



Ministerio de Cultura y Educación  
Universidad Nacional de San Luis  
Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias  
Departamento: Ingeniería  
Area: Electrónica

(Programa del año 2023)

### I - Oferta Académica

Materia	Carrera	Plan	Año	Período
Física de los Semiconductores	INGENIERÍA ELECTRÓNICA	OCD N° 23/22	2023	2° cuatrimestre

### II - Equipo Docente

Docente	Función	Cargo	Dedicación
ASENSIO, EDUARDO MAXIMILIANO	Prof. Responsable	P.Adj Exc	40 Hs
ESTEBAN, FRANCISCO DANIEL	Responsable de Práctico	JTP Semi	20 Hs

### III - Características del Curso

Credito Horario Semanal				
Teórico/Práctico	Teóricas	Prácticas de Aula	Práct. de lab/ camp/ Resid/ PIP, etc.	Total
1 Hs	1 Hs	2 Hs	1 Hs	5 Hs

Tipificación	Periodo
B - Teoria con prácticas de aula y laboratorio	2° Cuatrimestre

Duración			
Desde	Hasta	Cantidad de Semanas	Cantidad de Horas
07/08/2023	18/11/2023	15	75

### IV - Fundamentación

En el mundo actual, los dispositivos semiconductores desempeñan un papel esencial en una amplia gama de aplicaciones de la vida cotidiana. Comprendiendo los principios fundamentales de funcionamiento y operación de los semiconductores modernos, se adquieren las bases necesarias para desarrollar herramientas analíticas cruciales en el diseño de dispositivos tanto discretos como integrados. Estas tecnologías, a su vez, impulsan la creación y optimización de circuitos electrónicos innovadores.

Esta asignatura se basa en los fundamentos de la física electrónica y la física del estado sólido, centrándose en la exploración detallada del diseño y funcionamiento de dispositivos electrónicos semiconductores de última generación. El enfoque se inicia cuestionando los modelos atómicos de la mecánica clásica y, consecuentemente, se introduce la necesidad de emplear las herramientas provistas por la mecánica cuántica. A partir de este sólido fundamento, la perspectiva se orienta hacia la ingeniería, donde se lleva a cabo un análisis teórico exhaustivo de las estructuras de diversos dispositivos, derivando relaciones analíticas de sus curvas características.

De manera simultánea, se brinda un enfoque práctico y tangible mediante actividades de laboratorio, donde los estudiantes realizan experimentos para aplicar y consolidar los conceptos teóricos vistos.

Esta asignatura aporta una base sólida para la formación integral del estudiante al impartir conocimientos tanto teóricos como prácticos, que abarcan las disciplinas de la Física y la Ingeniería Electrónica. Al finalizar el curso, cada estudiante estará capacitado para describir el funcionamiento de los dispositivos semiconductores más utilizados y sus tecnologías de fabricación.

## V - Objetivos / Resultados de Aprendizaje

Interpretar las Leyes de la Física Moderna en la descripción del funcionamiento de los semiconductores, utilizando herramientas analíticas y software de cálculo.

Aplicar las leyes de la física cuántica de sólidos cristalinos y conceptos de diagramas de banda de energía para describir las características eléctricas de los semiconductores utilizando herramientas analíticas y software de cálculo.

Relacionar las propiedades fundamentales de los materiales aislantes, conductores y semiconductores utilizados en la fabricación de dispositivos actuales para comprender sus estructuras y funcionamiento, aplicando leyes de la física cuántica de sólidos cristalinos y diagramas de banda de energía.

Comprender el funcionamiento de dispositivos semiconductores actuales para su aplicación en circuitos electrónicos básicos a partir del análisis de sus estructuras físicas y curvas características utilizando herramientas de simulación e instrumentos de laboratorio.

Describir los procesos y tecnologías aplicadas en el diseño y fabricación de dispositivos semiconductores y circuitos integrados considerando las estructuras físicas y sus limitaciones.

## VI - Contenidos

### UNIDAD 1: CONCEPTOS DE MECÁNICA CUÁNTICA Y FÍSICA MODERNA

Materiales semiconductores más utilizados. Cristales y Celdas Unitarias. Fallas de la mecánica clásica a nivel atómico. Hipótesis de Planck. Modelo clásico del átomo de Bohr. Átomo de Hidrogeno, Átomo de hidrogeno como una antena radiante. Modelo cuántico de Bohr. Mecánica cuántica. Principio de Incertidumbre de Heisenberg. Ecuación de Schrödinger, Aplicación al pozo de potencial, Aplicación a la pared de potencial, Ecuación de Schrödinger aplicada a al átomo de un electrón (hidrogeno), Números Cuánticos, Principio de exclusión de Pauli.

