

LÁSER de Xe NEUTRO y MULTI-IÓNICO UV – VIS – IR

Gallardo M.[#], Raineri M.[#], Giuliani M.⁺, Lagorio C.⁺, Padilla S.⁺, Reyna Almandos J.[#]

[#]Centro de Investigaciones Ópticas (Ciop), C.C. 124 1900, La Plata, Buenos Aires, Argentina

⁺Dpto. De Física de C. Exactas y Naturales, Universidad Nacional de Mar del Plata, Funes 3350 (7600), Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina

e-mail: gallardom@ciop.unlp.edu.ar

El láser de Xe pulsado, ha sido perfeccionado en el tiempo y es hoy un emisor de radiación estimulada en numerosas transiciones que cubren el rango de 220 a 2200 nm. En este trabajo se presentan nuevos resultados con un arreglo experimental en el cual, se utiliza un medio activo de Xe excitado, al que se acopla un sistema de dos cavidades resonantes superpuestas mediante el uso de tres espejos. Esto permite generar, al mismo tiempo, radiación estimulada ultravioleta, visible e infrarroja. Radiación proveniente del Xe neutro (XeI) y de los iones XeII, XeIII, XeV, XeVI, XeVII y XeVIII es observada en este trabajo, en el que nuevas transiciones se agregan a las ya publicadas. Además, la observación de la radiación emitida transversalmente permite visualizar en que región del tubo de descarga se amplifica la radiación correspondiente a iones altos y bajos.

The pulsed Xe laser, has been improved along the years, and is today an emitter of stimulated radiation in several transitions that cover from 220 to 2200 nm range. In this work we present new results with an experimental arrangement in which, an active medium of excited Xe is used, coupled to a system with two superimposed resonant cavities using three mirrors. This allows to generate simultaneously stimulated radiation in the ultraviolet, visible and infrared. Radiation proceeding from neutral Xe (XeI) and the ions XeII, XeIII, XeV, XeVI, XeVII and XeVIII are observed in this work, where new transitions are added to the published ones. Besides, the observation of the end-on emitted radiation permits visualize in which region of the discharge tube the radiation is amplified corresponding to the different ions.

I. INTRODUCCION

Plasmas de gases nobles a baja presión generados en descargas cuasi-capilares pulsadas de alta corriente, han sido extensivamente usadas como fuentes de emisión espontánea y como medios activos de láseres neutros y multiiónicos. En particular, en Xe, tales descargas producen un espectro muy rico de emisión, incluyendo emisión estimulada, la cual ha sido reportada desde el comienzo del láser, por numerosos autores⁽¹⁻⁶⁾.

En el Centro de Investigaciones Ópticas, la primera configuración experimental se construyó en 1969 y fue desarrollada para obtener emisión láser en transiciones no asignadas iónicamente, siendo además utilizada sin cavidad resonante, como fuente luminosa no convencional para trabajos de espectroscopia atómica. Desde esta primera estructura experimental, el láser de Xe ha sido perfeccionado en el tiempo. Varios trabajos que presentan distintos estudios y aplicaciones han sido publicados⁽⁷⁻¹⁰⁾, y es hoy un emisor de radiación estimulada en numerosas transiciones que cubren el rango desde 220 a 2200 nm utilizado en investigación y para enseñanza.

El presente trabajo tiene por objeto presentar los últimos resultados obtenidos, referidos a una nueva estructura experimental que permite generar simultáneamente radiación ultravioleta, visible e infrarroja, e incorporar a la lista ya conocida, nuevas transiciones láser. Además, se plantea el inicio del estudio del comportamiento de los electrones f , responsables en la mayoría de las transiciones de la emisión láser en iones altos.

II. ARREGLO EXPERIMENTAL

El tubo de descarga de Pyrex, tiene 1,3 m de largo y 5 mm de diámetro interno, con electrodos de Wolframio recubiertos con Indio en sus extremos y una camisa de vidrio entre ellos, que permite el paso del agua para refrigeración. La excitación se lleva a cabo descargando a través de una llave rápida, un capacitor de 280 nF cargado hasta 18 kV, lo que permite generar pulsos de corriente entre 2 y 4 kA, con un ancho temporal de 2 μ s (FWHM), aproximadamente. El tubo está conectado a una línea de vacío que permite su evacuación a través de una bomba turbomolecular, y posterior llenado con Xe espectroscópicamente puro o con una mezcla de Xe – He. Las presiones de trabajo en ambos casos, variaron entre 5 y 100 mTorr.

