

## KB. 2 Lensa Optik Sinar-X

1. Lensa optik sinar-x generasi kesatu.
2. Lensa optik sinar-x generasi kedua.
3. Transmittansi lensa optik sinar-x.
4. Divergensi lensa optik sinar-x
5. Ukuran titik api lensa optik sinar-x.

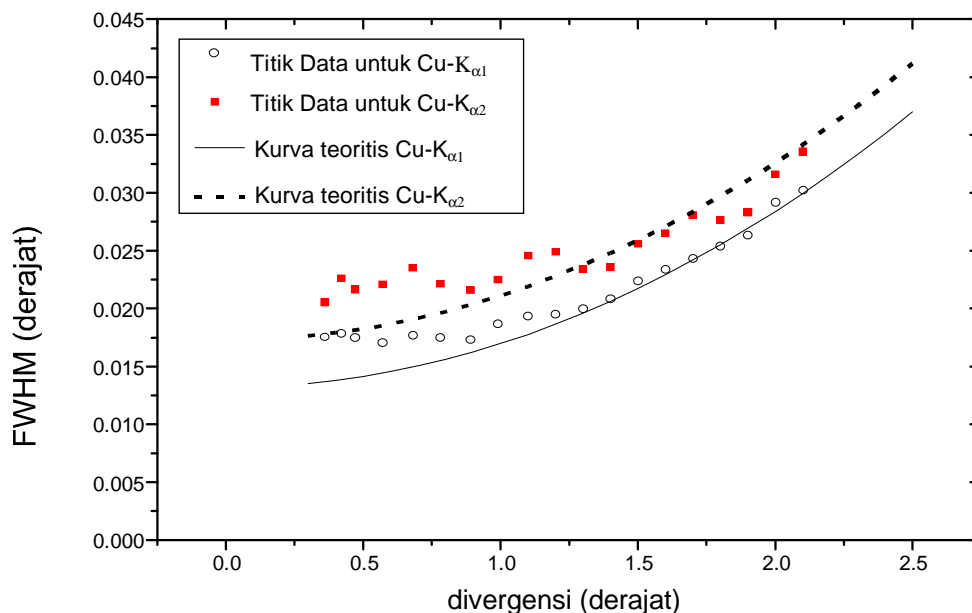
Masalah yang dihadapi oleh para peneliti yang bekerja dalam bidang sinar-x atau kristalografi adalah mengenai *resolusi*, *divergensi*, dan *intensitas* berkas sinar-x yang digunakan untuk mengindera struktur kristal.

Masalah resolusi berkaitan erat dengan monokromatisme panjang gelombang sinar-x. Meskipun masalah ini dapat diatasi dengan menggunakan kristal monokromator, tetapi intensitas sinar-x jadi berkurang karena bergantung reflektansi monokromator yang selalu kurang dari 100%. Resolusi berkas sinar-x sangat mempengaruhi akurasi hasil penginderaan. Dalam percobaan difraksi sinar-x, misalnya, masalah resolusi suatu berkas sinar-x sangat berpengaruh terhadap penentuan nilai-nilai parameter struktur kristal, karena panjang gelombang sinar-x yang digunakan akan menentukan posisi sudut setiap profil intensitas sinar-x terdifraksi.

Kedua masalah terakhir, yaitu divergensi dan intensitas adalah saling bergantung satu dengan yang lainnya. Di satu sisi kita dapat memperbaiki divergensi yaitu dengan menggunakan celah yang sangat sempit, namun di sisi lain intensitas jadi berkurang akibat sempitnya celah, dan sebaliknya. Disamping itu, divergensi juga sangat mempengaruhi resolusi berkas sinar-x. Kardiawarman<sup>1</sup> telah melakukan perhitungan secara teoritis dan membuktikan secara eksperimen tentang hubungan divergensi terhadap resolusi untuk sinar-x Cu-K<sub>α1</sub> dan Cu-K<sub>α2</sub> dengan menggunakan teknik difraksi kristal ganda tak identik (Non-identical double crystal diffraction). Hubungan tersebut secara teoritis dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan berikut:

$$\gamma_1 - \gamma_0 = \theta_1 - \theta_2 + \alpha \sin(\theta_1 / \cos \alpha) - \alpha \sin(\theta_2 / \cos \alpha) \quad (1)$$

dimana  $\gamma_1 - \gamma_0$  = resolusi berkas sinar-x,  $\theta_1$  dan  $\theta_2$  adalah masing-masing sudut Bragg untuk kristal pertama dan kristal kedua, sedangkan  $\alpha$  = divergensi berkas sinar-x. Dalam eksperimen, resolusi dinyatakan sebagai lebar penuh di setengah maksimum (Full Width at Half Maximum/FWHM), dan  $\alpha$  adalah sama dengan lebar celah yang dinyatakan dalam satuan derajat. Kurva resolusi (FWHM) sebagai fungsi divergensi ( $\alpha$ ) secara teoritis dan eksperimen untuk kedua garis Cu-K<sub>α1</sub> dan Cu-K<sub>α2</sub> ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Kurva resolusi (FWHM) sebagai fungsi divergensi ( $\alpha$ ) secara teoritis dan eksperimen untuk kedua garis Cu-K<sub>α1</sub> dan Cu-K<sub>α2</sub>.

