

Aniquilación de positrones

Damián Gulich*

Enrique Neyra**

Betiana Pianciola***

Martín Falabella****

Experimentos Cuánticos II (2008), Departamento de Física, Universidad Nacional de La Plata

Resumen

En este informe se emplea la técnica de aniquilación de positrones para la caracterización del Hf, el GaTe y un polímero.¹

1. Introducción

La Espectroscopía de Aniquilación de Positrones (PAS) es una técnica que permite el estudio de la estructura electrónica y defectos en sólidos. El análisis de la densidad electrónica local de la distribución de energía y momento de los dos fotones γ de aniquilación de un positrón proporciona información muy valiosa sobre entorno físico y químico de la región donde se ha producido la aniquilación.

En la interacción e^-/e^+ se conoce a la transformación de masa de fotones como *proceso de aniquilación* y puede representarse como [1]:

$$e^+ + e^- \rightarrow \gamma$$

Este proceso obedece ciertas leyes de conservación generales, tales como la conservación de las siguientes magnitudes:

- Energía total
- Cantidad de movimiento total

*d_gulich@yahoo.com

**quique_neyra@hotmail.com

***betianapianciola@gmail.com

****martinfalabella@yahoo.com.ar

¹ Nota: Los cortes de palabras son generados automáticamente por el paquete Babel de L^AT_EX.

- Carga total
- Momento angular total
- Paridad

El estudio de la naturaleza de los cuantos de aniquilación brinda información acerca del estado del par e^-/e^+ que se está aniquilando, inmediatamente después del evento. Usando electrodinámica cuántica [1] se puede concluir que existen varias formas de aniquilación e^-/e^+ :

- a) La aniquilación sin emisión de fotones o con la emisión de un único fotón solo es posible si están presentes otros cuerpos, tales como un núcleo M o electrones, los cuales deben absorber el momento de retroceso, así estos procesos se pueden representar de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} e^+ + e^- + 2M &\rightarrow 2M \\ e^+ + e^- + M &\rightarrow \gamma + M \end{aligned}$$

La probabilidad relativa de ocurrencia de estos procesos es despreciable.

- b) El proceso principal es la aniquilación con emisión de 2 fotones, en él los cuantos deben ser emitidos en direcciones opuestas en el sistema de centro de masa, y cada fotón debe llevar la mitad de la energía del proceso.
- c) La aniquilación con la emisión de 3 fotones; en este caso, los fotones pueden emitirse en cualquier dirección relativa y la energía de cada rayo gamma puede variar desde cero hasta m_0c^2 . Si el par e^-/e^+ está en reposo en el momento de la aniquilación, los tres cuantos estarán en el mismo plano.

Para el análisis de los espectros temporales obtenidos con la técnica anteriormente mencionada debe tenerse en cuenta que los positrones pueden aniquilarse en distintos estados con tiempos de vida característicos dados por $\tau_i = 1/\lambda_i$ y el espectro puede representarse mediante la suma de exponenciales decrecientes de la forma

$$\frac{dn(t)}{dt} = \sum I_i \lambda_i e^{-\lambda_i t} \quad (1)$$

donde $\sum I_i = 1$, y $n(t)$ es la probabilidad de que un positrón siga existiendo luego de que transcurrido un tiempo t respecto de su emisión. Una discusión más detallada de los perfiles de los espectros puede encontrarse en [2, p. 3-4].

En un metal perfecto, todos los positrones de aniquilan como partículas libres en estados tipo Bloch (la tasa de anihilación λ es independiente del tiempo) y los espectros contienen una sola exponencial decreciente. En materiales más complejos se obtienen multiexponenciales, lo mismo ocurre en presencia de defectos con densidad electrónica menor que la densidad electrónica media (por ejemplo: vacancias, dislocaciones, etc.), los positrones tienden a localizarse en estos sitios en donde el número de positrones aniquilados que contribuye al espectro temporal puede describirse como la suma de varias exponenciales decrecientes.

2. Arreglo experimental

El arreglo experimental se muestra en la figura 1. El multicanal fue configurado con 2048 canales en un rango máximo de 50 ns (asociados a un pulso de 10 V proveniente del TAC), lo cual da 24.41 ps/canal.

