

Academia de Introducción a la Física del estado sólido.

SUGERENCIAS PARA LA IMPARTICIÓN DE LA ASIGNATURA DE INTRODUCCIÓN A LA FÍSICA DEL ESTADO SÓLIDO.

Objetivo(s) del curso:

Que el alumno comprenda los conceptos básicos de física del estado sólido que explican las propiedades eléctricas y ópticas de los materiales, así como los principios de física cuántica en que se fundamentan, como antecedente para las asignaturas de telecomunicaciones, en que se aplican dichas propiedades.

Temario

NÚM.	NOMBRE	HORAS
1.	Introducción a la mecánica cuántica.	10.0
2.	Mecánica ondulatoria de Schrödinger.	10.0
3.	Teoría de bandas de energía.	12.0
4.	Propiedades eléctricas de los sólidos.	10.0
5.	Propiedades ópticas de los sólidos.	6.0
6.	Procesos de generación y recombinación en semiconductores	16.0
		64.0
Actividades experimentales (prácticas de laboratorio)		0.0
Total		64.0

TEMA 1. Introducción a la mecánica cuántica.

Objetivo: El alumno conocerá los principios básicos que dan origen al desarrollo de la mecánica cuántica.

1.1 Radiación electromagnética e irradiancia.

Con base en las Ecuaciones de Maxwell (sin fuentes, en el vacío y escritas en el sistema internacional de unidades) escribir expresiones para: Las ecuaciones de onda para el Campo Eléctrico y el Campo Magnético, las funciones de onda tridimensionales correspondientes, el módulo del vector de Poynting y la irradiancia promedio.

1.2 Radiación térmica de cuerpo negro e hipótesis cuántica de Planck.

Con base en algunos principios fundamentales de la Mecánica Estadística y la hipótesis cuántica de Planck escribir la ecuación de un cuerpo caliente que emite radiación como un cuerpo negro. Con base en lo anterior escribir relaciones pertinentes para la Ley del desplazamiento de Wien y la de Stefan-Boltzmann, respectivamente.

1.3 Efecto fotoeléctrico y la teoría fotónica de Einstein.

Con base en los postulados de Einstein y la relación de Planck para la energía y la frecuencia describir detalladamente el Efecto Fotoeléctrico. Emplear algún tipo de

simulador para estudiar, como resultado del análisis de un conjunto de datos, conceptos tales como: La constante de Planck, la frecuencia umbral y la función de trabajo, entre otros. Conocer las principales aplicaciones de este fenómeno, por ejemplo, en el campo de estudio de las celdas fotovoltaicas.

1.4 Espectros atómicos y la teoría de Bohr.

Con base en los antecedentes propios del estudio de la estructura atómica, en particular del modelo atómico de Bohr, profundizar en el conocimiento de las ecuaciones básicas que explican los espectros emitidos por cuerpos calientes o bien por gases bajo el efecto de descargas eléctricas. Emplear algún tipo de simulador para ejemplificar el concepto de cuantización de los niveles energéticos de los electrones, por ejemplo, para el átomo de hidrógeno, como función de la frecuencia de los fotones que estos emiten o absorben durante aquellas transiciones energéticas permitidas.

1.5 Hipótesis de De Broglie.

Con base en el estudio de la naturaleza corpuscular de la luz, estudiada para el efecto fotoeléctrico, establecer la analogía pertinente para justificar la existencia de la longitud de onda asociada a una partícula material. Postular el hecho anterior a través del conocimiento de la expresión que permite calcular dicha longitud de onda en términos del cociente de la constante de Planck y la cantidad de movimiento lineal.

1.6 Difracción de rayos X y electrones: experimentos de Davisson, Germer y Thomson.

Con base en la descripción y el empleo de una simulación para el experimento de la difracción de rayos X, difracción de Bragg, conocer la existencia de materiales con estructura atómica periódica, cristalina, a través del estudio de los parámetros que caracterizan de dicho experimento. Con base en lo anterior, emplear de igual forma una simulación que permita conocer el fenómeno de la difracción de electrones; fundamento esencial de la naturaleza ondulatoria de los cuerpos materiales.

