

การพัฒนากลไกแยกแรงสั่นสะเทือนความถี่ต่ำต้นแบบด้วยสปริงลม

The Development of a Prototype Mechanism for Vibration Isolation Using Air Spring

พงษ์พันธุ์ ฤกษ์จุมทรัพย์ และ ประเสริฐ ปราชญ์ประยูร

Pongpun Rerkkumsup and Prasert Prachprayoon

สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

833 ถ.พระราม 1 แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 โทร. 0-2219-3833 ต่อ 244 โทรสาร 0-2219-3855

E-mail: pongpun@ptwit.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้กล่าวถึงการออกแบบ และการสร้างกลไกแยกแรงสั่นสะเทือนความถี่ต่ำต้นแบบ เพื่อใช้ศึกษาและพัฒนาวิธีการลดทอนแรงสั่นสะเทือนความถี่ต่ำจากฐานรากเข้าระบบกวนระบบทดลอง กลไกต้นแบบถูกออกแบบและสร้างบนหลักการของระบบมวล-สปริง โดยใช้สปริงลมจำนวน 3 ตัวเป็นระบบดูดซับแรงสั่นสะเทือนจากฐานราก จากนั้นศึกษาพฤติกรรมของแรงสั่นสะเทือนที่ส่งผ่านเข้าสู่ระบบทดลอง และศึกษาอัตราส่วนการลดทอนแรงสั่นสะเทือนที่เข้าระบบเมื่อปรับแรงดันลมที่ป้อนให้แก่สปริงลมด้วยแรงดันที่แตกต่างกัน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ากลไกแยกแรงสั่นสะเทือนความถี่ต่ำต้นแบบที่พัฒนาขึ้นสามารถลดทอนแรงสั่นสะเทือนความถี่ต่ำย่าน 1 - 5 Hz ได้เฉลี่ยร้อยละ 85 เมื่อป้อนแรงดันลมให้แก่สปริงลมในย่าน 2 - 4 bar

Abstract

This research article describes the design and construction of a prototype mechanism for low frequency vibration isolation used to study and develop the method to suppress the low frequency vibration from floor which will disturb the experimental system. A prototype mechanism is designed and constructed based on a mass-spring system using three air springs as vibration suspension system then studies the behavior of vibration pass through the system and ratio of suspension pass through the system when different air pressure is supplied to the air springs. The experimental results show that the prototype mechanism for vibration isolation can suppress

the low frequency vibration, which frequency is in a range of 1-5 Hz, with averaged ratio of 85% when the supplied air pressure to air springs is in a range of 2 - 4 bar.

1. บทนำ

กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดในอุโมงค์ (Scanning tunneling microscope, STM) [1] เป็นเครื่องมือที่ได้รับความนิยมอย่างมากในการทดลองด้านวิศวกรรมพื้นผิว (Surface engineering) และวิศวกรรมเที่ยงตรงขั้นสูง (Ultra precision engineering) และมีความเป็นไปได้สูงที่จะประยุกต์ใช้ในงานวัดละเอียดระดับนาโนเมตร (Nanometrology) [2] ด้วยข้อดีที่มีโครงสร้างเรียบง่ายต่อการสร้างชิ้นใช้งานและพัฒนาเพื่อประยุกต์ใช้กับงานวิจัยอื่น สะดวกต่อการเตรียมชิ้นงานตัวอย่าง (Sample) และสามารถใช้งานในสภาพแวดล้อมชั้นบรรยากาศได้ [3] อย่างไรก็ตาม สภาพแวดล้อมโดยเฉพาะอุณหภูมิและแรงสั่นสะเทือนขณะบันทึกภาพพื้นผิวตัวอย่างด้วย STM ส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพของภาพพื้นผิวตัวอย่าง [4-6] การแกว่งไปมาของอุณหภูมิแวดล้อม (Ambient temperature fluctuation) ขณะบันทึกภาพพื้นผิวตัวอย่างเพียงเล็กน้อยในระดับ 0.1 องศาเซลเซียสก่อให้เกิดการบิดเบือนของพื้นผิวตัวอย่างอย่างมาก จนอาจทำให้ไม่สามารถแยกแยะอะตอมบนภาพตัวอย่างที่บันทึกได้ แรงสั่นสะเทือนทั้งจากย่านความถี่ต่ำที่ส่งผ่านฐานราก (Low frequency / Seismic vibration) ผู้ระบบทดลอง และแรงสั่นสะเทือนย่านความถี่สูงหรือความถี่เสียง (High frequency / Acoustic vibration) ส่งผลกระทบโดยตรงต่อช่องว่างในอุโมงค์ (Tunneling gap) ระดับพิโคเมตรระหว่างหัวเข็มของกล้องจุลทรรศน์ (STM Tip) และพื้นผิวตัวอย่าง ทำให้คุณภาพของภาพ

