

# MEDICIÓN DE LA FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN BIDIRECCIONAL DE TRANSMITANCIA Y LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DE MODULACIÓN PARA MATERIALES DIFUSORES

## ASSESSMENT OF BIDIRECTIONAL TRANSMISSION DISTRIBUTION FUNCTIONS (BTDF) AND THE MODULATION TRANSFERENCE FUNCTION (MTF) FOR DIFFUSIVE MATERIALS

**Corregidor Diego, Jaén Mirta\* y Sandoval José**

Departamento de Luminotecnia, Luz y Visión, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología,  
Universidad Nacional de Tucumán. Av. Independencia 1800- San Miguel de Tucumán.  
[majen@herrera.unt.edu.ar](mailto:majen@herrera.unt.edu.ar)

Las mediciones tradicionales de transmitancia resultan insuficientes para caracterizar ópticamente el comportamiento de materiales difusores en diferentes aplicaciones. En este trabajo se describe, por una parte, la implementación de un sistema de medición de la función de distribución bidireccional de transmitancia (BTDF), que en este caso se identifica con la función de punto extendido (PSF), de diferentes muestras de materiales difusores y por otra, un dispositivo que permite evaluar la función de transferencia de modulación (MTF) de esos mismos materiales, que permite caracterizarlos ópticamente y analizar comparativamente ambos métodos. Para determinar la BTDF (o PSF), se ha montado un dispositivo óptico con una fuente láser de HeNe y un fotodiodo. Se han medido distintos tipos de filtros fotográficos sobre acetato y vidrio, con diferentes transmitancias y se han comparado los resultados. Utilizando luz blanca difusa y patrones de franjas de distintas frecuencias espaciales, de referencia, se ha medido la MTF para las mismas muestras. Las transformadas de Fourier de las funciones BTDF obtenidas pueden compararse directamente con las MTF medidas para cada material. Se analizan comparativamente los resultados con los ajustes correspondientes y se propone la inversa del valor del área bajo la curva MTF como parámetro que caracteriza en forma adecuada las propiedades de difusión de las muestras medidas, y que podría utilizarse con fines prácticos. Las metodologías utilizadas muestran buen acuerdo entre ellas y con las mediciones tradicionales por lo que sería factible aplicarlas en la caracterización óptica de materiales con aplicaciones en tecnologías de alimentos, en problemas de percepción visual y otras.

Palabras Claves: materiales difusores- scattering de la luz - función de distribución bidireccional de transmitancia - función de transferencia de modulación – frecuencia espacial.

Traditional transmittance measurements are insufficient to optically characterise the behaviour of diffusers in different applications. This work describes a system designed to measure bidirectional distribution functions of transmittance (BTDF) of diffusive material samples. A device suitable to evaluate the modulation transference function (MTF) of those samples, allowing us to characterise them from the optical point of view is as well described. Both devices and the corresponding measure methodologies are comparatively analysed. To determine BTDF, an experimental setup consisting of an HeNe laser as a source and a photodiode as a detector was mounted. Different photographic filters (acetate and glass based) was measured with it and the results were compared. The MTFs of the samples were determined employing diffuse white light and reflectance standards of different spatial frequencies. The Fourier transforms of obtained BTDFs could be compared directly with the corresponding MTFs measured for each material. The results together with the corresponding fittings were analysed, and the area under the MTF curve was proposed as a parameter to adequately characterise the diffusing properties of the considered materials. The methodologies employed in this work show a good agreement between them and with previous results coming from traditional measurements, making the proposal applicable to the optical characterisation of materials in different activities like food technology, visual inspection and so.

Key Word: diffusive materials, light scattering, bidirectional transmittance distribution function, reflectance, modulation transference function, spatial frequency.

## I. INTRODUCCIÓN

Los medios difusores abarcan la gran mayoría de los materiales inorgánicos y biológicos con que nos encontramos en el medio ambiente natural y construido. En general los materiales no son ni reflectores ni difusores perfectos de la luz. Las mediciones tradicionales de transmitancia resultan insuficientes para caracterizar ópticamente el comportamiento de materiales difusores en diferentes aplicaciones. Entonces es necesario considerar la combinación de los procesos reales de reflexión y difusión de la luz en cada superficie y en cada medio que ésta atraviesa.