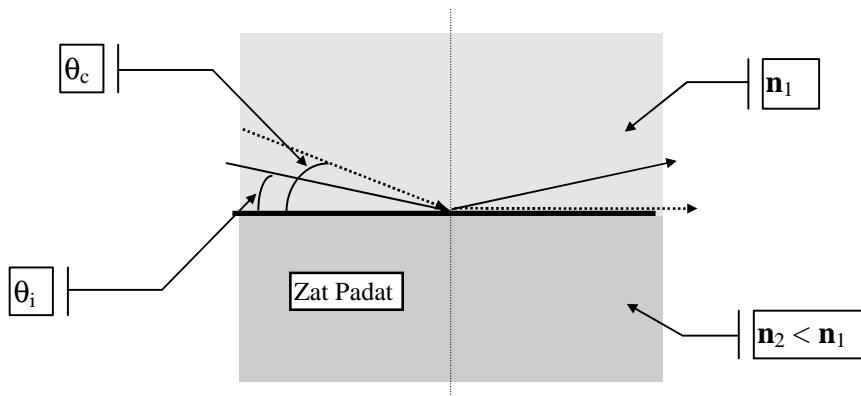
Perlu dijelaskan bahwa dalam pembuatan kurva teoritis lebar alamiah (natural width) dan lebar Darwin (Darwin width) untuk kedua garis Cu-K<sub>α1</sub> dan Cu-K<sub>α2</sub> telah diperhitungkan. Dari kurva dalam Gambar 1 di atas dapat kita lihat bahwa divergensi juga sangat mempengaruhi resolusi berkas sinar-x. Makin besar divergensi makin besar pula nilai FWHM yang berarti makin buruk resolusinya.

## 2. Landasan Teori Lensa Optik Sinar-X.

Sampai saat ini masih sangat sulit untuk mendapatkan berkas sinar-x dengan sudut divergensi yang kecil dan intensitas yang tinggi. Hal ini disamping disebabkan oleh kenyataan bahwa setiap sumber sinar-x selalu memancarkan berkas sinar-x ke segala arah (divergen), juga disebabkan oleh kenyataan bahwa *indeks bias sinar-x untuk kebanyakan zat padat adalah kurang dari satu*. Penyebab terakhir menyebabkan sinar-x sulit untuk disejajarkan, baik oleh lensa optik biasa maupun cermin.

Pada awal tahun 1990-an teknologi untuk menghasilkan berkas sinar-x sejajar yang berintensitas dan beresolusi tinggi mulai dikembangkan menyusul sebuah penemuan yang dilakukan oleh seorang muslim ahli fisika yang bernama M. Abubakir Kumakhov dari Institute for Roentgen Optic Systems (IROS), Moscow, Rusia.<sup>2</sup> Teknologi ini memanfaatkan pipa-pipa gelas kapiler yang berdiameter antara 10 μm sampai 15 μm sebagai bahan dasar. Pipa-pipa kapiler ini selanjutnya dikumpulkan menjadi satu kesatuan yang disebut Lensa Optik Sinar-X Generasi Pertama. Dalam perkembangan selanjutnya, pipa-pipa kapiler ini dijadikan polikapiler yang kemudian dijadikan Lensa Optik Sinar-X Generasi Kedua. Teknik penyatuan pipa-pipa kapiler dan polikapiler dalam kedua jenis lensa ini adalah dengan cara menyisipkan setiap kapiler/polikapiler ke dalam lubang-lubang kecil pada 4 buah jala-jala logam tipis yang berfungsi sebagai pemegang kapiler/polikapiler dan sekaligus sebagai pembentuk lensa.

Teori yang mendasari teknologi ini adalah *prinsip pemantulan total eksternal (principle of total external reflection)* sinar-x yang menyentuh suatu permukaan halus.



Gambar 2. Prinsip pemantulan total eksternal.

Hal ini terjadi karena, seperti disebutkan di atas, indeks bias sinar-x untuk kebanyakan zat padat adalah kurang dari satu, sehingga apabila sinar-x jatuh pada suatu permukaan dengan sudut datang ( $\theta_i$ ) yang lebih kecil dari pada sudut kritisnya ( $\theta_c$ ), maka seluruh berkas sinar-x tersebut akan dipantulkan secara total. Prinsip pemantulan total eksternal ini ditunjukkan pada Gambar 2.

Secara teoritis, indeks bias ( $n$ ) sinar-x untuk sebuah zat padat dapat dinyatakan oleh persamaan<sup>3</sup>:

$$n \approx 1 - \delta, \quad (2)$$

dimana  $\delta = 0.5 (\omega_p/\omega)^2$ , adalah ratio antara frekwensi plasma ( $\omega_p$ ) zat padat terhadap frekwensi sinar-x ( $\omega$ ). Sudut kritis pada saat berkas sinar-x mulai mengalami pemantulan total eksternal dinyatakan oleh persamaan<sup>4</sup> :

$$\theta_c = (2\delta)^{1/2} = (30/E) \text{ miliradian}, \quad (3)$$

dimana E = energi foton sinar-x dalam keV.

Prinsip pemantulan total eksternal tersebut memungkinkan kita untuk mengarahkan sinar-x melalui tabung gelas kapiler/polikapiler sehingga berkas keluaran sinar-x tersebut dapat disejajarkan sesuai

Gambar 3. Proses pengarahan sinar-x melalui tabung kapiler.

kebutuhan. Dalam perjalanannya melalui tabung kapiler/polikapiler, sinar-x akan mengalami beberapa aksi pemantulan, sehingga intensitas sinar-x yang keluar dari tabung tersebut akan berkurang akibat adanya absorpsi sinar-x pada setiap pemantulan. Dengan kata lain, akibat refleksi zat pemantul, yang dalam hal ini adalah gelas, yang lebih kecil dari satu. Proses pengarahan sinar-x melalui tabung kapiler ini ditunjukkan pada Gambar 3.

