

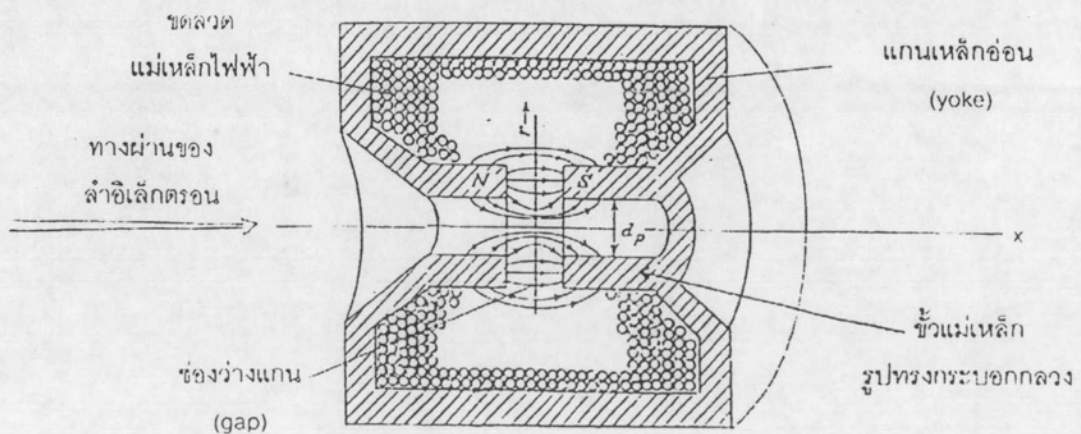
บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระบบเลนส์อิเล็กตรอน

2.1.1 โครงสร้างของเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า

เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่บังคับลำอิเล็กตรอนให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความเข้มของปริมาณอิเล็กตรอนเหมาะสมกับกำลังขยายเพื่อให้ได้ภาพชัดเจน ซึ่งขึ้นอยู่กับกรอกแบบเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าให้สามารถโฟกัสลำอิเล็กตรอนให้มีขนาดเล็กที่สุด หากพิจารณาโครงสร้างของเลนส์อิเล็กตรอนแล้วจะมีลักษณะเสมือนแม่เหล็กไฟฟ้า รูปทรงกระบอกเจาะรูตรงกลางสำหรับให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่าน โดยบริเวณตรงกลางของทรงกระบอกนั้นจะเปิดวงจรแม่เหล็กให้เป็นขั้วแม่เหล็ก (pole pieces) ส่วนบริเวณรอบนอกที่เป็นทรงกระบอกจะเป็นแกนเหล็กอ่อน (yoke) ด้านในมีขดลวดพันอยู่โดยจำนวนและขนาดของขดลวดจะขึ้นอยู่กับความเข้มสนามแม่เหล็กที่ต้องการ นอกจากนี้ปัจจัยที่มีส่วนส่งผลกระทบต่อความเข้มสนามแม่เหล็กอีก คือ อัตราส่วนระหว่างความกว้างของช่องเปิดของขั้วแม่เหล็ก (gap length, S) ต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูที่จะให้ลำอิเล็กตรอนผ่านของขั้วแม่เหล็ก (D_p) [2] โดยภาพภาคตัดขวางของเลนส์อิเล็กตรอนแบบแม่เหล็กไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 2.1



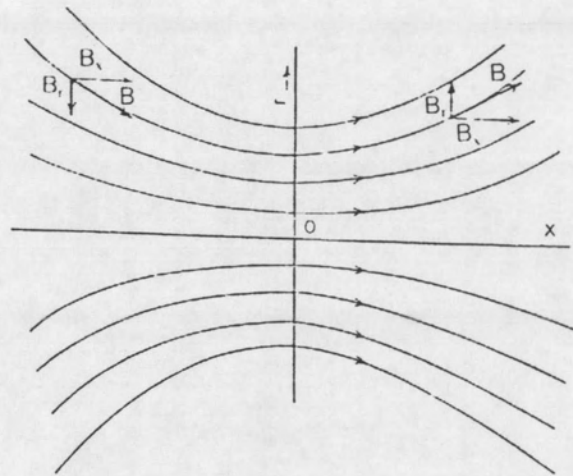
รูปที่ 2.1 แสดงภาคตัดขวางของเลนส์อิเล็กตรอนแบบแม่เหล็กไฟฟ้า [2]

หากพิจารณาถึงการกระจายตัวของเส้นแรงแม่เหล็กที่สมมาตรรอบแนวแกนนั้นสามารถพิจารณาเวกเตอร์ของความเข้มสนามแม่เหล็กได้ 2 แนวคือเวกเตอร์ความเข้มสนามแม่เหล็กตามแนวความยาวของเลนส์อิเล็กตรอน กำหนดให้เป็นแกน X (B_x) และความเข้มสนามแม่เหล็กตามแนวรัศมีของเลนส์อิเล็กตรอน กำหนดให้เป็นแกน r (B_r) จะได้ผลรวมเวกเตอร์ความเข้มสนามแม่เหล็กของเลนส์อิเล็กตรอนที่ตำแหน่งใดๆ แสดงดังสมการที่ 1 [3]

$$\vec{B} = \vec{B}_x + \vec{B}_r \quad (1)$$

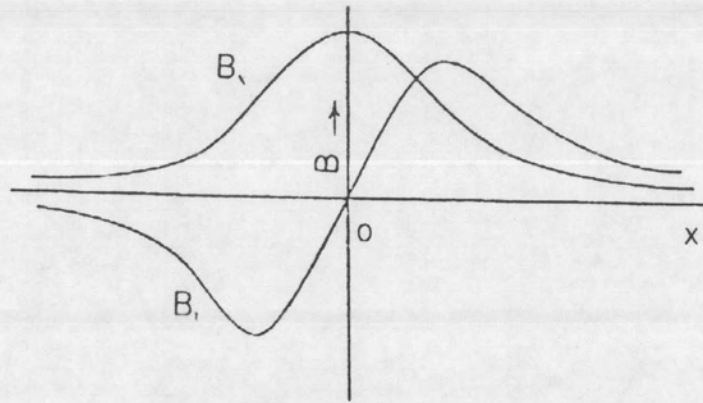
เมื่อพิจารณาความเข้มสนามแม่เหล็กตามแนวแกน X จะเห็นว่าสนามแม่เหล็กมีความเข้มสูงสุดที่ตำแหน่ง $X=0$ ในทางกลับกันความเข้มสนามแม่เหล็กในแนวแกน r จะมีค่าต่ำสุดที่ตำแหน่ง $X=0$ ซึ่งแนวเส้นแรงของสนามแม่เหล็กและกราฟความเข้มของสนามแม่เหล็กแสดงได้ดังรูปที่ 2.2 และรูปที่ 2.3 ตามลำดับ สำหรับความสัมพันธ์ของความเข้มสนามแม่เหล็กทั้ง 2 แนวจะเป็นไปตามสมการที่ 2

$$B_r = \frac{-r}{2} \frac{dB_x}{dx} \quad (2)$$



รูปที่ 2.2 แสดงแนวเส้นแรงในสนามแม่เหล็กแกนสมมาตร

ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก (B) และสนามแม่เหล็ก (H) จะเป็น $B = \mu H$ ในสภาพสุญญากาศค่าความซึมซับสนามแม่เหล็ก $\mu = 1$ ดังนั้นการกล่าวถึงความเข้มสนามแม่เหล็กในสภาพสุญญากาศบางครั้งจะใช้ B และ H แทนกัน



รูปที่ 2.3 แสดงเส้นกราฟความเข้มของสนามแม่เหล็กของทั้ง 2 แนวแกน

ในส่วนของวิธีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในการสร้างภาพด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.4 นั้น สามารถวิเคราะห์ห้ระบบเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าได้โดยสมการของวิถีแนวแกน (paraxial-ray equation) ในสนามแม่เหล็กแกนสมมาตรดังสมการที่ 3

$$r'' = \frac{-q}{8mV} B_x^2 r \quad (3)$$

เมื่อ r = รัศมีการเคลื่อนที่ในพิกัดรูปทรงกระบอก (cylindrical coordinate) ซึ่งมี

พิกัดเป็น (r, θ, x)

r'' = อนุพันธ์อันดับที่ 2 ของรัศมีการเคลื่อนที่เทียบกับแนวการเคลื่อนที่ (แกน x)