1.7 Dualidad onda-partícula.

Con base en el estudio de las propiedades ondulatorias de los cuerpos materiales así como de la naturaleza corpuscular de la radiación, conocer otros fenómenos, así como sus aplicaciones, que permitan verificar el comportamiento dual que las ondas y las partículas; situación que impide establecer diferencias fundamentales entre ellas mismas

TEMA 2. Mecánica ondulatoria de Schrödinger.

Objetivo: El alumno comprenderá el modelo matemático para la teoría cuántica y sus aplicaciones a modelos físicos.

2.1 Funciones de onda.

Con base en el formalismo matemático para el estudio de las ondas clásicas, identificar conceptos como: Amplitud, frecuencia, longitud de onda, número de onda y velocidad de propagación; así como las representaciones pertinentes para la ecuación de onda y sus soluciones en una, dos y tres dimensiones.

2.2 Interpretación de Born de las funciones de onda.

Con base en el concepto de función de probabilidad, identificar al cuadrado de la amplitud de la función asociada a una onda material con la densidad de probabilidad para un estado específico de la misma; de igual forma, conocer las propiedades esenciales de dichas funciones entendidas como funciones de cuadrado integrable.

2.3 Paquetes de ondas y velocidad de grupo.

Con base en las expresiones de la longitud de onda De Broglie, la energía de Planck y las ideas clásicas que relacionan a la velocidad de fase con la velocidad de grupo, identificar el término paquete de onda material con la superposición de ondas de frecuencia y longitud de onda calculadas a partir de aquellos conceptos; emplear algún tipo de simulación para ejemplificar el comportamiento de tales situaciones.

2.4 Principio de incertidumbre.

Con base en los apartados anteriores, introducir un aspecto fundamental de la teoría desarrollada más adelante en términos de una expresión que permita relacionar la incertidumbre propia de la medición de la posición de una partícula con la incertidumbre asociada a la medición simultánea de su momento lineal; conocer o derivar expresiones alternativas a este principio en términos, por ejemplo, de la energía y el tiempo o el momento angular y la posición angular respectivamente.

2.5 Ecuación de onda de Schrödinger.

Con base en las soluciones conocidas para la ecuación de una onda clásica unidimensional, la energía de Planck, la longitud de onda de De Broglie y el principio de incertidumbre, conocer la ecuación de onda de Schrödinger unidimensional dependiente del tiempo; así mismo conocer la expresión de la ecuación mencionada para el caso estacionario y generalizar las expresiones encontradas para el caso en tres dimensiones.

2.6 Potencial de pozo infinito.

Con base en el estudio de las soluciones de la ecuación de Schrödinger, en el caso estacionario unidimensional, para una partícula libre, establecer las condiciones de frontera pertinentes con el fin de conocer las soluciones a dicha ecuación bajo la aplicación de un potencial infinitamente profundo; estudiar los posibles valores de la energía para una partícula confinada en un potencial de este tipo.

2.7 Potencial de escalón.

Con base en el estudio de las soluciones de la ecuación de Schrödinger, en el caso estacionario unidimensional, para un pozo finito de potencial, establecer las condiciones de frontera y las situaciones pertinentes con el fin de conocer las soluciones a dicha ecuación bajo la aplicación de un potencial de altura finita y anchura infinita; estudiar las expresiones correspondientes para los coeficientes de Reflectancia y Transmitancia en el caso de una partícula limitada por un potencial de este tipo.

2.8 Potencial de barrera y efecto túnel.

Con base en el estudio de las soluciones de la ecuación de Schrödinger, en el caso estacionario unidimensional, para los potenciales estudiados en anteriores apartados, establecer las condiciones de frontera y las situaciones pertinentes con el fin de conocer las soluciones a dicha ecuación bajo la aplicación de un potencial de altura finita y anchura finita; estudiar la expresión correspondiente para el coeficiente de Transmisión en el caso de una partícula limitada por un potencial de este tipo y conocer las aplicación de estos principios en diseños tecnológicos recientes.