Jika kapiler/polikapiler itu kita lengkungkan dengan jari-jari R, seperti ditunjukkan dalam gambar 4, maka jari-jari kritis ( $R_c$ ) kelengkungan untuk sebuah kapiler dapat dihubungkan dengan sudut kritis ( $\theta_c$ ) oleh persamaan<sup>5</sup>:

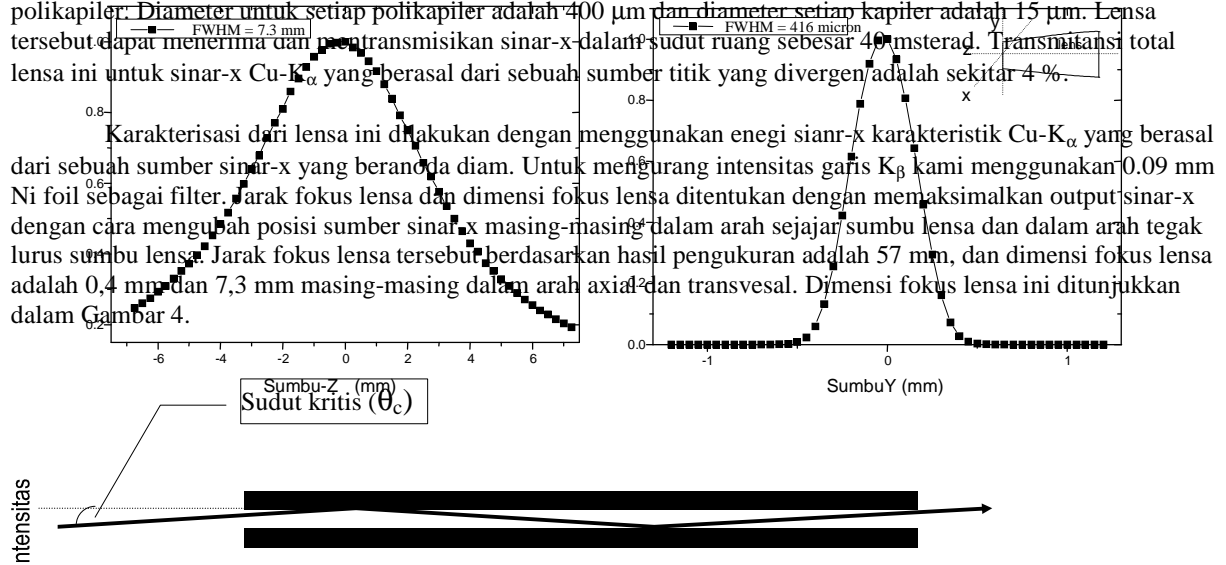
$$R_c = \frac{2d}{\theta_c^2} \quad (4)$$

dimana d adalah diameter pipa kapiler. Ini adalah jari-jari kelengkungan terkecil pada saat seluruh luas penampang kapiler dapat mentransmisikan berkas sinar-x yang datang kepadanya.

### 3. Karakteristik Lensa Optik Sinar-X

Lensa Optik Sinar-x pertama yang kami karakterisasi memiliki panjang 10 cm dan terdiri dari 919 serat polikapiler. Diameter untuk setiap polikapiler adalah 400  $\mu\text{m}$  dan diameter setiap kapiler adalah 15  $\mu\text{m}$ . Lensa tersebut dapat menerima dan mentransmisikan sinar-x dalam sudut ruang sebesar 40 mrad. Transmansi total lensa ini untuk sinar-x Cu-K $\alpha$  yang berasal dari sebuah sumber titik yang divergen adalah sekitar 4 %.

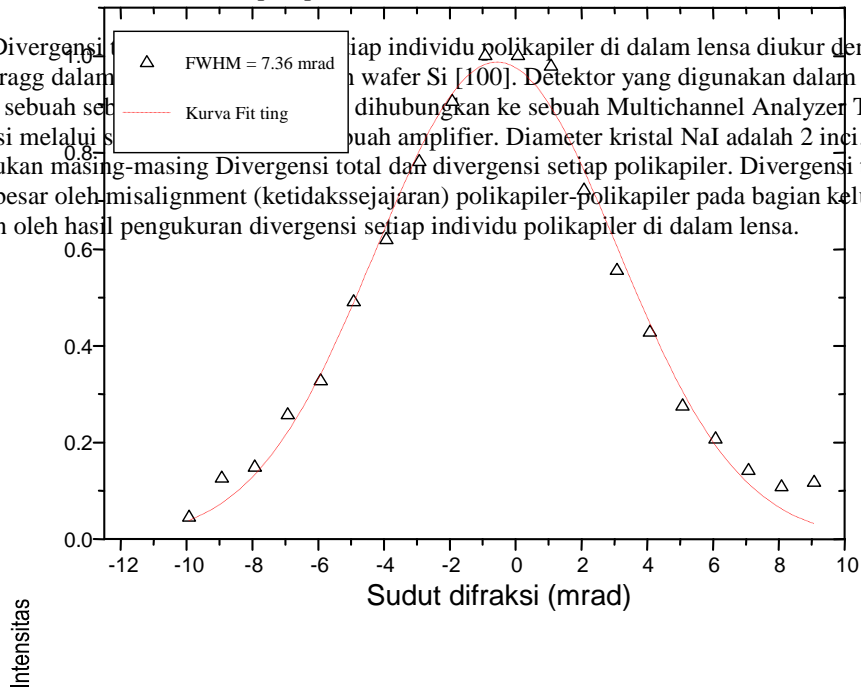
Karakterisasi dari lensa ini dilakukan dengan menggunakan energi sinar-x karakteristik Cu-K $\alpha$  yang berasal dari sebuah sumber sinar-x yang beranda diam. Untuk mengurangi intensitas garis K $\beta$  kami menggunakan 0.09 mm Ni foil sebagai filter. Jarak fokus lensa dan dimensi fokus lensa ditentukan dengan memaksimalkan output sinar-x dengan cara mengubah posisi sumber sinar-x masing-masing dalam arah sejajar sumbu lensa dan dalam arah tegak lurus sumbu lensa. Jarak fokus lensa tersebut berdasarkan hasil pengukuran adalah 57 mm, dan dimensi fokus lensa adalah 0,4 mm dan 7,3 mm masing-masing dalam arah axial dan transversal. Dimensi fokus lensa ini ditunjukkan dalam Gambar 4.