B_x = ความเข้มสนามแม่เหล็กในแนวแกน x

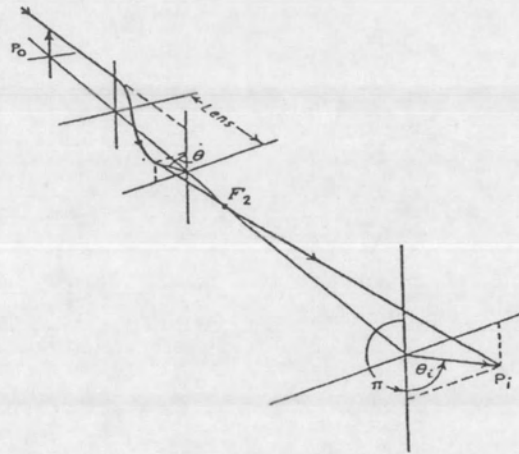
Q = ประจุของอิเล็กตรอน

m = มวลของอิเล็กตรอน

V = ค่าศักดาไฟฟ้าเร่ง

ซึ่งสมการจะมีคำตอบทั่วไป (general solution) อยู่ในรูป

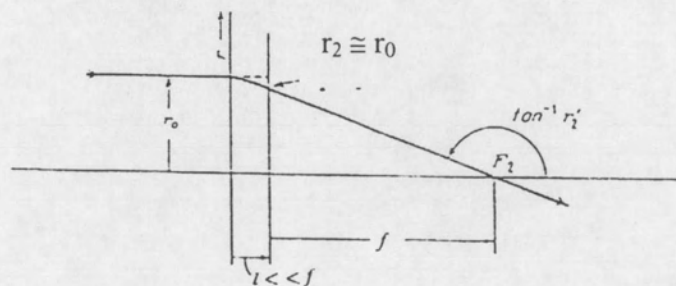
$$r = r_0 P(x) + r_0' Q(x) \quad (4)$$



รูปที่ 2.4 แสดงวิธีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในการสร้างภาพด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า[3]

ดังนั้นเมื่อพิจารณาเส้นฉายของเลนส์อิเล็กตรอนตามวิธีการเคลื่อนที่ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ในกรณีที่เลนส์มีความกว้างของช่องว่างของขั้วแม่เหล็กเล็กมากเมื่อเทียบกับความยาวโฟกัส แสดงให้เห็นว่าเลนส์มีช่วงเก็บเล็กมากดังนั้นคุณสมบัติของเลนส์จึงเป็นเลนส์ชนิดบาง (thin magnetic lens) จากสมการที่ 4 จะได้ความสัมพันธ์ของระยะโฟกัสดังสมการที่ 5 [3]

$$\frac{r_0}{f} = -r_2' \quad (5)$$



รูปที่ 2.5 แสดงเส้นฉายของเลนส์อิเล็กตรอนตามวิธีการเคลื่อนที่ [3]

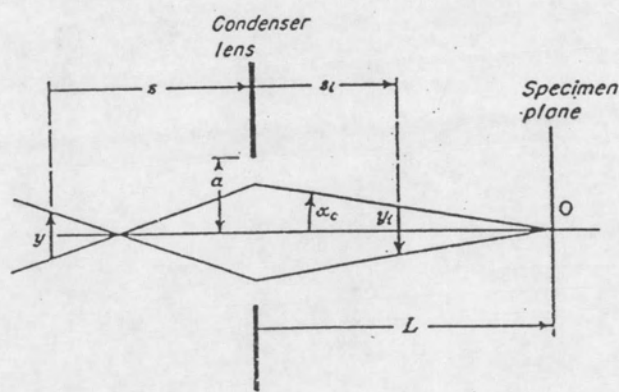
จากสมการของวิถีแนวแกนเมื่อให้ $r = r_0$ แล้วอินทิเกรตเพื่อหาค่า r'_2 นำค่า r'_2 แทนลงในสมการที่ 5 ผลคือจะได้สมการความยาวโฟกัส (f) ของระบบเลนส์แม่เหล็กดังสมการที่ 6 [2] โดยความยาวโฟกัสของเลนส์อิเล็กตรอนจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กกำลังสอง (B) ซึ่งสามารถแปรเปลี่ยนได้ด้วยปริมาณกระแสไฟฟ้า ส่วนความเร็วของอิเล็กตรอนนั้นสามารถแปรเปลี่ยนได้ด้วยศักดาไฟฟ้าแรง (V) ในขณะที่ความเข้มสนามแม่เหล็กจะเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับจำนวนรอบ และกระแสที่จ่ายให้กับเลนส์อิเล็กตรอน ($B \propto NI$) จะให้ความยาวโฟกัสของเลนส์มีความสัมพันธ์ตามสมการ

$$\frac{1}{f} = \frac{q}{8mV_0} \int B_x^2 dx \quad (6)$$

การควบคุมลำอิเล็กตรอนให้มีความสมบูรณ์ในเครื่องผลิตลำอิเล็กตรอนเพื่อระบบผลิตรังสีเอกซ์แบบไมโครโฟกัสจะต้องมีชุดเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ชุด คือ เลนส์คอนเด็นเซอร์และเลนส์ออฟเฟกทีฟ

2.2 Condenser Lens

เลนส์คอนเด็นเซอร์จะมีลักษณะเป็นเลนส์ที่มีระยะโฟกัสของลำอิเล็กตรอนค่อนข้างยาว ปลายลำอิเล็กตรอนจึงห่างจากบริเวณช่องว่างขั้วแม่เหล็กมาก ความสามารถของเลนส์จึงทำได้ในลักษณะควบคุมลำอิเล็กตรอนให้บีบรวมกัน



รูปที่ 2.6 การเกิดมุม α_c ที่จุด 0 ที่ระนาบวัตถุ

จากรูปที่ 2.6 แสดงภาพฉายของลำอิเล็กตรอนในชุดเลนส์คอนเด็นเซอร์ ถ้าภาพที่เกิดขึ้นอยู่ที่ y_i ทำให้เกิดมุมที่จุด 0 เล็กกว่าช่องของช่องบังคับลำอิเล็กตรอน (condenser aperture) แล้วมุม α_c ที่เกิดขึ้นจะถูกกำหนดโดยขนาดและตำแหน่งของ y_i ถ้าภาพ y_i ที่เกิดขึ้นอยู่เลยระนาบวัตถุไปแล้วดังรูปที่ 2.7 (a) และมุมที่จุด 0 เล็กกว่าช่องของ condenser aperture จะทำให้มุม α_c ที่เกิดขึ้นถูกกำหนดโดยขนาดและตำแหน่งของ y_i ด้วย อย่างไรก็ตามถ้าให้มุมที่จุด 0 ใหญ่กว่าช่องของ condenser aperture ดังรูปที่ 2.7 (b) จะได้มุม α_c ที่มีค่ามากที่สุดคือ a/L ดังนั้นการหาค่ามุม α_c โดยการอ้างอิงกับรูปที่ 2.6 และสมมติให้เป็นเลนส์ชนิดบาง จะได้ค่า α_c ดังนี้

$$\alpha_c = \frac{y_i}{2(L-s_i)} = \frac{My}{2(L-Ms)} = \frac{y/2}{(L/M)-s} \quad (7)$$

