(19) OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(11) Número de publicación: **2 574 406**

(51) Int. CI.:

***H01Q 15/08*** (2006.01)

(12) TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA T3

(96) Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **16.11.2011 E 11855258 (7)**

(97) Fecha y número de publicación de la concesión europea: **11.05.2016 EP 2728669**

(54) Título: **Metamaterial y antena de metamaterial**

(30) Prioridad:

**28.06.2011 CN 201110176783**
**28.06.2011 CN 201110176781**
**28.06.2011 CN 201110176770**
**29.06.2011 CN 201110178661**

(45) Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
**17.06.2016**

(73) Titular/es:

**KUANG-CHI INNOVATIVE TECHNOLOGY LTD. (50.0%)**
**18B, Block A CIC International Business Center No. 1061 of XiangMei Road Futian District ShenZhen, Guangdong 518034, CN y**
**KUANG-CHI INSTITUTE OF ADVANCED TECHNOLOGY (50.0%)**

(72) Inventor/es:

**LIU, RUOPENG;**
**JI, CHUNLIN y**
**YUE, YUTAO**

(74) Agente/Representante:

**LAZCANO GAINZA, Jesús**

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

**DESCRIPCIÓN**

Metamaterial y antena de metamaterial

Campo de la invención

La presente invención en general se relaciona al campo de tecnologías electromagnéticas, y más particularmente, a un metamaterial y una antena de metamaterial.

Antecedentes de la invención

En ópticas convencionales, se puede usar un lente para refractar una onda esférica, la cual se irradia a partir de un punto de fuente de luz ubicado en un foco del lente, dentro de una onda plana. Actualmente, el efecto convergente de los lentes se logra por virtud de la propiedad refractiva de la forma esférica de los lentes. Como se muestra en la Fig. 1, una onda esférica emitida a partir de un radiador 30, converge por lentes 40 esféricos y existe en la forma de una onda plana. El inventor ha encontrado en el proceso de hacer esta invención que, la antena de lentes tiene al menos los siguientes problemas técnicos: los lentes 40 esféricos son voluminosos y pesados, lo cual no es favorable para miniaturización; el desempeño de los lentes 40 esféricos depende en gran medida en la forma de los mismos, y la propagación direccional de la antena se puede lograr sólo cuando los lentes 40 esféricos tienen una forma precisa; y se ocasionan serias interferencias y pérdidas a las ondas electromagnéticas, las cuales reducen la energía electromagnética. Además, para la mayoría de los lentes, las transiciones abruptas de los índices refractivos siguen una simple línea que es perpendicular a una superficie de los lentes. Consecuentemente, las ondas electromagnéticas que se propagan mediante los lentes sufren de refracción, difracción y reflexión considerables, las cuales tienen un efecto serio en los rendimientos de los lentes.

El documento de la técnica anterior US2010 165473 describe un lente plano con estructura de metamaterial.

Resumen de la invención

En vista de los problemas anteriormente mencionados que la técnica anterior sufre de refracción, difracción y reflexión considerables y tiene rendimientos de metamaterial pobres, un objetivo de la presente invención es proporcionar un metamaterial y una antena de metamaterial que tenga rendimientos superiores.

Para lograr el objetivo anteriormente mencionado, la presente invención proporciona un metamaterial. Una línea que conecta una fuente de radicación a un punto en una primera superficie del metamaterial y una línea perpendicular al metamaterial que forma un ángulo θ entre los mismos, el cual sólo corresponde a una superficie curva en el metamaterial. Cada punto de la superficie curva al cual corresponde el ángulo θ, tiene un mismo índice refractivo. Los índices refractivos del metamaterial disminuyen gradualmente en la medida que aumenta el ángulo θ. Las ondas electromagnéticas que se propagan mediante el metamaterial salen en paralelo a partir de una segunda superficie del metamaterial.

Preferiblemente, la distribución del índice refractivo de la superficie curva satisface:

$$n(\theta) = \frac{1}{S(\theta)}\left[ F(1 - \frac{1}{\cos\theta}) + n_{\max} d \right];$$

donde, $S(\theta)$ es una longitud de arco de una generatriz de la superficie curva, $F$ es una distancia a partir de la fuente de radiación al metamaterial, $d$ es un espesor del metamaterial; y $n_{max}$ es el índice máximo refractivo del metamaterial.

Preferiblemente, el metamaterial comprende al menos una capa de lámina de metamaterial, cada una de las cuales comprende una lámina como un substrato y una diversidad de microestructuras hechas por el hombre unidas al substrato.

Preferiblemente, cada una de las microestructuras hechas por el hombre es una estructura bidimensional (2D) o tridimensional (3D) consistente de al menos un alambre de metal que tiene un patrón geométrico.

Preferiblemente, cada una de las microestructuras hechas por el hombre tiene una forma de “I”, una forma de “cruz” o una forma de copo de nieve.

Preferiblemente, cuando la generatriz de la superficie curva es un arco parabólico, la longitud del arco $S(\theta)$ del arco parabólico satisface:

$$S(\theta)=\frac{d}{2}\left[\frac{\log(|\tan\theta|+\sqrt{1+\tan^2\theta})+\delta}{|\tan\theta|+\delta}+\sqrt{1+\tan^2\theta}\right];$$

donde δ es un decimal predefinido.

Preferiblemente, cuando se toma una línea que pasa a través de un centro de la primera superficie del metamaterial y perpendicular al metamaterial, como un eje de abscisa y cuando se toma una línea que pasa a través del centro de la primera superficie del metamaterial y paralela a la primera superficie es como un eje de ordenada, se representa una ecuación de parábola donde se ubica el arco parabólico como:

$$y(x)=\tan\theta\left(-\frac{1}{2d}x^2+x+F\right).$$

Preferiblemente, el ángulo θ de cada punto (x, y) del arco parabólico, satisface la siguiente expresión relacional:

$$\theta(x,y)=\tan^{-1}\left[\frac{2dy}{2d(F+x)-x^2}\right].$$

Preferiblemente, cuando la generatriz de la superficie curva es un arco elíptico, se toma la línea que pasa a través del centro de la primera superficie del metamaterial y perpendicular al metamaterial, como un eje de abscisa y cuando la línea que pasa a través del centro de la primera superficie del metamaterial y paralela a la primera superficie se toma como el eje de ordenada, se representa una ecuación de una elipse donde se ubica el arco elíptico como:

$$\frac{(x-d)^2}{a^2}+\frac{(y-c)^2}{b^2}=1;$$

donde a, b y c satisfacen la siguiente relación:

$$\frac{d^2}{a^2}+\frac{(F\tan\theta-c)^2}{b^2}=1;$$

$$\frac{\operatorname{sen}\theta}{\sqrt{n^2(\theta)-\operatorname{sen}^2(\theta)}}=\frac{b^2}{a^2}\frac{d}{F\tan\theta-c}.$$

Preferiblemente, un centro de la elipse donde se ubica el arco elíptico está localizado en la segunda superficie y tiene coordenadas (d, c).

Preferiblemente, un punto de la primera superficie que corresponde al ángulo θ, tiene un ángulo de refracción θ', y un índice *n*(θ) refractivo del punto satisface:

$$n(\theta)=\frac{\operatorname{sen}\theta}{\operatorname{sen}\theta'}.$$

Preferiblemente, cuando la generatriz de la superficie curva es un arco circular, la distribución del índice refractivo de la superficie curva satisface:

$$n(\theta)=\frac{\operatorname{sen}\theta}{d\times\theta}(n_{\max}\times d+s-\frac{s}{\cos\theta});$$

donde, *s* es una distancia a partir de la fuente de radiación al metamaterial, *d* es un espesor del metamaterial; y $n_{max}$ es el máximo índice refractivo del metamaterial.

Preferiblemente, una línea perpendicular de una línea que conecta la fuente de radiación a un punto en la primera superficie del metamaterial, intersecta con la segunda superficie del metamaterial en un centro del circulo del arco circular, y un segmento de línea perpendicular entre el centro del círculo y un punto en la primera superficie del metamaterial es un radio del arco circular.

Preferiblemente, el metamaterial se proporciona con una capa de emparejamiento de impedancia en dos lados del mismo respectivamente.

Para lograr el objetivo anteriormente mencionado, la presente invención proporciona adicionalmente una antena de metamaterial, la cual comprende un metamaterial y una fuente de radiación dispuestos en un foco del metamaterial. Una línea que conecta la fuente de radiación a punto en una primera superficie del metamaterial y una línea perpendicular al metamaterial forma un ángulo θ ente los mismos, el cual corresponde únicamente a una superficie curva en el metamaterial. Cada punto en la superficie curva al cual el ángulo θ corresponde únicamente, tiene el mismo índice refractivo. Los índices refractivos en el metamaterial disminuyen gradualmente en la medida que aumenta el ángulo θ. Las ondas electromagnéticas que se propagan a través del metamaterial, salen en paralelo a partir de una segunda superficie del metamaterial.

