

Tecnologías Cuánticas para Fotometría

Joaquín Campos, Alejandro Ferrero, José Luis
Velázquez, Néstor Tejedor y Pablo Santafé-Gabarda

Principios Cuánticos para Fotometría

Joaquín Campos, Alejandro Ferrero, José Luis
Velázquez, Néstor Tejedor y Pablo Santafé-Gabarda

Contenido

1. Introducción
2. Principios cuánticos en la medida de radiación óptica.
 - 2.1. Eficiencia cuántica interna de fotodiodos.
 - 2.2. Detectores cuánticos eficientes predecibles (PQED).
3. Fuentes de un único fotón (mono-fotónicas).
4. Curva de eficiencia luminosa.
5. Conclusiones.

Introducción

“Principles Governing Photometry”

$$I_v = K_{cd} \int_0^{\infty} I_{e,\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda$$

Determinar la magnitud fotométrica es integrar espectralmente el contenido energético de la radiación en cuestión y las pertinentes magnitudes geométricas

Introducción

“Mise en pratique for the definition of the candela and associated derived units for photometric and radiometric quantities in the SI”.

Contenido energético.

Número de fotones:

$$I_v = K_p \int_0^\infty I_p(\lambda) \frac{n_a(\lambda)V(\lambda)}{\lambda} d\lambda \quad K_p = K_{cd} hc$$

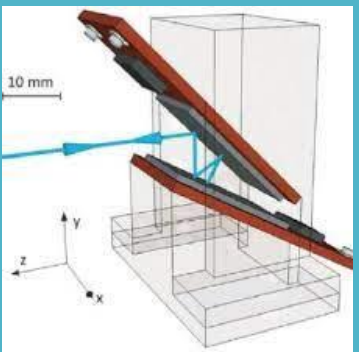
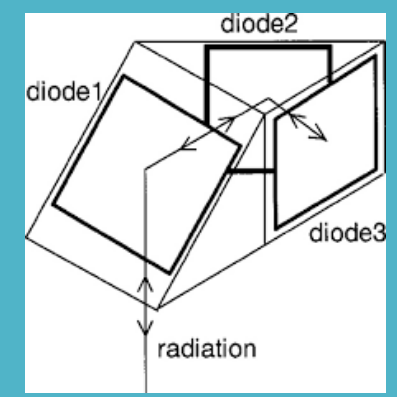
PRINCIPIOS CUÁNTICOS EN LA MEDIDA ENERGÉTICA DE LA RADIACIÓN ÓPTICA

Efecto fotoeléctrico interno en semiconductores

$$R(\lambda) = [1 - \rho(\lambda)] \cdot \eta(\lambda) \cdot \frac{e \cdot \lambda}{h \cdot c}$$

Primer intento en los años 80: conocer efectos físicos que evitan que $e. c. i. < 1$ en un fotodiodo y modelar espectralmente (Self-calibration of Si photodiodes, radiómetros QED).

Segundo intento siglo XXI: diseñar y construir un fotodiodo con $e. c. i. = 1$ (radiómetros PQED).



Radiómetro	Incertidumbre relativa
RCSE	1e-5
PQED (T. ambiente)	1e-4
PQED (T. criogénica)	1e-6

FUENTES DE UN ÚNICO FOTÓN (MONO-FOTÓNICAS)

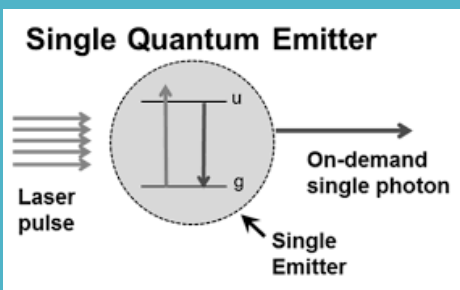
Fuente (perfecta) que nunca emite dos o más fotones simultáneamente.

Fuentes Fotones únicos:

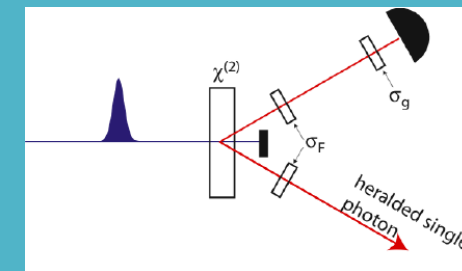
Fuentes deterministas mono-fotónicas: producidos por átomos individuales, iones, moléculas, centros de color y puntos cuánticos. Se excitan y emiten.

