

บทความวิชาการ

ตัวนำยวดยิ่งชนิดมีเหล็กเป็นองค์ประกอบ

อภาพงศ์ ชังจันทร์*

บทคัดย่อ

ตัวนำยวดยิ่งชนิดมีเหล็กเป็นองค์ประกอบเป็นตัวนำยวดยิ่งกลุ่มล่าสุดที่มีการค้นพบในปี 2551 ด้วยโครงสร้างที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบแสดงถึงความสัมพันธ์ของสภาพนำยวดยิ่งกับสภาวะแม่เหล็ก การที่มีค่าอุณหภูมิวิกฤตสูงและค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตบนซึ่งมีค่าสูงมากทำให้ตัวนำยวดยิ่งชนิดนี้มีความน่าสนใจทั้งในด้านสมบัติพื้นฐานและการประยุกต์ใช้งาน ในบทความนี้เรามุ่งความสนใจไปที่การค้นพบและพัฒนาการของตัวนำยวดยิ่งชนิดมีเหล็กเป็นองค์ประกอบ รวมทั้งงานวิจัยในเชิงทฤษฎีที่พยายามจะอธิบายพฤติกรรมของสนามแม่เหล็กวิกฤตบนที่มีค่าสูงมากของตัวนำยวดยิ่งชนิดนี้

คำสำคัญ: ตัวนำยวดยิ่งชนิดมีเหล็กเป็นองค์ประกอบ อุณหภูมิวิกฤต สนามแม่เหล็กวิกฤตบน

Fe-Based Superconductors

Arpamong Changjan*

ABSTRACT

Fe-based superconductors are the recent group of superconductor discovered in 2008. The structure has an iron component that shows the relationship between superconductivity and magnetism. The discovery of Fe-based superconductors with high critical temperature values is also completely unexpected. The very high upper critical magnetic field making this superconductor attractive in terms of fundamental properties and applications. In this article, we focus on the discovery and development of Fe-based superconductors including theoretical research that explains the very high upper critical magnetic field of this material.

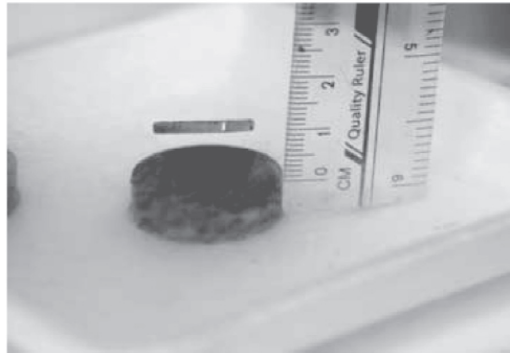
Keywords: Fe-based superconductors, critical temperature, upper critical magnetic field

บทนำ

สมบัติที่สำคัญประการหนึ่งของโลหะ คือ ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิ ซึ่งเป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปแล้วว่า ค่าความต้านทานไฟฟ้าจะแปรผันตรงกับอุณหภูมิ เมื่อลดอุณหภูมิลงค่าความต้านทานไฟฟ้าจะลดลงและเมื่อลดอุณหภูมิลงเรื่อยๆ จนใกล้ถึงศูนย์องศาสัมบูรณ์ค่าความต้านทานจะมีค่าคงตัว เนื่องจากความบกพร่องของโครงสร้างผลึกหรือสารเจือปนในโลหะ [1] แต่สำหรับโลหะและสารผสมบางชนิด เมื่อลดอุณหภูมิลงเรื่อยๆ จนถึงค่าๆ หนึ่ง ค่าความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุจะลดลงเป็นศูนย์อย่างทันทีทันใด เรียกสภาพที่ความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุมีค่าเป็นศูนย์อย่างทันทีทันใดนี้ว่าสภาพนำยวดยิ่ง (superconductivity) เรียกสารที่มีการเปลี่ยนสถานะทางไฟฟ้าในลักษณะนี้ว่า ตัวนำยวดยิ่ง (Superconductor) และเรียกอุณหภูมิที่ทำให้วัสดุเปลี่ยนจากสภาพนำธรรมดาเป็นสภาพนำยวดยิ่งว่า อุณหภูมิวิกฤต (critical temperature)

สภาพนำยวดยิ่งถูกค้นพบเป็นครั้งแรกในปี 2454 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวเนเธอร์แลนด์ชื่อ คาเมอร์ลิง ออนเนส [2] ขณะทำการทดลองวัดสภาพนำไฟฟ้าของโลหะที่อุณหภูมิต่ำ โดยนำปรอทบริสุทธิ์ใส่ลงในภาชนะแล้วแช่ลงในฮีเลียมเหลว เมื่ออุณหภูมิจึงลดลงถึง 4.2 เคลวิน ความต้านทานไฟฟ้าจะมีค่าเป็นศูนย์ทันที

ต่อมาในปี 2476 ไมส์เนอร์และออกเซนเฟลด์ [3] ได้ค้นพบสมบัติพื้นฐานที่สำคัญของตัวนำยวดยิ่งว่า เมื่อลดอุณหภูมิลงจนต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตสนามแม่เหล็กภายนอกจะไม่สามารถทะลุผ่านเข้าไปในสารตัวนำยวดยิ่งได้ และที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตสนามแม่เหล็กสามารถทะลุทะลวงเข้าไปในเนื้อสารได้ แต่เมื่อลดอุณหภูมิลงจนสารเปลี่ยนเป็นตัวนำยวดยิ่งสนามแม่เหล็กจะถูกผลักให้เบนออกมา ทำให้สนามแม่เหล็กภายในมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นสารตัวนำยวดยิ่งจึงมีคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็กไดอาแมกเนติก (perfect diamagnetic) และอธิบายว่าสาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำซึ่งเกิดขึ้นที่ผิวของสารตัวนำยวดยิ่งนั้นสร้างสนามแม่เหล็กต่อต้านสนามแม่เหล็กภายนอกที่เข้าไปกระทำ ความหนาของชั้นกระแสนี้เรียกว่า ระยะทะลุทะลวงลึกของสนาม (field penetration depth) มีค่าประมาณ 10^{-5} - 10^{-6} เซนติเมตร ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner's effect) ในทางปฏิบัติสามารถใช้ปรากฏการณ์นี้ในการตรวจสอบสภาพนำยวดยิ่งได้ โดยตัวนำยวดยิ่งจะสามารถลอยตัวเหนือแม่เหล็กถาวรหรือแม่เหล็กถาวรจะสามารถลอยตัวเหนือตัวนำยวดยิ่งได้



