



Indice

Indicaciones para el profesor

1 Lo que debería saberse respecto al manejo de las microondas	2
2. Para la realización de los experimentos	2
3. Utilización simultánea de varias instalaciones experimentales	3
Fórmulas y abreviaturas	3

Capítulo 1 : ¿Cómo funciona?

1. El oscilador Gunn	4
2. La sonda de campo E	7
3. La alimentación Gunn con amplificador	8
4. Experimento básico Generación y comprobación de ondas electromagnéticas	9

Capítulo 2: Propiedades fundamentales de los campos de microondas

5. Polarización del campo electromagnético delante de una antena de bocina	11
6. Medición de la distribución del campo delante de una antena de bocina	16
7. Interferencia de las ondas. Demostración de las ondas estacionarias y determinación de las longitudes de onda λ_0	19
8. Absorción de las microondas	22

Capítulo 3: Propagación de las ondas en las substancias dieléctricas

9. El acortamiento de la longitud de onda λ_m s y la determinación directa del número de refracción n	23
---	----

Capítulo 4: Comportamiento cuasiótico de las microondas

10. Difracción en un borde	26
11. La difracción en una rendija sencilla	28
12. Difracción en la rendija doble	32
13. Difracción en un obstáculo	34
14. Comprobación cuantitativa de la ley de la difracción	35
15. El efecto focalizador de los cuerpos de cuarzo convexos	38
16. Reflexión total	38
17. El interferómetro de Michelson	42

Capítulo 5: Propagación de las ondas a través de conductores

18. Conducción de microondas a lo largo de una línea de Lecher	44
19. Conducción de microondas a través de una conducción metálica hueca	46

Capítulo 6: Aplicaciones de la técnica de las microondas

20. El radar Doppler	48
21. Transmisión de señales con ayuda de microondas	50

Instrucciones de uso

Signos de fórmulas y abreviaturas que se utilizan en el siguiente texto:

- a : amplitud de la portadora no modulada
- α : ángulo de incidencia
- α' : ángulo de reflexión
- β : ángulo de refracción
- β_G : ángulo límite de la reflexión total
- c : velocidad de la luz en el espacio libre
- d : distancia de las rendijas en la rendija doble
- D : ancho de la rendija
- D : desplazamiento del nodo de intensidad de campo
- D_H : dimensión transversal de la bocina
- d_m : grosor del material dieléctrico
- E : intensidad de campo eléctrico
- ϵ_0 : constante dieléctrica del aire libre
- ϵ_r : constante dieléctrica relativa
- f : frecuencia
- l : longitud
- λ : longitud de onda
- λ_0 : longitud de onda en el aire libre
- λ_m : longitud de onda en el medio de índice de refracción n
- μ : movilidad de los portadores de carga
- μ_0 : permeabilidad
- μ_r : permeabilidad relativa
- n : índice de refracción
- P_{ABS} : potencia de la onda absorbida
- P_{EIN} : potencia de la onda incidente
- P_{REF} : potencia de la onda reflejada
- r_0 : límite entre el campo cercano y lejano
- S : densidad de potencia
- ϑ : ángulo de giro de la rejilla de polarización
- T_N : duración de los períodos de la señal de telecomunicación
- T_T : duración de los períodos de la oscilación portadora
- θ : ángulo de difracción
- U : tensión eléctrica
- U_{EMPF} : tensión de recepción de la sonda de campo E, o a la salida del amplificador de 737 020
- V_D : velocidad de desplazamiento de la portadora de carga en el cristal
- Z_1 : Localización del nodo de intensidad de campo sin relleno
- Z_2 : Localización del nodo de intensidad de campo con relleno

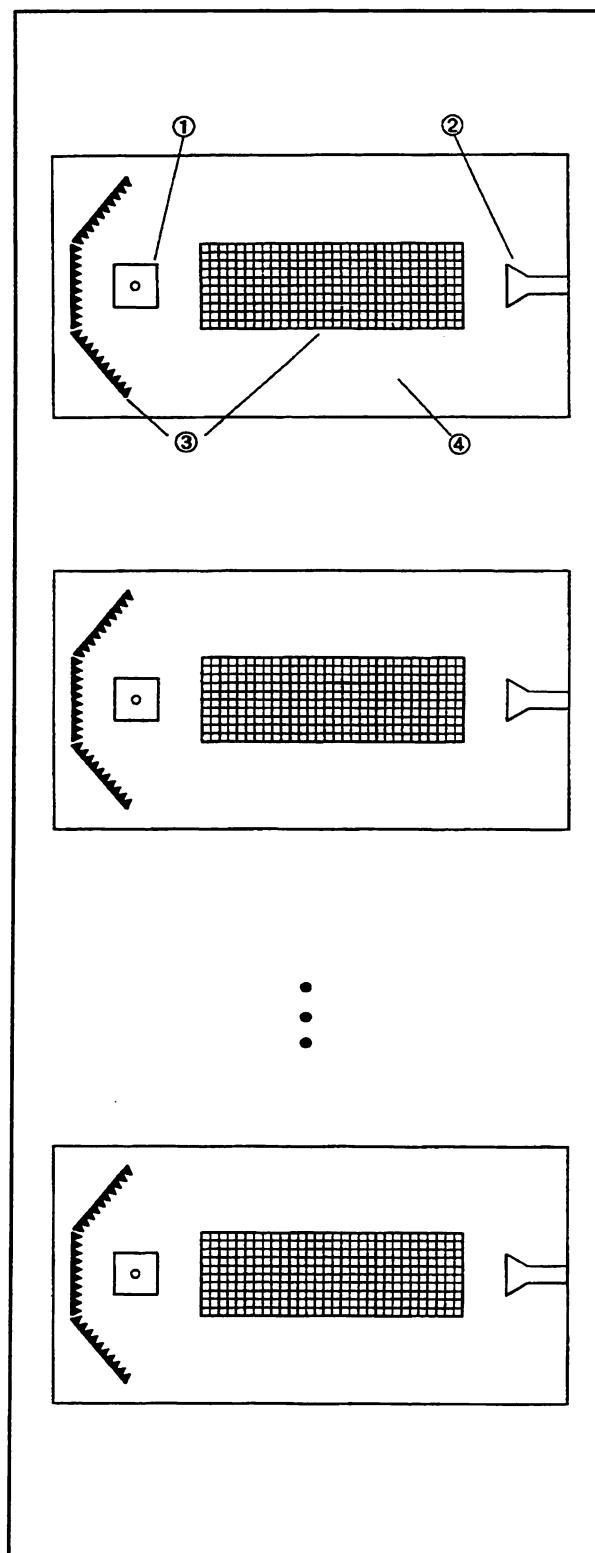


Fig. 0.1: Disposición experimental para la disminución de las perturbaciones y reflexiones mutuas (desacoplamiento espacial de varias instalaciones experimentales en el funcionamiento simultáneo)

- 1: sonda de campo E
- 2: oscilador Gunn
- 3: láminas absorbentes
- 4: plano de la mesa

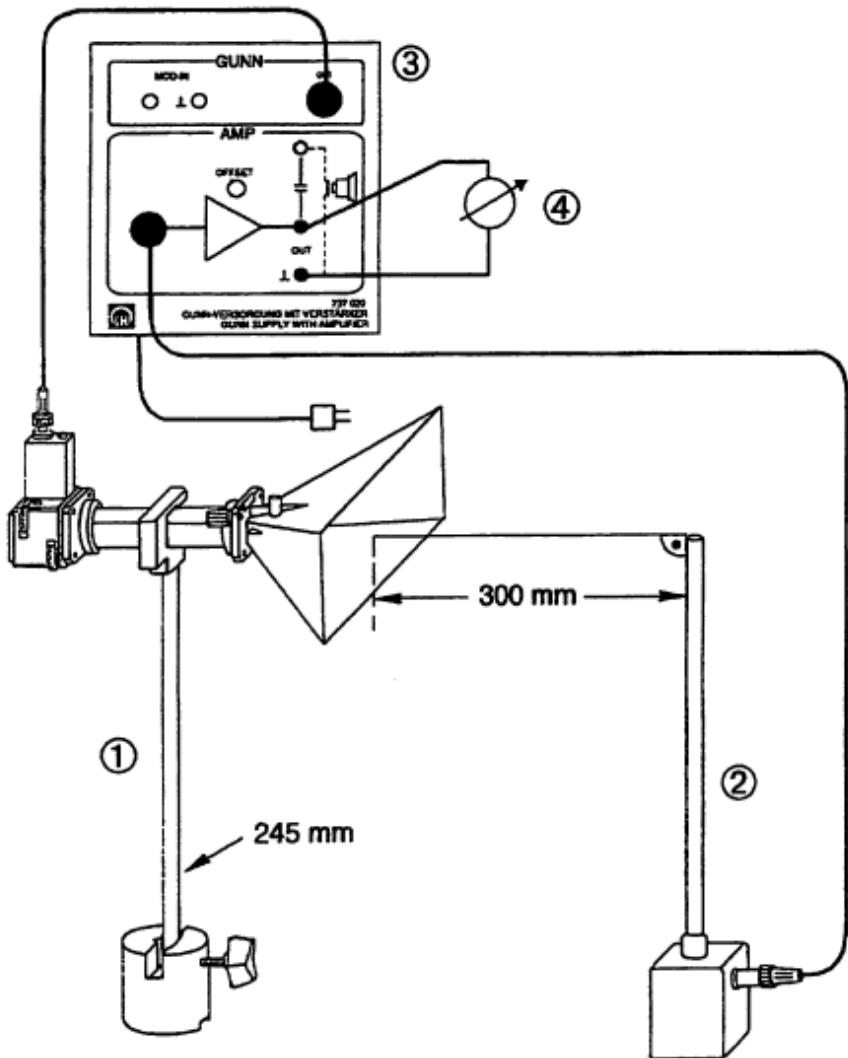


Fig. 4.1: Instalación experimental estándar

- 1: emisor de microondas
- 2: sonda de campo E
- 3: alimentación Gunn con amplificador
- 4: voltímetro

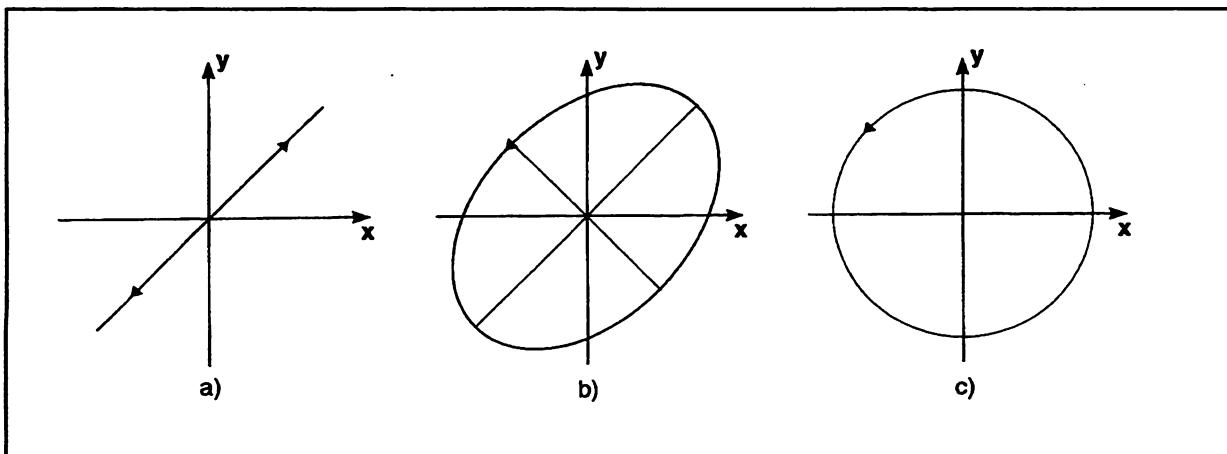


Fig. 5.1: Distintos estados de polarización

- a: polarización lineal
- b: polarización elíptica
- c: polarización circular

Propiedades fundamentales de los campos de microondas

Objetivos:

Demostración de la transversalidad y la polarizabilidad de las ondas electromagnéticas. Determinación de la polarización. Función del retículo de polarización. Confirmación cuantitativa de la ley de Malus. El retículo de polarización en la polarización cruzada. Distribución transversal y longitudinal del campo delante de una antena de bocina. Interferencia de las ondas. Demostración de las ondas estacionarias. Determinación de la longitud de onda en el aire. Absorción de microondas.

5. Polarización del campo electromagnético delante de una antena de bocina

La polarización de una onda electromagnética puede describirse mediante la dirección que señala el indicador de la intensidad del campo eléctrico en el plano perpendicular al sentido de propagación. En caso de que la situación del vector del campo E sea la misma en todo momento, se habla de una onda de polarización lineal. El extremo del vector del campo E se desplaza en ese caso en línea recta. Si traza un círculo, nos hallamos ante una polarización circular. El caso general, en el que el extremo del vector describe una ellipse, se denomina polarización elíptica. Tal como puede verse en la fig. 5.1, puede establecerse la existencia de este tipo de polarización mediante una técnica de medición consistente en medir el eje principal de la ellipse de polarización con ayuda de una sonda de campo E apropiada.

En óptica se conoce el uso del filtro de polarización. Dado que las microondas, en principio, se comportan de manera semejante a las ondas de la luz visible, con la única diferencia de que estas últimas tienen una longitud de onda mucho menor, la polarización de un campo de microondas puede demostrarse también con un retículo de polarización. El retículo que forma parte del conjunto de accesorios 737 27 está incluido como circuito impreso en una tarjeta. Es giratorio y está provisto de una escala de ángulos. ¿Cómo funciona un retículo de polarización de este tipo? Las delgadas bandas de metal -que en este caso son de cobre estañado- evitan la existencia de un campo eléctrico en sentido longitudinal de las bandas metálicas. El campo E sólo puede formarse en sentido perpendicular a dichas bandas. ¿Por qué? Vamos a suponer que el campo discurriera paralelo a las bandas. En tal caso y debido a la elevada conductividad eléctrica del metal, mantendría una corriente de enorme magnitud en las bandas metálicas, con lo que el campo de microondas perdería toda su energía. Recapitulemos: un retículo o una rejilla de alambre paralela, compuesta por bandas metálicas, polariza el campo siempre en sentido perpendicular a la dirección de las bandas.