พื้นผิวตัวอย่างแปรผกผันกับระดับ (Magnitude) ของแรงสั่นสะเทือนรบกวน (Disturbance vibration) การประยุกต์ใช้สปริงลมในระบบรองรับแรงสั่นสะเทือนกำลังได้รับความนิยมมากขึ้นและนำไปใช้ประโยชน์อย่างกว้าง เนื่องจากสามารถควบคุมและปรับเปลี่ยนคุณสมบัติของสปริงได้ง่าย [7-8]

เพื่อศึกษา และสร้างกลไกแยกแรงสั่นสะเทือนความถี่ต่ำต้นแบบ สำหรับลดทอนแรงสั่นสะเทือนจากฐานรากที่เข้รบกวนการใช้งานและการทดลองของกลไกจุดที่สนัแบบสองกราคนในอุโมงค์ที่จะสร้างขึ้นในอนาคตอันใกล้ เพื่อให้มั่นใจได้ว่าภาพตัวอย่างที่บันทึกได้จาก STM (STM image) จะมีคุณภาพสูงสุด คณะวิจัยจึงออกแบบและพัฒนากลไกแยกแรงสั่นสะเทือนความถี่ต่ำต้นแบบชนิดพาสซีฟ (Passive) โดยใช้สปริงลม

2. การออกแบบและการสร้างกลไกแยกแรงสั่นสะเทือน

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกลไกแยกแรงสั่นสะเทือนออกจากมวลที่ประกอบด้วยค่าความเสียดทานและค่าความแข็งของสปริง [9] สามารถเขียนได้ว่า

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + b \left(\frac{dy}{dt} - \frac{dx}{dt} \right) + k(y - x) = 0 \quad (1)$$

เมื่อ m คือ มวลที่ต้องการแยกแรงสั่นสะเทือน (kg)

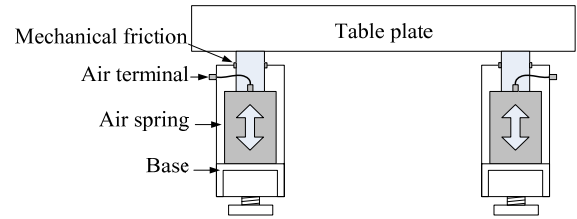
b คือ ค่าความเสียดทาน (Friction) ของชิ้นส่วนแยกแรงสั่นสะเทือน (N·s/m)

k คือ ค่าความแข็ง (Stiffness) ของสปริงที่ใช้แยกแรงสั่นสะเทือน (N/m)

x คือ การขจัดที่เกิดจากแรงสั่นสะเทือนเข้รบกวนมวลผ่านกลไกแยกแรงสั่นสะเทือน (m)

y คือ การขจัดที่เกิดขึ้นกับมวลที่พิจารณา (m) ซึ่งสามารถคำนวณค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency, ω_n) และอัตราส่วนการแดมป์ (Damping ratio, ζ) ได้

