



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

(11) PI 0707625-8 B1

(22) Data do Depósito: 09/02/2007

(45) Data de Concessão: 12/06/2018



(54) Título: LENTE OFTÁLMICA MULTIFOCAL

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

(30) Prioridade Unionista: 09/02/2006 US 11/350,505

(73) Titular(es): ALCON RESEARCH, LTD.

(72) Inventor(es): XIN HONG; STEPHEN J. VANNOY; XIAOXIAO ZHANG

Relatório Descritivo da Patente de Invenção para "**LENTE OF-TÁLMICA MULIFOCAL**".

REFERÊNCIA CRUZADA A PEDIDO RELACIONADO

Este pedido reivindica prioridade sob 35 U.S.C.§119 para Pedido
5 de Patente U.S. Nº. 11/350.505 depositado em 9 de fevereiro de 2006, os
conteúdos inteiros do qual são incorporados aqui por referência.

ANTECEDENTES

A presente invenção refere-se em geral a lentes oftálmicas multi-
focais, e mais particularmente, a lentes oftálmicas trifocais, tais como lentes
10 intraoculares trifocais (IOLs).

Uma pluralidade de lentes oftálmicas está disponível para corri-
gir transtornos visuais, tais como catarata, miopia, hipermetropia ou astigma-
tismo. Por exemplo, uma lente intraocular (IOL) pode ser implantada em um
olho do paciente durante a cirurgia de catarata para compensar a potência
15 óptica perdida da lente natural removida. Embora fornecendo a potência óp-
tica necessária, IOLs não fornecem a acomodação (isto é, a habilidade em
focalizar objetos a distâncias variadas) que pode ser obtida por uma lente
natural. No entanto, são conhecidas IOLs multifocais que podem fornecer
um certo grau de acomodação (também conhecida como pseudo-
20 acomodação). Por exemplo, estão disponíveis IOLs difrativas bifocais que
são capazes de fornecer um foco de perto e um foco de longe.

Lentes oftálmicas trifocais são também conhecidas para fornecer
um foco de perto e um foco de longe, bem como um foco intermediário. Tais
lentes trifocais convencionais, no entanto, sofrem de um número de incon-
25 venientes. Por exemplo, elas fornecem visão intermediária à custa da degra-
dação da visão de longe e/ou de perto.

Consequentemente, existe uma necessidade para lentes oftál-
micas multifocais melhoradas, e particularmente, lentes oftálmicas trifocais.
Existe também uma necessidade de tais lentes multifocais na forma intrao-
30 cular (IOLs) que podem ser implantadas nos olhos do paciente, por exemplo,
para substituir a lente natural.

SUMÁRIO

A presente invenção refere-se em geral a lentes oftálmicas multifocais, tais como lentes intra-oculares trifocais (IOLs), que fornecem visão de perto e de longe, bem como visão intermediária. As lentes oftálmicas da invenção utilizam estruturas difrativas para direcionar luz incidente em três regiões focais que correspondem a visão de perto, intermediária e de longe. Em alguns casos, as lentes oftálmicas incluem pelo menos dois padrões difrativos diferentes, um exibindo primariamente dois focos e o outro primariamente três focos tal que eles acomodam coletivamente a visão de perto, intermediária e longe. Em outros casos, as lentes oftálmicas incluem dois padrões oftálmicos diferentes, ambos os quais fornecem primariamente dois focos, embora em potências adicionais diferentes selecionados tal que os padrões coletivamente fornecem visão de perto, intermediária e de longe.

Em um aspecto, é descrita uma lente oftálmica trifocal que inclui um dispositivo óptico tendo uma superfície que compreende pelo menos um padrão difrativo trifocal e pelo menos um padrão difrativo bifocal tal que o padrão bifocal fornece visão de perto e de longe e o padrão trifocal gera visão de perto, de longe e intermediária. Por exemplo, o padrão trifocal pode fornecer focos de perto, de longe e intermediária tal que os focos de perto de longe são substancialmente coincidentes, respectivamente, com um foco de perto e um foco de longe do padrão bifocal. Desta maneira, os padrões trifocal e bifocal fornecem coletivamente focos de perto, intermediário e de longe (ou regiões focais) correspondendo, respectivamente, para visão de perto, intermediária e de longe. Os termos "focos" e "regiões focais" são usados de modo intercambiável aqui em seu sentido geral para identificar regiões espaciais onde a acuidade visual (por exemplo, resolução de imagem) é melhorada. O termo "padrão difrativo bifocal" como usado aqui, refere-se a estruturas difrativas que difratam luz incidente primariamente em duas ordens de difração (por exemplo, 60% ou mais da energia luminosa é direcionada para aquelas duas ordens de difração). Adicionalmente, o termo "padrão difrativo trifocal" como usado aqui, refere-se a estruturas difrativas que difratam luz incidente primariamente em três ordens de difração (por exemplo

60% ou mais da energia luminosa é direcionada para aquelas três ordens de difração).

Em um aspecto relacionado, a superfície do dispositivo ótico, compreendendo os padrões difrativos pode ser caracterizada por uma curva de referência de base adaptada para fornecer uma potência refrativa que corresponde ao foco de longe. Em muitas modalidades da invenção, o foco de longe fornece uma potência óptica em uma faixa de cerca de 6 a cerca de 34 Dioptrias com o foco intermediário fornecendo uma potência de aumento em uma faixa de cerca de 1,5 a cerca de 4,5 Dioptrias, e o foco de perto fornecendo uma potência de aumento em uma faixa de cerca de 3 a cerca de 9 Dioptrias.

Em outro aspecto, os padrões difrativos são dispostos dentro de uma parte da superfície circundada por uma parte periférica desta superfície é substancialmente desprovida de estruturas difrativas. Em outras palavras, as estruturas difrativas são truncadas tal que uma parte periférica da superfície fornece uma potência puramente refrativa.

Em outro aspecto, o padrão difrativo trifocal pode estar disposto mais perto de um eixo ótico do dispositivo ótico que o padrão bifocal. Por meio de exemplo, o padrão difrativo trifocal pode compreender uma pluralidade de estruturas difrativas que se estendem a partir de um eixo ótico do dispositivo ótico em um raio que corresponde a um raio de abertura (pupila) em uma faixa de cerca de 1 a cerca de 1,5 milímetro (isto é, um diâmetro de abertura em uma faixa de cerca de 2 a cerca de 3 mm). O padrão bifocal pode ser formado como uma pluralidade de estruturas difrativas anulares que circundam o padrão trifocal. Desta maneira, o padrão trifocal é empregado como o padrão difrativo primário para pequenas aberturas com contribuição difrativa do padrão bifocal aumentando quando o tamanho da abertura aumenta.

Em um aspecto relacionado, as estruturas difrativas bifocais anulares exibem uma altura de degrau crescente em seus limites como uma função de distância crescente do eixo ótico. O decréscimo nas alturas de degrau pode ser caracterizado por uma função de apodização. Um exemplo

de tal função de apodização se segue (aqueles ordinariamente versados na técnica apreciarão que outras funções podem também ser utilizadas):

$$f_{apodize} = 1 - \left(\frac{r_i}{r_{out}} \right)^3,$$

onde r_i indica a distância radial da zona i , r_{out} indica o raio externo da última zona difrativa focal.

5 Em outro aspecto, as estruturas difrativas formando o padrão trifocal são formatadas de modo diferente daquelas que formam o padrão bifocal. Por meio de exemplo, o padrão difrativo trifocal pode compreender um ou mais degraus em formato substancialmente quadrado enquanto o padrão difrativo bifocal compreende um ou mais um ou mais degraus substancialmente em formato dentado.

10 Em outros aspectos, a invenção fornece uma lente oftálmica trifocal que compreende um dispositivo óptico tendo pelo menos uma superfície com um perfil de referência caracterizado por uma curva de base, e pelo menos dois padrões difrativos anulares sobrepostos naquela curva de base.

15 Um dos padrões primeiramente fornece três focos enquanto o outro fornece dois focos tal que a combinação de distribuição de energia associada com os focos de um padrão com aquele do outro padrão resulta em acomodar visão de perto, intermediária e de longe. Adicionalmente, a curva de base pode ser adaptada para fornecer uma potência refrativa que corresponde à

20 visão de longe.