Las bandas metálicas se hallan sobre una fina capa de soporte dieléctrico: la tarjeta de circuitos impresos. Queremos asumir que esta capa no tiene influencia digna de mención sobre las microondas. Pregunta: ¿qué efecto podría tener en principio el material de soporte?

Aparatos necesarios

Material para la instalación del experimento estándar.

V. Experimento 4

Otros aparatos que se requieren

1 Accesorios de Física Microondas I	737 27
1 retículo de conductores paralelos	
1 portaplacas	
2 bases	300 11

Realización del experimento

- Determinación de la polarización ante el radiador de bocina.

Utilícese la instalación experimental estándar según la fig. 4.1. La sonda de campo E se encuentra situada a unos 300 mm del radiador de bocina. Anótese la tensión de recepción U_{EMPF-V} en la sonda de campo E, colocada en sentido vertical. El experimentador tomará en la mano la sonda de campo E y la mantendrá en sentido horizontal en el campo del radiador de bocina, al tiempo que se cuidade mantener en la misma posición el diodo detector, y anotará la tensión de recepción U_{EMPF-H} .

- ¿Qué polarización tiene el campo delante del radiador de bocina?
- ¿Cómo es la polarización del campo en relación con la posición del radiador de bocina? Haga un dibujo esquemático de esta posición.
- La ley de Malus. Efecto del retículo de polarización sobre la señal recibida.

Introduzca el retículo de polarización en el campo, entre el radiador de bocina y la sonda de campo E. Cúidese de que el radiador de bocina, el retículo y la sonda de campo E están alineados, es decir: situados en una misma línea (v. la fig. 5.2).

Mídase la tensión de recepción U_{EMPF} en relación con el ángulo de giro ϑ en pasos de 10° , desde 0° hasta 180° . ϑ será el ángulo entre las bandas metálicas del polarizador y la dirección del vector E incidente. Escribanse los resultados en la columna 2 de la tabla 5.1, y rellénense asimismo las restantes columnas de la tabla. En la columna U_{EMPF}/U_{MAX} se escribirán los cocientes de U_{EMPF} y la tensión máxima de recepción (normalización). Para llenar la columna $\text{sen}^4 \vartheta$ se necesitará una calculadora de bolsillo. ¿Cuál es la relación entre la dirección de paso del polarizador y la escala de ángulos impresa? Represéntese gráficamente la distribución de ϑ respecto a $\text{sen}^4 \vartheta$. Unanse los puntos formando una curva cerrada. Incorpórense a este mismo diagrama, como cruces, los valores medidos de la columna 3.

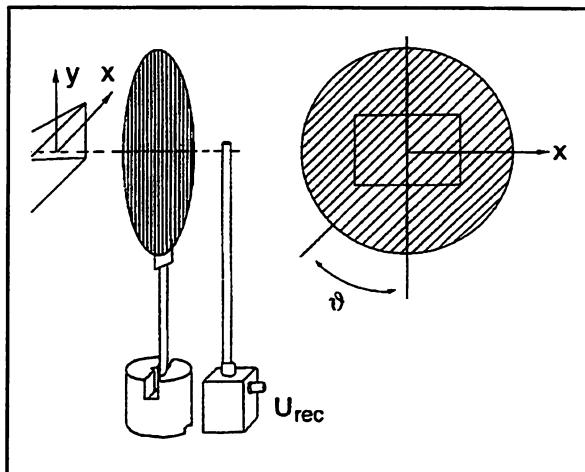


Fig. 5.2: Vista parcial de la instalación experimental con retículo de polarización

Advertencia: La dependencia de la señal de recepción (intensidad) respecto a dirección de paso del polarizador se expresa en óptica como ley de Malus. Esta ley dice así:

$$I(\vartheta) = I_0 \cos^2 \vartheta \quad (5.1)$$

Se supone normalmente que la dirección de paso se sitúa en $\vartheta = 0^\circ$ y que se utiliza un detector no polarizador. La dirección de paso del retículo metálico de 737 27 se sitúa sin embargo perpendicular a la orientación de las bandas metálicas y se halla en $\vartheta = 90^\circ$ ante la presencia de un campo de polarización vertical. En la fórmula 5.1 se sustituye en consecuencia el ángulo por su ángulo complementario, es decir, se cambia el coseno por el seno. Dado que la sonda de campo E sólo reacciona ante la componente del campo en la dirección longitudinal del dipolo, el campo situado detrás del polarizador se somete a una nueva descomposición del vector, esta vez en los ejes principales de la sonda de campo E. La ley de Malus adopta, en consecuencia, la forma siguiente:

$$I(\vartheta) = I_0 \text{sen}^4 \vartheta \quad (5.2)$$

Dedúzcase en un gráfico la ley de Malus para el polarizador de microondas. (análisis vectorial de la intensidad de campo eléctrico en dirección a los ejes principales del polarizador, o de la sonda de campo E.)

Tabla 5.1: Efecto del retículo de polarización:
ley de Malus

ϑ/Grad	$U_{\text{Empf}}/\text{mV}$	$U_{\text{Empf}}/U_{\text{max}}$	$\sin^4 \vartheta$
0			
10			
20			
30			
40			
50			
60			
70			
80			
90			
100			
110			
120			
130			
140			
150			
160			
170			
180			

5. El polarizador se sitúa entre la antena de bocina que polariza verticalmente y la sonda de campo E que lo hace en sentido horizontal (v. la fig. 5.3). Colóquese la sonda de campo E en sentido horizontal. Para ello se necesitará la barra de soporte de 180 mm y una base adicional. Colóquese la sonda de campo E tan alta como ser pueda, y el emisor de microondas tan bajo como sea posible. ¿Qué ley se aplica ahora a la dependencia de la señal de recepción respecto a la dirección de paso del polarizador? Repítase la medición de acuerdo con el punto 4. Escribase el valor medido en la tabla 5.2, y calcúlese la columna con $4\cos^2 \vartheta \sin^2 \vartheta$.

Advertencia: El factor 4 sirve para la normalización. Para $\vartheta = 45^\circ$ la intensidad máxima relativa será ($I = 100\%$). Represéntense los resultados en un gráfico.

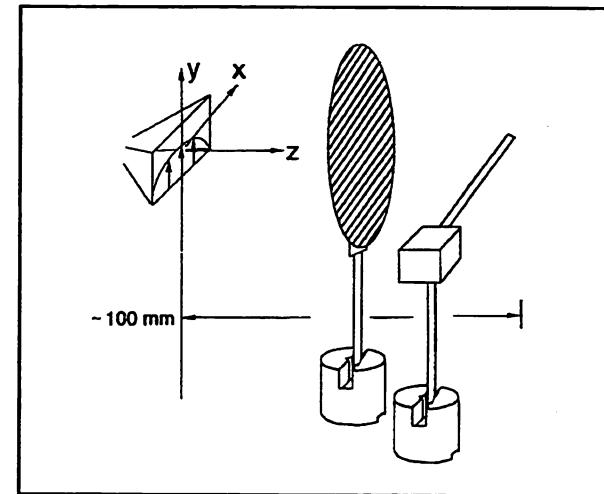


Fig. 5.3: Instalación experimental en la que el radiador de bocina y la sonda de campo E presentan entre sí un giro de 90° (polarización cruzada).

Tabla 5.2: Polarizador entre emisor y receptor polarizados en cruz

ϑ/Grad	$U_{\text{Empf}}/\text{mV}$	$U_{\text{Empf}}/U_{\text{max}}$	$4\cos^2 \vartheta \sin^2 \vartheta$
0			
10			
20			
30			
40			
50			
60			
70			
80			
90			
100			
110			
120			
130			
140			
150			
160			
170			
180			

6. Medición de la distribución del campo delante de una antena de bocina

En este experimento se medirá la distribución del campo delante de una antena de bocina. No se tendrá en cuenta la influencia del entorno. Según indica la fig. 6.1, puede describirse cualquier punto del espacio situado delante de la antena dando sus coordenadas. En la técnica de las antenas se distingue entre campo próximo y campo alejado. El campo próximo, que se forma en la proximidad inmediata de la antena, presenta por lo general una distribución complicada. Con el alejamiento creciente r de la antena se alcanza el campo alejado o distante. El límite entre el campo próximo y el distante puede calcularse con ayuda de la fórmula

$$r_0 > \frac{2D_H^2}{\lambda_0} \quad (6.1)$$

donde D_H es la dimensión transversal de mayor magnitud de la antena.

En relación con el campo distante de la antena pueden hacerse las siguientes formulaciones:

-las componentes eléctricas y magnéticas del campo se orientan tangencialmente a la superficie esférica ($r = \text{const.}$).

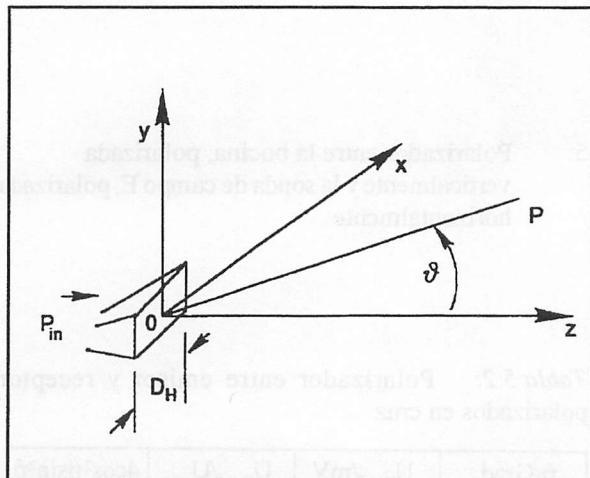


Fig. 6.1: Coordenadas en el campo distante de una antena

-El campo no posee ningún componente longitudinal en la dirección r .

-La dependencia de la densidad de potencia S con respecto a la distancia r se expresa de la siguiente manera:

$$S' \sim \frac{1}{r^2} \quad (6.2)$$

-Las componentes de los campos eléctrico y magnético se orientan en sentido transversal en relación con la dirección de propagación.

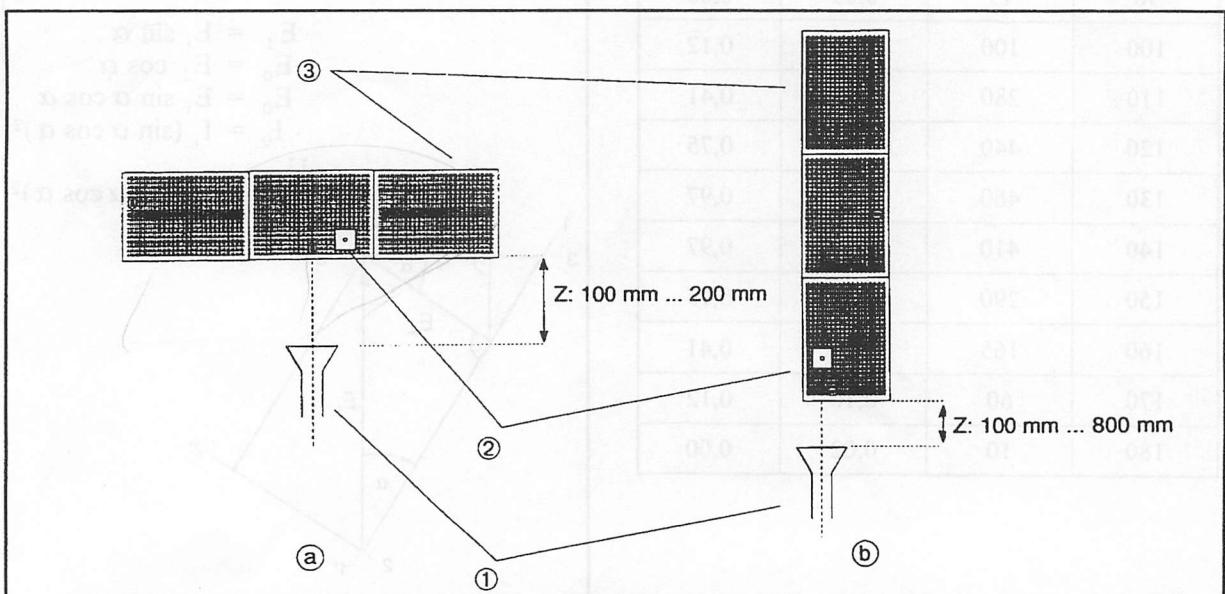


Fig. 6.2: Instalación experimental para medir la distribución del campo producido por una antena de radiador de bocina

- a: escala con cero central para la distribución del campo transversal
- b: escala con cero inicial para la distribución del campo longitudinal
- 1: emisor de microondas
- 2: sonda de campo E
- 3: escala de medición de papel milimetrado



Aparatos necesarios

Material para la instalación del experimento estándar,
v. Experimento 4.

También se necesita:

1 bloc de papel milimetrado tamaño DIN A4

Es recomendable

1 juego de láminas de absorción

737 390

Realización del experimento

1. Péguese entre sí 3 hojas de papel milimetrado con cinta adhesiva de forma que se consiga una escala de medición de unos 800 mm, tal como puede apreciarse en la fig. 6.2.