El dispositivo experimental (ver figura 2) está compuesto por una fuente de ^{22}Na emisora de positrones, que se deposita sobre una película de kapton. Para la experiencia se la junta con la muestra a analizar, en este caso un metal, un semiconductor y un polímero. La fuente de sodio emite casi simultáneamente con el positrón un rayo γ de energía 1,28 MeV, el cual actúa como señal de inicio para el conteo de tiempo, mientras que la señal de finalización es la proveniente del evento de aniquilación del positrón (su energía es de 511 keV). Ambas señales están filtradas por sus discriminadores respectivos. El tiempo transcurrido entre las señales de inicio y

finalización determina el tiempo de vida media de los positrones en el material estudiado.

Se utilizaron dos centelladores de NaI (dopados con Tl), con fotomultiplicadores y electrónica auxiliar Ortec.

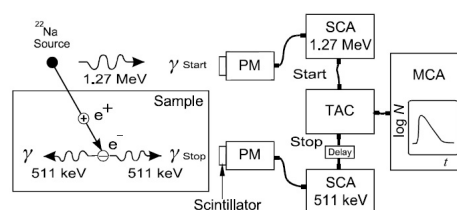


Fig. 1: Esquema de bloques del experimento [2].



Fig. 2: Arreglo empleado.

3. Resultados y análisis

Todos los análisis fueron realizados con el programa Origin 8. Se empleó una fuente de ^{60}Co , cuyas emisiones γ de 1.33 y 1.17 MeV se consideran simultáneas (la vida del nivel intermedio es de unos 12 ps). Después de un ajuste gaussiano del cobalto, es posible centrar el eje temporal en su máximo. La resolución en tiempo del dispositivo corresponde al ancho a altura mitad (FWHM) de este espectro, y es de 247 ± 2 ps (ver figura 3). Así, se corren todos los demás espectros y se comienza su ajuste a partir de los 123.5 ps.

Para cada uno de los gráficos de cuentas en función de tiempo se realizó un ajuste de acuerdo a la ecuación (1). Los resultados se muestran en las figuras 4 en la página siguiente, 5 en la página siguiente y 6 en la página siguiente.

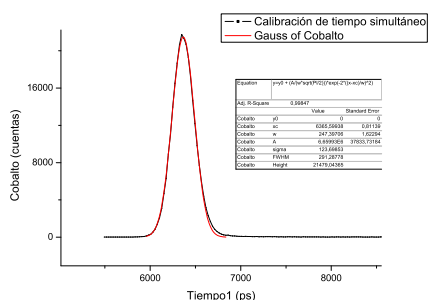
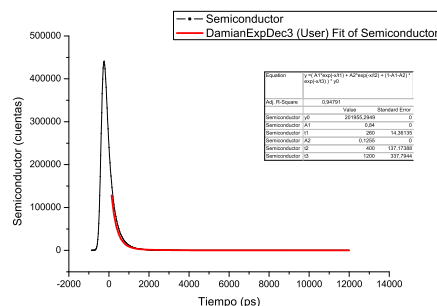
Fig. 3: Ajuste del ^{60}Co .

Fig. 5: Espectro del GaTe.

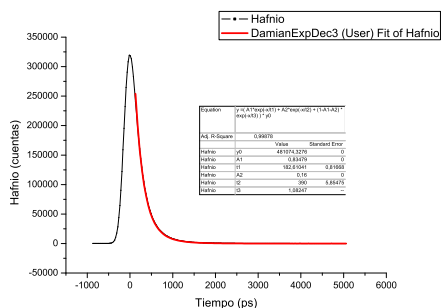


Fig. 4: Espectro del Hf.

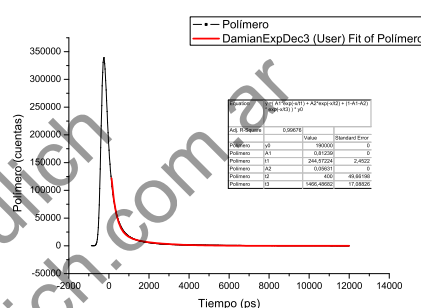


Fig. 6: Espectro del polímero.

Considerando las distintas variantes del modelo de Tao-Eldrup [4, 5, 7, 6, 3], es posible usar $\tau_{\text{espúrea}}$ para inferir el tamaño de los poros en el polímero [3, 4] (se ha utilizado el módulo "Tao-Eldrup calculator" del paquete PASCUAL [3]). Los resultados se muestran en la tabla 2 en la página 5.

