'un système de très haute efficacité en fonction de la longueur d'onde.

L'utilisation d'une structure tout diélectrique permet d'éliminer les pertes par absorption du système et d'atteindre l'efficacité de 100%. Cela permet également d'améliorer la tenue au flux du système par le choix de matériaux ayant un seuil de dommage optique élevé. Les performances théoriques de ce système sont de loin supérieures à celles des réseaux métalliques TM (polarisation p) utilisés actuellement dans les compresseurs d'impulsions laser [6].

4. CONCLUSION

Les réseaux résonnants permettent de revisiter des domaines où les réseaux usuels ont fait leur place en apportant des effets de plus haut contraste, de plus grande sélectivité et également une plus grande flexibilité de conception. La résolution du problème est donnée par un raisonnement purement physique sans recours à un code de calcul systématique. La modélisation et l'optimisation requièrent toutefois des codes de calcul rigoureux associés. Les réseaux résonnants montrent ici leur polyvalence. La modélisation de structures performantes, visant à approcher un objectif sous contraintes (longueur d'onde d'utilisation, bande passante du système, efficacité de diffraction, tenue à la fluence) est réalisée. Un large domaine d'application peut être couvert grâce à un choix judicieux de la structure supportant le réseau. Les performances théoriques obtenues sont meilleures (ou équivalentes) à celles des réseaux utilisés actuellement. L'utilisation de la polarisation TE (polarisation s) permet de s'affranchir des inconvénients de la polarisation TM (polarisation p).

Remerciements

Le CNRS et le Réseau Technologique Femtoseconde sont remerciés de leur soutien pour la fabrication de réseaux compresseurs d'impulsions femtosecondes.

Bibliographie

- [1] D. Strickland, G. Mourou, *Opt. Commun.* **56**, 219 (1985).
- [2] A.V Tishchenko, V.A Sychugov, *Optical and Quantum Electronics.* **32**, 1027 (2000).
- [3] A.V Tishchenko, *Optical and Quantum Electronics.* **32**, (2000) 971.
- [4] L. Li, *J. Opt. Soc. Am. A.* **10**, (1993) 2581.
- [5] R. Davidon, Fletcher, MJD, *Computer Journal.* **6**, (1963) 1631.
- [6] J.A Britten, M.D Perry, B.W Shore, R.D Boyd, *Optics Letters.* **21**, (1996) 540.