TEMA 3. Teoría de bandas de energía.

Objetivo: El alumno comprenderá en qué forma la estructura de bandas que adoptan los niveles de energía de los electrones de un sólido, es consecuencia directa del comportamiento mecánico-cuántico de éstos; además, identificará la estructura y ocupación de las bandas de energía que caracterizan a un conductor, a un dieléctrico y a un semiconductor.

3.1 Estructura cristalina.

Con base en el contenido de cursos antecedentes acerca de la estructura de la materia, relacionar ciertos tipos de enlaces químicos con algunas estructuras cristalinas de característica utilidad en el desarrollo del presente curso; introducir conceptos tales como: Red cristalina, celda unitaria, índices de Miller, planos cristalográficos y red de Bravais, entre otros.

3.2 Teorema de Bloch.

Con base en el conocimiento acerca de funciones periódicas y las soluciones correspondientes a una ecuación diferencial para una función con tales características, introducir el teorema de Bloch como fundamento matemático para describir el movimiento de los electrones en un sólido; identificar en este estudio conceptos tales como: Potencial periódico, modulación de una función y función de Bloch.

3.3 El modelo de Kronig-Penney.

Con base en el teorema de Bloch, describir los estados de energía para un electrón en una estructura cristalina estableciendo las condiciones de frontera pertinentes; suponer que las soluciones a la ecuación de Schrödinger, correspondientes al caso unidimensional, son funciones de Bloch dependientes del momento de la partícula y estudiar su comportamiento periódico y acotado para definir el concepto de banda de energía.

3.4 Diagramas de energía en el espacio k de los momentos.

Con base en los resultados del apartado anterior, elaborar diagramas de la energía como función del momento que permitan visualizar el comportamiento de los electrones en las distintas regiones de continuidad y discontinuidad de los mismos; comparar tales diagramas con el esperado para una partícula libre y asociar las discontinuidades en dichos diagramas con la existencia de bandas prohibidas para los electrones en un cristal.

3.5 Modelo de bandas de energía.

Con base en el contenido de cursos antecedentes acerca de la estructura de la materia, recordar conceptos como: Electrones de valencia y electrones de conducción en un átomo; utilizar tales conceptos y la naturaleza física del estado sólido para justificar la existencia de bandas de energía permitidas y prohibidas en un cristal considerando ejemplos específicos

3.6 Conductores, dieléctricos y semiconductores.

Con base en una representación simple para las bandas de valencia y conducción en un cristal, clasificar a partir del ancho de la banda prohibida correspondiente materiales reconocidos como: Conductores, aislantes y semiconductores; estudiar ejemplos específicos y conocer las energías típicas del ancho de las bandas prohibidas en cada caso.

TEMA 4. Propiedades eléctricas de los sólidos.

Objetivo: El alumno identificará las propiedades eléctricas de los sólidos y comprenderá la relación que guardan con las características estructurales y de bandas del material. Así mismo, comprenderá los fenómenos que tienen lugar en una unión p-n y cómo éstos determinan el comportamiento característico del diodo semiconductor.

4.1 Materiales conductores.

Con base en el conocimiento de conceptos tales como: Corriente eléctrica, densidad superficial de corriente eléctrica, campo eléctrico y conductividad eléctrica, entre otros; comparar el modelo clásico de la conductividad eléctrica, en materiales conductores, con el modelo cuántico, donde prevalecen conceptos tales como: Masa efectiva, principio de exclusión, distribución de Fermi-Dirac y energía de Fermi, entre otros.