 Em um aspecto relacionado, uma parte periférica do dispositivo óptico, que é substancialmente desprovida de estruturas difrativas, circunda os padrões difrativos. Em alguns casos, o padrão difrativo que fornece três focos é disposto mais perto de um eixo óptico do dispositivo óptico que o padrão que fornece três focos. Por meio de exemplo, o padrão difrativo que fornece três focos pode compreender uma pluralidade de zonas difrativas anulares que se estende de um eixo óptico do dispositivo óptico a uma primeira distância deste eixo, e o padrão difrativo que fornece dois focos pode compreender uma pluralidade de zonas difrativas anulares que se estende

25 desta primeira distância a uma segunda distância do eixo óptico, que é me-

30

nos que um raio do dispositivo óptico.

Em outro aspecto, a curva de base caracterizando o perfil de referência da superfície em que os padrões difrativos são dispostos é esférico de modo a reduzir aberração esférica, particularmente no foco de longe para grandes aberturas.

Em outro aspecto, é descrita uma lente oftálmica multifocal que inclui um dispositivo óptico que tem uma superfície compreendendo dois padrões bifocais separados, onde os padrões exibem diferentes potências de aumento de modo a fornecer cooperativamente visão de perto, intermediária e de longe. Por exemplo, um dos padrões pode fornecer uma potência de aumento em uma faixa de cerca de 1,5 a cerca de 4,5 Dioptrias enquanto o outro fornece uma potência de aumento em uma faixa de cerca de 3 a cerca de 9 Dioptrias.

Em um aspecto relacionado, um dos padrões bifocais pode estar disposto mais perto de um eixo óptico do dispositivo óptico que o outro. Por exemplo, os padrões podem estar na forma de zonas difrativas concêntricas dispostas em torno do eixo óptico, com as zonas correspondendo a um padrão que se estende do eixo óptico uma distância radial selecionada e as zonas que correspondem ao outro padrão se estendendo daquela distância radial para uma distância maior, que é selecionada, em muitas modalidades, para ser menor que um raio do dispositivo óptico.

Entendimento adicional da invenção pode ser obtido por referência à descrição detalhada seguinte em conjunto com as figuras associadas, que são descritas resumidamente abaixo.

BREVE DESCRIÇÃO DOS DESENHOS

A figura 1A é uma vista em seção transversal esquemática de uma lente oftálmica trifocal de acordo com uma modalidade da invenção,

a figura 1B é uma vista em seção transversal esquemática de uma superfície anterior de um dispositivo óptico da lente da figura 1A compreendendo uma pluralidade de estruturas difrativas sobrepostas em um perfil de base,

a figura 2 é uma vista dianteira da lente difrativa das figuras an-

teriores representando uma pluralidade de zonas anulares formadas pelas estruturas difrativas,

5 a figura 3 mostra uma distribuição exemplar da potência óptica em regiões focais de perto, intermediária e de longe de uma lente oftálmica trifocal de acordo com uma modalidade da invenção,

a figura 4A representa esquematicamente a focalização de luz que emana de um objeto perto, um intermediário e um longe na retina de um olho em que uma lente IOL trifocal de acordo com uma modalidade da invenção é implantada,

10 a figura 4B é uma vista dianteira esquemática de uma lente oftálmica trifocal de acordo com outra modalidade da invenção tendo padrões difrativos bifocais interno e externo com potências de aumento diferentes selecionados tal que os padrões fornecem coletivamente visão de perto, intermediária e de longe.

15 a figura 4C representa esquematicamente perfis de energia óptica em focos de perto e de longe de padrões bifocais individuais da lente mostrada na figura 4B, bem como os perfis de energia em focos de perto, intermediário e de longe fornecidos coletivamente pelos padrões combinados,

20 a figura 5A é uma vista em seção transversal esquemática de uma lente oftálmica trifocal de acordo com outra modalidade da invenção tendo zonas difrativas com áreas desiguais,

a figura 5B é uma vista dianteira da lente oftálmica da figura 5A,

25 a figura 6 apresenta dois gráficos esquemáticos contrastando 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,

30 a figura 7 apresenta dois gráficos esquemáticos ilustrando o melhoramento de acuidade visual para visão intermediária fornecida por uma lente oftálmica trifocal de acordo com uma modalidade da invenção,

a figura 8 representa esquematicamente o atraso de fase óptico (OPD) associado com três ordens de difração de uma lente oftálmica difrati-

va multifocal através de duas ordens difrativas como uma função da distância radial ao quadrado do eixo óptico da lente.

DESCRIÇÃO DETALHADA

5 A presente invenção é em geral direcionada para lentes oftálmicas trifocais, tais como lentes intra-oculares, que fornecem visão de perto, intermediária e de longe. As lentes oftálmicas trifocais da invenção fornecem vantajosamente desempenho visual melhorado para a visão intermediária com relação aquela obtida tipicamente por lentes trifocais convencionais enquanto mantém, e em muitos casos excedendo, o desempenho visual de
10 perto e de longe de tais lentes convencionais. Em modalidades discutidas abaixo, vários aspectos de lentes trifocais da invenção são descritas em conexão com lentes intra-oculares. Deve, no entanto, ser entendido que os princípios da invenção podem ser similarmente aplicados à fabricação de outras lentes oftálmicas, tais como lentes de contato.

15 Com referência às figuras 1A e 1B, uma lente oftálmica trifocal 10 de acordo com uma modalidade da invenção inclui um dispositivo óptico 12 tendo uma superfície óptica anterior 14 e uma superfície óptica posterior 16. Nesta modalidade, as superfícies ópticas anterior e posterior são simetricamente dispostas em torno de um eixo óptico 18 da lente, embora superfícies simétricas podem também ser empregadas. A lente exemplar 10 tam-
20 bém inclui elementos de fixação se estendendo radialmente ou alças ultra-oculares 20 para sua colocação em um olho do paciente. O dispositivo óptico 12 pode ser formado de qualquer material biocompatível. Alguns exemplos de tais materiais incluem, sem limitação, acrílico mole, silicone, hidrogel
25 ou outros materiais poliméricos biocompatíveis tendo um índice de refração necessário para uma aplicação particular da lente. Os elementos de fixação 20 podem também ser formados de materiais poliméricos adequados, tal como polimetilmetacrilato, polipropileno e similar. Embora as superfícies 14 e 16 sejam representadas como sendo em geral convexas, cada superfície
30 pode ter um formato em geral côncavo. Alternativamente, as superfícies 14 e 16 podem ser selecionadas para fornecer uma lente plano-convexa ou plano-côncava. Os termos "lente intra-ocular" e sua abreviação (IOL) são usa-

dos aqui de modo intercambiável para descrever lentes que são implantados no interior de um olho para tanto substituir a lente natural do olho quanto para aumentar de outro modo a visão independente de se ou não a lente natural é removida.

5 A superfície anterior 14 é caracterizada por uma curva de base 22 (representada por linhas tracejadas) que fornece uma potência refrativa selecionada e em que uma pluralidade de estruturas difrativas 24 são sobrepostas. Como mostrado esquematicamente na figura 2, as estruturas difrativas 24 podem ser caracterizadas como formando uma pluralidade de zonas difrativas anulares concêntricas 26 que difratam luz incidente em uma pluralidade de ordens difrativos, em uma maneira discutida em mais detalhe abaixo. As zonas difrativas 26 são confinadas dentro de uma parte da superfície que é circundada por uma parte periférica 28 que é desprovida de estruturas difrativas. Em outras palavras, as zonas difrativas são truncadas tal que a parte periférica da superfície anterior fornece uma potência puramente refrativa ditada pela curva de base. Nesta modalidade, as zonas difrativas são caracterizadas por dois padrões difrativos, um dos quais é aqui referido como um padrão trifocal e o outro como um padrão bifocal. Mais especificamente, as zonas anulares 26a, 26b e 26c, que formam o padrão difrativo trifocal, direcionam cooperativamente a luz incidente primariamente em três ordens de difração (aqui referidas como ordens de difração "+1", "0" e "-1"). A luz direcionada para a ordem de difração +1 converge para formar um foco de perto enquanto o feixe de luz direcionado para ordens de difração 0 e -1 convergem para formar, respectivamente, um foco intermediário e um de longe (distância). Deve ser apreciado que as zonas difrativas formando o padrão trifocal difratam luz em ordens maiores, também. No entanto, o padrão trifocal difrata uma grande percentagem da luz incidente, por exemplo, cerca de 60% ou mais, nas três ordens acima.