เมื่อ L = ระยะภาพถึงระนาบเลนส์

S = ระยะวัตถุถึงระนาบเลนส์

S_i = ระยะภาพ

Y = ขนาดวัตถุ

Y_i = ขนาดภาพของวัตถุ

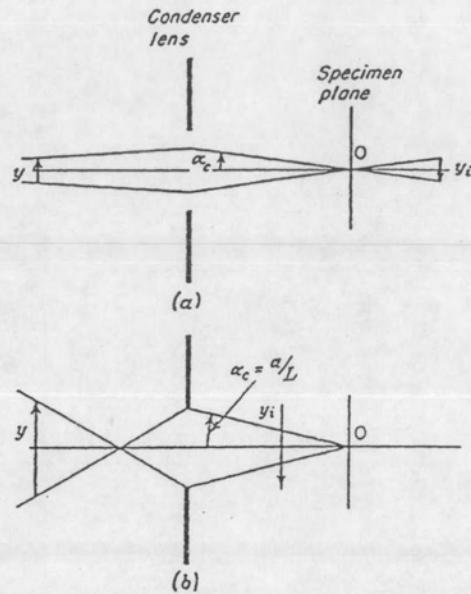
M = กำลังขยายของเลนส์

สมมติให้ $L = s$ และให้กำลังขยายของเลนส์เป็น

$$M = \frac{f}{s-f} \quad (8)$$

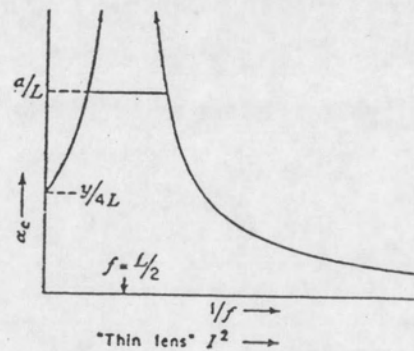
เมื่อแทน (8) ลงใน (7) จะได้ α_c เป็น

$$\alpha_c = \frac{y/2}{|L[(L/f)-2]|} \quad (9)$$



รูปที่ 2.7 เงื่อนไขในการจำกัดมุม α_c

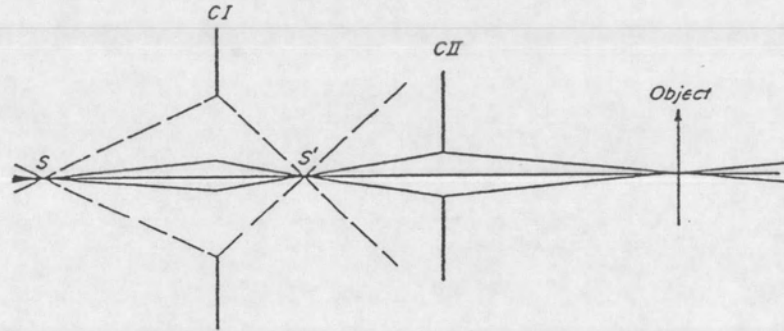
จากสมการที่ (9) จะเห็นได้ว่า α_c เป็นฟังก์ชันของ $1/f$ โดยความสัมพันธ์ของ α_c และ $1/f$ แสดงดังรูปที่ 2.8 สำหรับตำแหน่งที่ $1/f = 0$ คือ ตำแหน่งที่ไม่มีกระแสไฟฟ้าไปที่เลนส์ $\alpha_c = y/4s$ เมื่อให้ $f = L/2$ ค่าของ α_c จะเป็นอินฟินิตี (infinity) แต่ค่าที่สูงสุดที่เป็นไปได้ของ α_c คือ a/L ขณะที่ $1/f$ เพิ่มขึ้นจนเป็น $2/L$ จากนั้น α_c จะค่อยๆ ลดลงจนเป็นศูนย์ ซึ่งอาจจะหมายความว่า f เข้าใกล้ศูนย์แต่ความจริงเป็นไปได้



รูปที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง α_c กับความเข้มสนามแม่เหล็กของ condenser lens

จากเลนส์แม่เหล็กแบบ thin lens จะพบว่า $1/f \propto H^2 \propto I^2$ ซึ่งเป็นฟังก์ชันการทำงานอย่างง่ายของเลนส์คอนเด็นเซอร์ อย่างไรก็ตามเมื่อเลนส์คอนเด็นเซอร์ทำให้เกิดจุดโฟกัสบนหรือ

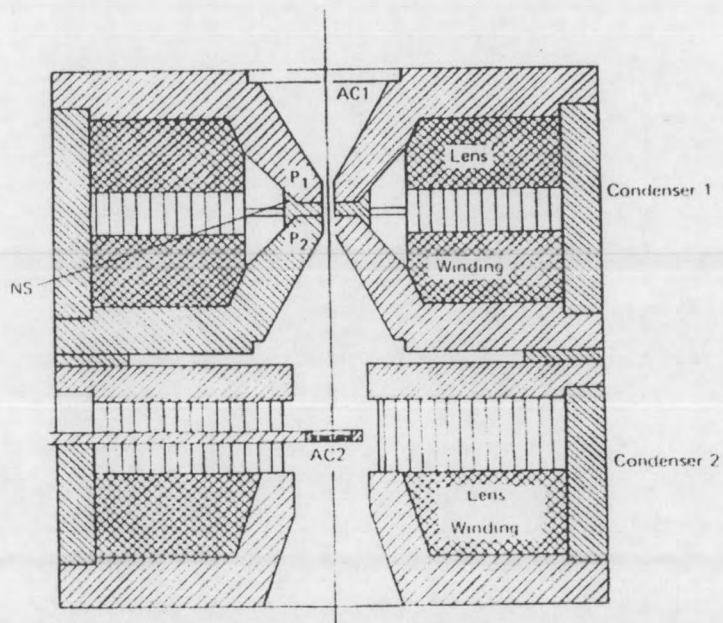
ใกล้กับระนาบวัตถุจะทำให้มุม α_c มากที่สุดและจะลดลงสำหรับกระแสที่มากกว่าหรือน้อยกว่าของกระแสที่ช่วยให้เลนส์คอนเด็นเซอร์ ความเข้มของลำอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นที่ระนาบวัตถุ มีลักษณะคล้ายกับรูปที่ 2.8 ที่การจ่ายกระแสเลนส์คอนเด็นเซอร์ค่าหนึ่ง ความเข้มและ α_c จะมีค่ามากที่สุดและจะลดลงทั้งสองข้างจากกระแสที่ป้อนให้



รูปที่ 2.9 แสดง double condenser

การใช้เลนส์คอนเด็นเซอร์ 2 อัน (double condenser) วางต่อเนื่องกันจะเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมปลายลำอิเล็กตรอนมากขึ้น เนื่องจากความเข้มสนามแม่เหล็กมีช่วงกว้างขึ้นทำให้ช่วยลดขนาดโฟกัสให้เล็กลง ดังในรูปที่ 2.9 condenser lens 1 (CI) จะทำให้เกิดภาพ s' ที่มีขนาดเล็กลง สำหรับจุดโฟกัสที่เล็กที่สุดและ condenser lens 2 (CII) จะบังคับให้ปลายลำอิเล็กตรอนเล็ก และความเข้มมากที่สุดบนวัตถุ ในทางปฏิบัตินี้ CI จะมีความเข้มของสนามแม่เหล็กมากกว่าจึงมี gap แคบและมีระยะโฟกัสสั้น ขณะที่ CII จะมีความเข้มสนามแม่เหล็กน้อยกว่าจึงมี gap กว้าง และมีความยาวโฟกัสยาวกว่า

ถ้าใช้เลนส์คอนเด็นเซอร์อันเดียวระยะระหว่าง s และเลนส์ จะประมาณได้เท่ากับระยะของเลนส์กับวัตถุ จุดโฟกัสที่ได้จะมีขนาดเท่ากับ s , 30-50 μm แต่ถ้าใช้เลนส์คอนเด็นเซอร์แบบ 2 ชุด จุดโฟกัสจะเล็กลงเป็น 2 - 3 μm โดย aperture ที่ CII จะถูกกำหนดโดยเส้นผ่านศูนย์กลางของ CII ซึ่งปกติแล้วจะมีค่าประมาณ 100 - 200 μm aperture ที่ CI จะมีความกว้างมากกว่า aperture ที่ CII โดยพิจารณาได้จากเส้นประในรูปที่ 2.9 เพื่อรักษาความเข้มของลำอิเล็กตรอน ความเข้มของลำอิเล็กตรอนจะสูญเสียไปมากถ้าความเข้มของสนามแม่เหล็ก CI เพิ่มมากขึ้น ภาพตัดขวางของชุดเลนส์คอนเด็นเซอร์แบบ 2 ชั้น แสดงในรูปที่ 2.10 ประกอบด้วยเลนส์ชั้นบนที่มีช่องทางผ่านของลำอิเล็กตรอนเล็กและ gap แคบ ขณะที่เลนส์ชั้นล่างมีช่องทางผ่านของลำอิเล็กตรอนกว้างและ gap กว้าง ด้านทางออกของปลายลำอิเล็กตรอนจะต่อเชื่อมกับเลนส์ชุดที่เกี่ยวข้องกับการโฟกัสลำอิเล็กตรอน คือ เลนส์ออฟเฟกทีฟ