El arreglo experimental actual presenta un medio activo similar a los detallados en trabajos anteriores, al que se acopla un nuevo sistema consistente en dos cavidades resonantes superpuestas, mediante el uso de tres espejos. La cavidad que podemos llamar interna, está compuesta por un par de espejos especiales para la región UV (95 % de reflectividad en 350 nm). La cavidad externa utiliza el espejo de salida de la anterior y agrega un espejo de oro, de 92 % de reflectividad en la región visible, en forma colineal con el resto.

En la Fig. 1 se observa en esquema del tubo de descarga, ambas cavidades y el sistema de detección alternativo de la radiación, ya que la misma fue analizada con un espectrógrafo montaje Ebert de 3 m de distancia focal, o un monocromador de 0,5 m de distancia focal. La radiación fue observada con un detector de PbS acoplado a un osciloscopio digital.

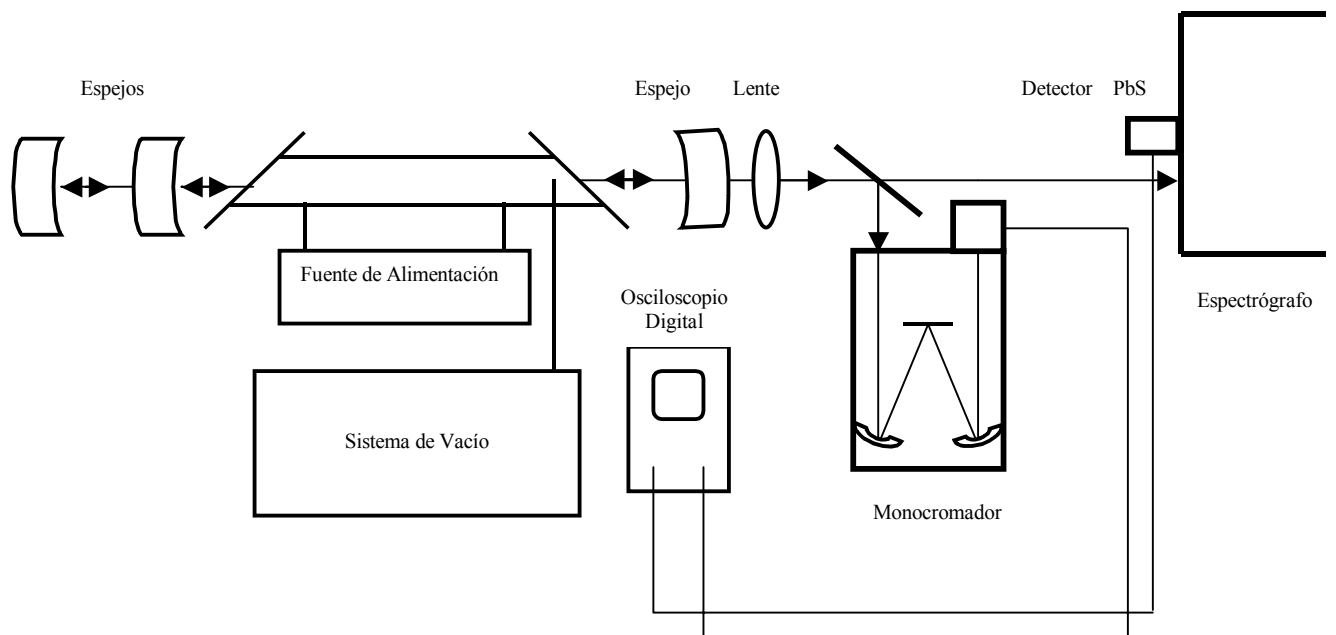


Figura 1: Esquema Experimental

III. RESULTADOS

Rango de emisión

La Tabla 1, muestra la lista de transiciones observadas con su clasificación dentro del esquema de niveles correspondiente, en el esquema de acoplamiento