Preferiblemente, la distribución del índice refractivo del la superficie curva satisface:

$$n(\theta)=\frac{1}{S(\theta)}\left[F(1-\frac{1}{\cos\theta})+n_{\max}d\right];$$

donde, *S*(θ) es una longitud de arco de la parabólica, *F* es una distancia a partir de la fuente de radiación al metamaterial; *d* es un espesor del metamaterial; y $n_{max}$ es el máximo índice refractivo del metamaterial.

Preferiblemente, el metamaterial comprende al menos una capa de lámina del metamaterial, cada una de las cuales comprende un substrato como una lámina y una diversidad de microestructuras hechas por el hombre unidas al substrato.

Preferiblemente, cuando la generatriz de la superficie curva es un arco elíptico, una línea que pasa a través de un centro de la primera superficie del metamaterial y perpendicular al metamaterial se toma como un eje de abscisa y una línea que pasa a través del centro de la primera superficie del metamaterial y paralela a la primera superficie se toma como un eje de ordenada, una ecuación de una elipse donde se ubica el arco elíptico se representa como:

$$\frac{(x-d)^2}{a^2}+\frac{(y-c)^2}{b^2}=1;$$

donde a, b y c satisfacen la siguiente relación:

$$\frac{d^2}{a^2}+\frac{(F\tan\theta-c)^2}{b^2}=1;$$

$$\frac{\operatorname{sen}\theta}{\sqrt{n^2(\theta)-\operatorname{sen}^2(\theta)}}=\frac{b^2}{a^2}\frac{d}{F\tan\theta-c}$$

Preferiblemente, cuando la generatriz de la superficie curva es un arco parabólico, la longitud del arco *S*(θ) del arco parabólico satisface:

$$S(\theta)=\frac{d}{2}\left[\frac{\log(|\tan\theta|+\sqrt{1+\tan^2\theta})+\delta}{|\tan\theta|+\delta}+\sqrt{1+\tan^2\theta}\right];$$

donde δ es un decimal predefinido.

Preferiblemente, cuando la línea que pasa a través del centro de la primera superficie del metamaterial y perpendicular al metamaterial se toma como un eje de abscisa y la línea que pasa a través del centro de la primera superficie del metamaterial y paralela a la primera superficie se toma como un eje de ordenada, una ecuación de una parábola donde se ubica el arco parabólico se representa como:

$$y(x)=\tan\theta(-\frac{1}{2d}x^2+x+F).$$

Las soluciones técnicas de la presente invención tienen los siguiente beneficios: al diseñar transiciones abruptas de los índices refractivos del metamaterial para seguir una superficie curva, se puede reducir significativamente la refracción, difracción y reflexión en los puntos de transición abruptos. Como resultado, se alivian los problemas ocasionados por las interferencias, los cuales además mejoran los rendimientos del metamaterial y la antena del metamaterial.

Breve descripción de los dibujos

En lo sucesivo, la presente invención será descrita además con referencia a los dibujos adyacentes y las realizaciones de esta. En los dibujos adyacentes:

La Fig. 1 es una vista esquemática que ilustra un lente esférico convencional en el cual convergen las ondas electromagnéticas;

La Fig. 2 es una vista esquemática que ilustra un metamaterial de acuerdo con una realización de la presente invención en la cual convergen las ondas electromagnéticas;

La Fig. 3 es una vista esquemática que ilustra una forma de una superficie curva en el metamaterial 10 que se muestra en la Fig. 2 al cual corresponde únicamente un ángulo θ;

La Fig. 4 es una vista lateral del metamaterial 10 que se muestra en la Fig. 3;

La Fig. 5 es una vista esquemática que ilustra una generatriz m de la superficie curva Cm que se muestra en la Fig. 3 cuando es un arco parabólico;

La Fig. 6 es una vista esquemática que ilustra variaciones de los índices refractivos de la Fig. 5;

La Fig. 7 es una vista esquemática que ilustra coordenadas del arco parabólico de la Fig. 5;

La Fig. 8 es un diagrama que ilustra la distribución del índice refractivo del metamaterial de la Fig. 5 en un plano yx;

La Fig. 9 es una vista esquemática que ilustra la generatriz m de la superficie curva Cm que se muestra en la Fig. 3 cuando es un arco elíptico;

La Fig. 10 es una vista esquemática que ilustra la construcción de la generatriz m de la superficie curva Cm que se muestra en la Fig. 3 cuando la generatriz m es un arco circular; y

La Fig. 11 es un diagrama que ilustra la distribución del índice refractivo del metamaterial de la Fig. 9 en el plano yx.

Descripción detallada de la invención

La Fig. 2 es una vista esquemática que ilustra un metamaterial de acuerdo con una realización de la presente invención en la cual convergen las ondas electromagnéticas. El metamaterial 10 está dispuesto en una dirección de propagación de ondas electromagnéticas emitidas a partir de una fuente de radiación.

Como puede conocerse como sentido común, el índice refractivo de la onda electromagnética es proporcional a $\sqrt{\varepsilon\times\mu}$. Cuando una onda electromagnética se propaga a partir de un medio u otro medio, la onda electromagnética se refractará: y si la distribución del índice refractivo en el material no es uniforme, entonces la

onda electromagnética se desviará hacia un sitio que tiene un gran índice refractivo. Al diseñar los parámetros electromagnéticos del metamaterial en cada punto, la distribución del índice refractivo del metamaterial se puede ajustar de forma que se logre el propósito de cambiar el camino de propagación de la onda electromagnética. De acuerdo con el principio anteriormente mencionado, la distribución del índice refractivo del metamaterial 10 se puede diseñar de tal forma que una onda electromagnética divergente en la forma de una onda esférica que se emite a partir de la fuente 20 de radiación se convierta en una onda electromagnética plana adecuada para transmisión de larga distancia.

La Fig. 3 es una vista esquemática que ilustra una forma de una superficie curva en el metamaterial 10 que se muestra en la Fig. 2 a la cual corresponde únicamente un ángulo θ. Como se muestra, una línea que conecta la fuente 20 de radiación a un punto en una primera superficie A del metamaterial 10 y una línea L que pasa a través de un centro O de una primera superficie A del metamaterial 10 y perpendicular al metamaterial 10, forman un ángulo θ entre los mismos, el cual corresponde únicamente a una superficie curva Cm en el metamaterial 10. Cada punto en la superficie curva Cm al cual el ángulo θ corresponde únicamente, tiene un mismo índice refractivo. Los índices refractivos del metamaterial 10 disminuyen gradualmente en la medida que aumenta el ángulo θ. Las ondas electromagnéticas que se propagan a través del metamaterial, salen en paralelo a partir de una segunda superficie B del metamaterial.

Como se muestra en la Fig. 3, una generatriz de la superficie curva Cm es un arco m, y la superficie curva Cm se obtiene mediante la rotación del arco m alrededor de la línea L. La Fig. 4 es una vista lateral del metamaterial 10. El espesor del metamaterial 10 es como se muestra por d, y L representa una línea perpendicular al metamaterial. Una vista de sección transversal de una superficie curva que tiene un mismo índice refractivo está en la forma de dos arcos, los cuales son simétricos con relación a la línea L. El arco que se muestra por una línea punteada es una generatriz de una superficie curva virtual en el metamaterial 10. Con el fin de describir más claramente que los puntos en la misma superficie curva tienen el mismo índice refractivo, se dilucidará también la superficie curva virtual (la cual no existe actualmente, y se dilucida solo para conveniencia de la descripción) en el metamaterial.

La Fig. 5 es una vista esquemática que ilustra la generatriz m de la superficie curva Cm que se muestra en la Fig. 3 cuando es un arco parabólico. Como se muestra, una línea que conecta la fuente de radiación a un punto O1 en la primera superficie del metamaterial y la línea L que pasa a través del centro O de la primera superficie y perpendicular al metamaterial 10, forma un ángulo $\theta_1$ entre los mismos, el cual corresponde a un arco parabólico ml; y cada punto en una superficie virtual curva, la cual se obtiene mediante la rotación del arco parabólico ml tiene un mismo índice refractivo. Igualmente, una línea que conecta la fuente de radiación en un punto 02 en la primera superficie del metamaterial y la línea L, forman un ángulo $\theta_2$ entre los mismos, el cual corresponde a un arco parabólico m2; y cada punto en una superficie curva virtual la cual se obtiene mediante la rotación del arco parabólico m2 tiene un mismo índice refractivo.

La distribución del índice refractivo de la superficie curva virtual satisface:

$$n(\theta)=\frac{1}{S(\theta)}\left[F(1-\frac{1}{\cos\theta})+n_{\max}d\right]$$

Como se muestra en la Fig. 6, $S(\theta)$ es una longitud de arco de la generatriz (el arco parabólico m) de la superficie curva virtual, $F$ es una distancia a partir de la fuente 20 de radiación al metamaterial 10, $d$ es un espesor del metamaterial 10; y $n_{max}$ es el máximo índice refractivo del metamaterial.

