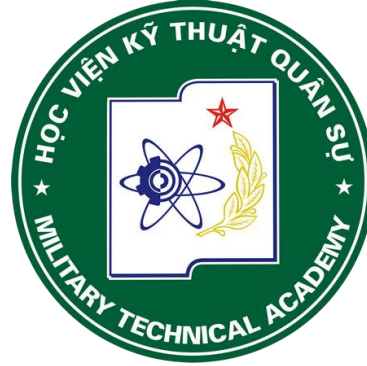


**HỘI NGHỊ KHOA HỌC CÁC NHÀ NGHIÊN CỨU TRẺ
LẦN THỨ XXI - NĂM 2026**



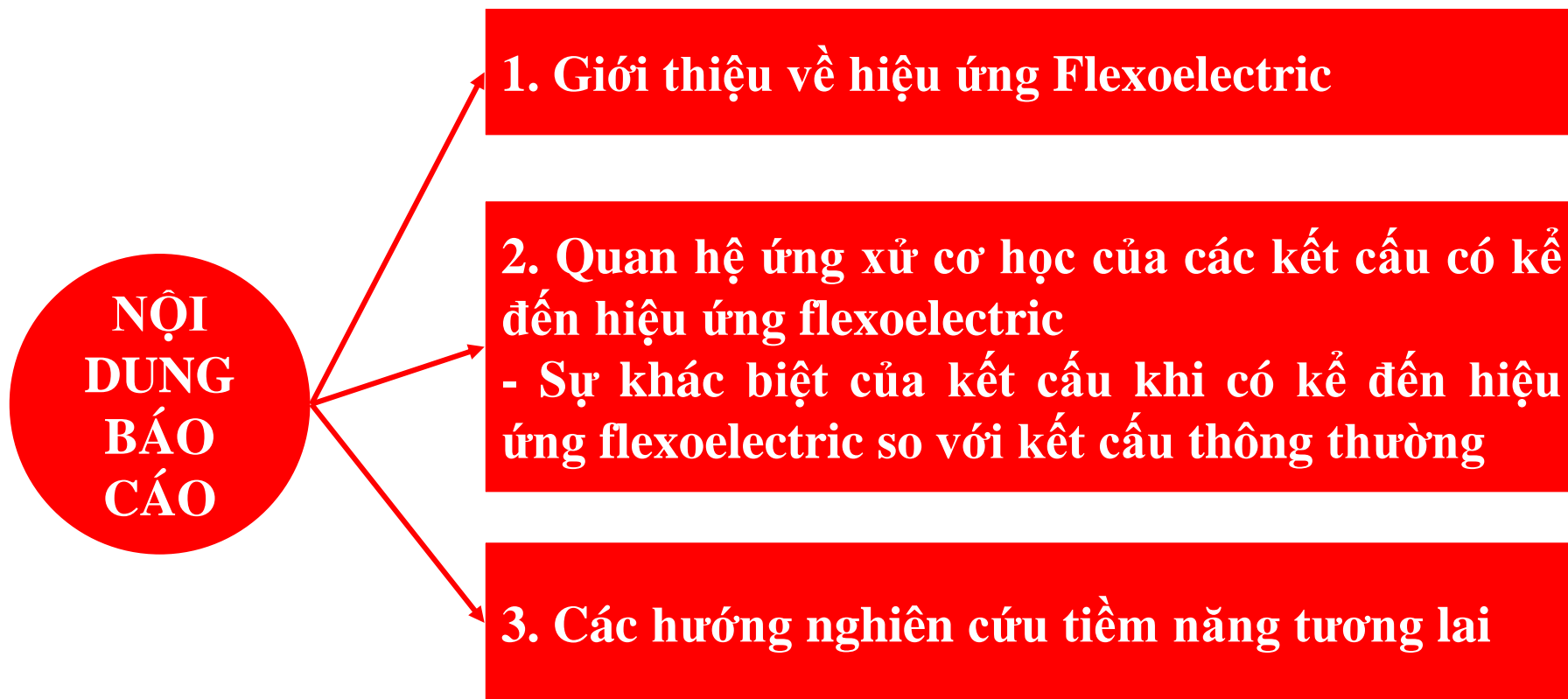
Chủ đề:

MỘT SỐ KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VỀ ỨNG XỬ CỦA KẾT CẤU FLEXOELECTRIC

Người báo cáo: Phùng Văn Minh

Đơn vị: Bộ môn Cơ học vật rắn – Khoa Cơ khí – Học viện Kỹ thuật quân sự

Hà Nội, tháng 3 năm 2026

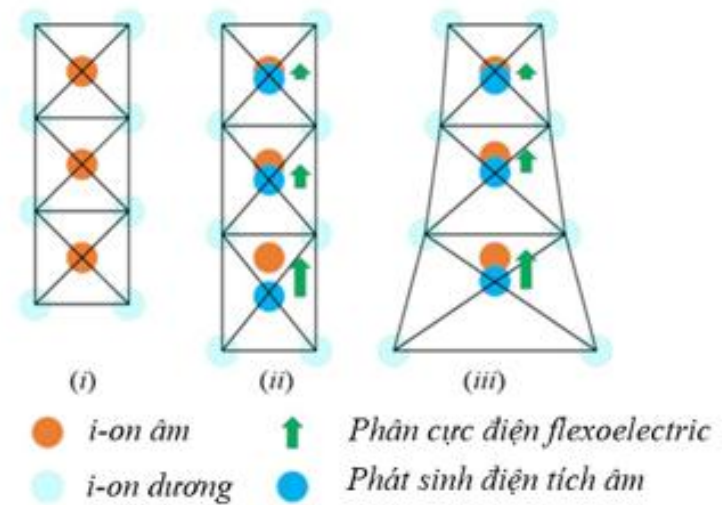
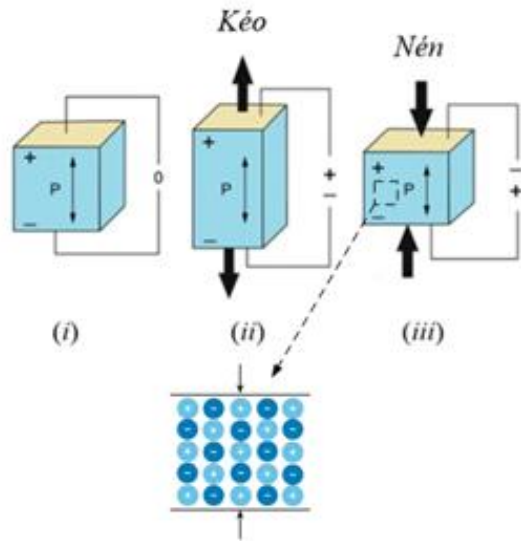


MỘT SỐ KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VỀ ỨNG XỬ CỦA KẾT CẤU FLEXOELECTRIC

Phùng Văn Minh, Giảng viên Bộ môn Cơ học vật rắn

1. Giới thiệu về hiệu ứng Flexoelectric

Hiệu ứng flexoelectric là hiện tượng vật liệu điện môi bị **phân cực điện** khi chịu tác động của **gradient biến dạng** (strain gradient). Điều này khác với hiệu ứng **piezoelectric** (áp điện), vốn chỉ xuất hiện trong các tinh thể **không có tâm đối xứng** khi chịu biến dạng đồng đều.



a) Hiệu ứng áp điện do biến dạng cơ học b) Hiệu ứng flexoelectric do biến thiên biến dạng

Hình 1. Sự khác nhau giữa hiệu ứng piezoelectric (áp điện) và hiệu ứng flexoelectric

MỘT SỐ KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VỀ ỨNG XỬ CỦA KẾT CẤU FLEXOELECTRIC

Phùng Văn Minh, Giảng viên Bộ môn Cơ học vật rắn



1. Giới thiệu về hiệu ứng Flexoelectric

Phương trình mô tả sự phân cực điện xảy ra trong chất điện môi do biến dạng và biến thiên biến dạng:

$$P_i = e_{ijk} \varepsilon_{ik} + f_{ijkl} \frac{\partial \varepsilon_{ik}}{\partial x_l} \quad (1)$$

trong đó:

- Thành phần đầu tiên biểu thị tác động của áp điện trực tiếp;
- Thành phần thứ hai mô tả sự phân cực điện do biến thiên biến dạng.
- Hệ số flexoelectric, được biểu thị bằng f_{ijkl} , là một tenxơ phân cực bậc bốn và hệ số biểu thị tác động áp điện trực tiếp được biểu thị bằng e_{ijk} .