LS o JK reportado en la bibliografía^(4,10). La intensidad máxima de salida de cada una de ellas es función de la presión, cercano a los 10 mtorr todas operando al mismo tiempo. Por lo tanto, a partir del uso de una doble cavidad resonante acoplada al medio activo, se genera simultáneamente radiación estimulada pulsada ultravioleta, visible e infrarroja

Tabla 1. Líneas Láser Clasificadas en la región del UV, Visible e Infrarrojo

λ [nm] (aire)	Ión	Clasificación
231,54	VII	$5s4f(^2S) ^1F_3 - 5p^2(^1D) ^1D_2$
324,70	VIII	$6d(^1S) ^2D_{5/2} - 5f(^1S) ^2F_{7/2}$
330,60	V	$5s^25p4f(^2P) ^3G_3 - 5s^25p5d(^2P) ^3F_2$
333,08	V	$5s^25p4f(^2P) ^3F_4 - 5s^25p5d(^2P) ^3F_3$
335,00	VIII	$6d(^1S) ^2D_{3/2} - 5f(^1S) ^2F_{5/2}$
364,55	VII	$5s4f(^1S) ^1F_3 - 5p^2(^3P) ^3P_2$
380,33	V	$5s^25p4f(^2P) ^3D_1 - 5s^25p5d(^2P) ^3P_0$
397,30	V	$5s^25p4f(^2P) ^3D_1 - 5s^25p5d(^2P) ^3P_1$
406,04	III	$5s^25p^3(^2P) 6p ^1D_2 - 5s^25p^3(^2P) 6s ^1P_1$
430,57	V	$5s^25p4f(^2P) ^3D_2 - 5s^25p5d(^2P) ^3P_1$
455,85	V	$5s^25p4f(^2P) ^3F_2 - 5s5p^3(^2P) ^1P_1$
495,41	V	$5s^25p4f(^2P) ^1G_4 - 5s^25p5d(^2P) ^1F_3$
500,78	V	$5s^25p4f(^2P) ^3D_3 - 5s^25p5d(^2P) ^1D_2$
515,91	V	$5s^25p4f(^2P) ^3F_4 - 5s^25p5d(^2P) ^3D_3$

526,02	V	$5s^2 5p 4f (^2P) ^1F_3 - 5s^2 5p 5d (^2P) ^3D_2$
535,29	V	$5s^2 5p 4f (^2P) ^3F_3 - 5s^2 5p 5d (^2P) ^3P_2$
539,46	V	$5s^2 5p 4f (^2P) ^3F_2 - 5s^2 5p 5d (^2P) ^3D_1$
595,57	V	$5s^2 5p 4f (^2P) ^1D_2 - 5s^2 5p 5d (^2P) ^1P_1$
904,5	I	$6p [1,1/2]_1 - 6s [1,1/2]_2$
926,6*	II	$6p [3]_{5/2} - 5d [2]_{5/2}$
1329,2*	II	$6p [1]_{3/2} - 5d [2]_{5/2}$
1732,5	I	$5d [1,1/2]_1 - 6p [2,1/2]_2$
2026,2	I	$5d [1,1/2]_1 - 6p [1,1/2]_1$
2037,9*	-	
2104,9*	VI	$5s^2 4f ^2F_{5/2} - 5s^2 5d ^2D_{3/2}$

* Líneas nuevas

Nuevas transiciones láser

En su totalidad, todas las líneas que se encuentran dentro del rango ultravioleta – visible, constituyen un conjunto de transiciones que ya han sido estudiadas por nuestro Grupo de Investigación^(9,10).

En este trabajo, la tarea principal se centró en la región infrarroja del espectro, la que fue intensamente estudiada con el fin de obtener nuevas transiciones. De ellas, las pertenecientes al Xe neutro (XeI) en 904,5, 1732,5 y 2026,2 nm, ya observadas por otros^(4,11,12), aparecen en esta oportunidad emitiendo como un láser convencional y como superradiantes (un solo espejo trasero), siendo las dos últimas extremadamente intensas. Las pertenecientes al Xe una vez ionizado (XeII), 926,6 y 1329,2 nm, son de baja intensidad. Lo mismo ocurre para la transición localizada en 2037,9 nm, la cual fue imposible asignarla iónicamente.

