การปรับปรุงความสม่ำเสมอของสนามแม่เหล็กสำหรับแม่เหล็กแกนเหล็ก

(Magnetic Field Homogeneity Improvement for Iron Core Magnet)

จันทร์เพ็ญ โทมัส และ Ian Thomas
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ขอนแก่น 40002

งานประชุมวิชาการประจำปี สวทช. 2548
“วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทยสู่เศรษฐกิจยุคโมเลกุล”
27-30 มีนาคม 2548

ความต้องการ

ความสม่ำเสมอของสนามแม่เหล็กที่คลุมตัวอย่างขนาด 8 cm สำหรับการถ่ายภาพ MRI (magnetic resonance imaging) ต้องประมาณ 10 ppm หรือดีกว่า

ปัญหา

เงื่อนไขนี้แม่เหล็กต้องมีระยะห่างระหว่างขั้ว (d) อย่างน้อย 32 cm และเส้นผ่านศูนย์กลางขั้ว (a) อย่างน้อย 96 cm ซึ่งใหญ่เกินไปสำหรับการสร้างเอง

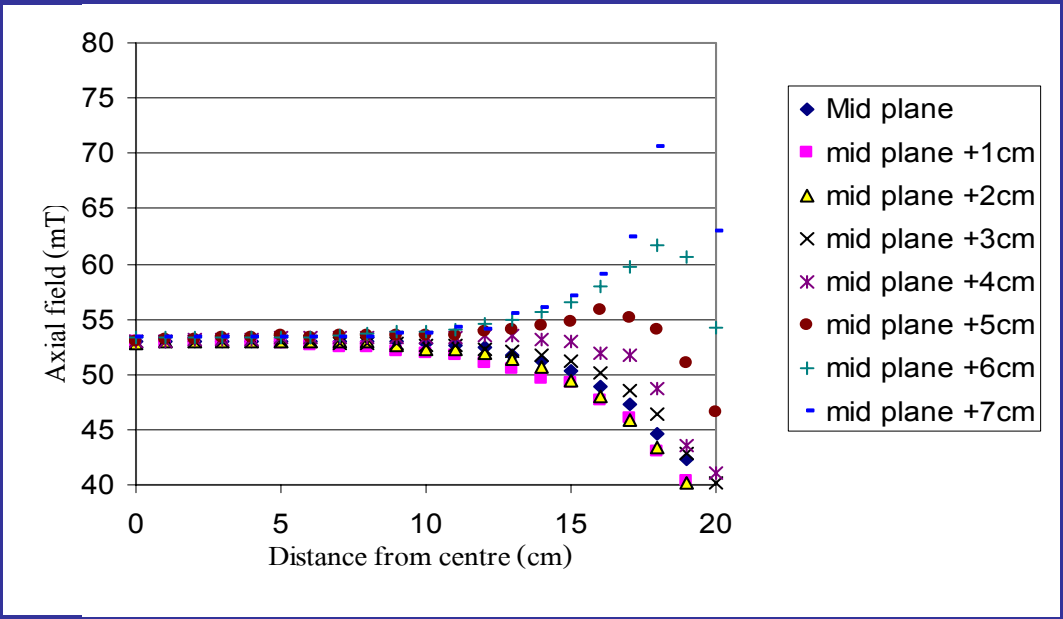
แม่เหล็กที่สร้างมี $d = 15.4$ cm และ $a = 40$ cm

ผลการวัดสนามแม่เหล็กด้วย Hall probe (±0.1mT)

เส้นผ่านศูนย์กลาง ขั้ว (*a*) 40 cm

ระยะห่างระหว่างขั้ว (*d*) 15.4 cm

สนามแม่เหล็กในแนวแกนวัดที่กระแส 10A



สนามสม่ำเสมอระดับ 19,000 ppm ในรัศมี 8 cm จากแกนและ~ 3.5 cm จากระนาบกึ่งกลางระหว่างขั้ว

