





## **DIRECTORIO**

**Mtro. Aurelio Nuño Mayer**

Secretario de Educación Pública

**Mtro. Efrén Rojas Dávila**

Subsecretario de Educación Superior

**Ing. Héctor Arreola Soria**

Coordinadora de Universidades Politécnicas y Tecnológicas



## **PÁGINA LEGAL**

### **Participantes**

M.T.A. Ricardo Cisneros Tamayo - Universidad Politécnica del Valle de México.

Primera Edición: 2010

DR © 2010 Coordinación de Universidades Politécnicas.

Número de registro:

México, D.F.



ISBN-----



## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	6
PROGRAMA DE ESTUDIOS .....	7
FICHA TÉCNICA.....	8
DESARROLLO DE LA PRÁCTICA O PROYECTO.....	10
INSTRUMENTOS DE EVALUACIÓN .....	13
GLOSARIO.....	13
BIBLIOGRAFÍA .....	15



## INTRODUCCIÓN

Los Sistemas Nanoelectromecánicos (NEMS) son dispositivos que integran elementos funcionales de nano electrónica tales como transistores, actuadores mecánicos, bombas, motores, acelerómetros, detectores de sustancias químicas en el aire y sensores para aplicaciones físicas y biológicas. Los NEMS constituyen el siguiente paso en la miniaturización de los ya compactos Sistemas Microelectromecánicos (MEMS) cuyas dimensiones son del orden de los micrómetros. Los NEMS tienen elementos estructurales de dimensiones iguales o inferiores a 100 nm y, en comparación con los MEMS, presentan una masa más pequeña, efectos mecánico-cuánticos potencialmente grandes tales como movimiento de punto cero y una gran cociente superficie/volumen útil para mecanismos de sensado lo cual los hace más interesantes para aplicaciones relacionadas con resonadores mecánicos de alta frecuencia y sensores ultrasensibles. Los NEMS han demostrado ser muy útiles en sectores como la medicina, procesos productivos, aviónica, equipos militares y automovilísticos.

Aplicaciones futuras de los NEMS se prevén en la detección, la generación de energía portátil, recolección de energía, suministro de fármacos y de imagen. Las aplicaciones que han ya alcanzado el mercado o que están disponibles como prototipos comprenden cantilévers ultrafinos para microscopía de fuerza atómica, memorias no volátiles, sensores de nanotubos de carbono, transistores individuales de electrones, nano electrómetros, sensores de pH, detectores de concentración de proteínas, entre otros.

# PROGRAMA DE ESTUDIOS

PROGRAMA DE ESTUDIO	
DATOS GENERALES	
NOMBRE DEL PROGRAMA EDUCATIVO:	INGENIERÍA EN NANOTECNOLOGÍA
OBJETIVO DEL PROGRAMA EDUCATIVO:	Ofrecer bajo las normas de calidad educativa, servicios de formación de profesionistas capaces de aportar soluciones adecuadas a los problemas científicos y tecnológicos que se presentan cada día en la industria y centros de investigación, mediante la formación de profesionales en el área de la nanotecnología.
NOMBRE DE LA ASIGNATURA:	NANO ELECTRO MECANISMOS (NEMS)
CLAVE DE LA ASIGNATURA:	NEM-ES
OBJETIVO DE LA ASIGNATURA:	El alumno será capaz de conocer los principios involucrados en el desarrollo de micro y nanodispositivos específicos para nuevas aplicaciones.
TOTAL HRS. DEL CUATRIMESTRE:	75
FECHA DE EMISIÓN:	30-oct-15
UNIVERSIDADES PARTICIPANTES:	UPVM

