



República Federativa do Brasil
Ministério do Desenvolvimento, Indústria
e do Comércio Exterior
Instituto Nacional da Propriedade Industrial.

(21) **PI0707619-3 A2**

(22) Data de Depósito: 09/02/2007
(43) Data da Publicação: 10/05/2011
(RPI 2105)



(51) *Int.Cl.:*
G02C 7/06
A61F 2/16

(54) Título: **LENTE INTRAOCULAR PSEUDOACOMODATIVA APRESENTADO ZONAS DIFRATIVAS COM ÁREAS VARIADAS**

(30) Prioridade Unionista: 09/02/2006 US 11/350,497

(73) Titular(es): ALCON RESEACH, LTD

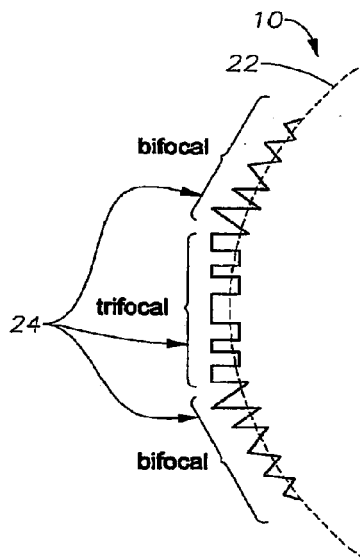
(72) Inventor(es): Steve Vannoy, Xiaoxiao Zhang, Xin Hong

(74) Procurador(es): Dannemann, Siemsen, Bigler & Ipanema Moreira

(86) Pedido Internacional: PCT US2007061906 de 09/02/2007

(87) Publicação Internacional: WO 2007/092949 de 16/08/2007

(57) Resumo: LENTE INTRAOCULAR PSEUDOACOMODATIVA APRESENTANDO ZONAS DIFRATIVAS COM ÁREAS VARIADAS. Em um aspecto da invenção, é descrita uma lente oftálmica trifocal que inclui um meio óptico apresentando pelo menos uma superfície óptica, e uma pluralidade de zonas difrativas que é disposta em uma porção dessa superfície em torno de um eixo óptico do meio óptico. Pelo menos duas dessas zonas difrativas apresentam diferentes áreas que modo a produzirem um alargamento dos perfis de energia óptica em um foco próximo e em um foco distante das zonas difrativas para gerar um foco intermediário.



Relatório Descritivo da Patente de Invenção para "**LENTE INTRAOCULAR PSEUDOACOMODATIVA APRESENTANDO ZONAS DIFRATIVAS COM ÁREAS VARIADAS**".

REFERÊNCIA CRUZADA A PEDIDOS RELACIONADOS

5 Este pedido reivindica prioridade de acordo com o Pedido de Patente U.S. Nº 11/350.497, 35 U.S.C. §119, depositado em 9 de fevereiro de 2006, os conteúdos totais do qual são aqui incorporados para referência.

ANTECEDENTES

10 A presente invenção refere-se, de modo geral, a lentes oftálmicas multifocais, e, mais particularmente, a lentes oftálmicas trifocais, tais como lentes intra-oculares trifocais (IOLs).

Uma pluralidade de lentes oftálmicas encontra-se disponível para corrigir distúrbios visuais, tais como catarata, miopia, hipermetropia ou astigmatismo. Por exemplo, uma lente intra-ocular (IOL) pode ser implantada
15 no olho de um paciente durante a cirurgia de catarata para compensar a potência óptica perdida da lente natural removida. Através da provisão da potência óptica exigida, as IOLs não proporcionam a acomodação (isto é, a capacidade de focalizar objetos em distâncias variadas) que pode ser conseguida por uma lente natural. Entretanto, são conhecidas IOLs multifocais
20 que podem prover um certo grau de acomodação (também conhecido como pseudoacomodação). Por exemplo, encontram-se disponíveis IOLs difrativas bifocais que podem prover um foco próximo e um foco distante.

As lentes oftálmicas trifocais são também conhecidas por proverem um foco próximo e um foco distante, assim como um foco intermediário.
25 Tais lentes trifocais convencionais, entretanto, sofrem de inúmeros inconvenientes. Por exemplo, elas proporcionam uma visão intermediária à custa da degradação da visão de longe e/ou de perto.

Conseqüentemente, existe uma necessidade de lentes oftálmicas multifocais aperfeiçoadas, e, particularmente, lentes oftálmicas trifocais.
30 Existe também uma necessidade de tais lentes multifocais na forma de lentes intra-oculares (IOLs) que podem ser implantadas nos olhos de pacientes, por exemplo, para substituir a lente natural.

SUMÁRIO

A presente invenção refere-se, de maneira geral, a lentes oftálmicas difrativas, tais como lentes intra-oculares trifocais (IOLs) que proporcionam a visão de perto e de longe, bem como visão intermediária. As lentes oftálmicas da invenção utilizam estruturas difrativas para dirigir luz incidente para três regiões focais correspondendo à visão de perto, intermediária e de longe. Por exemplo, as lentes oftálmicas incluem uma pluralidade de zonas difrativas com áreas variadas de modo a produzirem um alargamento dos perfis de energia óptica em um foco próximo e em um foco distante gerados por essas zonas, criando assim um foco intermediário. Em alguns casos, uma diferença máxima entre as áreas das zonas difrativas pode estar, por exemplo, em uma faixa de cerca de 75% a cerca de 200%.

Em um aspecto da invenção, é descrita uma lente oftálmica trifocal que inclui um meio óptico apresentando pelo menos uma superfície óptica, e uma pluralidade de zonas difrativas que é disposta em uma porção dessa superfície em torno de um eixo óptico do meio óptico. Pelo menos duas dessas zonas difrativas apresentam diferentes áreas de modo a produzirem um alargamento dos perfis de energia óptica em um foco próximo e em um foco distante das zonas difrativas para gerar um foco intermediário. Por meio de exemplo, as zonas difrativas podem dirigir pelo menos cerca de 25% da energia de luz incidente, ou, preferivelmente, pelo menos cerca de 28% da energia de luz incidente, em cada dos focos próximo e distante, enquanto dirige pelo menos cerca de 10% da energia de luz incidente para o foco intermediário. A superfície óptica pode também incluir um perfil de referência caracterizado por uma curva de base para gerar uma potência refrativa correspondendo ao foco distante. O termo "zona difrativa", conforme usado aqui, se refere a uma área da superfície que contém uma ou mais estruturas difrativas que são repetidas, seja identicamente, seja de acordo com uma apodização selecionada, para gerar um padrão de difração disposto nessa superfície.

Em um aspecto afim, as zonas difrativas exibem maiores áreas como uma função da maior distância do eixo óptico. Por exemplo, as zonas

difrativas podem ser formadas como zonas anulares, onde um quadrado do raio de uma zona é definido pela seguinte relação:

$$r_i^2 = (2i + 1)\lambda f + g(i),$$

onde i indica um número de zona, r_i^2 indica um raio quadrado dessa zona, e f indica uma potência adicional do foco próximo com relação ao foco distante, λ indica um comprimento de onda determinado, e $g(i)$ indica uma função de não-constante de i .

Por meio de exemplo, a função $g(i)$ pode ser definida, como segue:

$$g(i) = (a^2 + bi)f,$$

onde

i indica o número de zona,

a e b são dois parâmetros ajustáveis, e

f indica o comprimento focal do foco próximo. Por meio de exemplo, a pode estar em uma faixa de cerca de $0,1 \lambda$ a cerca de $0,3 \lambda$, e b pode estar em uma faixa de cerca de $1,5 \lambda$ a cerca de $2,5 \lambda$, onde λ indica o comprimento de onda.

Em outro aspecto, a invenção apresenta uma lente oftálmica trifocal que compreende um meio óptico apresentando uma superfície caracterizada por uma curva de referência de base, e uma pluralidade de estruturas difrativas anulares sobrepostas em uma porção dessa curva de base em torno de um eixo óptico do meio óptico. As estruturas difrativas exibem larguras variadas de modo a coletivamente proverem visão de perto, intermediária e de longe.

Em um aspecto afim, as estruturas difrativas exibem maiores larguras como uma função da maior distância a partir do eixo óptico. Por meio de exemplo, as larguras das estruturas difrativas podem aumentar radialmente para fora a partir do eixo óptico em um modo linear ou não-linear. Por meio de exemplo, em algumas concretizações, as larguras aumentam linearmente de tal modo que uma diferença de porcentagem máxima nas larguras das estruturas varie de cerca de 75% a cerca de 200%.

