FICHA TECNICA

PRINCIPIOS DE FOTOMETRIA

Instrumentos de Medición (Parte II)

Lic. RICARDO A. ARIZAGA

Laboratorio de Investigaciones Sensoriales — CONICET
C.C. 53 -Suc. 53- Buenos Aires

FOTOMETROS FISICOS

Se deisgna con este nombre a todo instrumento que utiliza como detector algún elemento fotosensible. Este tipo de detectores transforman la luz en electricidad, transformación que puede realizarse directamente o indirectamente a través de una doble transformación, de energía luminosa a térmica y de térmica a eléctrica.

Los que realizan la transformación directamente se denominan detectores fotoeléctricos, los que lo hacen indirectamente termoeléctricos. A continuación se analizan cada uno de ellos.

Detectores fotoeléctricos

En esta clase de detectores la radiación incidente hace que se produzcan efectos eléctricos que pueden ser medidos fácilmente con un instrumento adecuado. Según el tipo de efecto eléctrico producido podemos distinguir tres tipo: **células fotoconductivas; células fotovoltaicas** y **células fotoemisivas.**

En las **células fotoconductivas** la conductancia (o resistencia) depende del flujo luminoso que incide sobre ellas. La medición se realiza aplicando una diferencia de potencial a la célula, estando el valor de la corriente que circula en el circuito relacionado con la iluminación recibida. Esos tipos de células son altamente sensibles a cambios en el flujo luminoso incidente, y esta sensibilidad depende del tamaño de la superficie iluminada y de la tensión aplicada a la célula. Sin embargo no son útiles para mediciones de precisión dado que su respuesta es altamente alineal con respecto al flujo incidente. Otro inconveniente es que presentan pronunciados efectos de fatiga y son lentas para producir una respuesta estable. Las mismas se utilizan no propiamente en el campo de la fotometría, sino como simples detectores de señal donde se requiera determinar presencia o ausencia de una determinada cantidad de luz, es decir, se las utiliza como accesorio a otro tipo de aparato mecánico, electrónico, etc.

En las **células fotovoltaicas**, llamadas también de capa-barrera, la energía luminosa incidente causa el pasaje de electrones a través de la superficie de contacto entre un conductor y un semiconductor; la célula actúa entonces como un generador de fuerza electromotriz que es capaz de forzar esta corriente a través de un circuito externo de baja resistencia. El valor de la iluminación está dado por la corriente que circula, ya que ésta es proporcional al flujo luminoso incidente.

La respuesta espectral de una célula fotovoltaica depende del tipo de semiconductor utilizado en su fabricación; las de selenio, que son las mas comunes, presentan una respuesta espectral con las características de la curva a de la figura 1. Si se la desea utilizar como elemento detector de un instrumento fotoeléctrico es necesario corregir esta respuesta de manera que se asemeje lo mas posible a la curva de sensibilidad espectral relativa del observador normal CIE 1924 ($V\lambda$). Esto se realiza mediante el uso de filtros de color adecuados. La figura 1 muestra cómo, mediante la corrección de color, la respuesta de la célula se acerca a la $V\lambda$ lo suficiente como para considerarlas coincidentes. En el caso que se las utilice para comparar fuentes luminosas con igual distribución espectral, se hace innecesario el uso de la correción de color. Otro punto que es importante tener en cuenta, en una célula fotovoltaica es el ángulo de incidencia de la luz, si ésta llega formando un ángulo lo suficientemente grande, parte es reflejada por la superficie fotosensible o por la cubierta de vidrio, y esto hace que la lectura pueda llegar a ser hasta un 25% menor que el valor real.

La mayoría de los luxímetros comerciales están provistos de una cubierta difusora u otro medio similar para corregir la respuesta y así aproximarla a su valor verdadero. Si el instrumento no posee corrección y si la iluminación a medir proviene de una única fuente, la componente puede medirse orientando la célula perpendicularmente a la dirección de la luz y multiplicando la lectura por el coseno del ángulo de incidencia (Para ampliar detalles de este problema ver Coutteret, M. E. y Kirschbaum, C. F., 1976).

