

# GUÍA DOCENTE

## FÍSICA DEL ESTADO SÓLIDO

### Grado en Física

Cuarto Curso

**I.- DATOS INICIALES DE IDENTIFICACIÓN**

<b>Nombre de la asignatura:</b>	FÍSICA DEL ESTADO SÓLIDO
<b>Nombre de la materia:</b>	AMPLIACIÓN DE FÍSICA
<b>Créditos ECTS</b>	7,5
<b>Carácter:</b>	OBLIGATORIA
<b>Titulación:</b>	GRADUADA/O EN FÍSICA

**II.- INTRODUCCIÓN A LA ASIGNATURA**

La asignatura de Física del Estado Sólido pretende proporcionar una introducción a la física de los sólidos que familiarice a los estudiantes con las estructuras cristalina y electrónica de los materiales y la manera en que ambas determinan las propiedades básicas de los sólidos y sus posibles aplicaciones tecnológicas. El Estado Sólido es una materia que enlaza el mundo macroscópico con el microscópico y por tanto fundamental en el desarrollo de un Físico. En ella se estudian las propiedades fundamentales de la materia, que dan lugar a la conducción eléctrica o del calor en metales o aislantes se estudia el magnetismo como un fenómeno de interacción cuántica entre los componentes que constituyen la materia (átomos y electrones), así como el origen microscópico de sus propiedades.

La asignatura tiene 7,5 créditos ECTS asignados, de los cuales 6 son teóricos y 1,5 son prácticas de laboratorio.

En la asignatura de Física Cuántica, de tercer curso, se estudian algunos aspectos fundamentales de Estado Sólido, como el teorema de Bloch, la existencia de bandas de energía (modelo de Kronig-Penney) y las relaciones de dispersión, las condiciones periódicas de Born-von Karman, la masa efectiva o el concepto de hueco. También se estudia el modelo de Drude de conducción en un metal. Estos conceptos se presuponen conocidos, aunque algunos de ellos se repasan en el contexto del tema correspondiente. En paralelo a la Física del Estado Sólido los estudiantes cursan la Mecánica Cuántica. Muchos de los conceptos desarrollados en esta asignatura son importantes en la asignatura de Estado Sólido, en particular en el estudio de los semiconductores, y posteriormente en magnetismo y superconductividad. Por otra parte, la Física del Estado Sólido reúne los fundamentos necesarios para cursar otras asignaturas posteriores, como la Física de Semiconductores.

El desarrollo de la asignatura comienza analizando la periodicidad a largo alcance y las simetrías a que da lugar. Se estudian los distintos sistemas cristalinos y se ven ejemplos de estructuras de interés fundamental y tecnológico. Posteriormente se analiza el fenómeno de la difracción de rayos X en cristales, se introduce para ello la red recíproca y las zonas de Brillouin, y se describen algunos métodos de resolución de estructuras. Se estudia los tipos de defecto básicos existentes en un sólido. Seguidamente se aborda el problema denominado dinámica de la red, obteniéndose las relaciones de dispersión e introduciendo el concepto de fonón. Se formula de forma sencilla la dispersión de Brillouin y Raman para el estudio de los fonones acústicos y ópticos respectivamente. Se definen las ecuaciones fundamentales de la elasticidad en sólidos y se relacionan las constantes elásticas con las velocidades transversales y longitudinal en un sólido cúbico. Las propiedades térmicas de los sólidos están íntimamente relacionadas con los fonones. Se define la densidad de estados de fonones, que servirá de base para la determinación de una serie de propiedades térmicas como la capacidad calorífica, la expansión térmica o los efectos de anarmonicidad.

La estructura electrónica de los sólidos es esencial para conocer el comportamiento electrónico y óptico. En el tema se abordan dos modelos, el de la aproximación cuasi-libre, válida para metales, y el de la aproximación de electrones fuertemente ligados, válido para aislantes. Se analiza la estructura de bandas en la primera zona de Brillouin. Se introducen los puntos críticos. Luego se analiza algunas estructuras de bandas conocidas y sus densidades de estados. A continuación, se aborda el estudio de un gas de electrones libres en un pozo cuadrado de potencial con paredes infinitas. Se describe el gas de Fermi a 0K y la estadística de Fermi. Asimismo se estudia la contribución de los electrones a la conducción térmica. Se estudia el apantallamiento electrónico y la transición de Mott en metales. Los semiconductores son la base de gran parte de la tecnología electrónica actual. Después de recordar algunos conceptos que se han visto en Física Cuántica, como el concepto de hueco y de masa efectiva, se determina la concentración de electrones en un semiconductor y la evolución de la energía de Fermi en función de la temperatura. Se estudian los semiconductores dopados. Se aborda el problema de la homounión y heterounión entre semiconductores y la unión metal-semiconductor. Gran parte de las propiedades macroscópicas de un sólido viene dada por su función dieléctrica. A partir de los campos electromagnéticos en un medio material y de su formulación en el dominio de frecuencias, se hallan las relaciones de Kramers-Kronig. Se estudia la absorción infrarroja y los polaritones. También se estudian los materiales ferroeléctricos, tan importantes hoy en día.

