การออกแบบคานยึดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับนิวเมติกไมโครวาล์วชนิดทำงานด้วยไฟฟ้าสถิต

Design Optimization of Tethers in Electrostatic Actuating Pneumatic Microvalves

- นายรุ่งเรือง พัฒนากุล[1]
- ดร. อดิสร เตือนตรานนท์[2]
- อ. ดร. นิมิต ชมนาวัง[1]

1. ห้องปฏิบัติการระบบฝังตัวและกลไฟฟ้าจุลภาค สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
2. ห้องปฏิบัติการนาโนอิเล็กทรอนิกส์และเครื่องกลจุลภาค ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ

NAC2005 NSTDA Annual Conference S&T in Thailand : Towards the Molecular Economy

หัวข้อในการบรรยาย

- **ไมโครวาล์วคืออะไร**
  - กลไกการทำงาน
  - ไมโครวาล์วที่ทำงานด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Microvalve)
  - ผลตอบสนองที่ต้องการของไมโครวาล์วใน RBDS

o **โครงสร้างไมโครวาล์วที่ทำงานด้วยไฟฟ้าสถิต ชนิดแผ่นคู่ขนาน**
  - o ส่วนของโครงสร้างที่มีผลต่อการตอบสนองของไมโครวาล์ว
  - o Pull-in Voltage

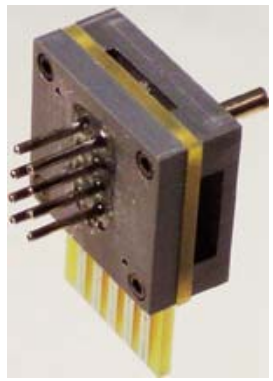
- **รูปแบบคานยึด**
  - การจำลองสถานการณ์ของคานยึด
  - ผลการจำลองสถานการณ์
  - ข้อดี-ข้อด้อย ของคานยึดแต่ละแบบ
  - รูปแบบคานยึดที่เหมาะสมที่สุดในการประยุกต์ใช้กับนิวเมติกไมโครวาล์ว

❑ **สรุป**

ไมโครวาล์วคืออะไร

ไมโครวาล์ว คือ อุปกรณ์ขนาดเล็กที่ทำหน้าที่ควบคุมการไหลของของไหล (ของเหลวและก๊าซ) ที่ต้องการความละเอียดสูง เช่น ตัวผสมและกระตุ้นปฏิกิริยาทางชีวเคมี, ตัวควบคุมการไหลในท่อขนาดเล็ก, ตัววิเคราะห์ทางชีวเคมี รวมทั้งการแสดงอักษรเบรลล์แบบซ้ำเดิมโดยใช้ลมอัด

M. Weicker



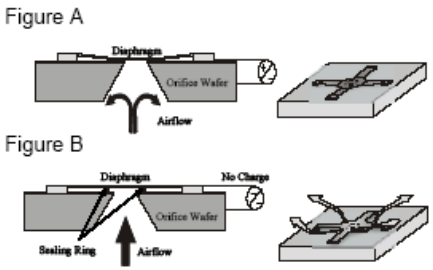
iACTIV Corporation

M. Kohl

เป็นเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาค (MEMS) รูปแบบหนึ่ง ที่ถูกสร้างด้วยเทคโนโลยีการผลิตวงจรรวม ประกอบด้วยส่วนไฟฟ้าขับเคลื่อนและส่วนกลไกที่สามารถเคลื่อนที่ได้

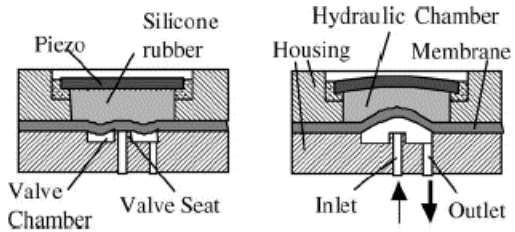
กลไกการทำงาน

โครงสร้างของไมโครวาล์วแต่ละแบบจะขึ้นอยู่กับกลไกการทำงาน ว่าใช้วัสดุแบบใด วัสดุที่เลือกมาเป็นพิเศษจะถูกใช้ให้ทำหน้าที่เพื่อให้กลไกนั้นทำงานได้