La longitud de arco $S(\theta)$ del arco parabólico satisface:

$$S(\theta)=\int_0^d ds=\int_0^d\sqrt{1+\tan^2\theta\,\frac{x^2}{d^2}}dx=\frac{d}{2}\left[\frac{\log(|\tan\theta|+\sqrt{1+\tan^2\theta})+\delta}{|\tan\theta|+\delta}+\sqrt{1+\tan^2\theta}\right]$$

donde δ es un decimal predefinido (por ejemplo, 0.0001), y puede asegurar que el radio $\frac{\log(|\tan\theta|+\sqrt{1+\tan^2\theta})+\delta}{|\tan\theta|+\delta}$ converja cuando el ángulo θ se acerque a 0.

Como se muestra en la Fig. 7, cuando la línea L que pasa a través del centro de la primera superficie del metamaterial 10 y perpendicular al metamaterial 10 se toma como un eje de abscisa y una línea que pasa a través del centro O de la primera superficie del metamaterial 10 y paralela a la primera superficie se toma como un eje de

ordenada, una línea que conecta la fuente de radiación a un cierto punto O' en la superficie A y el eje X forman un ángulo θ entre los mismos. El ángulo θ y cada punto (x, y) del arco parabólico m, satisfacen la siguiente expresión relacional:

$$\theta(x,y)=\tan^{-1}\left[\frac{2dy}{2d(F+x)-x^2}\right]$$

Suponiendo que una ecuación de una parábola donde se ubica el arco parabólico m es: $y(x) = ax^2 + bx + c$. La parábola pasa a través de un punto (0, $F$ tan θ), por ejemplo, $y(0) = c = F$ tan θ. Con el fin de hacer que la onda electromagnética salga en paralelo después de pasar a través del metamaterial, una línea tangente del arco parabólico debe ser paralela con el eje X cuando la onda electromagnética se propaga a través de la segunda superficie B del metamaterial; por ejemplo, se debe asegurar que $y'(d) = 0$. Debido a $y'(x) = 2ax + b$ , $y'(d) = 2ad + b = 0$. Además, se debe también asegurar que la onda electromagnética se propague en una dirección tangente correspondiente al ángulo θ cuando se alcanza la primera superficie A del metamaterial, así que $y'(0) = \tan\theta$. Se puede derivar de las condiciones anteriormente mencionadas que la ecuación de la parábola es $y(x)=\tan\theta(-\frac{1}{2d}x^2+x+F)$. De este modo, se puede obtener una expresión relacionar entre el ángulo θ y cada punto (x, y) en el arco parabólico como

$$\theta(x,y)=\tan^{-1}\left[\frac{2dy}{2d(F+x)-x^2}\right]$$

El ángulo θ corresponde únicamente a una superficie curva en el metamaterial, el cual se obtiene mediante la rotación de una generatriz m alrededor de la línea L (el eje X); y cada punto en la superficie curva al cual el ángulo θ corresponde únicamente tiene un mismo índice refractivo.

El metamaterial se puede usar para convertir la onda electromagnética emitida a partir de la fuente de radiación dentro de una onda plana. Los índices refractivos del metamaterial disminuyen a partir de $n_{max}$ a $n_{min}$ en la medida que aumenta el ángulo θ, como se muestra en la Fig. 7. Un arco que se muestra por una línea punteada es una generatriz de una superficie virtual curva en el metamaterial, y los índices refractivos en una superficie curva igual son idénticos entre sí. Se apreciará que, el metamaterial de la presente invención puede usarse también para converger una onda plana a un foco (por ejemplo, un caso contrario del que se muestra en la Fig. 2). En este caso, no hay necesidad de cambiar la construcción del metamaterial siempre que la fuente de radiación en la definición del ángulo θ se pueda localizar en el lado de la primera superficie A y localizarse en una posición de la fuente de radiación virtual correspondiente al foco del metamaterial. Diversas aplicaciones que adoptan el principio de la presente invención deben todas estar dentro del alcance de la presente invención.

El metamaterial tiene una diversidad de microestructuras hechas por el hombre dispuestas en este, las cuales hacen que los índices refractivos del metamaterial disminuyan gradualmente en la medida que aumenta el ángulo θ. La diversidad de microestructuras hechas por el hombre tienen la misma forma geométrica, y disminuyen en tamaño gradualmente en la medida que aumenta el ángulo θ.

Con el fin de representar más intuitivamente la distribución del índice refractivo de cada capa de lámina de metamaterial en un plano YX, las unidades que pueden tener el mismo índice refractivo están conectadas para formar una línea, y la magnitud del índice refractivo se representa por la densidad de las líneas. Una densidad superior de las líneas representa un índice refractivo más grande. La distribución del índice refractivo del metamaterial satisface todas las anteriores expresiones relacionales como se muestra en la Fig. 8.

La generatriz de la superficie curva Cm puede también tener algunas de las otras formas de curva, por ejemplo pero no se limita a, un arco elíptico. En lo consecuente, se dilucidará un caso en el cual una generatriz de la superficie curva Cm es un arco elíptico como un ejemplo.

La generatriz de la superficie curva Cm como se muestra en la Fig. 3 es un arco elíptico m, y la superficie curva Cm de obtiene mediante la rotación del arco elíptico m alrededor de la línea L. Una vista de sección transversal de una superficie curva que tiene el mismo índice refractivo está en la forma de dos arcos elípticos, los cuales son simétricos con relación a la línea L. El arco elíptico que se muestra por una línea punteada es una generatriz de una superficie virtual curva en el metamaterial 10. Con el fin de describir más claramente que los puntos en la misma superficie curva tienen el mismo índice refractivo, se dilucidará también la superficie curva virtual (la cual no existe actualmente, y de dilucida solo para conveniencia de descripción) en el metamaterial. Para el arco elíptico, como se muestra en la Fig. 5, una línea que conecta la fuente de radiación a un punto O1 en la primera superficie del

metamaterial y la línea L que pasa a través del centro O de la primera superficie y perpendicular al metamaterial 10, forman un ángulo $\theta_1$ entre los mismos, el cual corresponde a un arco m1 elíptico; y cada punto en una superficie virtual curva el cual se obtiene mediante la rotación del arco m1 elíptico tiene un mismo índice de referencia. Igualmente, una línea que conecta la fuente de radiación a un punto 02 en la primera superficie del metamaterial y la línea L forman un ángulo $\theta_2$ entre los mismos, el cual corresponde a un arco m2 elíptico; y cada punto en una superficie curva virtual el cual se obtiene mediante la rotación del arco m2 elíptico tiene el mismo índice refractivo.

La distribución del índice refractivo de la superficie curva virtual satisface:

$$n(\theta) = \frac{1}{S(\theta)}\left[ F(1 - \frac{1}{\cos\theta}) + n_{\max} d \right]$$

Como se muestra en la Fig. 6, $S(\theta)$ es una longitud de arco de la generatriz (el arco m elíptico) de la superficie curva virtual, $F$ es una distancia a partir de la fuente 20 de radiación al metamaterial 10; $d$ es un espesor del metamaterial 10; y $n_{max}$ es el máximo índice refractivo del metamaterial.

Como se muestra en la Fig. 9, cuando la línea L que pasa a través del centro O de la primera superficie del metamaterial 10 y perpendicular al metamaterial 10 se toma como un eje de abscisa y la línea que pasa a través del centro 0 de la primera superficie del metamaterial 10 y paralela a la primera superficie se toma como un eje de ordenada, una línea que conecta la fuente de radicación a un punto O' en la superficie A y el eje X forma un ángulo θ entre los mismos. Una ecuación de una elipse donde se localiza el arco m elíptico que se muestra por una línea sólida es: $\frac{(x-d)^2}{a^2} + \frac{(y-c)^2}{b^2} = 1$. Un centro de la elipse se localiza en la segunda superficie B, y tiene coordenadas (d, c) La elipse pasa a través de un punto (0, $F$ tan θ); por ejemplo, $y(0) = F \tan\theta$. Mediante la ecuación de la elipse, se puede obtener que $\frac{d^2}{a^2} + \frac{(F\tan\theta - c)^2}{b^2} = 1$. Con el fin de hacer que la onda electromagnética salga en paralelo después de pasar a través del metamaterial, una línea tangente del arco parabólico debe estar paralela con el eje X cuando la onda electromagnética se propaga a través de la segunda superficie B del metamaterial; por ejemplo, se debe asegurar que $y'(d)=0$. Una ecuación tangencial en cualquier punto (x, y) en la elipse es $\frac{dy}{dx} = -\frac{b^2}{a^2}\frac{x-d}{y-c}$, de manera que se puede obtener que $y'(d) = 0$.

El punto 0' en la primera superficie A correspondiente al ángulo θ tiene un ángulo de refracción θ' y un índice refractivo n(θ); y este se puede conocer a partir de la ley Snell que $n(\theta) = \frac{\operatorname{sen}\theta}{\operatorname{sen}\theta'}$. La onda electromagnética se propaga en una dirección tangente correspondiente al ángulo θ' de refracción cuando se alcanza la primera superficie A del metamaterial 10 (como se muestra en la Fig. 9). Esto es, en el punto donde el arco m elíptico se aproxima infinitamente al punto O', $y'(0^+) = \tan\theta'$. De este modo, la siguiente expresión relacional se puede obtener:

$$y'(0^+) = \tan\theta' = \frac{\operatorname{sen}\theta}{\sqrt{n^2(\theta) - \operatorname{sen}^2(\theta)}} = \frac{b^2}{a^2}\frac{d}{F\tan\theta - c}$$

El ángulo θ corresponde únicamente a una superficie curva en el metamaterial, la cual se obtiene mediante la rotación de la generatriz alrededor de la línea L (el eje X); y cada punto en la superficie curva a la cual el ángulo θ corresponde únicamente tiene un mismo índice refractivo. El ángulo θ oscila entre $[0, \frac{\pi}{2})$.