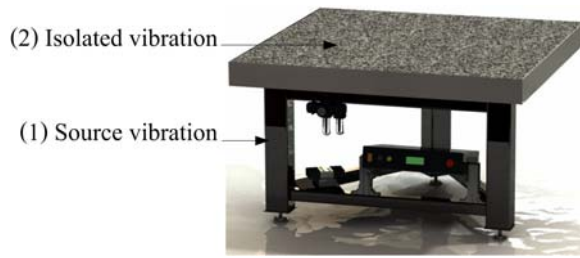
$$\omega_n = \sqrt{k/m} \quad (2)$$



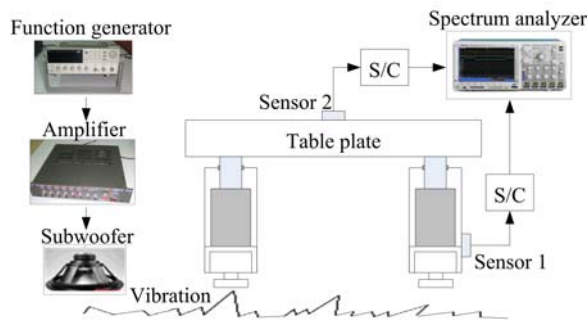
รูปที่ 1 แบบร่างของอุปกรณ์แยกแรงสั่นสะเทือนความถี่ต่ำต้นแบบ (ไม่มีขาที่ 3 ในภาพ)

$$\zeta = \frac{b}{\sqrt{4km}} \quad (3)$$

จาก (2) และ (3) จะเห็นว่าการแยกแรงสั่นสะเทือนความถี่ต่ำที่วิ่งผ่านฐานรากเข้รบกวนระบบทดลองให้สัมฤทธิ์ผลควรออกแบบให้ความแข็งของสปริง $k \ll m$ และออกแบบกลไกแยกแรงสั่นสะเทือนโดยปรับค่า b ให้เหมาะสมเพื่อลดทอนขนาดของการแกว่ง ณ ความถี่ของแรงสั่นสะเทือนมีค่าเท่ากับค่าความถี่ธรรมชาติ ω_n รูปที่ 1 แสดงแบบร่างกลไกต้นแบบที่ถูกออกแบบให้มี 3 ขาเพื่อความสะดวกในการควบคุมความโน้มเอียงในแนวระนาบ การออกแบบโครงสร้างผ่านการคำนวณและจำลองความแข็งแรงทางวัสดุในโปรแกรม CATIA V5 R16 [10] เพื่อให้รองรับน้ำหนักของแคลิเบรตวิบิเด [11] และน้ำหนักของ STM ที่จะติดตั้งไว้ภายใน ภายในขาแยกแรงสั่นสะเทือน (Vibration isolation leg) แต่ละขาประกอบด้วย ฐานยึดสปริงลม (Base) สปริงลมชนิดบล็อก (Enidine : YI-1S4-007) หัวต่อจ่ายลม (Air terminal) ด้านบนของสปริงลมต่อเข้ากับแกนเหล็กรองรับหน้าโต๊ะทดสอบ (Table plate) โดยมีชิ้นส่วนสร้างแรงเสียดทาน (Mechanical friction) ประคองการเคลื่อนที่ของแกนเหล็กขณะสปริงลมยืดและหดตัว รูปที่ 2 แสดงภาพถ่ายของกลไกแยกแรงสั่นสะเทือนต้นแบบซึ่งหน้าโต๊ะทำจากหินแกรนิตอัดแน่นและตำแหน่งติดตั้งเซนเซอร์วัดแรงสั่นสะเทือนแบบเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 2 ตัว โดยติดตั้งเซนเซอร์ตัวที่ 1 ไว้ที่ขาโต๊ะเพื่อตรวจจับแรงสั่นสะเทือนขาเข้า (Source vibration) และติดตั้งเซนเซอร์ตัวที่ 2 ไว้ที่หน้าโต๊ะเพื่อตรวจวัดแรงสั่นสะเทือนหลังลดทอน (Isolated vibration)