 Nesta modalidade exemplar, as zonas difrativas anulares 26d, 26e, 26f, 26g, 26h e 26i formam o padrão difrativo bifocal, que difrata a luz incidente primariamente em duas ordens de difração (por exemplo, ordens "0" e "+1"). A luz difratada na ordem 0 do padrão bifocal converge para um foco

que é substancialmente coincidente com o foco de distância acima gerado pela convergência da luz difratada na ordem -1 do padrão trifocal. E a luz difratada na ordem de difração +1 de padrão bifocal converge para um foco que é substancialmente coincidente com o foco de perto acima gerado por convergência da luz difratada na ordem de difração +1 do padrão trifocal. Similar ao padrão trifocal, o padrão bifocal difrata luz em ordens mais altas, também. No entanto, difrata o volume da energia óptica incidente, por exemplo, cerca de 60% ou mais, nas ordens 0 e -1 acima.

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

Como mostrado esquematicamente na figura 1B, nesta modalidade exemplar, as zonas difrativas trifocais são formadas por estruturas difrativas substancialmente retangulares (degraus), que são separadas uma da outra em seus limites de zona por uma altura de degrau substancialmente uniforme. Por meio de exemplo, a altura de degrau em um comprimento de onda de desenho pode ser definida de acordo com a relação seguinte:

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

em que:

λ é o comprimento de onda de desenho (por exemplo 550 nm),
 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 dispositivo óptico, e

n_1 indica o índice refrativo do meio que circunda a lente.

Em modalidades em que o meio circundante é o humor aquoso tendo um índice de refração de 1,336, o índice de refração do dispositivo óptico (n_2) pode ser selecionado para ser 1,55. A altura de degrau fornecida pela equação acima, é somente um exemplo, e outras alturas de degrau podem também ser utilizadas.

Em contraste, as zonas difrativas bifocais nesta modalidade e-

xemplar são formadas por uma pluralidade de estruturas difrativas do tipo dente de serra, que são separadas uma da outra e seus limites de zona respectivos por alturas de degrau não uniforme. Mais especificamente, as alturas de degrau em limites de zona do padrão bifocal diminuem progressivamente quando suas distâncias do eixo óptico aumentam. Em outras palavras, as alturas de degrau nos limites das estruturas difrativas bifocais são "apodized" de modo a modificar a fração de energia óptica difratada em focos de perto e de longe como uma função do tamanho da abertura (por exemplo, quando o tamanho da abertura aumenta, mais da energia luminosa é difratada para o foco de longe). Por meio de exemplo, a altura de degrau em cada limite de zona do padrão difrativo bifocal pode ser definida de acordo com a relação seguinte:

$$\text{altura de degrau} = \frac{\lambda}{a(n_2 - n_1)} f_{\text{apodize}} \quad \text{Equação (2)}$$

em que:

λ é o comprimento de onda de projeto (por exemplo 550 nm),
 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 indica o índice refrativo do dispositivo óptico,

n_1 indica o índice refrativo do meio em que a lente é colocada, e

f_{apodize} representa uma função de gradação cujo valor diminui como uma função de aumentar distância radial da interseção do eixo óptico com a superfície anterior da lente. Por meio de exemplo, a função de gradação f_{apodize} pode ser definida pela relação seguinte:

$$f_{\text{apodize}} = 1 - \left(\frac{r_i}{r_{\text{out}}} \right)^3 \quad \text{Equação (3)}$$

onde:

r_i indica a distância radial da zona i ,

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

Outras funções de gradação de apodização podem também ser empregados, tais como aquelas descritas em um pedido de patente co-pendente intitulado "Apodized Aspheric Diffractive Lenses", depositado a 1

de dezembro de 2004, e tendo um número de série 11/000770, que é aqui incorporado por referência. Adicionalmente, as estruturas difrativas podem ter formatos geométricos diferentes daqueles descritos acima.

Embora as propriedades difrativas dos padrões trifocal e bifocal tivessem sido discutidos separadamente acima, os dois padrões cooperativamente geram os focos de perto, intermediário e de longe para fornecer, respectivamente a visão de perto, intermediária e de longe. Como 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 deste ponto. Uma largura do perfil de energia difrativo (por exemplo, largura completa em metade de máximo) associada com cada ponto focal fornece uma medida da profundidade associada do foco. Em algumas modalidades, a fração de energia óptica incidente (por exemplo, na forma de raios incidentes substancialmente paralelos) direcionado para cada uma das regiões focais de perto e de longe com relação àquela direcionada para a região focal intermediária pode estar em uma faixa de cerca de 1,4 a cerca de 4. Por meio de exemplo, a eficiência difrativa associada com cada um dos focos de perto e de longe pode estar em uma faixa de cerca de 28% a cerca de 38%, enquanto a eficiência difrativa associada com o foco intermediário se encontra em uma faixa de cerca de 10% a cerca de 28%.

Referindo-se novamente à figura 2, nesta modalidade, o padrão difrativo trifocal se estende do eixo óptico para uma distância R (raio) deste eixo, enquanto o padrão difrativo bifocal se estende da distância R para uma distância radial maior R' (menos que um raio R'' da superfície anterior). Portanto, para pequenos tamanhos de abertura (pupila), as propriedades de visão de perto, intermediária e de longe da lente são primariamente determinados pelo padrão difrativo trifocal. Quando o tamanho de abertura (pupila) aumenta, as propriedades da lente são primariamente ditadas pelo padrão difrativo bifocal. Nesta modalidade, quando o tamanho de abertura aumenta, aumenta a fração da energia óptica direcionada aos focos de perto e de longe relativa àquela direcionada para o foco intermediário. Além do mais, como notado acima, a apodização das alturas de degrau das zonas difrativas

bifocais resulta em um aumento na energia óptica direcionada para o foco de longe com relação ao foco de perto, quando o tamanho da abertura aumenta. Em geral, o raio do dispositivo óptico (R'') é selecionado para estar em uma faixa de cerca de 2,5 a cerca de 3,5 milímetros, com o raio do padrão trifocal (R) que se encontra em uma faixa de cerca de 1 a cerca de 1,5 milímetros e aquele do padrão bifocal (R') que se encontra em uma faixa de cerca de 1,5 a cerca de 2 milímetros – embora outros valores possam também ser empregados. Adicionalmente, embora somente umas poucas zonas anulares são representadas aqui por clareza, o número de zonas anulares em cada um dos padrões trifocal e bifocal pode estar em geral em uma faixa de cerca de 3 a cerca de 30, e pode ser baseado em aumento na potência de aumento.

A potência óptica associada com o foco de longe pode estar, por exemplo, em uma faixa de cerca de 6 a cerca de 34 Dioptrias. O foco intermediário pode fornecer uma potência de aumento em uma faixa de cerca de 1,5 a cerca de 4,5 Dioptrias, e o foco de perto pode fornecer uma potência de aumento em uma faixa de cerca de 3 a cerca de 9 Dioptrias.

Assim, a lente IOL trifocal acima 10 fornece visão de longe para visualizar objetos em distâncias variando, por exemplo, de cerca de infinito a cerca de 4 metros (m), e visão de perto para visualizar objetos, em distâncias menores que, por exemplo, cerca de 0,4 m. Em adição, a IOL 10 fornece visão intermediária para visualizar objetos em distâncias em uma faixa de, por exemplo, cerca de 0,4 a cerca de 4m (e em algumas modalidades em uma faixa de cerca de 0,4 a cerca de 1 m). Em outras palavras, a lente oftálmica trifocal acima vantajosamente fornece um grau de acomodação (tipicamente referida como pseudo-acomodação) para três faixas de distância. Por meio de ilustração adicional, como mostrado esquematicamente na figura 4A, quando a IOL trifocal é implantada em um olho do paciente, a potência combinada da córnea do olho e a potência de perto, intermediária e de longe da IOL permitem focalizar a luz que emana dos objetos A, B e C, localizados, respectivamente, dentro de uma faixa de distância de perto, uma intermediária e uma de longe do paciente na retina.