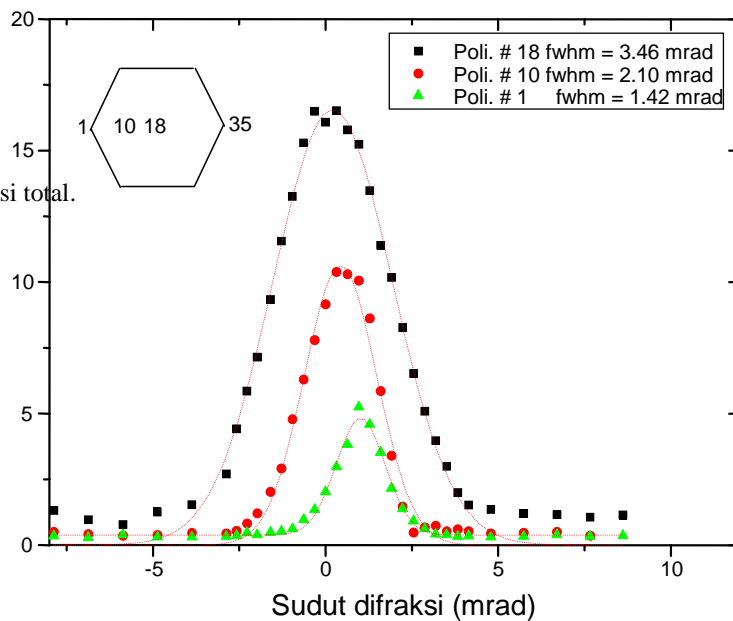
Gambar 4. Dimensi fokus Lensa Optik pertama.

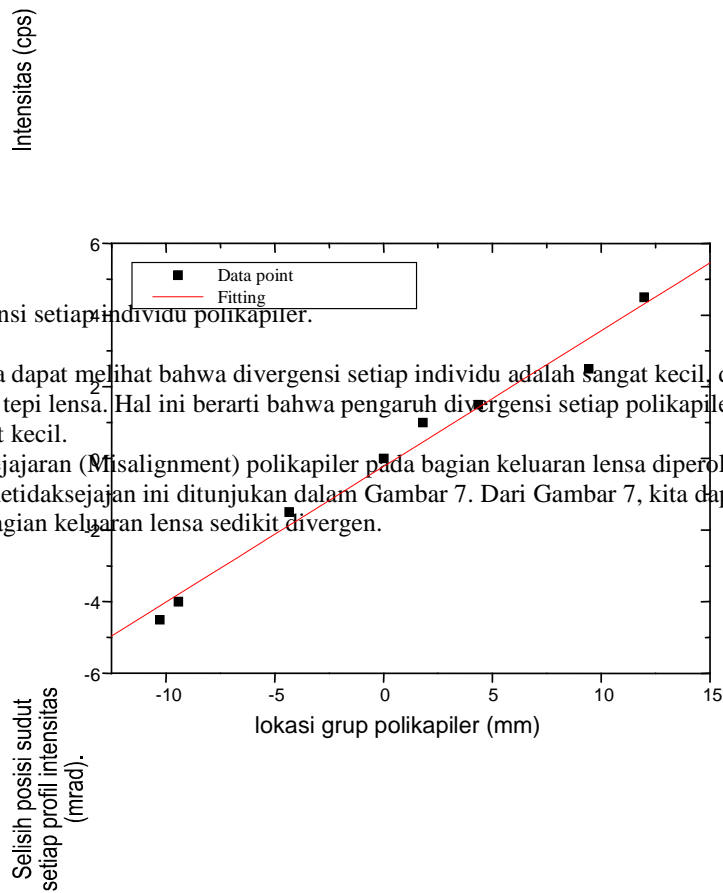
Divergensi difraksi Bragg dalam ini adalah sebuah set terkalibrasi melalui s

tiap individu polikapiler di dalam lensa diukur dengan menggunakan wafer Si [100]. Detektor yang digunakan dalam percobaan-percobaan ini adalah sebuah Multichannel Analyzer TN-1710 yang dihubungkan ke sebuah amplifier. Diameter kristal NaI adalah 2 inci. Gambar 5 dan Gambar 6 menunjukkan masing-masing Divergensi total dan divergensi setiap polikapiler. Divergensi total disebabkan sebagian besar oleh misalignment (ketidaksesjajaran) polikapiler-polikapiler pada bagian keluaran lensa. Hal ini dibuktikan oleh hasil pengukuran divergensi setiap individu polikapiler di dalam lensa.



Gambar 5. Divergensi total.





Gambar 6 Divergensi setiap individu polikapiler.

Dari Gambar 6 kita dapat melihat bahwa divergensi setiap individu adalah sangat kecil, dan divergensi ini mengecil dari pusat lensa ke tepi lensa. Hal ini berarti bahwa pengaruh divergensi setiap polikapiler terhadap divergensi total lensa adalah sangat kecil.

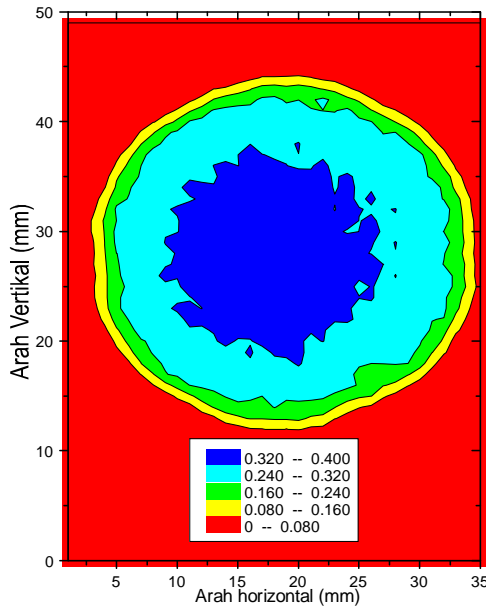
Ketidaksejajaran (Misalignment) polikapiler pada bagian keluaran lensa diperoleh dari hasil pengukuran divergensi local. Ketidaksejajaran ini ditunjukkan dalam Gambar 7. Dari Gambar 7, kita dapat melihat bahwa polikapiler pada bagian keluaran lensa sedikit divergen.