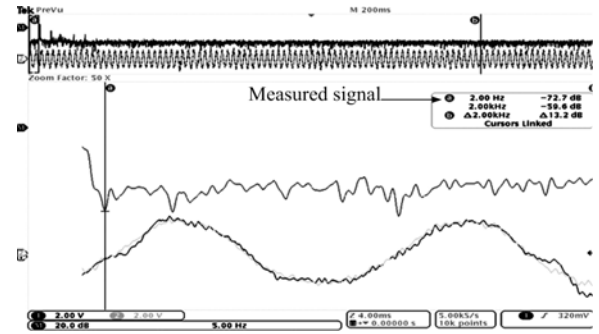
รูปที่ 2 ภาพถ่ายอุปกรณ์แยกแรงสั่นสะเทือนต้นแบบและตำแหน่งติดตั้งเซนเซอร์วัดแรงสั่นสะเทือน



รูปที่ 3 ระบบที่ใช้ในการประเมินศักยภาพของกลไกแยกแรงสั่นสะเทือนความถี่ต่ำต้นแบบ

3. การประเมินศักยภาพของกลไกแยกแรงสั่นสะเทือน

การประเมินศักยภาพของกลไกแยกแรงสั่นสะเทือนความถี่ต่ำต้นแบบที่พัฒนาขึ้นมุ่งเน้นที่อัตราการลดทอนแรงสั่นสะเทือนรอบความถี่ต่ำสุดเมื่อจ่ายลมเข้าสู่สปริงลมด้วยความดันลมที่แตกต่างกันสำหรับปรับค่า k รูปที่ 3 แสดงระบบที่ใช้ในการประเมินศักยภาพของกลไกแยกแรงสั่นสะเทือนต้นแบบ ภายในระบบประกอบด้วยเครื่องกำเนิดสัญญาณ (Function generator) ทำหน้าที่จ่ายสัญญาณไซน์ชอยด์ที่มีความถี่ทดสอบในย่าน 1 - 5 Hz สำหรับจำลองเป็นแรงสั่นสะเทือนความถี่ต่ำให้แก่เครื่องขยายสัญญาณ (Amplifier) ที่ขับสัญญาณออกสู่ลำโพงความถี่ต่ำ (Subwoofer) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 นิ้วที่ติดตั้งไว้ในตู้เปิด และคว่ำหน้าไว้ใกล้กับกลไกแยกแรงสั่นสะเทือนต้นแบบ เพื่อให้แรงสั่นสะเทือนความถี่ต่ำจากลำโพงสามารถวิ่งผ่านฐานรากเข้าสู่ขาของอุปกรณ์ได้ สัญญาณที่อ่านได้จากเซนเซอร์วัดแรงสั่นสะเทือนทั้ง 2 ตัวถูกส่งไปที่วงจรปรับสภาพสัญญาณ (Signal conditioner, S/C) ที่ปรับตั้งได้จนกระทั่งเซนเซอร์ทั้ง 2 ตัวมีความไว

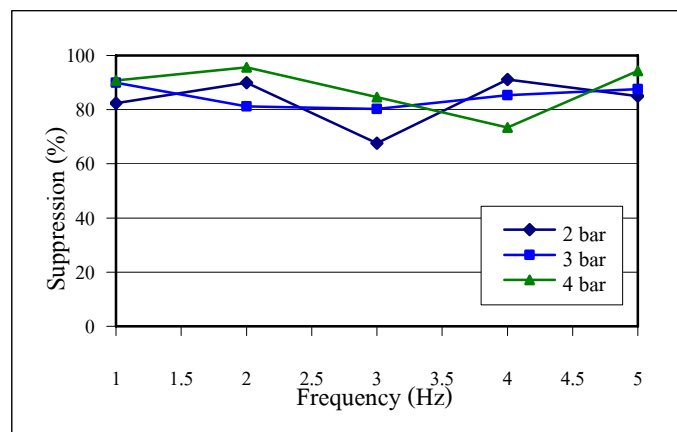


รูปที่ 4 สเปกตรัมสัญญาณจากเซนเซอร์ตัวที่ 2 เมื่อป้อนแรงดันลม 2 bar และสัญญาณรบกวน 2 Hz