Em algumas modalidades, uma lente oftálmica trifocal da invenção inclui dois padrões bifocais – fornecendo potências de soma diferentes – que são dispostas em uma superfície da mesma tal que fornecem coletivamente 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 dois padrões bifocais diferentes, dispostas em uma parte de uma superfície anterior 13 de uma lente trifocal 15 de acordo com outra modalidade da invenção. Similar à modalidade prévia, a superfície anterior é caracterizada por um perfil de base (não mostrado) que fornece uma potência de foco de longe correspondendo à ordem de difração 0 de cada padrão. Mais especificamente, as zonas difrativas internas 11a, 11b, e 11c formam um padrão bifocal fornecendo uma potência de aumento selecionada, por exemplo uma potência de aumento em uma faixa de cerca de 3 a cerca de 9 Dioptrias, enquanto as zonas difrativas 11d, 11e, 11f e 11g formam outro padrão bifocal que fornece uma potência de aumento diferente, por exemplo, uma potência de aumento em uma faixa de cerca de 1,5 a 4,5 Dioptrias (zonas de difração são mostradas somente para propósitos de ilustração e não são necessariamente desenhadas em escala). Embora nesta modalidade, o padrão bifocal interno exiba uma potência de aumento maior que o padrão bifocal externo, em outras modalidades, o padrão externo fornece uma potência de aumento maior. Adicionalmente, embora somente umas poucas zonas de difração sejam ilustradas, em muitas modalidades, 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 de degrau em limites de zona podem ser uniformes ou não uniformes e podem ser selecionadas, por exemplo, em uma maneira discutida acima. A potência de soma de cada zona pode ser determinada selecionando as localizações em seus limites de zona (isto é, a distância radial de cada zona difrativa no padrão) de acordo com a relação seguinte:

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

onde:

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

λ indica o comprimento de onda de desenho, e
f indica uma potência de aumento.

Nesta modalidade exemplar, o padrão bifocal externo exibe uma potência de aumento maior que o padrão bifocal interno. Por exemplo, os padrões bifocais externo e interno podem fornecer, respectivamente, uma
5 potência de aumento de cerca de 4 D e cerca de 2D correspondendo a suas ordens de difração +1. As ordens de difração 0 dos dois padrões são, no entanto, substancialmente coincidentes e direcionam a luz incidente para uma região focal de longe caracterizada por uma potência selecionada (baseada na curvatura da superfície do dispositivo óptico e seu índice de refração) em uma faixa de cerca de 6 a cerca de 34 Dioptrias. Como mostrado esquematicamente na figura 5C, o padrão externo fornece um foco de longe
10 A1 e um foco de perto A2 enquanto o padrão interno fornece um foco de longe B1 (substancialmente coincidente com A1) e um foco de perto B2. Portanto, os dois padrões fornecem coletivamente um foco de longe, um intermediário e um de perto, em que os focos de perto dos padrões interno e externo fornecem, respectivamente, visão de perto e intermediária.

As figuras 5A e 5B representam esquematicamente uma lente oftálmica trifocal 30, por exemplo, uma IOL, de acordo com outra modalidade da invenção que inclui um dispositivo óptico 32 tendo uma superfície anterior
20 34 e uma superfície posterior 36. O perfil de referência da superfície anterior 34 é caracterizado por uma curva de base 38 adaptada para fornecer uma potência de foco de longe. A superfície anterior 34 ainda 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 dispositivo óptico 44 do dispositivo óptico. Similar às modalidades prévias, o dispositivo óptico pode ser formado de um material biocompatível, e a lente pode ainda incluir alças ultra-oculares (não mostrados) que facilitam sua fixação no olho. Além do mais, embora as superfícies 14 e 16
25 30 nesta modalidade são em geral côncavas, em outras modalidades, as curvaturas de superfície podem ser selecionadas para fornecer uma lente plano-convexa ou plano-côncava.

Cada zona difrativa anular é separada de uma zona adjacente por um degrau (por exemplo, o degrau 50 separando a segunda zona da terceira zona). Os degraus são posicionados nos limites radiais das zonas. Nesta modalidade, as alturas de degrau são substancialmente uniformes, embora em outras modalidades podem ser **apodized**, por exemplo, em uma maneira discutida acima.

Diferente das lentes difrativas convencionais em que as zonas difrativas têm áreas substancialmente uniformes, nesta modalidade, as áreas das zonas difrativas variam – em uma maneira controlada – como uma função da distância do eixo óptico 44. Esta variação é desenhada para ampliar suficientemente os perfis de energia óptica em um foco de perto e um de longe, gerados por duas ordens de difração das zonas difrativas, de modo a fornecer uma visão intermediária enquanto preserva substancialmente os focos de perto e de longe. Por exemplo, referindo-se à figura 5B, nesta modalidade, as áreas das zonas difrativas anulares 40 aumentam progressivamente como uma função da distância crescente do eixo óptico. Por exemplo, a diferença máxima entre as áreas de duas zonas difrativas (por exemplo, a diferença nas áreas da maioria das zonas externa e interna pode ser cerca de 75% ou mais, por exemplo, até 200%).

A variação das áreas de zona difrativa pode ser implementada selecionando um raio quadrado de cada zona como uma função daquele número da 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 fornece gráficos que contrastam uma relação (gráfico A) entre os raios quadrados das zonas (r_i^2 indica o raio quadrado da zona i) e os números de zona – tipicamente empregados em lentes difrativas convencionais – com uma relação diferente (gráfico B) utilizado nesta modalidade de uma lente oftálmica trifocal da invenção. Como notado nos gráficos, na lente trifocal, os raios quadrados das zonas exibem um grau selecionado de variação não linear como uma função dos números de zona enquanto os raios quadrados das zonas de lente tendo áreas difrativas uniformes variam linearmente como uma função dos números de zona respecti-

vos. Isto modifica o padrão de interferência de luz difratada pela lente de modo a desviar mais energia para dentro de uma região focal intermediária.

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

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

onde:

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

λ indica o comprimento de onda de desenho, e

f indica um comprimento focal do foco de perto, e

$g(i)$ indica uma função não constante.

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

$$g(i) = (ai^2 + bi)f$$

onde:

i indica o número de zona,

a e b são dois parâmetros ajustáveis, e

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

Como notado acima, a variação das áreas das zonas difrativas como uma função de distância do eixo óptico resulta em diversão de alguma luz difratada em uma região focal intermediária para fornecer visão intermediária. Por exemplo, uma fração da luz difratada em uma faixa de cerca de 10% a cerca de 28% pode ser direcionada para a região focal intermediária.

Por meio de exemplo, a figura 7 apresenta dois gráficos (C e D) ilustrando esquematicamente o melhoramento de acuidade visual para visão intermediária fornecida pela lente oftálmica trifocal exemplar acima. Mais especificamente o gráfico C (linhas tracejadas) mostra a distribuição de energia óptica entre um foco de perto e um de longe de uma lente difrativa convencional em que as zonas difrativas anulares têm áreas iguais. Em con-

traste, o gráfico D mostra esquematicamente a distribuição de energia óptica em uma lente oftálmica de acordo com uma modalidade da invenção em que pelo menos duas ou mais das zonas difrativas têm áreas desiguais. Uma comparação de gráfico D com gráfico C mostra que uma modalidade de uma lente oftálmica da invenção tendo zonas difrativas com áreas desiguais fornece um melhoramento considerável da acuidade visual em visão de perto e de longe. Por meio de exemplo, em muitas modalidades, a eficiência difrativa em cada um dos focos de perto e de longe pode estar em uma faixa de cerca de 28% a cerca de 38%, com a eficiência difrativa no foco intermediário se encontrando em uma faixa de cerca de 10% a cerca de 28%.

