

ĐẠI HỌC QUỐC GIA HÀ NỘI
VIETNAM NATIONAL UNIVERSITY, HANOI

ISSN 0866 - 8612

JOURNAL OF SCIENCE

KHOA HỌC TỰ NHIÊN VÀ CÔNG NGHỆ
NATURAL SCIENCES AND TECHNOLOGY

Phụ trương ngành
Công nghệ Thông tin
Điện tử - Viễn thông
Vật lý kỹ thuật

MÔ PHỎNG CẢM BIẾN GIA TỐC MEMS KIỂU TỤ

Trần Đức Tân⁽¹⁾, Chủ Đức Trình⁽¹⁾

Nguyễn Phú Thuỳ⁽¹⁾ và Vũ Ngọc Hùng⁽²⁾

⁽¹⁾ Khoa Điện tử – Viễn thông, Trường Đại học Công Nghệ, ĐHQG Hà Nội

⁽²⁾ Viện Đào tạo Quốc tế về Khoa học Vật liệu, Đại học Bách khoa Hà Nội

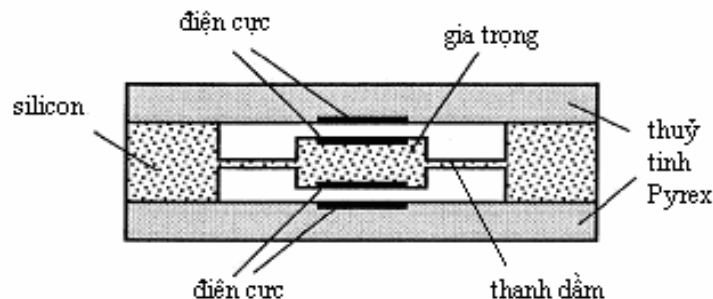
1. Giới thiệu

Có nhiều phương pháp được sử dụng để đo gia tốc. Một trong những phương pháp đó là sử dụng cảm biến gia tốc kiểu tụ. Cảm biến gia tốc MEMS kiểu tụ xác định gia tốc thông qua sự thay đổi giá trị điện dung của tụ điện, đây là một phương pháp rất linh hoạt được sử dụng nhiều trong các vi cảm biến quán tính. Người ta thường dùng cảm biến gia tốc kiểu tụ vi phân do độ nhạy cao, nhiễu thấp, ít hao phí năng lượng, đặc tính một chiều ổn định, ít chịu tác dụng của nhiệt độ và đáp ứng tuyến tính.

Bài báo này đề cập đến việc mô hình hoá và mô phỏng các cảm biến gia tốc kiểu tụ, tập trung vào cảm biến gia tốc kiểu tụ vi phân [1]. Đầu tiên, chúng tôi khảo sát mô hình năng lượng để thấy mối liên hệ của gia tốc theo tần số dao động riêng và độ dịch chuyển. Đó cũng là công thức cơ bản để mô phỏng, thiết kế một cấu hình cảm biến cụ thể. Trong quá trình thiết kế có tính toán tới nhiều cơ học do nhiệt, là một đại lượng không thể bỏ qua trong tính toán bởi ảnh hưởng tới độ chính xác của phép đo. Phương pháp thiết kế cảm biến được đề cập trong bài báo là phương pháp phân tích nút dùng ngôn ngữ SUGAR trong môi trường MATLAB [2,3]. Đây là một phương pháp phân tích cho kết quả chính xác tương đương với phương pháp truyền thống (phương pháp phần tử hữu hạn, phương pháp phần tử biên). Những kết quả thiết kế, mô phỏng đã được so sánh với kết quả thực nghiệm thu được từ các cảm biến chế tạo tại trung tâm ITIMS. Các cảm biến này được chuẩn hoá nhờ hệ thống đo chuẩn vi cảm biến gia tốc. Phần cuối cùng trình bày kết quả so sánh giữa mô phỏng và thực nghiệm.

