

Empleo del método matricial en el curso de óptica:

Capas delgadas antirreflectantes

(Use of matrix method in optics: antireflective thin films)

J. Fuentes Betancourt¹, A. Pérez Perdomo, O. Calzadilla Amaya y O. Hidalgo Alonso

Taller de Enseñanza de la Física Universitaria, Universidad de La Habana, Habana, Cuba

Recibido em 16/2/2005; Aceito em 23/8/2005

Se expone una experiencia didáctica, en el tratamiento de las láminas delgadas dentro del curso de óptica de la Licenciatura en Física. Se busca incrementar el papel del estudiante en el proceso de enseñanza aprendizaje. Se retoman los conocimientos adquiridos en álgebra lineal, computación y óptica. Se utiliza el método matricial para analizar y estudiar el comportamiento de la reflectancia de la radiación luminosa al incidir sobre una lámina multicapa. Tal estructura es importante, por cuanto constituye el modelo de un sistema físico de amplio empleo: las celdas solares. Se concluye que la integración de conocimientos, el empleo de las técnicas de computación y su aplicación a un objeto de estudio nuevo, así como la discusión grupal incrementan la motivación y participación del estudiante en la solución del problema.

Palabras clave: interferencia, lámina delgada, estructuras multicapas, reflectancia, método matricial.

A didactic experience has been proposed in the treatment of thin layers as part of the optics course of the Degree in Physics. It is oriented for increasing students role in the process of teaching-learning. Linear algebra, computation and optics contents are reintroduced through the matrix method for analysing and studying light reflection on multilayers, a model of the widely employed physical system like solar cells. It is concluded that by integrating the knowledge acquired, computing techniques and their application to a previously unknown study subject, could result in increased motivation due to group debate and participation of students for solving the problem.

Keywords: interference, thin layer, multilayer structure, reflectance, matrix method.

1. Introducción

Los Planes de Estudio de la Carrera de Física de la Universidad de La Habana y los programas de las disciplinas que los han conformado han tenido, en sucesivos perfeccionamientos como hilo conductor, los siguientes principios: vinculación de la teoría con la práctica; integración de conocimientos e incremento de la creatividad en el trabajo científico de los estudiantes.

En la fundamentación y los objetivos de la disciplina de Física General [1] se llama la atención de los docentes sobre “la necesidad de desarrollar la creatividad”..al aprovechar “situaciones que requieren de la integración de los conocimientos adquiridos”.. y “también la discusión colectiva de situaciones nuevas, tales como problemas de la vida real que no tienen solución exacta o única...”.

El Plan de Estudios contempla, a partir del segundo semestre un curso de álgebra lineal y dos de computación. Uno de los objetivos planteados en los

cursos de computación [2] es “desarrollar la capacidad profesional, al apropiarse de los conocimientos básicos de la programación con un super lenguaje estructurado y lo más actual posible, del funcionamiento de los microprocesadores, los sistemas operativos, Windows y aplicaciones actuales para la solución de problemas físicos”. En este contexto se estudia y se desarrollan habilidades prácticas para el empleo del Programa de cálculo *Mathematica* [3], el cual posibilita observar como influye la variación de los valores de determinados parámetros en las expresiones matemáticas que representan nuestro modelo físico y sobre esa base enriquecer su análisis [4].

Tradicionalmente en los cursos de óptica [5] se ha empleado, como concepción didáctica, el énfasis en el trabajo independiente de los estudiantes, con el objetivo de que logren un enfoque integrador en el estudio de los fenómenos físicos. A la interferencia de la radiación luminosa en láminas delgadas, se le dedican dos conferencias [6], para las cuales se le indica al estudiante la

¹E-mail: jfuentes@fisica.uh.cu.

lectura complementaria [7, 8]. Se dedican dos sesiones de clases prácticas [9] a la solución de problemas, y con posterioridad se desarrolla un seminario [10], para el cual se le facilita al estudiante un material docente [11] compilado específicamente para esta actividad.

Esta forma tradicional de impartir los conocimientos relacionados con este fenómeno, en la cual el estudiante mostraba lo adquirido en aplicaciones a estructuras multicapas sencillas, no requería de un especial conocimiento de las técnicas de computación y se desaprovechaban oportunidades para la formación integral del estudiante.

