

DÉTERMINATION EXPÉRIMENTALE DES PROBABILITÉS DE TRANSITION DU SILICIUM $\lambda 399$ nm

Belkacem FERHAT¹, Youssef AZZOUZ¹, Roland REDON² et Marc RIPPERT²

¹ Laboratoire LEQ, Faculté de Physique, U.S.T.H.B., B.P. 32, El-Alia, 16111 Alger

² Laboratoire PROTEE-ISO, Université Sud Toulon et du Var, 83957, La Garde, France

E-mail : belkacem.ferhat@gmail.com

RÉSUMÉ : Un claquage de faisceau laser sur du silicium solide pur crée un plasma source de spectres d'émission. La température a varié de 14000 à 18000 K et la densité électronique de $5 \cdot 10^{17}$ à $2.5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. La technique spectrométrique et la méthode numérique de traitement des raies permettent d'enregistrer et de traiter des raies de très faible intensité. Les probabilités de transition du silicium une fois ionisé à $\lambda 399$ nm sont mesurées expérimentalement pour la première fois. Ces valeurs n'ont pas pu être comparées à d'autres valeurs expérimentales par absence totale de données publiées. Les valeurs théoriques sont elles-mêmes approximatives.

MOTS CLÉS : plasma, raie spectrale, probabilités de transition

1. Introduction

Les techniques spectrométriques, les méthodes numériques de traitement des mesures ainsi que de l'utilisation de nouvelles sources radiatives (laser) permettent une prospection meilleure des propriétés spectroscopiques. La détermination des probabilités de transition du Silicium ionisé devient possible, particulièrement. Ces données sont fondamentales pour la détermination des niveaux de vie des niveaux atomiques et de l'abondance de cet élément dans les milieux stellaires et solaires de température comprise entre 10.000°K et 20.000°K car son spectre, constitué de raies d'émission dans le Visible et l'UV, y est dominant. Actuellement, plus du tiers des valeurs des probabilités de transition du Silicium n'est pas connu tandis que d'autres le sont avec peu de précision.

Une compilation exhaustive des probabilités de transitions du Si II a été faite par Lanz et Artru [1] en 1985 où il est montré que 30% des probabilités de transition ne sont pas connues et que d'autres sont connues avec peu de précision.

Les résultats expérimentaux les plus récents concernant le silicium une fois ionisé ont été présentés par Blanco and al. [2] et Matheron and al [3]. Il existe des valeurs expérimentales seulement pour une trentaine de multiplets. Or il est très utile de comparer les valeurs théoriques et expérimentales car l'effet de mélange de configuration pour le Si II dans l'approche de Coulomb rend les calculs très difficiles.

L'étude expérimentale des raies faibles du silicium n'a pas été faite sauf pour le doublet $\lambda 334$ nm [4] et [5].

La présente communication se veut une contribution à la détermination des probabilités de transition du silicium une fois ionisé pour le multiplet $\lambda 399$ nm.

2. Technique expérimentale et traitement des mesures

2.1 Technique expérimentale.

Un faisceau laser infrarouge Nd : Yag (10 ns, 310 mJ soit une puissance max de 31 MWatts) est focalisé par une lentille en silice sur un barreau de silicium pur (99.99%) se trouvant dans une enceinte étanche et munie de quatre hublots en BK7 protégés. La cible est un barreau de

silicium de 50 mm de long et 5 mm de diamètre. Il est soumis à un mouvement hélicoïdal vertical de manière à obtenir des impacts sur des surfaces différentes et, par conséquent, recueillir des spectres d'émission identiques. Le claquage du faisceau laser sur la cible solide crée un plasma. La lumière émise par le plasma est captée, dans la direction perpendiculaire à l'incidence laser, par une fibre optique silice-silice, et menée vers un monochromateur TRIAX 180 de Jobin-Yvon muni d'un réseau à 2400 traits/mm (blaze à 330 nm et fente de 25 μm). Ce dernier est couplé à une caméra UV Visible ICCD1024x256 Jobin-Yvon. La résolution obtenue est égale à 30 pm. La figure 1 décrit ce dispositif.

La caméra ICCD est intensifiée pendant 200 ns tandis que les retards après le pulse laser sont fixés à 125 ns.

A la sortie de l'ICCD se trouve un ordinateur qui gère l'acquisition des données et les enregistre pour un traitement ultérieur.

