

Difração por CDs e ondas X

Trabalho da disciplina F 809 “Instrumentação para o Ensino”, Instituto de Física-
Universidade Estadual de Campinas
1º semestre de 2002.

Aluno: Daniel Souza Ferreira Magalhães IFGW
dsouza@lei.ifc.unicamp.br
Orientadores: José J. Lunazzi IFGW
lunazzi@ifi.unicamp.br
Hugo F. Figueroa FEE
hugo@dmo.fee.unicamp.br
Colaborador: Cesar Dartora FEE
dartora@dmo.fee.unicamp.br

27 de junho de 2002

Resumo:

Os CDs usados domesticamente para ouvir música, ou para armazenar dados de computador, formam brilhantes figuras coloridas em sua “face espelhada”. Os CDs têm uma propriedade muito importante no estudo da ótica, a difração.

Como sabemos, a luz branca é formada pela superposição de várias outras cores. O CD consegue separar essas cores através da difração, isso porque é composto de riscos muito finos, mais finos que um fio de cabelo.

Quando seguramos um CD com uma certa inclinação e iluminamos com uma lâmpada pequena observamos uma linha que parece atravessá-lo. Isso acontece devido a nossa visão binocular (visão com os dois olhos). Se, enquanto estivermos observando a linha que parece atravessar o CD, fechamos um olho, a linha passa a ser observada em cima do CD.

A luz que passa através de um CD pode transportar informações que podem ser captadas através de uma linha reta que passa pelo eixo do CD. Na pesquisa de Engenharia Elétrica por novas antenas, há uma modalidade que desenvolve exatamente a habilidade de orientar uma onda em uma linha reta o mais definida possível, com um mínimo de largura. A difração pelo CD tem um grau de semelhança com isso.

Originalidade:

O tema parece-nos original, pois não conhecemos quem o tenha tratado antes. Apenas o uso e tratamento que aproxima o CD a uma rede de linhas retilíneas é conhecido.

Divulgação

Os orientadores permitem a reprodução e divulgação do trabalho em qualquer nível.

Descrição:

NIVEL BÁSICO (SEGUNDO GRAU)

A constituição do CD [1,2]

O CD-ROM convencional é fabricado por um processo de prensagem. A moldagem dos “picos” e “vales” é feita num disco com um gravador de CDs de onde são feitas as gravações sobre material fotosensível (polímeros chamados fotoresinas).

Após um processo de revelação, onde a luz incidiu o material acaba sendo retirado e deposita-se sob vácuo uma fina camada metálica. Um processo eletroquímico (galvanoplastia) toma o disco como eletrodo que é colocado em um meio líquido salino com um disco metálico com superfície plana como o outro eletrodo. Gera-se por meio de corrente elétrica agindo no meio uma réplica perfeita em níquel duro, que constitui a placa “mãe”, referência da qual pelo mesmo processo serão feitas réplicas “filhos” usadas para prensamento. Estes CDs “prensados” são produzidos “moldados” numa camada de um plástico do tipo policarbonato. Os dados gravados nesses CDs não são alteráveis, estes discos não podem ser gravados. A figura 1 mostra a estrutura desses CDs.

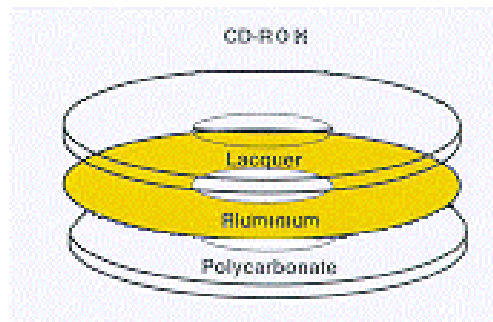


Figura 1: Estrutura de um CD convencional.

O CD comum possui três camadas. São elas:

- Laqueamento (Lacquer): existe somente para a proteção dos dados gravados no CD.
- Aluminium: composta por alumínio.
- Policarbonato: camada plástica onde estão situados os sulcos difratores.

O CD-ROM gravável não possui a camada Aluminium (alumínio), mas apresenta duas camadas a mais, a camada de gravação e a camada reflexiva. Às vezes uma camada de proteção a mais.