Este tipo de detector posee la desventaja de ser alineal para altos niveles de iluminación cuando la resistencia del circuito, al cual es conectada, es de valor alto. Por consiguiente para obtener resultados precisos es

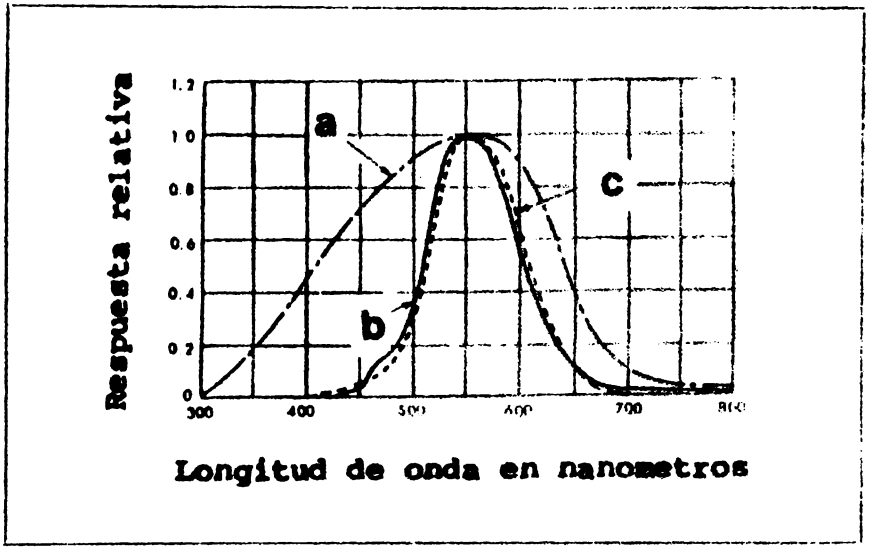

Fig. 1. — Curvas que representan la respuesta espectral de una célula fotovoltaica comparada con la sensibilidad del ojo humano.

A: Célula de selenio no corregida; B: Célula de selenio con corrección de color; C: Sensibilidad espectral relativa del observador normal. CIE 1924 ($V\lambda$).

necesario utilizar un instrumento de medición que posea resistencia externa nula.

Algunos de los luxímetros que se usan actualmente consisten en una célula fotovoltaica conectada a un amperímetro calibrado directamente en lux (o foot-candle). Otros tipos más elaborados utilizan amplificadores operacionales para amplificar la señal de la célula fotovoltaica, que permiten, reduciendo a cero la diferencia de potencial en la célula, obtener condiciones favorables para que la relación entre la respuesta de la célula y la luz incidente sea estrictamente lineal.

Las células fotoemisivas consisten en dos electrodos dentro de un tubo al vacío o con un gas inerte, sobre los cuales hay aplicada una diferencia de potencial. Al incidir luz sobre el electrodo negativo (cátodo) se produce una emisión de electrones por efecto fotoeléctrico; estos fotoelectrones son captados por el electrodo positivo, generándose de esta manera una corriente que está relacionada con la intensidad de la luz incidente.

En ciertas células fotoemisivas los fotoelectrones primarios golpean contra una segunda superficie causando la emisión de electrones secundarios para dar una corriente final amplificada. Estas células son comúnmente llamadas de emisión secundaria, o si la corriente es amplificada en varias etapas se los denomina fotomultiplicadores.

Las células fotoemisivas en tubos de vacío, especialmente los fotomultiplicadores, son utilizados exclusivamente en fotometría de alta precisión, mientras que las de gas, aunque son más sensibles que las de vacío, tienen la desventaja de que su sensibilidad es afectada fuertemente por pequeños cambios en la presión del gas y por fluctuaciones en la tensión aplicada.