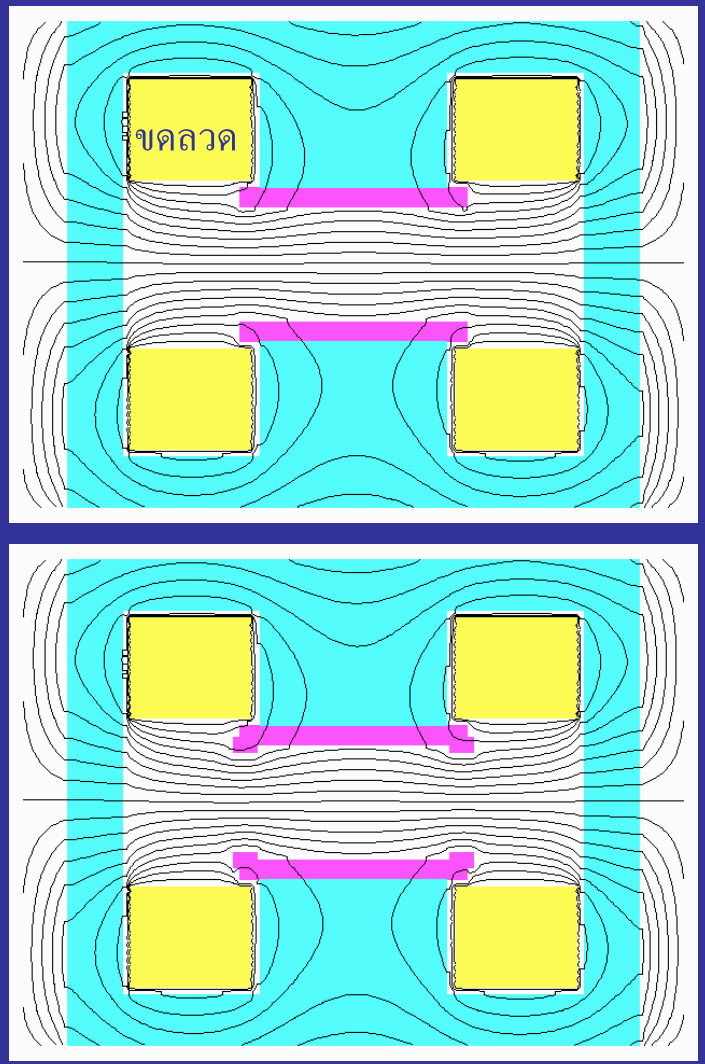
แนวคิด - ปัญหา

- เส้นฟลักซ์สนามแม่เหล็กจากขั้วหนึ่งไปอีกขั้วหนึ่งโป่งออกตรงกลางระหว่างขั้วแม่เหล็ก - สนามไม่สม่ำเสมอแม้ยังไม่มีตัวอย่าง
- สารพาราแมกเนติกและสารไดอาแมกเนติกทำให้เส้นฟลักซ์แม่เหล็กบิดเบี้ยวได้ - ความสม่ำเสมอของสนามจึงขึ้นกับตัวอย่างที่อยู่ในสนาม

แนวคิด - การแก้ไข

- ทำให้ขั้วแม่เหล็กมีลักษณะคล้ายกับเว้าเล็กน้อย โดยใช้ passive shims ทำจากเหล็กอ่อน - เป็นการปรับครั้งเดียว
- ใช้ขดลวด active shims - ปรับค่าสนามแม่เหล็กของขดลวดทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนตัวอย่าง
- รูปร่าง ขนาดและตำแหน่ง ของ shims ต้องออกแบบเฉพาะแม่เหล็ก