รูปที่ 1 แสดงปรากฏการณ์ไมสเนอร์ที่มีแม่เหล็กถาวรลอยตัวเหนือตัวนำยวดยิ่ง [4]

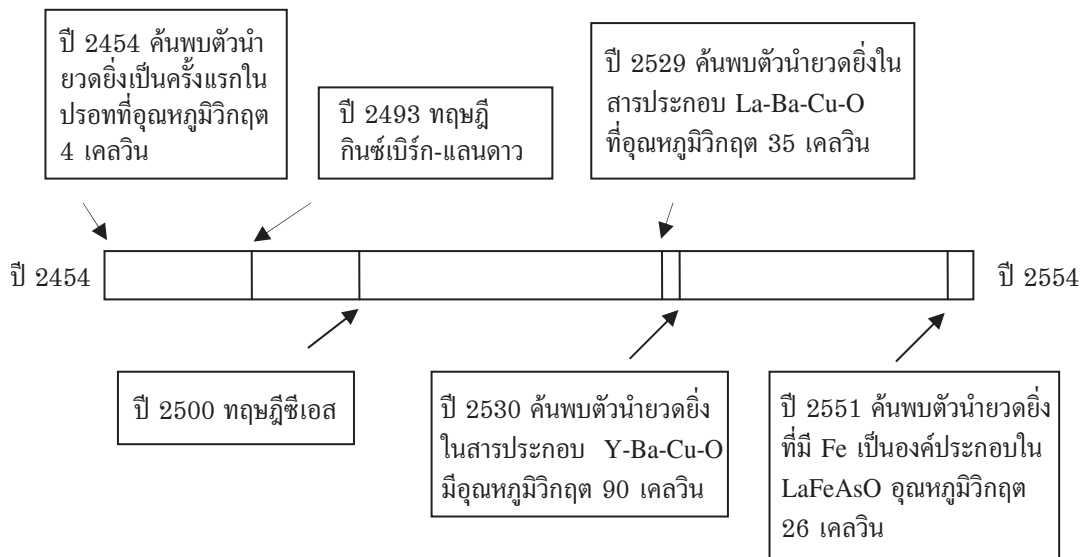
ในสภานำยวดยิ่งสารจะมีสมบัติทางแม่เหล็กและความจุความร้อนจำเพาะเปลี่ยนไป นอกจากนี้ยังพบว่าสภานำยวดยิ่งถูกทำลายด้วยกระแสไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็กที่มีค่าแน่นอนค่าหนึ่ง เรียกระแสไฟฟ้าที่น้อยที่สุดที่ทำให้สภานำยวดยิ่งเปลี่ยนไปเป็นสภานำปกติว่ากระแสวิกฤต (critical current) และเรียกระบบแม่เหล็กที่น้อยที่สุดที่ทำให้สภานำยวดยิ่งเปลี่ยนไปเป็นสภานำปกติว่าสนามแม่เหล็กวิกฤต (critical magnetic fields)

ตัวนำยวดยิ่งที่มีการค้นพบในยุคแรกๆ จะมีอุณหภูมิวิกฤตต่ำมาก ซึ่งไม่สามารถนำมาใช้งานจริงได้ ในช่วงปี 2523 นักฟิสิกส์เชื่อว่าสภานำยวดยิ่งไม่น่าจะสามารถเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิวิกฤตสูงเกินกว่า 30 เคลวิน จนกระทั่งปี 2529 เบทเทอร์ชและมูลเลอร์ [5] พบว่าสารประกอบ La-Cu-O เมื่อถูกเจือด้วยแบเรียม (Ba) จะกลายสภาพเป็นตัวนำยวดยิ่งที่อุณหภูมิประมาณ 35 เคลวิน ซึ่งถือว่าเป็นอุณหภูมิวิกฤตที่สูงมากในยุคนั้น

อีกหนึ่งปีถัดมา กลุ่มวิจัยของวู และคณะ [6] ค้นพบสารประกอบ Y-Ba-Cu-O ที่มีอุณหภูมิวิกฤตในช่วง 90 ถึง 100 เคลวิน และเรียกตัวนำนี้ว่าตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูง (high temperature superconductor) ซึ่งนับว่าเป็นความก้าวหน้าในการประยุกต์ใช้งานตัวนำยวดยิ่ง เพราะสภานำยวดยิ่งอุณหภูมิต่ำนั้นต้องประสบปัญหายุ่งยากในการทดลอง เพราะต้องมีห้องปฏิบัติการที่มีอุณหภูมิต่ำมาก ๆ ซึ่งทำให้ต้องลงทุนสูง เนื่องจากต้องใช้ฮีเลียมเหลวที่มีจุดเดือด 4 เคลวินมาเป็นตัวหล่อเลี้ยง ซึ่งฮีเลียมเหลวนั้นนอกจากมีราคาแพงแล้วยังหายากอีกด้วย ดังนั้นนักวิทยาศาสตร์จึงให้ความสนใจตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงมาก เพราะสามารถใช้ไนโตรเจนเหลวที่มีจุดเดือด 77 เคลวิน ในการหล่อเลี้ยง และไนโตรเจนเหลวก็มีราคาถูกกว่าฮีเลียมเหลวถึง 10 เท่า

การค้นพบนี้ทำให้นักฟิสิกส์ให้ความสนใจกับตัวนำยวดยิ่งในกลุ่มคิวเพรท (cuprate) ซึ่งเป็นกลุ่มของสารประกอบของทองแดง (Cu) และออกซิเจน (O) ว่าจะเป็นตัวนำยวดยิ่งที่สามารถมีอุณหภูมิวิกฤตสูงในระดับอุณหภูมิห้องได้ จากการศึกษาเพิ่มเติมทำให้มีการค้นพบตัวนำยวดยิ่งที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงขึ้นของสารประกอบอื่นๆ ในกลุ่มนี้ เช่น $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_6$ [7] ซึ่งมีอุณหภูมิวิกฤต 110 เคลวิน $\text{Ti}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ [8] ซึ่งมีอุณหภูมิวิกฤต 125 เคลวิน และ $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$ [9] ซึ่งมีอุณหภูมิวิกฤต 153 เคลวิน ภายใต้สภาวะความดันสูง เป็นต้น แต่จนถึงปัจจุบันก็ยังไม่สามารถสังเคราะห์ตัวนำยวดยิ่งให้มีอุณหภูมิวิกฤตสูงถึงระดับดังกล่าวได้