### UNIDAD 2: FÍSICA DE LOS SEMICONDUCTORES

Electrones en un sólido. División de los niveles de energía. Bandas de energía. Modelo de enlaces covalentes. Conductores, semiconductores y aislantes. Portadores: electrones y huecos. Energía de huecos y electrones. Masa efectiva. Densidad de estados. Distribución Fermi-Dirac. Densidad de Portadores. Densidad de estados en las bandas de valencia y conducción. Densidad de Portadores en un semiconductor Intrínseco. Ubicación del Nivel de Fermi. Semiconductores Extrínsecos, Semiconductor tipo N, Semiconductor tipo P. Equilibrio Térmico. Densidad de Portadores en Semiconductores Extrínsecos. Neutralidad de Cargas. Nivel de Fermi en Semiconductores Extrínsecos. Semiconductores degenerados  
Comparación entre semiconductores.

### UNIDAD 3: TRANSPORTE DE PORTADORES EN LOS SEMICONDUCTORES

Movimiento térmico de portadores. Movilidad y velocidad de arrastre. Corriente de arrastre, conductividad y resistividad. Difusión. Corriente de Difusión. Corriente total de portadores. Recombinación y Generación de portadores: en equilibrio térmico, en desequilibrio térmico.

### UNIDAD 4: JUNTURA PN

Formación de la región espacial de carga. Barrera de potencial y bandas de energía. Electrostatica de la región de carga espacial. Nivel de Fermi en la unión PN. Barrera de potencial en función del nivel de Fermi. Barrera de potencial en función de las concentraciones de impurezas. Campo eléctrico y potencial en la región de carga espacial. Ancho de la región de carga espacial. El diodo polarizado. Polarización directa. Ecuación de continuidad. Polarización inversa. Corriente en la juntura PN. Características de los diodos reales. Capacitancias en el diodo. Capacitancia de transición (unión). Capacidad de

almacenamiento. Transitorio del diodo

#### **UNIDAD 5: TRANSISTORES BIPOLARES DE JUNTURA**

Introducción e Historia del transistor. Estructura y funcionamiento. Terminología y Regiones de operación. Modos de Operación. Polarización. Determinación de las corrientes y sus relaciones. Corriente de Emisor. Corriente de Colector. Corriente de base. El BJT como amplificador de corriente. Corriente de base como corriente de control. Parámetros del transistor. Curvas Características. Emisor común. Configuración Base Común. Relaciones analíticas para las corrientes. Corriente de emisor

Corriente de colector. Corriente de base. Corrientes para un transistor PNP. Corriente de recombinación en la base.

Expresiones para alfa y beta en función de las constantes físicas.

Modelo Ebers-Moll. El transistor como llave (conmutación).

Carga almacenada. Análisis del control de carga.

#### **UNIDAD 6: TRANSISTORES DE JUNTURA - EFECTO DE CAMPO (JFET)**

Introducción a los transistores de efecto de campo. Simbología.

Construcción y modos de operación.

Ecuación característica de corriente-voltaje. Derivaciones analíticas. Conductancia del canal y transconductancia del JFET.

Circuito equivalente de pequeña señal. Limitaciones de alta frecuencia. Efectos debido a no idealidades.

#### **UNIDAD 7: TRANSISTORES MOSFET**

Introducción a la estructura MOS. Diagramas de bandas de energía. Efectos del voltaje de polarización. Relaciones analíticas para las densidades de carga. Tensión umbral.

Mediciones de capacitancia-voltaje. Acumulación. Agotamiento. Inversión. Condensador MOS. Efectos de las funciones trabajo y las cargas de óxidos.

Introducción a los transistores MOSFET. Estructura, simbología.

Descripción del funcionamiento, regiones operativas.

Características V-I. Derivaciones analíticas.

Transconductancia. Circuitos equivalentes de pequeña señal. Circuito de baja frecuencia. Circuito de alta frecuencia.

Rendimiento en alta frecuencia. Comparación del MOSFET y el BJT.

El interruptor MOSFET y el inversor CMOS.

#### **UNIDAD 8: TECNOLOGÍA DE FABRICACIÓN DE SEMICONDUCTORES**

Introducción a las tecnologías de fabricación. Circuitos integrados monolíticos. Comparación entre silicio, germanio y arseniuro de galio. El proceso de crecimiento de Czochralski.

Dopantes. Corte de lingotes y preparación de obleas.

Procesos de fabricación. Oxidación Térmica. Técnicas de grabado. Difusión. Expresiones para la difusión de la concentración de dopante. Implantación de iones. Fotomáscaras. Fotolitografía.