2. Cấu trúc và nguyên tắc hoạt động

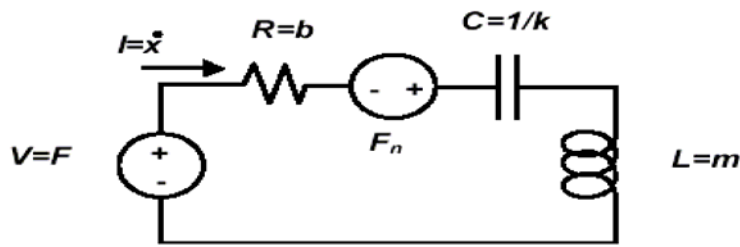
2.1. Cấu trúc của cảm biến gia tốc MEMS kiểu tụ



Hình 1. Mô hình đo gia tốc kiểu vòng mở

Cảm biến gia tốc đơn giản gồm một gia trọng m được gắn với một khung cố định nhờ một hay nhiều thanh dầm có hệ số đàn hồi k (Hình 1). Cảm biến gia tốc vòng mở kiểu tụ tiêu biểu nhất có hai điện cực cố định ở bên ngoài và điện cực ở giữa có thể chuyển động được, tạo thành tụ vi sai. Bất kì một gia tốc nào làm cho gia trọng chuyển động khỏi vị trí cân bằng sẽ tạo ra thay đổi giá trị tụ.

Mô hình năng lượng của một cảm biến gia tốc MEMS kiểu tụ hoạt động theo chế độ vòng mở được trình bày bằng một mô hình tương đương như trên hình 2.



Hình 2. Mô hình tương đương của một cảm biến gia tốc vòng mở

Trên hình 2, m là gia trọng, k là hằng số đàn hồi của thanh dầm, b đặc trưng cho suy hao trong không khí.

Biểu diễn của lực gây ra gia tốc như sau:

$$F = -F_n + x \left(b + \frac{k}{s} + sm \right) \tag{1}$$

với F_n là ngoại lực do nhiễu tác động và x là độ dịch chuyển của thanh dầm.

Biến đổi Laplace cho ta:

$$x = \frac{F + F_n}{s^2 + \frac{b}{m}s + \frac{k}{m}} \tag{2}$$

Hầu hết các ứng dụng đều liên quan đến gia tốc tĩnh ($\omega_o \gg \omega$) nên rút gọn được:

$$x = \frac{F + F_n}{k} \tag{3}$$

Nếu bỏ qua F_n thì :

$$x = \frac{F}{k} = \frac{F}{\omega_o^2 x} = \frac{a}{\omega_o^2} \tag{4}$$

Cuối cùng thu được:

$$a = \omega_o^2 x \tag{5}$$

với:

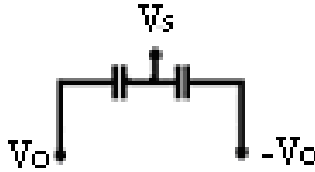
$\omega_o = \sqrt{k/m}$ là tần số cộng hưởng.

Thấy rằng gia tốc chỉ phụ thuộc vào tần số dao động riêng và vào độ dịch chuyển. Bài toán xác định độ dịch chuyển $x = g_2 - g_1$ nhờ điện thế của tụ vi phân như biểu diễn trên hình 3.

Ta có:

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{C_2 - C_1}{C_2 + C_1} = \frac{g_2 - g_1}{\text{const}} \quad (6)$$

với g_1, g_2 là khe hở 2 tụ.



Hình 3. Sơ đồ tụ vi phân của cảm biến

Công thức (6) cho thấy mối liên hệ tuyến tính giữa điện thế và độ dịch chuyển khi sử dụng tụ vi phân.

Xét giá trị RMS của nhiễu do nhiệt:

$$\sqrt{\bar{F}_n(v)} = \sqrt{4k_b T_b \Delta v} \quad (7)$$

Nhiều này tương đương với một gia tốc là:

$$\sqrt{a_n(v)} = \sqrt{\frac{4k_b T_{\omega_0} \Delta v}{mQ}} \quad (8)$$

Từ (8) ta thấy rằng cảm biến gia tốc MEMS cần được thiết kế với hệ số Q lớn để tăng tỉ số tín hiệu / nhiễu.

Chúng tôi sẽ tiếp tục nghiên cứu chi tiết các yếu tố khác như nhiễu điện tử, phản hồi của mạch điện, rung...Hiểu rõ về nhiễu là điều rất quan trọng bởi nhiễu sẽ ảnh hưởng lớn tới độ chính xác của phép đo.