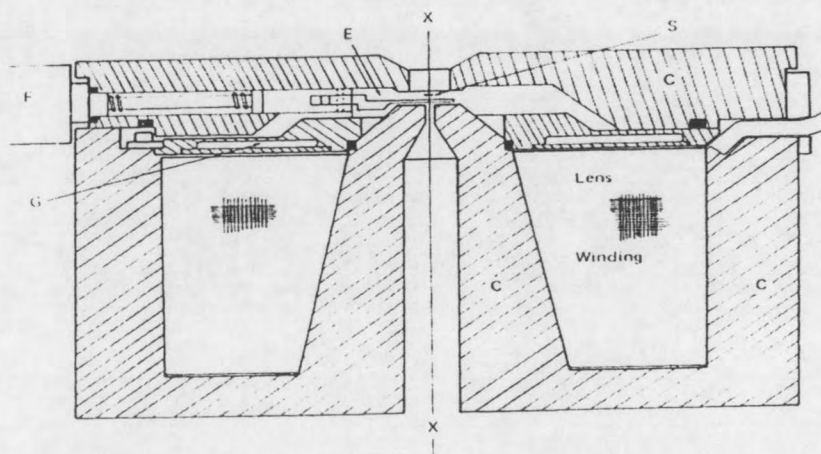


รูปที่ 2.10 โครงสร้างของเลนส์คอนเด็นเซอร์แบบ 2 ชั้น

เลนส์คอนเด็นเซอร์แบบ 2 ชั้นจะให้ประสิทธิภาพในการควบคุมโฟกัสของลำอิเล็กตรอนสูง โดยชั้นบนเป็นเลนส์ที่มี gap แคบทำให้มีสนามแม่เหล็กสูง (strong lens) ความยาวโฟกัสสั้น เลนส์ชั้นล่างจะเป็นเลนส์ที่มี gap กว้างทำให้ความเข้มสนามแม่เหล็กต่ำ (weak lens)

2.3 Objective Lens

เลนส์ออฟเจกทิฟเป็นเลนส์ที่ใช้เป็นตัวปรับปลายลำอิเล็กตรอนให้มีขนาดเล็กมากเพื่อความคมชัดของภาพ



รูปที่ 2.11 แสดงเลนส์ออฟเจกทิฟ[4]

โครงสร้างของเลนส์ออฟเจ็กทีฟจะแตกต่างจากเลนส์คอนเด็นเซอร์ที่ตำแหน่งช่อง gap ของสนามแม่เหล็ก กล่าวคือบริเวณช่องเปิดวงจรของเลนส์ออฟเจ็กทีฟจะอยู่ใกล้กับปลายทางออกของลำอิเล็กตรอน บางครั้งปลายปากเลนส์จะมีรูปรวยเพื่อให้สนามแม่เหล็กมีประสิทธิภาพในการโฟกัสปลายลำอิเล็กตรอน

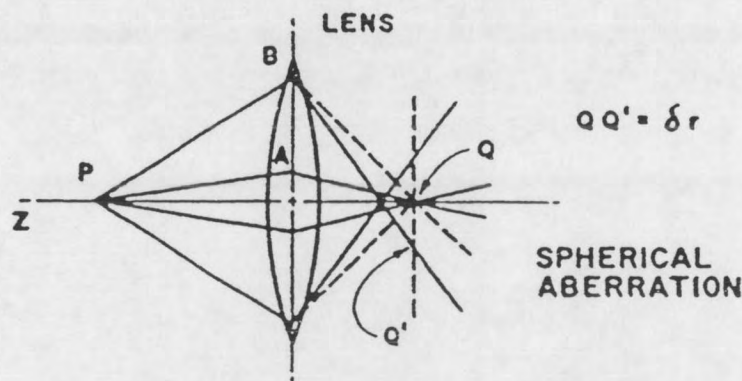
ซึ่งในการออกแบบเลนส์ออฟเจ็กทีฟ มีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องดังนี้

1. ตำแหน่งของวัตถุ ต้องวางไว้ใกล้กับเลนส์และตั้งฉากกับแกนของเลนส์
2. ความยาวโฟกัสและ C_s (สัมประสิทธิ์ความคลาดเคลื่อนแบบ spherical) เพื่อให้ได้ความละเอียดสูงจะต้องมี C_s น้อยๆ ซึ่ง C_s จะน้อยเมื่อมีความยาวโฟกัสสั้น แต่ความเปรียบต่างจะมากเมื่อมีความยาวโฟกัสยาว
3. Objective Aperture การใช้ objective aperture ก็เพื่อลดความคลาดเคลื่อนแบบ spherical และ diffraction ที่จะเกิดขึ้น แต่ในบางครั้ง aperture ก็นำมาใช้ในการเพิ่มความคมชัดของภาพมากกว่าที่จะลด aperture เพื่อลดความคลาดเคลื่อน

2.4 ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในระบบอิเล็กทรอนิกส์ออฟติก

2.4.1 ความคลาดเคลื่อนแบบ spherical

ความคลาดเคลื่อนแบบ spherical เกิดจาก บริเวณที่ไกลจากแกนของเลนส์จะมีความเข้มของเลนส์มากกว่าบริเวณที่ใกล้เลนส์ จากรูปจะเห็นว่าที่บริเวณไกลจากแกนของเลนส์จะให้จุดโฟกัสที่สั้นกว่าบริเวณที่ใกล้เลนส์ซึ่งก็ให้เกิดภาพวงกลมลวงขึ้นเรียกว่า disc of least confusion



รูปที่ 2.12 แสดงความคลาดเคลื่อนแบบ spherical

เส้นผ่านศูนย์กลางของภาพวงกลมลวงที่น้อยที่สุดคือ

$$d_s = \frac{1}{2}(C_s \alpha^3)$$

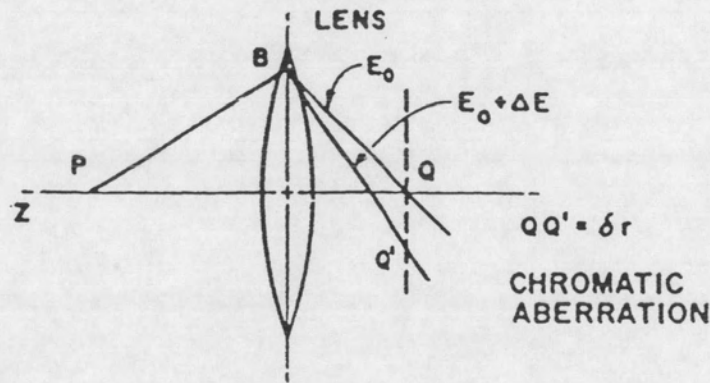
C_s เป็นสัมประสิทธิ์ความคลาดเคลื่อนแบบ spherical

α เป็นมุมระหว่าง BQ กับแกนของเลนส์

ซึ่ง α และ C_s มีความเกี่ยวข้องกับศักดาไฟฟ้า E_0 และความยาวโฟกัส f ของเลนส์ d_s สามารถลดลงได้โดยการลด α อย่างไรก็ดีตามเพื่อที่จะทำให้ α ลดลงจะต้องลดขนาดของ aperture ให้เล็กลงด้วยซึ่งมีผลให้กระแสวิกตรอนที่ final spot น้อยลง อีกวิธีหนึ่งที่จะทำให้ค่า d_s ลดลงคือการลดระยะห่างระหว่างเลนส์กับ specimen ซึ่งวิธีนี้ต้องทำให้เลนส์มีความเข้มสนามแม่เหล็กมากขึ้นเป็นผลให้ความยาวโฟกัสและ C_s ลดลง