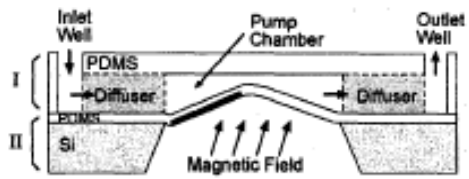
iACTIV Corporation

Electrostatic actuation



T. Rogge, 2004

Piezoelectric actuation



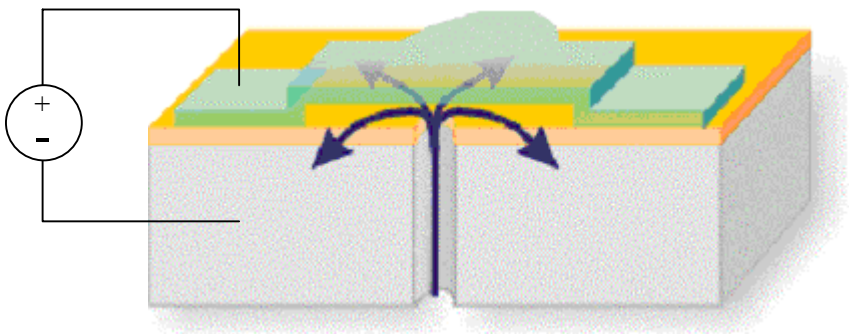
Melvin Khoo, 2000

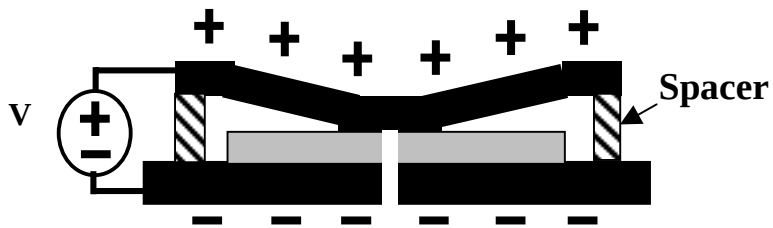
Magnetic actuation

กลไกการทำงานหลักของไมโครวาล์วมีหลายแบบคือ electrostatic, magnetic, piezoelectric, bimetallic, SMA (Shape Memory Alloy), pneumatic และ thermopneumatic โดยหลักการที่ใช้ออกแบบกลไกการทำงานพบมากใน 3 แบบแรก ซึ่งเข้าใจได้ง่ายและปรับเปลี่ยนรูปแบบการประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย

ไมโครวาล์วที่ทำงานด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Microvalve)

คือไมโครวาล์วที่ควบคุมการ เปิด-ปิด ด้วยแรงไฟฟ้าสถิต ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างโครงสร้างที่มีประจุไฟฟ้าตรงข้ามกัน



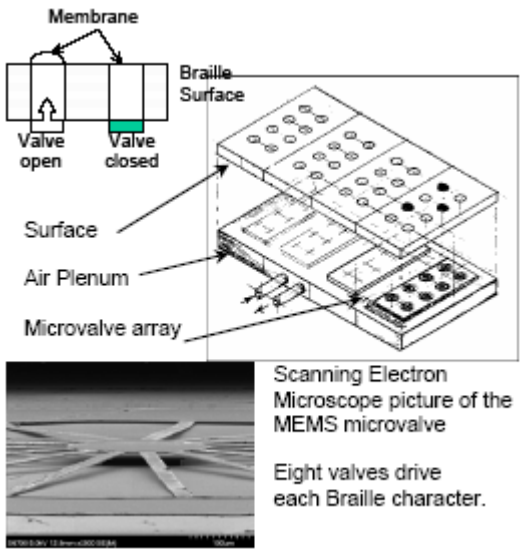


ข้อดี

- เป็นโครงสร้างที่ง่าย ไม่ซับซ้อน รูปแบบการประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย
- ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและพฤติกรรมการทำงานเข้าใจได้ง่าย
- เหมาะสมกับระดับเทคโนโลยีที่มีในการวิจัย ที่จะสร้างเป็นตัวต้นแบบ

ผลตอบสนองที่ต้องการ

ผลตอบสนองที่ต้องการขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งาน เช่น นิวเมติกไมโครวาล์ว ที่ทำหน้าที่ปิด-เปิดการไหลของอากาศ สำหรับระบบแสดงอักษรเบรลล์แบบซ้ำเดิม (Refreshable Braille display system, RBDS)

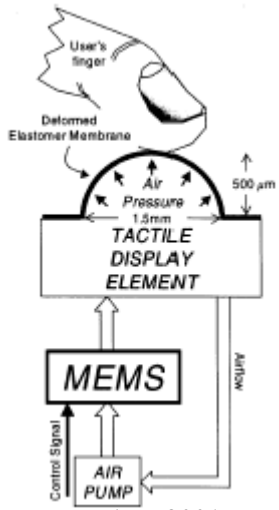


iACTIV Corporation

-การตอบสนองที่รวดเร็ว

-อัตราการรั่วไหลต่ำหรือไม่มี เมื่อวาล์วอยู่ในสภาวะปิด

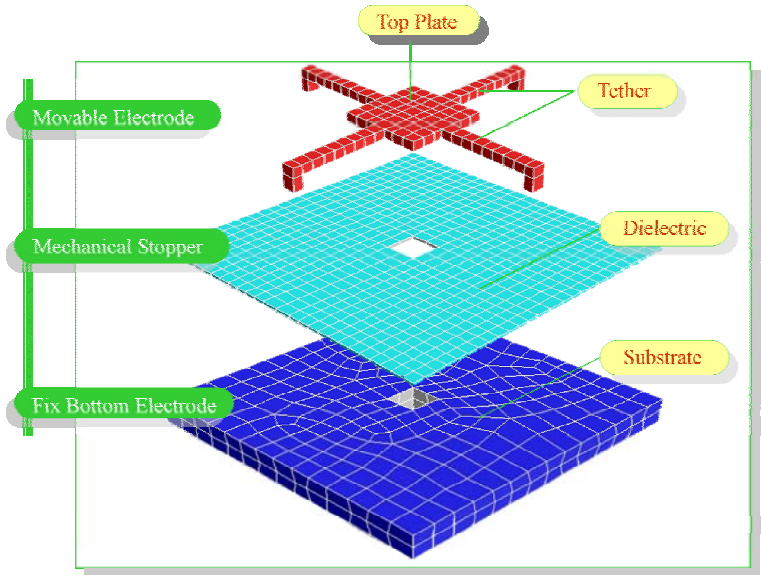
-ใช้พลังงานไฟฟ้าน้อย



L. Yobas, 2001

สิ่งต่างๆจะได้มา จะขึ้นอยู่กับรูปแบบโครงสร้างของไมโครวาล์วที่จะสร้าง ขนาดของส่วนประกอบแต่ละส่วน รวมถึงวัสดุที่ใช้ในการสร้าง