(Sensitivity) เท่ากัน จากนั้นส่งต่อไปที่เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม (Spectrum analyzer) เพื่อวิเคราะห์สเปกตรัมของสัญญาณด้วยฟังก์ชัน Fast Fourier Transform (FFT) รูปที่ 4 แสดงตัวอย่างการวิเคราะห์สัญญาณจากเซนเซอร์ตัวที่ 2 ด้วยฟังก์ชัน FFT เมื่อทำการป้อนแรงดันลมขนาด 2 bar เข้าสปริงลมทั้ง 3 ขา และป้อนสัญญาณไซน์ชอยด์ความถี่ 2 Hz เข้าสู่วงจรขยายสัญญาณเพื่อขับสัญญาณผ่านลำโพงความถี่ต่ำ จากรูป ผลการวิเคราะห์ขนาดของแรงสั่นสะเทือนที่หน้าโต๊ะ ณ ความถี่ 2 Hz ได้ -72.7 dB จากการทดลองปรับแรงดันลมที่จ่ายให้กับขาทั้ง 3 ในย่าน 2 - 4 bar และปรับสัญญาณไซน์ชอยด์ในย่านความถี่ 1 - 5 Hz ที่ใช้จำลองเป็นแรงสั่นสะเทือนความถี่ต่ำผ่านลำโพงความถี่ต่ำเข้าสู่กลไกแยกแรงสั่นสะเทือน เซนเซอร์ทั้ง 2 ตัวอ่านค่าแรงสั่นสะเทือนทั้ง 2 ตำแหน่งได้ดังสรุปผลการทดลองในตารางที่ 1 ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์ระดับแรงสั่นสะเทือนที่ตรวจวัดได้จากเซนเซอร์ทั้ง 2 ตัวด้วยเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม เมื่อนำค่าแรงสั่นสะเทือนที่วิเคราะห์ได้จากเซนเซอร์ตัวที่ 1 และค่าแรงสั่นสะเทือนที่วิเคราะห์ได้จากเซนเซอร์ตัวที่ 2 มาคำนวณหาอัตราการลดทอนแรงสั่นสะเทือนของกลไกที่พัฒนาขึ้น จะได้อัตราการลดทอนแรงสั่นสะเทือน โดยมีอัตราการลดทอนแรงสั่นสะเทือนเฉลี่ยที่ร้อยละ 85 และสามารถแสดงกราฟเปรียบเทียบได้ดังรูปที่ 5 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าศักยภาพของกลไกแยกแรงสั่นสะเทือนความถี่ต่ำต้นแบบที่พัฒนาขึ้นอยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจ

ตารางที่ 1 แรงสั่นสะเทือนที่วัดได้จากเซนเซอร์ทั้ง 2 ตัวและอัตราการลดทอนแรงสั่นสะเทือน

ความดันลม (bar)	ความถี่ (Hz)	Sensor 1 (ขาโต๊ะ) (dB)	Sensor 2 (หน้าโต๊ะ) (dB)	อัตราการลดทอนแรงสั่นสะเทือน (%)
2	1	-47.7	-62.8	82.42
	2	-52.7	-72.7	90.00
	3	-50.2	-60.0	67.64
	4	-44.6	-65.6	91.09
	5	-47.5	-64.0	85.04
3	1	-48.7	-68.7	90.00
	2	-47.8	-62.3	81.16
	3	-49.6	-63.7	80.28
	4	-48.3	-65.0	85.38
	5	-49.4	-67.5	87.55
4	1	-47.5	-68.2	90.78
	2	-35.7	-62.9	95.63
	3	-49.3	-65.6	84.69
	4	-48.5	-60.0	73.39
	5	-48.4	-73.3	94.31



รูปที่ 5 การเปรียบเทียบอัตราการลดทอนแรงสั่นสะเทือนย่าน 1 – 5 Hz
เมื่อป้อนลมเข้าสู่สปริงลมด้วยความดันลม 2 – 4 bar

4. สรุปผล

การพัฒนากลไกแยกแรงสั่นสะเทือนความถี่ต่ำแบบโดยใช้สปริงลมชนิดปลอกจำนวน 3 ตัวทำหน้าที่เป็นระบบดูดซับแรงสั่นสะเทือนจากฐานรากที่วิ่งผ่านโครงสร้างเข้าสู่ระบบทดลอง และศึกษาพฤติกรรมของกลไกที่พัฒนาขึ้นโดยจำลองแรงสั่นสะเทือน ณ ความถี่ต่างๆ ที่เข้ารบกวน