ในปี 2551 ความหวังที่จะสังเคราะห์ตัวนำยวดยิ่งให้มีอุณหภูมิวิกฤตสูงถึงระดับอุณหภูมิห้อง กลับมาอยู่ในกระแสความสนใจของนักฟิสิกส์อีกครั้ง เมื่อมีการค้นพบสภาพนำยวดยิ่งในสารตัวนำยวดยิ่ง ที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบ และสมบัติสำคัญที่ทำให้ตัวนำยวดยิ่งชนิดใหม่นี้มีความน่าสนใจมาก คือ การที่ตัวนำยวดยิ่งชนิดนี้มีค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตบนสูงมาก ซึ่งมีประโยชน์อย่างมากในการประยุกต์ใช้งานจริง เพราะการใช้งานส่วนใหญ่จากตัวนำยวดยิ่ง คือ การใช้งานสนามแม่เหล็กความเข้มสูงที่ตัวนำยวดยิ่งผลิตได้ ไม่ว่าจะเป็นรถไฟพลังงานแม่เหล็ก (MagLev) การสร้างภาพด้วยเรโซแนนซ์แม่เหล็ก (MRI) หรือเครื่องเร่งอนุภาค เป็นต้น



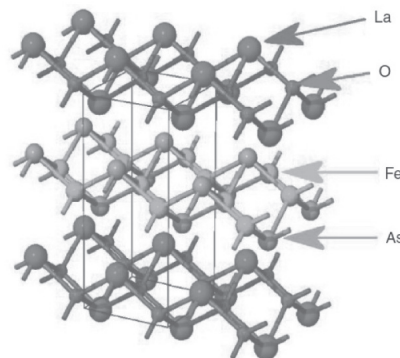
รูปที่ 2 ลำดับเหตุการณ์สำคัญของการค้นพบสภาพนำยวดยิ่ง

สำหรับทฤษฎีที่นับว่าประสบความสำเร็จในการอธิบายสภาพนำยวดยิ่งในปัจจุบันมีอยู่สองทฤษฎีด้วยกัน คือ ทฤษฎีบีซีเอส (BCS theory) (Bardeen, Cooper and Schrieffer) [10] และทฤษฎี กิ้นซ์เบิร์กและแลนดาว (Ginzburg-Landau theory) [11] ซึ่งแต่ละทฤษฎีนั้นเริ่มจากแนวคิดที่ต่างกัน แต่สามารถอธิบายสภาพนำยวดยิ่งได้เหมือนกัน มีข้อเด่นและข้อด้อยต่างกันออกไป กล่าวคือ ทฤษฎีบีซีเอสสามารถอธิบายสภาพนำยวดยิ่งของสารที่มีอุณหภูมิวิกฤตต่ำๆ ได้ แต่ในสารที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงๆ ทฤษฎีบีซีเอสจะให้ผลไม่สอดคล้องกับการทดลอง สำหรับทฤษฎี กิ้นซ์เบิร์กและแลนดาวสามารถที่จะอธิบายตัวนำยวดยิ่งที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงๆ ได้ แต่จะให้ผลสอดคล้องกับการทดลองในบริเวณรอบๆ อุณหภูมิวิกฤตเท่านั้น ในช่วงอุณหภูมิที่ไกลออกไปจากอุณหภูมิวิกฤตทฤษฎี กิ้นซ์เบิร์กและแลนดาวก็จะให้ผลที่ไม่สอดคล้องกับการทดลอง นอกจากนี้แนวคิดเริ่มต้นของทั้งสองทฤษฎีนี้ก็ยังคงเริ่มต้นมาจากคนละแนวคิด กล่าวคือ แนวคิดของทฤษฎีบีซีเอสนั้นจะเริ่มมาจากการพิจารณาระบบในระดับจุลภาค (microscopic) แต่ในทฤษฎี กิ้นซ์เบิร์กและแลนดาวจะเริ่มอธิบายระบบในระดับมหภาค (macroscopic)

จากสมบัติที่น่าสนใจของตัวนำยวดยิ่งชนิดมีเหล็กเป็นองค์ประกอบที่เพิ่งค้นพบใหม่นี้ทำให้ทีมงานวิจัยทั้งในเชิงการทดลองและเชิงทฤษฎีตีพิมพ์เป็นจำนวนมากในช่วง 2 ปีที่ผ่านมา จุดประสงค์ของบทความนี้จะกล่าวถึงการค้นพบและพัฒนาการของตัวนำยวดยิ่งชนิดมีเหล็กเป็นองค์ประกอบ รวมทั้งงานวิจัยในเชิงทฤษฎีที่พยายามจะอธิบายพฤติกรรมสนามแม่เหล็กวิกฤตบนที่มีค่าสูงมากของตัวนำยวดยิ่งชนิดนี้

เนื้อหา

ในเดือนกุมภาพันธ์ 2551 ฮิเดโอะ โฮโซโนะ และทีมวิจัย [12] จากสถาบันเทคโนโลยีโตเกียว (Tokyo Institute of Technology) ได้รายงานการค้นพบสภาพนำยวดยิ่งในตัวนำยวดยิ่ง LaFeAsO ที่มีการเจือฟลูออรีน โดยสารชนิดนี้จะแสดงสมบัติการเป็นตัวนำยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 26 เคลวิน การค้นพบครั้งนี้ อาจจะนับว่าเป็นเรื่องบังเอิญก็ได้ เพราะจริงๆ แล้วโฮโซโนะและทีมวิจัยมีจุดประสงค์ที่จะสังเคราะห์สารกึ่งตัวนำแบบโปร่งแสง (transparent semiconductor) เพื่อประยุกต์ใช้งานสำหรับหน้าจอกอมพิวเตอร์หรืออุปกรณ์แสดงผลอื่นๆ จากการวิจัยพบว่าวัสดุที่มีสมบัติตามที่ต้องการมีแนวโน้มอยู่ในกลุ่มของ LaOCuCh เมื่อ Ch คือ ธาตุในกลุ่มแชลโคเจน (chalcogen) เช่น ซัลเฟอร์ (sulfur) เซลิเนียม (selenium) หรือเทลลูเรียม (tellurium) หลังจากนั้นโฮโซโนะและทีมวิจัยได้ศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุชนิดนี้โดยการแทนที่อะตอมของทองแดง (Cu) ด้วยเหล็ก (Fe) หรือโลหะทรานซิชันชนิดอื่นๆ ที่สามารถแสดงสมบัติทางแม่เหล็กได้ แต่การกระทำเช่นนี้ทำให้โครงสร้างผลึกอยู่ชิดกันมากขึ้น ส่งผลให้โครงสร้างของสารไม่เสถียรเพื่อแก้ปัญหาโฮโซโนะและทีมวิจัยจึงต้องแทนที่ธาตุในกลุ่มแชลโคเจนด้วยธาตุในกลุ่มนิคโทเจน (pnictogen) เช่น ฟอสฟอรัส (phosphorus) หรืออาร์เซนิก (arsenic) และเมื่อทำการวัดสมบัติทางไฟฟ้าของสารที่เตรียมขึ้นพบว่า LaFePO และ LaFeAsO ที่มีการเจือฟลูออรีนแสดงสมบัติการเป็นตัวนำยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 4 และ 26 เคลวิน ตามลำดับ