การออกแบบ passive shims



มีวงแหวน passive shims ที่ขอบขั้ว

คำนวณเส้นสมศักย์ก่อนและหลังมีวงแหวน passive shims ใช้ Finite difference & สมการ

$$\mathbf{H} = -\nabla \Phi_M, \nabla^2 \Phi_M = 0$$

H - สนามความเข้มแม่เหล็ก

Φ_M - ศักย์แม่เหล็กแบบสเกลาร์

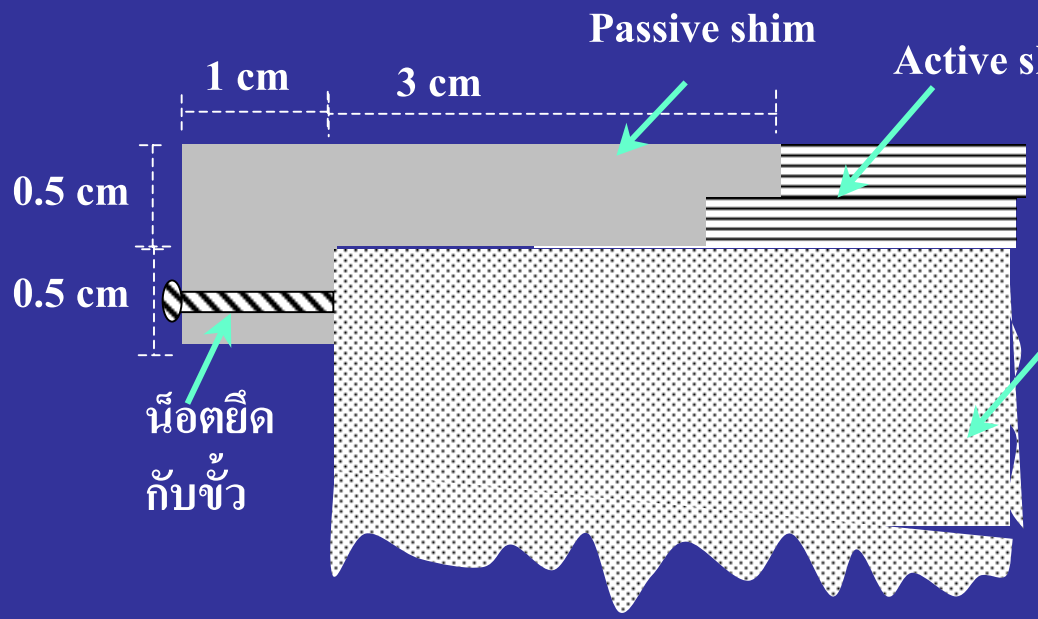
เงื่อนไขระหว่างอากาศกับเหล็กแนวตั้งฉากกับผิว

$$H_{n,air} = (\mu_{iron}/\mu_{air}) H_{n,iron}$$

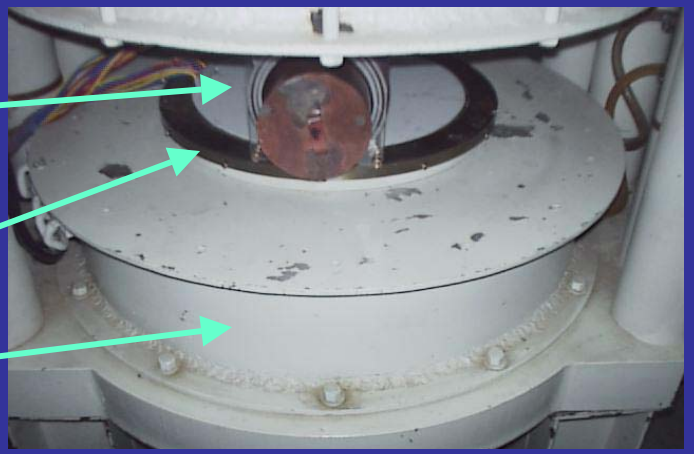
ใช้ $(\mu_{iron}/\mu_{air}) = 9$ (~ 9-12 วัดที่ ~200 mT)

วงแหวนหนา 0.5 cm กว้าง 4 cm (รัศมีภายใน 17 cm ภายนอก 21 cm)