Se apreciará que, cuando a=b en la elipse, la elipse se vuelve un verdadero círculo; y en este caso, el arco elíptico correspondiente se vuelve un arco circular, y la superficie curva se forma mediante la rotación del arco circular alrededor de la línea L (el eje X).

Cuando la generatriz de la superficie curva es un arco circular, el arco que se muestra en la Fig. 4 es un arco circular, y una vista esquemática de la construcción del arco circular se muestra en la Fig. 10. Los arcos circulares que se muestran por líneas punteadas en la Fig. 10 son generatrices de las superficies curvas en el metamaterial. Con el fin de describir más claramente esos puntos en la misma superficie curva que tienen el mismo índice refractivo, la superficie curva virtual (la cual no existe actualmente, y se dilucida solo para conveniencia de la descripción) en el metamaterial será también dilucidada. Una línea perpendicular de una línea que conecta la fuente

de radicación a un punto en la primera superficie A del metamaterial, intersecta con la segunda superficie B del metamaterial 10 en un centro del círculo del arco circular, y un segmento de línea perpendicular entre el centro del círculo y un punto en la primera superficie A del metamaterial es un radio del arco circular. El metamaterial tiene el máximo índice refractivo en el centro del mismo.

Una línea que conecta la fuente de radiación a un punto C' en la primera superficie A del metamaterial y la línea L forman un ángulo $\theta_3$ entre los mismos, un segmento de línea perpendicular $V_3$ de la línea que conecta la fuente de radiación al punto C' intersecta con la otra superficie del metamaterial en un punto $O_3$, y la correspondiente superficie curva en el metamaterial tiene una generatriz m3, la cual es un arco circular que se obtiene mediante la rotación alrededor del punto $O_3$ con el segmento de línea perpendicular $V_3$ como un radio. Con el fin de describir más claramente que los puntos en la misma superficie curva tienen el mismo índice refractivo, la superficie curva virtual en el metamaterial de dilucidará también. La Fig. 10 ilustra arcos circulares m1, m2 los cuales son generatrices de dos superficies curvas en el metamaterial. El arco m1 circular corresponde a un ángulo $\theta_1$ y un punto A' en la primera superficie del metamaterial. Un segmento de línea $V_1$ de una línea que conecta la fuente de radiación con el punto A' intersecta con la otra superficie del metamaterial 10 en un punto $O_1$, y una superficie exterior de la superficie curva virtual tiene una generatriz m1, la cual es un arco circular que se obtiene mediante la rotación alrededor del punto $O_1$ con el segmento de línea perpendicular $V_1$ como un radio. Del mismo modo, el arco m2 circular corresponde a un ángulo $\theta_2$ y un punto B' en la primera superficie. Un segmento $V_2$ de línea perpendicular de una línea que conecta la fuente de radiación al punto B' intersecta con la segunda superficie B del metamaterial 10 en un punto $O_2$ y una superficie exterior de la superficie virtual curva tiene una generatriz m2, la cual es un arco circular que se obtiene mediante la rotación alrededor del punto $O_2$ con el segmento $V_2$ de línea perpendicular como un radio. Como se muestra en la Fig. 5, los arcos m1, m2, m3 circulares están distribuidos simétricamente con relación a la línea L.

Para cualquier punto D' en la primera superficie A, una línea que conecta la fuente de radiación al punto D' en la primera superficie A y la línea perpendicular al metamaterial 10 forman un ángulo θ entre los mismos, el cual abarca entre $[0, \frac{\pi}{2})$.

La regla del índice $n(\theta)$ refractivo del metamaterial varía con el ángulo θ, satisface:

$$n(\theta) = \frac{\operatorname{sen}\theta}{d \times \theta}(n_{\max} \times d + s - \frac{s}{\cos\theta})$$

donde, $s$ es una distancia a partir de la fuente de radiación al metamaterial 10; $d$ es un espesor del metamaterial 10; y $n_{max}$ es el máximo índice refractivo del metamaterial. El ángulo θ corresponde únicamente a una superficie curva en el metamaterial, y cada punto en la superficie curva al cual el ángulo θ corresponde únicamente, tiene un mismo índice refractivo.

Como se muestra en la Fig. 10, una línea que conecta la fuente de radiación a un cierto punto en la primera superficie A y la línea perpendicular al metamaterial 10 forman un ángulo θ entre los mismos, un segmento $V$ de línea perpendicular de la línea que conecta la fuente de radiación al punto en la primera superficie A intersecta con la segunda superficie B del metamaterial en un punto $O_m$ y una generatriz m es un arco circular que se obtiene mediante la rotación alrededor del punto $O_m$ con el segmento $V$ de línea perpendicular como un radio. El ángulo θ corresponde únicamente a una superficie curva en el metamaterial, el cual se obtiene mediante la rotación de la generatriz m alrededor de la línea L; y cada punto en la superficie curva al cual el ángulo θ corresponde únicamente tiene un mismo índice refractivo.

El metamaterial se puede usar para convertir la onda electromagnética emitida a partir de la fuente de radiación en una onda plana. Los índices refractivos del metamaterial disminuyen a partir de $n_{max}$ a $n_{min}$ en la medida que aumenta el ángulo.

El metamaterial se puede usar para convertir la onda electromagnética emitida a partir de la fuente de radiación en una onda plana. Los índices refractivos del metamaterial disminuyen a partir de $n_{max}$ a $n_{min}$ en la medida que el ángulo θ aumenta, como se muestra en la Fig. 10. El arco elíptico que se muestra por una línea sólida en la elipse es una generatriz de una superficie virtual curva en el metamaterial, y cada punto en la misma superficie curva tiene un mismo índice refractivo. Se apreciará que, el metamaterial de la presente invención puede usarse también para converger una onda plana a un foco (por ejemplo, un caso contrario del que se muestra en la Fig. 2). En este caso, no hay necesidad de cambiar la construcción del metamaterial siempre que la fuente de radiación esté ubicada en un lado de la segunda superficie B; y el principio sea el mismo excepto que la fuente de radiación en la definición del ángulo θ debe localizarse en el lado de la primer superficie A y localizado en una posición de la fuente de radiación

virtual correspondiente al foco del metamaterial. Diversas aplicaciones que adoptan el principio de la presente invención deben todas estar dentro del alcance de la presente invención.

En diseños de estructura prácticos, el metamaterial puede estar diseñado para estar formado por una diversidad de capas de lámina de metamaterial, cada una de las cuales comprende un substrato similar a una lámina y una diversidad de microestructuras hechas por el hombre o estructuras de poro hechas por el hombre unidas al substrato. La distribución del índice refractivo general de la diversidad de capas de lámina del metamaterial combinadas en conjunto, deben satisfacer o aproximadamente satisfacer las ecuaciones anteriormente mencionadas de manera que los índices refractivos en una misma superficie curva sean idénticos entre sí, y la generatriz de la superficie curva esté diseñada como un arco elíptico o un arco parabólico. Por supuesto, en los diseños prácticos, puede ser relativamente difícil diseñar la generatriz de la superficie curva como un arco elíptico exacto o un arco parabólico exacto, de manera que la generatriz de la superficie curva pueda estar diseñada como un arco elíptico aproximado, un arco parabólico aproximado o una forma escalonada como sea necesario y se pueden escoger grados de exactitud como sean necesarios. Con el avance continuo de las tecnologías, se actualizan continuamente las formas de diseño, y puede haber un mejor proceso de diseño para el metamaterial para lograr la distribución del índice refractivo proporcionado por la presente invención.

Cada una de las microestructuras hechas por el hombre es una estructura bidimensional (2D) o tridimensional (3D) consistente de un alambre de metal y que tiene un patrón geométrico, y puede ser de, por ejemplo pero no está limitado a, una forma de “cruz”, una forma de copo de nieve 2D o una forma de copo de nieve 3D. El alambre de metal puede ser un alambre de cobre o un alambre de plata, y puede estar unido en el substrato mediante grabado, galvanoplastia, perforación, fotolitografía, grabado de electrones o grabado de iones. La diversidad de microestructuras hechas por el hombre en el metamaterial hacen que los índices refractivos del metamaterial disminuyan en la medida que aumenta el ángulo θ. Dado que se conoce una onda electromagnética incidente, al diseñar apropiadamente los patrones de topología de las microestructuras hechas por el hombre y el diseño de la disposición de las microestructuras hechas por el hombre de diferentes dimensiones dentro de un componente convergente de onda electromagnética, la distribución del índice refractivo del metamaterial se puede ajustar para convertir una onda electromagnética divergente de la forma de una onda esférica en una onda electromagnética plana.