Tabla 6.1: Distribución del campo transversal delante de una antena de bocina

X/mm	Z = 100 mm		Z = 200 mm	
	$U_{\text{Empf}}/\text{mV}$	$U_{\text{Empf}}/U_{\text{max}}$	$U_{\text{Empf}}/\text{mV}$	$U_{\text{Empf}}/U_{\text{max}}$
-400				
-360				
-320				
-280				
-240				
-200				
-160				
-120				
-80				
-40				
0				
40				
80				
120				
160				
200				
240				
280				
320				
360				
400				

Observación: En este experimento debe cuidarse indefectiblemente que no haya reflexión. El eje de la antena de bocina debería estar alejado no menos de 4 m de toda superficie de un objeto perpendicular. En caso necesario es recomendable recurrir a un espacio de medición con escasos reflejos, como el que puede construirse con ayuda de las láminas de absorción (737 390).

2. Medición de la distribución del campo transversal dentro de la banda X: desde -400 mm hasta +400 mm, en tramos de 40 mm. Para X = 0 mm, la distancia entre la antena de bocina y la sonda de campo E será Z = 100 mm. Anótense los resultados obtenidos en la tabla 6.1. Repítase la medición para una distancia Z = 200 mm entre la antena de bocina y la sonda de campo E (para X = 0 mm). Se representarán en un gráfico ambas distribuciones de campo conjuntamente.
3. Medición de la distribución de campo longitudinal en la banda Z: desde 100 mm hasta 800 mm, en tramos de 40 mm. Anótense los resultados en la tabla 6.2 y represéntense en un gráfico.

Tabla 6.2: Distribución del campo longitudinal delante de una antena de bocina

Z/mm	$U_{\text{Empf}}/\text{mV}$	Z/mm	$U_{\text{Empf}}/\text{mV}$
100		500	
140		540	
180		580	
220		620	
260		660	
300		700	
340		740	
380		780	
420		820	
460			

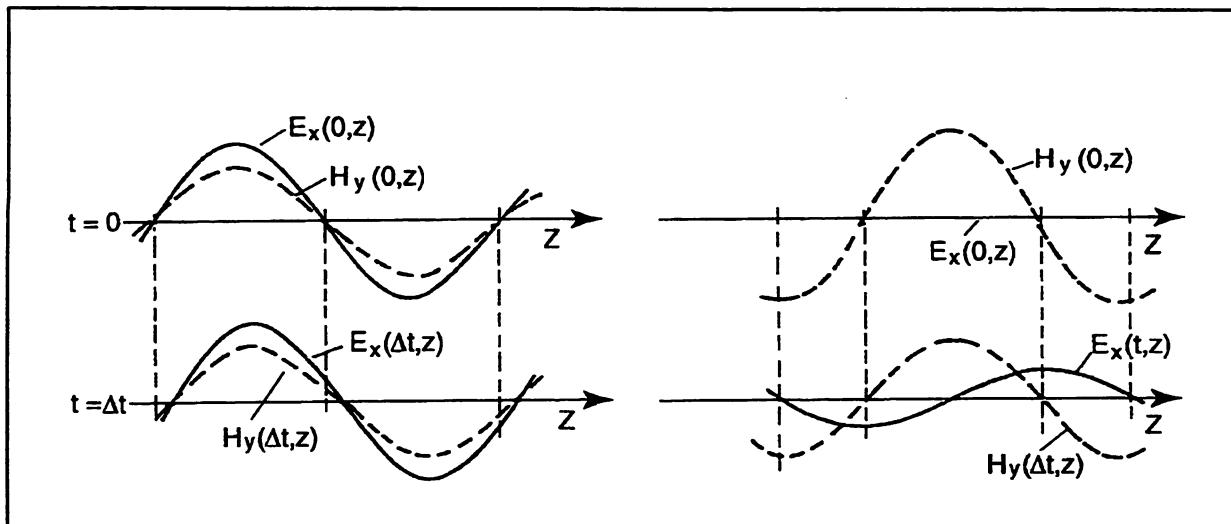


Fig. 7.1: Comparación de ondas progresivas y estacionarias mediante registros momentáneos de la distribución espacial de las intensidades de campo eléctrico y magnético
izquierda: onda progresiva
derecha: onda estacionaria

7. Interferencia de las ondas. Demostración de las ondas estacionarias y determinación de las longitudes de onda λ_0

En el experimento 6 hemos investigado, entre otras cosas, la distribución longitudinal de un radiador de bocina. Hemos medido el campo de una onda progresiva. Si se superpone a una onda progresiva una onda de igual amplitud (amplitud = estado de máxima oscilación), pero cuya dirección de propagación va en sentido contrario, se obtiene una imagen de interferencia, tal como se representen en la Fig. 7.1 derecha. Debido a la superposición de ambas ondas progresivas ha surgido una onda estacionaria cuya amplitud es ahora localmente fija. La onda estacionaria presenta en consecuencia puntos en los que la amplitud es 0 en todo momento (nodos). Tampoco los puntos de máxima amplitud cambian en el tiempo. A esta característica de la onda estacionaria se la denomina ondularidad estacionaria. Resulta fácil generar una onda estacionaria a partir de una onda progresiva, al introducir una placa de metal como reflector en sentido perpendicular a la propagación ondular. La fig. 7.1 muestra el valor momentáneo de la intensidad de campo eléctrico en relación con dos puntos temporales que se suceden con un intervalo corto.

La longitud de la onda progresiva la determina el período espacial y es:

$$\lambda_0 > \frac{c}{f} \quad (7.1)$$

Donde:

c: velocidad de la luz

f: frecuencia

En una onda estacionaria, la distancia entre dos máximos o mínimos es exactamente $\lambda/2$.

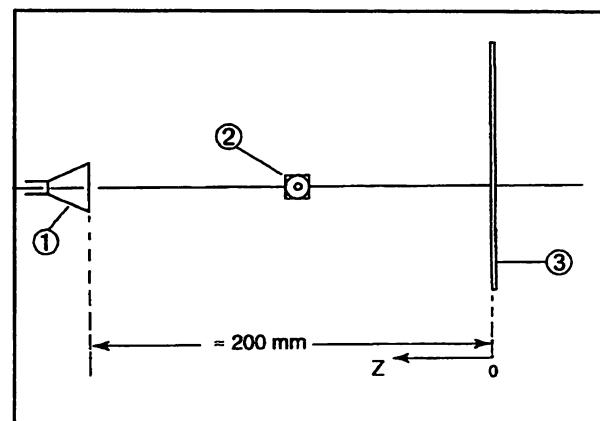


Fig. 7.2: Instalación experimental para ondas estacionarias (control)

- 1: emisor de microondas
- 2: sonda de campo E
- 3: placa metálica



Tabla 7.1: Interferencia de ondas

Aparatos necesarios

Material para la instalación del experimento estándar, y. Experimento 4.

Otros aparatos que se requieren

Accesorios de Física Microondas I

1 placa metálica

1 placa metálica
1 portaplacas

1 porta
1 base

737 27

300 11

Realización del experimento

1. Distribución del campo en una onda estacionaria
Cámbiese la instalación estándar de acuerdo con la fig. 7.2. La placa metálica estará en $Z = 0$ mm.
Mídase la tensión de recepción U_{EMPF} en la zona de 50 mm $<Z < 150$ mm. en tramos de 5 mm. Mídase asimismo la localización y las tensiones de recepción de los máximos y mínimos. Anótense los resultados en la tabla 7.1, y represéntense en un gráfico.
 2. Determinación de la longitud de onda
La longitud de onda puede establecerse a partir de la distribución de la ondularidad estacionaria. Se aprovecha para ello el hecho de que los máximos (o los mínimos) en la distribución de la ondularidad estacionaria aparecen a la distancia precisa de $\lambda/2$. Dado que los mínimos (nodos) son por lo general más fáciles de determinar, se mide su distancia. Mídase la distancia entre 5 mínimos consecutivos y obténgase el valor medio de estas mediciones. ¿Qué magnitud tienen las longitudes de onda en el espacio libre λ , y la frecuencia de las microondas?

Advertencia: La onda emitida por el radiador de bocina no es homogénea ni plana. De donde se sigue que la ondularidad estacionaria es función de la localización. Es máxima inmediatamente antes de la placa metálica y (teóricamente) disminuye progresivamente en dirección al radiador de bocina.



Propagación de las ondas en las substancias dieléctricas

Objetivo de aprendizaje:

Influencia de los medios dieléctricos en la propagación de las ondas electromagnéticas. Analogía con la refracción de la luz visible.

9. El acortamiento de la longitud de onda λ_m y la determinación directa del número de refracción n

La velocidad de fase v_ϕ de las microondas en un material no conductor la da la ecuación

$$v_\phi = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \epsilon_r \mu_0 \mu_r}} \quad (9.1)$$

en las substancias no magnéticas ($\mu_r = 1$) se sigue que:

$$\begin{aligned} v_\phi &= \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \\ &= \frac{c}{n} \end{aligned} \quad (9.2)$$

$$\lambda_m \cdot f = v_\phi = \frac{c}{n} \quad (9.3)$$

$$\lambda_m = \frac{\lambda_0}{n} \quad (9.4)$$

Donde:

- n : índice de refracción del medio
- λ_0 : longitud de onda en el espacio libre
- λ_m : longitud de onda en el medio de índice de refracción n

Debido a la menor velocidad de propagación de la onda en un dieléctrico, la longitud de onda se acorta. La fig. 9.1 representa este fenómeno.

La reducción de la longitud de onda puede demostrarse a partir de la distribución de la ondulación estacionaria en el experimento de reflexión Exp. 7. También puede utilizarse este experimento para determinar el índice de refracción n de un material desconocido. Para deducir la ecuación de determinación de n, se parte del concepto en el que se basa el modelo del camino óptico. El camino óptico es el espacio que ha tenido que recorrer la onda en el vacío en el mismo tiempo.

Siendo

$$l_1 = 2 n_1 Z_1 \quad (9.5)$$

el camino óptico hasta el nodo de intensidad de campo en el medio 1 (índice de refracción n_1), situado en $Z = Z_1$. Se multiplica por el factor 2 debido a la reflexión. Si se introduce en la instalación experimental una probeta de material con índice de refracción $n_2 > n_1$, el camino óptico aumentará a l_2 :

$$l_2 = 2 [n_1 (Z_1 - d) + n_2 d] \quad (9.6)$$

Para llegar al mismo nodo de intensidad de campo, deberá desplazarse la sonda de campo E, o la placa metálica, en un tramo D en dirección a la probeta del material. También D ha de contarse doble. Se obtiene así:

$$\begin{aligned} 2D &= l_2 - l_1 \\ &= 2 [n_1 Z_1 - n_1 d + n_2 d] - 2 n_1 Z_1 \quad (9.7) \\ &= 2 [-n_1 d + n_2 d] \end{aligned}$$

Con: $n_1 = 1$ (aire)
 $n_2 = n$, se obtiene:

$$D = -d + nd$$

$$n = \frac{D}{d} + 1 \quad (9.8)$$

Advertencia: con vista a la univocidad, se toman las siguientes condiciones límite:

$$\lambda_0/2 < d < \lambda_0 \quad y$$

$$1 < n < 2$$

Material necesario

v. experimento estándar.

Se necesita además

1 juego de accesorios de Física,

Microondas I

737 27

1 placa dieléctrica de 3 mm

1 placa metálica

1 juego de accesorios de Física,

Microondas II

737 275

1 placa dieléctrica de 20 mm de espesor,

de PVC

2 portaplaques

2 bases

300 11

1 regla

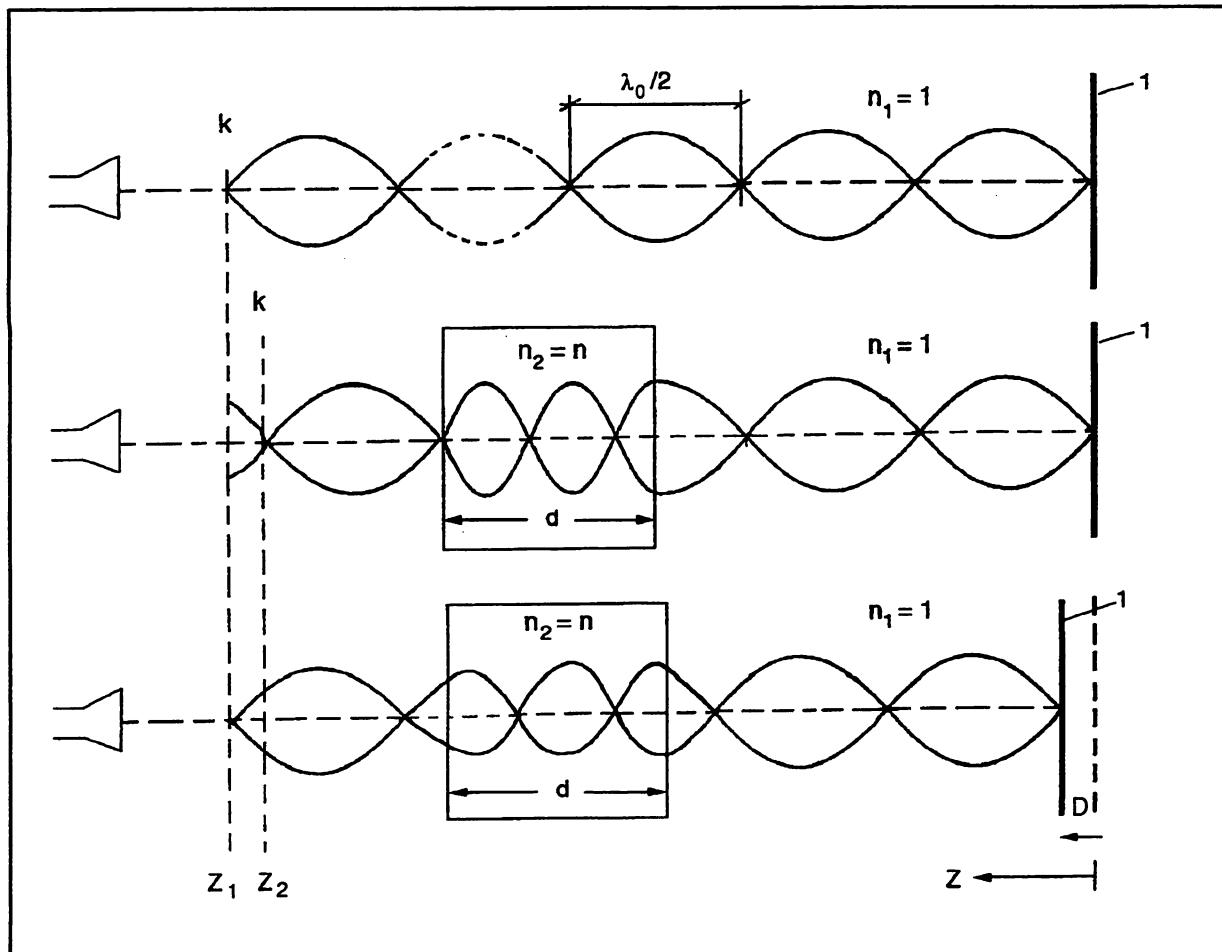


Fig. 9.1: Reducción de la longitud de onda en un dieléctrico

1: reflector

n₁: índice de refracción en el medio 1n₂: índice de refracción en la probeta

d : espesor del medio

Z₁ : localización del nodo de intensidad de campo sin rellenar localización de la sonda de campo EZ₂ : localización del nodo de intensidad de campo con rellenoD : Z₁-Z₂ desplazamiento del nodo de intensidad de campo

1.