รูปที่ 3 โครงสร้างผลึกของตัวนำยวดยิ่ง LaFeAsO [13]

การค้นพบสภาพนำยวดยิ่งในลักษณะนี้สร้างความประหลาดใจให้กับนักฟิสิกส์เป็นอย่างมาก เพราะโดยปกติเป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำยวดยิ่งและอำนาจแม่เหล็กมีความสัมพันธ์ในเชิงต่อต้านกัน ทำให้นักวิจัยหลีกเลี่ยงที่จะใช้สารแม่เหล็ก โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารแม่เหล็กเฟอร์โร (ferromagnetic) ซึ่งเป็นสารที่มีสภาพความเป็นแม่เหล็กสูงในการสังเคราะห์สารตัวนำยวดยิ่ง การค้นพบสภาพนำยวดยิ่งในสารชนิดนี้จึงเป็นเหมือนอีกทางเลือกหนึ่งในการสังเคราะห์สารตัวนำยวดยิ่งที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงขึ้น นอกเหนือจากสารตัวนำยวดยิ่งในกลุ่มคิวเพรทซึ่งมีการศึกษากันมานานกว่า 2 ทศวรรษ

สมบัติที่สำคัญอีกประการหนึ่งซึ่งทำให้ตัวนำยวดยิ่งชนิดนี้มีความน่าสนใจ คือ การที่ตัวนำยวดยิ่งชนิดนี้มีค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตบน (upper critical field) สูงมาก ส่งผลให้ค่ากระแสวิกฤต (critical current) มีค่าสูงตามไปด้วย จากจุดนี้ก็จะเห็นว่าตัวนำยวดยิ่งชนิดนี้มีความน่าสนใจในการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง เพราะโดยส่วนมากแล้วในการใช้งานตัวนำยวดยิ่งเราจะใช้ประโยชน์จากการที่ตัวนำชนิดนี้ไม่มีความต้านทาน จึงสามารถนำกระแสได้มาก ทำให้สามารถผลิตสนามแม่เหล็กความเข้มสูงมาใช้งานได้ แต่ในขณะที่เดียวกันถ้าปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ผ่านตัวนำยวดยิ่งมีค่ามากกว่าค่ากระแสวิกฤต ตัวนำยวดยิ่งจะสูญเสียสภาพนำยวดยิ่งทันที ทำให้ไม่สามารถผลิตสนามแม่เหล็กความเข้มสูงได้ ดังนั้นนอกจากความน่าสนใจในสมบัติพื้นฐานต่างๆ ซึ่งแตกต่างจากตัวนำยวดยิ่งชนิดอื่นๆ แล้ว ตัวนำยวดยิ่งชนิดนี้ยังมีความน่าสนใจในการประยุกต์ใช้งานอีกด้วย

จากความน่าสนใจในแง่มุมต่างๆ ของตัวนำยวดยิ่งชนิดนี้มีเหล็กเป็นองค์ประกอบนี้ทำให้เกิดความตื่นตัวในวงการวิทยาศาสตร์เป็นอย่างมาก ซึ่งจะเห็นได้จากการที่มีการตีพิมพ์บทความวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวนำยวดยิ่งชนิดนี้ ทั้งในเชิงการทดลอง และเชิงทฤษฎีมากกว่า 1,000 บทความ ในช่วง 2 ปีที่ผ่านมา [14]

หลังจากโฮโซโนะและทีมวิจัยได้รายงานการค้นพบสภาพนำยวดยิ่งในตัวนำยวดยิ่ง LaFeAsO ที่มีการเจือฟลูออรีนที่อุณหภูมิวิกฤต 26 เคลวินแล้วนั้นได้มีความพยายามจากหลายทีมวิจัยที่จะพัฒนาให้ตัวนำยวดยิ่งชนิดนี้มีอุณหภูมิวิกฤตที่สูงขึ้นด้วยวิธีการที่หลากหลาย เช่น การเตรียมสารในสภาวะความดันสูง การเจือด้วยสารชนิดอื่นหรือการแทนที่โครงสร้างของสารด้วยอะตอมของสารอื่น เป็นต้น รวมถึงการวัดสมบัติพื้นฐานต่างๆ เพื่อความเข้าใจในกลไกการเกิดสภาพนำยวดยิ่งของสารชนิดนี้ได้ดียิ่งขึ้น

หลังจากที่โฮโซโนะ และคณะ ได้รายงานการค้นพบตัวนำยวดยิ่งชนิดใหม่นี้ได้ไม่ถึง 3 เดือนในเดือนเมษายน เร็น และคณะ [15] ได้รายงานการค้นพบสภาพนำยวดยิ่งในตัวนำยวดยิ่ง $\text{Sm}[\text{O}_{1-x}\text{F}_x]\text{FeAs}$ ซึ่งมีอุณหภูมิวิกฤตสูงถึง 55 เคลวิน โดยตัวนำยวดยิ่งชนิดนี้มีโครงสร้างที่คล้ายคลึงกับตัวนำยวดยิ่ง LaFeAsO ที่มีการเจือฟลูออรีน แต่มีขนาดโครงร่างผลึกเล็กกว่า จากการค้นพบครั้งนี้ทำให้ตัวนำยวดยิ่งชนิดนี้มีเหล็กเป็นองค์ประกอบเป็นตัวนำยวดยิ่งที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงสุดเมื่อเทียบกับตัวนำยวดยิ่งในกลุ่มอื่นที่นอกเหนือไปจากตัวนำยวดยิ่งในกลุ่มออกไซด์ของทองแดง