Con el fin de representar más intuitivamente la distribución del índice refractivo de cada una de las capas de lámina de metamaterial en un plano YX, las unidades que tienen el mismo índice refractivo están conectadas para formar una línea, y la magnitud del índice refractivo se representa por la densidad de las líneas. Una densidad superior de las líneas representa un índice refractivo grande. La distribución del índice refractivo del metamaterial que satisface todas las expresiones relacionadas anteriores es como se muestra en la Fig. 11.

La presente invención se ha dilucidado en detalle tomando el arco parabólico y el arco elíptico como ejemplos. Como un ejemplo no limitante, la presente invención puede aplicarse adicionalmente a otros tipos de curvas tales como curvas irregulares. Los casos que satisfacen el principio de distribución del índice refractivo de la presente invención caen todos dentro del alcance de la presente invención.

La presente invención proporciona además una antena de metamaterial. Como se muestra en la Fig. 2 y la Fig. 3, la antena de metamaterial comprende el metamaterial 10 y una fuente 20 de radiación dispuesta en un foco del metamaterial 10. La estructura y las variaciones del índice refractivo del metamaterial 10 se ha descrito anteriormente, y en consecuencia no será descritas adicionalmente en este documento.

El metamaterial anteriormente mencionado puede estar en la forma que se muestra en la Fig. 3, y por supuesto, puede también estar hecho dentro otras formas deseadas tales como una forma anular tanto como las reglas de variación del índice refractivo anteriormente mencionadas pueden satisfacer.

En aplicaciones prácticas, con el fin de lograr mejores rendimientos del metamaterial y reducir la reflexión, se puede disponer una capa de emparejamiento de impedancia en cada uno de los dos lados del metamaterial. Los detalles de la capa de emparejamiento de impedancia se pueden encontrar en los documentos de técnicas anteriores, y en consecuencia no serán descritos en este documento.

Al diseñar las transiciones abruptas de los índices refractivos del metamaterial para seguir una superficie curva de acuerdo con la presente invención, se pueden reducir significativamente la refracción, difracción y reflexión en los puntos de transición abruptos. Como resultado, se alivian los problemas causados por las interferencias, lo cual mejora adicionalmente los rendimientos del metamaterial.

Las realizaciones de la presente invención se han descrito anteriormente con referencia en los dibujos acompañantes. Sin embargo, la presente invención no está limitada a las realizaciones anteriormente mencionadas, y estas realizaciones son solo ilustrativas pero no pretenden limitar la presente invención. Aquellos con habilidades

ordinarias en la técnica pueden idear muchas otras implementaciones de acuerdo con las enseñanzas de la presente invención sin apartarse del espíritu y del alcance reivindicados en la presente invención, y todas las implementaciones deben caer dentro del alcance de la presente invención.

**REIVINDICACIONES**

1. Un metamaterial para ser usado con una fuente de radiación, el metamaterial está dispuesto en una dirección de propagación de ondas electromagnéticas emitidas a partir de la fuente de radiación, en donde una línea que conecta la fuente de radiación a un punto en una primera superficie del metamaterial y una línea perpendicular al metamaterial forman un ángulo θ entre los mismos, el cual corresponde únicamente a una superficie curva en el metamaterial; cada punto en la superficie curva al cual el ángulo θ corresponde únicamente tiene un mismo índice refractivo; los índices refractivos del metamaterial disminuyen gradualmente en la medida que el ángulo θ aumenta; y las ondas electromagnéticas que se propagan a través del metamaterial salen en paralelo a partir de una segunda superficie del metamaterial.

2. El metamaterial de la reivindicación 1, en donde la distribución del índice refractivo de la superficie curva satisface:

$$n(\theta)=\frac{1}{S(\theta)}\left[F(1-\frac{1}{\cos\theta})+n_{\max}d\right];$$

donde, $S(\theta)$ es una longitud de arco de una generatriz de la superficie curva, $F$ es una distancia a partir de la fuente de radiación al metamaterial; $d$ es un espesor del metamaterial; y $n_{max}$ es el máximo índice refractivo del metamaterial.

3. El metamaterial de la reivindicación 2, en donde el metamaterial comprende al menos una capa de lámina de metamaterial, cada una de las cuales comprende un substrato como una lámina y una diversidad de microestructuras hechas por el hombre unidas al substrato.

4. El metamaterial de la reivindicación 3, en donde cada una de las microestructuras hechas por el hombre es una estructura bidimensional (2D) o tridimensional (3D) que tiene un patrón geométrico.

5. El metamaterial de la reivindicación 4, en donde cada una de las microestructuras hechas por el hombre es de una forma de “cruz” o de una forma de copo de nieve.

6. El metamaterial de la reivindicación 2, en donde cuando la generatriz de la superficie curva es un arco parabólico, la longitud del arco parabólico s(θ) del arco parabólico satisface:

$$S(\theta)=\frac{d}{2}\left[\frac{\log(|\tan\theta|+\sqrt{1+\tan^2\theta})+\delta}{|\tan\theta|+\delta}+\sqrt{1+\tan^2\theta}\right];$$

donde δ es un decimal predefinido.

7. El metamaterial de cualquiera de la reivindicación 2 a la reivindicación 6, en donde cuando una línea que pasa a través de un centro de la primera superficie del metamaterial y perpendicular al metamaterial, se toma como un eje de abscisa y una línea que pasa a través del centro de la primera superficie del metamaterial y paralela a la primera superficie, se toma como un eje de ordenada, una ecuación de una parábola donde se ubica el arco parabólico se representa como:

$$y(x)=\tan\theta(-\frac{1}{2d}x^2+x+F)$$

8. El metamaterial de la reivindicación 7, en donde el ángulo θ y cada punto (x, y) del arco parabólico satisface la siguiente expresión relacional:

$$\theta(x,y)=\tan^{-1}\left[\frac{2dy}{2d(F+x)-x^2}\right]$$

9. El metamaterial de la reivindicación 2, en donde cuando la generatriz de la superficie curva es un arco elíptico, se toma la línea que pasa a través del centro de la primera superficie del metamaterial y perpendicular al metamaterial

como un eje de abscisa y se toma la línea que pasa a través del centro de la primera superficie del metamaterial y paralela a la primera superficie como un eje de ordenada, se representa una ecuación de una elipse donde se ubica el arco elíptico como:

$$\frac{(x-d)^2}{a^2}+\frac{(y-c)^2}{b^2}=1;$$

donde a, b y c satisfacen las siguientes relaciones:

$$\frac{d^2}{a^2}+\frac{(F\tan\theta-c)^2}{b^2}=1$$

,

$$\frac{\operatorname{sen}\theta}{\sqrt{n^2(\theta)-\operatorname{sen}^2(\theta)}}=\frac{b^2}{a^2}\frac{d}{F\tan\theta-c}$$

10. El metamaterial de la reivindicación 9, en donde un centro de la elipse donde se ubica el arco elíptico en la segunda superficie y tiene coordenadas (d, c).

11. El metamaterial de la reivindicación 9, donde un punto en la primera superficie correspondiente al ángulo θ tiene un ángulo de refracción θ', y un índice refractivo *n*(θ) del punto satisface:

$$n(\theta)=\frac{\operatorname{sen}\theta}{\operatorname{sen}\theta'}$$

12. El metamaterial de la reivindicación 1, en donde cuando la generatriz de la superficie curva es un arco circular, la distribución del índice refractivo de la superficie curva satisface:

$$n(\theta)=\frac{\operatorname{sen}\theta}{d\times\theta}(n_{\max}\times d+s-\frac{s}{\cos\theta})$$

;

donde, *s* es una distancia a partir de la fuente de radiación al metamaterial; *d* es un espesor del metamaterial; y $n_{max}$ es el máximo índice refractivo del metamaterial.

13. El metamaterial de la reivindicación 12, en donde una línea perpendicular de una línea que conecta la fuente de radiación a un punto en la primera superficie del metamaterial, intersecta con la segunda superficie del metamaterial en un centro del círculo del arco circular, y un segmento de línea perpendicular entre el centro del círculo y un punto en la primera superficie del metamaterial es un radio del arco circular.

14. El metamaterial de la reivindicación 12, en donde el metamaterial se proporciona con una capa de emparejamiento de impedancia en dos lados del mismo respectivamente.

15. Una antena de metamaterial, que comprende un metamaterial de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 14 y una fuente de radiación dispuesta en un foco del metamaterial.