Em outro aspecto, é descrita uma lente oftálmica multifocal que

inclui um meio óptico apresentando pelo menos uma superfície óptica, e pelo menos duas zonas difrativas dispostas nessa superfície. Uma das zonas difrativas apresenta uma área maior do que uma área da outra zona por um fator em uma faixa de cerca de 75% a cerca de 200%, de tal modo que as zonas coletivamente proporcionem visão de perto, intermediária e de longe.

Um entendimento adicional da invenção poderá ser conseguido por meio de referência à seguinte descrição detalhada em conjunção com os desenhos anexos, que são descritos resumidamente abaixo.

BREVE DESCRIÇÃO DOS DESENHOS

10 A Figura 1A é uma vista em seção transversal esquemática de uma lente oftálmica trifocal, de acordo com uma concretização da invenção.

A Figura 1B é uma vista em seção transversal esquemática de uma superfície anterior de um meio óptico da lente da Figura 1A compreendendo uma pluralidade de estruturas difrativas sobrepostas em um perfil de base.

15 A Figura 2 é uma vista frontal da lente difrativa das figuras anteriores que representa uma pluralidade de zonas anulares formadas pelas estruturas difrativas.

A Figura 3 mostra uma distribuição exemplificativa da potência óptica nas regiões de perto, intermediária e de longe de uma lente oftálmica trifocal, de acordo com uma concretização da invenção.

20 A Figura 4A esquematicamente representa a focalização da luz que emana de um objeto próximo, intermediário e distante sobre a retina de um olho no qual é implantada uma lente IOL trifocal, de acordo com uma concretização da invenção.

25 A Figura 4B é uma vista frontal esquemática de uma lente oftálmica trifocal, de acordo com outra concretização da invenção, que apresenta padrões difrativos bifocais interno e externo com diferentes potências adicionais selecionadas, de tal modo que os padrões coletivamente proporcionem

30 visão de perto, intermediária e de longe.

A Figura 4C esquematicamente representa perfis de energia óptica nos focos próximo e distante de padrões bifocais individuais da lente

mostrada na Figura 4B, bem como os perfis de energia nos focos próximo, intermediário e distante coletivamente providos pelos padrões combinados.

5 A Figura 5A é uma vista em seção transversal esquemática de uma lente oftálmica trifocal, de acordo com outra concretização da invenção, que apresenta zonas difrativas com áreas desiguais.

A Figura 5B é uma vista frontal da lente oftálmica da Figura 5A.

10 A Figura 6 apresenta dois gráficos esquemáticos que contrastam as relações entre os raios quadrados das zonas difrativas de duas lentes difrativas, em uma das quais as zonas difrativas exibem áreas uniformes e na outra exibem áreas não-uniformes.

A Figura 7 apresenta dois gráficos esquemáticos que ilustram o aperfeiçoamento de acuidade visual para visão intermediária provida por uma lente oftálmica trifocal, de acordo com uma concretização da invenção.

15 A Figura 8 esquematicamente representa o retardo de fase óptica (OPD) associado com três ordens de difração de uma lente oftálmica difrativa multifocal através de duas ordens difrativas como uma função da distância radial quadrada do eixo óptico da lente.

DESCRIÇÃO DETALHADA

20 A presente invenção refere-se, de maneira geral, a lentes oftálmicas trifocais, tais como lentes intra-oculares, que proporcionam visão de perto, intermediária e de longe. As lentes oftálmicas trifocais da invenção vantajosamente apresentam um desempenho visual aperfeiçoado para a visão intermediária com relação àquele tipicamente obtido pelas lentes trifocais convencionais enquanto mantêm e, em muitos casos, excedem o de-
25 desempenho visual de perto e de longe de tais lentes convencionais. Nas concretizações discutidas abaixo, vários aspectos das lentes trifocais da invenção são descritos em conexão com as lentes intra-oculares. Contudo, deve ser entendido que os princípios da invenção podem ser similarmente aplicados à fabricação de outras lentes oftálmicas, tais como lentes de contato.

30 Com referência às Figuras 1A e 1B, uma lente oftálmica trifocal 10, de acordo com uma concretização da invenção, inclui um meio óptico 12 apresentando uma superfície óptica anterior 14 e uma superfície óptica pos-

terior 16. Nesta concretização, as superfícies ópticas anterior e posterior são simetricamente dispostas em torno de um eixo óptico 18 da lente, embora superfícies assimétricas possam também ser empregadas. A lente exemplificativa 10 também inclui agarres ou membros de fixação que se estendem radialmente 20 para sua colocação no olho de um paciente. O meio óptico 12 pode ser formado de qualquer material biocompatível adequado. Alguns exemplos de tais materiais incluem, sem limitação, acrílico macio, silicone, hidrogel ou outros materiais poliméricos biocompatíveis apresentando um índice exigido de refração para uma aplicação específica da lente. Os membros de fixação 20 podem também ser formados de materiais poliméricos adequados, tais como polimetilmetacrilato, polipropileno e semelhantes. Embora as superfícies 14 e 16 sejam representadas como sendo geralmente convexas, cada superfície pode ter uma forma geralmente côncava. Alternativamente, as superfícies 14 e 16 podem ser selecionadas para proverem uma lente plano-convexa ou plano côncava. Os termos "lente intra-ocular" e sua abreviação "IOL" são usados aqui intercambiavelmente para descrever lentes que são implantadas no interior de um olho ou para substituir a lente natural do olho ou para, de outra forma, aumentar a visão, não obstante se a lente natural é ou não removida.

20 A superfície anterior 14 é caracterizada por uma curva de base 22 (representada por linhas tracejadas) que proporciona uma potência refrativa selecionada e na qual é sobreposta uma pluralidade de estruturas difrativas 24. Conforme esquematicamente mostrado na Figura 2, as estruturas difrativas 24 podem ser caracterizadas como formando uma pluralidade de zonas difrativas anulares concêntricas 26 que difratam luz incidente para uma pluralidade de ordens difrativas, em uma maneira discutida abaixo em maiores detalhes. As zonas difrativas 26 são confinadas dentro de uma porção da superfície que é circundada por uma porção periférica 28 que é desprovida de estruturas difrativas. Em outras palavras, as zonas difrativas são truncadas de tal modo que a porção periférica da superfície anterior proporcione uma potência puramente refrativa ditada pela curva de base. Nesta concretização, as zonas difrativas são caracterizadas por dois padrões difra-

tivos, um dos quais é aqui denominado de padrão trifocal e o outro como um padrão bifocal. Mais especificamente, as zonas anulares 26a, 26b e 26c, que formam o padrão difrativo trifocal, cooperativamente direcionam luz incidente principalmente para três ordens de difração (aqui denominada de ordens de difração "+1", "0", e "-1"). A luz dirigida para a ordem de difração +1 converge para formar um foco próximo, enquanto que os feixes de luz dirigidos para as ordens de difração 0 - 1 convergem para formar, respectivamente, um foco intermediário e longe (distância). Deve ser apreciado que as zonas difrativas que formam o padrão trifocal difratam luz para as ordens mais altas também. Entretanto, o padrão trifocal difrata uma grande porcentagem da luz incidente, por exemplo, cerca de 60% ou mais, para as três ordens.

Nesta concretização exemplificativa, as zonas difrativas anulares 26d, 26e, 26f, 26h e 26i formam o padrão difrativo bifocal, que difrata a luz incidente principalmente para duas ordens de difração (por exemplo, ordens de "0" e "+1"). A luz difratada para a 0^{ésima} ordem do padrão bifocal converge para um foco que é substancialmente coincidente com o foco de distância acima gerado pela convergência da luz difratada para a ordem -1 do padrão trifocal. E a luz difratada para a ordem de difração +1 do padrão bifocal converge para um foco que é substancialmente coincidente com o foco próximo acima gerado pela convergência da luz difrata para a ordem de difração +1 do padrão trifocal. Similar ao padrão trifocal, o padrão bifocal difrata luz para ordens mais altas também. Entretanto, ele difrata o volume de energia óptica incidente, por exemplo, cerca de 60% ou mais, para as ordens 0 e -1.

