

高能X光共振腔的實現

X光共振腔的概念早在三十餘年前已被提出。在文獻中有許多針對晶體共振腔的理論研究。而實驗上，亦有許多想法希望實現X光共振腔。隨著同步輻射的出現，高解析度的實驗技術越趨成熟，在具備實驗條件的情況下，觀察X光共振腔干涉條紋的可能性越來越大。在本篇文章裡，我們報導首次觀測到X光共振腔之共振現象及干涉條紋的實驗。

前言

可見光之光學共振干涉〔或稱法布里-派洛Fabry-Perot共振腔〕早在1950年代即被發明，而較可見光波長小約五千倍之高能X光〔hard X-rays〕，其共振腔之構想也有人在1960年代提出^[1,2]。自1960年代至今，先後已有許多的理論與實驗研究冀求使X光在晶體製成的腔體內形成共振，也就是作成X光共振腔，然而均未能成功^[3-8]。

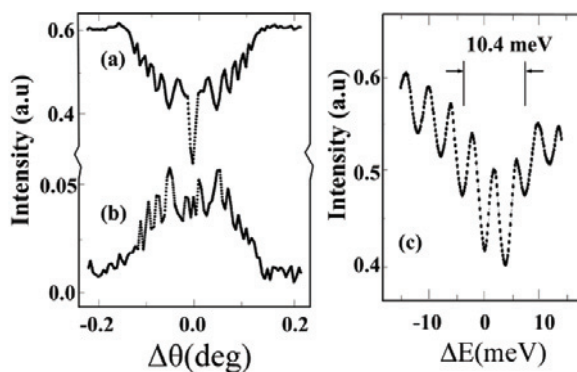
X光法布里-派洛共振腔是利用兩片晶體作為反射鏡，入射X光束在兩片晶體間來回反射提供相干光束，因而產生干涉條紋。反射的發生來自某一組原子面之背向反射。雖然有許多理論研究證明X光共振腔是可行的，但實際上要觀察到干涉條紋卻是相當的困難^[7,8]，此一困難來自於難以達成時間同調的實驗條件。在我們的實驗中，我們考慮了有效晶格間距(effective crystal gap)與入射光之時間相干性和空間相干性的關聯，成功的量測到共振干涉的效應^[9]。

X光共振腔製作與繞射實驗

為滿足X光共振干涉所需具備的同調性，我們利用微電子蝕刻技術在4英寸矽晶片上做出許多樣式的共振腔，從兩片到八片不等，厚度在25 ~ 150 μm 之間；片狀晶體的間距在40 ~ 150 μm 之間；寬度為800 μm ；高度為200 μm 。從儲存環出來的光源經過矽雙晶單色光器與四片晶體組成的超高解析度單色光器，使入射光能量解析度在能量為14.4388 keV時達到 $\Delta E/E = 2.5 \times 10^{-8}$ ；也就是 $\Delta E = 0.36 \text{ meV}$ ^[10]，亦使得入射光縱向同調長度大於共振腔間距。如此一來，即滿足實驗所需的縱向相干性條件。而橫向相干性也由於X光垂直入射的關係被保留下來^[9]。