วงแหวน passive shims ที่สร้างและการติดตั้ง

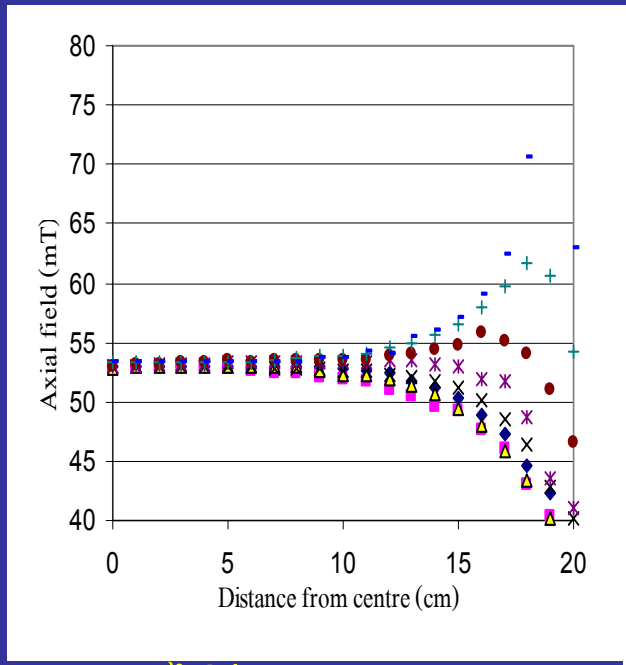


ภาคตัดขวางของวงแหวน passive shim เผื่อเนื้อที่ใส่ active shims

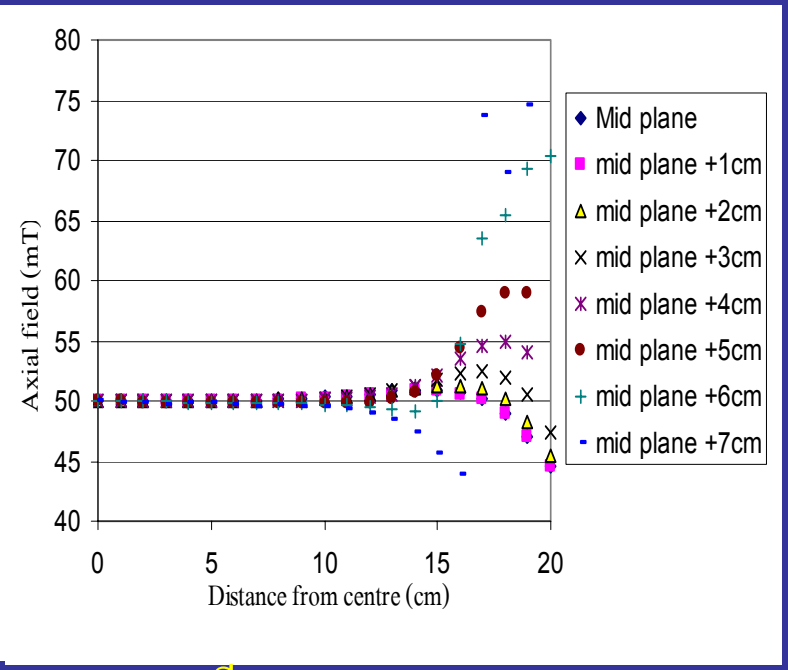


วงแหวน passive shim ชุดขดลวด active shims ติดอยู่บนหน้าขั้วแม่เหล็ก

ผลการวัดสนามแม่เหล็กก่อนและหลังใส่ passive shims



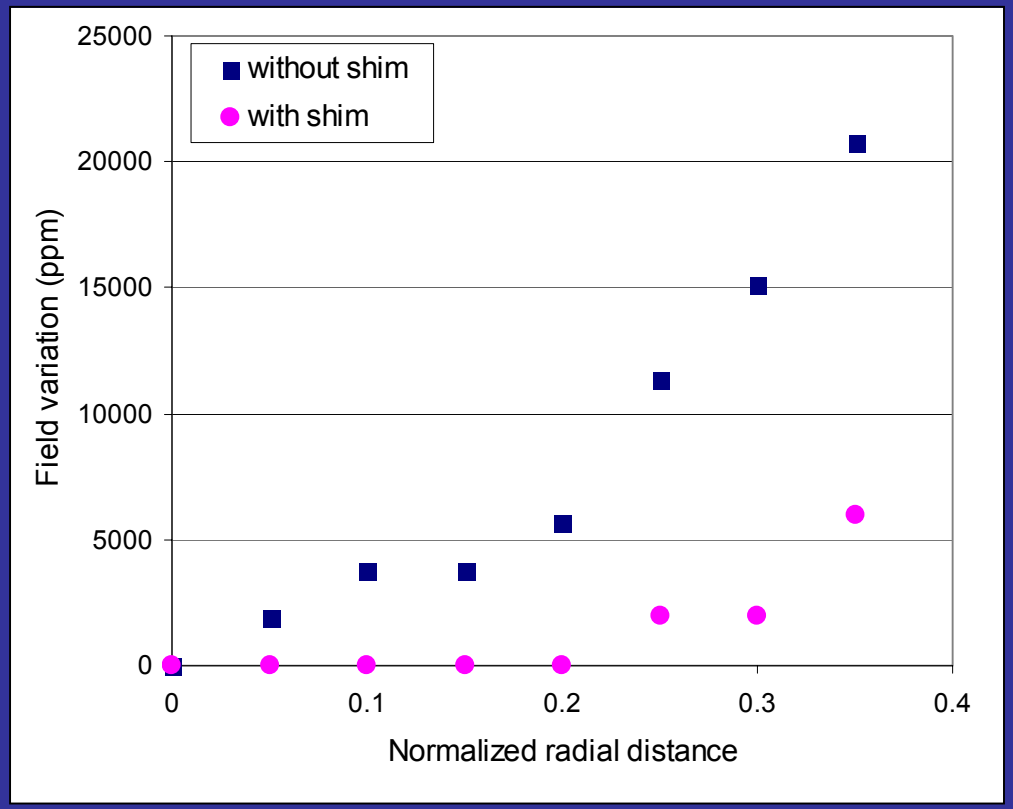
ไม่มี passive shims



มี passive shims

Passive shims เพิ่มบริเวณสนามสม่ำเสมอระดับ 19,000 ppm เป็นในรัศมี 14 cm จากแกนและ ~ 5 cm จากระนาบกึ่งกลางระหว่างขั้ว