2.2. Mô phỏng cấu trúc và hoạt động của cảm biến gia tốc MEMS kiểu tụ

Thiết kế vi cảm biến gia tốc kiểu tụ sử dụng chương trình mô phỏng SUGAR hoạt động dựa vào phân tích nút để giải các phương trình vi phân phi tuyến [4]. Chương trình được thực hiện trong môi trường MATLAB với độ chính xác cao, tương đương với những mô phỏng truyền thống (phương pháp phần tử hữu hạn – FEM, phương pháp phần tử biên - BEM).

Cấu trúc MEMS được chia thành ba thành phần cơ bản: các thanh dầm (beam), khe hở (gap) và mấu neo (anchor). Mỗi thành phần được xây dựng các mô hình ODE riêng biệt [1]. Phương trình hệ thống sẽ được thiết lập theo những thông tin từ các điểm nút và được giải theo phương pháp phân tích nút. Các tham số đầu vào có thể dùng thay đổi các tính chất vật liệu và hình học như mô đun Young, hệ số Poisson, hằng số điện môi, độ rộng thanh dầm... thuận lợi cho những thiết kế khác nhau. Đây là một ưu điểm lớn so với các công cụ mô phỏng khác. Trong chương trình mô phỏng dưới đây, một số thông số vật lý và hình học được liệt kê trong bảng 1 và bảng 2.

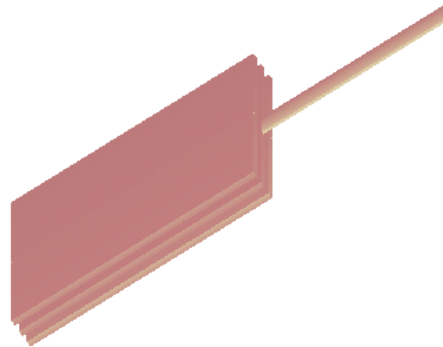
Bảng 1. Thông số vật lý

Hệ số Poisson	0.3
Khối lượng riêng	2300 kg/m ³
Môđun Young	1.65e11 N/m ²
Hằng số điện môi	8.854e-12 (C.s) ² /kg.#m ³

Bảng 2. Thông số hình học

Độ dài thanh dầm	3000#m
Chiều rộng thanh dầm	500#m
Độ dày thanh dầm	30-40#m
Khe hở cảm biến	10#m

Cấu trúc cảm biến gia tốc trong hình 4 là mô hình kiểu tụ vi phân một thanh dầm, được mô phỏng trong môi trường MATLAB.

**Hình 4. Cảm biến gia tốc theo trục z**

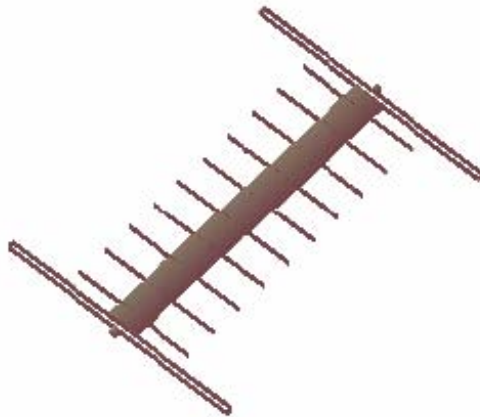
Cấu trúc trên bao gồm 1 thanh dầm, 5 mẫu neo và 2 khe hở cảm biến sẽ đóng vai trò tụ vi sai. Cảm biến trên có tần số dao động riêng là 280 Hz.

Cấu trúc cảm biến gia tốc kiểu tụ trong hình 5 là mô hình cảm biến với 2 thanh dầm, 6 mẫu neo và 2 khe hở cảm biến đóng vai trò tụ vi sai. Cấu trúc này có tần số dao động riêng là 1,108 kHz. Thấy rằng cấu trúc 2 thanh dầm đối xứng có dải làm việc lớn hơn cấu trúc 1 thanh dầm nhưng độ nhạy của cấu trúc 1 thanh dầm lại lớn hơn. Những tính toán mô phỏng cho thấy không thể đạt được cấu trúc vừa có dải làm việc rộng, vừa có độ nhạy cao. Vì thế, khi thiết kế các cảm biến phải cân đối các thông số này.