Pour un ensemble donné de paramètres (énergie laser, retard ...) le même spectre est enregistré en mode accumulatif 100 fois sur les 256 lignes de l'ICCD et ceci est répété 20 fois. Le spectre étudié est calculé comme le spectre médian de ces 20 spectres.

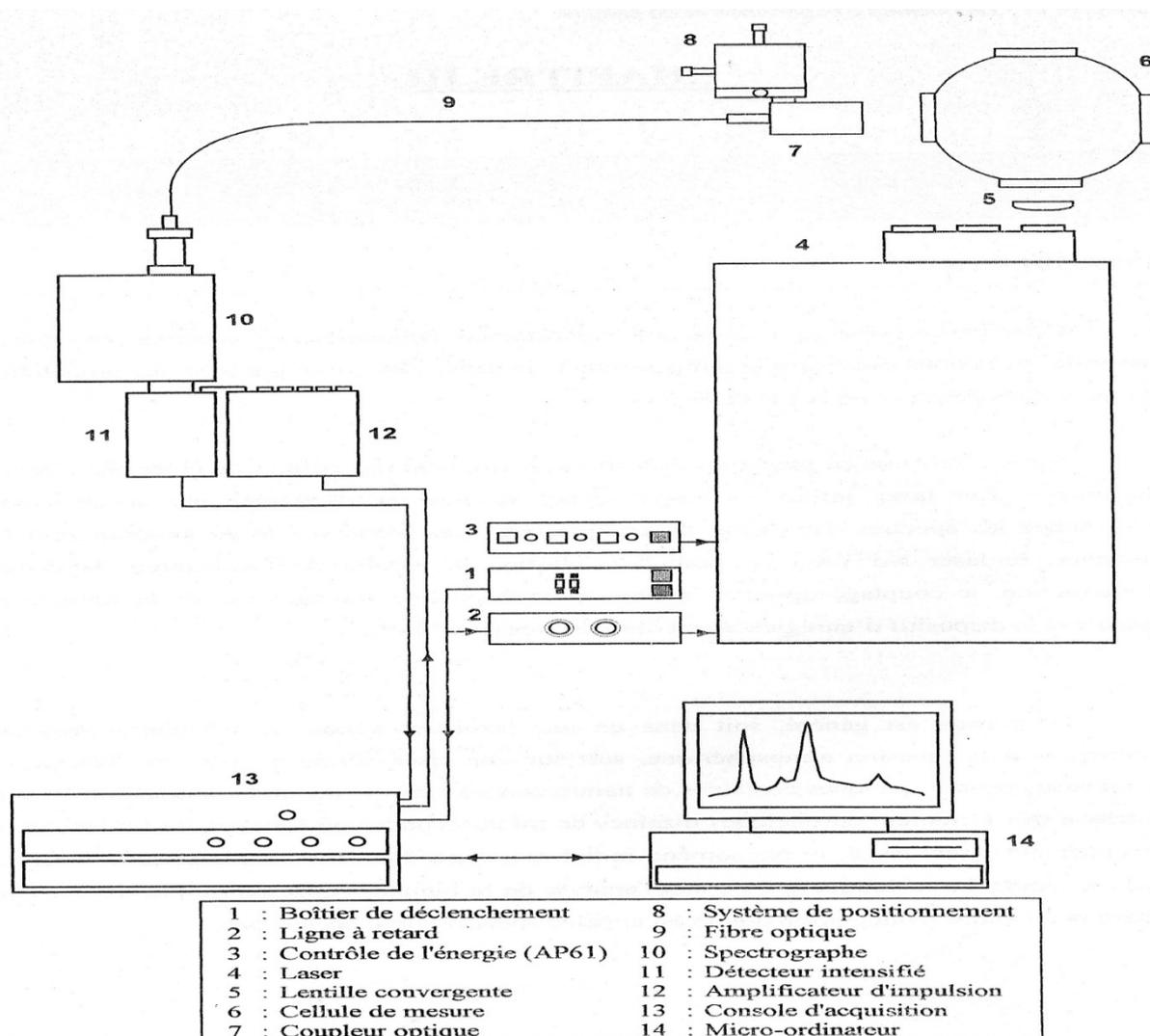


Figure 1 : Schéma du dispositif expérimental

2.2 Traitement des données

Les conditions expérimentales sont choisies de telle sorte que le processus responsable de l'élargissement des raies spectrales soit l'effet Stark quadratique. L'effet Doppler est 100 fois

plus faible que l'effet Stark et donc négligeable. Les profils de raies sont donc des distributions Lorentziennes.