4. Conclusiones

La vida media del positrón en el Hf puro sin ningún tipo de defectos es del orden de 170 ps (referencia de la cátedra); el valor obtenido en esta experiencia es consistente con ello. De los resultados se puede ver que un muy bajo porcentaje se aniquila fuera de la muestra y del kapton. Con respecto a la vida media del positrón en el kapton, se puede ver que se aproxima al valor esperado de 386 ps.

El semiconductor posee defectos intrínsecos provenientes del método de preparación. Por lo general posee 2 vidas medias: una del defecto y la otra del material, cuyos valores oscilan entre 200 y 300

ps. Se puede ver que los resultados están dentro de dicho intervalo. Para el caso del kapton, su tiempo de relajación y amplitud caen en el margen de error dentro de los valores esperados.

El polímero es un compuesto orgánico que debido a su estructura en la que hay volúmenes libres posee dos vidas medias diferentes mas una vida media correspondiente a la aniquilación en los huecos que es mayor a 1.5 ns. De acuerdo con las diversas configuraciones de poros, es posible estimar que los mismos tuvieron en la muestra estudiada un tamaño de entre 0.2 y 0.8 nm.

Referencias

- [1] "Uso de la espectroscopía de Aniquilación de Positrones para el Estudio y Caracterización de Materiales". A. Somoza. Uso de técnicas nucleares para la caracterización y estudio de materiales. A. Somoza y A. López García, editores. Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Argentina.

- [2] Positron Lifetime Spectroscopy. <http://www.positronannihilation.net/techniques/Positron%20Lifetime%20Spectroscopy.pdf>
- [3] C. Pascual-Izarra et al., Characterisation of Amphiphile Self-Assembly Materials using Positron Annihilation Lifetime Spectroscopy (PALS)-Part1: Advanced Fitting Algorithms for Data Analysis, Journal of Physical Chemistry B, [in review], 2008.
- [4] Simulation of Positronium: Toward More Realistic Models of Void Spaces in Materials. A.L.R. Bug, T.W. Cronin, P.A. Sterne, Z.S. Wolfson. 8th International Workshop on Positron and Positronium Chemistry (PPC8) Coimbra, Portugal September 4, 2005 through September 9, 2005. <https://e-reports-ext.llnl.gov/pdf/324038.pdf>
- [5] Positronium as a probe of small free volumes. Tomasz Goworek. Journal of nuclear and Radiochemical Sciences, Vol. 1, No. 1, pp. 11-13, 2000.
- [6] Verifying the RTE model: ortho-positronium lifetime measurement on controlled pore glasses. S. Thraenert, E. M. Hassan, D. Enke, R. Krause-Rehberg. Phys. stat. sol. (c) 4, No. 10, 3819–3822 (2007).
- [7] Characterizing porosity in nanoporous thin films using positronium annihilation lifetime spectroscopy. J. N. Sun, Y. F. Hu, W. E. Frieze and D. W. Gidley. Radiation Physics and Chemistry Volume 68, Issues 3-4, October-November 2003, Pages 345-349. Proceedings of the 7th International Conference on Positron and Positronium Chemistry.

	Hf	GaTe	Polímero
Amplitud muestra	0.83	0.84	0.81
τ_{muestra} [ps]	182.6±0.8	260±14	245±2
Amplitud kapton	0.16	0.1255	0.056
τ_{kapton} [ps]	390±6	400±100	400±50
Amplitud espúrea	0.01	0.0345	0.134
$\tau_{\text{espúrea}}$ [ps]	1.08±0.02	1200±338	1466±17

Tab. 1: Resultado de los ajustes.

Geometría	Tamaño del poro [nm]	Tamaño del poro † [nm]
Esfera (TE)	0.230277	0.395877
Esfera equivalente (RTE)	0.264951*	0.430551*
Cubo	0.481103*	0.861103*
Canal cuadrado	0.373173	0.753173*
Plano	0.22321*	0.60321*

Tab. 2: Tamaños de poros en el polímero para $\tau_{\text{espúrea}}=1466$ ps. Los valores indicados con * son para una temperatura de 20°C. † considerando potenciales de paredes de poro “blandas” [3].