Gambar 7. Ketidaksejajaran (misalignment) polikapiler pada bagian keluaran lensa.

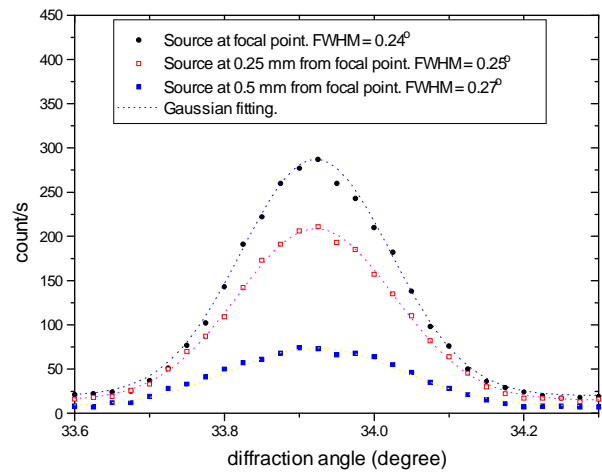
Lensa kedua yang kami teliti memiliki panjang 105 mm dengan penampang berbentuk lingkaran. Diameter pada bagian masukan dan keluaran adalah masing-masing 23 mm dan 31 mm. Lensa ini terbuat dari 1555 polikapiler dengan jumlah kapiler pada setiap polikapiler sebanyak 1141 kapiler yang berdiameter 12,5  $\mu\text{m}$ . Setiap polikapiler berbentuk heksagonal dengan jarak antara dua sudut yang berseberangan sebesar 0,59 mm dengan transmitansi 60 %. Transmitansi total lensa ini untuk sinar-x yang berenergi 8,0 keV adalah sebesar 30 %. Jarak fokus lensa ini adalah 153 mm, dan dimensi fokus lensa ini adalah masing-masing 0.71 mm dan 14.7 mm (FWHM), divergensi total output sinar-x  $\text{Cu-K}_{\alpha 1}$  untuk lensa ini adalah  $0,22^\circ = 3,8 \text{ mrad}$ .

Lensa ini dirancang untuk mensejajarkan radiasi sinar-x dari sebuah sumber sinar-x yang berbentuk garis dengan ukuran  $0,5 \times 10 \text{ mm}^2$  dengan sudut kemiringan sebesar  $6^\circ$  dalam geometry titik. Parameter disain ditentukan berdasarkan hasil simulasi komputer<sup>6</sup>. Proses karakterisasi lensa ini pada prinsipnya sama dengan proses karakterisasi untuk lensa pertama yang sudah dijelaskan di atas. Hasil karakterisasi ini ditunjukkan pada Gambar-Gambar 8, 9, 10, dan 11. Gambar 8 menunjukkan keseragaman (profil) transmitansi sinar-x untuk  $\text{Cu-K}_{\alpha}$ . Gambar ini merupakan profil yang diukur dengan cara "scanning" sebuah pinhole dalam arah dua dimensi. Gambar 9 menunjukkan divergensi total untuk berbagai posisi sumber sinar-x. Dari Gambar 9 kita dapat melihat bahwa

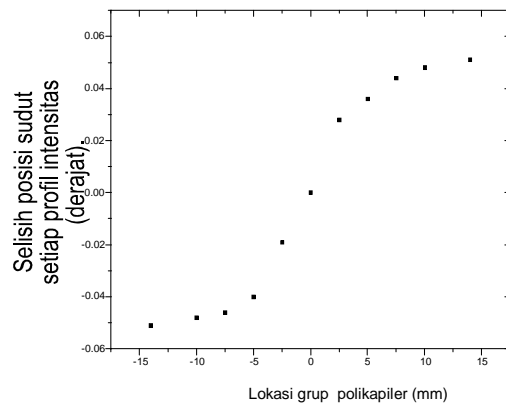
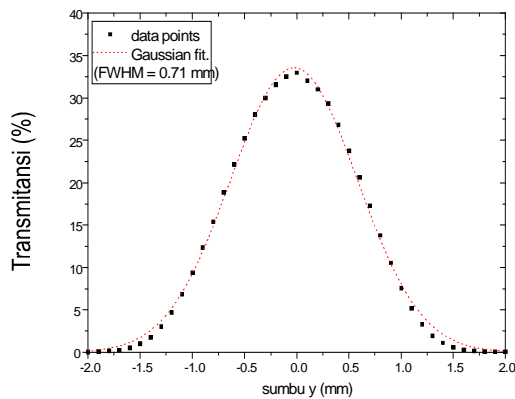
divergensi total untuk  $\text{Cu-K}_{\alpha}$  adalah  $0,24^{\circ}$ . Tetapi jika didekonvolusi untuk  $\text{Cu-K}_{\alpha 1}$  saja nilai divergensi total ini menjadi  $0,22^{\circ}$  atau  $3,8$  mrad. Gambar 10 merupakan dimensi fokus lensa dalam arah transversal. Dan terakhir Gambar 11 adalah kurva ketidaksejajaran polikapiler pada bagian keluaran lensa. Dari Gambar-Gambar tersebut kita dapat melihat bahwa kualitas lensa ini jauh lebih baik dari pada kualitas lensa pertama. Dari segi transmitansi misalnya terjadi perbaikan dari  $4\%$  menjadi  $30\%$ , dan peningkatan resolusi (penurunan divergensi total) dari  $7,3$  mrad menjadi  $3,8$  mrad. Demikian pula mengenai ketidaksejajaran (misalignment) polikapiler. Misalignment pada lensa kedua jauh lebih kecil (lebih sejajar) dari pada lensa pertama. Hal ini berarti akan meningkatkan mutu pralalelisme berkas sinar-x yang ditransmisikan lensa. Makin sejajar berkas sinar-x yang ditransmisikan makin baik mutu lensa.