Além disso, o foco refrativo provido pela curva de base da superfície anterior substancialmente corresponde ao foco distante gerado pelos padrões difrativos. Isto é, a potência refrativa da lente contribui para o desempenho da lente para a visão de longe.

Conforme mostrado esquematicamente na Figura 1B, nesta concretização exemplificativa, as zonas difrativas trifocais são formadas por estruturas (degraus) difrativas substancialmente retangulares, que são separadas entre si em seus limites de zona por uma altura de degrau substancialmente uniforme. Por meio de exemplo, a altura do degrau em um compri-

mento de onda determinado pode ser definida de acordo com a seguinte relação:

$$\text{Altura do degrau} = \frac{\lambda}{a(n_2 - n_1)} \quad \text{Equação (1)}$$

onde

λ é o comprimento de onda determinado (por exemplo, 550 nm),

5 a indica um parâmetro que pode ser ajustado para controlar a eficiência de difração associada com várias ordens. Por meio de exemplo, a pode ser selecionado para ser 2,5,

n_2 é o índice refrativo do meio óptico, e

10 n_1 indica o índice refrativo do meio que circunda a lente. Nas concretizações nas quais o meio circundante é o humor aquoso apresentando um índice de refração de 1,336, o índice refrativo do meio óptico (n_2) pode ser selecionado para ser 1,55. A altura do degrau provida pela equação acima é apenas um exemplo, e as outras alturas de degrau podem também ser utilizadas.

15 Em contraste, as zonas difrativas bifocais, nesta concretização exemplificativa, são formadas por uma pluralidade de estruturas difrativas na forma de dente de serra, que são separadas entre si em seus respectivos limites de zona por alturas de degrau não-uniformes. Mais especificamente, as alturas de degrau nos limites de zona do padrão bifocal progressivamente
20 diminuem na medida em que aumenta suas distâncias a partir do eixo óptico. Em outras palavras, as alturas de degrau nos limites das estruturas difrativas bifocais são "apodizadas" de modo a modificarem a fração da energia óptica difratada nos focos próximo e distante como uma função do tamanho da abertura (por exemplo, na medida em que aumenta o tamanho de abertura,
25 mais da energia da luz é difratada para o foco distante). Por meio de exemplo, a altura do degrau em cada limite de zona do padrão difrativo bifocal pode ser definida de acordo com a seguinte relação:

$$\text{Altura do degrau} = \frac{\lambda}{a(m - n)} \quad \text{Equação (1)}$$

onde

λ indica um comprimento de onda determinado (por exemplo,

550 nm),

a indica um parâmetro que pode ser ajustado para controlar a eficiência de difração associada com várias ordens, por exemplo, a pode ser selecionado para ser 2,5,

5 n_2 indica o índice de refração do meio óptico, e

n_1 indica o índice refrativo de um meio no qual a lente é colocada, e $f_{apodize}$ representa uma função de escala cujo valor diminui como uma função de aumentar a distância radial da interseção do eixo óptico com a superfície anterior da lente. Por meio de exemplo, a função de escala $f_{apodize}$ pode ser definida pela seguinte relação:

$$f_{apodize} = 1 - \left(\frac{r_1}{r_{out}}\right)^2 \quad \text{Equação (I)}$$

onde:

r_1 indica a distância radial da i ésima zona,

r_{out} indica o raio externo da última zona difrativa bifocal.

15 Outras funções de escala de apodização podem também ser empregadas, tais como aquelas descritas em um pedido de patente co-pendente intitulado "Lentes Difrativas Anesféricas Apodizadas", depositado em 1 de dezembro de 2004, e apresentando um número de série 11/000770, que é aqui incorporado para referência. Além disso, as estruturas difrativas podem ter formas geométricas diferentes daquelas descritas acima.

20 Embora as propriedades difrativas dos padrões trifocal e bifocal tenham sido discutidas separadamente acima, os dois padrões cooperativamente geram os focos próximo, intermediário e distante para prover, respectivamente, visão de perto, intermediária e de longe. Conforme mostrado esquematicamente na Figura 3, em cada foco, a energia óptica é distribuída de acordo com um perfil que exhibe um máximo no ponto focal e diminui em ambos os lados desse ponto. Uma largura do perfil de energia difrativa (por exemplo, largura total em meio-máximo) associado com cada ponto focal apresenta uma medida da profundidade associada do foco. Em algumas concretizações, a fração de energia óptica incidente (por exemplo, na forma de raios incidentes substancialmente paralelos) dirigida para cada das regiões focais de perto e de longe com relação àquela dirigida para a região focal

intermediária pode estar em uma faixa de cerca de 1,4 a cerca 4. Por meio de exemplo, a eficiência difrativa associada com cada dos focos próximo e distante pode estar em uma faixa de cerca de 28% a cerca de 38%, enquanto a eficiência difrativa associada com o foco intermediário fica em uma faixa de cerca de 10% a cerca de 28%.

Com referência novamente à Figura 2, nesta concretização, o padrão difrativo trifocal se estende do eixo óptico para uma distância (raio) R a partir desse eixo, enquanto que o padrão difrativo bifocal se estende a partir da distância R para uma distância radial maior R' (menor que um raio R'' da superfície anterior). Conseqüentemente, para tamanhos de pequena abertura (pupila), as propriedades de visão de perto, intermediária e de longe da lente são principalmente determinadas pelo padrão difrativo trifocal. Na medida em que aumenta o tamanho da abertura (pupila), as propriedades da lente são principalmente ditadas pelo padrão difrativo bifocal. Nesta concretização, na medida em que o tamanho da abertura aumenta, aumenta a fração de energia óptica dirigida para os focos próximo e distante com relação àquela dirigida para o foco intermediário. Ademais, conforme notado acima, a apodização das alturas de degrau das zonas difrativas bifocais resulta em um aumento na energia óptica dirigida para o foco distante com relação ao foco próximo, na medida em que o tamanho da abertura aumenta. De modo geral, o raio do meio óptico (R'') é selecionado para ficar em uma faixa de cerca de 2,5 a cerca de 3,5 milímetros, com o raio do padrão trifocal (R) ficando em uma faixa de cerca de 1 a cerca de 1,5 milímetros e aquele do padrão bifocal (R') em uma faixa de cerca de 1,5 a cerca de 2 milímetros - embora outros valores possam também ser empregados. Além disso, embora apenas algumas zonas anulares sejam representadas aqui para clareza, o número de zonas anulares em cada dos padrões trifocal e bifocal pode estar geralmente em uma faixa de cerca de 3 a cerca de 30, e pode ser mais com base no aumento na potência adicional.

A potência óptica associada com o foco distante pode, por exemplo, estar em uma faixa de cerca de 6 a cerca de 34 Dioptrias. O foco intermediário pode prover uma potência adicional em uma faixa de cerca de

1,5 a cerca de 4,5 Dioptrias, e o foco próximo pode prover uma potência adicional em uma faixa de cerca de 3 a cerca de 9 Dioptrias.

Desse modo, a lente IOL trifocal acima 10 apresenta uma visão de longe para visualizar objetos em distâncias que variam, por exemplo, de
5 cerca de infinito a cerca de 4 metros (m), e uma visão de perto para visualizar objetos em distâncias menores do que, por exemplo, cerca de 0,4 m. Além disso, a IOL 10 apresenta uma visão intermediária para visualizar objetos em distâncias em uma faixa, por exemplo, de cerca de 0,4 a cerca de 4 m (e, em algumas concretizações, em uma faixa de cerca de 0,4 a cerca de
10 1 m). Em outras palavras, a lente oftálmica trifocal acima vantajosamente provê um grau de acomodação (tipicamente denominada de pseudoacomodação) para três faixas de distância. Por meio de ilustração adicional, conforme mostrado esquematicamente na Figura 4A, quando a IOL trifocal for implantada no olho de um paciente, a potência combinada da córnea do olho
15 e a potência próxima, intermediária e distante da IOL permitirão focalizar a luz que emana dos objetos A, B e C, localizados, respectivamente, dentro de uma faixa de distância próxima, intermediária e longe do paciente sobre a retina.