Crecimiento epitaxial. Metalización e interconexiones. Contactos óhmicos. Encapsulados. Ejemplos de fabricación de dispositivos.

Fabricación de resistencias y condensadores en circuitos integrados.

### **VII - Plan de Trabajos Prácticos**

Se realizarán los siguientes trabajos prácticos:

#### **A - TRABAJOS PRÁCTICOS DE AULA.**

Consisten en un listado de ejercicios teóricos que deberán resolverse en clase. El alumno aplicará las herramientas matemáticas adquiridas para las siguientes temáticas:

Práctico N° 1: “Niveles de Energía y Mecánica Cuántica.”

Niveles de energía del electrón. Principio de incertidumbre. Números Cuánticos. Ejercicio de simulación.

Práctico N° 2: “Física de los Semiconductores.”

Semiconductores intrínsecos y extrínsecos. Dopado. Densidad de estados. Ejercicio de simulación.

Práctico N° 3: “Fenómenos de Transporte de Carga y Semiconductores fuera del equilibrio”

Corrientes de portadores. Movilidad. Conductividad. Resistividad. Recombinación. Ejercicio de simulación.

Práctico N° 4: “Unión PN.”

Electroestática de la juntura con y sin polarización. Ejercicio de simulación.

Práctico N° 5: “Transistor bipolar.”

Corrientes, polarización, regiones de funcionamiento. Ejercicio de simulación.

Práctico N° 6: “Transistores JFET.”

Corrientes, polarización, regiones de funcionamiento. Ejercicio de simulación.

Práctico N° 7: “Transistores JFET.”

Corrientes, polarización, regiones de funcionamiento. Ejercicio de simulación.

Práctico N° 8: “Tecnología de Fabricación de Semiconductores.”

Circuitos integrados monolíticos. Procesos de Fabricación.

## B - TRABAJOS PRÁCTICOS DE LABORATORIO.

Consistirán en actividades realizadas de forma grupal en Laboratorio de Electrónica, utilizando instrumentos específicos de medición y herramientas de software para la simulación. En todos los casos se contará con la asistencia de los docentes.

Práctico de Laboratorio N° 1 : “Diodos”

Obtención de las características V-I del diodo. Certificación del estado del diodo con multímetro.

Ensayo con multímetro y osciloscopio. Lectura de hoja de datos del dispositivo (inglés).

Práctico de Laboratorio N° 2: “Transistores BJT, JFET Y MOSFET”.

Certificación del estado del transistor con multímetro. Polarización. Curvas Características.

Ensayo con osciloscopio. Lectura de hoja de datos del dispositivo (inglés).

Todos los trabajos prácticos de laboratorio deberán ser resueltos y entregados de forma digital antes de la fecha propuesta por los docentes y en la plataforma asignada.

## VIII - Regimen de Aprobación

A - METODOLOGÍA DE DICTADO DEL CURSO:

Las clases teóricas consisten en taller de aula mediante exposición de presentación en PC. Las mismas fomentan la discusión en clase y sientan las bases para la realización de trabajos prácticos.

Se realizarán trabajos prácticos en aula orientados a la teoría para complementar lo expuesto en clases.

Además, se realizarán trabajos prácticos de laboratorio para que el alumno se familiarice con dispositivos semiconductores de manera experimental. Se busca fomentar el trabajo en equipo y el uso de instrumentos para la adquisición y análisis de datos.

B - CONDICIONES PARA REGULARIZAR EL CURSO

Se considera como alumno regular a todo aquel que cumpla con los siguientes requisitos :

- 1.- Cumplir con las condiciones de habilitación (equivalencias) para cursar la materia.-
  - 2.- Haber asistido al 80 % de las clase teóricas y prácticas.
  - 3.- Dar cumplimiento a los informes de trabajos de laboratorios
  - 4.- Haber aprobado los 2 (dos) parciales con la resolución de problemas de los temas asignados ya sea en primer instancia o en etapas de recuperación. La aprobación se logra al superar los 6 puntos en un examen con ejercicios ponderados en puntaje.
- Si el/la estudiante obtiene una calificación entre 5 y 6, se le otorga la posibilidad de rendir un coloquio de un tema definido

por el docente como etapa previa al recuperatorio.

#### C – RÉGIMEN DE APROBACIÓN CON EXÁMEN FINAL

La materia se aprobará rindiendo un examen final escrito con defensa oral. Se sorteará un tema específico y se le brindará al estudiante 15 minutos de repaso. Luego de este tiempo el estudiante deberá desarrollar el tema de manera escrita y posteriormente defenderlo oralmente. Se valorarán: detalle de la explicación, comprensión del tema, ejemplos, respuestas ante casos específicos.