Gambar 8. Keseragaman (profil) transmitansi lensa kedua.



Gambar 9. Divergensi total untuk berbagai posisi sumber sinar-x.



#### **4. Aplikasi Lensa Optik Sinar-X dan Faktor Penguatannya**

Setelah kedua lensa dikarakterisasi, langkah berikutnya adalah mengaplikasikan kedua lensa tersebut, baik secara langsung maupun tidak langsung, ke dalam beberapa percobaan fisika, seperti percobaan difraksi kristal ganda tak identik (non-identical double crystal diffraction (DCD) experiment) dan pengukuran tekanan sisa pada kristal.

Lensa pertama diaplikasikan secara tidak langsung ke dalam percobaan difraksi kristal ganda tak identik yang bertujuan untuk menentukan faktor penguatan intensitas. Faktor penguatan intensitas ini didefinisikan sebagai ratio antara intensitas keluaran lensa dengan intensitas keluaran sebuah celah difraksi

Gambar 10. Dimensi fokus lensa optik kedua.

Gambar 11. Ketidaksejajaran polikapiler pada bagian keluaran

dengan resolusi yang sama. Percobaan DCD dilakukan dengan menggunakan difraksi Bragg dari kristal Si [400] ke Si (111) dengan menggunakan berbagai ukuran celah difraksi yang dinyatakan dalam satuan derajat.

Agar unjuk kerja lensa dapat dibandingkan dengan unjuk kerja celah difraksi, terlebih dahulu kita harus menghitung transmitansi lensa untuk sumber sinar-x yang berbentuk garis yang berukuran  $0,5 \times 10 \text{ mm}^2$  dengan sudut kemiringan  $6^\circ$  serta diorientasikan pada geometri titik. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa transmitansi lensa untuk jenis sumber sinar-x tersebut adalah sebesar 1,28 %. Faktor penguatan lensa ini selanjutnya ditentukan oleh persamaan :



dimana:

Gain (w) = Faktor penguatan lensa sebagai fungsi lebar celah difraksi (w).

$\Delta\theta$  = rocking curve kristal.

T = rata-rata transmitansi lensa  $\approx 1,28 \%$

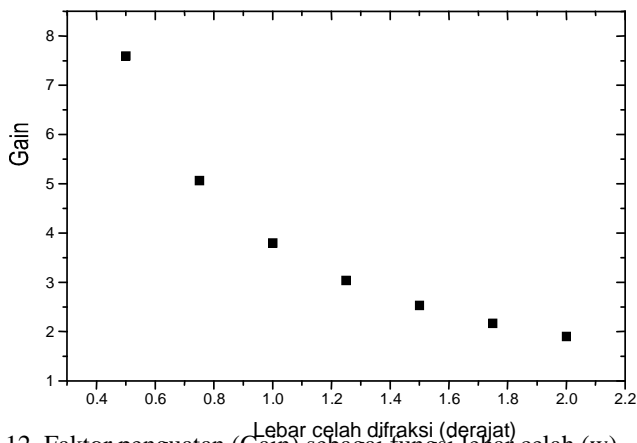
$\Omega_{\text{lens}}$  = sudut ruang total yang dibentuk bagian input lensa = 40 milliradians

w = lebar celah vertikal dalam percobaan difraksi dan dinyatakan dalam satuan mrad.

$S_{\text{total}}$  = luas divergensi lensa =  $W(\pi/2)^{1/2}$ , dimana W = FWHM yang diambil dari Gambar 5 di atas.

$S_{\Delta\theta}/S_{\text{total}}$  = bagian foton yang keluar dari lensa dan diterima oleh kristal pertama =  $\Delta\theta/[W(\pi/2)^{1/2}]$ .

Dengan menggunakan data tersebut di atas, akhirnya kita dapat menentukan faktor penguatan lensa sebagai fungsi lebar celah (kisi) difraksi. Hasilnya ditunjukkan dalam Gambar 12.



Gambar 12. Faktor penguatan (Gain) sebagai fungsi lebar celah (w).

Berikutnya adalah aplikasi secara langsung lensa kedua ke dalam percobaan penentuan tekanan sisa pada selaput tipis kristal CoPtCr yang menempel pada suatu hard disk komputer. Tujuan dari percobaan ini adalah untuk menguji unjuk kerja lensa dibandingkan dengan celah difraksi konvensional.

Dari hasil uji coba di laboratorium IBM di San Jose, California, U. S. A.

## 5. Kesimpulan



After we characterized the lens at X-Ray Optical Systems, Inc., we brought the lens to the IBM Material laboratory in San Jose, California to be installed in an experimental diffraction setup. We have examined several samples using a diffractometer equipped with the lens, and compared the results with that obtained from a para-focusing setup without a lens.

The first sample we examined was a thin film of CoPtCr in a computer storage hard disk. We scanned theta-two-theta for this sample using two diffractometers, one equipped with the lens and another one without a lens. The resolution of these setups for  $\text{CuK}\alpha_1$  was  $0.22^\circ$  and  $0.1^\circ$  respectively. The results from these scans are shown in Figure 8.