โครงสร้างไมโครวาล์วที่ทำงานด้วยไฟฟ้าสถิต ชนิดแผ่นคู่ขนาน



โครงสร้างของไมโครวาล์ว ประกอบด้วย 3 ส่วนหลักคือ

Movable electrode: เป็นขั้วนำไฟฟ้าด้านบน ประกอบด้วย

Top plate: ส่วน เปิด-ปิด รูอากาศ

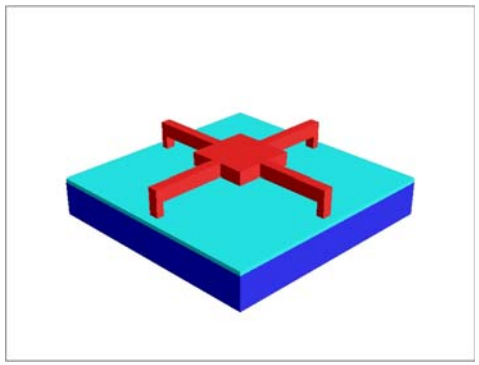
Tether: ยึดให้ top plate ลอยอยู่เหนือรูอากาศ

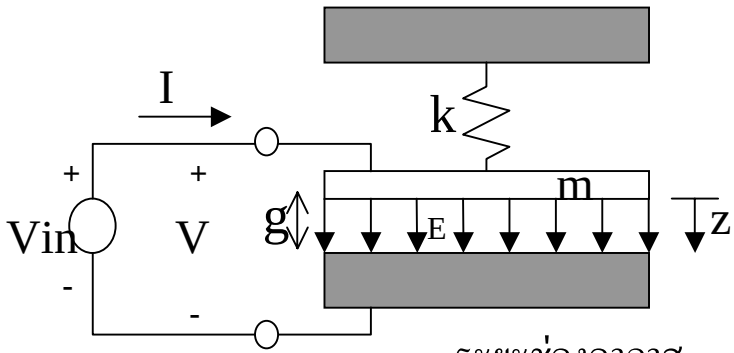
Fix bottom electrode: เป็นขั้วนำไฟฟ้าด้านล่างและเป็นฐานของไมโครวาล์วที่เจาะช่องอากาศผ่านตรงกลาง

Mechanical stopper: เป็นชั้น dielectric ทำหน้าที่รองรับ top plate ไม่ให้สัมผัสกับฐานโดยตรง เพื่อป้องกันการลัดลงจร

ส่วนของโครงสร้างที่มีผลต่อการตอบสนองของไมโครวาล์ว

ตัวแปรของโครงสร้างที่มีผลต่อระบบ เราสามารถพิจารณาได้จากสมการพื้นฐานของของ mass-spring model โดยตั้งเป้าหมายให้ใช้ความต่างศักย์ต่ำที่สุดในการดึง Top plate ลงมาติดที่ฐาน





g : ระยะช่องอากาศ

g_0 : ระยะช่องอากาศ เริ่มต้น

z : ระยะเคลื่อนที่ของมวล m

$$m\ddot{x} + kx = \frac{\varepsilon_0 A V^2}{2(g_0 - z)^2}$$

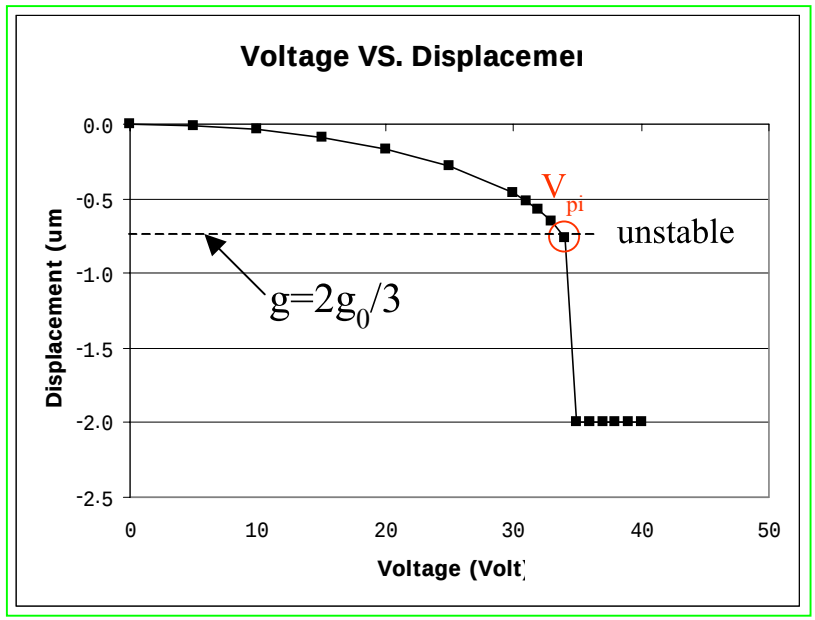
แรงดันไฟฟ้าสูงสุดสำหรับช่วงเสถียรภาพ (snap-down voltage หรือ pull-in voltage) เมื่อความต่างศักย์เกินจุดนี้ไปจะเกิดการยุบตัวลงของ Top plate ทันทีที่ระยะประมาณ $\frac{2}{3} g_0$