Existe gran cantidad de bibliografía sobre este tema pero también debe decirse que es muy diversa <sup>(1-6)</sup>. Las metodologías disponibles han evolucionado mucho y los dispositivos experimentales responden a cada aplicación concreta. En este caso, es de nuestro interés caracterizar las propiedades espaciales de transmisión y reflexión de materiales difusores translúcidos planos y volumétricos, constituidos por partículas pequeñas y aleatoriamente distribuidas. Esto lo podemos hacer mediante la determinación de la función de distribución bidireccional de reflectancia o de transmitancia (BRDF ó BTDF).

Luego, intentamos comparar estos resultados con los que se obtienen a partir de la medición de la función de transferencia de modulación (MFT), que en ciertas situaciones es de mucho más fácil implementación <sup>(2,3)</sup>. Cuando un flujo luminoso incide sobre un material que presenta difusión, la reflexión y la transmisión serán también difusas. Existe una distribución espacial de la energía reflejada y transmitida que podemos describir en general, con la función de distribución bidireccional de difusión (BSDF por sus siglas en inglés). Suponiendo que el haz incidente tiene sección transversal de corte uniforme, el área iluminada es isotrópica y la luz es difundida únicamente en la superficie, la BSDF puede definirse en términos radiométricos como la radiancia de la superficie difusora respecto a la irradiancia incidente en esa superficie <sup>(1)</sup>.

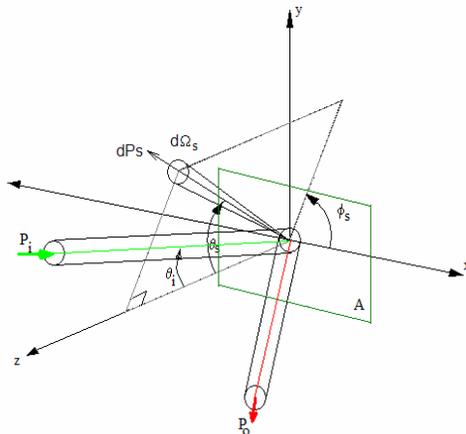


Figura 1. Configuración geométrica y definiciones básicas.

Entonces BSDF será:

$$BSDF = \frac{dP_s / d\Omega_s}{P_i \cos \theta_s} = \frac{P_s / \Omega_s}{P_i \cos \theta_s} \quad (1)$$

Donde la radiancia de la superficie difusora puede calcularse como el flujo de luz dispersada a través del ángulo sólido  $\Omega_s$  por unidad de área de la superficie iluminada y por unidad de ángulo sólido proyectado (que se calcula como el ángulo sólido multiplicado por el  $\cos \theta_s$ ). La irradiancia en la superficie se calcula como el flujo de luz incidente por unidad de área de la superficie iluminada (fig. 1).

Las suposiciones hechas en la derivación de (1) no son totalmente ciertas en una medición real. Un haz láser, por ejemplo, tiene una sección de corte gaussiana y no uniforme, y tampoco es cierto que un difusor sea estrictamente superficial, sobre todo en el caso de una muestra transparente o translúcida, en donde hay dos superficies y un volumen intermedio que aportan a la luz difundida. De todas maneras, en la práctica se utiliza la expresión (1) más como un parámetro útil que caracteriza la difusión medida que como la definición radiométrica precisa de la cual deriva históricamente <sup>(1)</sup>.

En muestras semitransparentes o transparentes se puede utilizar la función de punto extendido (PSF) <sup>(7)</sup>, que representa el perfil de la imagen de una fuente puntual luego de atravesar la muestra (fig.2), para describir la distribución espacial de la luz difundida (BSDF) por la muestra. Para muestras planas semitransparentes, puede considerarse que la PSF del sistema representa directamente la BSDF para este material.

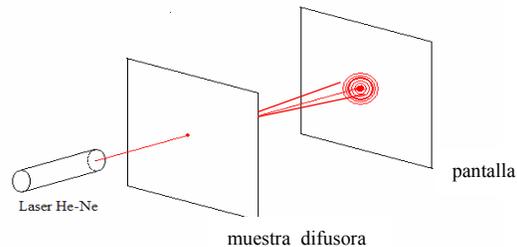


Figura 2. Vista esquemática de un dispositivo óptico que permite visualizar la función de punto extendido (PSF).