ต่อมาในเดือนกรกฎาคม ซู และคณะ [16] ได้เตรียมสารตัวนำยวดยิ่ง $\text{LaFeAsO}_{0.9}\text{F}_{0.1-\delta}$ โดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid state reaction) และได้ศึกษาพฤติกรรมของความต้านทานเทียบกับการเปลี่ยนแปลงค่าสนามแม่เหล็กภายนอก ทำให้สามารถประมาณค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตบนที่อุณหภูมิศูนย์เคลวินได้สูงถึง 50 เทสลา

สำหรับงานวิจัยในทางทฤษฎีก็มีความสำคัญไม่น้อยไปกว่างานวิจัยในด้านการทดลอง เพราะการจะสังเคราะห์สารนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงเพื่อใช้งานนั้นเราต้องมีความเข้าใจในกลไกการเกิดสภาพนำยวดยิ่ง

เพื่อจะได้นำความรู้ที่มีมาออกแบบโครงสร้างของสารเพื่อให้เอื้อกับการเกิดสภาพนำยวดยิ่งมากที่สุด รวมถึงความเข้าใจในสมบัติพื้นฐานต่างๆ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานต่อไป

เนื่องจากโครงสร้างของสารตัวนำยวดยิ่งในกลุ่มคิวเพรทและในกลุ่มที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบมีความแตกต่างกัน ดังนั้นกลไกการเกิดสภาพนำยวดยิ่งของสารทั้งสองชนิดจึงน่าที่จะมีความแตกต่างกันด้วย เพื่อที่จะยืนยันแนวคิดนี้ นากามูระ และคณะ [13] ได้ศึกษาระดับชั้นพลังงานของตัวนำยวดยิ่งชนิดมีเหล็กเป็นองค์ประกอบโดยการสร้างแบบจำลองจากการคำนวณเชิงตัวเลขแล้วนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง เพื่อที่จะอธิบายกลไกการเกิดสภาพนำยวดยิ่งของสารตัวนำยวดยิ่งชนิดมีเหล็กเป็นองค์ประกอบเป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าการสั่นของโครงร่างผลึก (lattice vibration) เป็นปัจจัยสำคัญของการเกิดสภาพนำยวดยิ่ง นากามูระ และคณะ ได้จำลองการสั่นของโครงร่างผลึกจากการคำนวณเชิงตัวเลขแล้วนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง พบว่าผลจากการคำนวณและผลการทดลองมีความสอดคล้องกันถ้ามีการรวมผลกระทบที่เกิดขึ้นเนื่องจากสภาวะแม่เหล็กที่ไม่สามารถตรวจวัดจากการทดลองในขณะนี้ได้ จากผลที่ได้ นากามูระ และคณะ สรุปว่าสำหรับตัวนำยวดยิ่งชนิดมีเหล็กเป็นองค์ประกอบกลไกการเกิดสภาพนำยวดยิ่งนอกจากจะเกิดจากการสั่นของโครงร่างผลึกแล้วสภาวะความเป็นแม่เหล็กก็เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่มีความสำคัญต่อกลไกการเกิดสภาพนำยวดยิ่ง แม้ว่าจะยังไม่ทราบรูปแบบความสัมพันธ์ที่แน่นอนก็ตาม

สำหรับสมบัติที่สำคัญประการหนึ่งของตัวนำยวดยิ่งชนิดมีเหล็กเป็นองค์ประกอบ คือ การมีค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตบนสูงมาก เป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปแล้วว่า ถ้าแบ่งประเภทของตัวนำยวดยิ่งโดยใช้สมบัติทางแม่เหล็กเป็นเกณฑ์จะแบ่งตัวนำยวดยิ่งได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่ ตัวนำยวดยิ่งประเภทที่ 1 (Type I superconductor) ซึ่งมีค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตเพียงค่าเดียว และตัวนำยวดยิ่งประเภทที่ 2 (Type II superconductor) ซึ่งมีค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตสองค่า คือ ค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตบน (upper critical field) ซึ่งคือค่าสนามแม่เหล็กที่น้อยที่สุดที่สามารถทำลายสภาพนำยวดยิ่งได้อย่างสมบูรณ์ และค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตล่าง (lower critical field) ซึ่งคือค่าสนามแม่เหล็กที่น้อยที่สุดที่สามารถเริ่มทะลุผ่านตัวนำยวดยิ่งได้ โดยส่วนมากตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงจะเป็นตัวนำยวดยิ่งประเภทที่ 2

แนวคิดเรื่องการแบ่งประเภทตัวนำยวดยิ่งออกเป็น 2 ชนิด โดยใช้สมบัติทางแม่เหล็กเป็นเกณฑ์ถูกนำเสนอโดยอริโคซอฟ (Abrikosov) [17] เขาได้ทำการศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กของตัวนำยวดยิ่งจากแนวคิดของทฤษฎีกินซ์เบิร์กและแลนดาว จากการคำนวณพบว่าในตัวนำยวดยิ่งซึ่งมีค่าอัตราส่วนระหว่างค่าระยะทะลวงลึกของสนามและค่าความยาวอาพันธ์ (ระยะห่างของอิเล็กตรอนที่จับกันเป็นคู่คูเปอร์) มากกว่า $\frac{1}{\sqrt{2}}$ จะแสดงสมบัติทางแม่เหล็กที่แตกต่างออกไป คือ จะมีค่าสนามแม่เหล็กวิกฤต 2 ค่า เรียกค่าอัตราส่วนระหว่างค่าระยะทะลวงลึกของสนามและค่าความยาวอาพันธ์นี้ว่าค่ากินซ์เบิร์ก-แลนดาวพารามิเตอร์ (Ginzburg-Landau parameter) และสามารถใช้นี้ในการแบ่งประเภทของตัวนำยวดยิ่ง โดยตัวนำยวดยิ่งประเภทที่ 1 จะมีค่ากินซ์เบิร์ก-แลนดาวพารามิเตอร์น้อยกว่า $\frac{1}{\sqrt{2}}$ และตัวนำยวดยิ่งประเภทที่ 2 จะมีค่ากินซ์เบิร์ก-แลนดาวพารามิเตอร์มากกว่า $\frac{1}{\sqrt{2}}$