CONTENIDOS PARA LA FORMACIÓN			ESTRATEGIA DE APRENDIZAJE												EVALUACIÓN			OBSERVACIÓN	
UNIDADES DE APRENDIZAJE	RESULTADOS DE APRENDIZAJE	EVIDENCIAS	TÉCNICAS SUGERIDAS		ESPACIO EDUCATIVO			MOVILIDAD FORMATIVA		MATERIALES REQUERIDOS	EQUIPOS REQUERIDOS	TOTAL DE HORAS				TÉCNICA	INSTRUMENTO		TOTAL DE HORAS
			PARA LA ENSEÑANZA (PROFESOR)	PARA EL APRENDIZAJE (ALUMNO)	AULA	LABORATORIO	OTRO	PROYECTO	PRÁCTICA			TEÓRICA		PRÁCTICA					
												Presencial	NO Presencial	Presencial	NO Presencial				
UNIDAD I. ANTECEDENTES "INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS INTEGRADOS"	Al término de la unidad, el alumno será capaz de: * Reconocer los principales eventos que dieron origen al desarrollo de la microelectrónica y a la miniaturización de dispositivos electrónicos. * Relacionar los diferentes sistemas y características que constituyen a un MEM y un NEM. Así como conocer los materiales de los cuales están constituidos.	EC: Desarrollo de cuadros sinópticos y mapas conceptuales para conocer y aprender la integración de sistemas mecánicos y electrónicos. ED: Lecturas complementarias relacionadas con los temas. EP: Entrega de un reporte sobre los conocimientos vistos al término de esta unidad.	Exposición por parte del facilitador sobre sistemas integrados, aplicación acerca de las nuevas tecnologías. Preguntas insertadas, ilustraciones y gráficas de las metodologías analizadas.	1- Instrucción Programada. 2- Experiencia estructurada. 3- Resolución de problemas. 4- Ejercitación	X	N/A	N/A	N/A	N/A	Pizzarrón, Plumones, Diapositivas	Proyector, Laptop	8	3	0	0	Documental	Lista de cotejo, exámenes escritos, guía de observación.	11	
UNIDAD II. MICRO-NANO FABRICACIÓN	Al término de la unidad, el alumno será capaz de: * Explicar los fundamentos de la micro-fabricación por sección de una película delgada y/o substracción de partes. * Identificar las principales técnicas para la nanofabricación.	EC: Presentación de cuestionarios y evaluaciones escritas u orales en clase, mostrar algún video sobre las técnicas de micro-nano fabricación. EP: Entregar tabla comparativa de las diferentes técnicas de fabricación	Exposición por parte del facilitador sobre las principales técnicas de nano-fabricación. Preguntas insertadas, ilustraciones y gráficas de las metodologías analizadas.	1- Instrucción Programada. 2- Experiencia estructurada. 3- Resolución de problemas. 4- Ejercitación	X	N/A	N/A	N/A	X	Pizzarrón, Plumones, Diapositivas	Proyector, Laptop	8	3	0	0	Documental	Lista de cotejo, exámenes escritos, guía de observación.	11	
UNIDAD III. ELABORACIÓN Y SÍNTESIS DE NEMS/MEMS.	Al término de la unidad, el alumno será capaz de: * Clasificar nano y micro dispositivos móviles. * Identificar micro acelerómetros como microdispositivos micro electromecánicos.	EC: Estudio de los principios de las diferentes técnicas para la síntesis. ED: Lectura comentada de artículos. EP: Entrega de una tabla de las diferentes técnicas.	Exposición por parte del facilitador sobre la elaboración y síntesis de NEMS/MEMS. Retroalimentación utilizando cuadros sinópticos, exposiciones, esquemas.	1- Instrucción Programada. 2- Experiencia estructurada. 3- Resolución de problemas. 4- Ejercitación	X	N/A	N/A	N/A	X	Pizzarrón, Plumones, Diapositivas	Proyector, Laptop	8	5	0	0	Documental	Lista de cotejo, exámenes escritos, guía de observación.	13	
UNIDAD IV. MODELAO DE NEMS/MEMS.	Al término de la unidad, el alumno será capaz de: * Resolver diferentes modelos, mediante análisis y simulación para NEMS/MEMS. * Aplicar la mecánica del medio continuo, dinámica molecular, teoría de Schrödinger, teoría de funcionales de la densidad al modelado de NEMS/MEMS. * Identificar los distintos modelos para los microsistemas mecánicos (estructuras elásticas), termicas, etc.	EC: Entender el funcionamiento técnico de NEMS/MEMS mediante el modelado análisis y simulación. ED1. Lectura de artículos comentados en clase. ED2. Realizar una simulación utilizando COMSOL. EP: Reporte del modelado de un sistema.	Exposición por parte del facilitador. Estudio del modelo físico-matemático. Simulación con software especializado. Retroalimentación (COMSOL, ANSYS). Metodología para la determinación de un modelo.	1- Instrucción Programada. 2- Experiencia estructurada. 3- Resolución de problemas. 4- Ejercitación	X	N/A	N/A	N/A	X	Pizzarrón, Plumones, Diapositivas	Proyector, Laptop	12	2	4	2	Documental / Campo	Lista de cotejo, exámenes escritos, guía de observación.	20	
UNIDAD V. CONTROL DE NANO Y SISTEMAS MICROELECTROMECANICOS.	Al término de la unidad, el alumno será capaz de: * Aplicar los fundamentos de radiación electromagnética en NEMS/MEMS. * Formular la teoría de estabilidad de sistemas parámetros sistemas. * Aplicar el control inteligente de NEMS/MEMS.	EC: Análisis de sistemas NEMS/MEMS aplicando teoría de Control. ED1. Lectura de Artículos comentada. ED2. Realizar simulación mediante SUGAR (Matlab) EP: Entregar un reporte final de proyecto donde explique el conocimiento de las unidades anteriores.	Exposición por parte del facilitador. Planteamiento de reglas de teoría de control de sistemas tipo NEMS y MEMS.	1- Instrucción Programada. 2- Experiencia estructurada. 3- Resolución de problemas. 4- Ejercitación	X	N/A	N/A	X	N/A	Pizzarrón, Plumones, Diapositivas	Proyector, Laptop	10	2	6	2	Documental / Campo	Lista de cotejo, exámenes escritos, guía de observación.	20	

## BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS:

**Introduction to Nanoscale Science and Technology**  
 Autor: Vezzaro, Massimo, Zeng, Shizhuo, Hsien, James R.  
 Año: 2004  
 Editorial O Referencia: Kluwer Academic Publishers  
 Lugar y Año de la Edición: Boston, 2004  
 ISBN O REGISTRO: 978-1-4020-7377-9

**Microfabrication AND Nanomanufacturing**  
 Autor: Mark, J. Jackson  
 Año: 2008  
 Editorial O Referencia: CRC Press  
 Lugar y Año de la Edición: USA, 2008  
 ISBN O REGISTRO: 978-0-82472431-3

**Principles and Applications of NanMEMS Probes**  
 Autor: Sarin, Neel  
 Año: 2005  
 Editorial O Referencia: Springer Press  
 Lugar y Año de la Edición: Holanda, 2005  
 ISBN O REGISTRO: 978-0-387-25834-8

**Modeling MEMS and NEMS**  
 Autor: John A. Pleschke, David H. Bernheim  
 Año: 2003  
 Editorial O Referencia: Chapman & Hall/CRC Press  
 Lugar y Año de la Edición: Boca Raton, 2003  
 ISBN O REGISTRO: 978-1-58488300-7

**Nano- and Micro-Electromechanical Systems: Fundamentals of Nano- and Microengineering, Second Edition**  
 Autor: Sergey Edward Likhovskiy  
 Año: 2005  
 Editorial O Referencia: CRC Press  
 Lugar y Año de la Edición: USA, 2005  
 ISBN O REGISTRO: 978-0-84932838-1



**FICHA TÉCNICA**

**NOMBRE DE LA ASIGNATURA**

Nombre:	NANO ELECTRO MECANISMOS (NEMS)
Clave:	NEM-ES
Justificación:	Esta asignatura presenta la importancia del desarrollo de MEMS y NEMS en la implementación y aplicación de nuevos dispositivos, que involucra el aprendizaje de diversas áreas como la mecánica, electrónica, materiales e ingeniería biomédica.
Objetivo:	El alumno será capaz de diseñar los procesos de fabricación de los sistemas integrados mediante la aplicación de los conocimientos básicos obtenidos de todas las fases existentes de los mismos, para el desarrollo de los sistemas NEMS.
Habilidades:	Comunicar efectivamente; Saber trabajar en equipo; Ser responsable en la inspección; Conocer las herramientas básicas del control de calidad; Conocer técnicas de muestreo.
Competencias genéricas a desarrollar:	Capacidad de abstracción, análisis y síntesis; Capacidad de aplicar los conocimientos en la práctica; Capacidad de comunicación oral y escrita.