ความสม่ำเสมอของสนามแม่เหล็กในทรงกลมรัศมี 5 cm จากศูนย์กลาง ก่อนและหลังใส่ passive shims



คำนวณจาก

10^6 ด $(B_{zmax} - B_{zmin})/B_{zcentre}$ ppm

การเปลี่ยนแปลงของสนามภายในทรงกลมรัศมี 1/4 ของขั้วหรือ 5 cm ลดจาก 12,000 ppm ก่อน shims เป็น 2,000 ppm หลังใส่ passive shims

- ยังไม่ดีพอ -> active shims

การออกแบบขดลวด active shims

ใช้หลักการของ Anderson (1961) ออกแบบขดลวดให้สนามแม่เหล็กที่จะลดผลของเทอมต่างๆ ในการกระจายสนาม B_z (ผลของสนามในแนวอื่นน้อยไม่คิด)

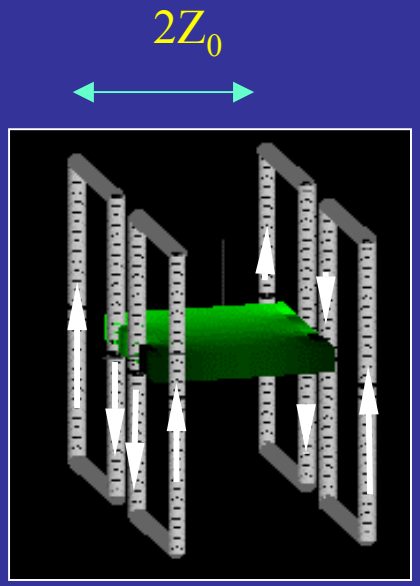
$$B_z = A_1^0 + 2A_2^0 z + 3A_2^1 x + 3B_2^1 y + \frac{3}{2} A_3^0 (2z^2 - x^2 - y^2)$$
$$+ 12A_3^1 zx + 12B_3^1 zy + 15A_3^2 (x^2 - y^2) + 15B_3^2 (2xy) + \ldots$$

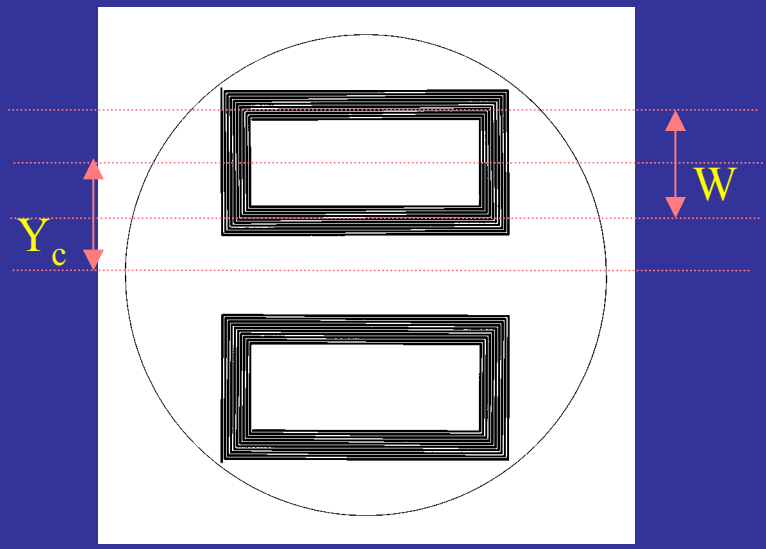
ในที่นี้ออกแบบและสร้างขดลวดเพียง 6 ชุด ที่ให้สนามแปรแบบ

$$B_z \propto x, B_z \propto y, B_z \propto z, B_z \propto xy,$$
$$B_z \propto (x^2 - y^2), B_z \propto (2z^2 - x^2 - y^2)$$