En consecuencia, los colectivos de las asignaturas de computación y de óptica realizaron una primera experiencia pedagógica [12], que consistió en integrar los conocimientos y habilidades adquiridos por los estudiantes en los cursos precedentes de computación y álgebra lineal, para su aplicación a la solución de problemas derivados del diseño de sistemas de lentes, en un seminario programado al efecto. Estimulados por los resultados obtenidos, se plantearon una segunda experiencia que es el objeto del presente trabajo.

2. Elementos teóricos

2.1. De didáctica

La concepción que sustenta la experiencia pedagógica que presentamos [13, 14] tiene como idea central que el proceso de enseñanza aprendizaje expresa en sí mismo dos formas de actividad: la del estudiante y la del profesor, las que, aunque íntimamente relacionadas, reflejan su doble carácter.

Así el proceso de enseñanza comprende la concepción, elaboración y puesta en práctica de acciones y formas de organización del proceso de aprendizaje tales, que garantice que los estudiantes asimilen los conocimientos, y desarrollen hábitos y habilidades. Esta demostrado que el proceso de aprendizaje no se produce sin la activa y consciente participación del estudiante.

De los planteamientos anteriores se desprende que le corresponde al profesor diseñar el sistema de acciones, que garanticen crear estímulos y despertar en los estudiantes el interés por involucrarse en el trabajo necesario para alcanzar el pleno dominio del material docente.

Un elemento muy importante a considerar, y fuerza motriz fundamental del profesor es la contradicción existente entre la secuencia propuesta al estudiante para su aprendizaje en las tareas cognoscitivas y prácticas y el real nivel de conocimientos, hábitos y habilidades que el estudiante posee.

En este sentido el rol del profesor está en poner de manifiesto, y emplear esta contradicción para activar el proceso cognoscitivo de los estudiantes. Es fundamental que el proceso de enseñanza esté en correspondencia con las posibilidades cognoscitivas del estudiante: se aproveche al máximo la existencia de conocimientos, hábitos y habilidades; así como el nivel y grado de

desarrollo de las capacidades intelectuales de los estudiantes.

El proceso de aprendizaje solamente se podrá considerar completo si el estudiante llega a saber cómo emplear sus conocimientos, hábitos y habilidades en la práctica. En este sentido la comprensión tiene un papel fundamental: solamente lo que se comprende bien, se asimila y recuerda fácilmente. La comprensión tiene como elemento esencial la correlación existente entre las nuevas ideas y el sistema de ideas anteriormente asimilado. Aunque este proceso siempre tendrá la impronta de la experiencia individual, nuestra práctica docente nos indica que la comprensión será más completa y consciente si logramos motivar al estudiante.

Para que el proceso cognoscitivo tenga lugar, el estudiante debe querer aprender. ¿Cómo motivarlo? Esto es un problema fundamental planteado a la ciencia pedagógica. En nuestra experiencia los motivos de excitación del pensamiento son la base más segura para el mantenimiento, fijación y ulterior desarrollo de los intereses cognoscitivos: deseos de encontrar por sí mismo la respuesta al problema planteado, discusión grupal de ideas que pueden consolidarse o modificarse, satisfacción por el éxito de la solución, comprensión de la significación práctica del asunto resuelto, y también satisfacción con el proceso del trabajo intelectual.

2.2. De óptica matricial

Para el estudio de la interferencia de la radiación luminosa en capas delgadas aplicando el método matricial [7, 8], las técnicas de la computación abren la posibilidad de un estudio más completo del fenómeno físico.

Supongamos que un haz de luz monocromática de longitud de onda λ incide sobre una capa no conductora, homogénea, no magnética e isotrópica, de espesor t , que la diferencia de recorrido óptico entre los haces reflejados y transmitidos, después de experimentar las reflexiones múltiples se mantiene pequeña en comparación con la longitud de coherencia, lo que asegura así, que los haces sean esencialmente coherentes.

