

Modélisation et spécification des cavités de lasers dispersives

Bryan Burgoyne, Genia Photonics

1 Introduction

Concevoir et construire des cavités de lasers demande une bonne connaissance de la physique et des tolérances des différents éléments utilisés. Bien qu'il soit possible de concevoir ou d'optimiser les cavités expérimentalement, cette façon de procéder est longue et coûteuse. Une approche plus économique, mais moins précise, est de simuler numériquement les différents éléments de la cavité ainsi que les lois de la physique régissant l'évolution du champ électrique (la lumière laser). La modélisation permet de résoudre le problème "direct" où les caractéristiques de la lumière laser sont obtenues en fonction des paramètres de la cavité. Toutefois nous cherchons à faire de la conception et de l'optimisation, ce qui se trouve être un problème "inverse" : nous voulons déterminer les paramètres de la cavité donnant des caractéristiques spécifiques de la lumière laser. De plus, une simulation de laser à impulsions (le cas qui nous intéresse) peut prendre plusieurs minutes pour une cavité typique, ce qui rend difficile l'exploration complète de l'espace des paramètres ou l'utilisation des méthodes numériques d'optimisation.

Une autre approche est de simplifier le problème pour le résoudre analytiquement ou d'une manière numérique rapide. La simplification devra toutefois demeurer suffisamment fidèle pour que le résultat puisse délimiter la zone d'exploration des paramètres et définir des tolérances pour les différents éléments.

2 Définition du problème

Les lasers auxquels nous nous intéressons sont les lasers de fibre à impulsions, c'est-à-dire que les impulsions laser sont confinées dans une fibre optique. La cavité laser est donc faite de fibre optique. Les éléments ont également des fibres à l'entrée et à la sortie. Le fait que les impulsions soient confinées dans une fibre est important puisque leurs caractéristiques seront modifiées lors de leur propagation, ce qui n'est pas le cas (en général) lorsqu'elles se propagent dans l'air. La cavité laser peut donc être décrite par une

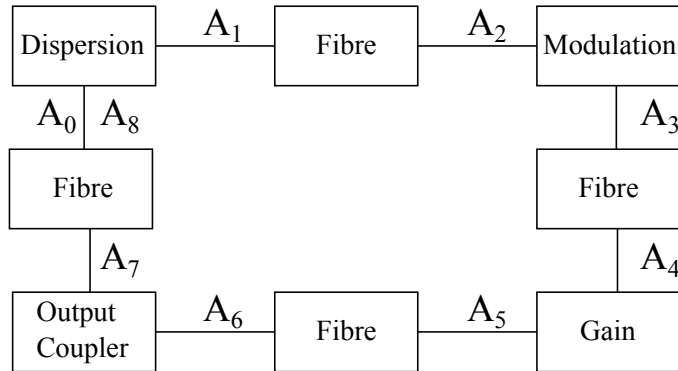


FIGURE 1 – La cavité peut être représentée par différents blocs.

suite de blocs représentant les différents éléments dans la cavité, ainsi que la fibre, comme dans la figure 1. Notre intérêt se porte sur les cavités à modes verrouillés activement, accordables en dispersion (“dispersion-tuned actively mode-locked fiber lasers” [1]). La particularité de ces cavités est qu’elles comportent un élément qui module le champ électrique dans le domaine temporel et un élément hautement dispersif qui induit un délai différent pour chaque fréquence de l’impulsion. Les autres éléments (coupleur de sortie, gain) sont typiques des lasers.

Les impulsions sont décrites par l’enveloppe de leurs champs électriques, qui est une variable complexe. Cette enveloppe dépend du temps (ou des fréquences, en prenant une transformée de Fourier) et de la position dans la cavité, qui sont toutes deux des variables réelles. L’évolution du champ électrique des impulsions à travers chaque élément, ainsi que la fibre, est décrite soit par une équation aux dérivées partielles (selon le temps et la position dans la cavité), soit par une fonction sur le champ électrique. Les conditions aux limites sont telles que le champ à l’entrée d’un bloc est la sortie du champ précédent. Puisque la cavité est fermée, la solution se trouve être un mode propre du système d’équations aux dérivées partielles successives. Le problème principal consiste donc à déterminer l’enveloppe du champ électrique décrivant l’impulsion en fonction des paramètres des différents blocs. Le problème secondaire consiste à savoir comment modéliser ces blocs ou en faire une approximation afin de permettre une résolution analytique (ou numérique rapide).

3 Approches possibles

Différentes approches ont été tentées pour résoudre ce genre de problèmes qui est commun à toutes les cavités lasers.

- La méthode la plus courante est d'utiliser un modèle moyen qui consiste à linéariser tous les blocs, ce qui revient à propager les impulsions dans un bloc moyen contenant tous les effets. Les solutions obtenues par ces méthodes sont donc indépendantes de la position, ce qui convient à certaines cavités (dont les cavités solitoniques) mais ne convient pas aux cavités où les impulsions varient beaucoup [2].
- Une autre approche est de ne considérer que des éléments linéaires et intégrer chaque bloc, de sorte que le système est décrit par des fonctions de transfert. Le système peut être résolu si la forme du champ électrique peut être déterminée [3].
- Il est également possible de s'affranchir de la dépendance temporelle (ou spectrale) des équations en posant un "ansatz" pour le champ électrique, ce qui transforme les équations aux dérivées partielles sur le champ électrique en équations différentielles ordinaires sur les paramètres de l'"ansatz" [4].
- Une variante de cette approche est de considérer le champ électrique comme une distribution de carré intégrable (ce qui est le cas puisque les impulsions ont une énergie finie) et de le décrire en utilisant les moments de la distribution. Nous obtenons ainsi un système d'équations différentielles ordinaires sur les moments [5].

En résumé, il s'agit de déterminer les paramètres de la cavité laser permettant d'obtenir l'impulsion optique voulue. Il faudra déterminer les avantages et les inconvénients des différentes approches en fonction de la précision de la modélisation des blocs et de la capacité à obtenir des solutions analytiques. Nous avons déjà des programmes permettant de simuler une cavité donnée et ainsi valider les modèles analytiques en certains points. Différentes modélisations des blocs sont possibles et dépendent du niveau de détail. Il y a des effets qui sont négligeables en première approximation, mais il y a certains effets que nous voudrions inclure dans la modélisation des blocs car ils ont un impact dans les résultats expérimentaux.

Références

- [1] S. Yamashita and M. Asano, “Wide and fast wavelength-tunable mode-locked fiber laser based on dispersion tuning,” *Optics Express*, 14, p. 9299–9306, 2006.
- [2] H.A. Haus, “Mode-locking of Lasers,” *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, 6(6), p. 1173–1185, 2000.
- [3] B. Burgoyne, A. Dupuis, and A. Villeneuve, “An Experimentally Validated Discrete Model for Dispersion-tuned Actively Mode-locked Lasers,” *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, 20(5), 1100409, 2014.
- [4] B.G. Bale, S. Boscolo, J.N. Kutz and S.K. Turitsyn, “Intracavity dynamics in high-power mode-locked fiber lasers,” *Physical Review A*, 81(3), 033828, 2010.
- [5] J. Santhanam and G.P. Agrawal, “Raman-induced spectral shifts in optical fibers : general theory based on moment method,” *Optics Communications*, 222, p. 413–420, 2003.