Desde el punto de vista psicofísico, un difusor en el camino óptico, entre un objeto y el ojo (detector) causa una pérdida de contraste en las distintas frecuencias espaciales que forman la imagen que llega a la retina del observador. Esta analogía es usada generalmente para analizar la pérdida de calidad de las imágenes transmitidas en un medio turbio <sup>(2-4)</sup>. Usando la aproximación de sistemas lineales, se puede caracterizar el efecto óptico del difusor mediante la función de transferencia de modulación (MTF) que representa cómo

el sistema óptico afecta la transmisión de cada frecuencia espacial del objeto (fig.3) <sup>(7)</sup>.

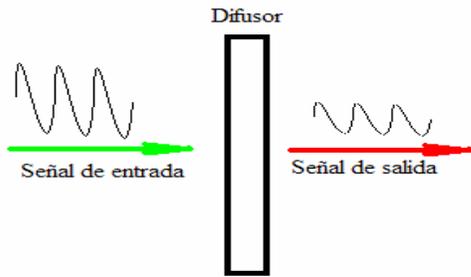


Figura 3. Efecto de un medio difusor a una señal de entrada (radiación óptica, en este caso) que se mide como la Función de transferencia de modulación (MTF) (esquemático).

## 2. DISPOSITIVOS EXPERIMENTALES

En esta primera etapa se midieron un conjunto de muestras difusoras de material semitransparente disponibles comercialmente: filtros de iluminación plásticos (marca comercial ROSCO) y un filtro de fotografía (TIFFEM BPM2 de vidrio). El interés de incluir este último filtro radica en la posibilidad de utilizarlo luego en la modelización de la difusión intraocular generada en un ojo con cataratas .

Las dos metodologías a usar son: A) la medición de la PSF; B) la determinación de la MTF, para cada difusor.

**Dispositivo A:** El diseño típico de un escatómetro permite medir la intensidad de luz dispersada en cada dirección como función del ángulo que forma con la dirección de propagación del haz incidente <sup>(1)</sup> (fig. 4). Se ha utilizado como fuente un laser HeNe de 5mW y como sensor un fotodiodo Spindler & Hoyer tipo E2V. Con un filtro neutro y dos polarizadores se regula la intensidad máxima que se aplicará a la muestra.

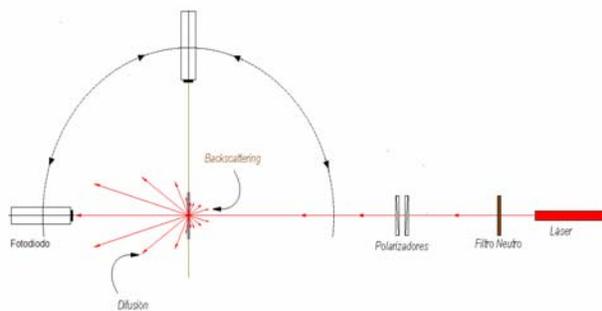


Figura 4. Dispositivo experimental para determinar la PSF (o la BSDF) de las muestras de material difusor. La fuente es láser (HeNe - 5 mw) y el detector es un fotodiodo (Spindler & Hoyer-tipo E2V).

El sistema óptico desarrollado en nuestro laboratorio, permite posicionar el sensor sobre un plano horizontal, perpendicular a la muestra, desde 0° a 180° respecto al eje óptico del sistema y se realizaron mediciones cada 2°.

**Dispositivo B:** Se utiliza una fuente de luz blanca, con artefacto y óptica colimadora para iluminar un patrón de franjas de perfil rectangular, delante de cual se colocan las muestras difusoras. Se registran las imágenes con y sin difusores con una CCD (Dupont IK557), las que luego se procesan para determinar la MTF (fig. 5) <sup>(2,3)</sup>.

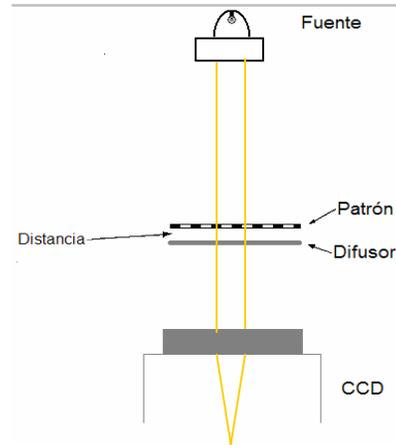


Figura 5. Arreglo experimental para determinar la MTF del difusor.