Em algumas concretizações, uma terceira lente oftálmica trifocal
20 da invenção inclui dois padrões bifocais - provendo diferentes potências adicionais - que são dispostos em uma superfície da mesma, de tal modo que eles coletivamente proporcionem três regiões focais correspondendo à visão de longe, intermediária e de perto. Por meio de exemplo, a Figura 4B esquematicamente ilustra uma pluralidade de zonas difrativas 11, formadas de
25 dois padrões bifocais diferentes, dispostas em uma porção de uma superfície anterior 13 de uma lente trifocal 15, de acordo com outra concretização da invenção. Similar à concretização anterior, a superfície anterior é caracterizada por um perfil de base (não mostrado) que proporciona uma potência de foco distante correspondendo à 0^{ésima} ordem de difração de cada padrão.
30 Mais especificamente, as zonas difrativas internas 11a, 11b, e 11c formam um padrão bifocal provendo uma potência adicional, por exemplo, uma potência adicional em uma faixa de cerca de 3 a cerca de 9 Dioptrias, enquanto

que as zonas difrativas 11d, 11e, 11f e 11g formam outro padrão bifocal que provê uma potência adicional diferente, por exemplo, uma potência adicional em uma faixa de cerca de 1,5 a cerca de 4,5 Dioptrias (as zonas de difração são mostradas apenas para fins de ilustração e não são necessariamente desenhadas em escala). Embora nesta concretização, o padrão bifocal interno exiba uma potência adicional mais alta do que o padrão bifocal externo, em outras concretizações, o padrão externo provê uma potência adicional maior. Além disso, embora apenas algumas zonas de difração sejam ilustradas, em muitas concretizações, o número de zonas de difração em cada padrão pode variar de cerca de 3 a cerca de 30, ou qualquer outro número adequado. As alturas do degrau nos limites de zona podem ser uniformes ou não-uniformes e podem ser selecionadas, por exemplo, em uma maneira discutida acima. A potência adicional de cada zona pode ser ajustada por meio da seleção das localizações de seus limites de zona (isto é, a distância radial de cada zona difrativa no padrão), de acordo com a seguinte relação:

$$r_i^2 = (2i + 1)\lambda f \quad \text{Equação (4)}$$

onde:

i indica o número de zona ($i = 0$ indica a zona central),

λ indica o comprimento de onda determinado, e

f indica uma potência adicional.

Nesta concretização exemplificativa, o padrão bifocal externo exibe uma potência adicional maior do que o padrão bifocal interno. Por exemplo, os padrões bifocais externo e interno podem prover, respectivamente, uma potência adicional de cerca de 4D e cerca de 2D correspondendo a suas ordens de difração +1. As 0^{ésimas} ordens de difração dos padrões são, contudo, substancialmente coincidentes e dirigem a luz incidente para uma região focal de longe caracterizada por uma potência selecionada (com base na curvatura da superfície do meio óptico e em seu índice de refração) em uma faixa de cerca de 6 a cerca de 34 Dioptrias. Conforme mostrado esquematicamente na Figura 5C, o padrão externo apresenta um foco distante A1 e o foco próximo A2, enquanto que o padrão interno provê um foco dis-

tante B1 (substancialmente coincidente com A1) e um foco próximo B2. Conseqüentemente, os dois padrões apresentam coletivamente um foco distante, intermediário e próximo, nos quais o foco próximo dos padrões interno e externo proporcionam, respectivamente, visão de perto e intermediária.

5 As Figuras 5A e 5B esquematicamente representam uma lente oftálmica trifocal 30, por exemplo, uma IOL, de acordo com outra concretização da invenção que inclui um meio óptico 32 apresentando uma superfície anterior 34 e uma superfície posterior 36. O perfil de referência da superfície anterior 34 é caracterizado por uma curva de base 38 adaptada par prover
10 uma potência de foco distante. A superfície anterior 34 adicionalmente inclui uma pluralidade de zonas difrativas anulares 40, formadas por uma pluralidade de estruturas difrativas microscópicas 42, que são simetricamente dispostas em torno de um eixo óptico 44 do meio óptico. Similar às concretizações anteriores, o meio óptico pode ser formado de um material biocompatível, e a lente pode adicionalmente incluir agarres (não mostrados) que facilitam sua fixação no olho. Ademais, embora as superfícies 14 e 16, nesta concretização, sejam geralmente côncavas, em outras concretizações, as curvaturas de superfície podem ser selecionadas para proverem uma lente plano-convexa ou plano-côncava.

20 Cada zona difrativa anular é separada de uma zona adjacente por um degrau (por exemplo, o degrau 50 que separa a segunda zona da terceira zona). Os degraus são posicionados nos limites radiais das zonas. Nesta concretização, as alturas são substancialmente uniformes, embora em outras concretizações, elas possam ser apodizadas, por exemplo, em uma
25 maneira discutida acima.

Diferente das lentes difrativas convencionais, nas quais a zonas difrativas apresentam áreas substancialmente uniformes, nesta concretização, as áreas das zonas difrativas variam - de maneira controlada - como uma função da distância a partir do eixo óptico 44. Esta variação é projetada
30 para suficientemente alargar os perfis de energia óptica em um foco próximo e em um foco distante gerados por duas ordens de difração das zonas difrativas, de modo a proverem uma visão intermediária enquanto substancial-

mente preservam os focos próximo e distante. Por exemplo, com referência à Figura 5B, nesta concretização, as áreas das zonas difrativas anulares 40 progressivamente aumentam como uma função da maior distância do eixo óptico. Por exemplo, a diferença máxima entre as áreas das duas zonas difrativas (por exemplo, a diferença nas áreas das zonas mais externa e mais interna pode ser de cerca de 75% ou mais, por exemplo, até cerca de 200%).

A variação das áreas da zona difrativas pode ser implementada com a seleção de um raio quadrado de cada zona como uma função do número dessa zona, onde as zonas são consecutivamente numeradas radialmente para fora do eixo óptico, por exemplo, em uma maneira descrita abaixo. Por meio de exemplo, a Figura 6 apresenta gráficos que contrastam uma relação entre (Gráfico A) entre os raios quadrados das zonas (r_i^2 indica o raio quadrado da i ésima zona) e os números de zona - tipicamente empregados em lentes difrativas convencionais - com uma relação diferente (Gráfico B) utilizada nesta concretização de uma lente oftálmica trifocal da invenção. Conforme notado nos gráficos, na lente trifocal, os raios quadrados das zonas exibem um grau selecionado de variação linear como uma função dos números de zona, enquanto que os raios quadrados das zonas da lente apresentando áreas difrativas uniformes variam linearmente como uma função dos respectivos números de zona. Isto modifica o padrão de interferência de luz difratada pela lente de modo a desviar mais energia para uma região focal intermediária.

Mais especificamente, na presente concretização, a localização radial de um limite de zona pode ser determinada de acordo com a seguinte relação:

$$r_i^2 = (2i+1)\lambda f + g(i) \quad \text{Equação (5)}$$

onde

i indica o número da zona ($i = 0$ indica a zona central),
 λ indica o comprimento de onda determinado,
 f indica um comprimento focal do foco próximo, e
 $g(i)$ indica uma função não-constante.

Nesta concretização, a função $g(i)$ é definida de acordo com a seguinte relação:

$$g(i) = (a^2 + bi) f,$$

onde

5 i indica o número da zona

a e b são dois parâmetros ajustáveis, e

f indica o comprimento focal do foco próximo. Por meio de exemplo, a pode estar em uma faixa de cerca de $0,1 \lambda$ a cerca de $0,3 \lambda$, e b pode estar em uma faixa de cerca de $1,5 \lambda$ a cerca de $2,5 \lambda$, onde λ indica o comprimento de onda determinado.

Conforme notado acima, a variação das áreas das zonas difrativas como uma função da distância do eixo óptico resulta no desvio de parte da luz difratada para uma região focal intermediária para prover visão intermediária. Por exemplo, uma fração da luz difratada para uma faixa de cerca de 10% a cerca de 28% pode ser dirigida para a região focal intermediária.