Similar à modalidade prévia, a potência óptica associada com o foco de longe pode estar, por exemplo, em uma faixa de cerca de 6 a cerca de 34 Dioptrias com o foco de perto fornecendo uma potência de aumento em uma faixa de cerca de 3 a cerca de 9 Dioptrias. Adicionalmente, o foco intermediário pode fornecer, por exemplo, uma potência de aumento em uma faixa de cerca de 1,5 a cerca de 4,5 Dioptrias com relação ao foco de longe.

A funcionalidade das lentes trifocais acima pode ser talvez entendida melhor considerando o diagrama mostrado na figura 8, representando o atraso de fase óptica (OPD) associado com 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 do eixo óptico. Os atrasos associados com +1 e -1 variam de modo substancialmente linear – enquanto que associados com a ordem 0 permanece substancialmente constante – como o quadrado da distância radial muda de zero para um valor correspondendo ao limite da primeira zona difrativa com a segunda (designado aqui por ZB12). No limite de zona, a fase óptica associada com cada ordem exibe uma descontinuidade. Embora não mostrado, ocorre descontinuidade de fase similar no limite da segunda zona com a terceira (designado em ZB23), etc. Se os limites de zona são colocados em posições radiais quadradas correspondendo a mudança de fase óptica π através de cada zona difrativa, a energia óptica difratada na ordem 0 substancialmente

desaparece. Em outras palavras, a lente fornece efetivamente somente duas ordens de difração (foco de perto e de longe). No entanto, em muitas modalidades da invenção, as localizações radiais quadradas de um ou mais limites de zona difrativa são selecionadas tal que a mudança de fase ótica através de uma zona difrativa é menor que π (por exemplo, é $\pi/4$). Isto leva à diversão de alguma energia ótica difratada na ordem 0, desse modo fornecendo visão intermediária.

Em algumas modalidades, a visão a distância fornecida pela lente oftálmica trifocal é melhorada por correção de aberração para grandes aberturas (por exemplo tamanhos maiores que cerca de 3 mm em diâmetro, embora em algumas modalidades a correção de aberração pode também ser utilizada para tamanhos de abertura menores). Tal correção de aberração pode, por exemplo, contrabalançar a luz desfocalizada, se alguma, que pode aparecer no foco de longe como um 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 asfericidade a fim de reduzir efeitos de aberração esférica, que pode ser particularmente pronunciada para grandes aberturas. Algum exemplo de tais perfis asféricas adequados para uso na prática da invenção são descritos no pedido de patente Norte Americano co-pendente acima mencionado intitulada "Apodized aspheric diffractive lenses".

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

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

onde:

z indica uma depressão da superfície paralela a um eixo (z), por exemplo, o eixo ótico, 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 tendo especificação na técnica apreciarão que várias
modificações podem ser feitas nas modalidades acima sem se afastar do
5 escopo da invenção.

REIVINDICAÇÕES

1. Lente oftálmica multifocal (10, 15), compreendendo:
um dispositivo ótico (12, 32) tendo uma superfície (13, 14, 16, 34, 36) que compreende pelo menos dois padrões difrativos (11, 26,42) diferentes adaptados e dispostos com relação um ao outro de modo a fornecer coletivamente visão de perto, intermediária e de longe, os dois padrões difrativos diferentes que compreendem um primeiro conjunto de degraus difrativos anulares que é bifocal ou trifocal que tem focos que correspondem a ordem difrativa de -0,1 ou + 0,1 para um comprimento de onda selecionado de luz no espectro visível em uso oftálmico e um segundo conjunto de degraus difrativos anulares que é ou bifocal ou trifocal, que tem focos correspondendo a ordem difrativa de -0,1 ou + 0,1 para o comprimento de onda selecionado de luz no espectro visível em uso oftálmico,

caracterizada pelo fato de que os dois conjuntos diferentes de degraus difrativos não sobrepõem na direção radial, os dois padrões difrativos diferentes são concêntricos, e os dois padrões difrativos diferentes têm focos diferentes que incluem coletivamente, um foco de perto, um de longe e um intermediário.

2. Lente oftálmica multifocal, de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que um dos ditos padrões difrativos compreende um padrão trifocal (26a-c) e o outro padrão difrativo compreende um padrão bifocal (26d-i).

3. Lente oftálmica multifocal, de acordo com a reivindicação 2, caracterizada pelo fato de que o dito padrão bifocal (26d-i) exibe alturas de degraus apodized.

4. Lente oftálmica multifocal, de acordo com a reivindicação 2, caracterizada pelo fato de que o dito padrão trifocal (26a-c) está disposto mais perto de um eixo ótico (18) do dito dispositivo ótico (12) que o dito padrão bifocal (26d-i).

5. Lente oftálmica multifocal, de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que os ditos padrões difrativos compreendem dois padrões bifocais (11a-c, 11d-g) tendo potências de aumento diferentes.

6. Lente oftálmica multifocal, de acordo com a reivindicação 2, caracterizada pelo fato de que o dito padrão bifocal (26d-i) é adaptado para fornecer visão de perto e de longe, e o dito padrão trifocal (26a-c) é adaptado para fornecer visão de perto, de longe e intermediária.

5 7. Lente multifocal, de acordo com a reivindicação 6, caracterizada pelo fato de que a dita superfície é definida por uma curva de referência de base (22) adaptada para fornecer um foco refrativo que corresponde à dita visão de longe.

8. Lente multifocal, de acordo com a reivindicação 6, caracterizada pelo fato de que os ditos padrões difrativos são dispostos dentro de uma porção da dita superfície circundada por uma parte periférica (28) da dita superfície que é destituído de estruturas difrativas.

9. Lente multifocal, de acordo com a reivindicação 8, caracterizada pelo fato de que cada um dos ditos padrões difrativos compreende uma ou mais estruturas difrativas anulares simetricamente dispostas em torno de um eixo ótico (18) do dito dispositivo ótico.

10. Lente multifocal, de acordo com a reivindicação 9, caracterizada pelo fato de que as ditas estruturas difrativas anulares compreendem o dito padrão difrativo trifocal (26a-c) são dispostos mais perto do dito eixo ótico (18) que as ditas estruturas difrativas anulares compreendendo o dito padrão difrativo bifocal (26d-i).

11. Lente multifocal, de acordo com a reivindicação 10, caracterizada pelo fato de que as ditas zonas difrativas anulares que compreendem o dito padrão difrativo trifocal (26a-c), se estendem a partir do dito eixo ótico em um raio que corresponde a um tamanho de abertura em uma faixa de 1 mm a 1,5 mm.

12. Lente multifocal, de acordo com a reivindicação 11, caracterizada pelo fato de que o dito padrão difrativo bifocal (26d-i) circunda de modo anular o dito padrão difrativo trifocal (26a-c).

13. Lente multifocal, de acordo com a reivindicação 12, caracterizada pelo fato de que as ditas estruturas difrativas anulares bifocais (26d-i) exibem uma altura de degrau (50) decrescente em seus limites como uma

função da distância crescente do eixo ótico.

14. Lente multifocal, de acordo com a reivindicação 13, caracterizada pelo fato de que a dita altura de degrau decrescente (50) é definida por uma função de apodização selecionada.

5 15. Lente multifocal, de acordo com a reivindicação 14, caracterizada pelo fato de que a dita função de apodização é definida de acordo com a relação seguinte:

$$f_{apodize} = 1 - \left(\frac{r_i}{r_{out}} \right)^3,$$

onde r_i indica a distância radial da zona i , r_{out} indica o raio externo da última zona difrativa focal (26i).

10 16. Lente multifocal, de acordo com a reivindicação 6, caracterizada pelo fato de que o dito padrão difrativo trifocal (26a-c) compreende um ou mais degraus em formato quadrado e o dito padrão difrativo bifocal (26d-i) compreende um ou mais degraus em formato dentado.

15 17. Lente multifocal, de acordo com a reivindicação 6, caracterizada pelo fato de que o dito padrão difrativo trifocal (26a-c) fornece focos de perto, de longe e intermediário, os ditos focos de perto e de longe trifocais sendo coincidentes, respectivamente, com um foco de perto e um de longe do dito padrão bifocal (26d-i).

20 18. Lente multifocal, de acordo com a reivindicação 17, caracterizada pelo fato de que os ditos focos de perto, intermediário e de longe correspondem, respectivamente, à dita visão de perto, intermediária e de longe.