## 3. RESULTADOS

La figura 6 muestra los resultados obtenidos para los distintos difusores medidos con el Dispositivo A. Los valores medidos de la PSF o BSDF en función del ángulo confirman que los filtros más difusores (3009, 3008 y 3028) son los que presentan mayores valores de energía dispersada para ángulos grandes (mayores que 10°), mientras que el filtro BPM2 prácticamente no difunde más allá de los 10° (fig. 6).

Por otra parte, los datos obtenidos con el dispositivo B (medición de la MTF) se muestran en la fig. 7, donde se observa que los filtros, más dispersores según el primer método, son los que más atenúan el contraste para frecuencias espaciales altas. De hecho, los filtros R3028, R3009 y R3008 muestran valores prácticamente nulos para la MTF a frecuencias espaciales iguales o mayores a 1,0 grad<sup>-1</sup>, mientras que los filtros 3040 y 3020 presentan niveles significativos para estas mismas frecuencias.

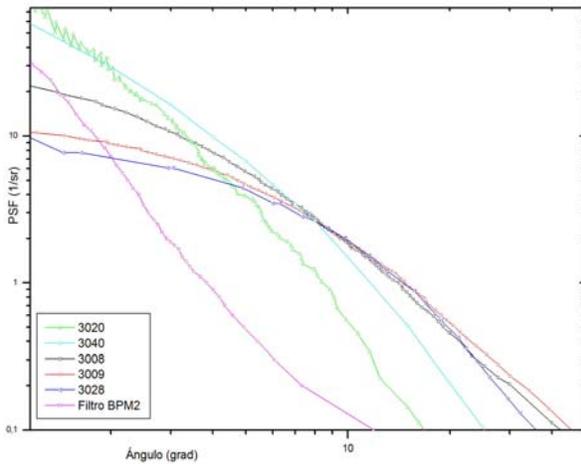


Figura 6. Valores de la función PSF en función del ángulo para distintos difusores, medida con el dispositivo A. Los filtros más difusores (3008, 3009 y 3028) presentan mayores valores de energía dispersada en ángulos grandes (mayores que 10°), mientras que el filtro BPM2 prácticamente no difunde más allá de los 10°.

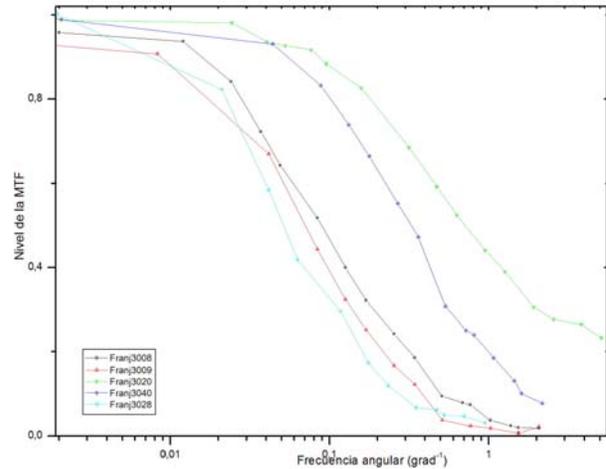


Figura 8. MTF calculada a partir de la transformada de Fourier de las PSF correspondientes (figura 6), en función de la frecuencia espacial (angular) del estímulo, para los distintos difusores.

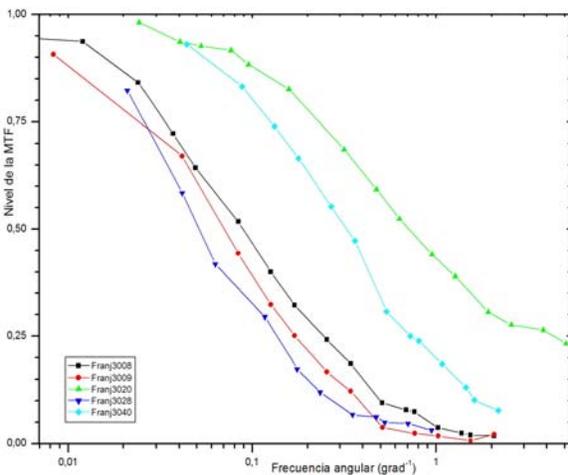


Figura 7. Valores de la MTF en función de la frecuencia angular del estímulo, para distintos difusores, medida con el dispositivo B. Los filtros R3028, R3009 y R3008 muestran valores prácticamente nulos para la MTF a frecuencias espaciales iguales o mayores a 1,0 grad<sup>-1</sup>, mientras que los filtros 3040 y 3020 presentan niveles significativos para estas mismas frecuencias.