Fuentes mono-fotónicas probabilísticas/heráldicas: pares de fotones únicos mediante un proceso no lineal, cada uno se emite en una dirección

Una fuente mono-fotónica perfecta emitiría $\Phi = f h c/\lambda$ (f , la frecuencia de emisión de fotones).



$$I_v = K_p \int_0^\infty I_p(\lambda) \frac{n_a(\lambda)V(\lambda)}{\lambda} d\lambda$$



FUENTES DE UN ÚNICO FOTÓN (MONO-FOTÓNICAS)

$$\Phi = f h c/\lambda$$

Magnitud	Incertidumbre relativa
Frecuencia repetición	1e-17
Longitud de onda	1e-12

¡Reducción notable de la incertidumbre de medición del flujo!

(Estamos lejos de fuentes perfectas. 4e-2)

Estado del arte

Tipo de fuente	Centro de impureza en nano-diamante	Molécula individual	Punto cuántico semiconductor
Emisor	NV	DBT:Ac	InGaAs
N_{ph} (fotones/s)	2.6×10^5	1.32×10^6	2.55×10^6
$\Delta\lambda$	≈ 100 nm	< 0.2 nm	< 42 pm
$N_{ph,\lambda}(\lambda)$ (fotones/(nm s))	≈ 1100 (@ ≈ 685 nm)	1.32×10^6 (@ 785.6 nm)	2.55×10^6 (@ 929.8 nm)
$g^{(2)}(\tau=0)$	0.23	0.08	0.24
T / K	Temperatura ambiente	3	10

CURVA DE EFICIENCIA LUMINOSA

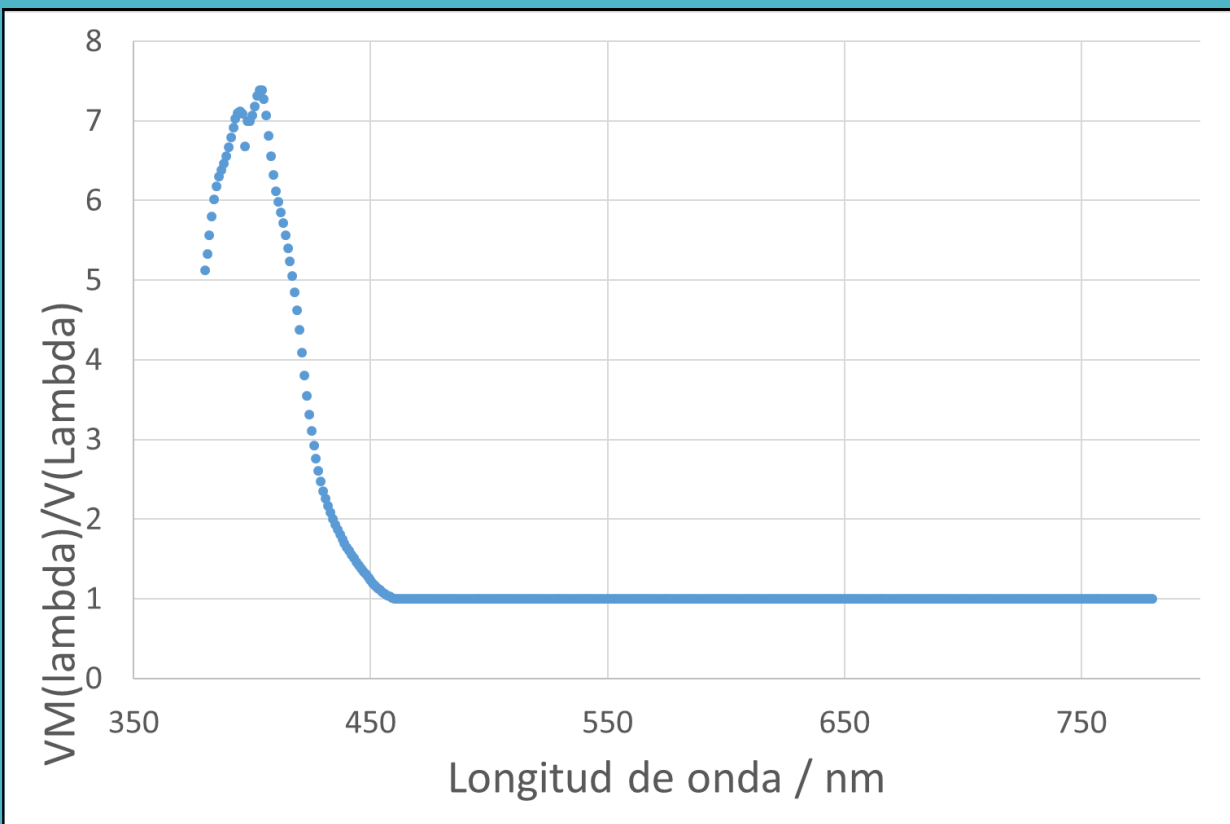


Figura 1. Relación entre la curva de eficiencia luminosa modificada y la curva de eficiencia luminosa.