El magnetismo es un fenómeno cooperativo, conjuntamente con la superconductividad. Es esencial la interacción entre vecinos, la denominada interacción de intercambio. Se estudia la teoría cuántica del diamagnetismo y paramagnetismo, así como del ferromagnetismo de bandas. Se diferencia los distintos comportamientos magnéticos a través de la susceptibilidad magnética en función de la temperatura. Por último, se da una visión bastante completa al fenómeno de la superconductividad. Se describen algunos experimentos esenciales, se hace una descripción fenomenológica y el estado básico superconductor. Se describe el efecto Josephson. Finalmente, se analiza los distintos tipos de superconductores.

### III.- VOLUMEN DE TRABAJO

TIPO DE ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN	HORAS
Asistencia a clases teóricas	Magistrales teórico-prácticas:	40
Asistencia a clases de prácticas	Clases de problemas participativas	20
Asistencia a clases de laboratorio	Realización de experimentos en sesiones de laboratorio, incluyendo un análisis preliminar de los resultados. 3 h/ sesión x 5 sesiones	15
Preparación de trabajos y resolución de problemas para su evaluación	Problemas y ejercicios: 15 h	25
	contenidos experimentales: 2 horas/sesión/semana x 5 sesiones=10	
Estudio-preparación contenidos teórico- prácticos	4 h/sem x 15 semanas	60
Estudio para preparación de exámenes:	16 h/examen x 1 examen	16
Tutorías individuales (despacho)	1 h/10 de clase =7,5 h	7,5
Realización de exámenes:	4 h/examen x 1 examen	4
<b>TOTAL VOLUMEN DE TRABAJO</b>		<b>187,5</b>

### IV.- OBJETIVOS GENERALES

- Adquirir una visión global de la Física del Estado Sólido.
- Ser capaz de localizar los contenidos necesarios para resolver un problema físico relacionado con el Estado Sólido.
- Conseguir que el estudiante comprenda los conceptos fundamentales de materia cristalina, de red recíproca, de dinámica de la red, de propiedades térmicas, de propiedades electrónicas y de magnetismo.

## V.- CONTENIDOS MÍNIMOS

### Tema 1. Estructuras cristalinas.

Se comienza por la definición de orden a larga distancia y por comentar los distintos tipos de materia. Se introducen los distintos tipos de red cristalina, en dos y tres dimensiones, y los distintos elementos de simetría posibles que dan lugar a las 32 clases cristalinas. Se analiza el significado de la simetría desde el punto de vista cuántico. Se estudian algunas estructuras cristalinas importantes (silicio, diamante, zincblenda, wurtzita, etc.) y superestructuras (pozos cuánticos y superredes, puntos cuánticos e hilos cuánticos) basadas en semiconductores de interés tecnológico. Se analiza la física básica relacionada con las aleaciones sólidas. Finalizamos definiendo los tipos de defectos en sólidos.

### Tema 2. Difracción en estructuras periódicas.

Se describe matemáticamente el proceso de difracción, para estudiar a continuación la difracción a la que da lugar una estructura periódica. Para ello se introduce la red recíproca y se utiliza la esfera de Ewald para describir el proceso de difracción. Se examina la interpretación de Bragg de la condición de Laue. Se definen las zonas de Brillouin. Se introduce el factor de estructura y se analizan algunos métodos de resolución de estructuras cristalinas, desde el histórico método de Patterson hasta los modernos métodos directos o de Rietveld.

### Tema 3. Dinámica de la red en estructuras periódicas.

A partir del potencial cristalino y su desarrollo de Taylor, se llega a las ecuaciones de la dinámica de la red. Se define la matriz dinámica y los vectores de polarización. Se particulariza para una cadena lineal con un átomo y dos átomos en la celda unidad, y se definen las ramas acústicas y ópticas. Se describe alguna relación de dispersión real de un sólido. Se formula de forma sencilla los procesos denominados dispersión de Brillouin y Raman para el estudio de los modos acústicos y ópticos. Se introduce el concepto de fonón. Finalmente se formula, a modo de introducción, la teoría de la elasticidad en sólidos, particularizando para un medio cúbico.