โดยปกติแล้วปัจจัยที่ทำลายสภาพนำยวดยิ่งนอกจากอุณหภูมิแล้วสนามแม่เหล็กภายนอกก็เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่สามารถทำลายสภาพนำยวดยิ่งได้เช่นเดียวกัน คือ สำหรับตัวนำยวดยิ่งประเภทที่ 1 เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตสนามแม่เหล็กภายนอกจะไม่สามารถผ่านเข้าไปในสารตัวนำยวดยิ่งได้ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner's effect) แต่ถ้าเพิ่มค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก

ภายนอกจนเท่ากับสนามแม่เหล็กวิกฤตแล้วสภาพนำยวดยิ่งจะถูกทำลาย และสนามแม่เหล็กภายนอกจะสามารถทะลุผ่านเข้าไปในสารตัวนำยวดยิ่งได้ และสำหรับตัวนำยวดยิ่งประเภทที่ 2 เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตตัวนำยวดยิ่งจะแสดงปรากฏการณ์ไมสเนอร์ได้อย่างสมบูรณ์ เช่นเดียวกับกรณีตัวนำยวดยิ่งประเภทที่ 1 แต่เมื่อเพิ่มค่าความเข้มสนามแม่เหล็กภายนอกจนเท่ากับสนามแม่เหล็กวิกฤตล่างจะมีเส้นแรงแม่เหล็กบางส่วนที่สามารถทะลุผ่านเข้าไปในสารตัวนำยวดยิ่งได้ ดังนั้นในช่วงนี้ในเนื้อของวัสดุจึงมีส่วนทั้งที่เป็นสภาพนำยวดยิ่งและสภาพนำปกติผสมกันอยู่ เมื่อเพิ่มค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตจนกระทั่งมีค่ามากกว่าสนามแม่เหล็กวิกฤตบน เส้นแรงแม่เหล็กจากภายนอกจะทะลุเข้าไปได้อย่างสมบูรณ์ วัสดุจะสูญเสียสภาพนำยวดยิ่งและกลายเป็นสภาพนำปกติโดยสิ้นเชิง ดังนั้นการที่ตัวนำยวดยิ่งชนิดมีเหล็กเป็นองค์ประกอบมีค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตบน (Upper critical field) สูงมาก จึงเป็นประเด็นสำคัญที่ทำให้ตัวนำยวดยิ่งถูกจับตามองเป็นพิเศษ

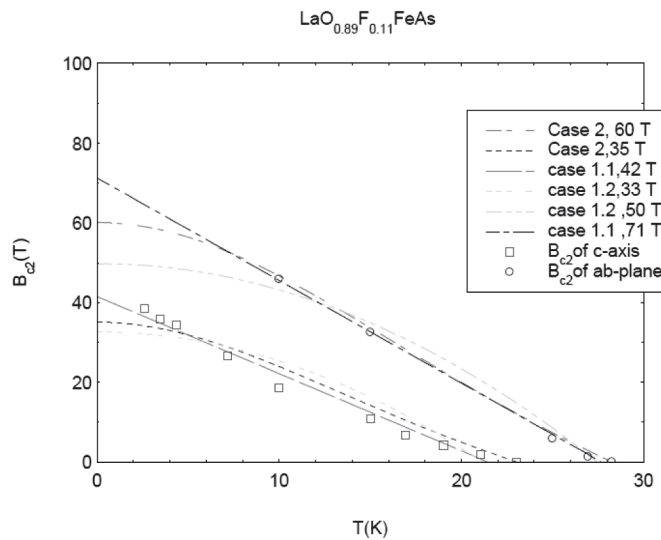
ในการตรวจวัดค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตวิธีหนึ่งที่เป็นที่นิยม คือ การใช้ AC Magnetic Susceptibility โดยอาศัยหลักการในการวัดค่า magnetic susceptibility (อัตราส่วนระหว่างค่าแมกนีไทเซชันกับสนามแม่เหล็กภายนอก) เทียบกับอุณหภูมิ [18] สำหรับในประเทศไทยมีกลุ่มวิจัยที่ทำงานทางด้านตัวนำยวดยิ่งทั้งในด้านการทดลองและทฤษฎี เช่น มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ มหาวิทยาลัยมหิดล และมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เป็นต้น

สำหรับทฤษฎีที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของสนามแม่เหล็กวิกฤตที่เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปในปัจจุบันคือ ทฤษฎีกินซ์เบิร์กและแลนดาว (Ginzburg-Landau Theory) ซึ่งเป็นทฤษฎีในระดับมหภาค (macroscopic) ที่มุ่งเน้นจะอธิบายผลการทดลอง โดยแนวคิดเริ่มต้นของทฤษฎีนี้เริ่มมาจากการพิจารณาตัวแปรที่บอกความเป็นระเบียบ (order parameter) โดยค่าตัวแปรที่บอกความเป็นระเบียบจะมีค่าต่างกันไปแล้วแต่ปรากฏการณ์ที่ต้องการจะอธิบาย โดยสมบัติที่สำคัญของตัวแปรที่บอกความเป็นระเบียบ คือ ต้องมีค่าเป็นศูนย์เมื่ออยู่เหนือจุดวิกฤตและต้องมีค่าจำกัดเมื่ออยู่ต่ำกว่าจุดวิกฤต เช่น ในกรณีที่สารแม่เหล็กเฟอร์โร (ferromagnetic) มีการเปลี่ยนสถานะเป็นสารแม่เหล็กพารา (paramagnetic) ใช้ค่าแมกนีไทเซชัน (magnetization) เป็นตัวแปรที่บอกความเป็นระเบียบ เพราะเมื่อเราให้ความร้อนกับสารแม่เหล็กเฟอร์โรจนถึงอุณหภูมิคูรี (curie temperature) สารแม่เหล็กเฟอร์โรซึ่งมีค่าแมกนีไทเซชันไม่เป็นศูนย์จะเปลี่ยนสถานะกลายเป็นสารแม่เหล็กพาราซึ่งมีค่าแมกนีไทเซชันเป็นศูนย์ สำหรับในกรณีของสภาพนำยวดยิ่งทฤษฎีกินซ์เบิร์กและแลนดาว ใช้ความหนาแน่นของความเป็นของฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอนในสภาพนำยวดยิ่งเป็นตัวแปรที่บอกความเป็นระเบียบ โดยค่าของตัวแปรนี้เป็นไปตามเงื่อนไข คือ จะมีค่าเป็นศูนย์เมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤต และมีค่าจำกัดเมื่ออุณหภูมิมิมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต

$$|\psi|^2 = \begin{cases} 0 & \text{เมื่อ } T > T_c \\ \text{ค่าคงที่} & \text{เมื่อ } T < T_c \end{cases} \quad (1)$$