4.2 Materiales dieléctricos.

Con base en el contenido del apartado anterior, estudiar el caso de aquellos materiales donde la energía de Fermi está ubicada en el espacio comprendido al ancho de la banda prohibida que separa la banda de valencia y la banda de conducción; analizar, en los casos considerados, la estructura electrónica de dichos materiales, así como los valores típicos de la energía de Fermi y el ancho de la banda prohibida.

4.3 Materiales semiconductores, semiconductores extrínsecos e intrínsecos y Semiconductores tipo P y tipo N.

Con base en el contenido de los apartados anteriores, distinguir el caso de aquellos materiales donde el ancho de la banda prohibida es menor que el considerado para un material aislante y que por efectos de la elevación de la temperatura o la radiación incidente admiten portadores en la banda de conducción. Estudiar los casos, en este apartado, de la pureza y el dopado de dichos materiales que permita clasificarlos como materiales con impurezas donadoras o aceptoras, según sea el caso.

4.4 Características eléctricas en términos de las estructuras de bandas.

Con base en un conjunto de representaciones icónicas acordes con la teoría de bandas, explicar los casos descritos en apartados anteriores resaltando entre otros puntos: El grosor de la brecha prohibida en los distintos tipos de materiales considerados, la dependencia de la temperatura en el caso de semiconductores intrínsecos y la ubicación de los niveles donadores y aceptores en el caso de los semiconductores extrínsecos.

4.5 La unión P-N y el diodo semiconductor.

Con base en las características conocidas de los semiconductores extrínsecos, estudiar inicialmente el comportamiento estático de la unión P-N resaltando conceptos tales como: Difusión de los portadores de carga, zona de agotamiento y potencial de barrera, entre otros; consecuentemente, analizar el caso del comportamiento dinámico de la unión P-N resaltando conceptos tales como: Pares electrón-Hueco, polarización directa de la unión P-N, polarización inversa de la unión P-N, corriente inversa de saturación y curva característica de polarización, entre otros.

TEMA 5. Propiedades ópticas de los sólidos.

Objetivo: El alumno comprenderá los procesos de transmisión y absorción de la luz en los materiales sólidos, y las propiedades ópticas a las que dichos procesos dan lugar, especialmente en relación con la estructura de bandas del material.

5.1 Materiales transparentes.

Con base en una clasificación simple de los materiales que atienda a sus propiedades ópticas, reconocerlos como transparentes, translúcidos y opacos; en este contexto, analizar fenómenos como la dispersión, la refracción o la reflexión que permitan definir parámetros como la reflectancia y la transmitancia, en cada uno de los casos considerados.

5.2 Materiales absorbentes.

Con base en lo establecido en el apartado anterior, introducir el concepto de absorción lumínica de una muestra partir de las intensidades luminosas, incidente y transmitida, el coeficiente de absorción y los factores geométricos de dicha muestra; estudiar el caso particular de la absorción selectiva debida de la luz incidente sobre los electrones de ciertos materiales semiconductores.

5.3 Espectros de absorción de los sólidos.

Con base en el contenido de cursos antecedentes y en los conceptos desarrollados en el apartado 1.4 de este texto, estudiar los espectros de absorción de algunos compuestos empleados en el diseño de dispositivos semiconductores; adicionalmente, explicar el fenómeno de la luminiscencia con la finalidad de entender el comportamiento de materiales fosforescentes y fluorescentes.

5.4 Relación entre el borde de absorción y la banda prohibida.

Con base en la expresión para la energía radiante, de Planck, y el ancho típico de la banda prohibida en materiales semiconductores, establecer las condiciones para los distintos niveles de absorción a partir de las energías lumínicas correspondientes a los límites del espectro visible; estudiar los casos más conocidos de materiales semiconductores intrínsecos y extrínsecos.

TEMA 6. Procesos de generación y recombinación en semiconductores.

Objetivo: El alumno comprenderá los procesos de generación y recombinación de pares electrón-hueco en los semiconductores, así como los principios de operación de algunos dispositivos optoelectrónicos basados en este tipo de materiales.