Realización del experimento

1.1 Reducción de la longitud de onda para la placa de PVC de 20 mm de espesor

Establézcase la localización Z_1 del mínimo de intensidad de campo k sin relleno. Anótese la localización en la tabla 9.1.

Establézcase la localización Z_2 del mínimo de intensidad de campo k sin relleno. Anótese asimismo en la tabla 9.1.

Determine, según Gl. 9.8 el índice de refracción n de la probeta de material.

Tabla 9.1: Determinación de un índice de refracción n desconocido

Material	Z ₁ /mm	Z ₂ /mm	D	n

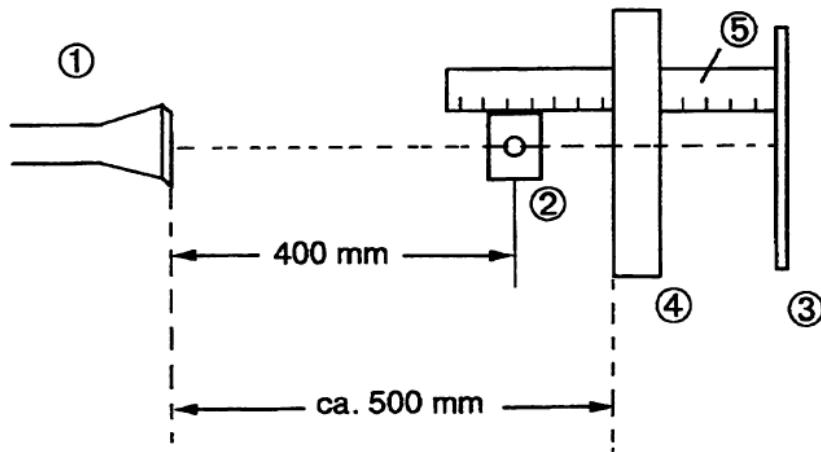


Fig. 9.2: Instalación experimental para la determinación de un índice de refracción n desconocido a partir de la distribución de las ondas estacionarias.

- 1: emisor de microondas
- 2: sonda de campo E en el punto del nodo de intensidad de campo k
- 3: reflector
- 4: material de relleno dieléctrico (placa de PVC de 20 mm de espesor)
- 5: regla

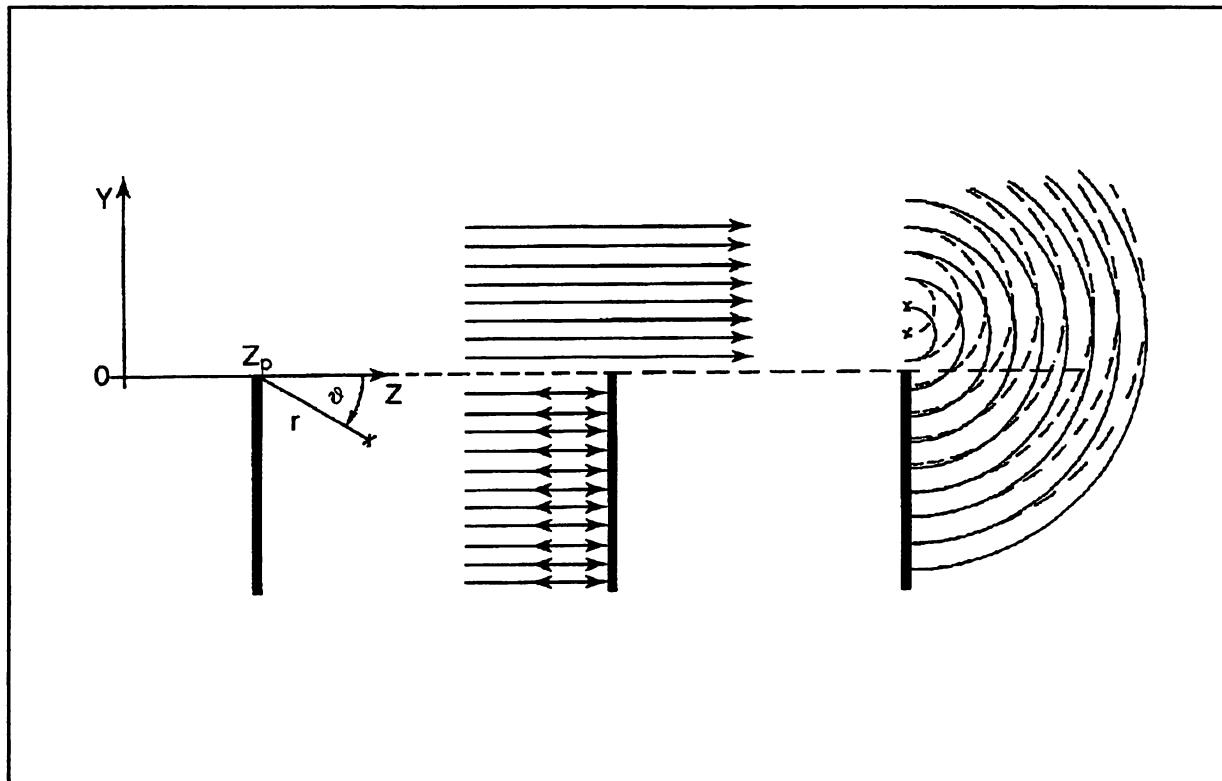


Fig. 10.1

Comportamiento cuasióptico de las microondas

Objetivos :

Delimitación de la óptica de radiación y la óptica ondulatoria en el ejemplo de la difracción. Investigación cuantitativa de la distribución de la intensidad en una sola rendija. Ambito de validez de la difracción de Fraunhofer en la doble rendija. Verificación de la ley de la refracción de Snell. Principios fundamentales de los instrumentos ópticos. Determinación del ángulo límite de la reflexión total. El efecto Goos-Hänchen. Principios básicos de la interferometría.

10. Difracción en un borde

Una placa metálica se halla en posición perpendicular en el campo de una onda plana, homogénea. En la fig. 10.1 se representa a la izquierda la placa metálica con el sistema de coordenadas que se toma como base.

En el centro de la fig. 10.1 se expone la situación con los medios de la óptica geométrica. Según dicha óptica, en la parte superior, la zona no perturbada, cabe esperar un campo homogéneo no alterado, mientras que por

detrás de la placa metálica no se encontraría campo alguno, sería una zona de sombra. En la parte derecha de la figura se representa una solución que responde a las propiedades de la luz y que tiene en cuenta el fenómeno de la difracción. Lo importante aquí es que, también en la zona situada detrás de la placa metálica, donde la óptica de la radiación predice la existencia de sombra, puede demostrarse la existencia de un campo. La difracción, a la que obedece esta desviación de la propagación en línea recta, puede explicarse con ayuda del principio de Huygens. Cada uno de los puntos del frente ondulatorio es, según esta ley, punto de partida de una onda elemental que se propaga de forma esférica. Sólo la superposición de las ondas elementales acaba constituyendo el frente ondulatorio. La óptica ondulatoria produce el resultado, para la difracción en un borde metálico, de que no existe ninguna región libre de campo por detrás de la placa de metal. El siguiente experimento servirá de base para esta afirmación.

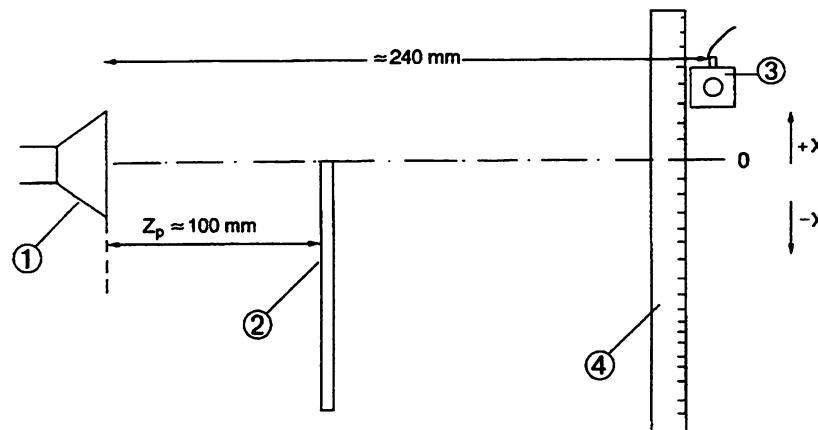


Fig. 10.2: Instalación experimental para la difracción en un borde

- 1: emisor de microondas
- 2: placa de metal
- 3: sonda de campo E
- 4: escala de medición (regla)

Aparatos necesarios

Material para la instalación del experimento estándar, v. Experimento 4.

También se requiere

1 juego de accesorios de Física,

Microondas I

737 27

1 placa metálica de 230 x 230

1 portaplacas

1 base 300 11

Es recomendable

1 regla

Realización del experimento

1. Instalación experimental según la fig. 10.2
2. Medición del campo de difracción dependiendo de la posición transversal de la sonda de campo E. Colocar la placa metálica, de acuerdo con la fig. 10.2, de lado en la zona comprendida entre la abertura de la bocina y la sonda de campo E.
Advertencia: Para facilitar la posición exacta de la sonda de campo E, puede pegarse sobre la mesa de experimentación una hoja de papel milimetrado tamaño DIN A4 o una regla.
Cámbiese la posición transversal X de la sonda en pasos de 10 mm dentro de la zona comprendida entre aprox. -100 mm y +100 mm. Anótese en la tabla 10.1 la tensión de recepción U_{EMPf} y represéntese el resultado en un gráfico.

Tabla 10.1: Difracción en un canto

X/mm	$U_{\text{EMPf}}/\text{mV}$
+50	
+40	
+30	
+20	
+10	
0	
-10	
-20	
-30	
-40	
-50	
-60	
-70	
-80	
-90	
-100	
-110	

Si se radian microondas sobre un canto metálico, el receptor muestra que sigue habiendo energía en la zona de sombra geométrica. Lo cual significa que las microondas se desvían al incidir sobre el borde del metal.

11. La difracción en una rendija sencilla

También en este caso puede demostrarse la existencia de una imagen de difracción a la izquierda y a la derecha, en las zonas de sombra, lo que supone una desviación del camino geométrico de la radiación.

En la fig. 11.1 vuelve a representarse, a la izquierda, la situación tal como sería de acuerdo con la óptica geométrica. En la parte derecha se dibuja la imagen de difracción por detrás de la rendija, tal como la predice la óptica ondulatoria. En el centro de la rendija, perpendicular al plano de la misma se halla el máximo principal del campo de difracción. Este máximo desciende de manera simétrica a ambos lados con el aumento del ángulo de difracción θ . La imagen la determina de manera decisiva la relación entre la longitud de onda λ_0 y la anchura de la rendija D. Si esta relación es mayor de 1, aparecen en la imagen de difracción puntos cero. Estos mínimos de intensidad tienen su origen en la interferencia destructiva, es decir, en la mutua extinción de las ondas elementales de Huygens. Se presentan con ángulos de difracción θ_m para los que es de aplicación:

$$\sin \theta_m = m \frac{\lambda_0}{D} \quad (11.1)$$

D : ancho de la rendija

λ_0 : longitud de onda

m : 1,2,3...

Si se reduce D hasta el punto en que $\lambda_0/D = 1$, sólo se medirá la distribución de intensidad en el máximo principal. El primer mínimo no pude alcanzarse ya, puesto que $\sin \theta < 1$.

Los máximos de intensidad se produce con ángulos θ_n en los que

$$\sin \theta_n = n \frac{\lambda_0}{2D} \quad (11.2)$$

para n = 3, 5, 7...