Hình 5. Cảm biến theo trục z – 2 beam, tâm đối xứng

Những cấu trúc được mô phỏng trong hình 4 và hình 5 là những cảm biến được chế tạo nhờ công nghệ vi cơ khối nên có thể đạt được độ nhạy cao và nhiễu nhỏ (xem phương trình 8). Tuy nhiên nhược điểm của những cảm biến loại này đó là công nghệ vi cơ khối cần phải có bước hàn tinh điện. Đây là kỹ thuật khó và gây nhiều sai lỗi. Công nghệ vi cơ bề mặt đã khắc phục được những nhược điểm của công nghệ vi cơ khối. Hình 6 mô tả cấu trúc của cảm biến gia tốc được chế tạo theo công nghệ vi cơ bề mặt. Đây là cảm biến kiểu răng lược với 10 răng lược, hệ giảm xóc gắn với hai mẫu neo A và B.



Hình 6. Cảm biến theo trục y – kiểu răng lược

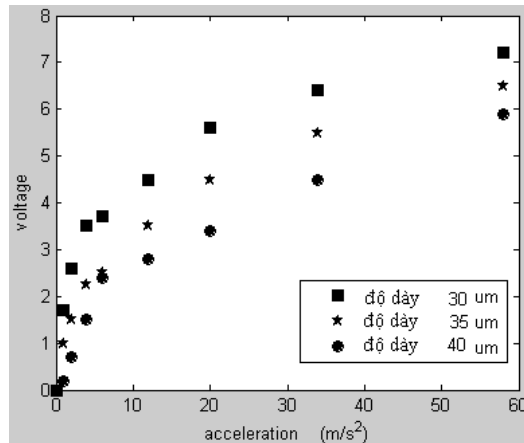
Cấu trúc trên có tần số dao động riêng là 10,601 kHz. Chương trình mô phỏng có thể cho phép dễ dàng thay đổi số răng lược, kích thước hình học, tính chất vật liệu. Bởi vậy thiết kế rất linh hoạt, đáp ứng được các yêu cầu thực nghiệm.

3. Một số kết quả thực nghiệm

Để đánh giá kết quả mô phỏng và kết quả thực nghiệm thu được từ những cảm biến do trung tâm ITIMS chế tạo, chúng tôi đã xây dựng một hệ đo chuẩn vi cảm biến gia tốc. Phương pháp gia tốc ly tâm được sử dụng cho phép xác định đáp ứng tĩnh của vi cảm biến gia tốc.

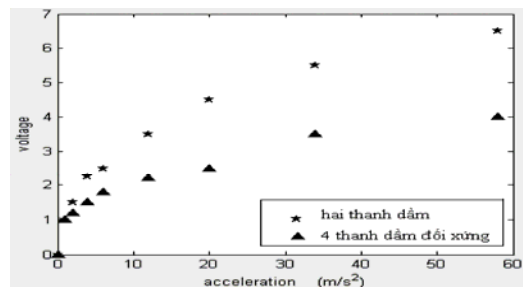
Từ những tính toán mô phỏng thấy rằng độ nhạy, dải làm việc của cảm biến gia tốc phụ thuộc rất lớn vào độ dày của thanh dầm chứ không phải vào chiều dài hay độ rộng

thanh dầm. Điều này có ý nghĩa rất lớn trong thiết kế cảm biến phù hợp với các tiêu chuẩn đã định trước. Kết quả đo hiệu điện thế như một hàm của gia tốc của các cảm biến 2 thanh dầm với độ dày khác nhau, được vẽ trên hình 7. Nhận thấy đó là đường cong phi tuyến và độ nhạy của cảm biến sẽ cao nếu độ dày của thanh dầm là thấp. Độ nhạy có thể đạt tới 0.042 Vg^{-1} với cảm biến có độ dày 30 μm .