- Camada de Gravação: Nos CDs de face dourada, prateada e esverdeada, esta camada é formada por uma variação do composto cianino, denominado fitohalocianino que pode ser mais ou menos azulado de acordo com as concentrações dos compostos básicos do material.

-Camada Reflexiva: Nesta camada é aplicado o material reflexivo unicamente metálico. Essa camada pode ser constituída de duas diferentes ligas: uma liga de prata ou uma liga de ouro 24K.

A figura 2 (a) mostra um esquema desse tipo de CD-ROM.

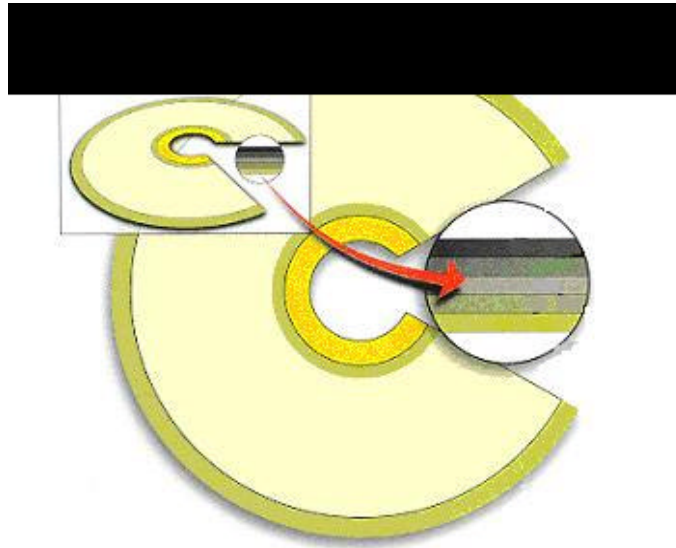


Figura 2 (a): CD-R

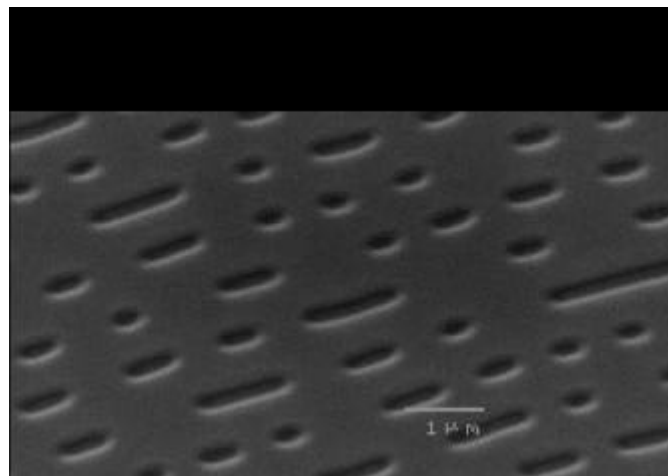


Figura 2 (b): Imagem de microscopia eletrônica de um CD fabricado por prensagem.

Um CD virgem gravável apresenta uma estrutura semelhante porem de sulcos contínuos.

Já os CDs-RW possuem uma composição completamente diferente, excetuando-se a camada plástica. Em substituição ao composto de cianino e à liga metálica reflexiva é colocado uma espécie de cristal que torna-se opaco ou translúcido de acordo com o comprimento de onda que o atravessa. Esses CDs refletem apenas 30% do raio incidente, o que impossibilita que eles sejam lidos em qualquer drive de CD (os CDs convencionais refletem de 70% a 80% do raio incidente). A leitura dos CD-RW só é possível em drives que possuam um circuito denominado AGC, ou em português, Controle Automática de Ganho, que compensa esta “má reflexão”.

Experimentalmente identificamos a camada de proteção, a camada de gravação (ou em um CD normal a camada *aluminium*) e o policarbonato (a camada plástica). Tentamos atacar o CD com soda caustica, mas essa não se mostrou eficaz para separar as camadas.

Resolvemos usar, então, uma tesoura para recortar a borda onde a camada de gravação e a de proteção estava aderida. Com isso conseguimos isolar o policarbonato, que fica transparente. Nos CDs com camada de gravação dourada conseguimos melhores resultados, pois esses ficaram quase transparentes. Os CDs com camada azulada (fitohalocianino) deixavam o policarbonato um pouco manchado de azul.