### Tema 4. Propiedades térmicas de los sólidos.

A partir de las relaciones de dispersión estudiadas en el tema anterior y el concepto de fonón, se introduce la densidad de estados y se discute la aproximación de Debye. Después de recordar algunos conceptos de termodinámica estadística, se estudian varias propiedades relacionadas con la dinámica de la red, como el calor específico, la expansión térmica o los efectos de anarmonicidad. Finalmente, se estudia la conducción del calor en sólidos.

### Tema 5. Estructura electrónica: bandas y enlaces.

A partir de la ecuación de Schrödinger e introduciendo los elementos de simetría, se obtiene la función de onda de un electrón en un sólido: función de Bloch. Se recuerda el enlace químico visto en Física Cuántica. Se describe la aproximación del electrón cuasi-libre, válida para metales, y la aproximación del electrón fuertemente ligado, válida para aislantes y semiconductores. Se analiza el comportamiento de las bandas en la primera zona de Brillouin en un ejemplo de metal y uno de semiconductor. Se introduce la densidad de estados y los puntos críticos o singularidades de Van Hove. Se describe la densidad de estados de un sólido no cristalino.

### Tema 6. Metales.

Se discute el modelo de Drude y los problemas que conlleva. Se analiza el gas de electrones libres en un pozo cuántico con barreras de potencial infinitas. Se define la energía de Fermi, la densidad de estados y la superficie de Fermi. Se formula la estadística de Fermi. Se estudia el calor específico debido a los electrones en un metal. Se estudia el apantallamiento eléctrico y la transición de Mott.

**Tema 7. Semiconductores.**

Partiendo de la bandas de un semiconductor, se recuerda el concepto de hueco y de masa efectiva. Se determina la concentración de electrones y huecos en un semiconductor intrínseco y se halla la evolución del nivel de Fermi con la temperatura. Se analiza el cambio en las propiedades del semiconductor al doparse. Se determina la evolución del nivel de Fermi con la temperatura en un conductor dopado. Finalmente se analiza la unión pn y la unión Schottky.

**Tema 8. Dieléctricos.**

Se introduce la función dieléctrica en el espacio real y de frecuencias, y se determinan las relaciones de Kramers-Kronig. Se estudia la absorción de radiación electromagnética en un medio dieléctrico. Se formula la función dieléctrica de un oscilador armónico. Se describen los modos longitudinales y transversales a partir de las ecuaciones de los campos y se obtiene las relaciones de dispersión polaritónicas. Se estudia la polarización de un material ferroeléctrico.

**Tema 9. Magnetismo.**

Tanto el magnetismo como la superconductividad se enmarcan dentro de la Mecánica Cuántica como fenómenos cooperativos en los que es importante la interacción entre átomos vecinos y sus espines. El tema comienza con la descripción del diamagnetismo y paramagnetismo. Se introduce la interacción de intercambio y se formula un modelo de bandas para el ferromagnetismo. Se estudia el comportamiento de un material ferromagnético con la temperatura a partir del modelo de bandas. Se introduce el antiferromagnetismo, y se describen algunos materiales nuevos con magnetismo frustrado.

**Tema 10. Superconductividad.**

Se describen algunos fenómenos importantes relacionados con la superconductividad y su descripción fenomenológica por medio de las ecuaciones de London. Se introducen los pares de Cooper. Se define el estado fundamental en la teoría BCS. Se introduce el efecto Josephson. Finalmente se describen los tipos de superconductores existentes.

**VI.- DESTREZAS QUE ADQUIRIR**

- Conocimiento de los conceptos básicos de simetría relacionados con la estructura cristalina.
- Conocimientos de difracción de rayos X.
- Entender las ecuaciones básicas de la elasticidad.
- Entender el origen de fenómenos físicos como las propiedades térmicas, eléctricas u ópticas.
- Comprender el origen del magnetismo y la superconductividad.
- Manejo de las herramientas matemáticas y conceptos físicos necesarios para abordar un tema de investigación en Estado Sólido.

## VII.- HABILIDADES SOCIALES O TRANSVERSALES

- Desarrollar la capacidad de identificar problemas e idear estrategias para su resolución.
- Desarrollar la capacidad de planificar y organizar el propio aprendizaje, basándose en el trabajo individual a partir de la bibliografía y otras fuentes de información.
- Evaluar la importancia relativa de las diferentes causas que intervienen en un fenómeno físico.
- Identificar los elementos esenciales de una situación compleja, realizar las aproximaciones necesarias para construir modelos simplificados que lo describan y poder así entender su comportamiento en otras situaciones.
- Ser capaz de efectuar una puesta al día de la información existente sobre un problema concreto, ordenarla y analizarla críticamente.
- Fomentar la capacidad para trabajar en grupo.