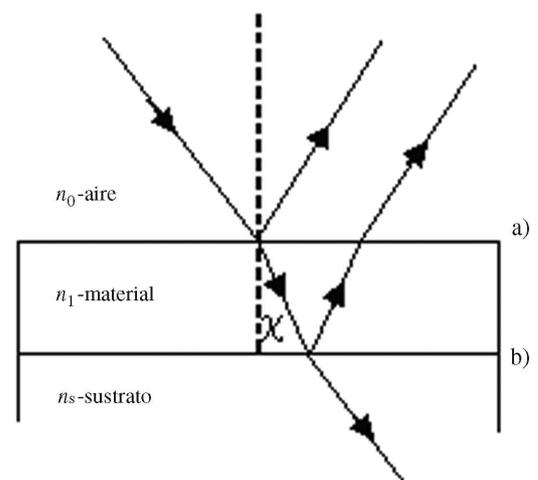


Figura 1 - Estructura de capa y sustrato que muestra la propagación de la luz.

Teniendo en cuenta las condiciones de frontera para los campos magnéticos y eléctricos de las ondas planas incidentes en las interfaces, podemos obtener la ecuación matricial que relaciona los valores de los campos netos en una cara de la capa, con los valores que tienen en la otra. Estas ecuaciones pueden ser escritas, en forma matricial, de la manera siguiente:

$$\begin{bmatrix} E_a \\ B_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\delta) & i \operatorname{sen}(\delta)/\gamma_1 \\ \gamma_1 \operatorname{sen}(\delta) & \cos(\delta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_b \\ B_b \end{bmatrix}, \quad (1)$$

el subíndice a o b en los campos eléctrico y magnético está referido a las caras de la capa; $\delta = 2\pi n_1 t \cos \chi / \lambda_0$ es el cambio de fase que adquiere el haz de luz al atravesar la capa; χ es el ángulo de refracción; t el espesor de la capa; n_1 el índice de refracción del material de la capa y γ_1 puede tomar dos valores, en dependencia de la orientación del campo con respecto al plano de incidencia: cuando esté perpendicular $\gamma_1 = n_1 \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \cos \chi$ y $\gamma_1 = \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} n_1 / \cos \chi$ cuando esté paralelo.

La matriz de segundo orden que aparece en la expresión (1) es llamada matriz de transferencia de la capa y se representa en general como:

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

La matriz de transferencia total de un sistema, M_T , formado por varias capas, es el producto de las matrices individuales de transferencia, en el que se mantiene el orden en el cual la luz atraviesa las capas al propagarse a través del sistema. Tenemos entonces:

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_1 \mathbf{M}_2 \dots \mathbf{M}_N. \quad (3)$$

Se obtienen entonces, las siguientes expresiones para los coeficientes de reflexión y de transmisión de amplitud, en función de los elementos de la matriz de transferencia;

$$\mathbf{r} = \frac{\gamma_0 \mathbf{m}_{11} + \gamma_0 \gamma_s \mathbf{m}_{12} - \mathbf{m}_{21} - \gamma_s \mathbf{m}_{22}}{\gamma_0 \mathbf{m}_{11} + \gamma_0 \gamma_s \mathbf{m}_{12} + \mathbf{m}_{21} + \gamma_s \mathbf{m}_{22}} \quad (4)$$

$$\mathbf{t} = \frac{2\gamma_0}{\gamma_0 \mathbf{m}_{11} + \gamma_0 \gamma_s \mathbf{m}_{12} + \mathbf{m}_{21} + \gamma_s \mathbf{m}_{22}}, \quad (5)$$

donde γ_0 y γ_s son parámetros que caracterizan el medio sobre la capa y el sustrato, respectivamente [11]. Dichas ecuaciones nos permiten calcular las propiedades reflectantes y refringentes tanto de una capa sencilla como de una lámina multicapa representada por la matriz de transferencia.

Aunque la incidencia normal de la luz sobre la lámina es una situación particular, ésta es la que con más frecuencia se emplea en la práctica y será la que estudiaremos. Obsérvese que en este caso el parámetro γ_1 es igual para ambas polarizaciones dado que el $\cos \chi$, es igual a la unidad.

Como es conocido, la reflectancia R representa la relación de la irradiancia reflejada, con respecto a la irradiancia de la radiación incidente.