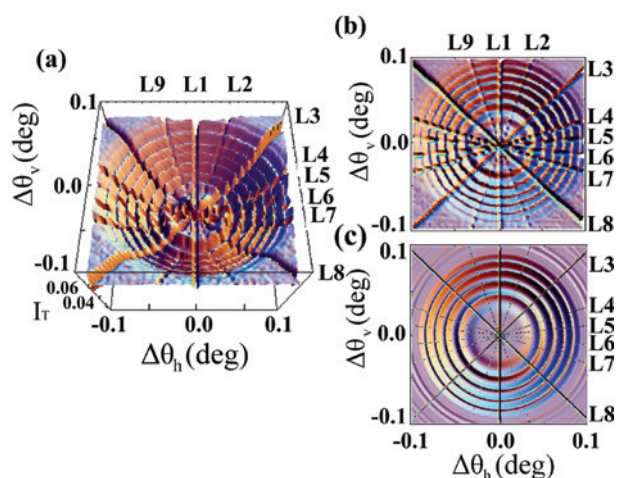
實驗是在日本Spring-8同步輻射中心台灣光束線BL12XU上進行，儲存環運轉的能量為8 GeV；電流為100 mA。入射光先打到共振腔的其中一片，將此片位置定在八環繞射儀的環心。藉著調整四片晶體單色光器的角度來執行能量掃描，其最小的刻度為0.005弧秒，換算成能量則為58.548 μeV 。晶體的角度掃描則是藉著轉動八環繞射儀的 $\Delta\theta_v$ 與 $\Delta\theta_h$ 來完成(分別是垂直方向與水平方向)，其最小的調整角度為0.0005°。選擇矽晶體(12 4 0)的反射面產生背向繞射光。利用PIN型二極體偵測器來量測(0 0 0)直射光方向穿透光的強度變化；離子游離偵測器用來偵測(12 4 0)背向繞射光的強度變化。由於高能量的X光與矽晶體的對稱性，所以產生背向繞射光時也會有其他繞射光同時滿足繞射條件，在此實驗能量下會產生24光複繞射^[9]。此意味著在精確能量(精確能量 = 14.4388 KeV)下，艾華德球面〔Ewald sphere〕上會同時存在24個倒晶格點。將能量調整至遠離精確能量約9 meV處，入射光打在兩片晶體的共振腔上(每

片的厚度為70 μm ；間距為100 μm)，實驗結果顯示在圖一：(a)為垂直方向角度掃描時，(0 0 0)穿透強度的變化；(b)則為(12 4 0)背向繞射光強度變化。(c)是對此組共振腔作能量掃描的結果。



圖一：(a)穿透光的角度掃描；(b)背向反射光的角度掃描；(c)能量掃描。

根據動力繞射理論，當光子能量非常接近精確能量時，(0 0 0)穿透光的角度掃描會顯示出一段強度下降的區域，此圖像可在圖一(a)中看見，強度下降的原因是共振腔內發生全反射，而強度最低陷的地方則顯示了24光繞射的結果。從此三個圖中，我們清楚看到，不管是能量掃描或角度掃描，都可觀察到清楚的干涉條紋。從圖一(c)的能量掃描圖裡可大約估計出峰與峰的能量間隔約3.65 meV，此即所謂的自由光譜範圍(E_d)，與理論計算的結果： $E_d = hc/2d = 3.6 \text{ meV}$ ，相差不遠(上述的 $d = d_g + t$ 為有效共振腔距離， d_g 代表晶片間距； t 代表每片晶體的厚度)。若從動力繞射理論出發，同樣可預測出相同的結果：X光打在共振腔時，會在腔體內來回反射，經過兩次反射的光與未經反射的光在同一個方向互相干涉。考慮X光之電場形式，則此二電場相差的距離為 $2(d_g + t n_x) \sim 2d n_x \sim 2d$ 即為X光的光程差(n_x 是X光的折射率 $\rightarrow n_x = 1 - \delta$, $\delta = 2.3 \times 10^{-6}$)，當電場滿足 $2d$ 的光程差時，彼此的相位差是 2π ，此時兩電場互相建設性地干涉。故理論亦與圖一(c)的結果相符。但是在實驗上，由能量峰半寬($\Gamma = 1.6 \text{ meV}$)所得到的精微值(Finesse) $\rightarrow F = E_d/\Gamma = 2.3$ 卻與理論精微值不合(F 理論值 = 4.0)，這可能是由於共振腔的晶體表面粗糙度與傾斜度的影響，還有處理晶體時造成的晶格扭曲與熱膨脹均會導致精微值變小。