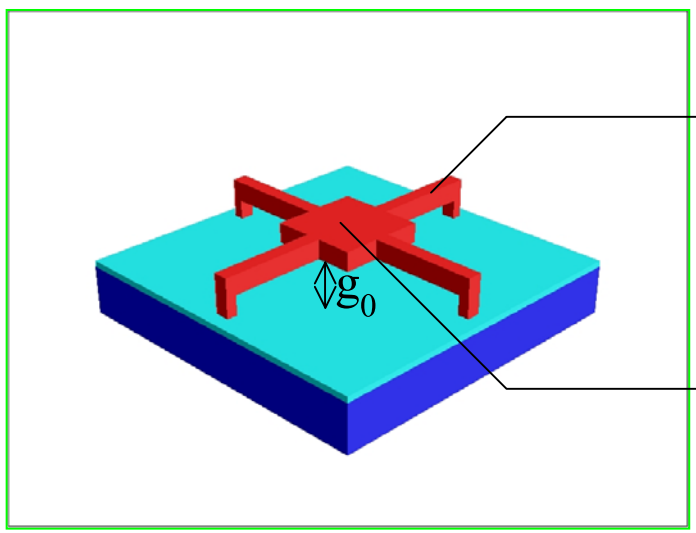
$$V_{pi} = \sqrt{\frac{8 g_0^3 \cdot k}{27 A \varepsilon}}$$

Pull-in Voltage

Pull-in voltage จึงเป็นระดับความต่างศักย์สุดท้ายก่อนที่ Top plate จะลงมาปิดรูที่ฐาน

ดังนั้นการออกแบบโครงสร้างจะมุ่งเน้นให้ Pull-in voltage ของไมโครวาล์วมีค่าต่ำที่สุด เพื่อการประหยัดพลังงาน





$$V_{pi} = \sqrt{\frac{8g_0^3 \cdot k}{27A\varepsilon}}$$

k: ค่าคงที่สปริง — ระยะยกตัว, Pull-in voltage

A: พื้นที่ของ Top plate

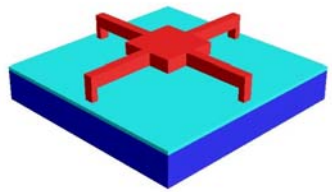
g_0: ระยะช่องอากาศเริ่มต้น

NAC2005
NSTDA Annual Conference
S&T in Thailand : Towards the Molecular Economy

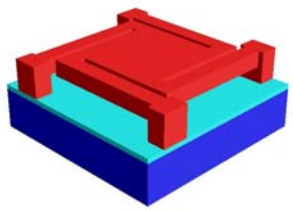
รูปแบบคานยึด

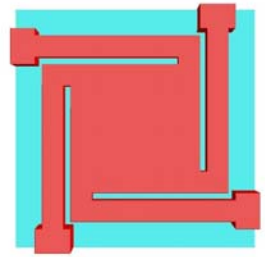
รูปแบบคานยึดจะนำมาจากโครงสร้างพื้นฐานของ RF MEMS Switch คือ

คานยึดแบบตรง

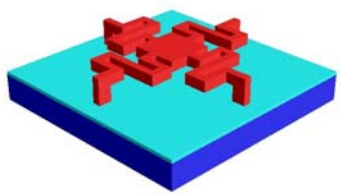


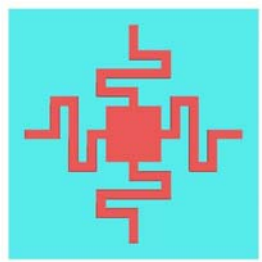
คานยึดแบบขาปู





คานยึดแบบขด





การจำลองสถานการณ์ของคานยึด

การจำลองสถานการณ์จะใช้โปรแกรม CoventorWare™ ที่

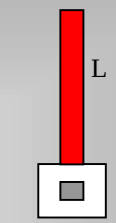
โครงสร้างต้นแบบแต่ละแบบจะทำการเปลี่ยนขนาดดังนี้