Una operación previa a la búsqueda de nuevas transiciones en el infrarrojo fué la de predecir la línea 2104,9 nm perteneciente al Xe cinco veces ionizado (XeVI), teniendo en cuenta los resultados de los cálculos teóricos para que una transición entre dos niveles de energía determinados se amplifique.

Hasta este trabajo y observando las publicaciones de diferentes autores, el láser de Xe generaba emisión láser desde el XeI al XeVIII, con excepción del XeVI. El Grupo de Espectroscopía Atómica del CIOP ha trabajado intensamente en la espectroscopía de emisión de gases nobles y tres de sus trabajos⁽¹³⁻¹⁵⁾ están dedicados al Xe VI.

Empleando cálculos teóricos, se determinaron tiempos de vida y probabilidades de transición, los que impulsaron la búsqueda de líneas láser en las

proximidades de 2050 y 3322 nm, correspondientes a transiciones 5d – 4f en Xe VI. La detección de emisión láser de mediana intensidad en 2104,9 nm, a una presión entre 20 y 15 mTorr previo a la emisión visible, si es que continuamos bajando la presión en el tubo de descarga, constituye un resultado significativo ya que por primera vez se observa dicha emisión en XeVI

[$4f ^2F_{5/2} - 5d ^2D_{3/2}$]

Para predecir los tiempos de vida de los niveles involucrados en las transiciones láser para el Xe VI y las probabilidades de transición, se utilizaron cálculos del tipo Hartree-Fock Relativistas (HFR) y de diagonalización de matrices (Cowan)⁽¹⁶⁾. Las configuraciones consideradas en el cálculo fueron $5s^2 (5p, 4f, 5f, 6p, 7p, 8p, 6h, 7h, 8h, 8k), 5p^3, 5s5p5d, 5s5p6s$ y $5s 5p^2, 5s^2 (5d, 6s)$ para las paridades impar y par respectivamente. Utilizamos en el cálculo parámetros optimizados obtenidos de los valores de energía conocidos experimentalmente para el Xe cinco veces ionizado. Los resultados mostraron probabilidades de transición del orden de $10^5 s^{-1}$, y que el tiempo de vida del nivel superior involucrado es por lo menos varios órdenes de magnitud mayor que el correspondiente al nivel inferior. En la Tabla 2 se muestran los parámetros obtenidos para las transiciones analizadas con su correspondiente clasificación.

No podemos explicar la no aparición de la otra transición predicha [$4f ^2F_{7/2} - 5d ^2D_{5/2}$], ya que la zona de trabajo no aparece como suficientemente cubierta por el detector de PbS, a pesar de haber sido refrigerado a temperatura de aire líquido.

Tabla 2 Probabilidad de transición A_{si} , tiempos de vida del nivel superior τ_s , e inferior τ_i , calculados para transiciones láser.

λ [nm] (aire)	Clasificación	τ_s [s]	τ_i [s]	A_{si} [s ⁻¹]
2104,9	$5s^2 4f ^2F_{5/2} - 5s^2 5d ^2D_{3/2}$	$1,052 \cdot 10^{-8}$	$4,560 \cdot 10^{-11}$	$4,948 \cdot 10^5$
	$5s^2 4f ^2F_{5/2} - 5s^2 5d ^2D_{5/2}$	$1,052 \cdot 10^{-8}$	$5,520 \cdot 10^{-11}$	$5,923 \cdot 10^3$
	$5s^2 4f ^2F_{7/2} - 5s^2 5d ^2D_{5/2}$	$1,055 \cdot 10^{-8}$	$5,520 \cdot 10^{-11}$	$2,364 \cdot 10^5$

Estructura del frente de onda del láser

En nuestros trabajos anteriores de espectroscopía del Xe usando el tubo de descarga del láser sin cavidad como fuente luminosa y observando la luz en forma longitudinal, se podía discriminar la pertinencia a cierta ion por la forma de la línea observada en el espectro. Esto surge a partir del efecto “pinch” que se genera en

descargas cuasi-capilares de alta corriente, en donde concentra la mayor densidad de corriente en el centro del tubo.