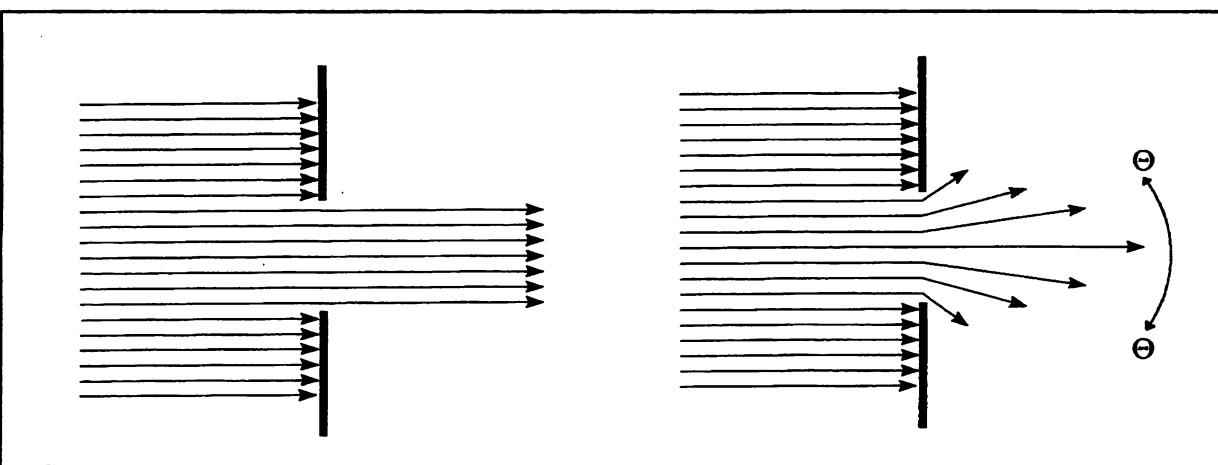


Fig. 11.1: Difracción en la rendija sencilla

Observación para quienes tengan interés por las matemáticas:

Para la distribución de la intensidad en la rendija sencilla se aplica:

$$I(\Theta) = I_0 \left[\frac{\sin\left(\pi \frac{D}{\lambda_0} \sin\Theta\right)}{\pi \frac{D}{\lambda_0} \sin\Theta} \right]^2 \quad (11.3)$$

Las fórmulas anteriores 11.1 u 11.2 para la localización de las franjas oscuras (= mínimos) y de las franjas claras (= máximos) pueden deducirse de la fórmula 11.3. Se entiende por intensidad el valor temporal medio de la potencia, que una onda transporta a través de la superficie unitaria en dirección perpendicular a la dirección de propagación. Ahora bien, la potencia y la intensidad de campo mantienen entre sí una relación cuadrática. En consecuencia, la distribución de la intensidad de campo tras la rendija será proporcional a $\sin x/x$. ¿Qué es lo que medimos con la sonda de campo E? ¿Cómo sería, en consecuencia, la imagen de difracción que se mediría con ella?

Realización del experimento

- Instálese el experimento de acuerdo con la fig. 11.2. Utilícese para la colocación de la sonda de campo E el patrón con división de grados.
- Distribución de la intensidad en la rendija sencilla
Elijanse sucesivamente los anchos de rendija $D = 40 \text{ mm}$ y $D = 60 \text{ mm}$.
Mídase la tensión de recepción $U_{\text{EMPF}}/\text{mV}$. Anótense los resultados de la medición en la tabla 11.1. Regúlense los valores de medición sobre la base del valor máximo U_{max} , y represéntense en un gráfico la tensión de recepción normalizada sobre el ángulo Θ .

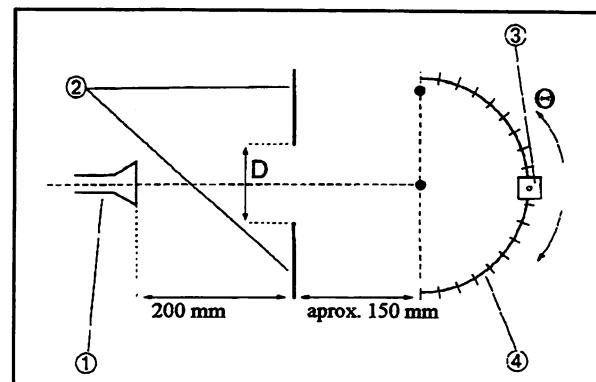


Fig. 11.2: Instalación experimental

- emisor de microondas
- placas metálicas con portaplatas y bases
- sonda de campo E
- patrón de ángulos, v. anexo

Aparatos necesarios

Material para la instalación del experimento estándar, v. Experimento 4.

Se requiere además

1 juego de accesorios de Física,

Microondas I 737 27

1 placa metálica de 230 x 230

1 juego de accesorios de Física,

Microondas II 737 275

1 placa metálica de 230 x 230

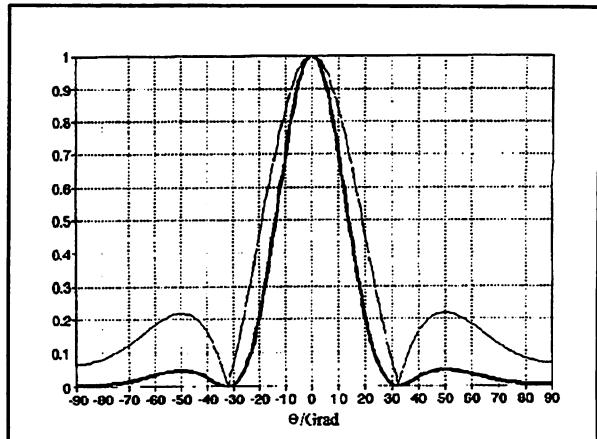
2 portaplatas

2 bases 300 11

Tabla 11.1: Difracción en la rendija sencilla

$$\lambda_0 = 32 \text{ mm}$$

Θ/Grad	D = 40 mm		D = 60 mm	
	$U_{\text{Empf}}/\text{mV}$	$U_{\text{Empf}}/U_{\text{max}}$	$U_{\text{Empf}}/\text{mV}$	$U_{\text{Empf}}/U_{\text{max}}$
70				
60				
50				
40				
30				
20				
10				
0				
-10				
-20				
-30				
-40				
-50				
-60				
-70				



Curva gruesa: distribución de la intensidad en la rendija sencilla D = 60 mm

Curva fina: distribución de la intensidad de campo en la rendija sencilla D = 60 mm

Obsérvese que la distribución de la intensidad de campo eléctrico por detrás de la rendija sencilla es igual a la raíz de la distribución de la intensidad. Con la sonda de campo E medimos (en caso de que se cumpla la ley del cuadrado para el diodo del detector) el cuadrado de la intensidad de campo eléctrico.

Respuesta

Cálculo de la situación de los mínimos de intensidad a partir de la fórmula 11.3

$$I(\Theta) = 0$$

$$\Rightarrow \sin(\pi \frac{D}{\lambda_0} \sin \Theta) = 0$$

$$\pi \frac{D}{\lambda_0} \sin \Theta = m\pi \quad m = 1, 2, 3 \dots$$

$$\sin \Theta = m \frac{\lambda_0}{D}$$

$$\Theta = \arcsin\left(m \frac{\lambda_0}{D}\right)$$

$$\text{para } \frac{\lambda_0}{D} = \frac{32}{60}$$

$$\Rightarrow \Theta_1 = \arcsin\left(\frac{32}{60}\right) = 32,2^\circ$$

13. Difracción en un obstáculo

Hasta este momento hemos investigado imágenes de difracción producidas por frentes de ondas planas que inciden sobre una rendija. Para poder deducir de estas experiencias una teoría manejable en alguna medida hemos partido de la base de que la rendija se hallaba en una placa de metal por lo demás ilimitadamente extensa. Aquí queremos investigar cualitativamente la difracción en una obstáculo de extensión limitada.

Advertencia: para facilitar la colocación de la placa en su posición exacta, fíjese la regla a la mesa de experimentación con cinta adhesiva. Cámbiese la posición transversal X de la sonda de campo E en pasos de 10 mm, dentro de la región de -150 mm hasta +150 mm. Anótese la tensión de recepción U_{Empf} en la tabla 13.1 y represéntese el resultado en un gráfico.

Tabla 13.1: Difracción en un obstáculo

Aparatos necesarios

Material para la instalación del experimento estándar, v. Experimento 4.

Se requiere además

1 juego de accesorios de Física,

Microondas II

737 275

1 placa metálica de 230 x 60

1 portaplacas

1 base

300 11

Es recomendable

1 regla

Realización del experimento

- Instalación del experimento según la fig. 13.1
- Medición del campo de difracción a la «sombra» del obstáculo. Colocar la placa metálica, de acuerdo con la fig. 13.1, entre la apertura de la bocina y la sonda de campo E.

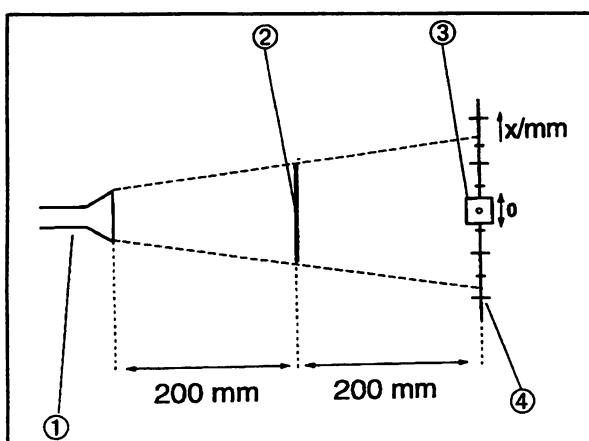


Fig. 13.1: Instalación experimental para la difracción en un obstáculo

- 1: emisor de microondas
- 2: placa metálica de 60 x 230 sobre el portaplacas y la base
- 3: sonda de campo E
- 4: escala de medida (regla)

X/mm	$U_{\text{Empf}}/\text{mV}$	X/mm	$U_{\text{Empf}}/\text{mV}$
-150		+10	
-140		+20	
-130		+30	
-120		+40	
-110		+50	
-100		+60	
-90		+70	
-80		+80	
-70		+90	
-60		+100	
-50		+110	
-40		+120	
-30		+130	
-20		+140	
-10		+150	
0			

14. Comprobación cuantitativa de la ley de la difracción

Sabemos por la óptica que un rayo de luz que incide sobre una superficie plana que limita dos medios transparentes con distinto índice de refracción, en parte se refleja y en parte se refracta. La fig. 14.1 presenta esta situación y reproduce las dos definiciones habituales del ángulo de incidencia α y del ángulo de refracción β .

El rayo refractado, en el medio ópticamente más denso, es decir en la substancia con un más elevado índice de refracción (n_2), se desvía hacia la perpendicular de la superficie límite. El ángulo de incidencia y el de reflexión se relacionan entre sí, en la ley de la refracción mediante el índice de refracción:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n \quad (14.1)$$

Se supondrá que $n_2 = n$, $n_1 = 1$. En el experimento siguiente se investigará el cambio experimentado por la dirección de propagación de las microondas como consecuencia de la refracción en un semicilindro. El semicilindro está vacío y puede llenarse con diversas substancias (aquí utilizaremos únicamente arena de cuarzo). El experimento demuestra que la ley de la refracción que se aplica en óptica tienen también validez para las microondas.

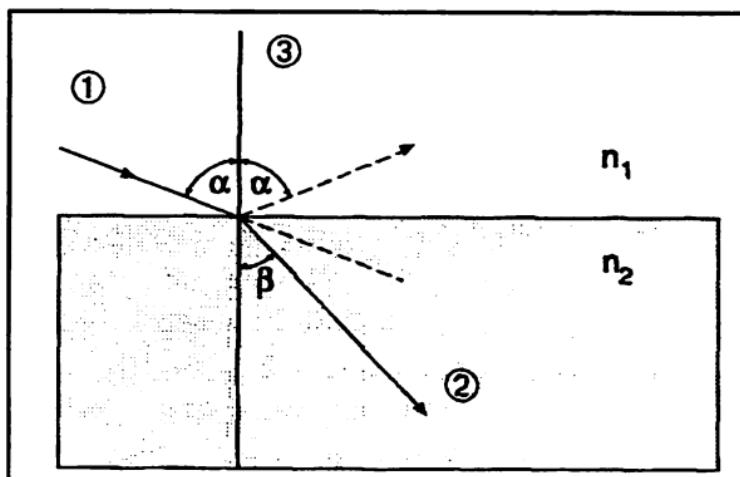


Fig. 14.1: Refracción en un medio ópticamente más denso

- 1 : «rayo» de microondas incidente
- 2 : «rayo» de microondas refractado
- 3 : perpendicular respecto a la superficie límite
- α : ángulo de incidencia
- β : ángulo de refracción
- n_1 : índice de refracción en el medio 1
- n_2 : índice de refracción en el medio 2
- (aquí: $n_1 = 1$ (aire) y, por tanto, $n_1 < n_2$)

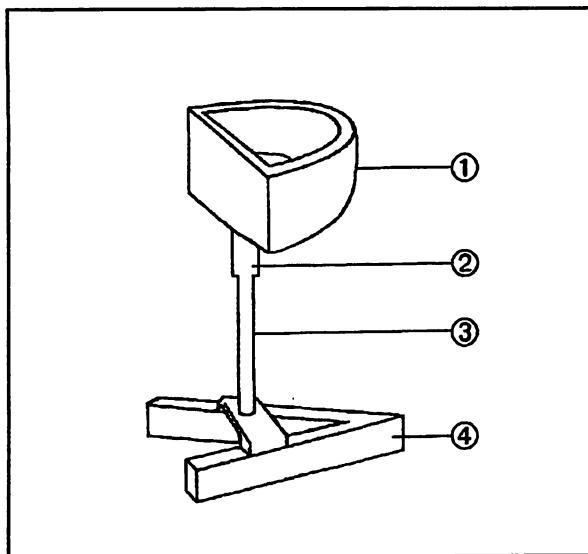


Fig. 14.2: Montaje del semicilindro

- 1: semicilindro
2: pieza cilíndrica intermedia
3: barra de sujeción de 180 mm
4: pie pequeño en forma de V

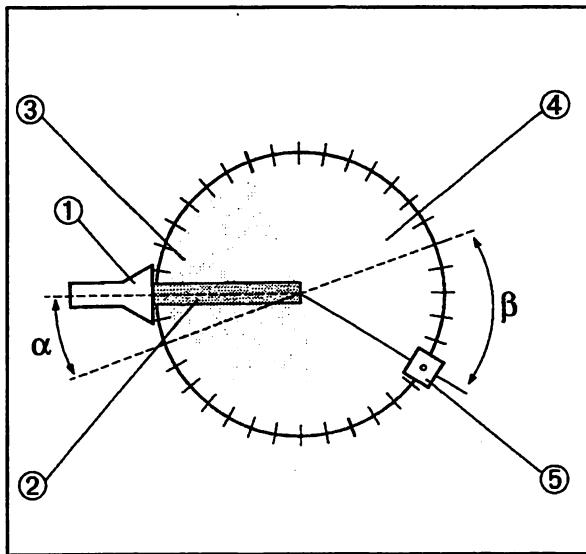


Fig. 14.3: Instalación del experimento de refracción en un semicilindro hueco

- 1: emisor de microondas
2: regla
3: semicilindro hueco
4: receptor con graduación de ángulos (anexo)
5: sonda de campo E

Aparatos necesarios

Material para la instalación del experimento estándar, v. Experimento 4.