Simple tether

Tether length,L = 200, 400, 600 และ 800 μm

Air gap, h = 1, 2 และ 3 μm

Material = Polysilicon, Nickel



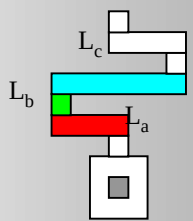
Serpentine tether

La = 135 μm, Lb = 30 μm, Lc = 240 μm

Tether turn = 1, 2 และ 3

Air gap, h = 1, 2 และ 3 μm

Material = Polysilicon, Nickel

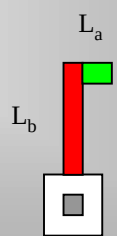


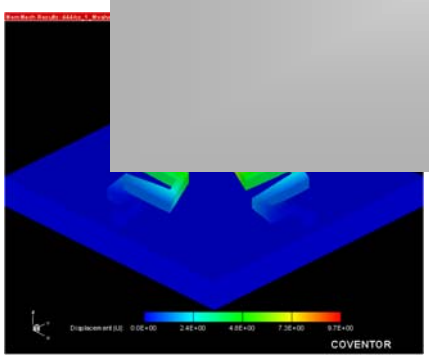
Crab-leg tether

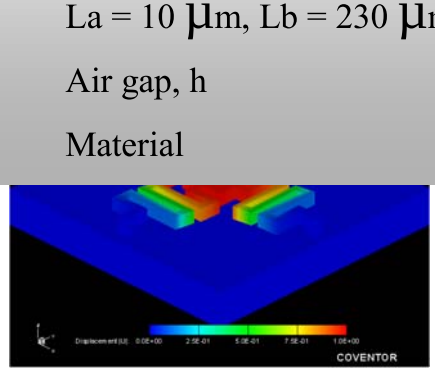
La = 10 μm, Lb = 230 μm

Air gap, h = 1, 2 และ 3 μm

Material = Polysilicon, Nickel



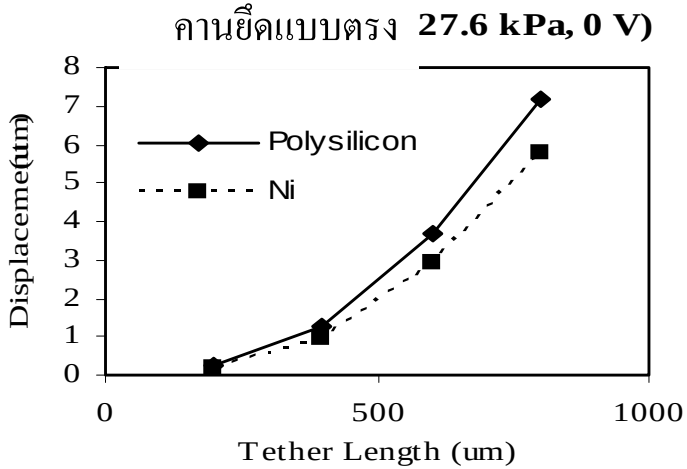


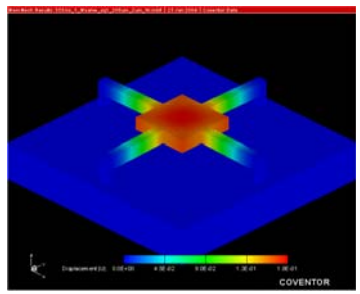


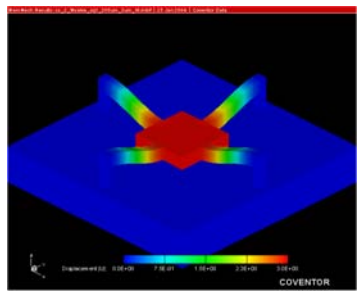
แรงดันลมเพื่อทำการเปรียบเทียบค่าแรงดันที่ใช้ในการทดสอบเมื่อไม่มีแรงดันลม 27.6 kPa และมีแรงดันลมมากระทำโดยเปลี่ยนลักษณะของคานไปทีละแบบ

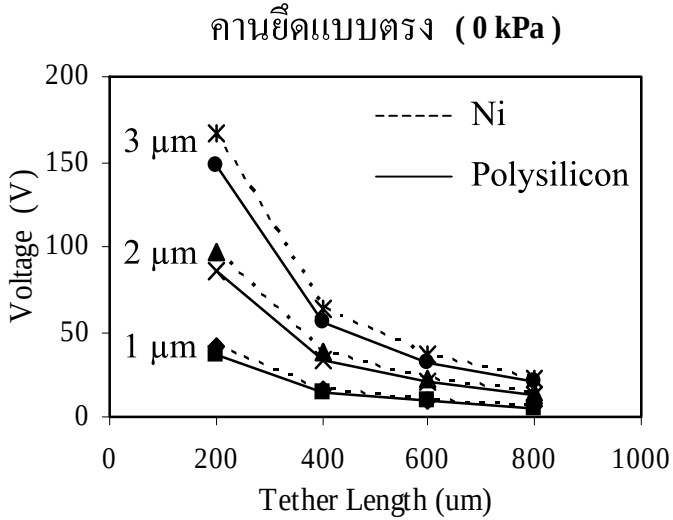
ผลการจำลองสถานการณ์

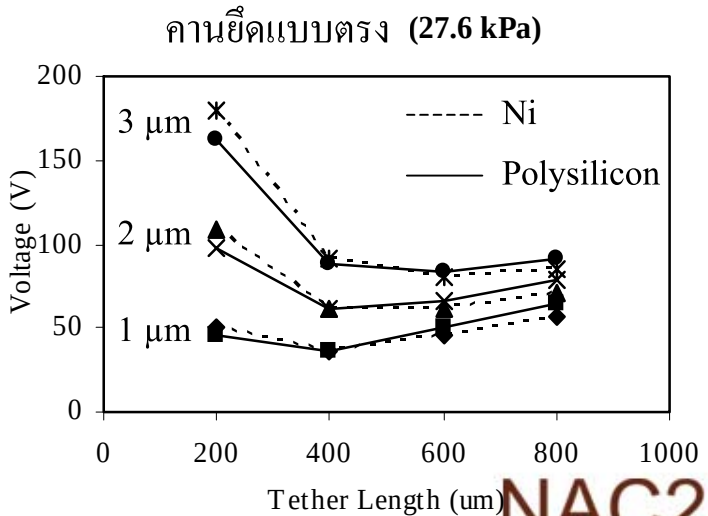
- คานยึดแบบตรง









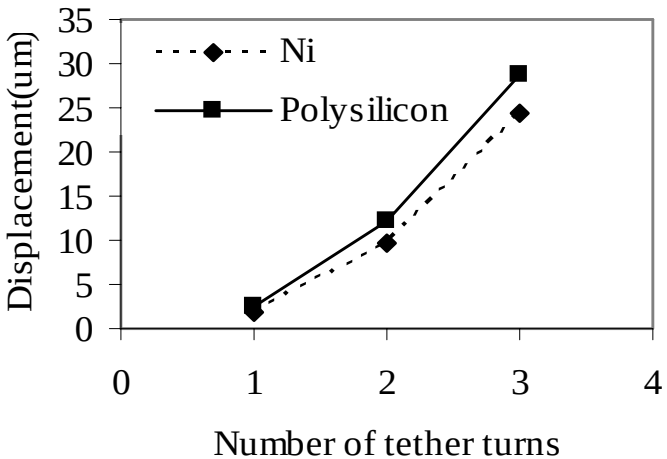


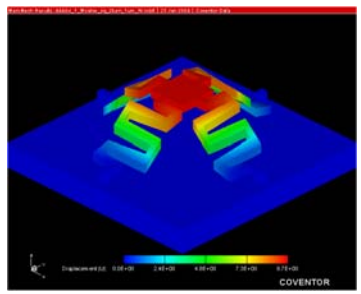
NAC2005
NSTDA Annual Conference
S&T in Thailand : Towards the Molecular Economy