Estereoscopia e a linha virtual que atravessa o CD [3,4]

O termo "estereoscopia" engloba todas as técnicas que utilizam o mecanismo visual binocular do ser humano, para criarem uma sensação de profundidade em duas ou mais imagens bidimensionais do mesmo objeto representado através de diferentes perspectivas. A palavra "estereoscopia" deriva do grego "stereos" e "skopein", que significam, respectivamente, "sólido", "relevo" e "olhar", "ver", quer dizer, visão em relevo. A freqüente interpretação de "estéreo" no sentido de "dois" é resultante do fato de necessitarmos de dois olhos e dois ouvidos para vermos e ouvirmos espacialmente.

Na figura 3, obtida com uma câmera dupla, podemos ver como a ponta da régua está em posição diferente com respeito ao rosto em cada uma das perspectivas. Isto acontece por ela estar bem a frente do rosto.

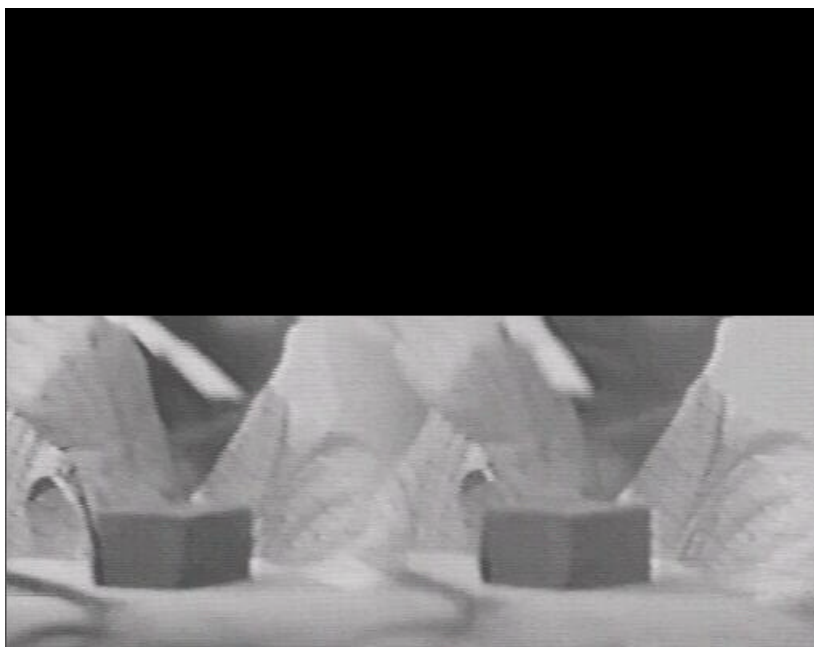
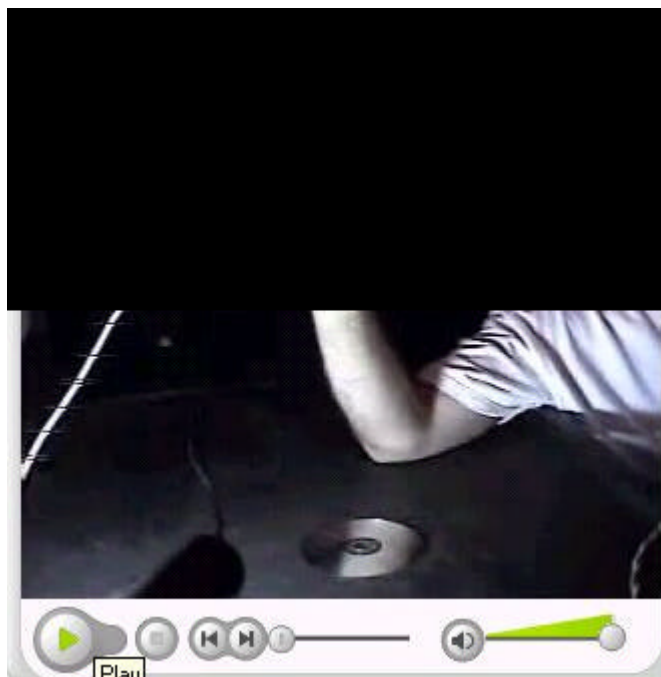