The intensity gain ( $G_i$ ) is defined as a ratio of the peak height obtained with the lens to that obtained without the lens at the same x-ray power. The actual powers were 3 kW for the diffractometer equipped with the lens and 1.5 kW for that without a lens. Accounting for the acceptance angle difference of the two setups, from Figure 8 we can directly determine the intensity gain for this specific highly textured thin film. This is given by :

$$G_i = \frac{(346-125)/(113-82)}{2} = 3.2$$

This value of the gain is a direct ratio without taking into account other factors such as the diameter of the lens output beam, the transmission efficiency of soller slits used in both setups, the capture area of

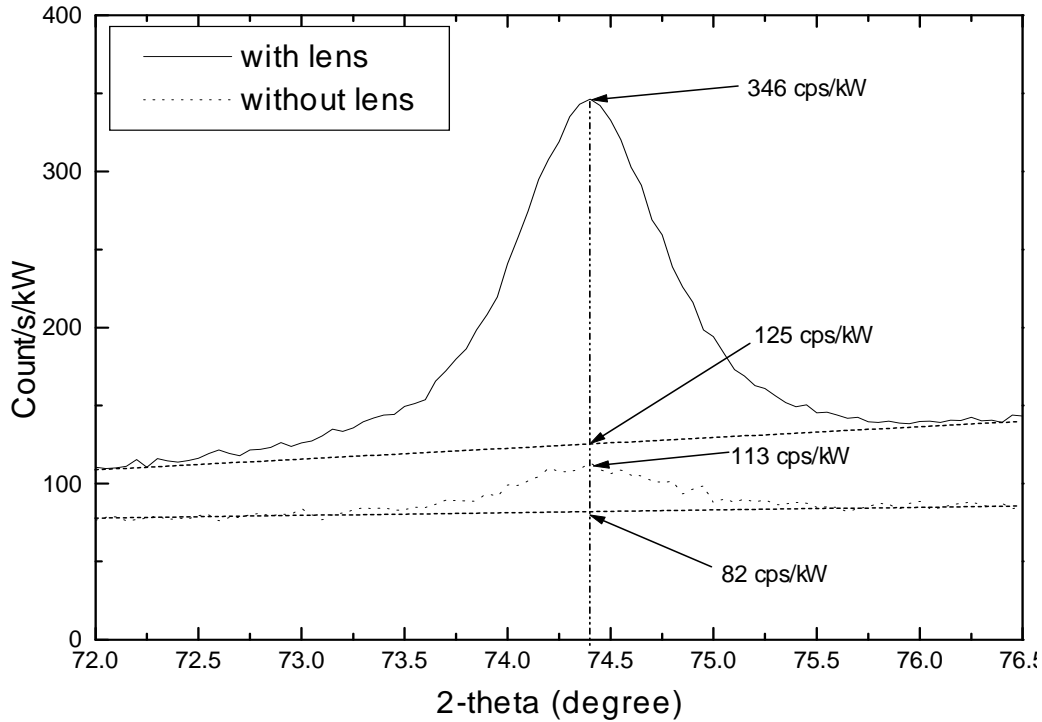
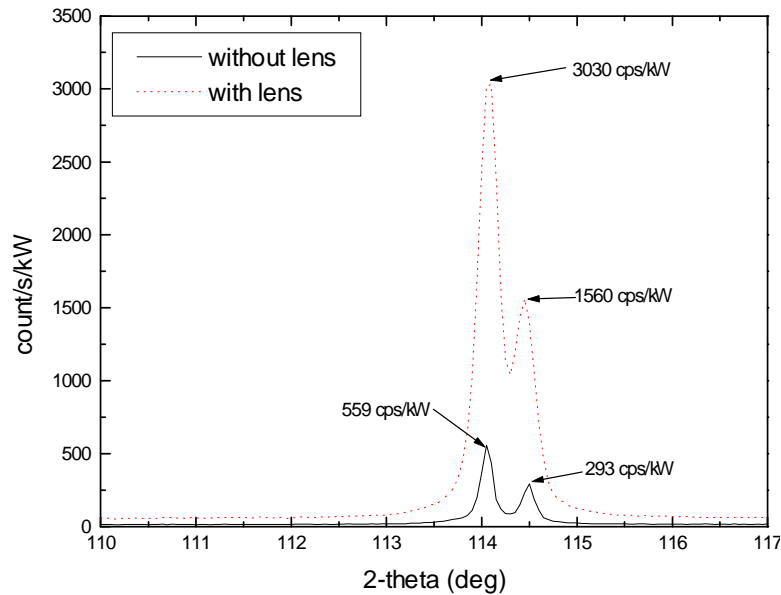


Figure 8. Peak of CoPtCr from theta-two-theta scan with and without lens, per kilowatt of x-ray source.

the analyzer (monochromator and detector), and elongation of the x-ray beam on the sample. The diameter of the lens output beam used in this experiment was 28 mm, while the total diameter of the output beam was 31 mm. The transmission efficiencies of the soller slits installed with the lens and without a lens were optically equal to 65 % and 90 % respectively.