En ella pueden observarse que las curvas obtenidas con los dos métodos tienen buena correspondencia. Se observa claramente que los filtros medidos aparecen ordenados desde los muy “difusores” (R3028, R3009 y R3008) con valores casi nulos de MTF a frecuencias espaciales de 1 grad<sup>-1</sup> hasta los más “débiles” (R3040, R3020), con valores de MTF mayores a 0,2 para esa misma frecuencia.

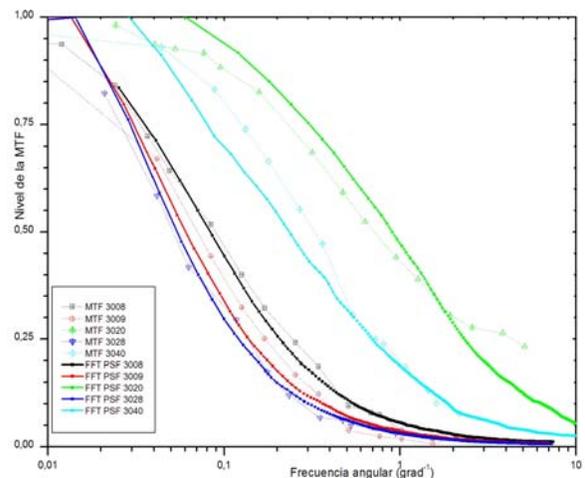


Figura 9. MTF en función de la frecuencia espacial (angular) del estímulo, medida con el dispositivo B y calculada como la FFT de las PSF correspondientes (figura 6), para los distintos difusores.

Para poder comparar los resultados de ambos métodos, se calculó la transformada de Fourier (transformada rápida de Fourier- FFT)<sup>(8)</sup> de las PSF medidas con el primer dispositivo, cuyos resultados se muestran en la fig. 8.

El comportamiento óptico del conjunto de difusores, analizados con los dos procedimientos descriptos, se muestra en la fig. 9.

Realizando el ajuste de una curva tipo logist (ec. 2) a los valores experimentales obtenidos y omitiendo los valores de las asíntotas que en todos los casos resultan coincidentes en A1=1,00 y A2= 0,00 dentro de un 1% de precisión, se puede particularizar la ec.2 para nuestro problema.

$$y = A_2 + \frac{(A_1 - A_2)}{1 + \left(\frac{x}{x_0}\right)^p} \quad (2)$$

Podemos expresar así, en buena aproximación, la MFT en función de la frecuencia como:

$$MTF = \frac{1}{1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^p} \quad (3)$$

Donde  $f_0$  es la frecuencia correspondiente a la altura mitad de la gráfica (MTF=0,5) y el valor de  $p$  determina la pendiente de la curva en ese punto. Estos parámetros se detallan en la tabla 1, para cada muestra medida.

Tabla 1. Parámetros:  $f_0$  y  $p$ , de las curvas (ec 3) de ajuste a los valores experimentales representados en la fig.9. Se indican los valores correspondientes a cada muestra y a cada método usado.

Difusor	FFT-PSF		MTF	
	$f_0$	$p$	$f_0$	$p$
3028	0,0576	1,407	0,0532	1,441
3009	0,0633	1,353	0,0727	1,220
3008	0,0832	1,210	0,0886	1,182
3040	0,2430	1,098	0,3117	1,265
3020	0,8905	1,137	0,7492	0,955

En la tabla 1 puede verse también, que los parámetros de ajuste calculados para cada difusor por los dos métodos no difieren apreciablemente y que el valor creciente de  $f_0$  se corresponde con el ordenamiento de las muestras desde “más a menos difusoras”. Sin embargo la pendiente de las curvas no se corresponde tan bien con este ordenamiento. Es por ello que sugerimos introducir el área bajo la curva como parámetro que tenga en cuenta estas dos propiedades del filtro y que puede ser útil para caracterizar el comportamiento de estos materiales respecto a la difusión.