Figura 3: Par estéreo

Na iluminação do CD por uma fonte de tamanho pequeno observa-se uma linha de direção radial, que é consequência do espalhamento por difração. A linha é colorida pelo efeito da difração, podendo apresentar uma ou mais cores, que variam na seqüência do espectro da luz branca ao inclinar o CD. O ângulo que essa linha faz depende da posição do observador, ou seja que é diferente para cada olho. Assim, na face "espelhada" do CD observamos uma linha virtual formada por estereoscopia quando olhamos o reflexo de uma lâmpada posta a uma distância grande ou usamos uma lâmpada pequena de tal forma que ela possa ser considerada uma fonte aproximadamente pontual. Devido a distância entre

ossos dois olhos vemos uma linha com uma inclinação diferente para cada olho. Nosso cérebro interpreta essas duas imagens como se fosse apenas uma que atravessa o CD. Variando a inclinação do CD observamos essa linha se movimentar em terceira dimensão. Movimentando nossa cabeça em varias direções, curiosamente, a variação é tal que vemos sempre a linha na mesma posição, como se fosse uma imagem holográfica.



ASSISTA O VÍDEO: Cdestereoscopia.rm de 2 min 43 s de duração e 13,2 Mb de tamanho, em formato de tela 320 x 240 que pode ser assistido em tela cheia, e estará disponível na página das disciplinas.

Difração por reflexão e por transmissão

No Cd normal temos difração somente por reflexão, mas isto dificulta a observação de figuras iluminadas e observadas pela linha central, que é a de simetria. O observador acaba se interpondo entre a fonte luminosa e o CD. Por isto fizemos a desmontagem do CD obtendo apenas a parte de policarbonato que usamos para fazer a difração por transmissão. As vezes, por acaso, numa caixa de CDs virgens tem um CD sem camada refletiva. A maioria das figuras que mostramos por transmissão podem ser encontradas por reflexão, com mais dificuldade de alinhamento.

NIVEL AVANÇADO (UNIVERSITÁRIO)

Difração no CD e ondas X [6, 7, 15]

Quando a luz divergente de um laser atravessa um CD observamos uma “estranha” imagem formada na transmissão (aqui usamos o policarbonato do CD que separamos com o auxílio de uma tesoura, como foi explicado na seção: “A constituição do CD”). Essa imagem é a superposição da luz que passa por cada sulco do CD. Em cada milímetro,

existem aproximadamente duzentos sulcos e cada um deles produz uma imagem semelhante a da figura 4:

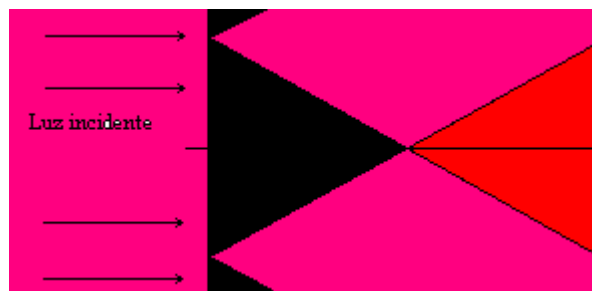


Figura 4: Espectro de difração de uma fenda circular

A figura não colocou a densidade de luz em detalhes, que daria uma concentração no ponto do eixo onde a luz que sai de um lado e do outro se encontra.

Para que possamos estudar o espectro de difração através do CD usamos um laser divergente, que é uma caneta laser comum, só que sem a lente que focaliza a luz num feixe [5]. A figura 5 mostra a maneira como o CD foi iluminado.

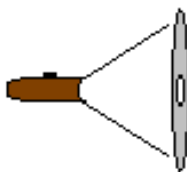


Figura 5: Laser divergente

Essa imagem “estranha” tem uma característica muito interessante, ao longo do centro do CD vemos uma linha bem definida com um comprimento limitado que termina abruptamente. Então começamos a investigar essa linha para outras fontes luminosas.