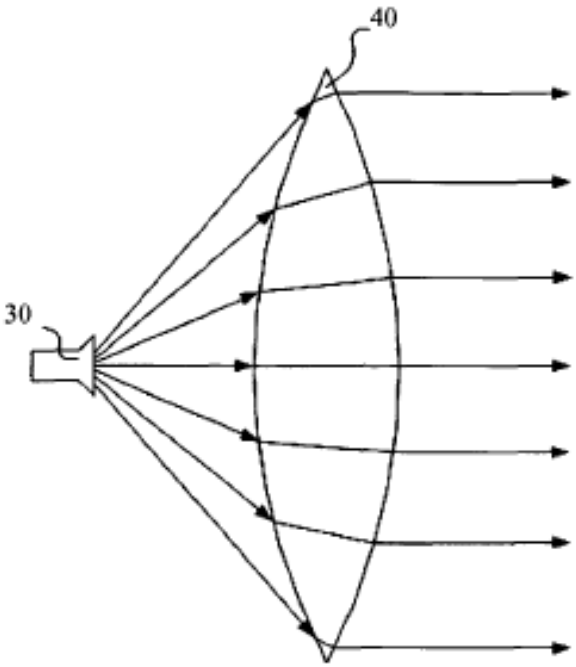


FIG. 1

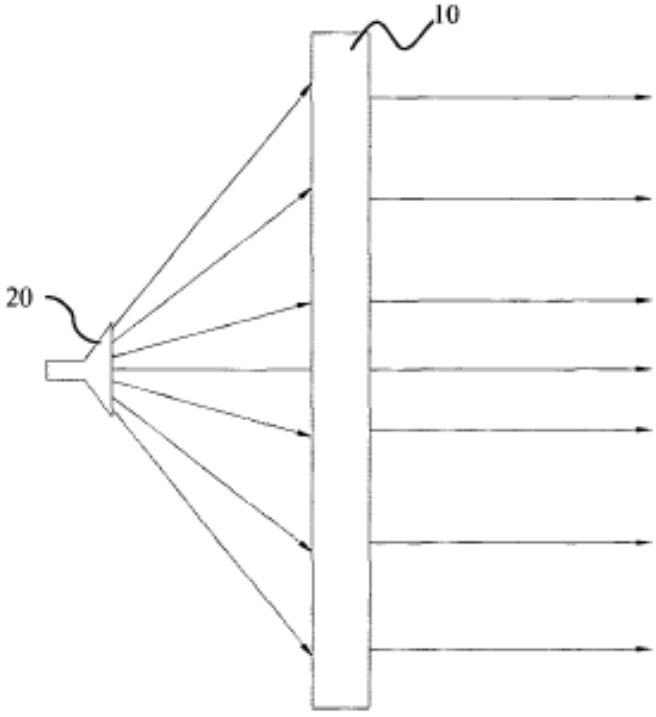


FIG. 2

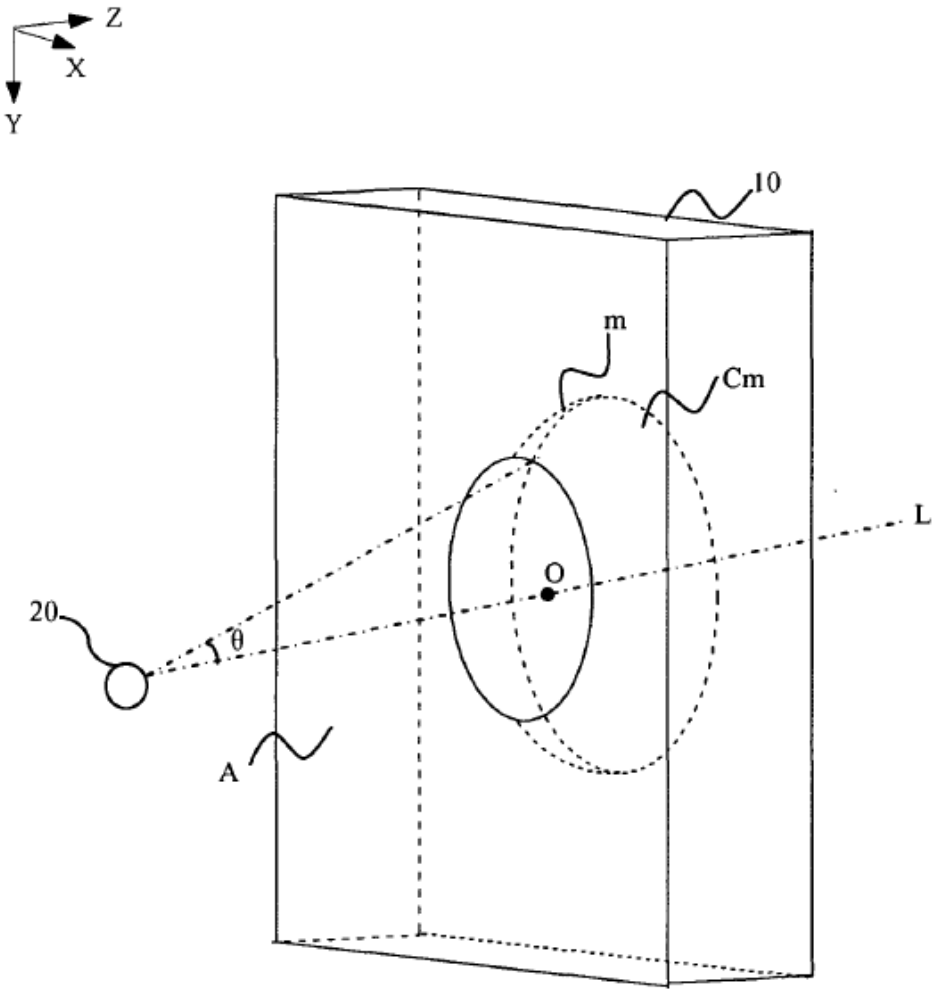


FIG. 3

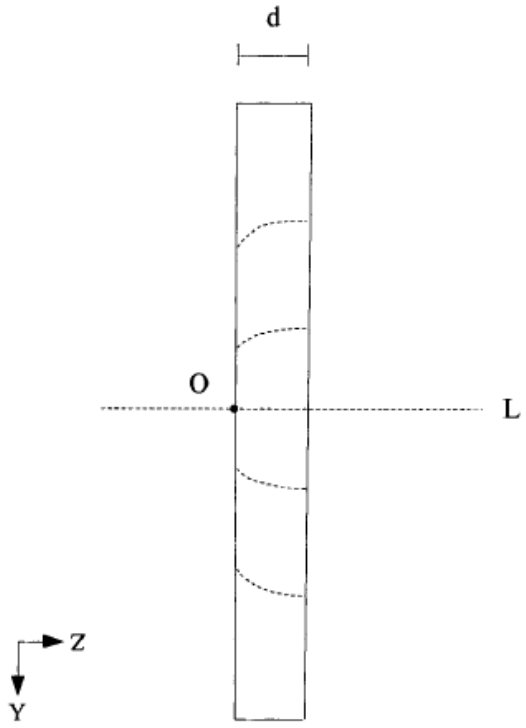