25 19. Lente multifocal oftálmica, de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que compreende uma lente oftálmica trifocal (30) que compreende um dispositivo ótico (32) tendo pelo menos uma superfície (34, 36) definida por uma curva de base (38), pelo menos dois padrões difrativos anulares (42) dispostos no dito dispositivo ótico, um dos ditos padrões fornecendo primeiramente três focos e o outro fornecendo primeiramente dois focos, tal que uma combinação de distribuição de energia associada com os focos de um padrão com aquela do outro padrão resulta em fornecer
30 visão de perto, intermediária e de longe.

20. Lente multifocal oftálmica, de acordo com a reivindicação 19 caracterizada pelo fato de que a dita curva de base (38) fornece uma potência refrativa que corresponde com a dita visão de longe.

5 21. Lente multifocal oftálmica, de acordo com a reivindicação 19, caracterizada pelo fato de que os ditos padrões difrativos (42) são circundados por uma parte periférica do dito dispositivo ótico que é destituído de estruturas difrativas.

10 22. Lente multifocal oftálmica, de acordo com a reivindicação 21, caracterizada pelo fato de que o dito padrão difrativo (42) que fornece três focos está disposto mais perto de um eixo ótico (44) do dito dispositivo ótico que o dito padrão difrativo fornecendo dois focos.

15 23. Lente multifocal oftálmica, de acordo com a reivindicação 21, caracterizada pelo fato de que o dito padrão difrativo (42) que fornece três focos compreende uma pluralidade de zonas difrativas anulares se estendendo a partir de um eixo ótico (44) do dito dispositivo ótico a uma primeira distância deste eixo.

20 24. Lente multifocal oftálmica, de acordo com a reivindicação 23, caracterizada pelo fato de que o dito padrão difrativo que fornece dois focos compreende uma pluralidade de zonas difrativas anulares se estendendo a partir da dita primeira distância para uma segunda distância menor que um raio do dito dispositivo ótico.

25 25. Lente multifocal oftálmica, de acordo com a reivindicação 19, caracterizada pelo fato de que a dita curva de base (38) é esférica de modo a reduzir a aberração esférica.

26. Lente oftálmica multifocal (15), de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que os dois padrões difrativos diferentes compreendem dois padrões bifocais (11a-c, 11d-g) separados, os ditos padrões exibindo potências de aumento diferentes de modo a fornecer cooperativamente visão de perto, intermediária e de longe.

30 27. Lente multifocal, de acordo com a reivindicação 26, caracterizada pelo fato de que um dos ditos padrões (11a-c) fornece uma potência de aumento em uma faixa de 3 a 9 Dioptrias e o outro padrão (11d-g) forne-

ce uma potência de aumento em uma faixa de 1,5 a 4,5 Dioptrias.

28. Lente multifocal, de acordo com a reivindicação 26, caracterizada pelo fato de que um dos ditos padrões (11a-c) está disposto mais perto de um eixo ótico do dito dispositivo ótico que o outro padrão (11d-g).

5 29. Lente multifocal, de acordo com a reivindicação 28, caracterizada pelo fato de que cada um dos ditos padrões compreende uma pluralidade de zonas de difração concêntricas (11) dispostas em torno do dito eixo ótico.

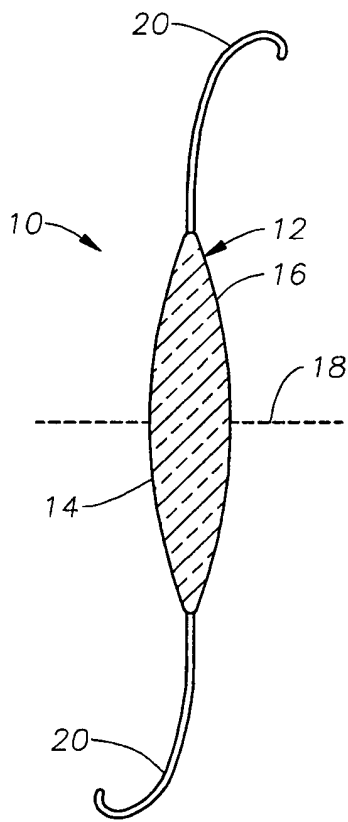


Fig. 1A

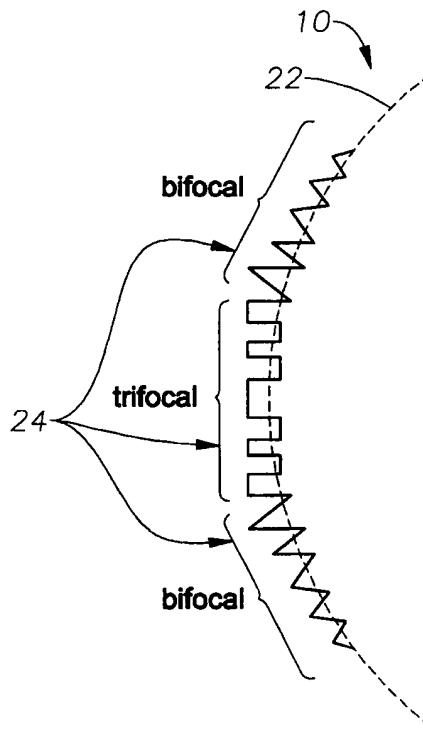


Fig. 1B

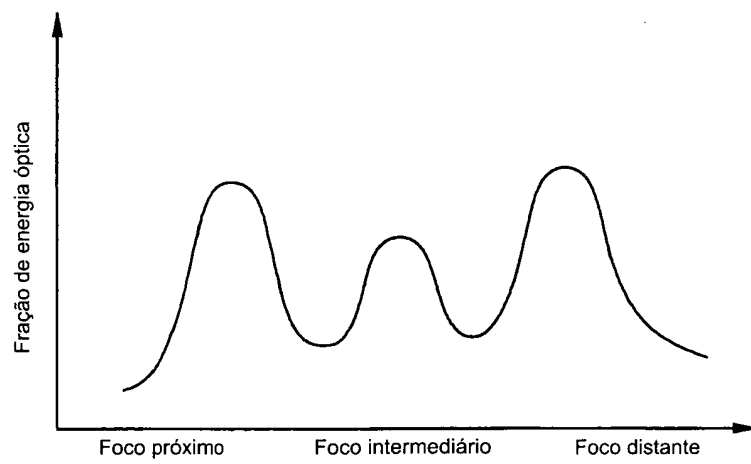
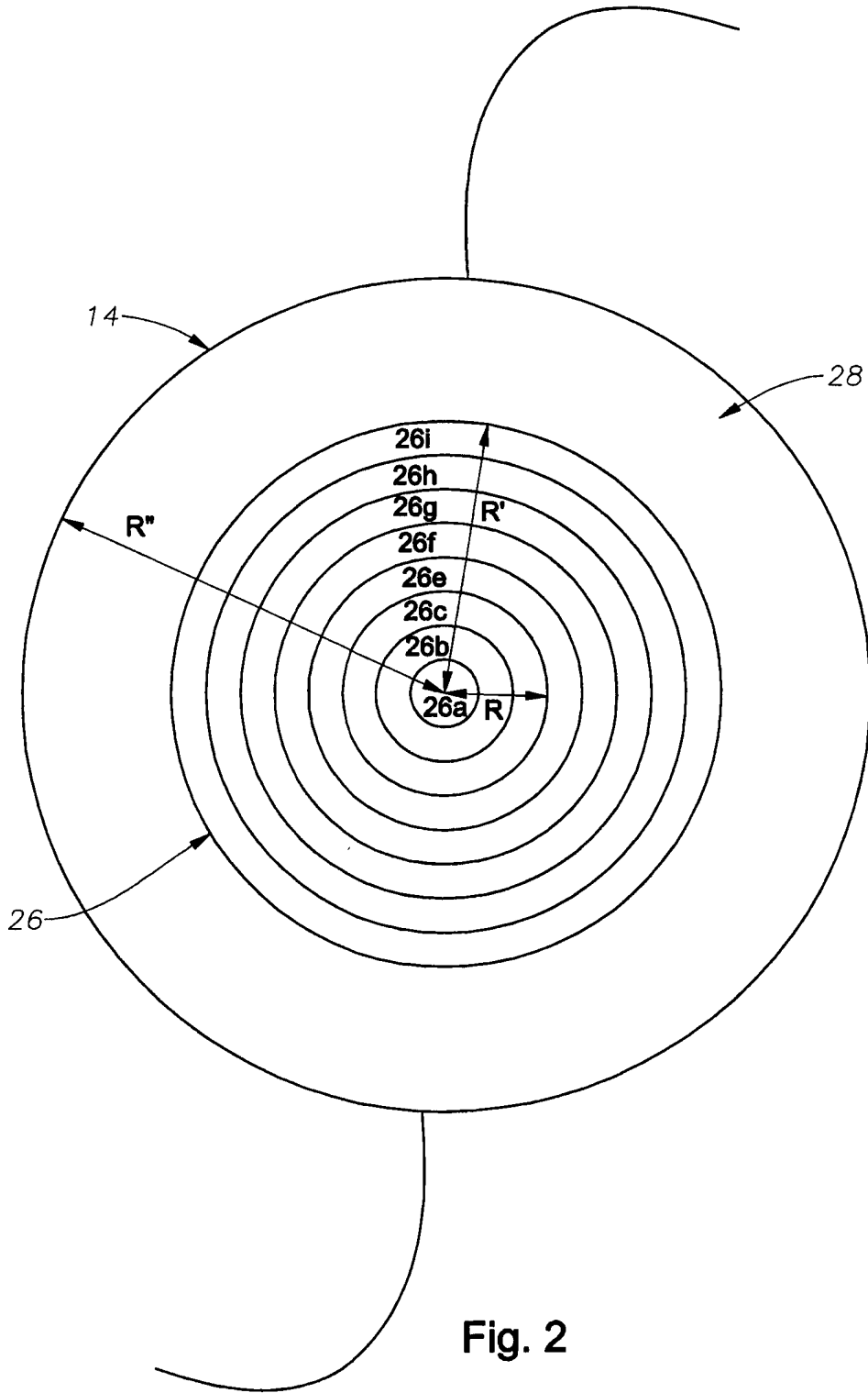