Usando uma pequena lâmpada de 12 V de carro (fonte de luz branca, isto é, fonte de vários comprimentos de onda), afastada de forma que pudesse ser considerada uma fonte pontual, observamos novamente o espectro. A linha, desta vez, se mostrava mais alongada e em sua extremidade, podíamos ver claramente uma divisão de cores. Uma evidência da difração através do CD; cada cor que forma a luz branca sofrerá um desvio diferente no momento em que penetra no CD e chegará a uma distância diferente do mesmo. A figura 6 ilustra o que foi observado:

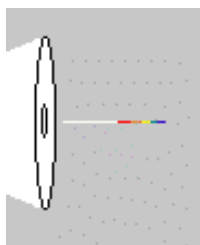


Figura 6: Luz branca iluminando o CD e a linha formada pela difração.

O espectro de difração do CD foi calculado no apêndice 2.

Em 1987, Durnin mostrou a existência de feixes não-difrativos que se propagam no espaço livre com uma grande quantidade de energia confinada próximo a seu eixo; esses feixes não se espalham ou divergem. Essas ondas são conhecidas como ondas X [6] e são pesquisadas para a geração de antenas extremamente direcionais.

O que vemos no espectro de difração do CD é muito parecido com isso, só que em regime estacionário, pois não há propagação.

Uma maneira que pela qual supomos ser possível a produção de ondas X pelo CD seria utilizar um diafragma que abrisse e fechasse com grande velocidade, de forma a variar a iluminação do CD. A figura 7 mostra melhor a hipótese.

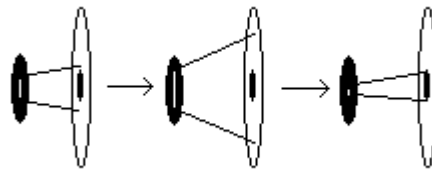


Figura 7: Geração de ondas X.

Conclusão

Estudamos a estrutura de um CD-ROM comum e de gravação para que possamos separar a estrutura que nos possibilitaria fazer difração; o policarbonato. Observamos então o espectro de difração do CD usando um laser divergente e uma lâmpadinha de luz branca.

Um efeito interessante presente quando se olha através de um CD (não apenas do policarbonato) é a estereoscopia, que é a interpretação que nosso cérebro faz de uma imagem que é vista de duas perspectivas diferentes devido aos nossos dois olhos.

Apêndice 1: Difração de Fraunhofer ou caso de campo afastado [8]

A difração de Fraunhofer acontece quando as distâncias, da fonte a abertura que difrata e da abertura até o ponto receptor (P), são ambas grandes o suficiente para que a curvatura das ondas difratadas possa ser negligenciada.

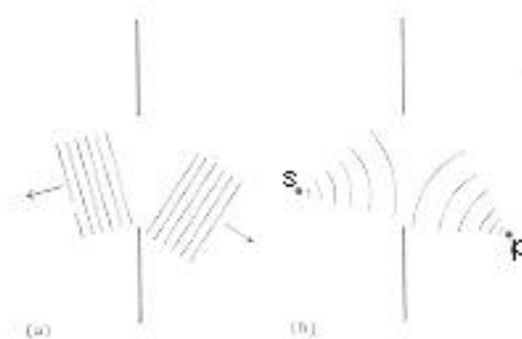


Figura 8: (a) Difração de Fraunhofer. (b) Difração de Fresnel.

Chamando o ponto de análise P está a uma distância d do plano da abertura. A fonte de luz S está a uma distância d' do mesmo plano. As distâncias h , h' e δ estão representadas na figura 9.