Se requiere además

1 juego de accesorios de Física,

Microondas II 737 275

- 1 semicilindro hueco
1 pieza cilíndrica intermedia
2 frascos de plástico con arena de cuarzo
1 un embudo

1 un pie pequeño en forma de V 300 02

Es recomendable

1 regla

Realización del experimento

El semicilindro se instala en el «pasillo de radiación» del experimento estándar. Véase la fig. 14.2

Atención: ¡Por razones de estática, el montaje debe hacerse únicamente sobre un pie pequeño!

El nivel medio debe estar situado a la altura del detector de la sonda de campo E. Esto se consigue utilizando la barra de soporte de 180 mm y la pieza cilíndrica intermedia (de 27 mm de diámetro y 75 mm de longitud). Véase la fig. 14.2.

Lléñese el semicilindro cuidadosamente con arena de cuarzo (se necesitará aprox. 1,5 kg).

Pregunta 1: ¿Qué ventaja representa el uso de la pieza cilíndrica intermedia? Sería posible asimismo utilizar una barra soporte metálica de la longitud correspondiente.

Pregunta 2: ¿Qué ventaja podría tener la utilización de un semicilindro para la instalación experimental que se planea?

1. Instalación experimental

Colóquese el radiador de bocina frente al semicilindro, de manera tal que la bocina señale radialmente en dirección a su punto medio. (¡Compruébese el ángulo de incidencia α) El ángulo de incidencia α puede leerse ahora en cada caso en la escala de ángulos del cilindro hueco.

2. Comprobación de la ley de la refracción en el semicilindro lleno

Desplácese la sonda de campo E sobre la escala de ángulos (v. anexo) para cada ángulo de incidencia α , hasta hallar el máximo de U_{EMPF} . La posición de la señal de recepción máxima corresponde al ángulo de refracción β . Anótese el ángulo β en la tabla 14.1. ¿Calcúlense los valores de $\sin \alpha$, $\sin \beta$, n para todos los ángulos sucesivos. ¿Qué conclusiones saca el experimentador de los resultados que obtiene?

3. Comprobación de la ley de la refracción en el semicilindro vacío



Vuelva a echarse la arena en los frascos, con sumo cuidado, con ayuda de un embudo. Es recomendable realizar esta operación encima de una cubo de la basura. Repítase el experimento cualitativamente (no vale la pena utilizar la tabla). ¿Qué observa ahora el experimentador?

Tabla 14.1: Refracción en cuerpo semicilíndrico

α/Grad	β/Grad	$\sin \alpha$	$\sin \beta$	n
0				
10				
20				
30				
40				
50				

Respuestas

1. Se obtiene un soporte para el semicilindro con escasa reflexión. Se evita así la difracción en los bordes, como ocurre en el Experimento 13.
2. El cuerpo semicilíndrico posee 2 superficies de refracción:
 - una pared en forma semicircular
 - y una pared plana.

En la superficie exterior semicircular, el ángulo de incidencia α es siempre de 0° , es decir que la incidencia se produce siempre en dirección a la perpendicular. En esta superficie circular no se produce refracción. La refracción que se investiga en este experimento procede de la pared exterior plana.

15. El efecto focalizador de los cuerpos de cuarzo convexos

La refracción de la luz se aprovecha para construir instrumentos ópticos, tales como las gafas, lentes, telescopios, etc.

Aparatos necesarios

Material para la instalación del experimento estándar.

Se requiere además

1 juego de accesorios de Física,

Microondas II

737 275

1 semicilindro hueco

1 pieza cilíndrica intermedia

1 lente biconvexa (convergente)

2 frascos de plástico con arena de cuarzo

1 un embudo

1 un pie pequeño en forma de V

300 02

Es recomendable

1 regla

Realización del experimento

Se investigará aquí, cualitativamente, el efecto focalizador de objetos llenos de arena (lentes biconvexas o cuerpos semicilíndricos).

1. Instálese el experimento según la fig. 15.1.
2. Hágase una medición de referencia de la señal de recepción en el «pasillo de radiación» sin el cuerpo focalizador. Anótese la señal de recepción $U_{EMPF,0}$.
3. Determínese la señal de recepción máxima $U_{EMPF,max}$ tras instalar la lente de focalización. Deberá optimizarse la posición de la lente ante la sonda de campo E.

Resultado del experimento

2. $U_{EMPF,0} \approx 450 \text{ mV}$
3. $U_{EMPF,max} \approx 4500 \text{ mV}$.

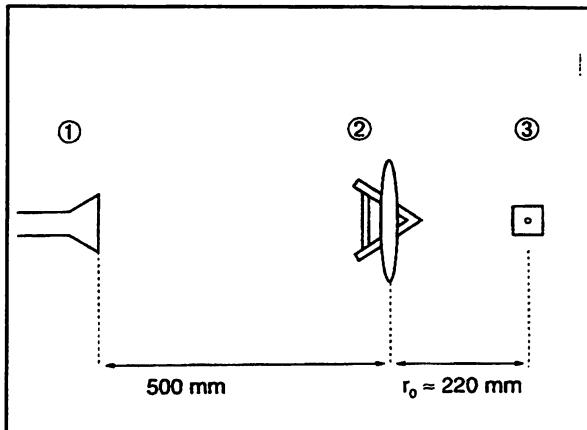


Fig. 15.1: Instalación experimental para investigar el efecto focalizador de los cantos de refracción
 1: emisor de microondas
 2: lente biconvexa montada sobre un pie pequeño
 3: sonda de campo E

16. Reflexión total

Determinación del ángulo límite de la reflexión total

Si una onda electromagnética plana incide, desde un medio óptico más denso n_2 , en la superficie límite con un medio óptico menos denso n_1 (es decir $n_1 < n_2$), no se produce solamente la refracción que aparta a la onda de la perpendicular, sino una parte de la misma es reflejada. Este aspecto no se tuvo en cuenta en el experimento anterior. La ley de la reflexión postula la igualdad entre el ángulo de incidencia y el de reflexión. La fig. 16.1 representa este hecho.

Si el ángulo de incidencia β sobrepasa un determinado valor, no habrá ninguna salida de energía hacia el medio más denso. El ángulo que corresponde a este fenómeno se llama ángulo límite de la reflexión total β_g . Depende de los índices de refracción n_1 , n_2 . El ángulo de incidencia en el material óptico más denso puede variar desde $\beta = 0^\circ$ hasta 90° . Dado que la refracción de la luz se produce en el material ópticamente menos denso, el ángulo de refracción β' es siempre mayor que el de incidencia. Según la ley de la refracción de Snell:

$$n_2 \operatorname{sen} \beta = n_1 \operatorname{sen} \beta' \quad (16.1)$$

Cuando $\beta = \beta_g$ la luz refractada pasa rozando ligeramente la superficie límite. Si el ángulo de incidencia sobrepasa a β_g , aparece la reflexión total. En relación con β_g se dice que:

$$n_2 \operatorname{sen} \beta_g = n_1$$

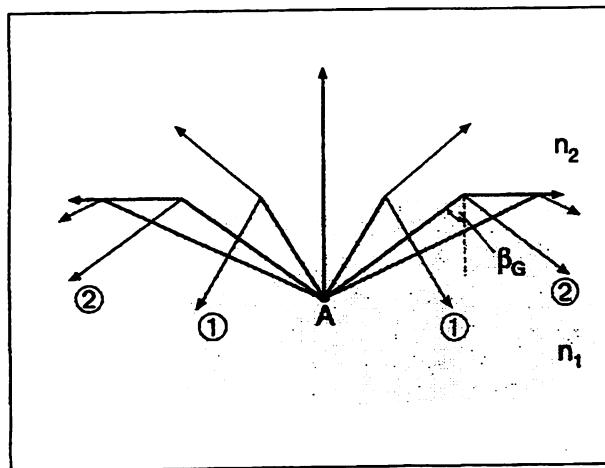


Fig. 16.1: Explicación de la reflexión total

A : fuente de luz en el medio óptico más denso n_2
 1 : rayo luminoso reflejado parcialmente
 2 : rayo luminoso reflejado totalmente
 β_G : ángulo límite de la reflexión total
 n_1 : número de refracción del medio óptico menos denso
 n_2 : número de refracción del medio óptico más denso, es decir: $n_2 > n_1$

En relación con $n_1 = 1$, se dice que:

$$\beta_G = \arcsen \frac{1}{n_2} \quad (16.2)$$

El efecto Goos-Hänchen

En un análisis más exacto de acuerdo con la Teoría de Campos, se comprueba que, cuando se produce la reflexión total, la onda reflejada penetra en el medio óptico menos denso unas 3...4 longitudes de onda, para propagarse allí, como onda de superficie, a lo largo de la superficie límite. En la práctica, esto significa una transferencia de radiación entre la radiación incidente y la totalmente reflejada. Al parecer, la reflexión total se produce en una superficie de reflexión imaginaria paralela a la superficie límite. Esta transferencia de radiación en la reflexión total, que se representa en la fig. 16.3, se denomina desplazamiento de Goos-Hänchen.

Aparatos necesarios

Material para la instalación del experimento estándar.
Se requiere además

1 juego de accesorios de Física,

Microondas II

737 275

- 1 semicilindro hueco
- 1 placa metálica
- 1 pieza cilíndrica intermedia
- 2 frascos de plástico con arena de cuarzo

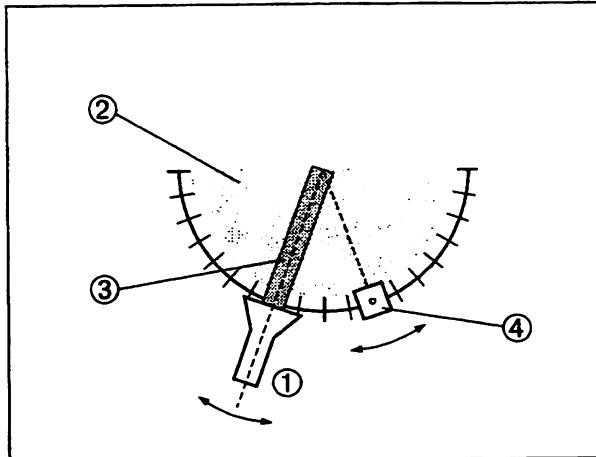


Fig. 16.2: Instalación del experimento para reflexión total con un semicilindro lleno de arena de cuarzo

- 1: Emisor de microondas
- 2: Semicilindro, lleno de arena
- 3: Regla
- 4: Sonda de campo E

1 un embudo para introducir la arena

1 prisma

1 lente biconvexa

1 un pie pequeño en forma de V

300 02

1 base

300 11

Es recomendable

1 regla

Realización del experimento

1. Instalación experimental

Lléñese el semicilindro de arena. Acérquese el radiador de bocina lo más posible al semicilindro. La bocina emite radialmente en dirección al punto central del semicilindro. La situación relativa del eje del radiador de bocina respecto al semicilindro determina el ángulo de incidencia α . Colóquese la regla junto al semicilindro para leer el ángulo de reflexión α' .

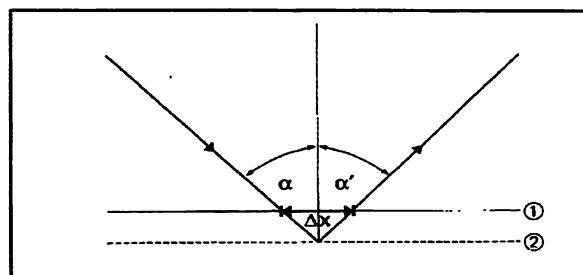


Fig. 16.3: Desplazamiento de Goos-Hänchen

- 1 : superficie límite física
- 2 : superficie límite imaginaria
- Δx : transferencia de radiación

2. Comprobación del la ley de la reflexión en el semicilindro lleno

Desplácese la sonda a lo largo de la pared exterior semicircular del semicilindro de acuerdo con cada ángulo de incidencia α . La posición de la señal de recepción máxima corresponderá al ángulo de reflexión α' . Anote en la tabla 16.1 el ángulo α' y la tensión de recepción máxima.

Tabla 16.1: Reflexión total

α/Grad	α'/Grad	($U_{\text{Empf}}/\text{mV}$)
10		
20		
30		
40		
50		
60		
70		
80		

3. El efecto Goos-Hänchen

Introduzca el prisma sólido de PVC en el «pasillo de radiación». (Véase fig. 16.4) Su nivel medio deberá estar a la altura del detector de la sonda de campo E. Para ello se empleará la barra soporte de 180 mm y la pieza cilíndrica intermedia.

Mídase la U_{EMPF} correspondiente a las posiciones A y B de la sonda de campo E. ¿Qué ocurre cuando, al medir la posición A, se toca con la palma de la mano la hipotenusa del prisma de PVC?