#### D – RÉGIMEN DE PROMOCIÓN SIN EXAMEN FINAL

“El curso no contempla régimen de promoción”

#### E – RÉGIMEN DE APROBACIÓN PARA ESTUDIANTES LIBRES

Los alumnos libres podrán rendir la materia según el ítem C, luego de haber entregado y aprobado los trabajos prácticos teóricos y de laboratorio.

### IX - Bibliografía Básica

[1] FÍSICA DE LOS SEMICONDUCTORES. Tipo: Apuntes de la asignatura. Formato: Digital. Disponibilidad: brindado por los docentes.

[2] DISPOSITIVOS SEMICONDUCTORES. Jasprit Singh. Tipo: Libro. Formato: impreso. Disponibilidad: biblioteca.

### X - Bibliografía Complementaria

[1] ELECTRONICA DEL ESTADO SOLIDO.- Angel D. Tremosa . Ed. Marymar. Tipo: Libro. Formato: impreso. Disponibilidad: biblioteca.

### XI - Resumen de Objetivos

Interpretar las leyes de la física moderna utilizadas para describir el funcionamiento de los semiconductores.

Aplicar las leyes de la física cuántica de sólidos cristalinos y conceptos de diagramas de banda de energía para describir las características eléctricas de los semiconductores.

Relacionar las propiedades de materiales aislantes, conductores y semiconductores utilizados en la fabricación de dispositivos actuales para comprender sus estructuras y funcionamiento.

Comprender el funcionamiento de dispositivos semiconductores actuales para su aplicación en circuitos electrónicos básicos mediante el análisis cualitativo de las curvas características.

Describir los procesos y tecnologías aplicadas en el diseño y fabricación de dispositivos semiconductores y circuitos integrados

### XII - Resumen del Programa

MECÁNICA CUÁNTICA Y FÍSICA MODERANA

FÍSICA DE LOS SEMICONDUCTORES

TRANSPORTE DE PORTADORES

JUNTURA PN

TRANSISTORES BIPOLARES DE JUNTURA

TRANSISTORES JFET

### **XIII - Imprevistos**

En caso de que, por razones de fuerza mayor, la asignatura no pueda dictarse de manera presencial, se contempla la realización de clases de forma virtual. Los trabajos prácticos de laboratorio se realizarán mediante software de simulación en una primera instancia, y luego se coordinará con el alumno para que los realice presencialmente antes de rendir el examen final.

### **XIV - Otros**

- Aprendizajes Previos:

Resolver ecuaciones diferenciales que describan fenómenos físicos.

Manejar herramientas de computación para el cálculo y gráfica de variables físicas.

Aplicar leyes físicas básicas que describan características eléctricas de los materiales.

- Detalles de horas de la Intensidad de la formación práctica:

Cantidad de horas de Teoría: 15hs.

Cantidad de horas de Práctico Aula (Resolución de prácticos en carpeta): 30hs.

Cantidad de horas de Práctico de Aula con software específico: (Resolución de prácticos en PC con software específico propio de la disciplina de la asignatura): 15hs.

Cantidad de horas de Formación Experimental: (Laboratorios, Salidas a campo, etc.) 15hs.

Cantidad de horas de Resolución Problemas Ingeniería con utilización de software específico: (Resolución de Problemas de ingeniería con utilización de software específico propio de la disciplina de la asignatura)

Cantidad de horas de Resolución Problemas Ingeniería sin utilización de software específico: (Resolución de Problemas de ingeniería SIN utilización de software específico)

Cantidad de horas de Diseño o Proyecto de Ingeniería con utilización de software específico: (Horas dedicadas a diseño o proyecto con utilización de software específico propio de la disciplina de la asignatura)

Cantidad de horas de Diseño o Proyecto de Ingeniería sin utilización de software específico: (Horas dedicadas a diseño o proyecto SIN utilización de software específico)

- Aportes del curso al perfil de egreso:

1.1. Identificar, formular y resolver problemas. (Nivel 3)

1.5. Certificar el funcionamiento, condición de uso o estado. (Nivel 2)

1.6. Proyectar y dirigir lo referido a la higiene, seguridad, impacto ambiental y eficiencia energética. (Nivel 2)

2.1 Utilizar y adoptar de manera efectiva las técnicas, instrumentos y herramientas de aplicación.

3.1. Desempeñarse de manera efectiva en equipos de trabajo multidisciplinarios. (Nivel 1)

3.2. Comunicarse con efectividad en forma escrita, oral y gráfica. (Nivel 1)

3.3. Manejar el idioma inglés con suficiencia para la comunicación técnica. (Nivel 3)