Por meio de exemplo, a Figura 7 apresenta dois gráficos (C e D) que esquematicamente ilustram o aperfeiçoamento da acuidade visual para visão intermediária provida pela lente oftálmica trifocal exemplificativa acima. Mais especificamente, o gráfico C (linhas tracejadas) mostra a distribuição da energia óptica entre um foco próximo e um foco distante de uma lente difrativa convencional na qual as zonas difrativas anulares apresentam áreas iguais. Em contraste, o gráfico D esquematicamente mostra a distribuição de energia óptica em uma lente oftálmica, de acordo com uma concretização da invenção, na qual pelo menos duas ou mais das zonas difrativas apresentam áreas desiguais. Uma comparação do gráfico D com o gráfico C mostra que uma concretização de uma lente oftálmica da invenção apresentando zonas difrativas com áreas desiguais apresenta um aperfeiçoamento considerável da acuidade visual para visão intermediária enquanto substancialmente preserva o desempenho visual na visão de perto e de longe. Por meio de exemplo, em muitas concretizações, a eficiência difrativa em cada dos focos próximo e distante pode estar em uma faixa de cerca de 28% a cerca de 38%, com a eficiência difrativa no foco intermediário ficando em uma faixa

de cerca de 10% a cerca de 28%.

Similar à concretização anterior, a potência óptica associada com o foco distante pode estar, por exemplo, em uma faixa de cerca de 6 a cerca de 34 Dioptrias com o foco próximo provendo uma potência adicional em uma faixa de cerca de 3 a cerca de 9 Dioptrias. Além disso, o foco intermediário pode prover, por exemplo, uma potência adicional em uma faixa de cerca de 1,5 a cerca de 4,5 Dioptrias com relação ao foco distante.

A funcionalidade das lentes trifocais acima pode ser talvez melhor entendida com a consideração do diagrama mostrado na Figura 8, que descreve o retardo de fase óptica (OPD) associado com as três ordens de difração (isto é, +1, 0 e -1) de uma lente difrativa multifocal através de duas zonas difrativas, como uma função do quadrado da distância radial a partir do eixo óptico. Os retardos de fase associados com +1 e -1 variam substancialmente de modo linear - enquanto que associado com a 0^{ésima} ordem permanece substancialmente constante - na medida em que a distância radial muda de zero para um valor que corresponde ao limite da primeira zona difrativa com a segunda (indicado aqui por ZB12). No limite de zona, a fase óptica associada com cada ordem exibe uma descontinuidade. Embora não mostrado, a descontinuidade de fase similar ocorre no limite da segunda zona com a terceira (indicado em ZB23), etc. Se os limites de zona forem colocados em posições radiais quadradas correspondendo à mudança de fase óptica Π através de cada zona difrativa, a energia óptica difratada para a 0^{ésima} ordem substancialmente desaparece. Em outras palavras, a lente apresenta efetivamente apenas duas ordens de difração (foco próximo e distante). Entretanto, em muitas concretizações da invenção, as localizações radiais quadradas de uma ou mais limites de zona difrativas são selecionadas de tal modo que a mudança de fase óptica através de uma zona difrativa seja menor do que Π (por exemplo, ela é $\Pi/4$). Isto resulta no desvio de parte da energia óptica difratada para a 0^{ésima} ordem, provendo assim a visão intermediária.

Em algumas concretizações, a visão de distância provida pela lente oftálmica trifocal é aperfeiçoada pela correção da aberração para gran-

des aberturas (por exemplo, tamanhos de abertura maiores do que cerca de 3 mm de diâmetro, embora, em algumas concretizações, a correção de aberração possa também ser utilizada para tamanhos de abertura menores). Tal correção de aberração pode, por exemplo, contrabalançar a luz desfocalizada, se houver alguma, que possa aparecer no foco distante como resultado de um aumento de luz na região focal intermediária. Por exemplo, o perfil de base (curva) da superfície anterior pode ser selecionado para ter algum grau de anesfericidade a fim de reduzir os efeitos de aberração esférica, que podem ser particularmente pronunciados para grandes aberturas. Alguns exemplos de tais perfis anesféricos adequados para uso na prática da invenção são descritos no pedido de patente norte-americano copendente acima mencionado intitulado "Lentes difrativas anesféricas apodizadas".

Por meio de exemplo, o perfil anesférico da superfície anterior como uma função da distância radial (R) do eixo óptico da lente pode ser caracterizado pela seguinte relação:

$$z = \frac{cR^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + cc)c^2 R^2}} + adR^4 + aeR^6 + \text{termos de ordem maior}$$

onde

z indica uma deformação da superfície paralela a um eixo (z), por exemplo, o eixo óptico, perpendicular à superfície,

c indica uma curvatura no vértice da superfície,

cc indica um coeficiente cônico,

R indica uma posição radial da superfície,

ad indica um coeficiente de deformação de quarta ordem, e

ae indica um coeficiente de deformação de sexta ordem.

Aqueles versados na técnica irão apreciar que várias modificações podem ser formadas às concretizações acima sem se afastar do escopo da invenção.

REIVINDICAÇÕES

1. Lente oftálmica multifocal que compreende:
um meio óptico tendo pelo menos uma superfície óptica, e
uma pluralidade de zonas difrativas dispostas em torno de um
5 eixo óptico do meio óptico, pelo menos duas das ditas zonas difrativas tendo
diferentes áreas de modo a produzirem um alargamento dos perfis de ener-
gia óptica em um foco perto e em um foco distante das ditas zonas difrativas
para gerar um foco intermediário.

2. Lente oftálmica multifocal, de acordo com a reivindicação 1,
10 em que as zonas difrativas exibem áreas crescentes como uma função de
aumentar a distância a partir do eixo óptico.

3. Lente oftálmica multifocal, de acordo com a reivindicação 1,
em que as zonas difrativas compreendem zonas anulares caracterizadas por
um raio (r_i) proveniente do eixo óptico, no qual um quadrado do raio de uma
15 zona é definido pela seguinte relação:

$$r_i^2 = (2i + 1)\lambda f + g(i),$$

onde i indica um número de zona, r_i^2 indica um raio quadrado dessa zona, e
 f indica uma potência adicional do foco próximo com relação ao foco distan-
te, λ indica um comprimento de onda determinado, e $g(i)$ indica uma função
20 de não-constante de i .

4. Lente multifocal, de acordo com a reivindicação 3, em que $g(i)$
é definido pela seguinte relação:

$$g(i) = (a^2 + bi)f,$$

onde

25 i indica o número de zona,
 a e b são dois parâmetros ajustáveis, e
 f indica o comprimento focal do foco próximo.

5. Lente multifocal, de acordo com a reivindicação 4, em que o
dito parâmetro ajustável a está na faixa de cerca de $0,1 \lambda$ a cerca de $0,3 \lambda$.

30 6. Lente multifocal, de acordo com a reivindicação 5, em que o
dito parâmetro ajustável b está em uma faixa de cerca de $1,5 \lambda$ a cerca de
 $2,5 \lambda$.

7. Lente multifocal, de acordo com a reivindicação 1, em que o dito meio óptico direciona pelo menos cerca de 25% da energia de luz incidente para cada dos ditos focos próximo e distante.

5 8. Lente multifocal, de acordo com a reivindicação 7, em que o dito meio óptico direciona pelo menos cerca de 10% da energia de luz incidente para o dito foco intermediário.

9. Lente multifocal, de acordo com a reivindicação 7, em que o dito meio óptico direciona pelo menos cerca de 28% da energia de luz incidente para cada dos ditos focos próximo e distante.

10 10. Lente multifocal, de acordo com a reivindicação 1, em que a dita superfície óptica é caracterizada por uma curva de base que gera uma potência refrativa correspondendo ao dito foco distante.

11. Lente multifocal, de acordo com a reivindicação 1, em que o dito foco próximo é caracterizado por uma potência adicional em uma faixa de cerca de 3 a cerca de 9 dioptrias com relação ao dito foco distante.

12. Lente oftálmica multifocal que compreende:
um meio óptico apresentando uma superfície caracterizada por uma curva de referência de base,
uma pluralidade de estruturas difrativas anulares sobrepostas em uma porção da dita curva de base em torno de um eixo óptico do dito meio óptico,

onde uma pluralidade das ditas estruturas difrativas exibem larguras variadas de modo a coletivamente prover visão próxima, intermediária e distante.

25 13. Lente oftálmica multifocal, de acordo com a reivindicação 12, em que as ditas estruturas difrativas exibem maiores larguras como uma função de aumentar a distância do dito eixo óptico.

14. Lente oftálmica multifocal, de acordo com a reivindicação 12, em que a dita curva de referência de base apresenta uma potência refrativa correspondendo à dita visão distante.

30 15. Lente oftálmica multifocal, de acordo com a reivindicação 12, em que uma diferença máxima de porcentagem entre as larguras das duas

estruturas difrativas anulares está em uma faixa de cerca de 75% a cerca de 200%.