4. Sustitúyase el prisma PVC por una placa de metal y optimícese el ángulo de incidencia hasta que en la posición A aparezca la señal de recepción máxima. Llévense a cabo las mediciones que se especifican en el punto 3 que antecede.

5. Analogía con el principio del anteojos prismático

La instalación experimental que se representa en la fig. 16.5 reproduce el principio del anteojos prismático. Este tipo de sistemas tienen aplicación práctica en los anteojos de campaña. Desde el punto de vista de la física, los anteojos prismáticos unen la reflexión total que se

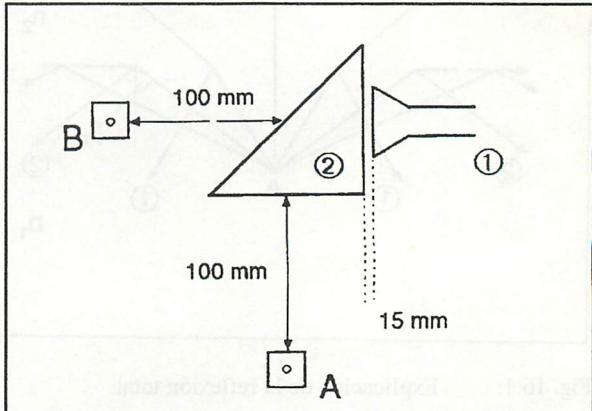


Fig. 16.4: Instalación experimental para la demostración de las ondas de superficie en la reflexión total

1 : emisor de microondas

2 : prisma de PVC

A : sonda de campo E en posición para la señal de la reflexión total

B : sonda de campo E en posición para la demostración de las ondas de superficie

produce en el prisma con el efecto focalizador que tienen lugar en las superficies de refracción de la lente biconvexa. La distancia entre el prisma y la lente corresponde a la recepción máxima de la distancia focal de aprox. 150 mm. Móntese de nuevo el prisma sobre el pie pequeño.

Aléjese el prisma del «pasillo de radiación» ¿Qué ocurre?

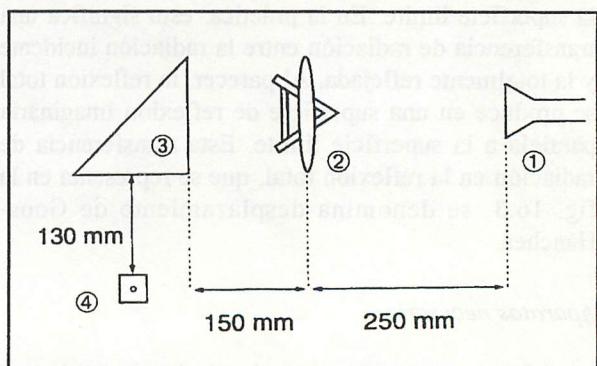


Fig. 16.5: El anteojos prismático

1: emisor de microondas

2: lente biconvexa

3: prisma

4: sonda de campo E

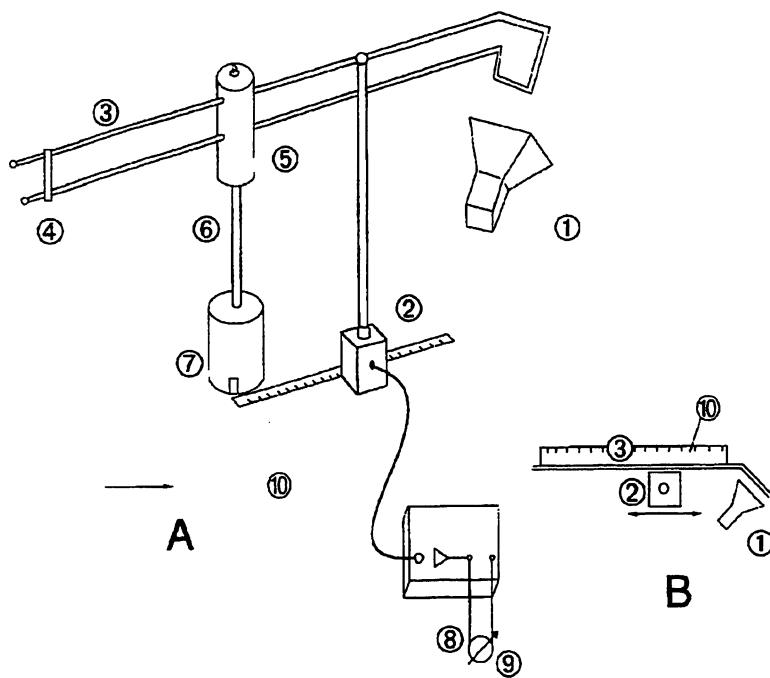


Fig. 18.1: Instalación experimental de un sistema de línea de Lecher

- A: representación en perspectiva
- B: vista parcial desde arriba
- 1: emisor de microondas
- 2: sonda de campo E
- 3: sistema conductor de Lecher
- 4: desplazador de cortocircuito
- 5: pieza cilíndrica intermedia
- 6: barra de soporte de 180 mm
- 7: base
- 8: alimentación Gunn con amplificador
- 9: instrumento de medición.
- 10: regla

Propagación de las ondas a través de conductores

Objetivos:

Comparar la propagación de las ondas por el sistema de conductores de Lecher con la propagación en el espacio libre. El conductor hueco flexible como ejemplo de una conducción que casi sin pérdida.

18. Conducción de microondas a lo largo de una línea de Lecher

Dos conductores paralelos forman una conducción doble a la que se conoce también como línea de Lecher. A través de un sistema de conducción de este tipo pueden difundirse ondas electromagnéticas y llevarse hasta los puntos que se deseé, de acuerdo con el

recorrido de la línea. Este sistema de conducción se utiliza preferentemente con frecuencias bajas. Puede incluso transportar corriente continua (lo que constituye toda una hazaña) gracias a que dispone de una línea de ida y otra de vuelta separadas). Esta afirmación, trivial en apariencia, no es aplicable a todos los tipos de conducción, como veremos más adelante. La línea de Lecher que hemos empleado aquí en este experimento consta de 2 cables de latón redondos y niquelados, con un diámetro de 3 mm que corren paralelos con una separación de 10 mm entre sí. El conductor que utilizamos tiene 400 mm de largo. En uno de sus extremos está soldado a un lazo de alambre con el que forma una ángulo de aprox. 45°. El lazo de alambre permite el impulso de las ondas de la conducción a través del campo magnético del oscilador Gunn.



Pregunta 1: ¿De acuerdo con que ley física trabaja el impulso magnético por medio de un lazo de alambre? ¿Qué posibles direcciones cobra la excitación cuando se impulsan las ondas con un oscilador Gunn? ¡Piénsese en la distribución de los componentes del campo eléctrico y magnético! ¿Cómo ha de orientarse el lazo de alambre para conseguir el impulso máximo?

Aparatos necesarios

Material para la instalación del experimento estándar

Además se requiere

1 accesorios de Física,

Microondas II

737 275

1 línea de Lecher con un estribo
de cortocircuito

1 una pieza cilíndrica intermedia

1 base

300 11

Es recomendable

cinta adhesiva, que no contiene el sistema didáctico

1 regla

Realización del experimento

Prepárese la instalación para el experimento de acuerdo con la fig. 18.1.

Se sujetará la regla a la mesa con cinta adhesiva, colocándola debajo de la línea de Lecher, de modo que la sonda de campo E pueda desplazarse a lo largo de la regla sin que tropiece con los conductores. Se cuidará de que la distancia de la sonda con respecto a la conducción se mantenga más o menos constante (a unos 3 mm), pues es importante llevar la sonda a lo largo de la conducción. Colóquese el estribo de cortocircuito al final de la línea de Lecher, y optimícese la posición entre el lazo de alambre y la bocina, de modo que se consiga la máxima señal de recepción.

1.1 Recórrase, con la sonda de campo E, el campo a lo largo de la conducción, y tómense mediciones cada 5 mm. Anótense los valores obtenidos en la tabla 18.1. A continuación, se hará un esquema de la distribución del campo eléctrico a lo largo de la conducción y se analizarán los resultados.

Tabla 18.1: Distribución del campo a lo largo de una línea de Lecher

X/mm	$U_{\text{Empf}} / \text{mV}$
0	
5	
10	
15	
20	
25	
30	
35	
40	
45	
50	
55	
60	
65	
70	

- 1.2 Establézcase la longitud de onda de las ondas impulsadas a través de la línea de Lecher. La longitud de onda se averigua midiendo la distancia entre 2 máximos o mínimos consecutivos. Compárese la longitud de onda λ_L con la longitud de onda λ_0 en el espacio libre.
- 1.3 ¿Cómo puede demostrarse la ondulación estacionaria en la conducción sin desplazar la sonda?

Respuestas

1. El impulso magnético por medio de un lazo de alambre funciona de acuerdo con la ley de la inducción. El impulso máximo se consigue cuando el movimiento tiene lugar en una dirección perpendicular con el plano del lazo.

19. Conducción de microondas a través de una conducción metálica hueca

La formación de haces de microondas mediante un espejo cóncavo o mediante lentes dieléctricas resulta fácil. Para ello se sitúa la fuente de microondas en su punto focal. Según las leyes de la óptica geométrica se obtiene de ese modo un haz de radiaciones paralelo. Pero estos campos unidos en haces tienden a abrirse al propagarse en el espacio libre, lo que conduce a un descenso de la intensidad de los campos eléctrico y magnético en el sentido de la propagación. Si se utilizan conducciones para transportar estas ondas electromagnéticas, no se producen esas pérdidas. A diferencia de lo que ocurre con las conducciones de más de un hilo, como la línea de Lecher, la conducción hueca no necesita más que un único tubo metálico para guiar las microondas. Para ello se aprovecha un tipo especial de onda que sólo puede propagarse cuando adquiere una frecuencia mínima en el conductor hueco. Así pues, el conductor hueco sirve para la conducción de ondas electromagnéticas, lo mismo que el sistema de línea de Lecher. Pero a diferencia con lo que ocurre cuando se utiliza este último sistema, el conductor hueco sólo funciona cuando se alcanza una frecuencia mínima: la llamada Frecuencia Cutt Off. Las tensiones continuas no pueden por tanto transmitirse a través de un conductor hueco.

Observación: Una más amplia comprensión de la propagación de ondas a través de conductores la ofrece la conducción mediante dos placas que se expone en el Sistema didáctico MTS 7.4.3. En él se realizan experimentos de profundización en los modos TEM y TE, y se investiga el fenómeno de la frecuencia límite.

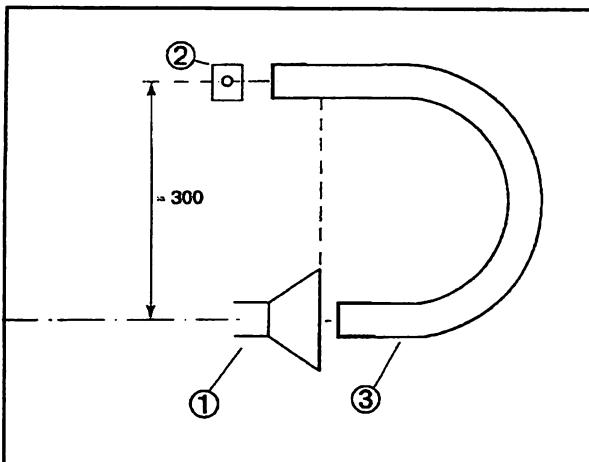


Fig. 19.1: Instalación experimental con conductor hueco flexible

- 1: emisor de microondas
- 2: sonda de campo E
- 3: conductor hueco flexible

Aparatos necesarios

Material para la instalación del experimento estándar

Además se requiere

- 1 juego de accesorios de Física, Microondas I
- 1 conducción hueca, flexible, de 1 m de longitud.

Realización del experimento

1. Hágase la instalación para el experimento de acuerdo con la fig. 19.1 (inicialmente sin conductor hueco). Situar a continuación la sonda de campo E en un lugar junto al radiador de bocina, de modo que la señal de recepción sea de aproximadamente 0 mV. Colocar el conductor flexible, según indica la fig. 19.1 entre la antena de bocina y la sonda de campo E. Léase U_{EMPF} .

Resultados del experimento

U_{EMPF} 6000...10000 mV con la conducción hueca de la que se dispone. Observación: con el conductor hueco flexible pude dirigirse la energía de las microondas a cualquier punto que se deseé. La atenuación que provoca el conductor es mucho más pequeña que la atenuación que se produce al propagarse la onda en el espacio libre.

Advertencia: en la técnica de las microondas se utilizan la mayoría de las veces conductores huecos de sección cuadrangular.

Aplicaciones de la técnica de las microondas

Objetivos de aprendizaje:

Aplicación del efecto Doppler en el radar para la comprobación de la velocidad de un objeto. Construcción de un sistema de radiorelés para la retransmisión de noticias.

20. El radar Doppler

El elemento Gunn y el diodo de detección forman parte de los elementos semiconductores activos. (Véase el cap. 1) Los elementos activos presentan una curva característica de corriente-tensión. Si se superponen a un elemento que presenta este tipo de curvas características, dos oscilaciones con las frecuencias f_1 y f_2 , se obtiene en la señal de partida estacionaria nuevos componentes espectrales que, entre otras cosas, pueden contener las frecuencias $f_1 - f_2$, $f_1 + f_2$, $2f_1$, $2f_2$, etc. El carácter definitorio del espectro depende de la curvatura de la característica. Las señales (de entrada) originales se ven al parecer desplazadas a otra situación de frecuencia. En radiotécnica este proceso de cambio de frecuencias se denomina mezcla. El principio al que obedece se expone esquemáticamente en la fig. 20.1.