La reflectancia R de una estructura, ver Fig. 1, formada por una capa de índice de refracción n_1 , sobre un sustrato de índice de refracción n_s , situada ésta en un medio con índice de refracción n_0 , está definida por:

$$R = |r^2|, \quad (6)$$

donde

$$r = \frac{n_1(n_0 - n_s) \cos(\delta) + i(n_0 n_s - n_1^2) \sin(\delta)}{n_1(n_0 + n_s) \cos(\delta) + i(n_0 n_s + n_1^2) \sin(\delta)} \quad (7)$$

es el coeficiente de reflexión de amplitud, que representa la relación entre las intensidades de los campos eléctricos incidente y reflejado.

3. Aplicación del método matricial al cálculo de la reflectancia espectral de celdas solares

El objeto del seminario son las celdas solares. Se aplica el método matricial y las técnicas de computación al tratamiento de la radiación luminosa al incidir sobre una lámina multicapa.

A pesar de su estudio ser objetivo de cursos superiores, esta selección se justifica, dado que pone en contacto al estudiante con una aplicación práctica muy importante, que le sirve de motivación.

Durante el seminario se profundizó con los estudiantes en el funcionamiento de las celdas solares y sus aplicaciones tanto terrestres como espaciales. Se les explicó los materiales semiconductores con los cuales se construyen como el Si, GaAs o el CdTe y que en todos los casos se emplean capas antirreflectantes, lo que incrementa la cantidad de energía luminosa utilizable. Con este objetivo en la oblea de material semiconductor, fundamentalmente silicio, en la cual se ha obtenido por difusión una juntura p-n, se deposita una capa de un material adecuado con un índice de refracción tal que la reflectancia disminuya sustancialmente.

Como orientación para la solución del problema del seminario se facilitaron a los estudiantes programas que permiten calcular el valor de la reflectancia en por cientos y graficar la reflectancia espectral para una o más capas.

3.1. Problemas propuestos a los estudiantes

Una vez establecida la importancia práctica del empleo de láminas multicapas, se propone a los estudiantes resolver los problemas que se anotan a continuación. Se les alerta que la dispersión está presente, pero no será considerada. Por la naturaleza de los materiales usados y dados los objetivos de la actividad, la generalidad del método mantiene su validez.

Problema 1. Se tiene una oblea de Si en la que se ha obtenido por difusión una juntura p-n. Se requiere depositar una capa de un óxido para disminuir la reflectancia del silicio. Con los datos de la Tabla 1 y considerando la longitud de onda de trabajo 550 nm, los estudiantes deben:

- a) Hallar la combinación de la capa de silicio cubierta con una capa de óxido de $\lambda/4$ con la cual se obtiene la mayor disminución de la reflectancia de la lámina de dos capas.
- b) Determinar el óptimo espesor con el cual se alcanza el mínimo de reflectancia con este mismo material.
- c) Graficar la reflectancia espectral en el intervalo entre 400-900 nm.

Material	Índice de refracción
Silicio	3,99
SiO_2	1,457
TiO_2	2,579
SnO_2	1,88

Tabla 1. Datos de los materiales utilizados en las celdas solares de Silicio

Problema 2. Se tiene una celda solar multicapa, depositada sobre una lámina de vidrio con la siguiente estructura: capa de ITO (óxido de indio dopado con óxido de estaño), capa de CdS y capa de CdTe, cuyos índices de refracción aparecen en la Tabla 2 y considerando la longitud de onda de trabajo 550 nm.

- a) Determinar cuánto disminuye la reflectancia espectral si el espesor de cada capa depositada es de un cuarto de onda y el espesor del vidrio es $85 \mu\text{m}$ (Ver Fig. 2).
- b) Graficar la reflectancia espectral en el intervalo entre 300-900 nm.

Material	Índice de refracción
Vidrio	1,5299
ITO	1,96
CdS	2,51
CdTe	2,894

Tabla 2. Datos para el Problema 2

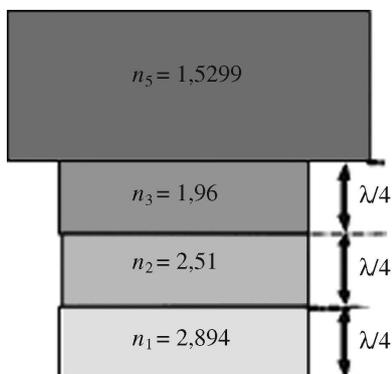


Figura 2 - Vista de la estructura de la celda solar de CdTe.