5 16. Lente oftálmica multifocal, de acordo com a reivindicação 12, em que a dita visão distante e a dita visão próxima apresentam aproximadamente visão de 20/20 e a dita visão intermediária apresenta aproximadamente visão de 20/30.

17. Lente multifocal, de acordo com a reivindicação 12, em que a visão próxima provê uma potência adicional na faixa de cerca de 3 a cerca de 9 dioptrias.

10 18. Lente multifocal, de acordo com a reivindicação 12, em que a visão intermediária provê uma potência adicional na faixa de cerca de 1,5 a cerca de 4,5 dioptrias.

15 19. Lente oftálmica multifocal, de acordo com a reivindicação 13, em que as ditas larguras aumentam linearmente como uma função da distância do eixo óptico.

20. Lente oftálmica multifocal, de acordo com a reivindicação 13, em que as ditas larguras aumentam não-linearmente como uma função de distância do eixo óptico.

20 21. Lente oftálmica multifocal, de acordo com a reivindicação 13, em que a dita curva de base é anesférica.

25 22. Lente oftálmica multifocal que compreende:
um meio óptico tendo pelo menos uma superfície óptica, e
pelo menos duas zonas difrativas dispostas na dita superfície,
uma das ditas zonas apresentando uma área maior do que uma área da outra zona por um fator em uma faixa de cerca de 75% a cerca de 200%, de tal modo que as zonas difrativas coletivamente proporcionem uma visão próxima, intermediária e distante

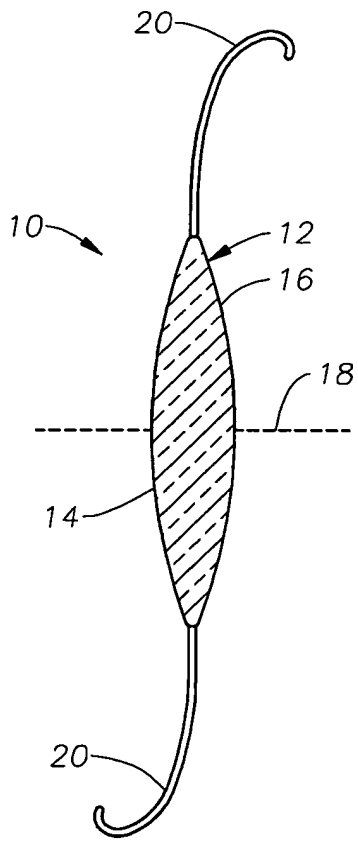


Fig. 1A

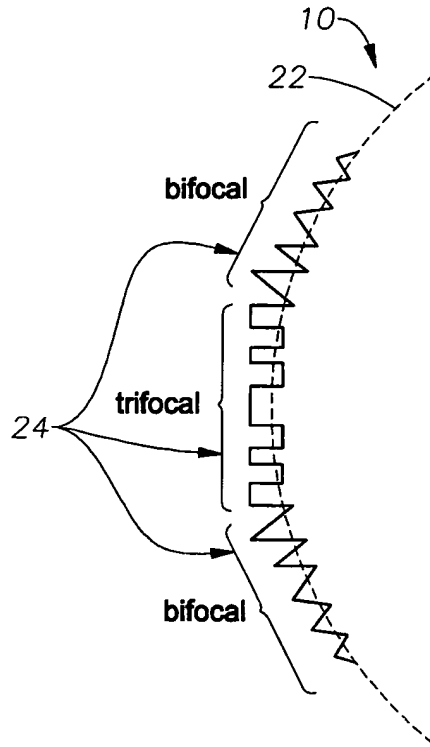


Fig. 1B

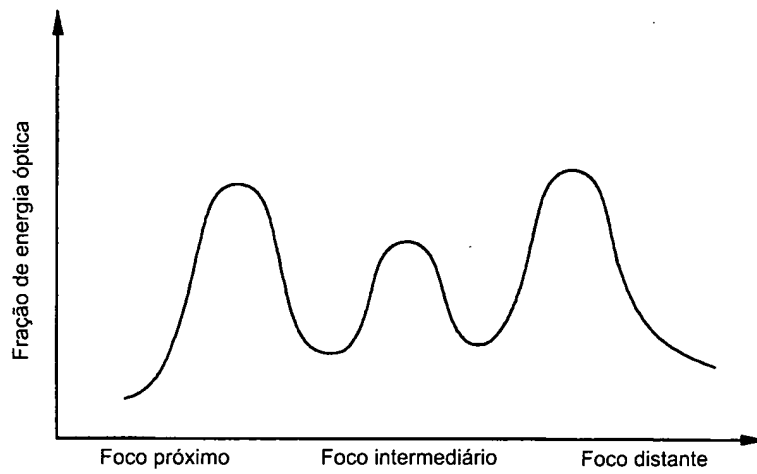
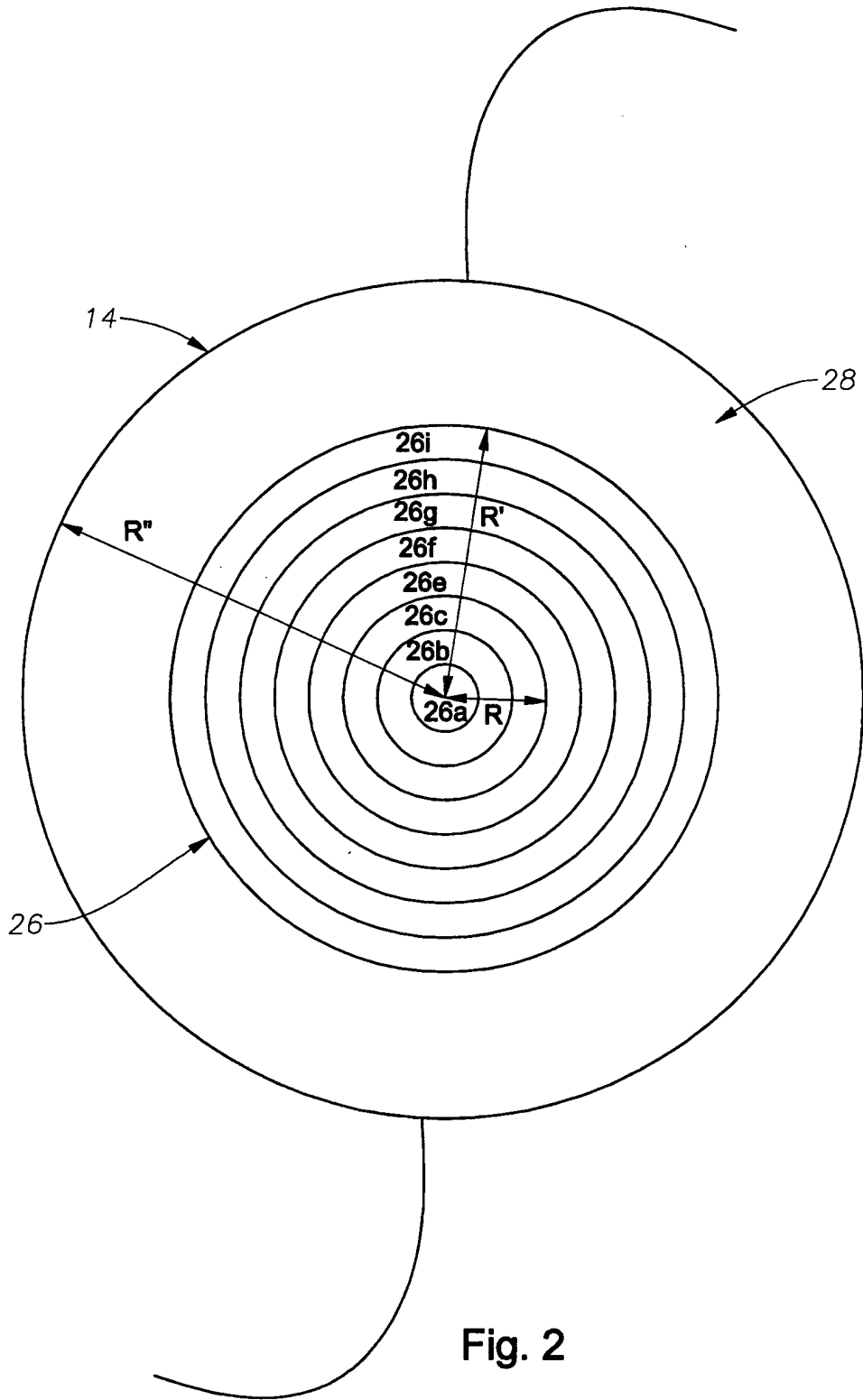