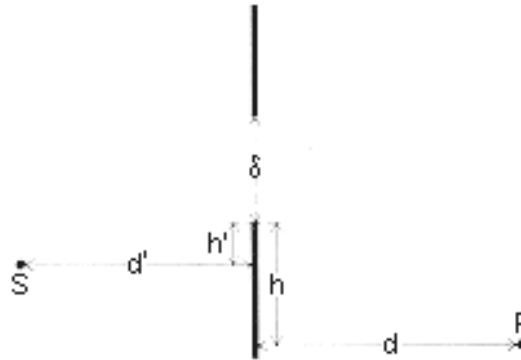


Figura 9: Aproximação de Fraunhofer

Da figura, a variação Δ da quantidade $r + r'$ de uma borda da abertura até a outra é dada por:

$$\Delta = \sqrt{d'^2 + (h' + d)^2} + \sqrt{d^2 + (h + d)^2} - \sqrt{d'^2 + h'^2} - \sqrt{d^2 + h^2} = \left(\frac{h'}{d'} + \frac{h}{d}\right)d + \frac{1}{2}\left(\frac{1}{d'} + \frac{1}{d}\right)d^2 + \dots \quad (1)$$

O termo quadrático da expansão acima é essencialmente uma mediada da curvatura da frente de onda. A onda é efetivamente plana acima da abertura se esse termo for muito pequeno comparado com o comprimento de luz incidente, isto é, se

$$\frac{1}{2}\left(\frac{1}{d'} + \frac{1}{d}\right)d^2 \ll \lambda \quad (2)$$

Este é o critério para a difração de Fraunhofer. Para a difração no CD temos:

$$\frac{1}{2}\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{0,1}\right)(5 \cdot 10^{-6})^2 = 1,31 \cdot 10^{-10} \ll 5 \cdot 10^{-7} \quad (3)$$

Como o segundo termo é quase 4000 vezes maior que o primeiro, no CD fazemos uma difração de Fraunhofer, e por isso não precisamos da lente.

Apêndice 2: Cálculo do espectro de difração no CD [9, 10]

Considerando que o CD possui n anéis concêntricos, que a_j seja o raio do j -ésimo anel; considerando ainda que cada um dos anéis tenha como função de transferência uma Delta de Dirac. Usando a teoria da difração escalar chegamos a função de onda para o j -ésimo anel a uma distância z do CD de:

$$\Psi_j(\mathbf{r}, z, \mathbf{j}) = \frac{A.a_j e^{ik\left(z + \frac{\mathbf{r}^2}{2z} + \frac{a_j^2}{2z}\right)} J_0\left(\frac{\mathbf{r}.k.a_j}{z}\right)}{z} \quad (4)$$

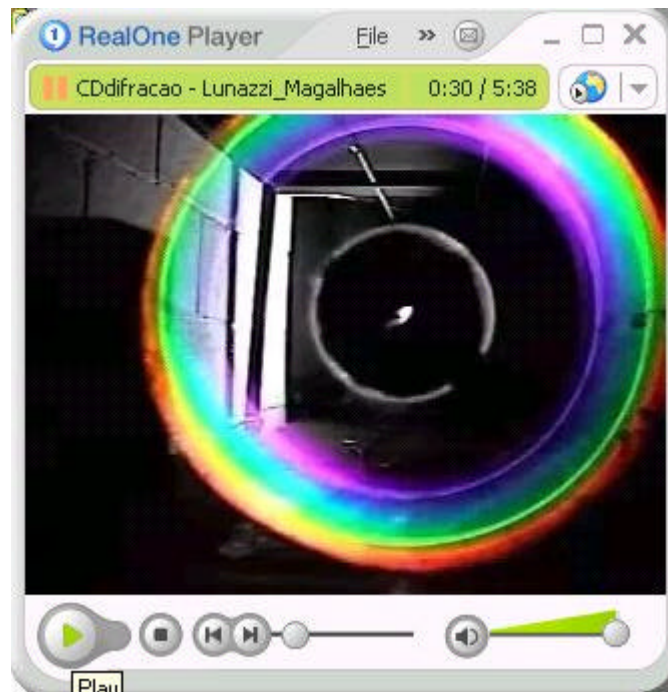
Para o espectro temos de todos os anéis temos que somar (4) sobre todos os n, ou seja:

$$\Psi(\mathbf{r}, z, \mathbf{j}) = \sum_{j=1}^n \Psi_j(\mathbf{r}, z, \mathbf{j}) \quad (5)$$

Então, o espectro de difração fica:

$$\Psi(\mathbf{r}, z, \mathbf{j}) = A \sum_{j=1}^n \frac{a_j e^{ik\left(z + \frac{\mathbf{r}^2}{2z} + \frac{a_j^2}{2z}\right)} J_0\left(\frac{\mathbf{r}.k.a_j}{z}\right)}{z} \quad (6)$$

Onde k é igual a $2\pi/\lambda$ e J_0 é a função de Bessel de ordem zero.