2.4.2 ความคลาดเคลื่อนแบบ chromatic

ความคลาดเคลื่อนแบบ chromatic เกิดจากการเปลี่ยนแปลงศักดาไฟฟ้า และความเร็วของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ผ่านเลนส์หรือการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กของเลนส์ซึ่งจะไปเปลี่ยนตำแหน่งการกระจายของอิเล็กตรอนจากจุด P ซึ่งก่อให้เกิดภาพวงกลมลงขึ้นเรียกว่า disc of least confusion



รูปที่ 2.13 แสดงความคลาดเคลื่อนแบบ chromatic

เส้นผ่านศูนย์กลางของภาพวงกลมลงที่น้อยที่สุดคือ

$$d_c = (\Delta E / E_0) C_c \alpha$$

C_c เป็นสัมประสิทธิ์ความคลาดเคลื่อนแบบ chromatic ซึ่งเกี่ยวข้องโดยตรงกับความยาวโฟกัสของเลนส์

α เป็นมุมระหว่าง BQ กับแกนของเลนส์

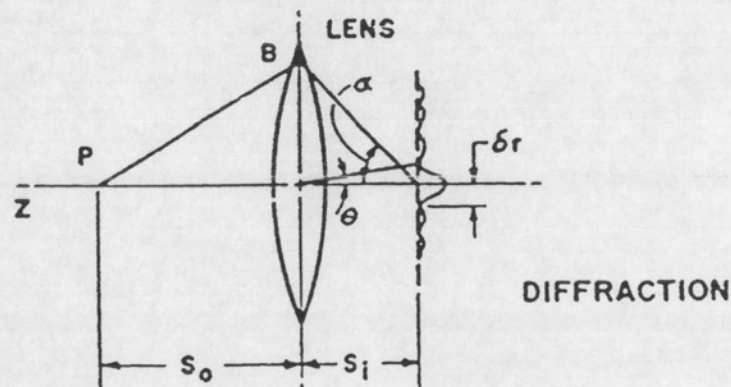
$\Delta E / E_0$ เป็นสัดส่วนในการเปลี่ยนแปลงพลังงานในลำอิเล็กตรอน

การเปลี่ยนแปลงของ E_0 และสนามแม่เหล็กไฟฟ้า H อาจเกิดจากความไม่เสถียรของแหล่งจ่ายไฟฟ้า ถ้ากระแสและศักดาไฟฟ้ามีเสถียรภาพหนึ่งในด้านก่อนที่การเปลี่ยนแปลงของ E_0 และสนามแม่เหล็กไฟฟ้า H จะไม่ถูกนำมาคิด อย่างไรก็ตามก็ยังมีการเปลี่ยนแปลง ΔE ในพลังงานของอิเล็กตรอนที่อ้างอิงจากการกระจาย Maxwellian ของความเร็วเริ่มต้นของอิเล็กตรอนที่ออกจากแคโทดซึ่งความเร็วนี้แสดงอยู่ในรูปพลังงานของอิเล็กตรอน 2-3 eV สำหรับ Tungsten hairpin filament

ค่า d_c สามารถลดลงได้โดยการลดมุม α เช่นเดียวกับการลด d_s

2.4.3 ความคลาดเคลื่อนแบบ diffraction

ความคลาดเคลื่อนแบบ diffraction เกิดจากการปรากฏการณ์ธรรมชาติของคลื่นที่ปรากฏบนฉากรับภาพ รัศมีที่น้อยที่สุด δ_r ที่ก่อให้เกิดมุม θ ดังรูป ก่อให้เกิดภาพวงกลมลวงขึ้นเรียกว่า disc of least confusion



รูปที่ 2.14 แสดงความคลาดเคลื่อนแบบ diffraction

เส้นผ่านศูนย์กลางของภาพวงกลมลวงที่น้อยที่สุดคือ

$$d_d = 1.22\lambda / \alpha$$

λ คือความยาวคลื่นของอิเล็กตรอน โดยให้

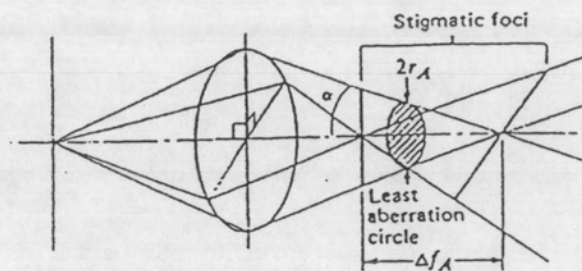
$$\lambda = 12.26 / E_0^{1/2} \text{ (angstroms)}$$

E_0 เป็นพลังงานเริ่มต้นของอิเล็กตรอน (eV)

α เป็นมุมระหว่างลำอิเล็กตรอนที่พุ่งเข้าหาแกนของเลนส์กับแกนของเลนส์
(radians)

2.4.4 ความคลาดเคลื่อนแบบ stigmatism

ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการไม่สมมาตรของเลนส์มีสาเหตุมาจากคุณภาพของเลนส์อิเล็กตรอน เช่น วัสดุที่ใช้ทำ ความละเอียดในการสร้างชิ้นส่วน ความกลมของช่องทางเดินของอิเล็กตรอน ทำให้สนามแม่เหล็กที่ได้ไม่สม่ำเสมอ



รูปที่ 2.15 แสดงความคลาดเคลื่อนแบบ stigmatism

เส้นผ่านศูนย์กลางของภาพวงกลมลงที่น้อยที่สุดคือ

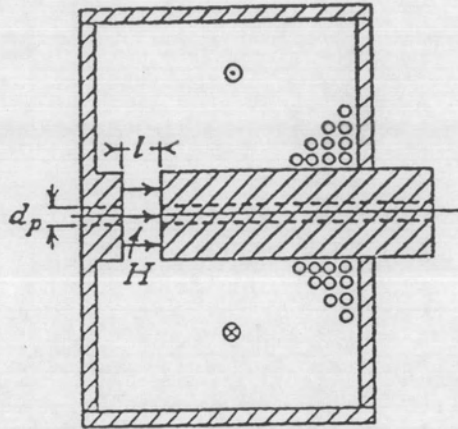
$$d_A = \Delta f_A \alpha$$

Δf_A คือระยะระหว่าง stigmatic foci

ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นสามารถแก้ไขได้โดยการเพิ่มอุปกรณ์ที่มีขั้วแม่เหล็กหลายขั้วที่เรียกว่า Stigmator ไปปรับแก้ความไม่สมมาตร stigmatism corrector

ถ้าสนามแม่เหล็กของเลนส์ที่เกิดขึ้นไม่มีความสมมาตร ภาพที่ได้ก็จะเกิดความผิดเพี้ยน แม้ว่าอุปกรณ์จะถูกติดตั้งอย่างเที่ยงตรงแต่ก็อาจจะเกิดมาจากเหล็กที่ใช้ไม่เป็นเนื้อเดียวกันซึ่งแก้ไขได้โดยการใช้ stigmator สามารถปรับได้ทั้งขนาดและทิศทางของสนามแม่เหล็กให้สมมาตร โดยการปรับทำในขณะที่ระบบกำเนิดลำอิเล็กตรอนกำลังทำงานอยู่

2.5 การออกแบบเลนส์อิเล็กตรอน



รูปที่ 2.16 เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าในอุโมงค์

ในรูปที่ 2.16 แสดงโครงสร้างเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าในอุโมงค์ ซึ่งประกอบด้วยแกนปิดสนามแม่เหล็ก ซึ่งเปิดปลายบริเวณสนามแม่เหล็กไว้ โดยสมมติให้วัสดุทำแกนแม่เหล็กมีค่าความซึมซับของแกน (permeability) เป็นอินฟินิตี้ (∞) และให้ bore d_p มีค่าเล็กมากเมื่อเทียบกับ gap/l จึงไม่มีผลต่อ d_p ทำให้สามารถหาสนามแม่เหล็ก (H) ได้จาก