Resultados obtenidos: El primero y de carácter general fue el elevado nivel de motivación de los estudiantes. Esto se reflejó en su preparación para el seminario. Además participaron activamente en el análisis de los fenómenos físicos y de los distintos comportamientos de la reflectancia en cada caso, proponiendo alternativas a la formulación de los problemas. Todo esto evidenció que se logró activar su participación consciente en el proceso de enseñanza aprendizaje. Los estudiantes demostraron y consolidaron un adecuado conocimiento y manejo de las herramientas de cálculo.

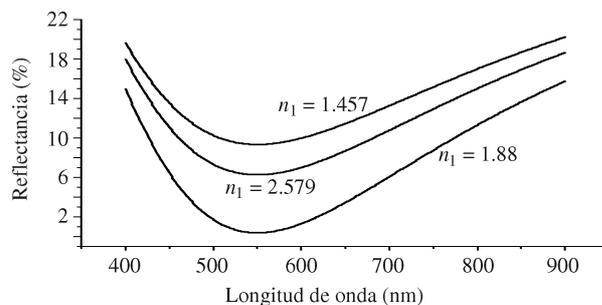


Figura 3 - Reflectancia espectral para capas con $n_1 = 1.457, 1.88, 2.579$.

Primer problema

a) Los estudiantes, empleando las herramientas de cálculo, revelaron el comportamiento de cada una de las alternativas propuestas en el rango visible del espectro. Se llama la atención de los estudiantes sobre que el valor de la reflectancia calculado para el silicio sin capa antirreflectante es de ($\approx 36\%$). Se comprobó que la mayor disminución se obtiene empleando el óxido de estaño con el cual se alcanza un valor de $\approx 0.37\%$ en 550 nm.

b) Para establecer el espesor óptimo, con el cual se alcanzaría el mínimo de la reflectancia empleando el óxido de estaño, se utilizó la expresión obtenida teóricamente para ésta, en el caso de incidencia normal:

$$R = \frac{n_1^2(n_0 - n_s)^2 \cos^2(\delta) + (n_0 n_s - n_1^2)^2 \sin^2(\delta)}{n_1^2(n_0 + n_s)^2 \cos^2(\delta) + (n_0 n_s + n_1^2)^2 \sin^2(\delta)} \quad (8)$$

y como trabajamos con capas de un cuarto de longitud de onda tenemos que $\text{sen}(\delta) = 1$ y $\text{cos}(\delta) = 0$, así que;

$$R = \left(\frac{n_0 n_s - n_1^2}{n_0 n_s + n_1^2} \right)^2, \quad (9)$$

de donde se tiene que la reflectancia será mínima cuando $n_1 = \sqrt{n_0 n_s}$. En nuestro caso esto implica que $n_1 = 2$, valor cercano al índice de refracción del óxido de estaño.

El programa elaborado permitió encontrar el espesor óptimo de la capa antirreflectante. Para el caso del SnO_2 fue de 73.1 nm, lo que coincide con el espesor de la capa de $\lambda/4$.

Se mostró que para la capa de SiO_2 que es el material más utilizado, por las facilidades tecnológicas de obtención, la reflectancia $R = 9.3\%$ y el espesor óptimo resultó 94.4 nm.

c) Los resultados se muestran en la Fig. 3, donde se presentan las curvas de reflectancia espectral obtenidas para las diferentes capas antirreflectantes.

El empleo de las herramientas de cálculo permitió mostrar a los estudiantes cómo al incrementar el espesor de la capa de SnO_2 , por ejemplo hasta 600 nm, Fig. 4, los haces reflejados desde las diferentes caras producen un patrón característico de máximos y mínimos de irradiancia, que se manifiesta en una oscilación en los valores de la reflectancia.