Hình 7. Đặc tính hiệu điện thế – gia tốc của cảm biến gia tốc với 2 thanh dầm

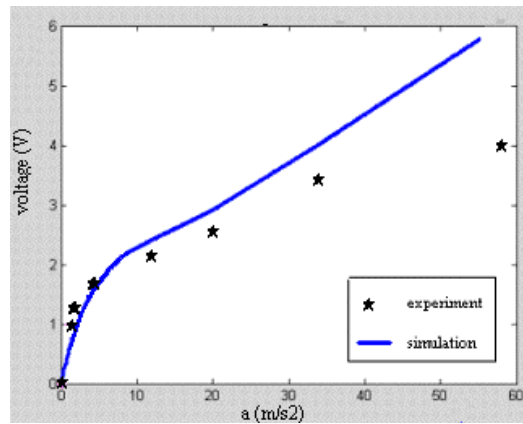
Hình 8 biểu diễn liên hệ đã đo được giữa hiệu điện thế và gia tốc của cảm biến 2 thanh dầm và cảm biến 4 thanh dầm đối xứng. Các thanh dầm đều có cùng kích thước $3 \times 0.5 \times 0.03 \text{ mm}^3$. Kết quả đo cho thấy độ nhạy của cảm biến 4 thanh dầm nhỏ hơn độ nhạy cảm biến 2 thanh dầm. Điều này phù hợp với kết quả mô phỏng trong phần II.2.



Hình 8. Đặc tính hiệu điện thế – gia tốc của cảm biến gia tốc với 2 thanh dầm và 4 thanh dầm

Hình 9 biểu diễn liên hệ giữa hiệu điện thế và gia tốc của cảm biến 4 thanh dầm đối xứng. Các kết quả thực nghiệm (điểm) được so sánh với kết quả mô phỏng (đường). Kết quả đo đạc và mô phỏng là khá phù hợp với giá trị gia tốc thấp. Tuy nhiên khi gia tốc cao, sự sai khác giữa các kết quả thực nghiệm và mô phỏng là tương đối lớn. Sự sai khác này được giải thích do các nguyên nhân sau: nhiễu và suy hao trong mạch đo lường điện tử; độ chính xác trong chế tạo chưa hoàn hảo; tính toán trong miền phi tuyến và suy hao cơ học trong mô phỏng chưa hoàn toàn phù hợp với thực tế.

Tuy nhiên có thể thấy rằng các kết quả mô phỏng là có thể tin cậy được và các cảm biến gia tốc được chế tạo có thể được ứng dụng trong thực tế.



Hình 9. Đặc tính hiệu điện thế – gia tốc của cảm biến gia tốc 4 thanh dầm đối xứng

4. Kết luận

Để đáp ứng nhu cầu phát triển của việc ứng dụng các cảm biến MEMS trong đời sống chúng tôi đã tập trung vào việc mô phỏng và thiết kế cảm biến gia tốc MEMS kiểu tụ. Bên cạnh đó, một hệ thống đo chuẩn sử dụng bộ biến đổi điện dung - điện thế và mạch thu phát không dây đã được xây dựng để xác định các thông số của các cảm biến được chế tạo tại trung tâm ITIMS. Bài báo cho thấy tầm quan trọng của việc mô hình hoá khi chế tạo các cảm biến gia tốc MEMS kiểu tụ.

Lời cảm ơn

Tập thể tác giả xin cảm ơn sự trợ giúp của đề tài mã số 811404 trong chương trình nhà nước về “*Khoa học và Công nghệ nano*” của bộ Khoa học và Công nghệ.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. W. Kuehnel, Modelling of the mechanical behaviour of a differential capacitor acceleration sensor, Sens.Actuator A48 (1994) 101-108.
2. J.V.Clark, N.Zhou, D.Bindel., 3D MEMS Simulation Modeling using modified nodal analysis. [Http://www-bsac.eecs.berkeley.edu](http://www-bsac.eecs.berkeley.edu)
3. J. V. Clark, N.Zhou, and K. S. .J. Pister, Modified nodal analysis for MEMS with multi-Energy Domains. [Http://www-bsac.eecs.berkeley.edu](http://www-bsac.eecs.berkeley.edu)
4. R.Puers, D. Lapadatu, Electrostatic forces and their effects on capacitive mechanical sensors, Sens.Actuator A56 (1996) 203-210.