รูปร่างและการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กจากขดลวด

ขดลวด *X*-shims และ *Y*-shims





$B_z \propto x, y$

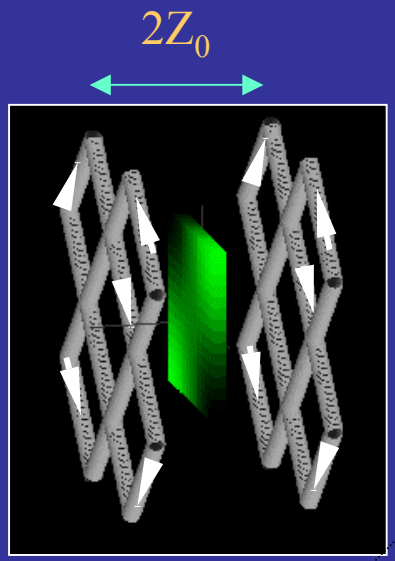
ขดลวด *Y* shim

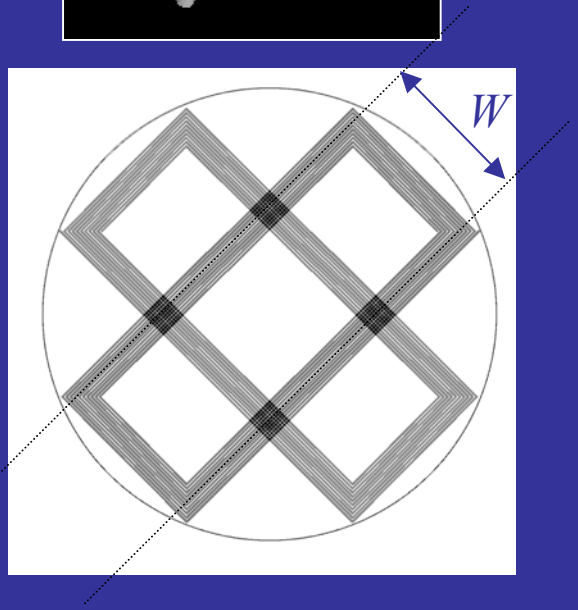
ขึ้นกับด้านยาวขดลวด
ตั้งฉากกับ x หรือ y

ใช้ $W/Z_0 = 1.55$ และ
X_c หรือ $Y_c = 1.19Z_0$

รูปร่างและการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กจากขดลวด

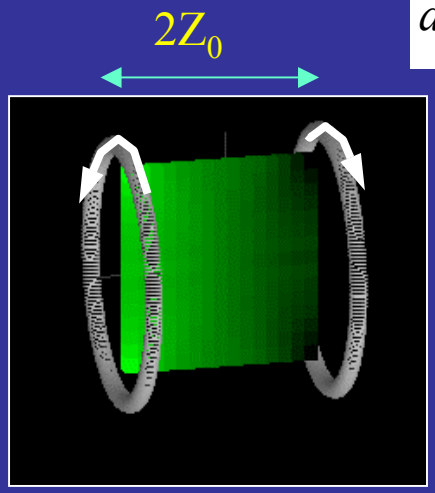
ขดลวด *XY*-shims $W = 1.452Z_0$

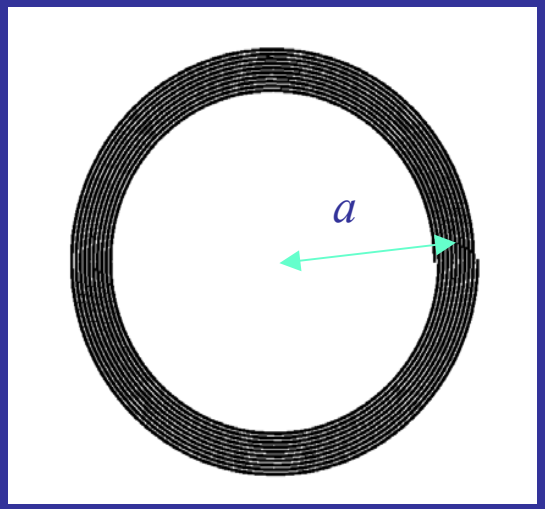




ขดลวด *Z*-shims

$$a = (2/\sqrt{3})Z_0$$





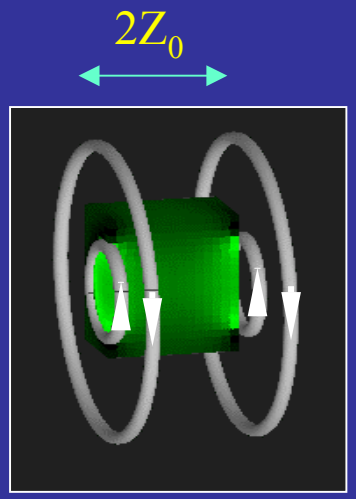
รูปร่างและการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กจากขดลวด