Se les muestra que a partir de la gráfica de la Fig. 4, si desconociéramos su espesor, t , sería posible establecerlo, a través de la expresión [15]:

$$2n_1t = \frac{\lambda_1\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2}, \quad (10)$$

donde los valores de la longitud de onda se corresponden a los de dos mínimos o dos máximos consecutivos de irradiancia y n_1 es el índice de refracción de la capa.

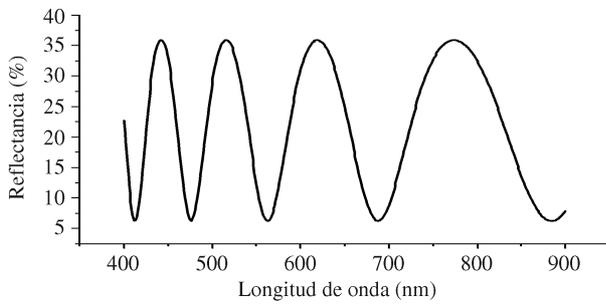


Figura 4 - Reflectancia espectral para una capa de espesor de 600 nm.

Segundo problema

a) Se establece que al ser todas las capas de un cuarto de longitud de onda para cada uno de los materiales empleados y sustrato del espesor indicado, la reflectancia disminuye hasta $R=1.3-1.6\%$ en el entorno de la longitud de onda de trabajo.

b) El gráfico de la reflectancia espectral en el intervalo dado muestra una apreciable disminución de la reflectancia R en el entorno de la longitud de onda de trabajo, ver Fig. 5. Se llama la atención del estudiante acerca de que la disminución de la reflectancia para la longitud de onda de trabajo no es tan significativa como en el caso de la capa de SnO_2 sobre silicio, pero que esta es una estructura novedosa, poco costosa y posee la ventaja de que el contacto es depositado sobre toda la cara posterior, lo que mejora la recolección de portadores de carga.

Se sugiere a los estudiantes que, aprovechando las posibilidades de las herramientas de cálculo, se propongan alternativas para encontrar un compromiso entre valores pequeños de reflectancia y mayor ancho del rango de longitudes de onda. Se promueve la discusión de los resultados obtenidos profundizando en el fenómeno físico.

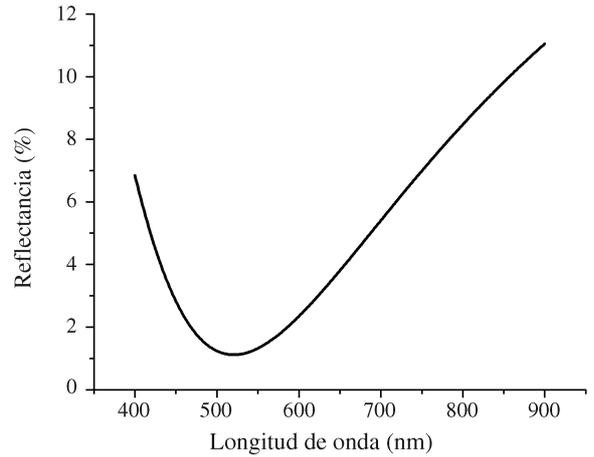


Figura 5 - Reflectancia espectral de la celda solar de CdTe.

En cada uno de los problemas planteados se llama la atención del estudiante sobre las posibilidades que ofrece el tratamiento matricial con el empleo de las herramientas de cálculo, en cuanto a obtener las gráficas del comportamiento de la reflectancia en dependencia de las relaciones existentes entre los índices de refracción de las capas y el sustrato, así como de la longitud de onda de la radiación incidente. Esta posibilidad se ejercita y aprovecha para que los estudiantes propongan alternativas y modificaciones a la propuesta inicial del problema.

Una vez concluido el seminario se verificó en los estudiantes un elevado nivel de satisfacción con la actividad, lo que permite afirmar que se lograron los objetivos didácticos planteados y que estos se involucraron consciente y activamente en el proceso de enseñanza aprendizaje.