Fig. 3



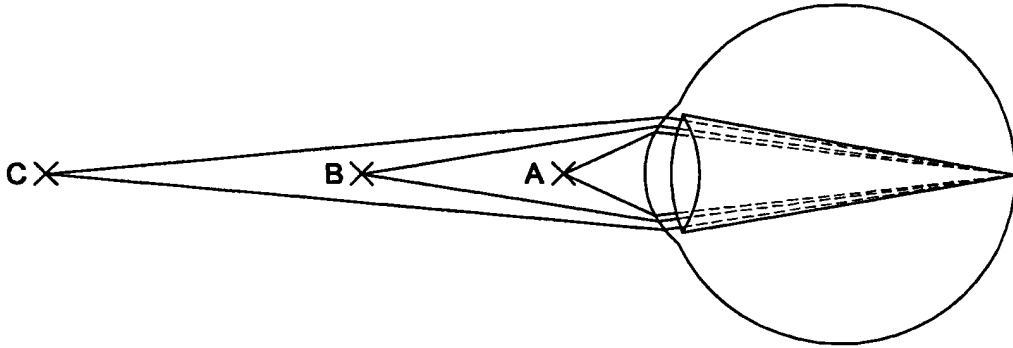


Fig. 4A

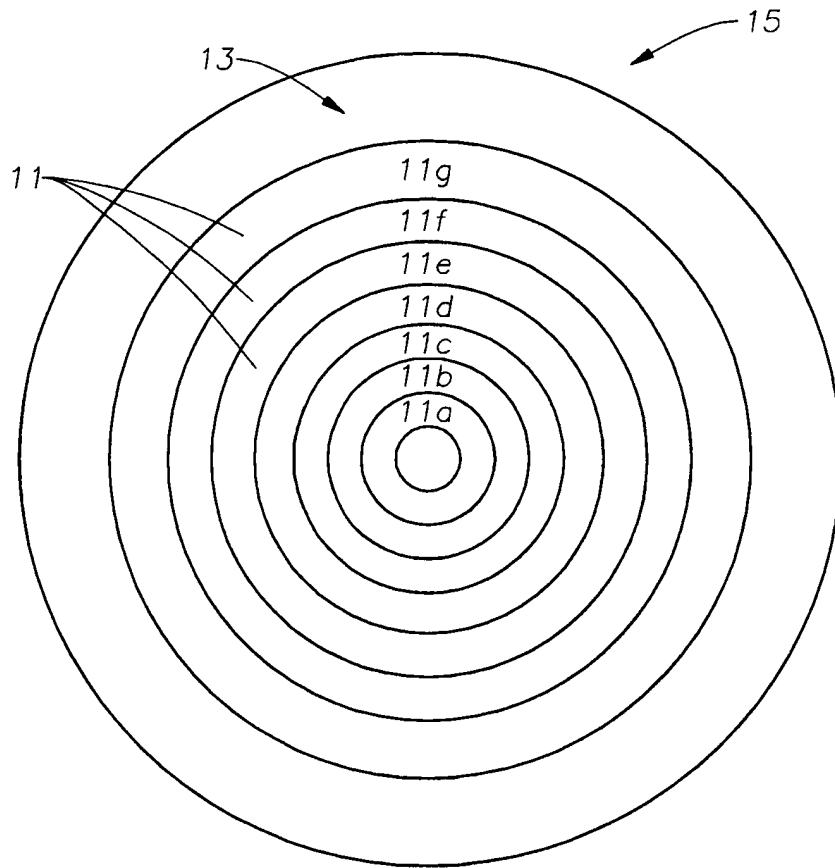


Fig. 4B

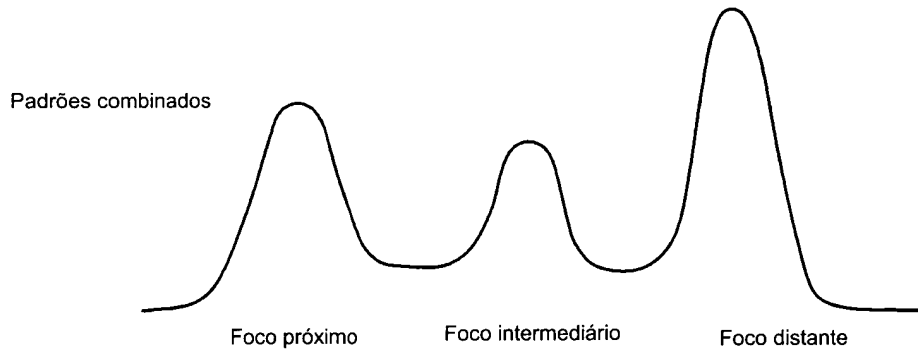
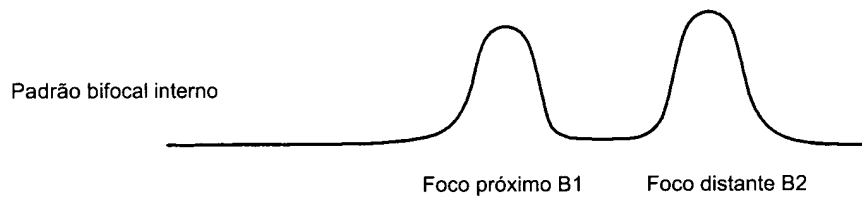
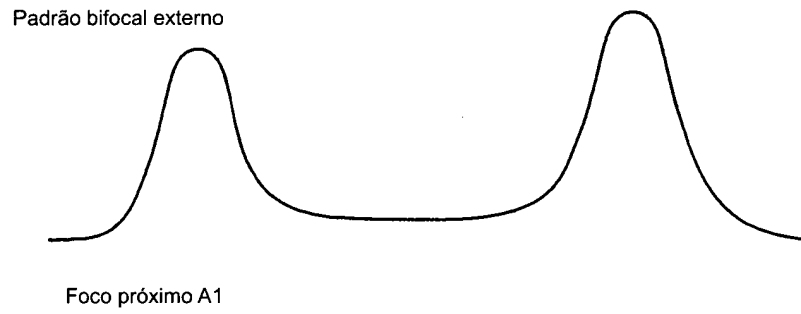