## VIII.- TEMARIO Y PLANIFICACIÓN TEMPORAL

La planificación que se muestra a continuación es lógicamente orientativa ya que, dependiendo del ritmo de adquisición de competencias de los alumnos y del grado de madurez de sus conocimientos previos, puede resultar conveniente (o necesario) reajustar el cronograma siguiente.

### TEMARIO DE TEORÍA

		horas
1	Estructuras cristalinas	6
2	Difracción en estructuras periódicas	6
3	Dinámica de la red en estructuras periódicas	6
4	Propiedades térmicas de los sólidos	4
5	Estructura electrónica: bandas y enlaces	8
6	Metales	5
7	Semiconductores	7
8	Dieléctricos	5
9	Magnetismo	7
10	Superconductividad	6

### TEMARIO DE PRÁCTICAS

		horas
1	Estructuras cristalina difracción	3
2	Vibraciones en sólidos	3
3	Propiedades electrónicas (efecto Hall y conductividad)	3
4	Propiedades térmicas de los sólidos (calor específico)	3
5	Ferroeléctricos	3

## IX.- BIBLIOGRAFÍA DE REFERENCIA

### Bibliografía básica:

1. Solid-State Physics: An introduction to principles of Materials Science, H. Ibach y H. Lüth, Springer, 2003.
2. Introduction to Solid State Physics, C. Kittel, Wiley, 2005.

### Bibliografía complementaria:

1. Solid State Physics, G. Burns, Academic Press, 1990.
2. Solid State Physics, N. W. Ashcroft y N. D. Mermin, Holt-Saunders Int. Edt., 1976.
3. Quantum Theory of Solids, C. Kittel, Wiley, 1987.
4. Solid State Physics, M. S. Rogalski y S. B. Palmer, Gordon and Breach, 2000.
5. Solid State Physics, H. E. Hall, John Wiley & Sons, 1982.
6. Fundamentals of Semiconductors: Physics and Materials Properties, Springer, 2003.
7. Introductory Solid State Physics, H. P. Myers, Taylor and Francis, 1990.
8. Física del Estado Sólido: Teoría y Métodos Numéricos, F. Domínguez-Adame, Paraninfo, 2000.
9. <http://solidstate.physics.sunysb.edu/teach/intlearn/>: distintos aplets en Java sobre temas de Estado Sólido (red recíproca, cuasicristales, relaciones de dispersión, magnetismo, etc.).
10. <http://cecm.insa-lyon.fr/CIOL/ems.html>: software para el análisis de difracción de rayos X y microscopía electrónica.
11. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/solcon.html#solcon>: página web con conceptos de Física del Estado Sólido: dieléctricos, semiconductores, magnetismo, teoría de bandas, etc.

## X.- CONOCIMIENTOS PREVIOS

Física General, Mecánica y Ondas, Física Cuántica, Termodinámica y Física Estadística, Óptica, Electromagnetismo, Matemáticas, Métodos Matemáticos.

## XI.- METODOLOGÍA

### Clases teóricas:

Se establecerán las bases del Estado Sólido, introduciendo los aspectos fundamentales y derivando sus propiedades eléctricas, ópticas y magnéticas.

### Clases de problemas:

Se realizan ejercicios que complementen las clases teóricas, en los que se procurará introducir magnitudes físicas reales que nos permitan conocer el orden de magnitud de los distintos parámetros físicos que dan cuenta de sus propiedades.

### Sesiones de laboratorio:

Las prácticas de laboratorio se realizarán en grupos reducidos. Los estudiantes trabajan en grupo en la toma de datos y discusión de los resultados, en un análisis preliminar.

## XII.- EVALUACIÓN DEL APRENDIZAJE

### Parte teórico-práctica:

- Exámenes escritos: en la parte de teoría se evaluará fundamentalmente la comprensión de los aspectos físicos relativos a las propiedades de los sólidos, su relación mutua y su dependencia respecto a las condiciones externas, mediante cuestiones de tipo conceptual. En la parte de problemas se evaluará la capacidad para obtener parámetros físicos básicos de los sólidos, en diferentes condiciones.
- Evaluación continua: se evaluará la realización de problemas propuestos durante el curso.

### Parte experimental:

- Evaluación continua: Control individual del trabajo en el laboratorio y de la elaboración de datos, resultados y conclusiones de cada práctica.
- Evaluación final: informe escrito y/o comunicación oral del trabajo realizado en alguna de las prácticas.