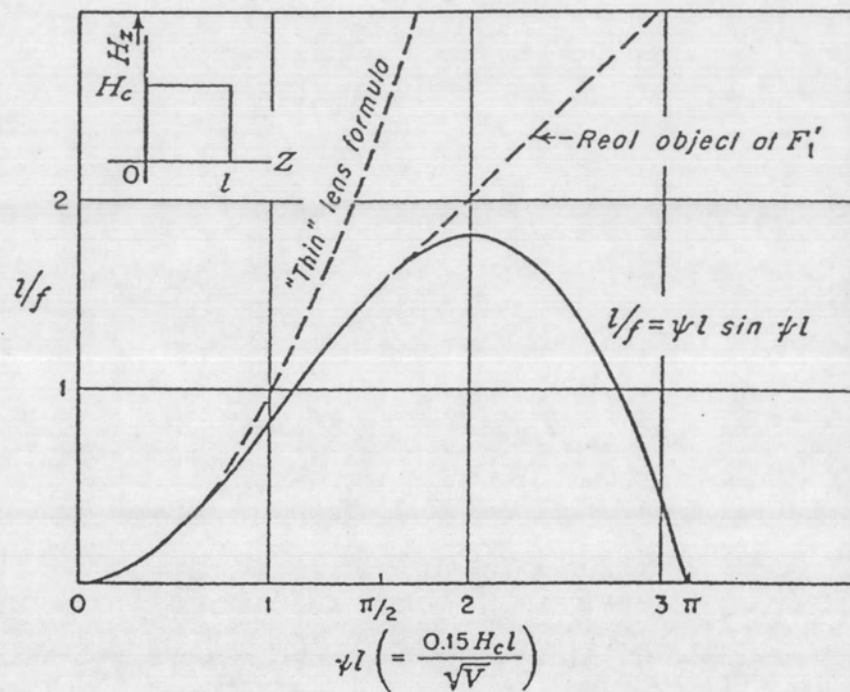
$$H = \frac{4\pi NI}{10l} \quad (10)$$

จาก thick lens จะได้ค่ามุมของภาพที่เบี่ยงเบนไปจากตำแหน่งจริง (ψ) ดังนี้

$$\psi = \frac{0.15H_c}{\sqrt{V}} \quad (11)$$

นำสมการ (10) แทนใน (11) จะได้

$$\psi l = \frac{0.187NI}{\sqrt{V}} \quad (12)$$



รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ของ $1/f$ กับ ψl

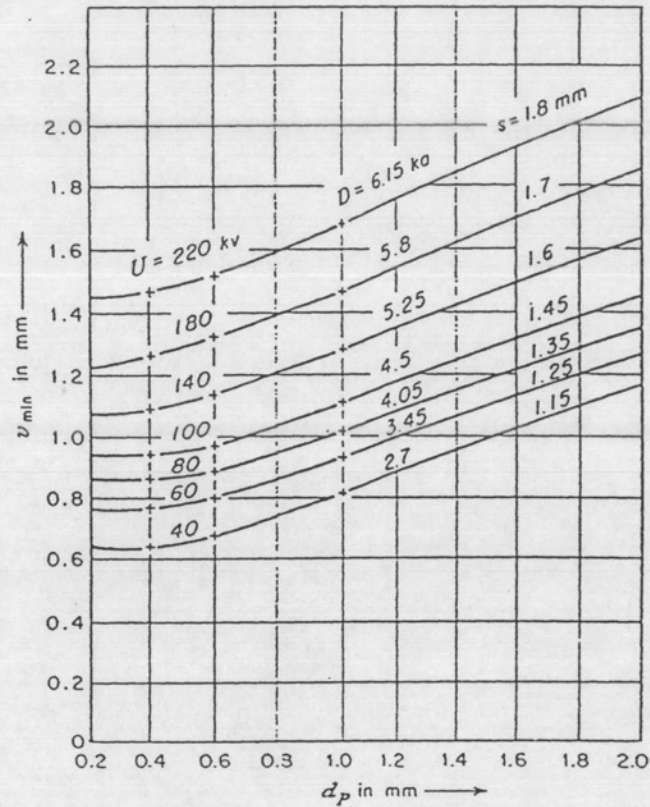
เลนส์ชนิดนี้ค่าความยาวโฟกัสจะขึ้นอยู่กับกระแสที่ให้กับขดลวดโดยตรง โดยมี ความสัมพันธ์ของ $1/f$ กับ ψl ดังรูปที่ 2.17 จากสมการที่ (10) จะเห็นว่าพื้นที่ของ gap ไม่มี ความสัมพันธ์กับสนามแม่เหล็กและกระแสที่ให้ขดลวด หมายความว่าขนาดของสนามแม่เหล็กใน gap ไม่ขึ้นอยู่กับฟลักซ์ทั้งหมดที่เคลื่อนที่ผ่าน นั่นคือพื้นที่ของ gap มีขนาดใหญ่พอที่จะรับฟลักซ์ ทั้งหมดโดยไม่เกิดการอิ่มตัว ในการออกแบบนั้นจะพิจารณาให้พื้นที่หน้าตัดของ pole piece ที่อยู่ ใกล้กับ gap มีขนาดเล็กเพื่อลดฟลักซ์ที่ผ่านเลนส์ จากสิ่งนี้ทำให้เกิดความสนใจผลกระทบที่เกิดจาก การเปลี่ยนแปลงระยะ gap l เมื่อให้กระแสที่ให้กับขดลวดคงที่[4] จะได้ความสัมพันธ์ของ $1/f$ เป็น

$$1/f = \psi l \sin \psi l \quad (13)$$

เมื่อนำสมการที่ (12) แทนใน (13) จะได้สมการความยาวโฟกัสเป็น

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{l} \frac{0.187NI}{\sqrt{V}} \sin \frac{0.187NI}{\sqrt{V}} \quad (14)$$

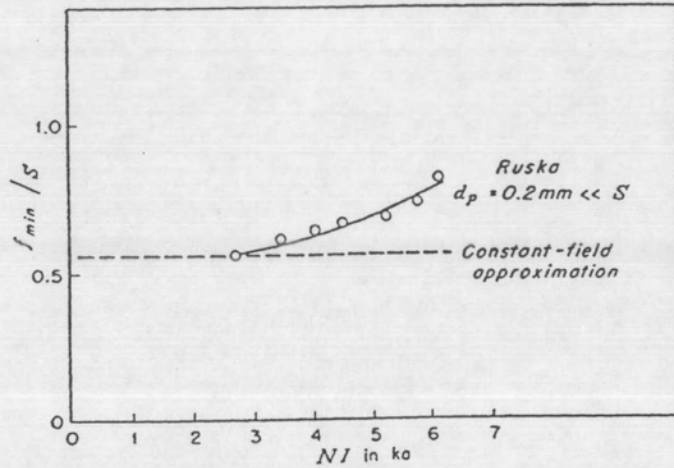
จากสมการจะเห็นได้ว่า f แปรผันตรงกับ l ทำให้เราสามารถเปลี่ยนความยาวโฟกัสจากระยะ gap ได้



รูปที่ 2.18 แสดงความสัมพันธ์ของความยาวโฟกัสที่ต่ำที่สุด v_{\min} กับ bore d_p โดยให้ s เป็นความยาวของ gap และ D เป็นค่าของจำนวนชดลวดกับกระแส

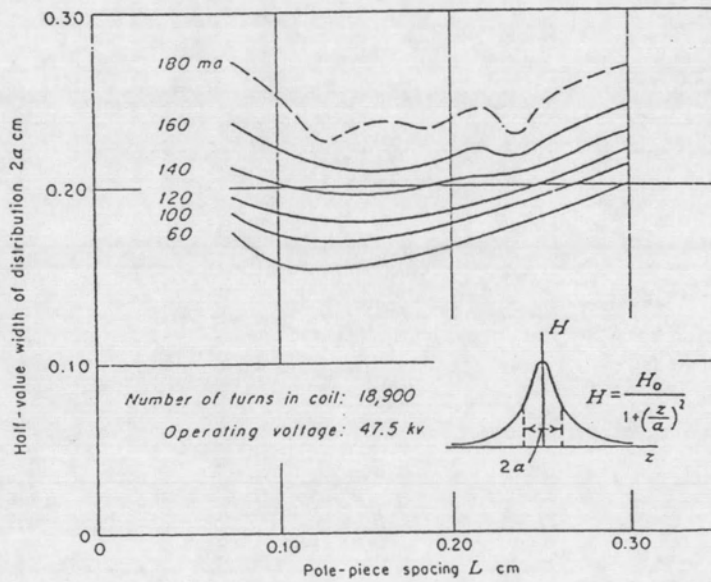
2.5.1 ขนาดของ bore (d_p)