ASSISTA O VÍDEO: Cddifracao.rm de duração de 5min 38 s e tamanho 27,4 Mb em formato de tela de 320 x 240.

ALGUMAS FOTOGRAFIAS



Figura 10: Difração sob luz branca sobre uma tela vertical, estando o CD horizontal e a lâmpada a 2,5 m de distância. O reflexo do CD no papel branco criou uma incrível ilusão de presença de um segundo CD que lançasse a figura por cima dele.

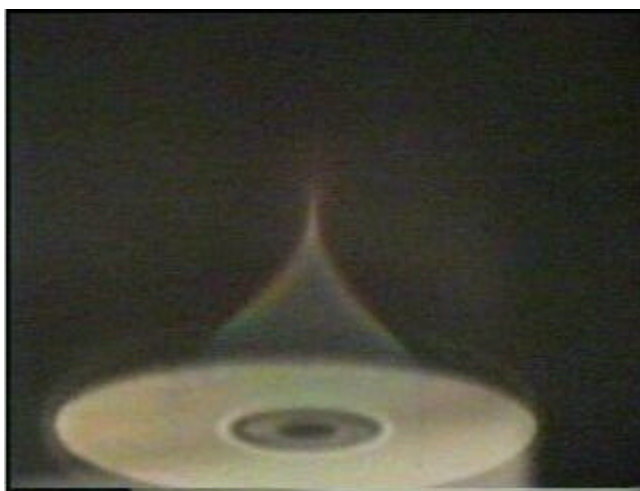


Figura 11: Vista mais próxima.



Figura 12: Detalhe da difração.