La señal s_1 es ahora la señal de emisión del oscilador Gunn. Su frecuencia es de 9.400 GHz. Si la señal s_2 tiene aproximadamente la misma frecuencia que s_1 (quizá tan sólo 100Hz más o menos), en la salida del mezclador surgen señales con frecuencias muy diversas:

$$f_1 - f_2 = 100 \text{ Hz}$$

$$f_1 + f_2 \approx 2f_1 \approx 2f_2 = 18,8 \text{ GHz}$$

etc.

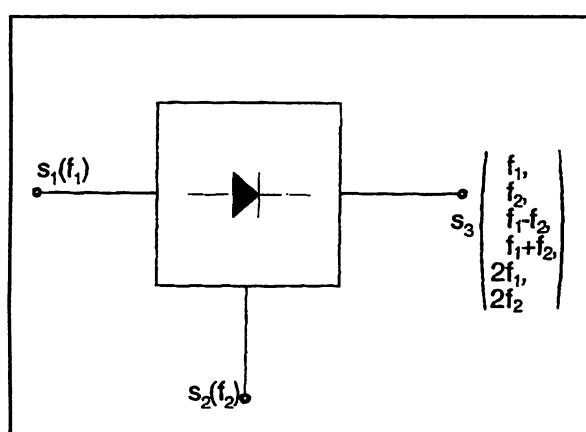


Fig. 20.1: Señal de salida en un mezclador

La señal s_2 , con una frecuencia f_2 muy próxima a f_1 , se genera p.ej. por reflexión de la onda del emisor al chocar con un objeto en movimiento. El cambio de frecuencia por reflexión al incidir sobre un objetivo en movimiento se denomina desplazamiento de Doppler

o efecto Doppler. Este efecto se aprovecha en radioastronomía, y también lo utiliza la policía para medir la velocidad del tráfico en las carreteras.

La literatura científica ofrece la siguiente fórmula para el desplazamiento de Doppler $f_d = f_1 - f_2$:

$$f_d = 2 \frac{v}{c} \cdot f_1 \quad (20.1)$$

Donde:

v : velocidad relativa del blanco

c : velocidad de la luz

f_1 : frecuencia del emisor (oscilador Gunn).

Para $f_1 = 10^{10} \text{ Hz}$

$v = 3 \text{ m/s}$

$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

el efecto Doppler estará en la región de los 200 Hz.

Aparatos necesarios

Material para la instalación del experimento estándar. Véase el Experimento 4.

También se requiere

1 juego de accesorios de Física I 737 27

1 placa metálica

1 portaplaques

1 base 300 11

1 osciloscopio, p.ej. 205-3 575 29

Se produce una interesante modificación en el experimento si se conecta la placa del reflector en la alimentación de un trazador de función o registrador YT. Esto puede hacerse con cinta adhesiva. Si se gradúa la base de tiempo lo bastante lenta, el trazador podrá trazar directamente la señal Doppler.

Es recomendable también

1 Registrador YT

Realización del experimento

1. Recepción de la señal Doppler con un mezclador externo.

En este experimento, el oscilador Gunn sirve para generar la señal del emisor (como siempre), mientras se utiliza como mezclador la sonda de campo E. Para ello tendrá que poder recibir tanto una parte de la señal del emisor como la señal

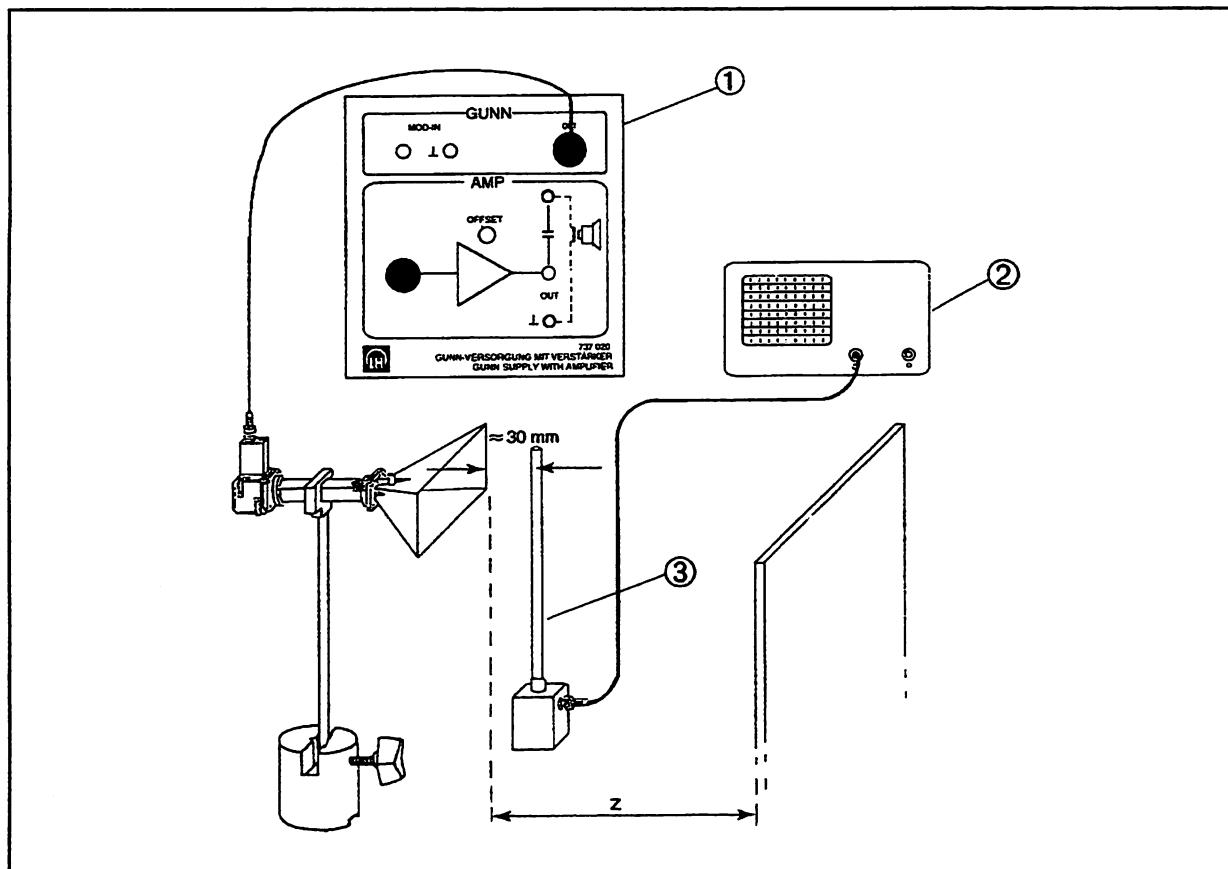


Fig. 20.2: Instalación experimental para el radar Doppler con mezclador externo

reflejada por el blanco en movimiento. Instálense los elementos necesarios para el experimento según la fig. 20.2. La sonda de campo E se encuentra a unos 3 cm de la apertura de la antena de bocina, un poco lateralmente respecto al eje principal. Se halla conectada directamente, a través de un cable coaxial, al osciloscopio de C.A.

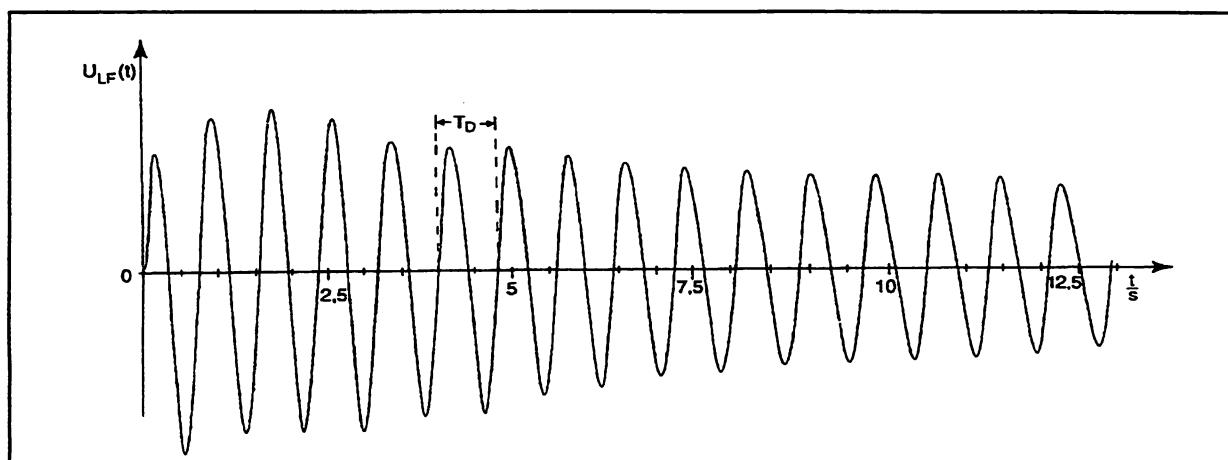
Muévase rápidamente la placa metálica de un lado a otro y obsérvese la señal en el osciloscopio.

Resultados del experimento

- En el osciloscopio aparece un tren de ondas cuya frecuencia es proporcional a la velocidad de la placa metálica. Con el aumento de la distancia de la placa de metal respecto a la antena de bocina del emisor de microondas, descienden las amplitudes de la señal Doppler.

Tren de curvas tomado con un registrador YT

Significan :
 T_D : Período de la señal Doppler
 $U_{LF}(t)$: Señal de salida de la sonda de campo E que está trabajando como mezclador



21. Transmisión de señales con ayuda de microondas

Las microondas muestran un comportamiento cuasióptico. Al igual que las ondas del espectro visible es fácil unirlas en haces y transmitirlas mediante un sistema de relés de un punto a otro utilizando las microondas para la transmisión de información. Para ello es necesario «cargar» la señal portadora de la palabra o de los datos sobre las microondas. La microonda sirve de portadora que se modula con la señal que contiene la información. El experimento que sigue demostrará el efecto de transmisión dirigida sirviéndose de microondas con amplitud modulada. En la modulación de amplitud, la señal del emisor se altera con el ritmo del habla. La fig. 21.1 muestra qué es lo que debemos de entender por este sistema.

Aparatos necesarios

Material para la instalación del experimento estándar.

Véase el Experimento 4.

Se requiere además

1 juego de accesorios de Física,	
Microondas I	737 27
1 lámina de gomaespuma	
1 juego de accesorios de Física,	
Microondas II	737 275
1 lente biconvexa	
1 arena de cuarzo	
1 portaplatas	
1 un pie pequeño	300 02
1 altavoz STE 4/50	579 28
1 generador de funciones P	522 56

Es recomendable

En los sistemas de radiotransmisión dirigida comerciales y en medida creciente también en la televisión por satélite, se utilizan antenas parabólicas para la transmisión de señales de microondas. Con ayuda de la antena Nº Catálogo 737 450 pueden demostrarse las propiedades de focalización de una antena reflectora semejante.

1 juego de antenas parabólicas	737 450
--------------------------------	---------

Realización del experimento

1. Instálese el experimento según la fig. 21.2.

Conéctese el generador de funciones con el enchufe MOD IN del aparato de alimentación 737 020. Colóquese el generador de funciones en la amplitud Seno 5 V, entre los 500 Hz y los 3 kHz. Se enchufará el altavoz en los enchufes previstos al efecto del aparato alimentador, y se ajustará la lente biconvexa y la sonda de campo E de modo que la señal de recepción procedente del altavoz sea máxima.

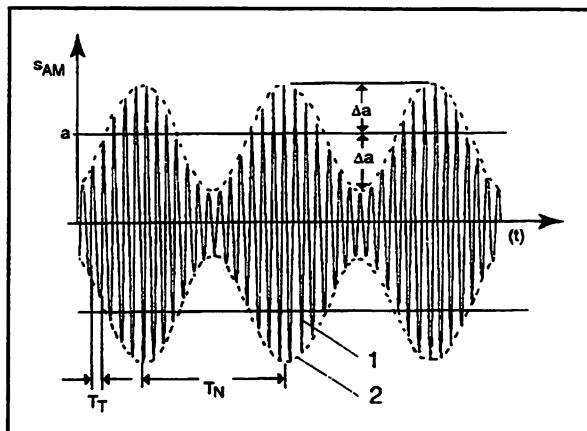


Fig. 21.1: Señal de amplitud modulada

- 1: Oscilación de portadora con un período T_T y amplitud a (p.ej. procedente del oscilador Gunn con 9.400 GHz)
- 2: Oscilación de la señal de información (p.ej. procedente del generador de función) con período T_N

2. Trate de explicar el experimento
3. Manténgase la lámina de gomaespuma entre la lente biconvexa y el radiador de bocina. ¿Qué se observa? Humedézcase bien la lámina de gomaespuma y manténgase de nuevo en el mismo sitio en la instalación experimental. ¿Qué se observa ahora?
4. Se puede cambiar la instalación experimental colocando el espejo parabólico detrás de la sonda de campo E. Para que el detector quede en el punto focal del espejo, deberá colocarse la sonda en posición horizontal, tal como se representa en la fig. 21.3. (Cuando está en posición vertical, es decir cuando la sonda de campo E está de pie sobre la mesa, el diodo del detector sobresale del foco). Se utilizará para ello la base de metal y la barra de sujeción de 737 450. Gírese el emisor de microondas 90°, es decir: elijase la polarización horizontal.

Resultados del experimento

2. La señal de información que procede del generador de funciones se utiliza para cambiar la amplitud de la señal de microondas radiada. Tras su propagación por el espacio libre, el campo de microondas (debilitado) se focaliza mediante la lente biconvexa. La lente, según su diámetro, capta una parte mayor de la señal de microondas que la que capta la sonda de campo E por sí sola (refuerzo de la señal). La sonda de campo E rectifica las microondas. Emite una señal NF que corresponde a la señal moduladora del generador de función.