FIG. 4

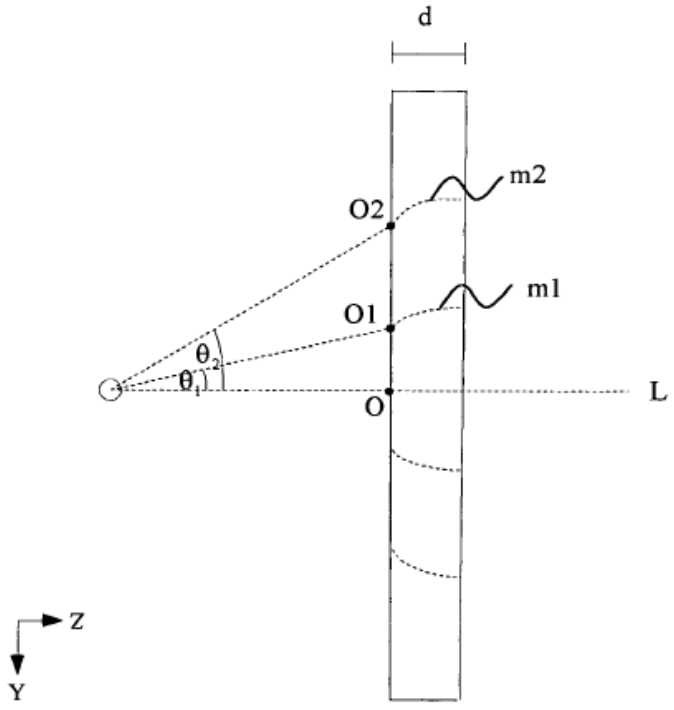


FIG. 5

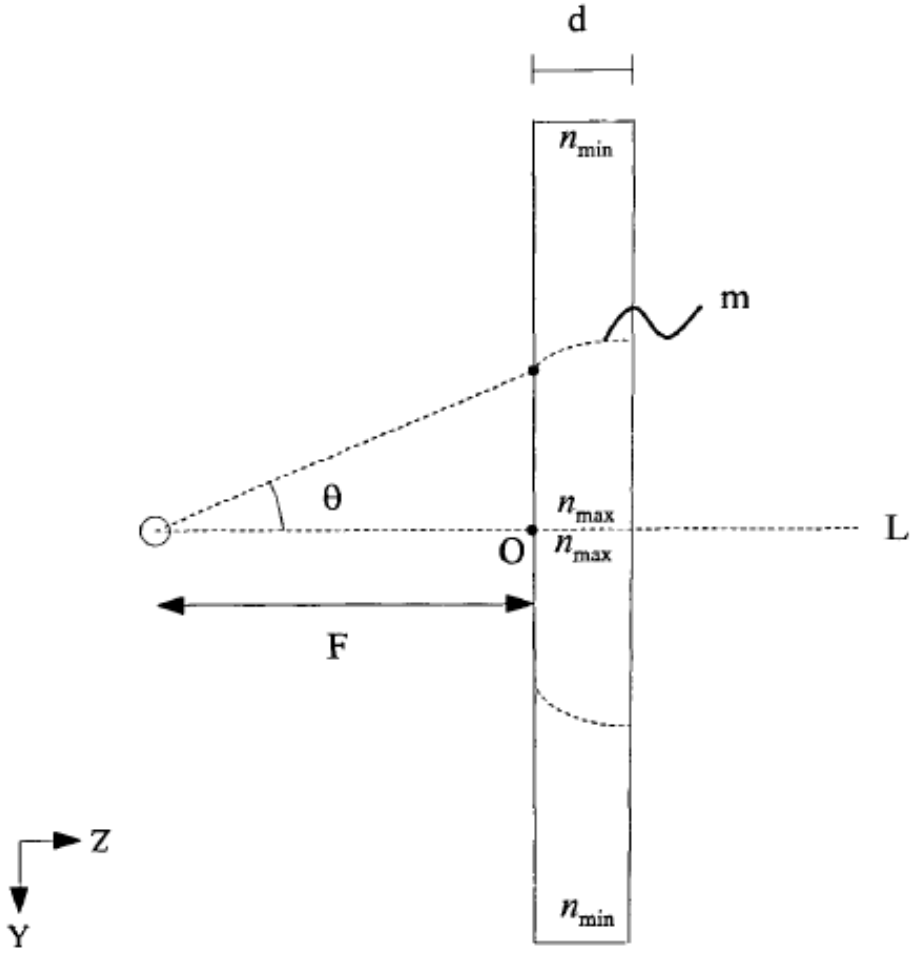


FIG. 6

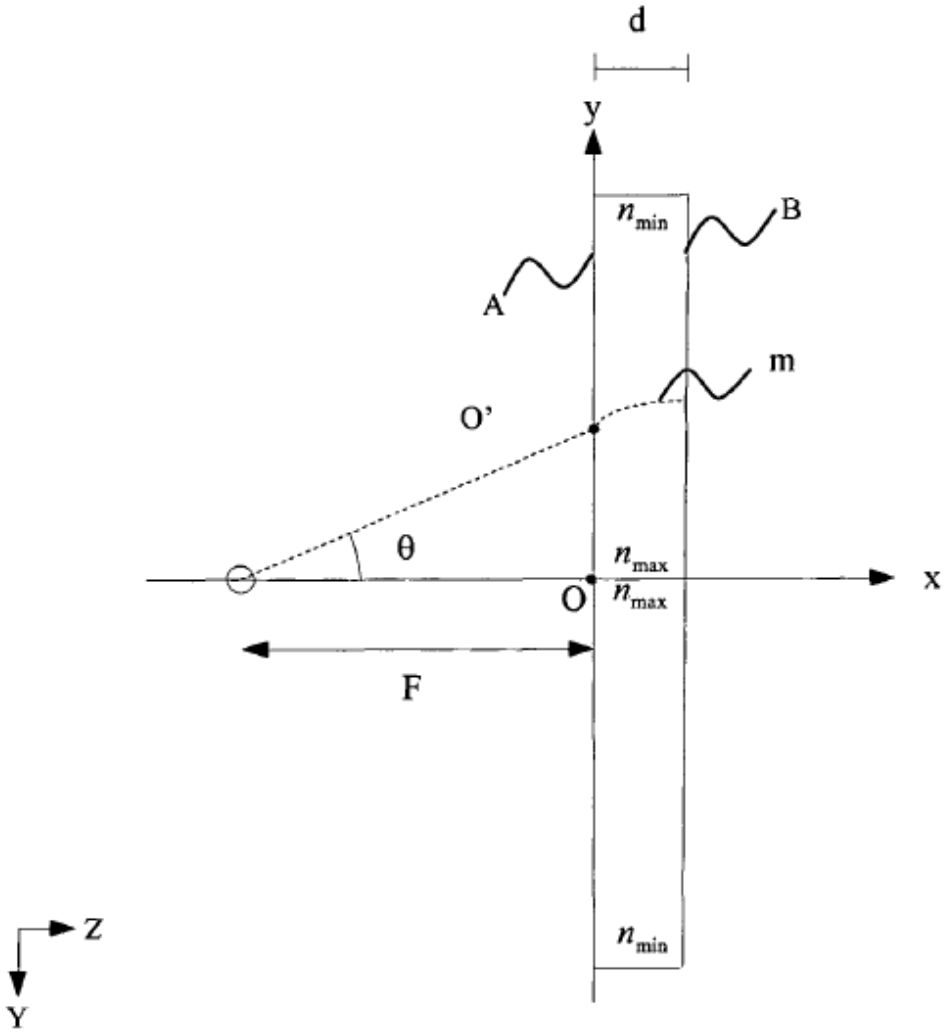


FIG. 7