Capacidades a desarrollar en la asignatura	Competencias a las que contribuye la asignatura
<p>Definir el cronograma del proyecto empleando tiempos estándar e históricos de cada tarea para establecer los planes de suministro de materiales y recursos humanos.</p> <p>Definir las etapas del proyecto empleando paquetes de tareas para determinar la ruta crítica, presupuesto, recursos humanos y materiales.</p>	<p>Estructurar diagrama de flujo de proceso e instrumentación, empleando el software especializado para representar el proceso de fabricación.</p> <p>Gestionar proyectos para la fabricación de nanoproductos utilizando herramientas computacionales diseñadas para administrar las diferentes etapas de procesos de fabricación.</p> <p>Establecer los procedimientos de caracterización con base a las especificaciones técnicas del nanoproducto para evaluar las cualidades de los mismos.</p> <p>Gestionar sistemas de calidad y mantenimiento empleando las normas vigentes para mejorar el desempeño del proceso de fabricación de nanoproductos.</p>

	Unidades de aprendizaje	HORAS TEORÍA		HORAS PRÁCTICA	
		presencial	No presencial	presencial	No presencial
Estimación de tiempo (horas) necesario para transmitir el aprendizaje al alumno, por Unidad de Aprendizaje:	ANTECEDENTES "INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS INTEGRADOS"	8	3	0	0
	MICRO-NANO FABRICACIÓN	8	3	0	0
	ELABORACIÓN Y SINTÉSIS DE NEMS/MEMS.	8	5	0	0
	MODELADO DE NEMS/MEMS.	12	2	4	2
	CONTROL DE NANO Y SISTEMAS MICROELECTROMECHANICOS.	10	2	6	2
Total de horas por cuatrimestre:	75				
Total de horas por semana:	5				
Créditos:	5				



## DESARROLLO DE LA PRÁCTICA O PROYECTO

Nombre de la asignatura:	Nano electro mecanismos (NEMS)		
Nombre de la Unidad de Aprendizaje:	CONTROL DE NANO Y SISTEMAS MICROELECTROMECHANICOS.		
Nombre de la práctica o proyecto:	Control de Nanoelectromecanismos.		
Número:	1	Duración (horas) :	6
Resultado de aprendizaje:	Aplicar teoría de control		
Requerimientos (Material o equipo):	Software Especializado (MATLAB SUGAR), Computadoras, Proyector.		
<p>Actividades a desarrollar en la práctica: Definir en prosa las actividades a desarrollar en cada etepa.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ A partir de un modelo establecer leyes de control para un NEMS.</li> <li>✓ Análisis y programación de las leyes de control.</li> <li>✓ Graficar los resultados a</li> <li>✓ Empleo de Software Especializado.</li> <li>✓ Generar un reporte en un procesador de textos donde se informe.</li> </ul>			
<p>Evidencias a las que contribuye el desarrollo de la práctica:</p> <p><b>EP1 Proyecto</b> Entregar un reporte final de proyecto donde aplique el conocimiento de las unidades anteriores.</p>			