La méthode de synthèse développée par Redon and al [4] est appliquée pour le traitement numérique des raies du doublet $\lambda 399$ nm. Cette méthode de synthèse des spectres est valable car les profils de raies observés sont lorentziens. Un polynôme de degré variable est ajouté pour modéliser le fond continu. Enfin, le spectre théorique est multiplié par la réponse en intensité du dispositif d'acquisition et convolué avec la fonction d'appareil déterminée expérimentalement.

Le spectre obtenu est ajusté au spectre expérimental par la méthode « Simplex ». La fonction d'appareil et du bruit propre au système de détection grâce à l'enregistrement de spectre d'une lampe Hg basse pression (raie spectrale appropriée) avant et après les séquences d'acquisition des spectres.

Une très petite quantité de Xénon est introduite dans la chambre à cible afin de déterminer la température du plasma par la méthode des Boltzmann plot des intensités des raies du Xe II. La variation de la puissance de sortie du faisceau laser permet la variation de la température du plasma créée sur la cible d'impact.

Un programme Matlab incluant le modèle des raies, la fonction d'appareil ainsi qu'un polynôme décrivant le bruit thermique permet d'obtenir les valeurs numériques des intensités des raies aux longueurs d'onde maximales, des demi-largeurs à mi hauteur ainsi que celle du bruit de fond.

La précision sur les valeurs expérimentales induite par les incertitudes propres à la technique spectrométrique est de l'ordre de 5%

3. Résultats et discussion

Le choix du multiplet est guidé par son importance d'ordre astrophysique et l'absence de données expérimentales à son sujet. Les raies du doublet étudié sont bien résolues et n'ont pas présenté de réabsorption. La figure 2 illustre une bande spectrale contenant le doublet Si II pour différentes valeurs de l'énergie laser incidente. La température et la densité électronique du plasma ont varié, respectivement, de 14 000 °K à 17 000 °K et de $0.5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ à $2.5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. La figure 3 rapporte le doublet $\lambda 399$ nm réel (ligne bleue) et synthétisé par le modèle de déconvolution (ligne rouge) pour une température $T = 16\,000\text{K}$ et une densité électronique $N_e = 2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.