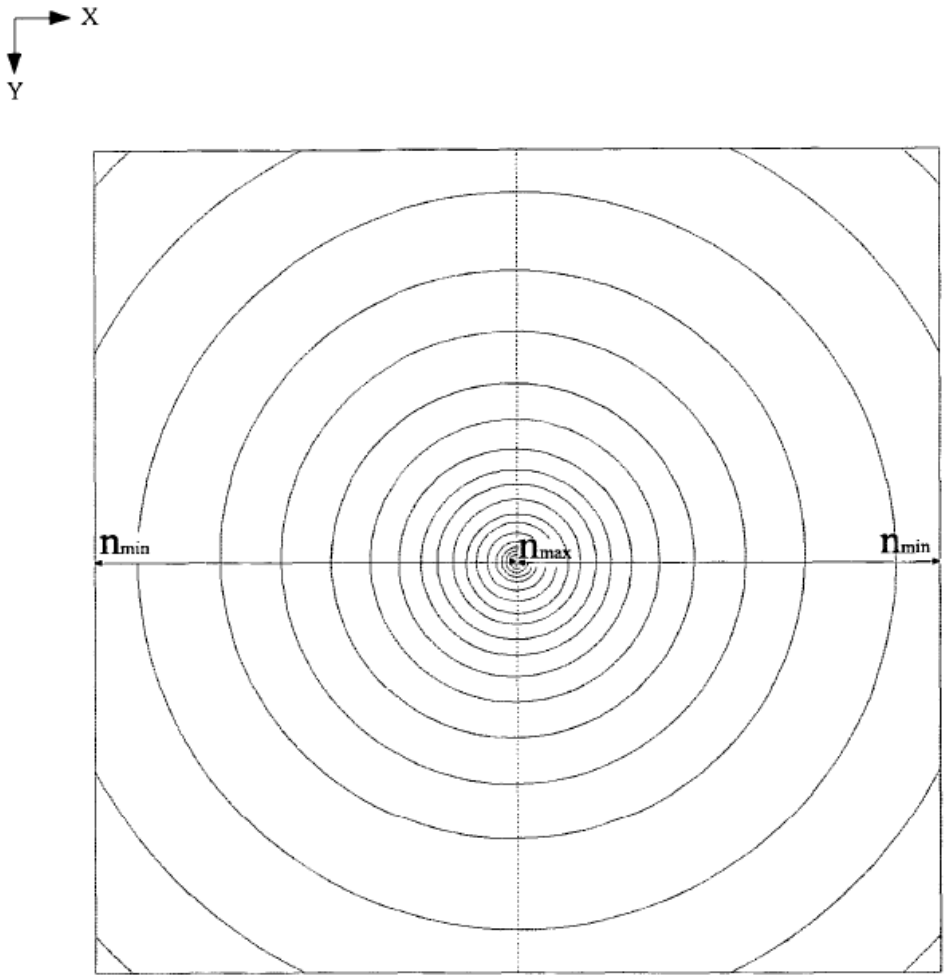


FIG. 8

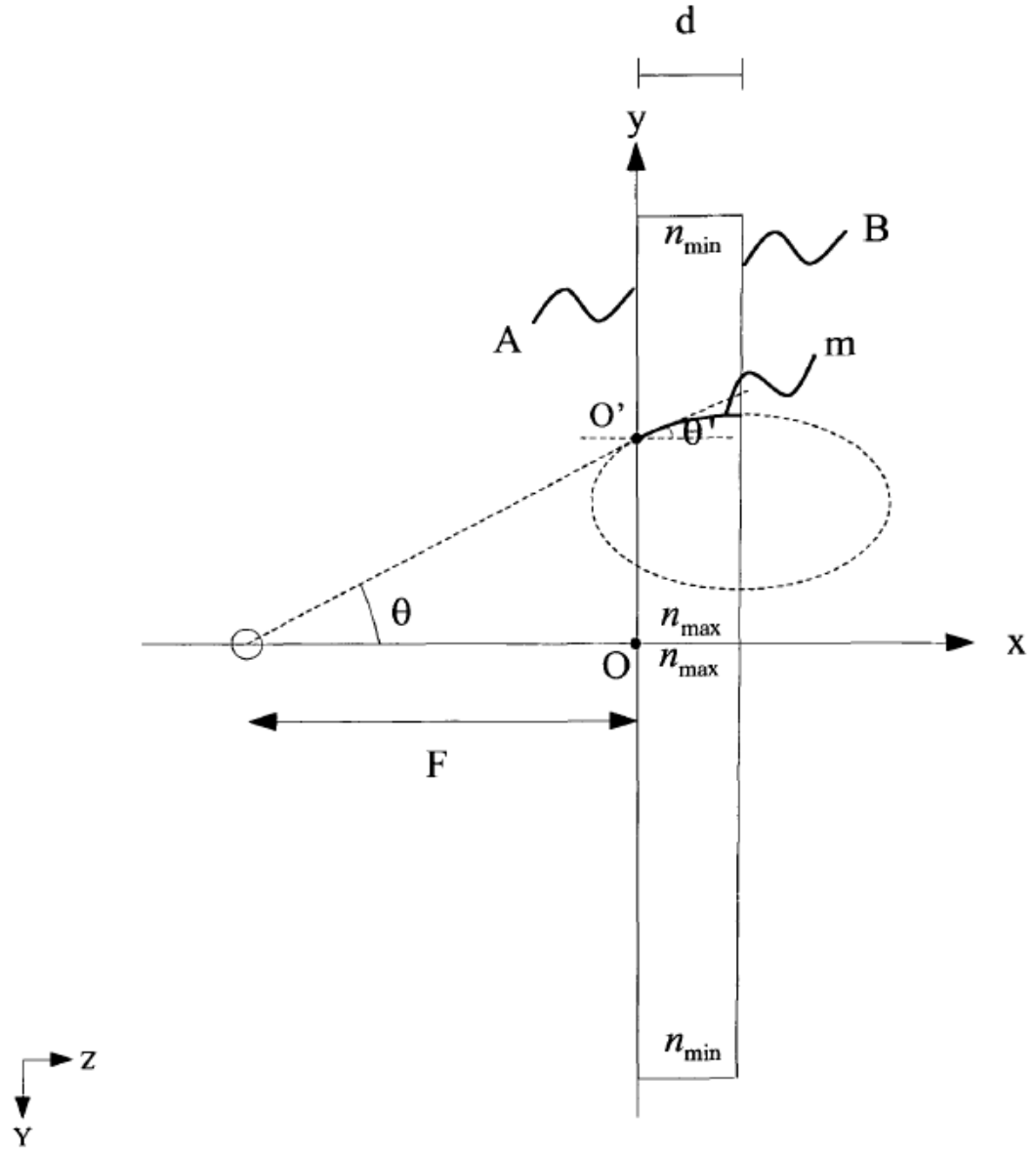


FIG. 9

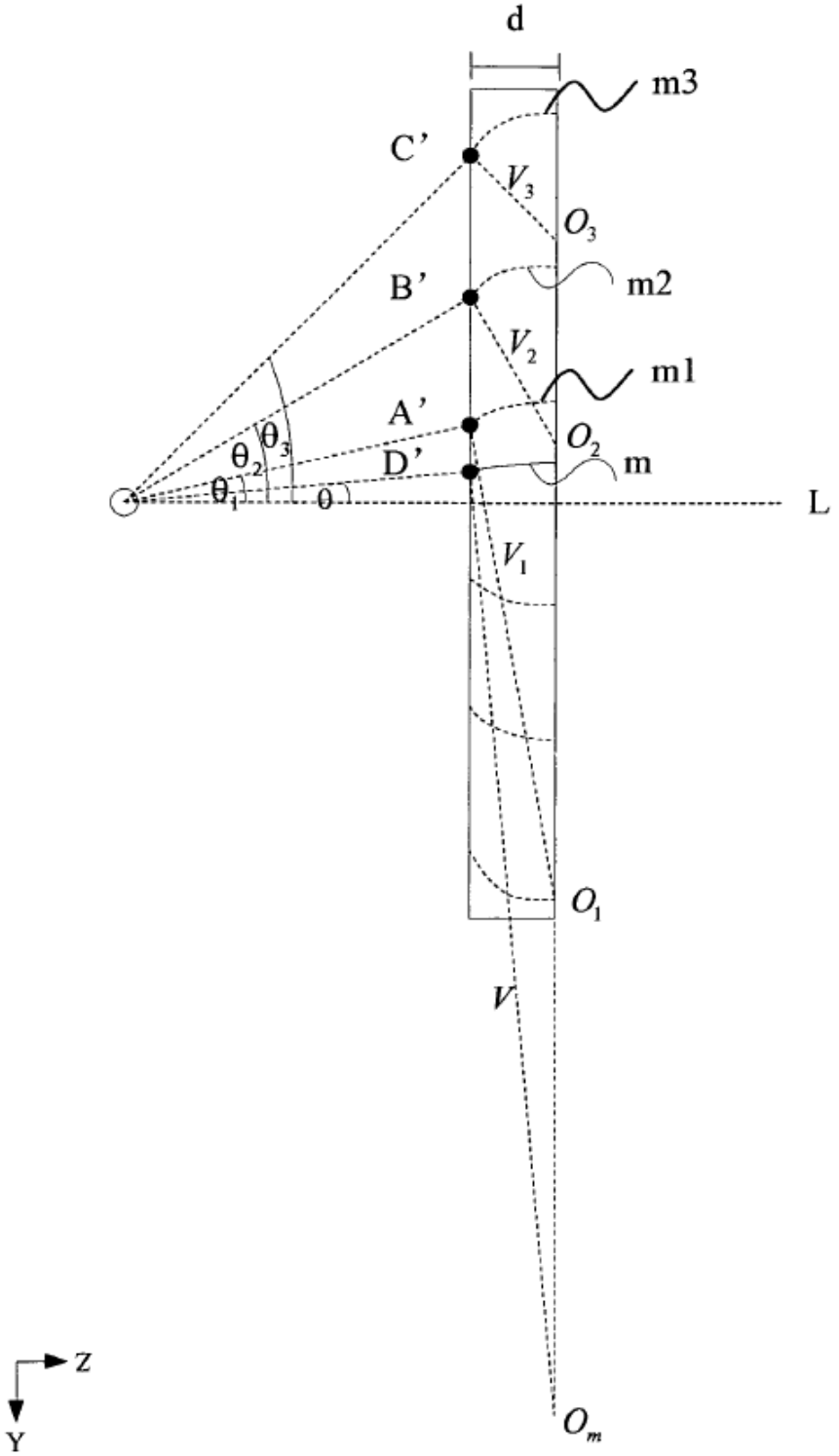


FIG. 10

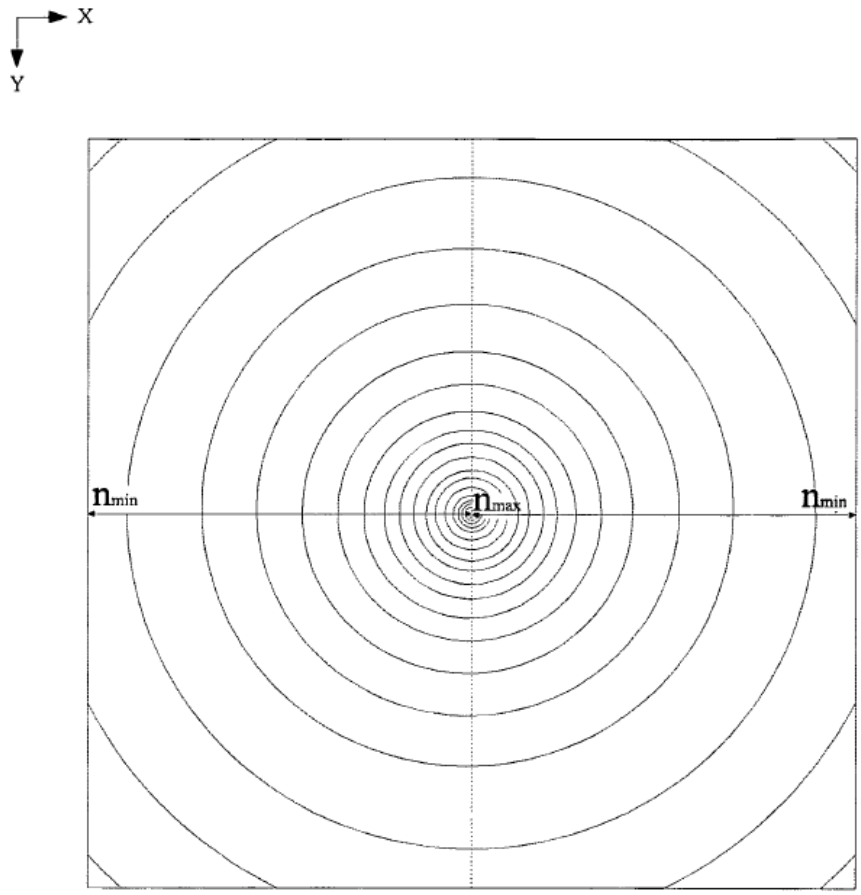


FIG. 11