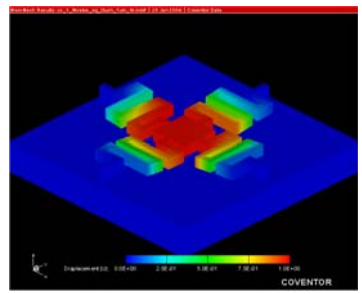
ผลการจำลองสถานการณ์

- คานยึดแบบขด

คานยึดแบบขด **(27.6 kPa, 0V)**

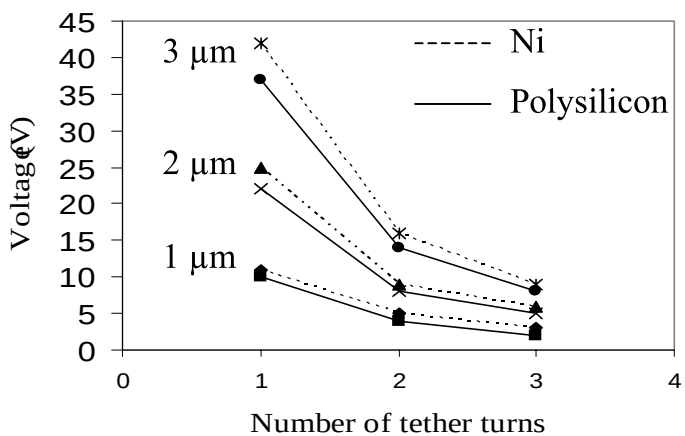


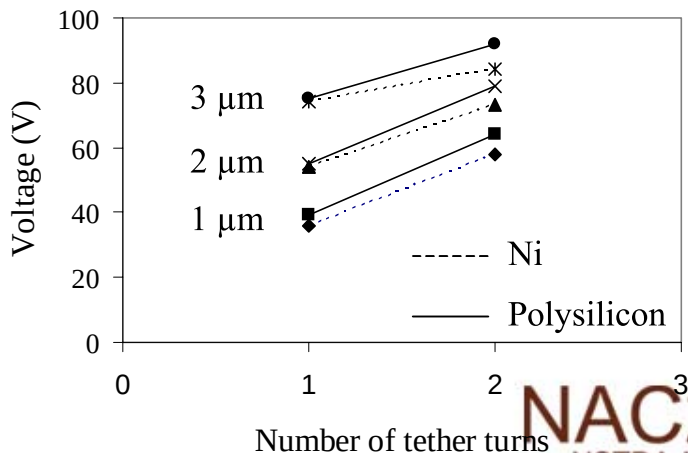




คานยึดแบบขด **(27.6 kPa)**

คานยึดแบบขด **(o kPa)**





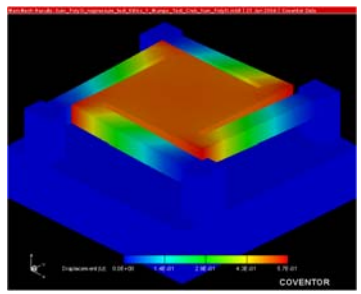
ผลการจำลองสถานการณ์

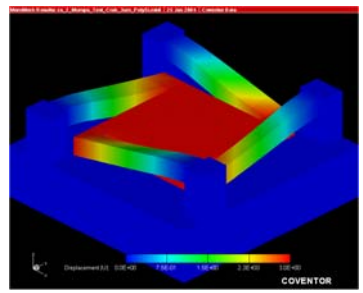
- คานยึดแบบขาปู

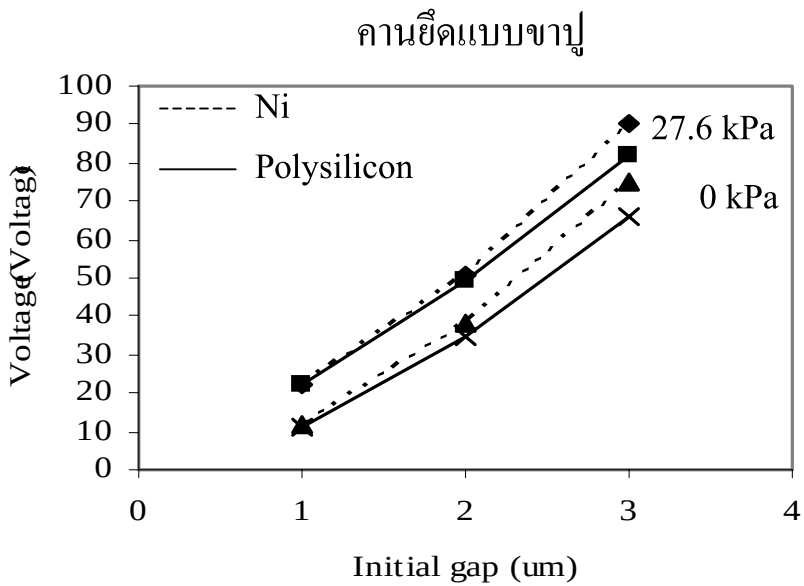
ระยะยกตัวของ Top plate

นิกเกิล: 0.44 µm

โพลีซิลิกอน: 0.57 µm







ข้อดี-ข้อด้อย ของคานยึดแต่ละแบบ

***คานยึดแบบตรง*:**

ข้อดี

-ค่า stiffness เปลี่ยนตามความยาวคานยึด มีความยืดหยุ่นสูง การเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นได้มากเมื่อมีแรงมากระทำและจะเปลี่ยนมากขึ้นเมื่อคานยึดยาวขึ้น