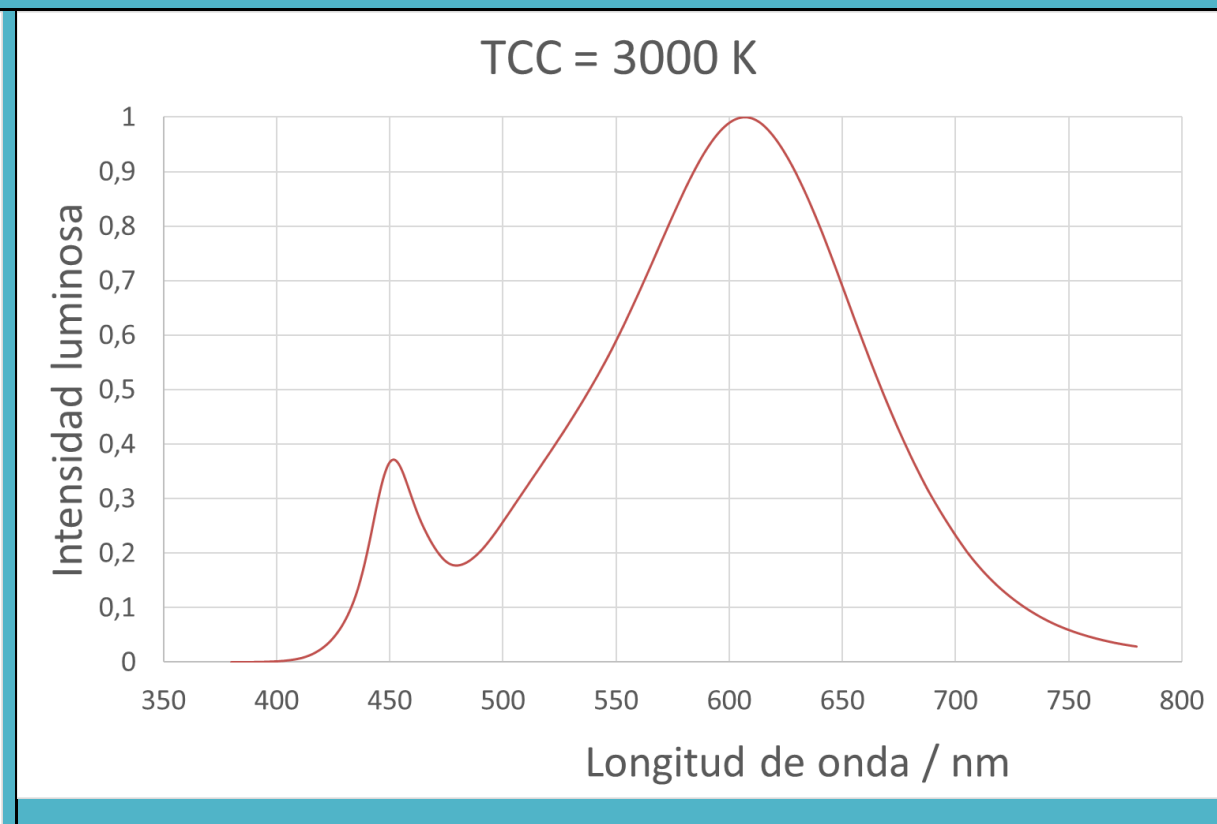


Figura 2. Distribución espectral típica de una fuente LED de temperatura de color correlacionada igual a 3000 K

CONCLUSIONES

Principios de la física cuántica han dado lugar a radiómetros absolutos (PQED) con una incertidumbre estimada comparable a la de los radiómetros criogénicos de sustitución eléctrica, pero con un equipamiento mucho más simple.

Se están desarrollando fuentes mono-fotónicas que podrían usarse como emisores patrones primarios absolutos, dando lugar a una nueva forma de realización de la candela.

Esas mismas fuentes mono-fotónicas podrían ser una herramienta muy útil para una nueva determinación de la curva de eficiencia luminosa del observador humano.