**INSTRUCCIONES: Responda a lo que se le pide.**

1. Defina los siguientes conceptos: NEMS, MEMS. ¿Qué materiales se utilizan en la elaboración de estos dispositivos?, ¿Cuáles son sus características?, ¿cuáles sus funciones y aplicaciones?
2. Describa en que consiste la técnica de crecimiento de CVD.
3. A que se refieren los términos de adsorción de desorción.
4. Explique la energía libre de Gibbs, su formulación matemática y como se involucra este concepto en las reacciones químicas en el CVD.
5. Escriba al menos 6 tipos de reacciones químicas que se pueden dar por CVD y ponga su ejemplo.
6. ¿Qué es nucleación y cuantos tipos de nucleación se llevan a cabo cuando se hace el depósito mediante un CVD?, explique cada tipo.
7. Explique la tasa de deposición en un CVD.
8. Menciones los tipos de reactor de CVD dependiendo la presión de la cámara, el calentamiento del reactor y Mecanismo de reacción. ¿Qué características tiene cada tipo?
9. Explique los parámetros que intervienen en el proceso de grabado. Velocidad de Grabado, Uniformidad, anisotropía, bias, selectividad.
10. ¿qué requerimientos debe cumplir un grabado?
11. Menciones al menos 5 reactivos que se utilizan para un grabado húmedo.
12. ¿De cuantas formas se puede dopar un material?
13. El coeficiente de difusión está dado por:

$$D(T) = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{K_B T}\right)$$

El comportamiento del coeficiente de difusión para el  $\text{Ga}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As}$ , donde la  $E_a = 0.9 \text{ eV}$  y  $D_0 = 1.8 \times 10^{-9}$  en un intervalo de temperatura. ¿Cómo es el comportamiento de la Energía de Activación en un gráfico tipo Arrhenius? Explique.

14. Explique ampliamente la primera y la segunda ley de Fick.
15. ¿Por qué los hornos de difusión utilizan por lo regular un tubo de cuarzo?, explique.
16. Explique los principios básicos de la Implantación Iónica, utilice un esquema.
17. En una tabla comparativa escriba las ventajas y desventajas de la difusión e implantación iónica.
18. Describa los términos de: rango, rango proyectado, en la distribución de iones implantados.
19. Mencione de que depende la profundidad de penetración.
20. ¿Qué función tiene un espectrógrafo de masas y una taza de Faraday en un implantador iónico?
21. ¿Qué significa el termino epitaxial?
22. ¿Qué es la homoepitaxia? ¿Qué es la heteroepitaxia?, ¿en que consisten?.
23. ¿De qué parámetros depende la calidad epitaxial?
24. Explique ampliamente la técnica LPE.
25. ¿cómo se crean capas de distintos materiales por LPE?
26. ¿En que consiste la técnica epitaxial VPE? Explique el proceso.
27. ¿Cuantos tipos de reactores podemos encontrar en un VPE?
28. Explique el proceso de la epitaxia por haces moleculares.
29. ¿Qué finalidad tienen las celdas de efusión en la cámara de vacío de MBE?
30. ¿Cuáles son las ventajas y desventajas de esta técnica?

31. Explique ampliamente en que consiste RHEED.
32. ¿Cuáles son los defectos comunes que ocurren en capas epitaxiales?
33. ¿Cuál es el desacople de red para un elemento ternario  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  crecido sobre un substrato de GaAs? Donde el parámetro de red se calcula  $a = 5.6533 + 0.0078x \text{ \AA}$ , en una concentración molar del 23% en aluminio. ¿es un esfuerzo de compresión? ¿es un esfuerzo de tensión? Explique.



Subsistema de  
Universidades  
Politécnicas

## INSTRUMENTOS DE EVALUACIÓN

### Lista de cotejo para proyecto plan de muestra.

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE :

#### DATOS GENERALES DEL PROCESO DE EVALUACIÓN.

Nombres(s) del Alumno(s)	Matrícula:	Firma del alumno(s)
Producto:	Nombre del Proyecto:	Fecha:
Asignatura: Control Estadístico de la Calidad.		Periodo Cuatrimestral:
Nombre del Docente:		Firma del Docente.

#### INSTRUCCIONES

Revisar las actividades que se solicitan y marquen en los apartados "SI" cuando la evidencia se cumple; en caso contrario marque "NO". En la columna "OBSERVACIONES" indicaciones que pueden ayudar al alumno a saber cuáles son las condiciones no cumplidas, si fuese necesario.