- เหมาะกับ device ที่ต้องการการเคลื่อนที่ไม่มากนัก

- Voltage ในสภาวะปกติจะมีค่าลดลงตามความยาวของคานยึดซึ่งอยู่ในระดับที่ต่ำมาก

ข้อด้อย

- คานยึดที่ยาวมาก ส่งผลให้ยกตัวสูงจากฐานเมื่อมีแรง pressure ทำให้ต้องใช้ voltage ในการดึงลงมาสูง

- ขนาดของ device จะมีขนาดใหญ่ขึ้นตามความยาวของคานยึดเท่ากับสองเท่าของความยาว ซึ่งสิ้นเปลืองเนื้อที่ในการสร้าง

ข้อดี-ข้อด้อย ของคานยึดแต่ละแบบ

***คานยึดแบบขด*:**

ข้อดี

-ค่า stiffness น้อยมากและยังมีขนาดที่เล็กกว่าด้วยเหมาะกับ device ที่ต้องการการเคลื่อนที่มากๆ

- Voltage ที่ใช้ในภาวะปกติมีค่าต่ำมาก

- จำนวนขดที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้พื้นที่ผิวรวมของคานยึดมีค่ามากพอที่ electrostatic force จะช่วยดึงคานยึดลงมาได้เร็วขึ้น แต่ต้องเป็นสภาวะที่มีแรงกระทำในระดับต่ำเพื่อ top plate จะไม่สูงมาก

ข้อด้อย

- ความยืดหยุ่นที่มากเกินไป ส่งผลให้ยกตัวสูงจากฐานเมื่อมี pressure กระทำ ทำให้ต้องใช้ voltage ในการดึงลงมาสูง จึงเป็นสภาพที่ไม่เหมาะกับการนำมาประยุกต์ใช้เป็น microvalve

- ผลของ stiffness ที่อ่อนค่า ยังส่งผลให้ในสภาวะที่สามารถดึง top plate ลงมาติดฐานได้มีการยกตัวขึ้นของ top plate เล็กน้อย ทั้งๆที่คานยึดทั้ง 4 ติดกับฐานแล้ว ยิ่งจำนวนขดและ pressure ด้านล่างมาก ผลนี้ก็มีโอกาสเกิดขึ้นมาก

ข้อดี-ข้อด้อย ของคานยึดแต่ละแบบ

***<u>คานยึดแบบขาปู</u>*:**

<u>ข้อดี</u>

-เป็นรูปแบบคานยึดที่ให้ค่า stiffness สูงกว่าแบบขดมากและยังมีขนาดที่เล็กกว่าด้วยเหมาะกับ device ที่ไม่ต้องการการเคลื่อนที่มากๆ

- ความแตกต่างของ voltage ที่ใช้ในสภาวะปกติและเมื่อมี pressure กระทำไม่ต่างกันมากนัก

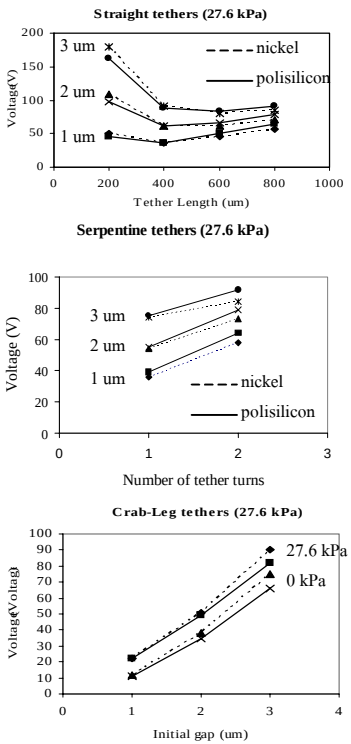
<u>ข้อด้อย</u>

- เป็นโครงสร้างที่มีทางออกของอากาศน้อยในกรณีสร้างกรอบล้อม เนื่องจากคานยึดวางตัวขนานกับขอบของ top plate ทั้ง 4 ด้าน

รูปแบบคานยึดที่เหมาะสมที่สุดในการประยุกต์ใช้กับนิวเมติกไมโครวาล์ว

จากผลการทำ Simulation โครงสร้างที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็น microvalve ทั้ง 3 แบบ คือ แบบตรง, แบบขดและแบบขาปู เราจะพบว่ารูปแบบคานยึดที่เหมาะสมที่สุดควรให้ระดับ Pull-in voltage ในสภาวะที่มี pressure ที่ไม่สูงนัก เพราะจะช่วยประหยัดพลังงาน นอกจากนั้นควรมีขนาดเล็ก ไม่สิ้นเปลืองทรัพยากรในการสร้าง

Pull-in Voltage

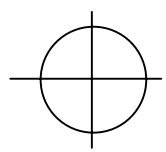


Area

รูปแบบคานยึด	ความยาวคานยึด (um) / จำนวนขด	พื้นที่ $(um)^2$
แบบตรง	200 um	580^2
	400 um	980^2
	600 um	$1,380^2$
	800 um	$1,780^2$
แบบขด	1 Turn	540^2
	2 Turn	840^2
	3 Turn	$1,080^2$
แบบขาปู	-	300^2

ตั้งเป้าหมายว่าเป็นตัวต้นแบบของนิวเมติกไมโครวาล์วสำหรับระบบแสดงอักษรเบรลล์แบบซ้ำเดิม