เมื่อ $|\nu|^2$ คือ ความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอนในสภานำยวดยิ่ง จากแนวคิดของทฤษฎีกินซ์เบิร์กและแลนดาว ซึ่งจันท์ และอุดมสมุททธิรัฐ [19,20] ได้นำมาใช้อธิบายสนามแม่เหล็กวิกฤตของตัวนำยวดยิ่งชนิดมีเหล็กเป็นองค์ประกอบ โดยเริ่มจากการพิจารณาพลังงานอิสระแบบสองแถบพลังงานที่ขึ้นกับทิศทาง จากนั้นจึงคำนวณเพื่อหาค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตบนโดยการแปรค่าพลังงานอิสระเทียบกับค่าคอนจูเกตของตัวแปรที่บอกความเป็นระเบียบ ค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตล่างโดยการแปรค่าพลังงานอิสระเทียบกับศักย์เวกเตอร์ (\vec{A}) และค่าอัตราส่วนสนามแม่เหล็กวิกฤต (Critical magnetic field ratio) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตบนและค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตล่าง ค่าอัตราส่วนสนามแม่เหล็กวิกฤตเป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดขึ้นเพื่อให้ นักทดลองทำงานได้สะดวกขึ้น เพราะในทางปฏิบัติแล้วการวัดค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตบนของตัวนำยวดยิ่งทั่วไปสามารถวัดได้ง่ายกว่าค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตล่าง เพราะเมื่อเพิ่มค่าสนามแม่เหล็กภายนอกจนถึงค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตบน สนามแม่เหล็กทั้งหมดจะสามารถทะลุผ่านเข้าไปในวัสดุได้อย่างสมบูรณ์ วัสดุจะสูญเสียสภาพนำยวดยิ่งและกลายเป็นสภาพนำปกติทันที เราจึงสามารถวัดค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตบนจากสภาพนำไฟฟ้าของวัสดุได้ แต่สำหรับการวัดค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตล่างเป็นการวัดค่าสนามแม่เหล็กที่น้อยที่สุดที่สามารถทะลุผ่านวัสดุเข้าไปได้ จึงเป็นการยากที่จะวัดค่าสนามแม่เหล็กในเนื้อวัสดุ หรืออย่างไรกรณีตัวนำยวดยิ่งชนิดมีเหล็กเป็นองค์ประกอบ ซึ่งมีค่าสนามแม่เหล็กบนสูงมากจนไม่สามารถวัดค่าโดยวิธีปกติได้ ค่าอัตราส่วนสนามแม่เหล็กวิกฤตจะช่วยให้ นักทดลองสามารถประมาณค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตได้สะดวกยิ่งขึ้น

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กวิกฤตบนกับอุณหภูมิจากแบบจำลอง 2 กรณี ได้แก่ แบบจำลองทฤษฎีกินซ์เบิร์กแลนดาวแบบปรับปรุง ซึ่งแยกพิจารณาเป็นกรณีที่ค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตบนมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิแบบเชิงเส้น (กรณี 1.1) และแบบไม่เป็นเชิงเส้น (กรณี 1.2) จะได้สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กวิกฤตบนกับอุณหภูมิเป็น $B_{c2}(t) = B_{c2}(0)(1-at)$ และ $B_{c2}(t) = B_{c2}(0)(1+at^2)$ ตามลำดับ สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กวิกฤตบนกับอุณหภูมิอีกหนึ่งกรณีพิจารณาตามแบบจำลองของ ชู และคณะ (Zhu et., al.) [16] (กรณี 2) จะได้สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กวิกฤตบนกับอุณหภูมิเป็น $B_{c2}(t) = B_{c2}(0)\frac{1-t^2}{1+t^2}$ เมื่อ $t = \frac{T}{T_c}$, a คือ ค่าคงที่ใดๆ ที่หาได้จากการทดลอง $B_{c2}(0)$ และ $B_{c2}(t)$ คือ ค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตบนที่อุณหภูมิศูนย์เคลวินและอุณหภูมิใดๆ ตามลำดับ



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตบนเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ $\text{LaO}_{0.89}\text{F}_{0.11}\text{FeAs}$ [21]

เมื่อนำผลที่ได้จากการคำนวณมาพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตบนมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองของค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตบนตามแนวแกน c (สนามแม่เหล็กมีทิศตั้งฉากกับระนาบของโครงสร้างผลึก) และค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตบนตามแนวระนาบ ab (สนามแม่เหล็กมีทิศขนานกับระนาบของโครงสร้างผลึก) จากผลการทดลองจะเห็นว่าค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตบนมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำลง และค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตบนที่อุณหภูมิศูนย์เคลวิน (ตัวเลขที่แสดงด้านหลังในแต่ละกรณี) จากการคำนวณที่สอดคล้องกับผลการทดลองมีค่าอยู่ในช่วง 42-71 เทสลา [21] ซึ่งนับว่าเป็นค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตที่สูงมากเมื่อเทียบกับตัวนำยวดยิ่งในกลุ่มอื่นๆ

สรุป

ตัวนำยวดยิ่งชนิดมีเหล็กเป็นองค์ประกอบนับเป็นตัวนำยวดยิ่งกลุ่มล่าสุดที่มีการค้นพบด้วยโครงสร้างที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบและค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตที่มีค่าสูงมาก ทำให้ตัวนำยวดยิ่งชนิดนี้มีความน่าสนใจทั้งในด้านสมบัติพื้นฐานและการประยุกต์ใช้งานในช่วงเวลาไม่นานนับจากการรายงานการค้นพบสภาพนำยวดยิ่งของตัวนำยวดยิ่งกลุ่มนี้เป็นครั้งแรกที่อุณหภูมิวิกฤต 26 เคลวิน เพิ่มขึ้นเป็น 55 เคลวิน ภายในเวลาไม่ถึง 3 เดือน จำนวนบทความวิจัยที่ตีพิมพ์มากกว่า 1,000 เรื่อง ในเวลา 2 ปี น่าจะเป็นสิ่งยืนยันได้เป็นอย่างดีสำหรับความน่าสนใจของตัวนำยวดยิ่งชนิดใหม่นี้ ซึ่งน่าจะเป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการเข้าใกล้ตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิห้องนอกเหนือจากตัวนำยวดยิ่งกลุ่มอื่นๆ