โครงสร้างด้วยสัญญาณไซน์ซอซด์ที่ผ่านการขยายสู่ลำโพงความถี่ต่ำ ระดับแรงสั่นสะเทือนที่วัดจากฐานรากและวัดจากตำแหน่งติดตั้งระบบทดลองแสดงให้เห็นว่า กลไกที่พัฒนาขึ้นสามารถแยกแรงสั่นสะเทือนได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีอัตราการลดทอนแรงสั่นสะเทือนเฉลี่ยร้อยละ 85 ดังนั้นคณะวิจัยเชื่อว่าแนวคิดนี้สามารถพัฒนาสู่

การสร้างกลไกแยกแรงสั่นสะเทือนความถี่ต่ำบนหลักการของ มวล-สปริง-แดชพ็อต ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถใช้งานร่วมกับกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดในอุโมงค์ที่จะสร้างขึ้นในอนาคตอันใกล้เพื่อบันทึกภาพพื้นผิวตัวอย่างได้

กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยขอขอบคุณ นายคมกร ศิริทัศน์ และ นายนฤชา คงเหมือน นักศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ สำหรับความอุตสาหะในการสร้างชิ้นส่วน และขอขอบคุณงบประมาณในการทำวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาและสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยผ่านทุนพัฒนาศักยภาพในการทำวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่

เอกสารอ้างอิง

[1] G. Binning and H. Rohrer, "Scanning Tunneling Microscope" IBM J. RES. DEVELOP., vol. 30, no. 4, 1986, pp. 355-369.

[2] M. Aketagawa, K. Takada, P. Rerkkumsup, Y. Togawa and H. Honda, "Real-Time Atomic Encoder Using Scanning Tunneling Microscope and Regular Crystalline Surface" Mea. Sci. Technol., vol. 17, no. 3, 2006, pp. 513-518.

[3] S. I. Park and C. F. Quate, "Tunneling Microscopy of Graphite in Air" Appl. Phys. Lett., vol. 48, no. 2, 1986, pp. 112-114.

[4] B. S. Swartzentruber, "Direct Measurement of Surface Diffusion Using Atom-Tracking Scanning Tunneling Microscopy" Phys. Rev. Lett., vol. 76, no. 3, 1996, pp. 459-462.

[5] M. Aketagawa, K. Takada, K. Kobayashi, N. Takeshima, M. Noro and Y. Nakayama, "Length Measurement Using a Regular Crystalline Lattice and a Dual Tunneling Unit Scanning Tunneling Microscope in a Thermo-Stabilized Cell" Mea. Sci. Technol., vol. 9, 1998, pp. 1076-1081.

[6] P. Rerkkumsup, M. Aketagawa, K. Takada, Y. Togawa, N. T. Thinh and Y. Kozuma, "Highly Stable Atom-Tracking Scanning Tunneling Microscopy" Rev. Sci. Instrum., vol. 75, no. 7, 2004, pp. 1061-1067.

[7] G. V. Dixon and J. Pearson, "Automatically Controlled Air Spring Suspension System for Vibration Testing" NASA Tech. Note, NASA TN D-3891, April 1967.

[8] H. Posumamilla and A. G. Kelkar, "Robust Control and μ Analysis of Active Pneumatic Suspension" 2005 American Control Conference, June 8-10, 2005, Portland, OR, USA, pp. 2200-2205.

[9] S. I. Park and C. F. Quate, "Theories of the Feedback and Vibration Isolation Systems for the Scanning Tunneling Microscope" Rev. Sci. Instrum., vol. 58, no. 11, 1987, pp. 2004-2009.

[10] CATIA[®] is a registered trademark of the Dassault Systemes.

[11] P. Rerkkumsup and P. Prachprayoon, "The Proposal of Novel Design of Temperature Control System for Scanning Tunneling Microscope: The Closed Surface Capsule", Proceedings of 3rd IEEE Int. Conf. on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, January 6-9, 2008, Sanya, China, pp. 432- 435.