4. Conclusiones

La organización del seminario cumplió con los objetivos didácticos que nos planteamos. Los estudiantes:

- Profundizaron en la comprensión del fenómeno de la interferencia de la radiación luminosa al incidir sobre láminas delgadas.
- Ampliaron sus conocimientos de óptica, álgebra matricial y computación, con lo que se logró la integración de conocimientos que nos proponíamos inicialmente.
- Lograron discutir el método matricial y las posibilidades y ventajas que brinda su complementación con las técnicas de computación. El estudiante, además de calcular la reflectancia espectral pudo, aprovechando las posibilidades que ofrecen los métodos computacionales, observar como influye la variación de los diferentes parámetros sobre la reflectancia.
- Se motivaron, al aplicar sus conocimientos al estudio de las celdas solares en calidad de modelo físico, lo que se tradujo en un incremento en su interés por el aprendizaje.

• Incrementaron su interés, lo que creó un ambiente propicio para el debate de ideas y permitió enriquecer la discusión física del fenómeno.

El resultado obtenido permite afirmar que en la actividad se logró la asimilación de nuevos conocimientos y el desarrollo de hábitos y habilidades y que el estudiante ha consolidado los conocimientos sobre la óptica, a través del principio “aprender haciendo”.

Agradecimientos

Los autores expresan su mas sentido agradecimiento al árbitro por sus sugerencias y señalamientos. Al Dr. Ernesto Reyes-Gómez por su ayuda con el TeX. A los Profesores Luis Hernández García, Medel Pérez Quintana y Marlen Domínguez Hernández, por su lectura crítica del manuscrito. Y a la M.C. Lídice Vaillant por los datos aportados sobre las celdas solares de CdTe.

Referências

- [1] *Programa de la Disciplina de Física General* (Facultad de Física, Universidad de la Habana, 1998).
- [2] *Programa de la Asignatura de Computación* (Facultad de Física, Universidad de la Habana, 1998).
- [3] J. Fuentes y M. Hernández, in *Actas del Segundo Taller Iberoamericano de Enseñanza de la Física Universitaria* (2000), p. 572.
- [4] B.A. Thacker, *Rep. Prog. Phys.* **66**, 1833 (2003).
- [5] O. Calzadilla, A. Pérez, A. Fornés y T. Molina, in *Eight International American Conference on Physics Education* (2003).
- [6] “La Conferencia es el tipo de actividad docente que tiene como objetivo instructivo principal la orientación a los estudiantes de los fundamentos científico-técnicos más actualizados de una rama del saber”
- [7] E. Hecht, *Óptica* (Addison Wesley Iberoamericana. Madrid, 2000), tercera edición.
- [8] F.L. Pedrotti, S.J. Pedrotti and L.S. Pedrotti, *Introduction to Optics* (Prentice-Hall International Inc., Englewood Cliffs, 1993).
- [9] “La clase práctica es el tipo de actividad docente que tiene como objetivo instructivo principal que los estudiantes ejecuten, amplien, profundicen, integren y generalicen determinados métodos de trabajo que les permitan desarrollar cualidades para utilizar y aplicar de modo independiente, los conocimientos”.
- [10] “El seminario es el tipo de actividad docente que tiene como objetivo instructivo principal que los estudiantes consoliden, amplien, profundicen, discutan, integren y generalicen los contenidos orientados aborden la resolución de problemas mediante la utilización de los métodos propios de la rama del saber y de la investigación científica; desarrollen su expresión oral, el ordenamiento lógico de los contenidos y las habilidades en la utilización de las diferentes fuentes del conocimiento”
- [11] A. Pérez Perdomo y O. Calzadilla Amaya, *Óptica Matricial* (Ediciones Universidad de la Habana, La Habana, 1996).
- [12] J. Fuentes, A. Pérez, O. Calzadilla y O. Hidalgo, Aceptado por la *Rev. Bras. Ens. Fís.*
- [13] D.P. Ausubel, J.D. Novak y H. Hanesian, *Psicología Educativa: Un Punto de Vista Cognitivo* (Editorial Trillas, México, 1983).
- [14] L.C. Vigotski, *Fragmentos. Tomo 1. Cuestiones de la Teoría e Historia de la Psicología* editado por A.P. Luria y M.G. Iaroshevskogo (Editorial Pedagogía, Moscú, 1982).
- [15] O.S. Heavens, *Optical Properties of Thin Films* (Dover Publication Inc; New York, 1991), 2nd ed., p. 115.