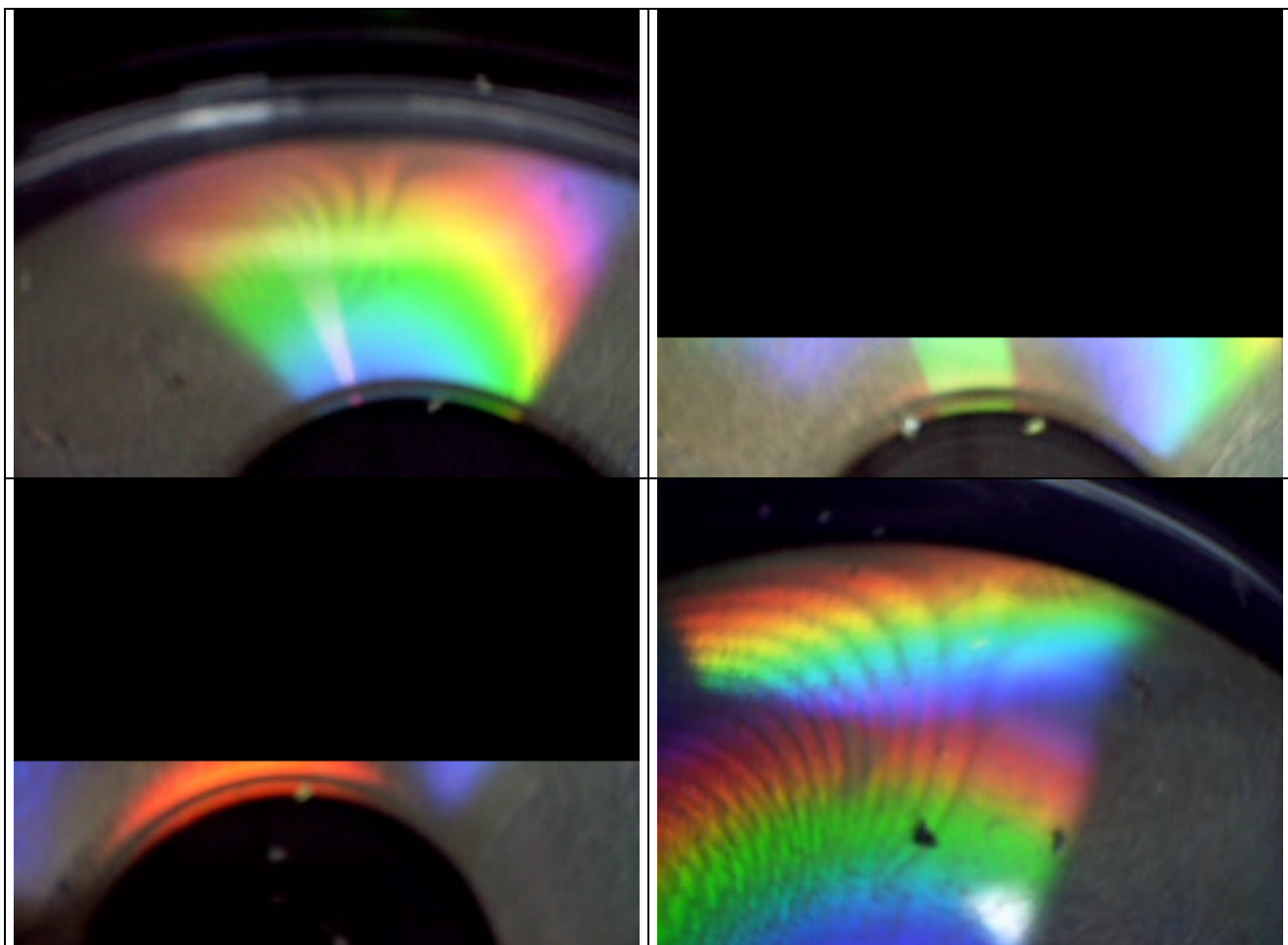


Figura 13: Interferência obtida iluminando com luz de mercúrio durante ataque químico de mais de 5 minutos.

Tentamos observar variação nas franjas, mas foi muito pouco em consequência da camada refletiva ser mais espessa do que supúnhamos.

Referências:

- [1] Revista PC Master, Edição 60, Ano 5. Editora Europa.
- [2] Alessi A., Froehlich P., Teixeira, R. e Collares, T. P.; Homepage-
<http://vitoria.upf.tc.br/~rebonatto/trabepd/gravadores/midias.html>
- [3] Estéreo Magia; Homepage - <http://www.estereomagia.com.br>
- [4] Lunazzi, J. J.; <http://geocities.com/doctorlunazzi/Estereoscopia/estere.htm>
- [5] Aparelho adaptado pelo Prof. Lunazzi –
http://geocities.com/prof_lunazzi/ensino_de_holografia/equip2p.htm
- [6] Indebetouw, G. - Nondiffracting optical fields: some remark on their analysis and synthesis. Virginia Polytechnic Institute and State University, USA.
- [7] Saarij, P. e Reivelt, K. - Evidence of X-Shaped Propagation-Invariant Localized Light Waves; Physical Review Letters vol.79, Number 21. Institute of Physics, Estonia.
- [8] Fowles, G. R. - “Introduction to Modern Optics”, University of Utah; Dover Publications, Inc., New York
- [9] Goodman, J. W. – “Introduction to Fourier Optics”, Stanford University; McGraw-Hill Companies, Inc. Second Edition
- [10] Dartora, C. A.; Rached, M. Z.; Nóbrega, K. Z.; Figueroa, H. E. H., Department of Microwaves and Optics, School of Electrical and Computer Engineering, University of Campinas; Campinas
- [11] Sears, Francis Weston - FÍSICA óptica vol. 3
- [12] Lunazzi, J. Difração. http://www.geocities.com/prof_lunazzi/f641/f641.htm
- [13] Causal Explanation of Observed Superluminal Behavior of Microwave Propagation in Free Space (with D. S. Thober and A. L. Xavier Jr.), *Phys. Lett. A* **284**(6), 217-224 (2001).
- [14] Thoughtful Comments on ‘Bessel Beams and Signal Propagation’ (with E.C. de Oliveira, A.L. Xavier, Jr. and D. S. Thober, *Phys. Lett. A* **284**(6), 296-303 (2001).
- [15] Kettunen, V. e Turunen, Jari - Propagation-Invariant Spot Arrays. Department of Physics, University of Joensuu, Finland.