Fig. 3



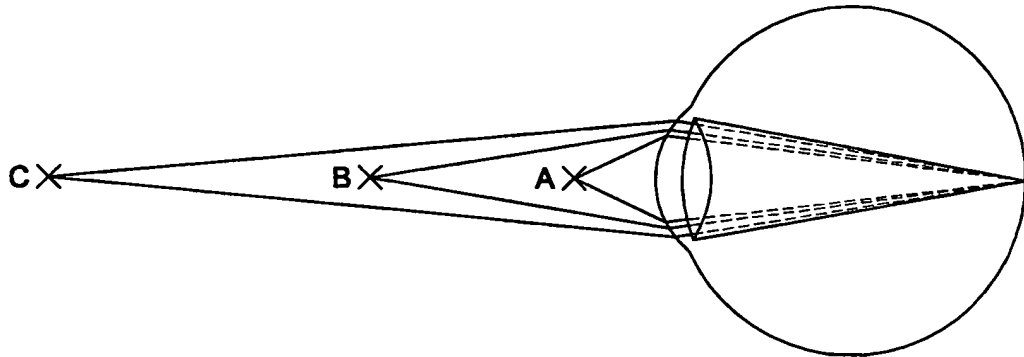


Fig. 4A

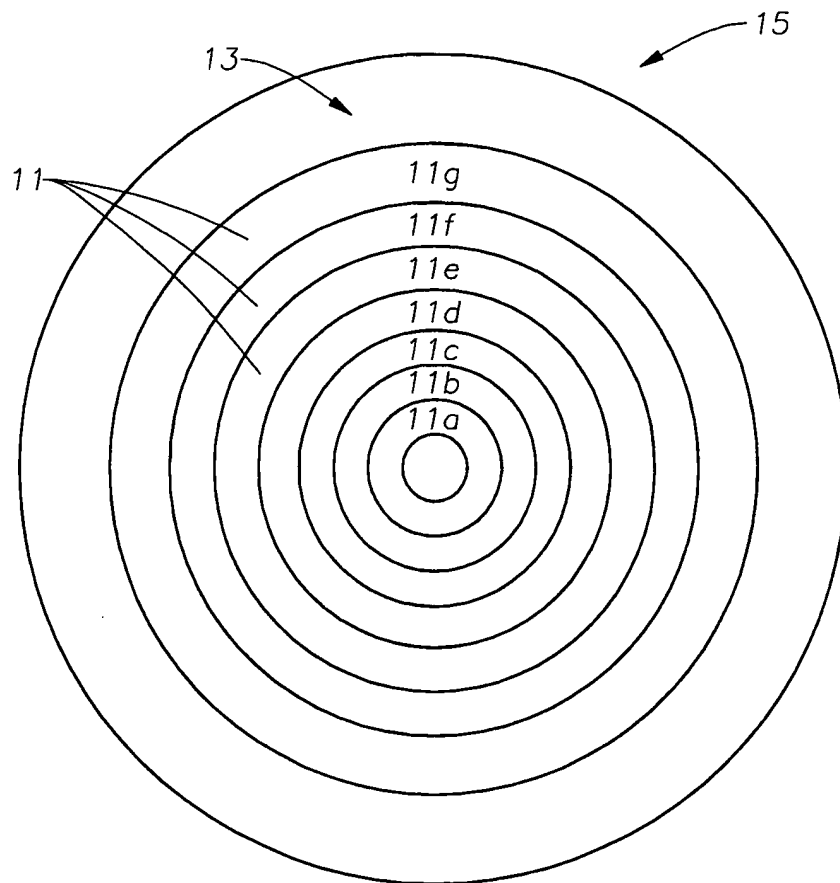


Fig. 4B

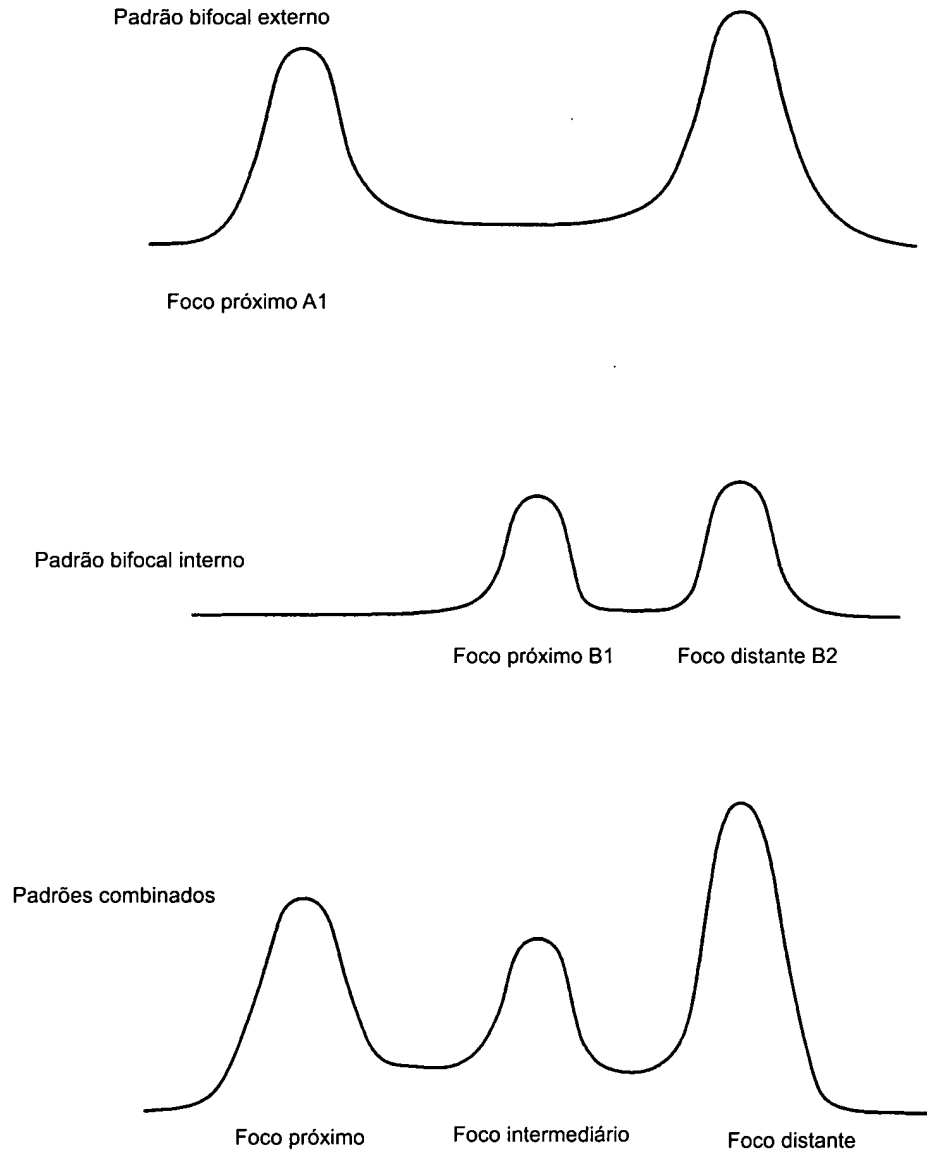


Fig. 4C

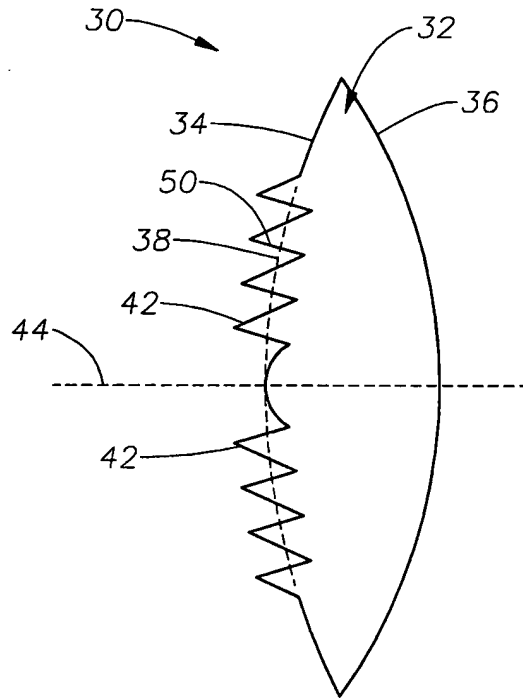


Fig. 5A

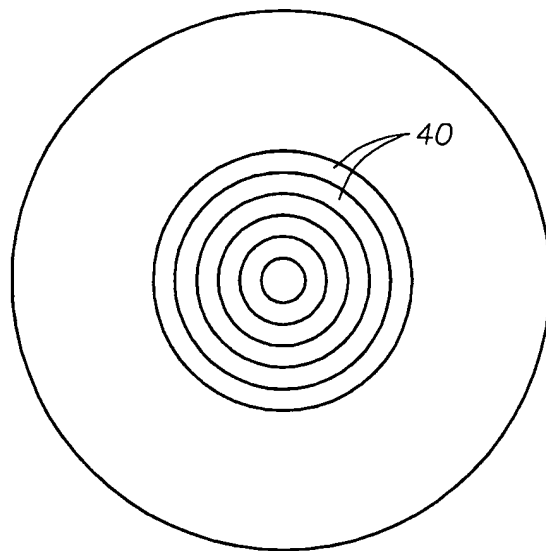


Fig. 5B

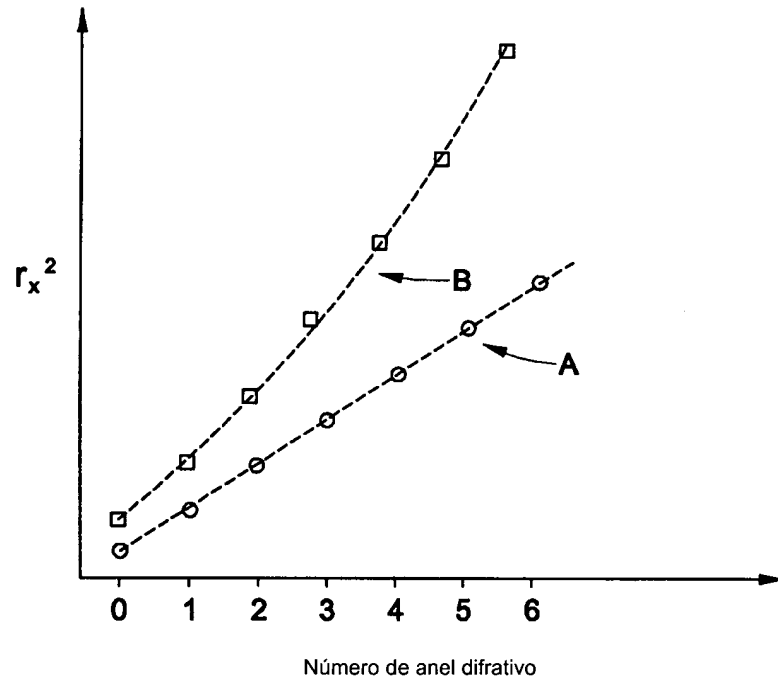


Fig. 6

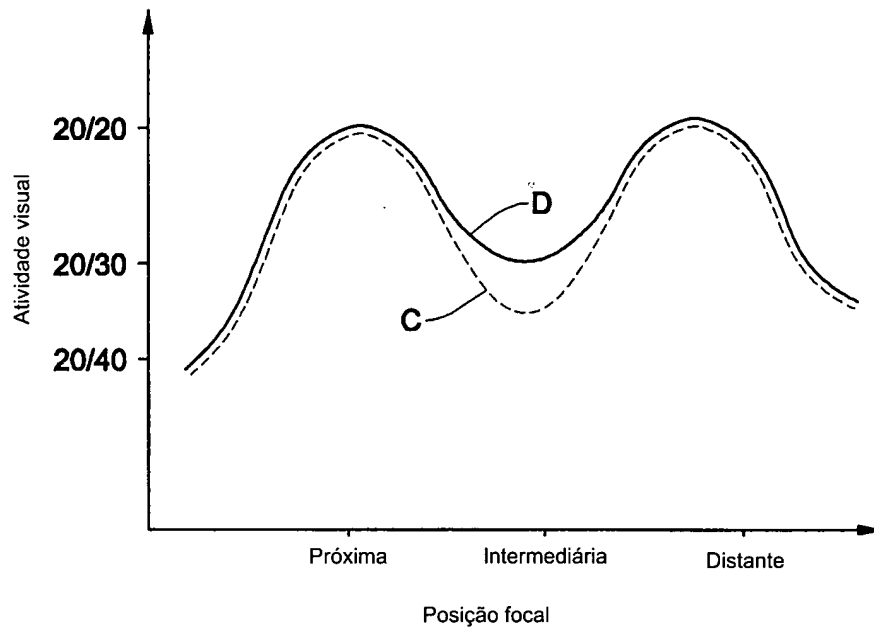


Fig. 7

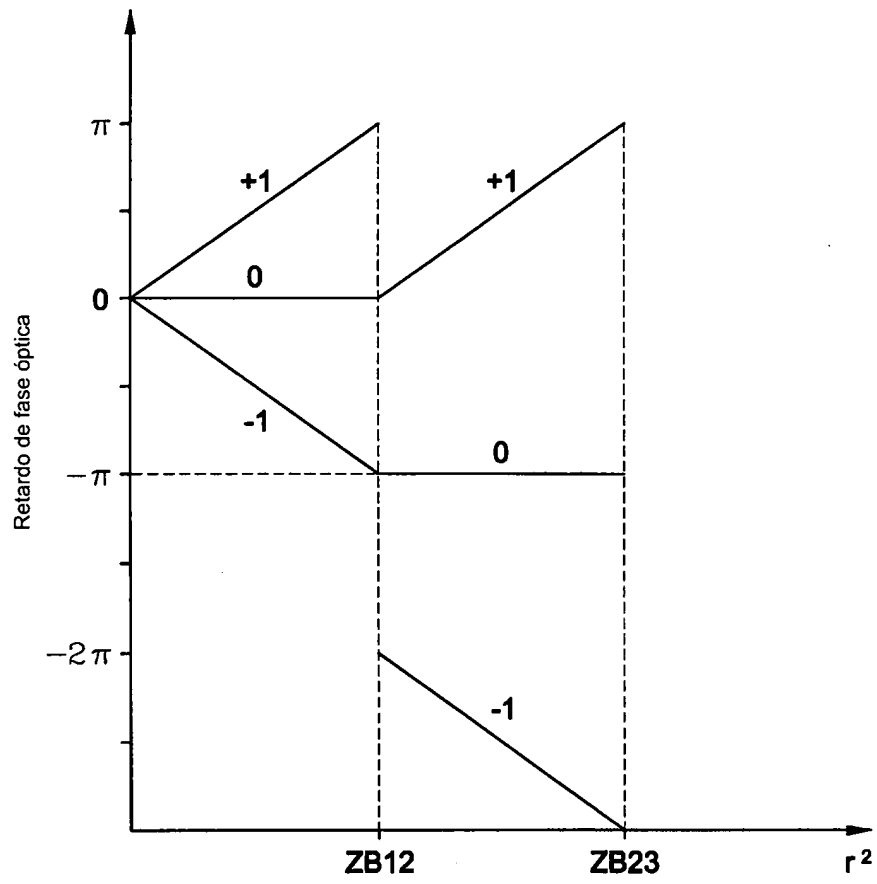


Fig. 8

RESUMO

Patente de Invenção: **"LENTE INTRAOCULAR PSEUDOACOMODATIVA APRESENTANDO ZONAS DIFRATIVAS COM ÁREAS VARIADAS"**.

Em um aspecto da invenção, é descrita uma lente oftálmica trifocal que inclui um meio óptico apresentando pelo menos uma superfície óptica, e uma pluralidade de zonas difrativas que é disposta em uma porção dessa superfície em torno de um eixo óptico do meio óptico. Pelo menos duas dessas zonas difrativas apresentam diferentes áreas de modo a produzirem um alargamento dos perfis de energia óptica em um foco próximo e em um foco distante das zonas difrativas para gerar um foco intermediário.