โดยปกติจะออกแบบให้ bore มีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับ gap จากรูปที่ 2.18 เมื่อเพิ่มขนาด bore (d_p) ความยาวโฟกัสจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากการกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก และส่งผลให้ความสัมพันธ์ของ NI และ f_{\min}/s เป็นไปดังรูปที่ 2.19 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ที่กระแสชดลวดสูงๆ หรือความหนาแน่นของฟลักซ์มากเข้าใกล้จุดอิมิตัวจะเกิดการกระจายของสนามแม่เหล็กไกลกว่าระยะ gap [3]



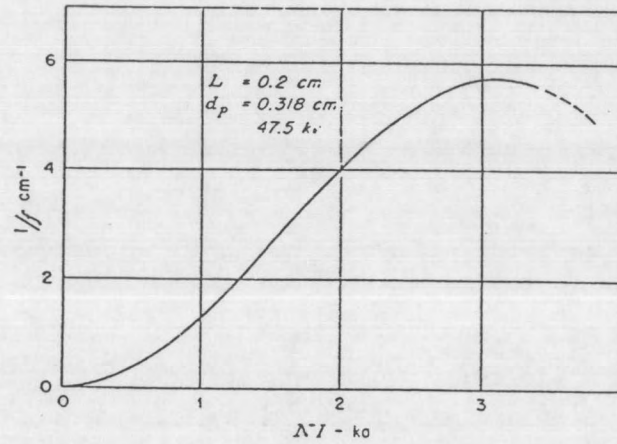
รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ของ NI และ f_{min}/s

ที่ขนาดของ bore ใหญ่ขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับระยะ gap สนามแม่เหล็กจะกระจายตัวในลักษณะกราฟระฆังคว่ำ (bell shape) ดังปรากฏในการทดลองของ Zworykin ดังแสดงรูปที่ 2.20 ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ของค่าการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กที่ half-value width $2a$ กับความยาว gap l จากรูปจะเห็นได้ว่า $2a$ ไม่ได้ขึ้นอยู่กับระยะ l แต่ $2a$ จะเพิ่มขึ้นเมื่อกระแสในขดลวดสูงขึ้น



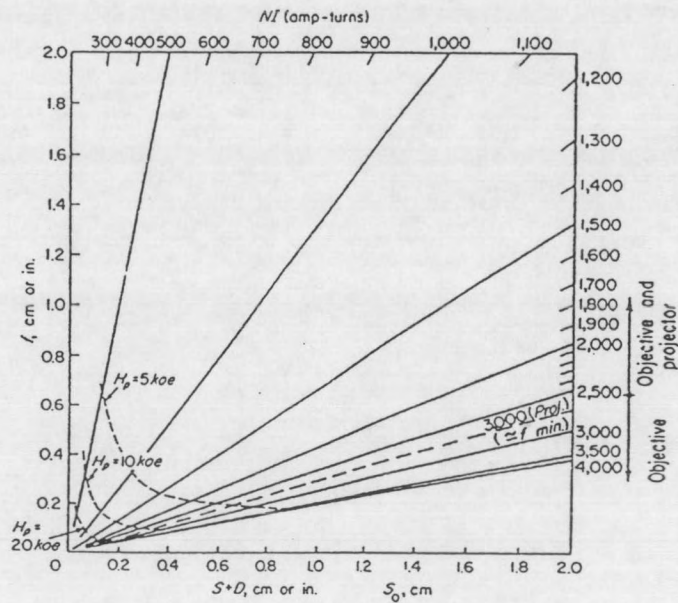
รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ของการกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก half-value width $2a$ กับความกว้างของระยะ gap l

ผลจากรูปที่ 2.20 ทำให้ได้ความสัมพันธ์ของ $1/f$ กับ NI ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 ความสัมพันธ์ของ $1/f$ กับ NI เมื่อ bore มีขนาดใหญ่

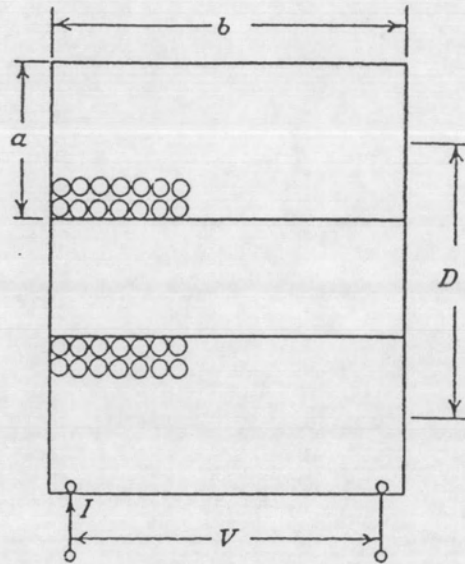
ได้มีการศึกษาและพัฒนาข้อมูลในการเปลี่ยนแปลงความกว้างของ bore ที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงตัวแปรอื่นๆของเลนส์ชนิดออฟเฟกทีฟ โดย Liebmann ดังรูปที่ 2.22 โดยให้ bore เท่ากับ D และ gap ยาว s รวมทั้งแปรเปลี่ยนความยาวโฟกัสโดยการเปลี่ยนแปลงค่า NI



รูปที่ 2.22 แสดงความสัมพันธ์ของความยาวโฟกัสกับจำนวนขดลวดและกระแสในเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า

2.5.2 การคำนวณขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า

ในการออกแบบเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าขั้นแรกจะต้องออกแบบการพันขดลวดซึ่งจำนวนขดลวดและกระแสจะมีความสำคัญต่อการผลิตสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 2.23 แสดงตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการพันขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า

จากโครงสร้างในรูปที่ 2.23 สามารถคำนวณจำนวนรอบของขดลวดได้จาก

$$N = \frac{ab}{d^2} \quad (15)$$

โดย d เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวด

ถ้าให้ ρ เป็นความต้านทานเฉพาะของเส้นลวด (ทองแดง) จะได้ค่าความต้านทานของขดลวดเป็น

$$R = \rho \frac{\text{total length of wire}}{\text{cross-sectional area}} = \rho \frac{N\pi D}{\pi d^2 / 4} = \frac{4\rho ND}{d^2} \quad (16)$$

นำ (15) แทนใน (16) จะได้

$$R = \frac{4\rho D}{ab} N^2 \quad (17)$$

จากกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดมีค่าเป็น $I^2R = VI$ จะได้สมการเป็น

$$\frac{4\rho D}{ab}(NI)^2 = VI \quad (18)$$

2.6 ระบบบันทึกภาพด้วยแผ่นบันทึกภาพ (imaging plate)

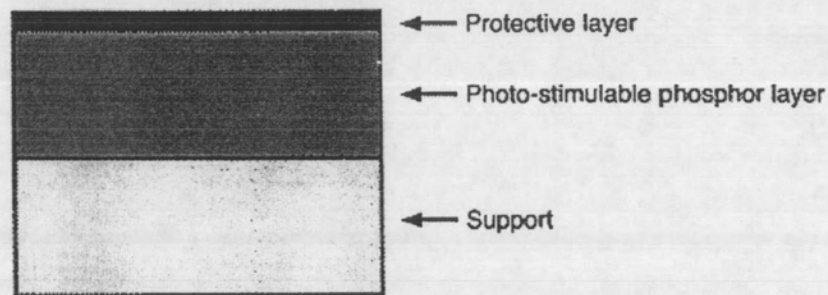
2.6.1 ทฤษฎีแผ่นบันทึกภาพ[5]