Fig. 4C

5/7

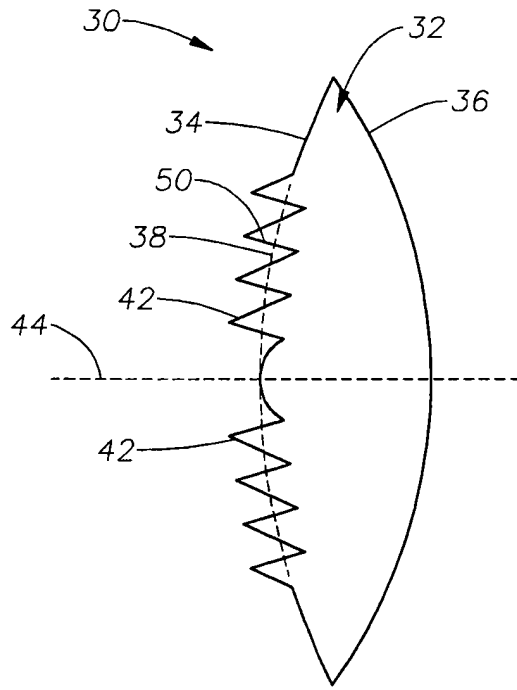


Fig. 5A

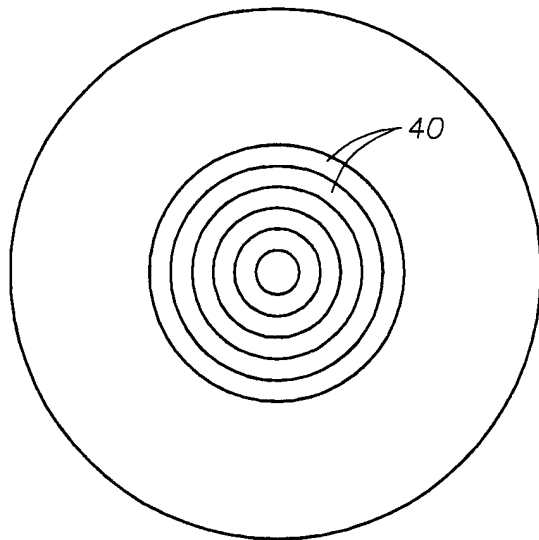


Fig. 5B

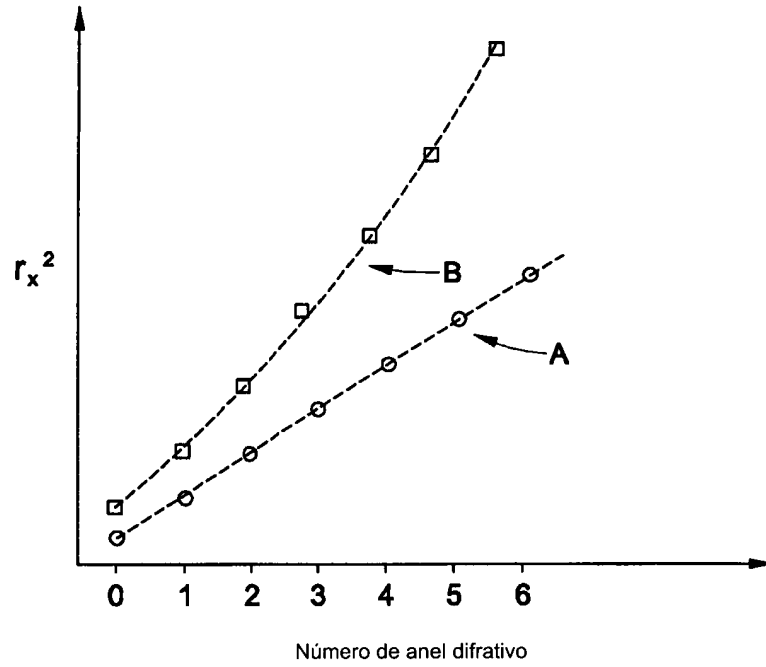


Fig. 6

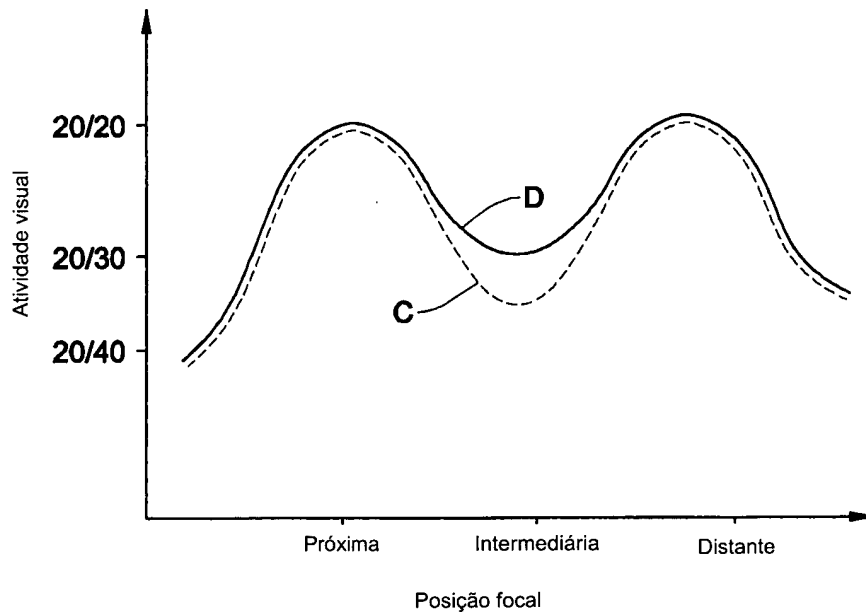


Fig. 7

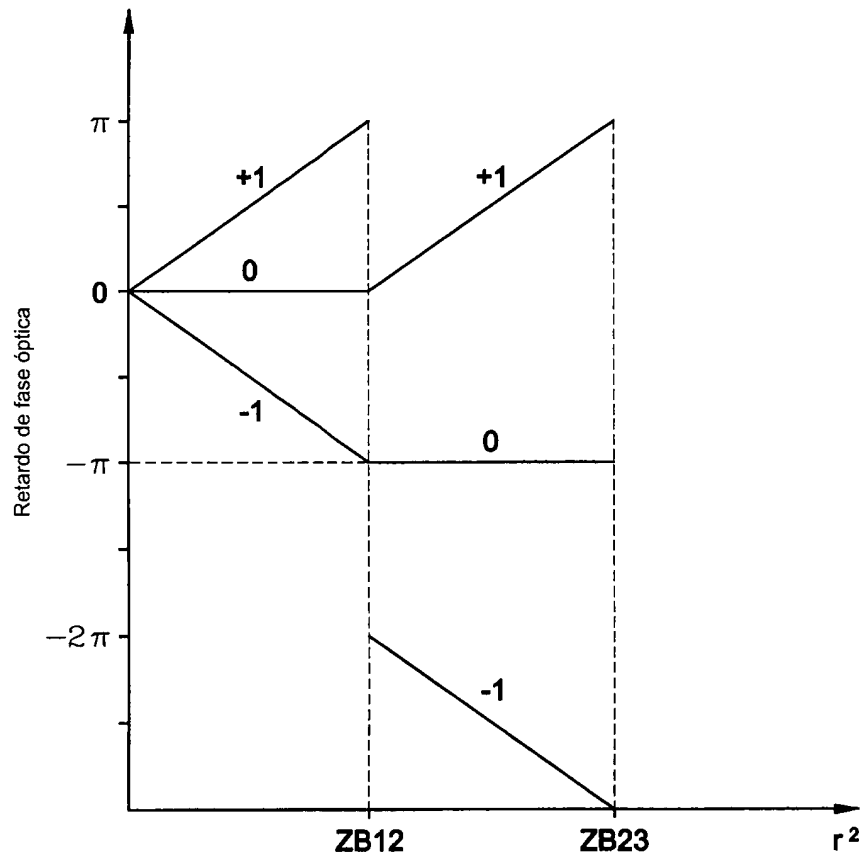


Fig. 8