CAPACITIVE ACCELEROMETER MEMS SENSOR

**Tran Duc Tan⁽¹⁾, Chu Duc Trinh⁽¹⁾
Nguyen Phu Thuy⁽¹⁾ and Vu Ngoc Hung⁽²⁾**

⁽¹⁾ Faculty of Electronics and Telecommunications, College of Technology, VNU

*⁽²⁾ International Training Institute for Material Sciences
Hanoi University of Technology*

MEMS based accelerometer is one type of advanced sensors that are applied widely to varied fields, such as automobile and household electronics. In this paper, we focus on modeling and simulation of the capacitive accelerometer. Firstly, we have analyzed operational principles for open loop and force-balance accelerometers. Then, we focus on the simulation of the different types of MEMS accelerometer using SUGAR in MATLAB environment. Finally, we compared the simulation results and the experimental ones which were obtained by using a home-built measurement system on MEMS accelerometers fabricated in ITIMS.

VIETNAM NATIONAL UNIVERSITY, HANOI
JOURNAL OF SCIENCE
NATURAL SCIENCES & TECHNOLOGIES
T. XXI, N₀2AP - 2005

ĐẠI HỌC QUỐC GIA HÀ NỘI
TẠP CHÍ KHOA HỌC
KHOA HỌC TỰ NHIÊN VÀ CÔNG NGHỆ
T. XXI, SỐ 2PT - 2005

HỘI ĐỒNG BIÊN TẬP

CHỦ TỊCH

Tổng Biên tập: **GS.TSKH** Vũ Minh Giang

CÁC ỦY VIÊN

- PGS.TSKH Lưu Văn Bội (Ph. Tổng Biên tập)
- PGS.TS Nguyễn Thụy (Trưởng ban)
- PGS.TSKH Lê Văn Cam
- ThS Nguyễn Văn Lợi
- TSKH Nguyễn Đình Đức
- GS Vũ Dương Ninh

BAN BIÊN TẬP CHUYÊN SAN KHOA HỌC TỰ NHIÊN & CÔNG NGHỆ

- PGS.TSKH Lưu Văn Bội (Trưởng ban)
- PGS.TS Trương Quang Hải
- GS.TSKH Trương Quang Học
- PGS.TS Nguyễn Đình Hòa
- GS.TS Trần Nghi
- GS.TSKH Đặng Ứng Vận
- GS.TS Vũ Văn Vụ

ĐẠI HỌC QUỐC GIA HÀ NỘI
TẠP CHÍ KHOA HỌC
KHOA HỌC TỰ NHIÊN VÀ CÔNG NGHỆ
T. XXI, SỐ 2PT - 2005

MỤC LỤC

1.	Hồ Sĩ Đàm, Đào Kiến Quốc, Nguyễn Việt Hà. Một số luận cứ phân tích thiết kế hệ thống thông tin đại học.....	1
2.	Phan Đình Diệu. Các hệ thống thông tin: Một vài hướng nghiên cứu cần cho ứng dụng hiện nay.....	7
3.	Nguyễn Năng Định. Linh kiện quang điện tử trên cơ sở màng mỏng VO ₂ chế tạo bằng chùm tia điện tử.....	8
4.	Nguyễn Việt Tân, Đào Kiến Quốc, Nguyễn Ngọc Duy. SEL@B/CMS - Một giải pháp phần mềm để quản trị nội dung WEBSITE.....	16
5.	Trịnh Nhật Tiến, Trương Thị Thu Hiền. Về một quy trình bỏ phiếu từ xa.....	21
6.	Lê Anh Cường, Nguyễn Phương Thái, Nguyễn Văn Vinh. Xử lý nhập nhằng ngữ nghĩa từ với độ chính xác cao sử dụng phân loại Naive Bayesian kết hợp lựa chọn thuộc tính.....	29
7.	Nguyễn Tuệ. Ứng dụng mô hình thực thể liên kết mở rộng vào việc thiết kế quan niệm cơ sở dữ liệu hướng đối tượng.....	36
8.	Hoàng Thị Lan Giao. Một số thuật toán tìm tập rút gọn của bảng quyết định sử dụng các phép toán của đại số quan hệ.....	41
9.	Nguyễn Vinh Quang, Trần Quang Vinh, Chử Văn An, Đỗ Văn Mạnh. Mô đun ghép nối máy tính sử dụng vi điều khiển AT89C52....	49
10.	Ngô Diên Tập, Nguyễn Kiên Hùng, Phạm Đức Long. Thử nghiệm kỹ thuật thu phát âm số với vi điều khiển AVR.....	55
11.	Trịnh Anh Vũ, Trần Mạnh Hà. Nhận thực vân tay từ sensor của số hạn chế dựa theo trường định hướng.....	62
12.	Trần Đức Tân, Chử Đức Trinh, Nguyễn Phú Thủy, Vũ Ngọc Hùng. Mô phỏng cảm biến gia tốc MEMS kiểu tụ.....	65
13.	Lê Tuấn Anh. ROBOT bắt bóng.....	75
14.	Trần Quang Vinh, Phùng Mạnh Dương, Trần Hiếu. Giám sát và điều khiển ROBOT di động qua mạng LAN vô tuyến và INTERNET.....	85
15.	Vương Đạo Vy, Trần Thanh Hải, Phạm Đình Tuấn, Trần Anh Tuấn, Hà Quang Dự, Phùng Công Phi Khanh. Mạng cảm biến không dây thu thập dữ liệu môi trường sử dụng vi điều khiển Chipcon CC1010.....	