ขนาดจุดของอักษรเบรลล์จึงเป็นตัวกำหนดขนาดใหญ่ที่สุดของไมโครวาล์ว



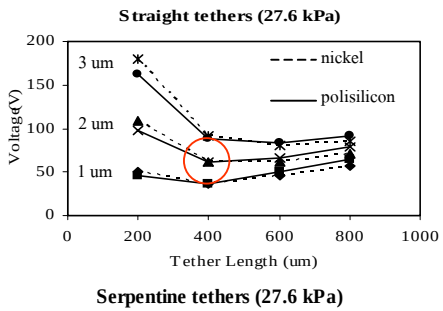
$1,500^2\ (um)^2$

Ø 1.5 mm

NAC2005
NSTDA Annual Conference
S&T in Thailand : Towards the Molecular Economy

รูปแบบคานยึดที่เหมาะสมที่สุดในการประยุกต์ใช้กับนิวเมติกไมโครวาล์ว (ต่อ)

Pull-in Voltage



gap 1 um: ยากที่จะสร้างระยะห่างใต้ Top plate และเกิดปัญหาการติดของ Top plate กับฐาน

gap 3 um: Pull-in voltage สูงเกินไป

gap 2 um: เหมาะสมที่สุด

แบบตรง: ความยาวคานยึด = 400 um

แบบขด: จำนวนขด = 2

แบบขาปู: ความยาวคานยึด = 230 um

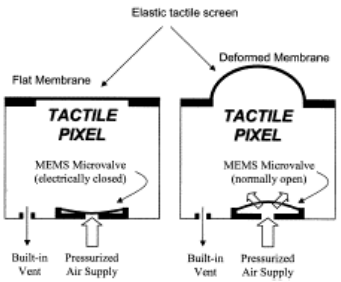
Material

นิกเกิลและโพลีซิลิกอนให้ Pull-in voltage ไม่ต่างกันมากนัก แต่สิ่งที่แตกต่างกันชัดเจนคือ

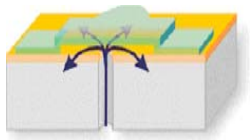
โพลีซิลิกอน: เป็นวัสดุที่นิยมนำมาใช้และต้องใช้เทคโนโลยีขั้นสูงในการสร้าง, ต้นทุนสูง

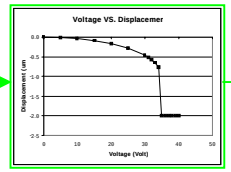
นิกเกิล: ถ้าสามารถทำงานได้จริงจะเป็นวัสดุใหม่และราคาถูก

สรุป

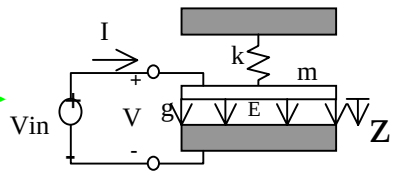


L. Yobas, 2003

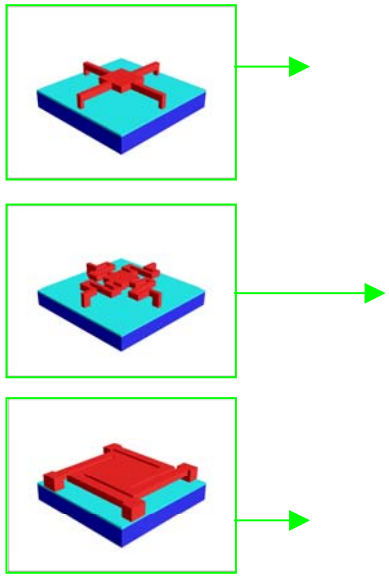


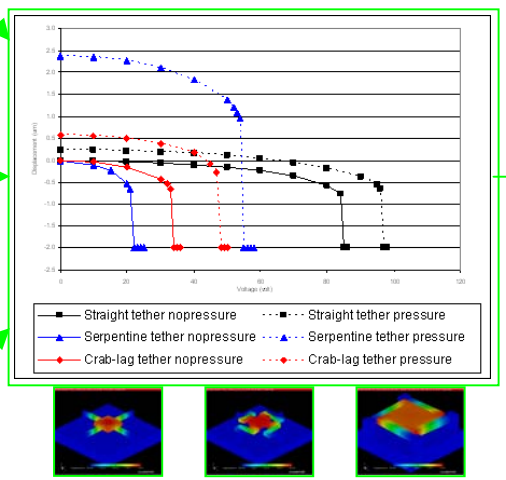


CoventorWare™

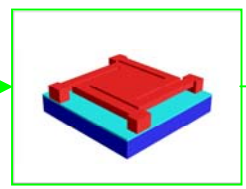


$$V_{pi} = \sqrt{\frac{8g_0^3 \cdot k}{27A\varepsilon}}$$



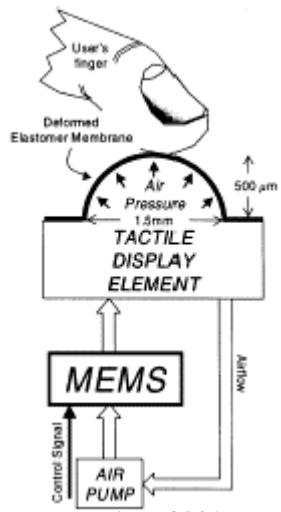


- ประหยัดพื้นที่
- ประหยัดพลังงาน



Nickel

Polysilicon



L. Yobas, 2001

NAC2005
NSTDA Annual Conference
S&T in Thailand : Towards the Molecular Economy

จบการนำเสนอ