ฟอสฟอรัส (phosphor) แบบพิเศษถูกนำมาออกแบบเป็นแผ่นบันทึกภาพ ฟอสฟอรัสเป็นสารที่มีคุณสมบัติปล่อยแสงเมื่อกระทบกับรังสียูวี ถ้าอิเล็กทรอนิกส์ ความร้อน การชนของอนุภาคหรือกระตุ้นด้วยปฏิกิริยาเคมี โดยทั่วไปจะเรียกรวมกันว่า สารฟลูออเรสเซนต์ (fluorescence) แต่ถ้าสารนั้นมีลักษณะเป็นผงมักจะเรียกว่า ฟอสฟอรัส ฟอสฟอรัสจะปลดปล่อยแสงเมื่อถูกกระตุ้นด้วยรังสี แสงที่ถูกปล่อยออกมาจะหายไปทันทีที่หยุดการกระตุ้น ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “ฟลูออเรสเซนต์” สารฟอสฟอรัสบางชนิดสามารถปลดปล่อยแสงออกมาชั่วขณะภายหลังการกระตุ้นเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ฟอสฟอรัสเรสเซนต์ (phosphorescence) ปรากฏการณ์ทั้งสองเรียกรวมได้ว่า ปรากฏการณ์ ลูมิเนสเซนซ์ (luminescence) ฟอสฟอรัสที่ใช้กับแผ่นบันทึกภาพมีคุณสมบัติแตกต่างจากคุณสมบัติข้างต้น เรียกคุณสมบัตินี้ว่า photostimulated luminescence (PSL) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ไม่ใช่ทั้ง ฟอสฟอรัสเรสเซนต์ และ ฟลูออเรสเซนต์ ปรากฏการณ์ PSL ถูกค้นพบโดยชาวฝรั่งเศสชื่อ Becquerel ตอนกลางศตวรรษที่ 19 ปรากฏการณ์นี้จะปล่อยแสงอีกครั้งโดยการกระตุ้นครั้งที่ 2 แสงที่ออกมาจะมีความยาวคลื่นมากกว่าแสงกระตุ้นครั้งแรกให้เกิดการเก็บกักพลังงาน ในญี่ปุ่นมีการนำมาประยุกต์ใช้ตอนช่วงสงครามโลกครั้งที่ 2 ในการตรวจจับรังสีอินฟราเรด ในสหรัฐอเมริกาถูกนำมาใช้เป็นแผ่นฟิล์มในการฉายรังสี ต่อมาได้นำปรากฏการณ์ PSL มาใช้ในแผ่นบันทึกภาพกับการถ่ายภาพทางรังสีที่จะเก็บข้อมูลและปล่อยข้อมูลนั้นออกมาเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงอินฟราเรดจากหลอดเลเซอร์

ปัจจุบันแผ่นบันทึกภาพได้ถูกออกแบบให้ฟอสฟอรัสกักพลังงานจากรังสี พลังงานจะถูกเก็บกักจนกระทั่งถูกสแกนด้วยเลเซอร์จึงปลดปล่อยออกมาในรูปของสัญญาณแสง เทคนิคนี้ได้ถูกนำมาใช้ในกระบวนการถ่ายภาพรังสีรังสีเอกซ์ทางการแพทย์

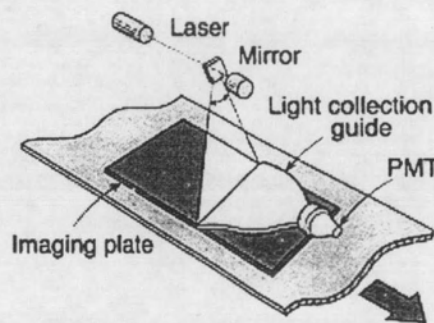
2.6.2 หลักการทำงานของแผ่นบันทึกภาพ

แผ่นบันทึกภาพจะมีผลึกคริสตัลขนาดเล็กมาก ($5\ \mu\text{m}$) ของแบเรียม ฟลูออโรโบโรไมด์ ที่เจือ bivalent Europium เป็นแหล่งกำเนิดลูมิเนสเซนซ์ (BaFBr:Eu^{2+}) ผลึกจะเคลือบอยู่บนแผ่นฟิล์มโพลีเอสเตอร์ ดังแสดง โครงสร้างของแผ่นบันทึกภาพในรูปที่ 2.24



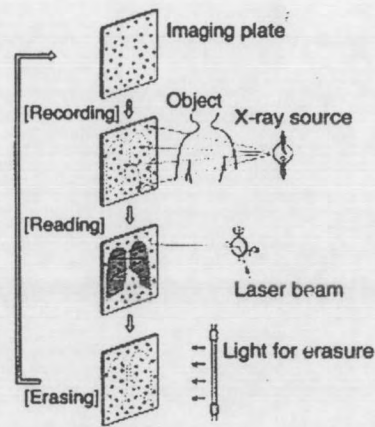
รูปที่ 2.24 โครงสร้างของแผ่นบันทึกภาพ

วิธีการใช้แผ่นบันทึกภาพในการถ่ายภาพรังสีจะคล้ายกับการใช้แผ่นฟิล์มธรรมดา แต่ต้องนำแผ่นบันทึกภาพมาสแกนด้วยเลเซอร์แทนการนำไปล้างด้วยสารเคมี



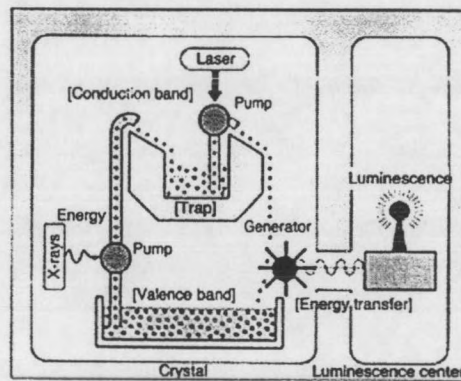
รูปที่ 2.25 แผนภาพแสดงการอ่านภาพถ่ายรังสีจากแผ่นบันทึกภาพ

แผ่นบันทึกภาพที่รับรังสีและเกิดภาพแฝง (latent image) แล้วจะถูกสแกนด้วยเลเซอร์ทำให้เกิดสัญญาณ PSL ปลดปล่อยออกมาตรวจวัดด้วย photomultiplier tube (PMT) เพื่อเปลี่ยนเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ความละเอียดในการอ่านสามารถเลือกได้ตั้งแต่ 5-40 pixels/mm แผ่นบันทึกภาพสามารถนำกลับมาใช้งานได้อีกหลังจากลบภาพแฝงที่ตกค้างอยู่บนแผ่นบันทึกภาพด้วยแสงจนกว่าจะเสื่อมสภาพ ในรูปที่ 2.26 แสดงวงจรการใช้แผ่นบันทึกภาพในงานถ่ายภาพด้วยรังสี



รูปที่ 2.26 กระบวนการบันทึก อ่านค่าและลบภาพถ่ายทางรังสีโดยวิธีของแผ่นบันทึกภาพ

ผลึก BaFX:Eu^{2+} ($X=\text{Cl, Br}$ หรือ I) เป็นผลึกไอออนิก (ionic crystal) มีโครงสร้างแบบ tetragonal Ba จะถูกแทนที่ด้วยไอออน Eu^{2+} ปกติผลึกจะมีองค์ประกอบของ $X=\text{Br}$ เมื่อผลึกนี้ถูก รังสีเอกซ์จะทำให้ ไอออน Eu^{2+} กลายเป็น Eu^{3+} โดยมีอิเล็กตรอนหลุดออกมาจะถูกจับอยู่ในชั้นของ Br ที่ว่าง เมื่อใช้เลเซอร์กระตุ้นให้ PSL เกิดขึ้นอิเล็กตรอนที่ถูกจับจะหลุดออกมาจับกับ Eu^{3+} ทำให้ Eu^{3+} กลายมาเป็น Eu^{2+} แสดงดังรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 กลไกการเกิดลูมิเนสเซนส์ของแผ่นบันทึกภาพ

อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นจะถูกจับในชั้นของฮาโลเจนไอออน (halogen) ที่ว่างอยู่ในแถบคอนดักชัน (conduction band) ของผลึก เมื่อแสงเลเซอร์ทำการกระตุ้นอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนจะเข้าไปรวมกับ Eu^{3+} ทำให้ ไอออน Eu^{3+} กลายเป็น Eu^{2+} กลับลงสู่สถานะพื้นบนแถบวาเลนซ์ (valence band) ของผลึกและปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของรังสี รังสีนี้จะไปกระตุ้นให้เกิดปรากฏการณ์ลูมิเนสเซนส์ ที่ปล่อยแสงออกมา แสงที่ออกมาจะถูกเก็บข้อมูลโดย PMT และถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า