La estabilidad de las células fotoemisivas es muy alta durante largos períodos mientras se tenga el cuidado de no sobrecargarla y así evitar que circule una fotocorriente excesivamente alta. La linealidad es lo que más caracteriza a las células fotoemisivas y hace que se las utilice para mediciones de alta precisión. La relación entre la fotocorriente y la iluminancia puede apartarse de la linealidad apenas en 1 por 10.000 sobre un rango de luminancia de 1 a 10. La respuesta espectral está directamente relacionada con el tipo de material que recubre el cátodo. Los más comunes utilizan cesio sobre antimonio, dando una respuesta que decrece abruptamente hacia la zona de longitud de onda altas. Debido a que su sensibilidad es relativamente alta a lo largo de todo el espectro visible, los cátodos llamados triálcali (Cs-Sb-Na-K) resultan más útiles para aplicaciones fotométricas ya que es menos dificultosa la corrección de color mediante filtros. A diferencia de las células fotovoltaicas o fotoconductivas, que por requerir una fuente de tensión de unos pocos volts y por ser menos delicadas se aplican a fotómetros de tipo portátil, los detectores fotoemisivos, especialmente los fotomultiplicadores son utilizados en fotómetros de tamaño relativamente grande. Esto se debe a que requieren un montaje mas elaborado y también necesitan ser alimentados por fuentes reguladas de tensión de voltajes mayores.

Detectores termoeléctricos

Los **detectores termoeléctricos,** tales como los termocuplas, termopilas o bolómetros, convierten energía térmica en energía eléctrica. En el caso de las termopilas o termocuplas esta transformación se realiza haciendo uso del efecto termoeléctrico o de "Peltier"; básicamente consisten en un circuito eléctrico formado por dos materiales distintos (alambre, cintas de metal o semiconductores) donde una de las uniones es ennegrecida para que absorba la mayor cantidad posible de la energía luminosa incidente sobre ellas; la otra unión es apantallada y permanece fría. La corriente generada en el circuito es proporcional a la diferencia de temperatura entre las uniones y provee una medida del flujo radiante. En la termocupla se emplea solo un par de uniones, en cambio en la termopila se utilizan varias termocuplas conectadas en serie con sus uniones ennegrecidas, agrupadas para formar una superficie receptora hacia donde incide el flujo radiante.

Los bolómetros están constituidos por dos cintas angostas de material ennegrecido (platino) que forman dos ramas de un puente de Wheatstone.

Cuando una de las dos cintas es iluminada su resistencia aumenta, debido al aumento de temperatura, proporcionalmente al flujo luminoso recibido.

Lo más importante de los detectores mencionados es que su sensibilidad espectral no depende de la longitud de onda de la radiación incidente siempre que el material con que fueron ennegrecidas las superficies receptoras haya sido convenientemente elegida y depositada. Por esta característica estos detectores son comúnmente utilizados en radiometría y no se los utiliza generalmente en fotometría dado que la superficie fotosensible es muy pequeña y la respuesta que se obtiene de ellos es de muy bajo valor y se hace necesario amplificar la señal con los consiguientes inconvenientes. Además son instrumentos muy delicados que requieren condiciones especiales de funcionamiento, lo que los hace que estos detectores se los utilice en laboratorios altamente especializados.

La reseña dada en los dos últimos artículos correspondientes a la Nota Técnica, si bien no es completa, trata de dar un panorama general de los instrumentos utiliados en fotometría, dando idea de sus ventajas y limitaciones. El cuadro siguiente resume lo anteriormente dicho clasificando los fotómetros de acuerdo a sus características.

FOTOMETROS							
VISUALES			FISICOS				
			FOTOELECTRICOS			TERMOELECTRICOS	
POR IGUALDAD DE BRILLO	POR IGUALDAD DE CONTRASTE	DE PARPADEO	CELULAS FOTO-CONDUCTIVAS	CELULAS FOTO-VOLTAICAS	CELULAS FOTO-EMISIVAS	I	II
BUNSEN BECHSTEIN LUMMER-BRODHUM	LUMMER-BRODHUM BECHSTEIN	BECHSTEIN	Fotoresistencias	Células de selenio. Luxímetros portátiles	Fotocélulas de vacío y de emisión secundaria. Fotomultiplicadores	Termopilas Termocuplas	Bolómetros

TABLA I: Cuadro resumen de clasificación de fotómetros de acuerdo a sus características: I: Detectores basados en el "efecto Peltier". — II: Detectores basados en la variación de la resistencia de un conductor con la temperatura.