La Fig.2 muestra, sobre una pantalla, la proyección de la luz difractada por una red plana de 300 líneas/mm sobre la que incide directamente el haz del láser.

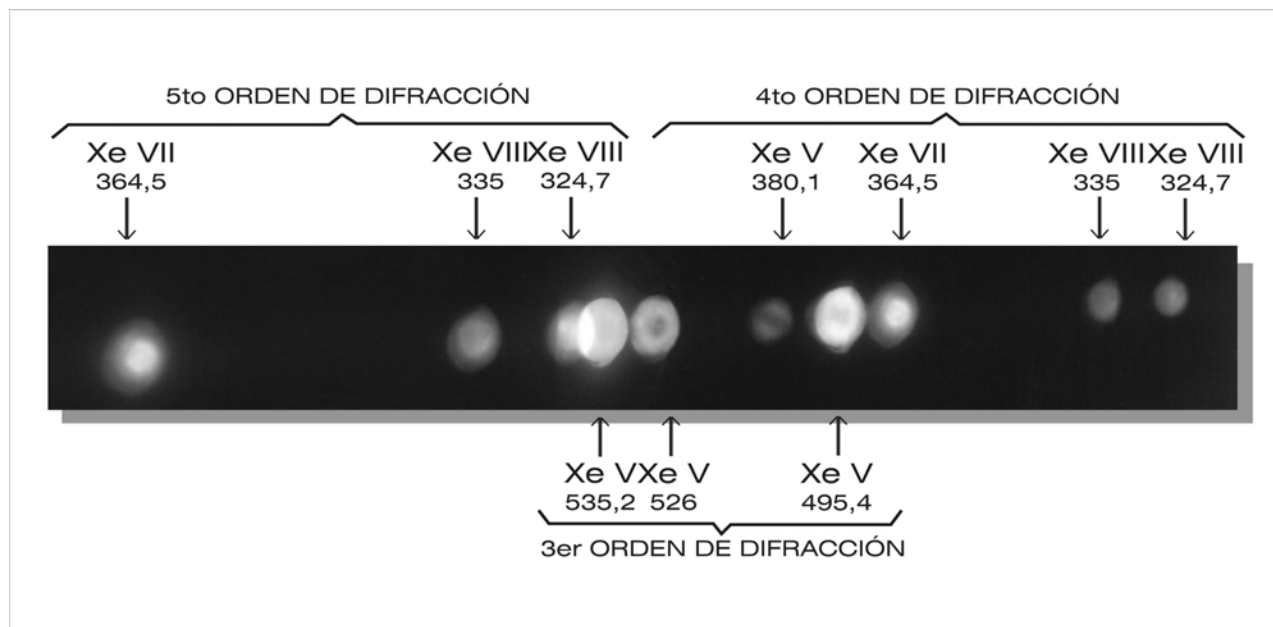


Figura 2.

Los diferentes órdenes de difracción que convergen sobre la pantalla, muestran líneas de alta intensidad que se corresponden con transiciones ultravioletas y visibles del XeV, XeVII y XeVIII. Al observar detenidamente la forma de cada una de ellas al impactar sobre la pantalla, las pertenecientes al XeV aparecen en forma de aro, mientras que las correspondientes a iones más altos aparecen como un pequeño círculo.

Lo interesante de estas últimas observaciones, es que a una determinada presión, el aro azul-verdoso que producen las transiciones más fuertes del XeV, tiene un radio perfectamente definido, que proyectado sobre un simple papel blanco forman un contorno a las transiciones ultravioletas del XeVII y XeVIII que hacen fluorecer el papel en su centro.

Un tratamiento teórico de la fenomenología observada en descargas capilares pulsadas, ha sido descrito en la tesis de Sherar⁽¹⁷⁾

Importancia de los electrones f

Un análisis más detallado de la Tabla 1, en la columna correspondiente a la clasificación de las líneas, permite rescatar el hecho de que para una gran parte de las mismas, uno de los niveles involucrado en la transición corresponde a un electrón **f**, o niveles con porcentaje de composición mezclado con este.