Valor del reactivo	Características a cumplir	CUMPLE		OBSERVACIONES
		SI	NO	
<b>4%</b>	<b>Presentación:</b> El trabajo cumple con los requisitos de: a) Buena presentación			
<b>8%</b>	b) Presenta cero errores ortográficos.			
<b>2%</b>	c) Mismo formato (indicado al inicio de curso)			
<b>6%</b>	d) Maneja el lenguaje técnico apropiado			
<b>10%</b>	<b>Introducción y objetivo:</b> la introducción y el objetivo dan una idea clara del objetivo de trabajo, motivando al lector a continuar con su lectura y revisión			
<b>30%</b>	<b>Sustento Teórico:</b> Presenta un panorama general del tema a desarrollar y lo sustenta con referencias bibliográficas y ligas de Internet, cita correctamente a los autores			
<b>15%</b>	<b>Desarrollo:</b> Cumplió con lo establecido en la práctica.			
<b>10%</b>	<b>Resultados:</b> Cumplió totalmente con el objetivo esperado.			
<b>10%</b>	<b>Conclusiones:</b> Las conclusiones son claras y acordes con el objetivo esperado.			
<b>5%</b>	<b>Responsabilidad:</b> Entregó el reporte en la fecha y hora señalada			
<b>100%</b>	<b>CALIFICACION</b>			

## GLOSARIO

1. **MEMS.** Por sus siglas en inglés, Sistemas micro electromecánicos, es la integración de diferentes sistemas (electrónico, mecánico) en una escala micrométrica.
2. **Sistema.** Conjunto de elementos inter-relacionados de forma lógica y dinámica, tiene composición, estructura y entorno.
3. **NEMS.** Es una clase de dispositivos que integra funcionalidad electrónica y mecánica a una escala nanométrica.
4. **Densidad de Componentes.** Es el número de componentes dentro del integrado.
5. **Micro Ingeniería.** Tecnología y práctica de fabricar estructuras tridimensionales y dispositivos con dimensiones del orden de micrómetros.
6. **Lift off.** Técnica utilizada para transferir patrones en metales nobles.
7. **Microelectrónica.** Es la tecnología de semiconductores, mediante la cual se diseñan dispositivos electrónicos encapsulados en grandes densidades en una pastilla única. Para obtener dispositivos electrónicos miniaturizados.
8. **Acelerómetro.** Dispositivo que mide la razón de cambio de la velocidad de un objeto.

## BIBLIOGRAFÍA

### Básica

- TÍTULO:** Introduction to Nanoscale Science and Technology  
**AUTOR:** Ventra, Massimiliano, Evoy, Stephane, Heflin, James R.  
**AÑO:** 2004  
**EDITORIAL O REFERENCIA:** Kluwer Academic Publishers  
**LUGAR Y AÑO DE LA EDICIÓN:** Boston, 2004  
**ISBN O REGISTRO:** 978-1-4020-7757-9
- TÍTULO:** Microfabrication AND Nanomanufacturing  
**AUTOR:** Mark J. Jackson  
**AÑO:** 2006  
**EDITORIAL O REFERENCIA:** CRC Press  
**LUGAR Y AÑO DE LA EDICIÓN:** USA, 2006  
**ISBN O REGISTRO:** 978-082472431-3
- TÍTULO:** Principles and Applications of NanoMEMS Physics  
**AUTOR:** Santos, Hector  
**AÑO:** 2005  
**EDITORIAL O REFERENCIA:** Springer Press  
**LUGAR Y AÑO DE LA EDICIÓN:** Holanda, 2005  
**ISBN O REGISTRO:** 978-0-387-25834-8
- TÍTULO:** Modeling MEMS and NEMS  
**AUTOR:** John A. Pelesko, David H. Bernstein  
**AÑO:** 2003  
**EDITORIAL O REFERENCIA:** Chapman & Hall/CRC Press  
**LUGAR Y AÑO DE LA EDICIÓN:** 2003  
**ISBN O REGISTRO:** 978-158488306-7
- TÍTULO:** Nano- and Micro-Electromechanical Systems: Fundamentals of Nano- and Microengineering, Second Edition  
**AUTOR:** Sergey Edward Lyshevski  
**AÑO:** 2005  
**EDITORIAL O REFERENCIA:** CRC Press  
**LUGAR Y AÑO DE LA EDICIÓN:** 2005  
**ISBN O REGISTRO:** 978-084932838-1

### Complementaria

### Sitio Web