Se calcularon las áreas correspondientes a las curvas de la figura 9, para cada muestra, obteniéndose los valores que se muestran en la Tabla II. En esta tabla se incluyen además, otros parámetros típicos de caracterización de los difusores, que se encuentran comúnmente en la bibliografía, tales como la transmitancia (T) y la emisión medida a  $10^\circ$  ( $S_{10}$ )<sup>(5,6)</sup>, para referencia y comparación. Con el parámetro  $S_{10}$  hay una

correspondencia razonable, como era de esperar, no así con los valores de transmitancia que no tienen en cuenta la distribución de la luz difundida sino el valor global integral de ésta<sup>(1,7)</sup>.

Tabla II. Valores del Área bajo la curva MTF ( y su inversa 1/A) para los difusores medidos y ordenados desde los más a los menos difusores. Se indican también como referencia, los valores medidos de transmitancia (T) y de energía difundida a los  $10^\circ$  ( $S_{10}$ ) como referencia.

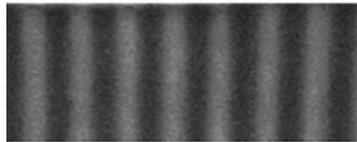
Difusor	Area	1/Area	T	$S_{10}$
R 3028	0,1959	5,104	75,7	197
R 3009	0,2200	4,546	64,3	190
R 3008	0,3137	3,188	68,1	187
R 3040	0,4701	2,127	84,5	114
R 3020	1,0666	0,938	87,7	54,5
T BPM 2	1,2793	0,781	66,4	15,7

#### 4. CONCLUSIONES.

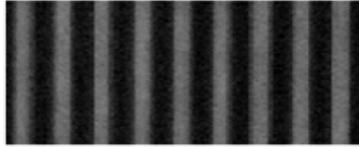
En el presente trabajo hemos mostrado que es posible caracterizar ópticamente un difusor translúcido midiendo la PSF o bien midiendo la MTF de una muestra del material, con similar precisión. Siendo este último método más sencillo de implementar, en muchos casos puede resultar de gran utilidad práctica.

Proponemos además el valor del área bajo la curva MTF como parámetro numérico que caracteriza en forma adecuada las propiedades de difusión de las muestras medidas, y que podría utilizarse con fines prácticos, tal como se ejemplifica en la fig. 10. En ella se muestran las imágenes del patrón de franjas de referencia visto a través de los distintos difusores y los valores del parámetro (1/A) propuesto, en cada caso. Las metodologías utilizadas muestran buen acuerdo entre ellas y con las mediciones tradicionales por lo que creemos sería factible aplicarlas en la caracterización óptica de materiales de interés en tecnologías de alimentos, en percepción visual y otras.

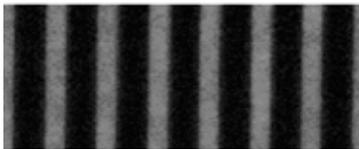
En la continuación de este trabajo se llevará a cabo la aplicación de la metodología descripta a otros tipos de difusores, volumétricos, por ejemplo, y un análisis más detallado de los errores involucrados en los dos métodos, de modo de agregar elementos de comparación.



R3028 -  $1/A = 5,10$



R3040 -  $1/A = 2,19$



R3020 -  $1/A = 0,937$

*Figura10. Imágenes del patrón de franjas de referencia visto a través de los distintos difusores y los valores del parámetro  $1/A$  propuesto, en cada caso.*

## 5. REFERENCIAS

1. Stover J. C. "Optical Scattering, Measurement and Analysis". McGraw-Hill, Inc. NY, USA. (1995).
2. Dumont E. CIE 24<sup>th</sup> Session Proceedings vol I, 196-200, Warsaw'99 (1999).
3. Nameda N. Lighting Research & Technology, 24(2), 103-106, (1992).
4. Bierman A., Raffucci J., Boyce P.R., Decusatis C. Lighting Research & Technology, 28(4), 177-188, (1996).
5. De Wit G. C. and Coppens J.E. Optometric Vision Science 80:395-400 (2003).
6. De Wit G. C., Franssen L., Van der Berg T. and Coppens J.E. Journal of Cataract Refractive Surgery - Vol 32, 294-300 (2006).
7. Heavens O. S., Ditchburn R. W. "Insight into Optics". Wiley & Sons. UK. (1991).
8. Jain A. K. "Fundamentals of digital image processing". Prentice- Hall International Editions, USA. (1989)