6.1 Generación de pares electrón-hueco.

Con base en los conceptos desarrollados en el apartado 4.5 en relación con los pares electrón hueco, estudiar los procesos más conocidos de generación de pares electrón-hueco para materiales semiconductores; identificar otros conceptos como son: Corriente de arrastre, corriente de difusión, ecuación de continuidad, equilibrio térmico y excitación fotónica, entre otros.

6.2 Absorción de fotones.

Con base en los procesos descritos en algunos apartados del capítulo anterior, conocer y distinguir los casos de absorción: Intrínseca, extrínseca, por vibraciones de la red o por excitaciones colectivas; introducir, según sea el caso, conceptos tales como: Excitones, fonones y transiciones entre bandas, entre otros.

6.3 Celdas fotovoltaicas

Con base en la descripción del efecto fotoeléctrico realizada en el apartado 1.3, conocer el principio de funcionamiento de una fotocelda simple formada por la unión P-N de silicio dopado; estudiar, adicionalmente, el desarrollo histórico de estos dispositivos, sus técnicas de fabricación, la eficiencia esperada de los mismos y sus desarrollos más recientes.

6.4 Recombinación radiativa, generación de fotones, generación asistida de fotones, inversión de la población y el efecto láser.

Con base en el comportamiento de los pares electrón-hueco descrito en apartados anteriores, analizar el caso de la emisión de un fotón por la recombinación simple de un electrón de la banda de conducción con un hueco de la banda de valencia; conocer aquellos mecanismos que permiten inducir transiciones electrónicas, desde estados metaestables de energía, con la consecuente emisión de fotones.

6.5 Recombinación no-radiativa, el efecto Auger y excitones.

Con base en el comportamiento de los pares electrón-hueco descrito en apartados anteriores, analizar el caso de la recombinación de un electrón de la banda de conducción con un hueco de la banda de valencia donde, a diferencia del caso anterior, el producto

final es un nuevo electrón en el borde de la banda de conducción; discutir la eficiencia y vida útil de los dispositivos basados en este principio.

6.6 Diodo emisor de luz (LED).

Con base en el contenido del apartado 6.4, analizar el principio de operación, electroluminiscencia, de un diodo emisor de luz; conocer la relación de la longitud de onda del fotón emitido con el ancho de la banda prohibida de los materiales usualmente empleados para su fabricación.

6.7 Diodo láser semiconductor.

Con base en el apartado anterior y en los conceptos desarrollados en el apartado 6.4, analizar el caso de la emisión de luz, en un semiconductor, estimulada por radiación; comprender los detalles del diseño de dispositivos capaces de producir un haz de luz monocromático y coherente, así como la importancia de tales dispositivos en el desarrollo de las nuevas tecnologías de la transmisión de la información.

Bibliografía básica

Temas para los que se recomienda:

BUBE, Richard <i>Electrons in Solids</i> 3th. Edition San Diego Academic Press, 1992	4 y 5
EISBERG, Robert, RESNICK, Robert <i>Física cuántica, átomos, moléculas, sólidos, núcleos y partículas</i> 1a. edición México, D.F. Limusa, 2012	1 y 2
MCKELVEY, John <i>Física del estado sólido de semiconductores</i> 1a. edición México, D.F. Limusa	1, 2, 3, 4 y 6
PIERRET, Robert <i>Semiconductor Device Fundamentals</i> 134 1a. edición California Addison-Wesley Longman, 1996	3, 4 y 6
SERWAY, Raymond, MOSES, Clement, MOYER, Curt <i>Modern Physics</i>	1, 2, 3, 4 y 6

3th. edition
California
Cengage Learning, 2005

Bibliografía complementaria

BEISER, Arthur
Concepts of Modern Physics 1 y 2
6th. edition
London
Mc. Graw Hill, 2003

EISBERG, Robert
Fundamentos de física moderna 1 y 2
1a. edición
México, D.F.
Limusa, 2007