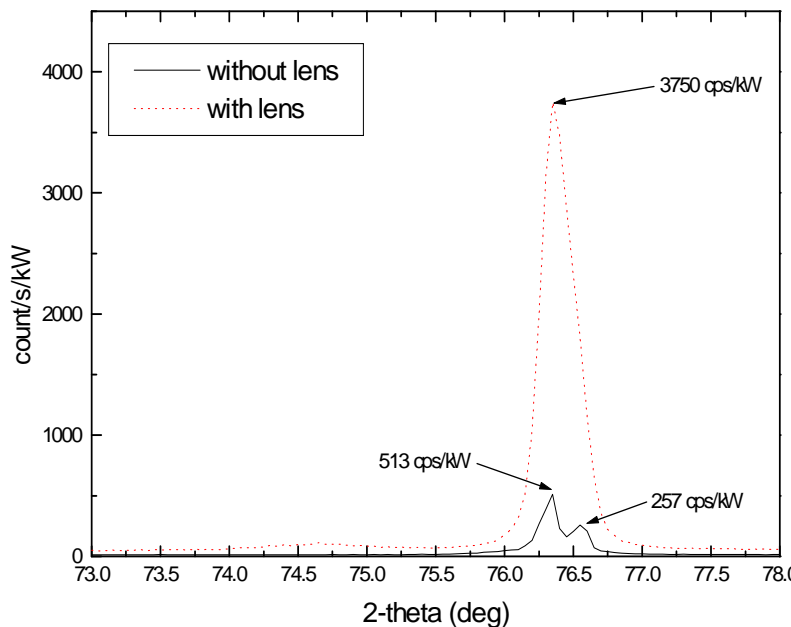


The capture area of the analyzer was determined by the width of the soller slit and the height of a defining aperture in the monochromator housing. This is equal to 20 mm x 14 mm. The elongation of the x-ray beam on the sample varied correspondingly with the two theta angle. The elongation of the beam determined the fraction of the beam captured by the soller slit. Normalization of all of these factors and

Figure 9 (a). Theta-two-theta scan for Si polycrystal, per kilowatt of x-ray source, taking the uniformity of the transmission efficiency of the

lens into account the intensity gain would be increased by a factor of 2.6, so that the total intensity gain of the lens would be 8.4.

The intensity gain above was only for highly textured thin films. The gain will decrease for polycrystal samples due to random crystallographic orientation. As an example, we have scanned theta-two-theta for a Si polycrystal and some of the peaks are shown in Figure 9 a and 9 b. For this particular polycrystalline sample, the intensity gain obtained from Figure 9a is equal to 2.5 X which is slightly



smaller than that for highly texture CoPtCr thin films. In addition to the decreasing intensity gain, the lens could not resolve closely separated peaks at lower diffraction angles. This can be seen in Figure 9b. Another limitation encountered by using the lens was that lens produced a higher background at very low diffraction angles (0°-10°). This was because the size of the lens output beam was much larger than the beam from the slit installed in the Parafocusing setup. This problem can be reduced by employing an x-y slit

Figure 9 (b). Theta-two-theta scan for Si polycrystal.

at the lens exit. Further improvement can be achieved by replacing the conventional soller slit placed between sample and the monochromator crystal with a multi-fiber based soller slits. This is possible because total divergence

(FWHM =  $0.22^\circ$ ) of the output beam in both directions would then match the critical angle ( $0.22^\circ$ ) for Cu-K $\alpha$  line. The transmission efficiency of such a polycapillary slit system should be about the same as that of the existing conventional soller slit system. However, since the beam would be collimated in both horizontal and vertical directions, the background will largely be reduced.

The geometric gain was determined by taking the ratio of counts per second (cps) of the lens output to the cps of direct beam passing through a pinhole with the same beam divergence as that produced by the lens. This was  $0.24^\circ$  for CuK $\alpha$  in all radial directions. This was found to be 74 X for a  $0.25 \times 10 \text{ mm}^2$  line source with  $6^\circ$  take off angle and 159 X for point source of  $0.300 \text{ mm}$  in diameter.

Finally, we conclude that, based on the data discussed above, the lens is applicable to structure analysis, especially for highly textured thin films and for samples whose area approximate the output area of the lens. Even higher benefit can be obtained from a multi-fiber lens when used in high resolution single crystal diffraction measurements.

## 5. Acknowledgement.

We would like to thank D. Gibson, R. Youngman, I. Klotzko, L. Severnyak, I. Hart, and C. Jezewski for their assistance. This work is supported by U. S. Department of Energy and The Advanced Technology Program through grants awarded to the X-Rays Optical Systems, Inc. , with grant no. DE-F602-91ER81220 and 70 NAN B 2H 1250 respectively. We also acknowledge the support of the Center for Advanced Thin Films and Coatings, a New York State Center for Advanced Technology supported by the New York State Science and Technology Foundation.

## 6. References

1. P. B. Hirsch and J. Kellar, Proc. Phys. Soc. (London) B64, 369 (1951).
2. D. Mosher and S. Stephanakis, Appl. Phys. Lett., 29, 105, (1976).
3. R. V. Pound and G. A. Rebka, Phys. Rev. Lett., 3, 439 (1959).
4. J. Marton, Appl. Phys. Lett., 9, 194 (1966).
5. P. S. Chung and R. Pantell, Electron Lett., 13, 527 (1977).
6. E. A. Stern, Z. Kalman, A. Lewis, and K. Lieberman, Appl. Opt., 27, 5135 (1988).
7. D. A. Carpenter and M. A. Taylor, Adv. in X-Ray Anal. vol. 34, 217, (1991).
8. V. A. Arkadiev, A. I. Kolomitsev, M. A. Kumakhov, V. V. Lubazov, Yu. P. Chertov, and I. M. Shakhparonov, Poverkhnost, 2, 44 (1987).
9. M. A. Kumakhov and F. F. Komarov, Phys. Rep. 191, 290 (1990).
10. V. E. Kovantsev, J. Pant, V. Pantojas, N. Nazaryan, T. M. Hayes, and P. D. Persans, Appl. Phys. Lett. 62, 2905 (1993).
11. V. M. Pantojas, V. E. Kovantsev, J. Pant, S. A. Budkov, T. M. Hayes, and P. D. Persans, Nuclear Instru. Method A 333, 607 (1993).
12. Kardiawarman, V. Kovantsev, S. Budkov, W. M. Gibson, T. M. Hayes, L. Lurio, C. A. MacDonald, P. Persans, Q. F. Xiao, SPIE Proc., 2278, 238, (1994).
13. W. M. Gibson, and C. A. MacDonald, SPIE Proc, 2278, 156, (1994).
14. Q. F. Xiao, I. Yu. Ponomarev, A. I. Kolomitsev, and J. C. Kimbal, SPIE Proc., 1736, 227 (1992).