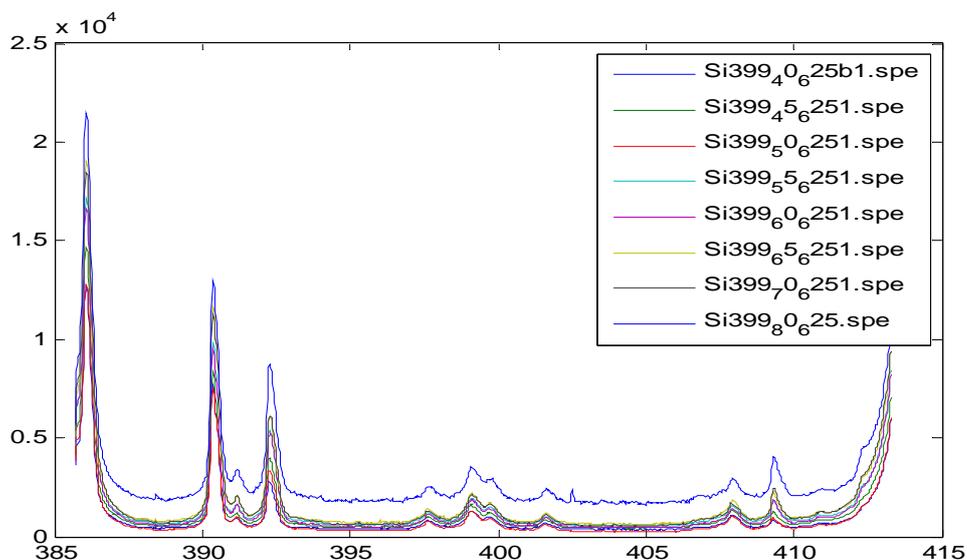


Figure 2 : Spectre de Si II pour différentes énergies du faisceau laser

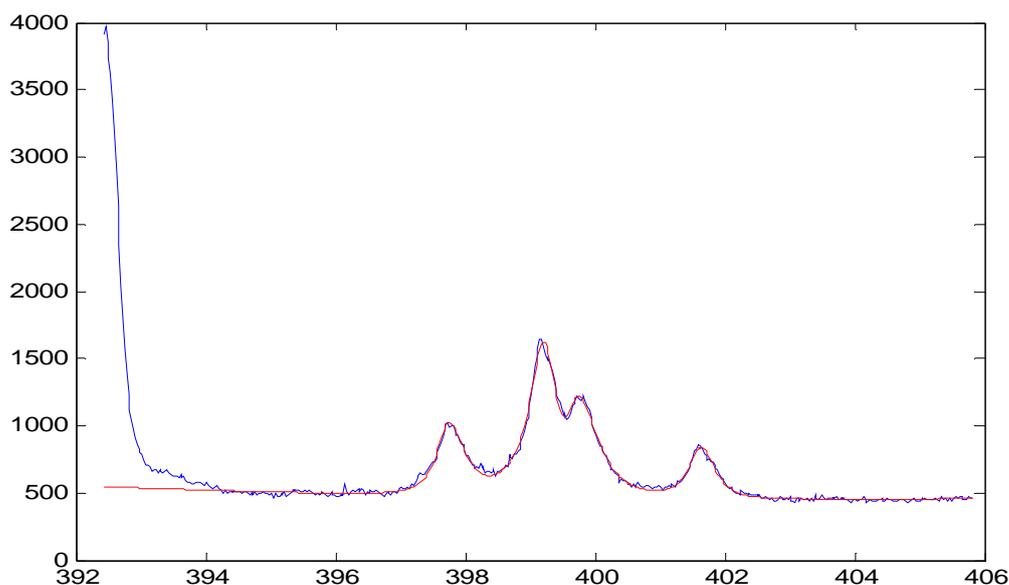


Figure 3. *Multiplet du silicium SI II à la longueur d'onde 399 nm*
Spectre réel (bleu) et spectre synthétisé (rouge)

Les données spectroscopiques du NIST sur le silicium une fois ionisé ne rapporte aucune information sur les raies concernées.

Il n'y a aucune valeur expérimentale rapportée dans la littérature actuelle afin de pouvoir faire une comparaison constructive. La seule valeur théorique spectroscopique de ces deux raies est celle de la force d'oscillateur donnée par [1]. Il s'agit d'une valeur calculée selon l'approximation de Coulomb adoptée après une compilation de toutes les données existantes sur le silicium une fois ionisé. La force d'oscillateurs a été calculée selon l'expression :

$$(gf)_i = 1.4992 \cdot 10^{-7} (2L + 1)(2S + 1) A_i \lambda_i$$

Où A_i est la probabilité de transition pour la raie de longueur d'onde λ_i . A partir de la formule et en utilisant l'expression de Wiese [6] pour les branching ratios, on déduit la valeur de A_i . Pour les raies du même multiplet, les valeurs des probabilités de transitions sont proportionnelles à celles de leurs intensités [3]. On obtient les valeurs rapportées dans le tableau ci-dessous.

Tableau : probabilités de transition du Si II $\lambda_{399\text{ nm}}$

| λ en nm (air) | Intensité relative | A_{ki} (/s) | Précision |
|-----------------------|--------------------|---------------|-----------|
| 399.197 | 23 | 2.66 e+05 | B |
| 399.769 | 10 | 1.15 e+05 | B |

Les valeurs des probabilités de transitions obtenues sont adoptées avec une précision de classe B bien que les valeurs expérimentales des densités électroniques et de la température sont déduites avec une précision de classe A. Ceci vient du fait que la valeur de la force d'oscillateur à partir de la quelle sont déduite les valeurs des probabilités est une valeur

adoptée par calcul selon une approximation de Coulomb. L'interaction de configuration propre à cet ion rend très complexes les calculs selon d'autres méthodes telles que la multi-configuration Hartree-Fock, la méthode dite de champ self-consistent ou la méthode optimisée de multi-configuration.

Références

- [1] Y.LANZ et M.C.ARTRU, Physica Scripta, Vol.32, pp 115-124,1985
- [2] F.Blanco, B.Botho et J.Campos, Physica Scripta, Vol.52, pp 628-633
- [3] P.Matheron,A.Escarguel,R.Redon,A.Lesage et J.Richou JQSRT, Vol.69,p 535, 2001
- [4] A.Lesage et R.Redon, Astronomy & Astrophysics,Vol 478, p765, 2004
- [5] B.Ferhat,Y.Azzouz et A.Akrib, CNPA'08,Bejaia,11-13 novembre 2008
- [6] W.L.Wiese,M.W.Smith,B.M.Miles Atomic Transition Probabilities,Nat.Bur.Stand, Pub. NSRDS-NBS, 22, Washington DC, 1969