La segunda observación, nos dice que ese hecho se relaciona con iones altos a partir del XeV. Según

Sobral⁽¹⁰⁾ en el XeVI los electrones **f** se pueblan por transiciones de la configuración 5s 5p² 4f y la 7d. Estos estudios se encuentran en progreso.

IV. CONCLUSIONES

Se presenta en este trabajo un nuevo dispositivo experimental par emisión estimulada de Xe, compuesto por un ya conocido sistema de descargas cuasi-capilares pulsadas al que se asocian un par de cavidades resonantes superpuestas, materializadas mediante el uso de tres espejos.

Los estudios llevados a cabo con este renovado dispositivo, permitieron:

- Mostrar que es posible operarlo, a una presión determinada, como emisor en el ultravioleta, visible e infrarrojo simultáneamente.
- Mediante un trabajo sistemático de búsqueda, encontrar nuevas transiciones láser en el infrarrojo.
- Observar que la emisión estimulada correspondiente a iones bajos (< ó = XeV) es amplificada sobre las paredes del tubo de descarga, mientras que la de iones altos, aparece en el centro de la descarga.

Finalmente, se encontró emisión estimulada por primera vez en XeVI, a partir del conocimiento del esquema de niveles de energía realizado en trabajos de espectroscopía de emisión y cálculos teóricos que determinaron la transición a estudiar. Este hecho contribuye a mostrar la importancia de los electrones **f** en

distintos iones del láser de Xe y presenta la oportunidad de continuar el estudio en el tema.

Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad Nacional de Mar del Plata; Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), y la Comisión de Investigaciones Científicas (CIC) de la Provincia de Buenos Aires, Argentina, donde M.G., MR, y JRA son investigadores

Referencias

- 1- Bridges, W.B. and A.N. Chester. Appl.Opt., **4**, 573-580 (1965)
- 2- Bridges, W.B. and A.N. Chester. IEEE J.of Quantum Electron. ,**QE-1**, 66-84 (1965)
- 3- Cheo,P.K. and H.G. Cooper. J. Appl. Phys. **36**, 1862-1865 (1965)
- 4- Andrade, O., M.Gallardo and K.Bockasten. Appl. Phys. Lett. **11**,99-10 (1967)
- 5- Gallego Lluésma, E., A.Tagliaferri, C.Massone, M.Garavaglia and M.Gallardo. J.Opt.Soc.Am. **63**, 362-364 (1973)
- 6- Sakuna, E. and T.Tako. Jpn. J. Appl. Phys. **13**, 1489-1490 (1974)
- 7- Schinca, D., R.Duchowicz, H.Sobral and M.Gallardo. Anales AFA, **5**, 164-168 (1993)
- 8- Sobral, H., D.Schinca, R.Duchowicz and M.Gallardo. Pure Appl. Opt. **5**, 1011-1019 (1996)
- 9- Sobral,H., D.Schinca, M.Gallardo and R.Duchowicz. J. Appl. Phys. **85**, 69-73 (1999)
- 10- Sobral,H., M.Raineri,D.Schinca, M.Gallardo and R.Duchowicz. IEEE J. Of Quantum Electron. **35**,1308-1313 (1999)
- 11- Sinclair, D.C. J.Opt.Soc.Am **55**, 571-572 (1965)
- 12- Lengyel,B.A. in "Introduction of Laser Physics", Ed. John Wiley and Sons (1966)
- 13-Sarmiento, R. J.G. Reyna Almandos, M. Raineri and M.Gallardo. J. Phys. B. **32**,2853- 2858 (1999)
- 14-Reyna Almandos, J.G., R.Sarmiento, M.Raineri, F.Bredice and M.Gallardo. J. Quant.. Spec. And Rad. Transf. **70**, 189-194 (2001)
- 15-Gallardo,M., R.Sarmiento, M. Raineri, F. Bredice and J.G. Reyna Almandos. Proceedigs of SPIE, **4419**, 411-414 (2001)
- 16- R. D. Cowan, *The Theory of Atomic Structure and Spectra*, Berkeley, University of California Press, Berkeley, 1981
- 17- Sherar A., Tesis Doctoral "Descargas Eléctricas Capilares Pulsadas" Tandil, Argentina (1998).