อย่างไรก็ตามกลไกการเกิดสภาพนำยวดยิ่งเป็นเรื่องที่มีความซับซ้อนมาก การศึกษาที่ผ่านมาทั้งทางด้านทฤษฎีและการทดลองทำให้ประเด็นปัญหาบางประเด็นกระจ่างขึ้น แต่ก็ยังมีอีกหลายประเด็นปัญหาที่ยังไม่สามารถตอบได้อย่างชัดเจน ดังนั้นงานวิจัยทางด้านตัวนำยวดยิ่งจึงยังคงเปิดกว้างแก่นักวิจัยในปัจจุบัน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์แก้ว อุดมสมุทรหิรัญ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ สำหรับคำแนะนำในการเขียนบทความชิ้นนี้

เอกสารอ้างอิง

1. Serway, R. A., and Jewett, J. W. 2004. Physics for Scientists and Engineers. 6th Edition. UK. Thompson/Brooks/Cole. p. 843-844.
2. Ketterson, J. B., and Song, S. N. 1999. Superconductivity. 1st Edition. UK. Cambridge University Press. p. 1-4.
3. Buckel, W. 1991. Superconductivity: Fundamentals and Applications. Weinheim. VCH. p. 112.
4. Kruaehong, T., Nilkamjon, T., Ratreng, S., Theamyim, N., Tambamrung, P., Doungrod, S., and Udomsamuthirun, P. 2009. The Construction of Maglev Train Model. *Srinakharinwirot Science Journal* 25(2): 91-100. (in Thai).
5. Bednorz, J. G., and Müller, K. A. 1986. Possible High T_c Superconductivity in the Ba-La-Cu-O System. *Zeitschrift fur Physik B Condensed Matter* 64(1): 189-193.
6. Wu, M.K., Ashburn, J. R., Torng, C. J., Hor, P. H., Meng, R. L., Gao, L., Huang, Z. J., Wang, Y. Q., and Chu, C. W. 1987. Superconductivity at 93 K in a New Mixed-Phase Y-Ba-Cu-O Compound System at Ambient Pressure. *Physical Review Letters* 58(9): 908-910.
7. Hazen, R. M., Prewitt, C. T., Angel, R. J., Ross, N. L., Finger, L. W., Hadidiacos, C. G., Veblen, D. R., Heaney, P. J., Hor, P. H., Meng, R. L., Sun, Y. Y., Wang, Y. Q., Xue, Y. Y., Huang, Z. J., Gao L., Bechtold, J., and Chu, C. W. 1988. Superconductivity in the High- T_c Bi-Ca-Sr-Cu-O System: Phase Identification. *Physical Review Letters* 60(12): 1174.
8. Sheng, Z. Z., and Hermann, A. M. 1988. Superconductivity in the Rare-Earth-Free Tl-Ba-Cu-O System above Liquid-Nitrogen Temperature. *Nature* 332: 55-58.
9. Chu, C. W., Gao, L., Chen, F., Hung, Z. J., Meng, R. L., and Xue, Y. Y. (1993). Superconductivity above 150 K in $HgBa_2Ca_2Cu_3O_{8+\delta}$ at High Pressures. *Nature* 365 (6444): 323.
10. Bardeen, J., Cooper, N., and Schrieffer, J. R. 1959. Theory of Superconductivity. *Physical Review* 108(5): 1175-1204.
11. Fetter, A. L., and Walecka, J. D. 1995. Quantum Theory of Many-Particle System. 1st Edition. Taiwan. McGraw-Hill, Inc. p. 430.
12. Kamihara, Y., Watanabe, T., Hirano, M., and Hosono, H. 2008. Iron-Based Layered Superconductor $La[O_{1-x}F_x]FeAs$ ($x = 0.05-0.12$) with $T_c = 26$ K. *Journal of American Chemical Society* 130(11): 3296-3297.

13. Nakamura, H., Hayashi, N., Nakai, N., and Machida, M. 2008. First-Principle Electronic Structure Calculations for Iron-Based Superconductors: An LSDA+U Study. *Journal of the Physical Society of Japan* 77: 153-154.
14. Paglione, J., and Greene, R. L. 2010. High-Temperature Superconductivity in Iron-Based Materials. *Nature Physics* 6: 645-658.
15. Ren, Z. A., Lu, W., Yang, J., Yi, W., Shen, X. L., Li, Z. C, Che, G. C., Dong, X. L., Sun, L. L., Zhou, F., and Zhao, Z. X. 2008. Superconductivity at 55K in Iron-Based F-Doped Layered Quaternary Compound $\text{Sm}[\text{O}_{1-x}\text{F}_x]\text{FeAs}$. *Chinese Physics Letter* 25(6): 2215-2216.
16. Zhu, X., Yang, H., Fang, L., Mu, G., and Wen, H. H. 2008. Upper Critical Field, Hall Effect and Magnetoresistance in the Iron-Based layered Superconductor $\text{LaFeAsO}_{0.9}\text{F}_{0.1-\delta}$. *Superconductor Science and Technology* 21: 105001-105006.
17. Abrikosov, A. A. 1957. On the Magnetic Properties of Superconductors of the Second Group. *Journal of Experimental and Theoretical Physics* 5(6): 1142-1452.
18. Youssif, M. I., Bahgat, A. A., and Ali, I. A. 2000. AC Magnetic Susceptibility Technique for the Characterization of High Temperature Superconductors. *Egyptian Journal of Solids* 23(2): 231-250.
19. Changjan, A., and Udomsamuthirun, P. 2010. Critical Magnetic Field Ratio of Anisotropic Magnetic Superconductors. *Physica C: Superconductivity* 471: 23-25.
20. Changjan, A., and Udomsamuthirun, P. 2011. The Critical Magnetic Field of Anisotropic Two-Band Magnetic Superconductors. *Solid State Communications* 151: 988-992.
21. Changjan, A., and Udomsamuthirun, P. 2011. Investigate the Upper Critical Magnetic Field of Fe-Based Superconductors. Proceedings of the 2nd International Conference on Applied Science (ICAS) & The 3rd International Conference on Science and Technology for Sustainable Development of the Greater Mekong Sub-Region (STGMS). 24-25 March 2011. Souphanouvong University. Luang Prabang. Lao PDR. p. 224-229.

ได้รับบทความวันที่ 19 ตุลาคม 2554

ยอมรับตีพิมพ์วันที่ 31 มกราคม 2555