16.	Nguyễn Kim Giao, Nguyễn Thị Hồng, Phạm Thị Hồng, Phạm Phi Hùng. Nghiên cứu triển khai hệ thống mạng truy cập ADSL tại PTN BMVT (Telecom Sys Lab).....	100
17.	Nguyễn Kim Giao, Phạm Phi Hùng, Nguyễn Quốc Tuấn. Nghiên cứu triển khai các dịch vụ truyền thông hiện đại qua các tổng đài số tích hợp.....	111
18.	Nguyễn Việt Kinh, Nguyễn Quốc Tuấn, Nguyễn Bích Phượng. Ảnh hưởng của nhiễu xuyên âm đến chất lượng truyền điều chế đa âm tần rời rạc.....	119
19.	Trần Ngọc Hưng. Thiết kế Anten cho hệ thống truyền thông không dây dùng trong các hệ thống WLAN.....	125
20.	Nguyễn Thị Hồng, Nguyễn Kim Giao, Phạm Phi Hùng, Phạm Thị Hồng. Báo hiệu QoS trong mạng xây dựng mô hình mạng viễn thông thu nhỏ.....	135
21.	Nguyễn Thị Tuyết Minh, Phạm Thị Hồng. Nghiên cứu bộ cân bằng cho truyền dẫn đa kênh không dây.....	145
22.	Bạch Gia Dương, Nguyễn Kim Giao. Xây dựng hệ thống thu thập xử lý tín hiệu trong môi trường truyền thông.....	151
23.	Nguyễn Quốc Tuấn, Nguyễn Đình Thông. Nghiên cứu bộ cân bằng làm giảm nhiễu trong hệ thống truyền thông hiệu dụng trong điều chế đa sóng mang.....	162
24.	Trần Thị Tâm, Võ Ngọc Cẩm, Đặng Quốc Trung. Hiện tượng lưỡng ổn định trong laser bán dẫn pha tạp Erbium.....	170
25.	Nguyễn Văn Hiệu. Lý thuyết tương tự các linh kiện điện tử Nano ít điện tử.....	177
26.	Phạm Văn Hội, Chu Thị Thu Hà, Hoàng Quang Hưng, Nguyễn Thu Trang, Đặng Hoàng Long. Nghiên cứu chế tạo và khảo sát Laser vi cộng hưởng dạng sóng truyền bằng vật liệu thủy tinh Silica pha tạp Er nồng độ cao.....	182
27.	Lê Quốc Minh, Nguyễn Thanh Hương, Trần Thu Hương, Nguyễn Thanh Bình, Nguyễn Tấn Thành, Phan Việt Phong, Trần Kim Anh. Vật liệu bán dẫn cấu trúc Nano nhằm chế tạo linh kiện dẫn sóng quang.....	188
28.	Phan Hồng Khôi, Phan Ngọc Minh. Vật liệu Các bon có cấu trúc Nanô và một số ứng dụng ban đầu.....	195
29.	Nguyễn Thị Thu Thủy, Nguyễn Thị Thu Trang, Hoàng Mai Hà, Nguyễn Thị Vân, Văn Trọng Hiếu, Trần Phương Hoa, Nguyễn Đức Tuyển, Nguyễn Đức Nghĩa. Chế tạo và nghiên cứu tính chất của hợp chất khoáng sét (Montmorillonite) lai - hữu cơ.....	203