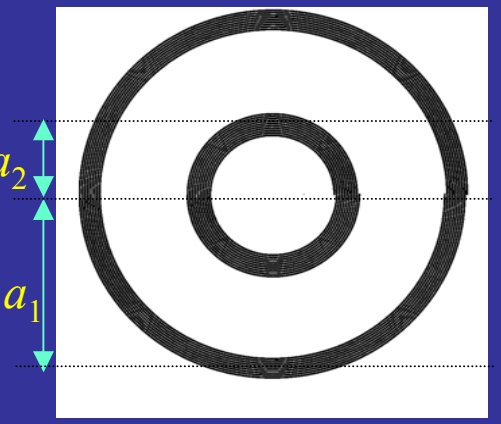
ชุดขดลวด

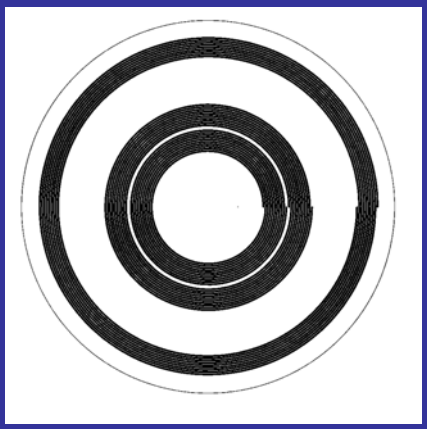
$2Z^2$-X^2-Y^2shim

วงใน:นอก= 9:10 รอบ

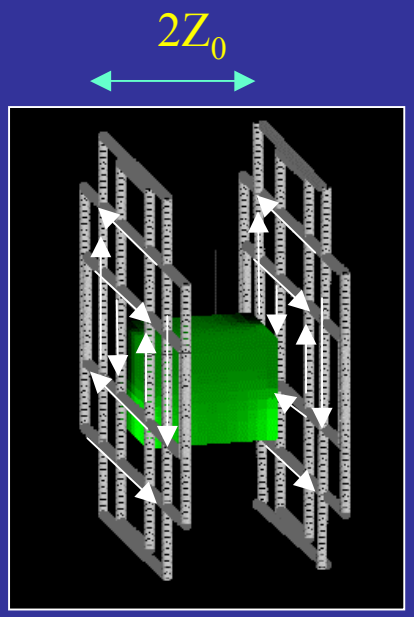
$a_1 = 0.83Z_0$, $a_2 = 2Z_0$

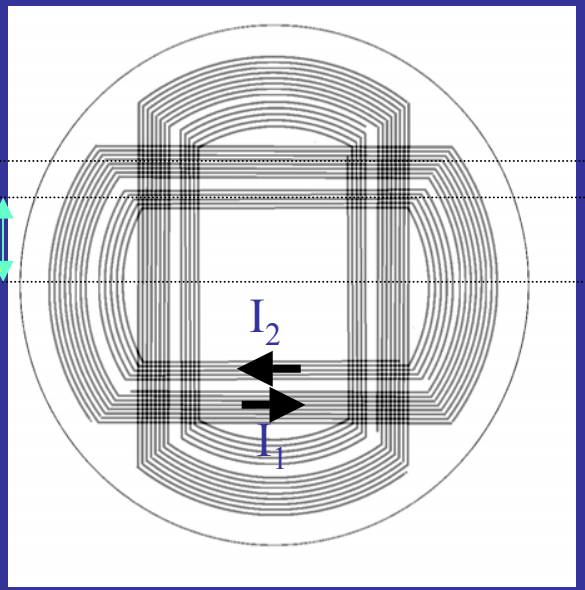






มี Z shim อยู่ด้วยกัน



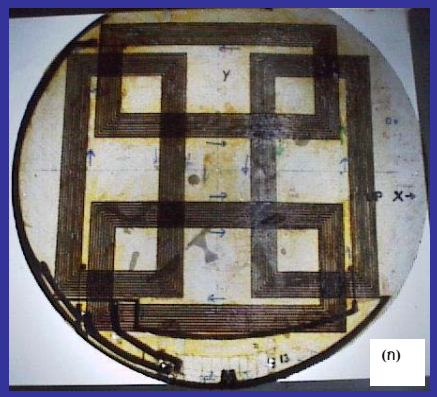


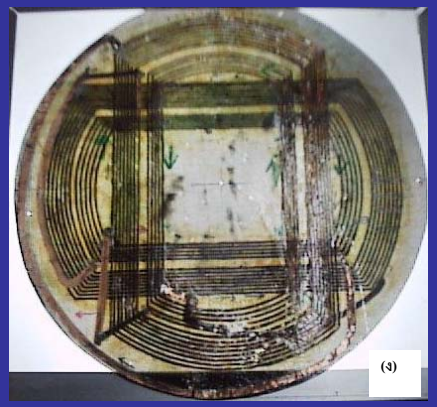
ชุดขดลวด X^2-Y^2 Shim

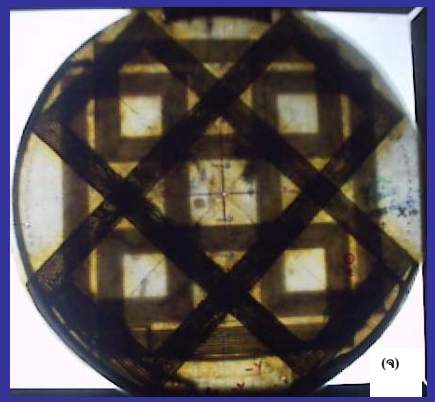
I_1:I_2 = 8:5

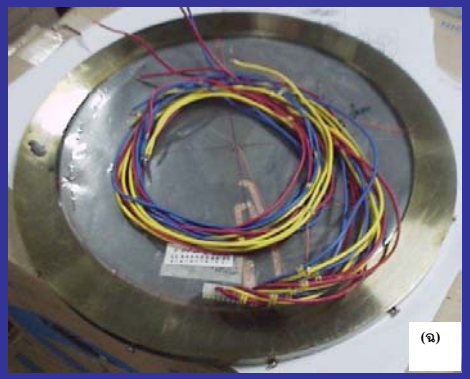
$Y_1 = 1.5Z_0$ และ $Y_2 = 0.67Z_0$

ขดลวด shims ที่สร้างขึ้น ต่อขั้วและประกอบ









ขดลวด active shims