圖二：共振條紋的強度分佈圖：(a)3-D圖；(b)二維等高線圖；(c)理論計算的二維等高線圖。

圖二(a)(b)(c)三圖皆為能量遠離精確能量12 meV時，兩片晶體共振腔的強度分佈圖。(a)是水平-垂直角度與(0 0 0)穿透光的強度分佈，可清楚看出干涉強度的分佈；(b)是(a)的等高線圖，干涉效應所造成的最大、最小值顯示在同心圓上，而筆直的九條線則是24光共面複繞射所造成的結果；(c)是理論計算的結果，與(b)相似。在不同的光子能量下，會有不一樣的背向繞射面與不同的複繞射面。原則上，複繞射的存在對干涉條紋的觀察不會造成太大的問題。即使角度些微的偏移複繞射發生的位置，仍然可以觀察到干涉現象。共振腔的穿透光與反射光彼此有良好的相位關係，使它有較好的精確值，利用此特點可將共振腔應用在相位對比光學、高解析度的X光光學上，例如用背向反射的原理做出更高解析度的單色光器或者用穿透光的特性

做出窄頻濾波器。這些應用可改良高解析度散射實驗、光譜學或相位對比顯微術的相關技術，使物理、化學、生物方面的研究有更精進的發展。另外，若將能量掃描的強度分佈圖做傅利葉轉換，可發現從共振腔穿透出的光也有相當好的時間結構，此一特性可促進固態、液態，生物分子動力學等方面的研究。更進一步地，若使共振腔的品質變好，例如：提高反射率、降低晶格扭曲程度等，只要發現適當的增益介質，那麼對於發展高能X光或 γ 光雷射的可能性就越來越大了。

參考文獻：

- [1] W. L. Bond, M.A. Duguay, and P. M. Rentzepis, Appl. Phys. Lett. **10**, 216 (1967).
- [2] R. D. Deslattes, Appl. Phys. Lett. **12**, 133 (1968).
- [3] A. Steyerl and K.-A. Steinhauser, Z. Physik. B **34**, 221 (1979).
- [4] A. Caticha and S. Caticha-Ellis, Phys. Status Solidi A **119**, 643 (1990).
- [5] S. Kikuta, *et al.*, J. of Synchrotron. Rad. **5**, 670 (1998).
- [6] V. G. Kohn, Yu. V. Shvyd'ko, and E. Gerdau, Phys. Status Solidi B **221**, 597 (2000).
- [7] K. D. Liss, *et al.*, Nature **404**, 371 (2000).
- [8] M. Yabashi, K. Tamasaku, S. Kikuta, and T. Ishikawa, Rev. Sci. Instrum. **72**, 4080 (2001).
- [9] Yu. V. Shvyd'ko, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **90**, 013904 (2003).
- [10] S.-L. Chang, Yu. P. Stetsko, M.-T. Tang, Y.-R. Lee, W.-H. Sun, M. Yabashi, and T. Ishikawa, Phys. Rev. Lett. **94**, 174801 (2005).

中心主辦、協辦之會議

- ◆ 2006年3月29~31日：本中心協辦ISMNT-2 (The 2nd International Symposium on Micro & Nano Technology)。
www.memns.nthu.edu.tw/ismnt-2/
- ◆ 2006年5月24~26日：日本SPRING-8舉行第四屆MEDSI'06 (Mechanical Engineering Design for Synchrotron Radiation Instrumentation and Equipments)，本會議亦為SRI之satellite meeting之一。
medsi2006.spring8.or.jp
- ◆ 2006年6月5~6日：本中心主辦AST2006 (Applications of Superconducting Technology in Synchrotron Light Sources)。
web11.nsrrc.org.tw/ast2006/
- ◆ 2006年7月16~20日：本中心主辦第九屆國際表面X光及中子散射研討會9SXNS (The Ninth International Conference on Surface X-ray and Neutron Scattering)。
web11.nsrrc.org.tw/9sxns/
- ◆ 2006年5月24~26日：本中心協辦第十一屆生物物理新知研討會 (The 11th Symposium on Recent Advances in Biophysics)。
www.sinica.edu.tw/~biophys/11TH/

近期國際會議 CONFERENCES

- ◆ 2006年5月28日~6月2日：韓國SRI2006 (The Ninth International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation)。
www.sri2006.org
- ◆ 2006年7月30日~8月2日：美國芝加哥Fifth International Conference on Synchrotron Radiation in Material Science。
www.aps.anl.gov/News/Conferences