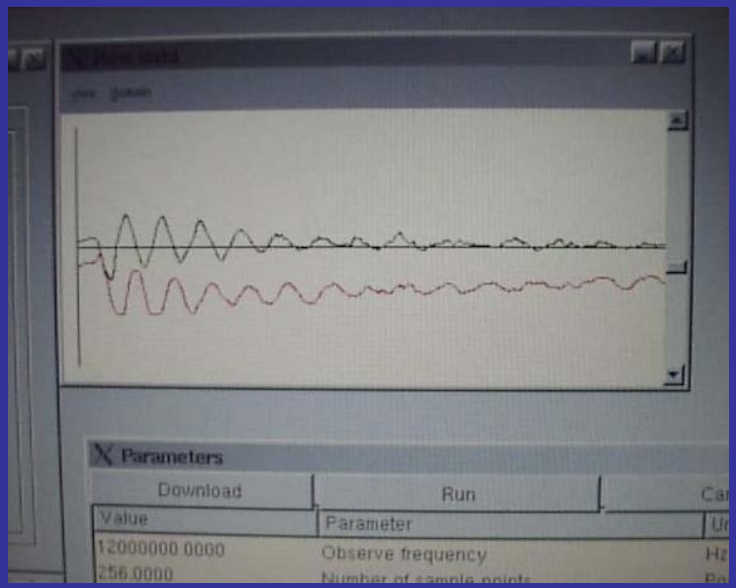
และสายไฟเข้า

วงแหวน passive shim

ขดลวดแม่เหล็ก

การทดสอบเบื้องต้น

- ได้สร้าง current regulated power supply สำหรับขดลวดแต่ละชุด จ่ายกระแสได้ $\pm$ 2.9A สำหรับตัวต้านทาน 2.5 โอห์ม
- ขดลวด shims ~ 0.7 โอห์มต่อขด
- active shims และ passive shims ช่วยให้สามารถสังเกตสัญญาณ NMR จากตัวอย่างขนาด ~ 6 cm ได้ โดยสัญญาณสลายตัวช้าลง



- จะวัดอย่างละเอียดเมื่อระบบ cooling ของแม่เหล็กเสร็จ

ขอบคุณ

- ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์คอมพิวเตอร์แห่งชาติ (เนคเทค)
- ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
- คุณอนัน พิลาวุฒิ