Hai hệ số này phụ thuộc vào đặc tính của vật liệu cụ thể.

MỘT SỐ KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VỀ ỨNG XỬ CỦA KẾT CẤU FLEXOELECTRIC

Phùng Văn Minh, Giảng viên Bộ môn Cơ học vật rắn



1. Giới thiệu về hiệu ứng Flexoelectric

| Giai đoạn | Mốc chính | Nội dung nổi bật |
|---------------|---|---|
| 1957 | Kogan (Liên Xô) | Đề xuất khái niệm <i>flexoelectricity</i> : phân cực điện do gradient biến dạng . |
| 1970s – 1990s | Mashkevich, Tolpygo và các nhà nghiên cứu | Phát triển cơ sở lý thuyết , xây dựng tensor flexoelectric bậc 4; hiệu ứng được coi là yếu, ít ứng dụng. |
| 2000s | Cross & Ma (Penn State University) | Thí nghiệm trên pê-rôp-xkai (BaTiO_3 , SrTiO_3), phát hiện hệ số flexoelectric lớn hơn dự đoán hàng trăm lần . |
| 2010s – nay | Nhiều nhóm nghiên cứu quốc tế | Ứng dụng mạnh trong nano-vật liệu, MEMS/NEMS, thu năng lượng, cảm biến, cơ sinh học ; kết hợp với piezoelectric và ferroelectric. |

MỘT SỐ KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VỀ ỨNG XỬ CỦA KẾT CẤU FLEXOELECTRIC

Phùng Văn Minh, Giảng viên Bộ môn Cơ học vật rắn



1. Giới thiệu về hiệu ứng Flexoelectric

Bảng 1. Giá trị thực nghiệm và giá trị tính toán hệ số flexoelectric đối với một số vật liệu điện môi

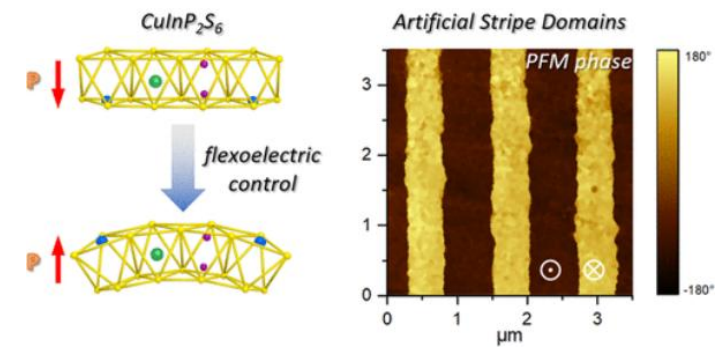
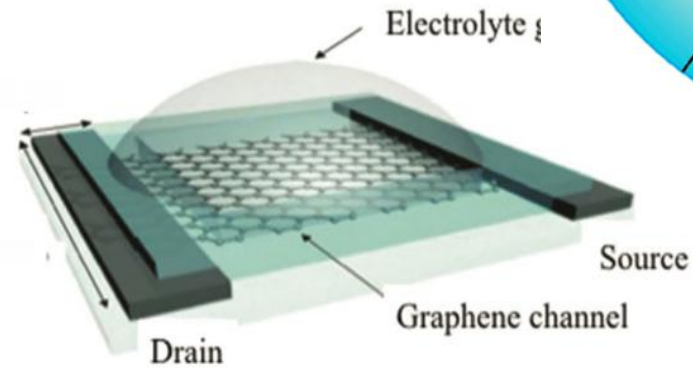
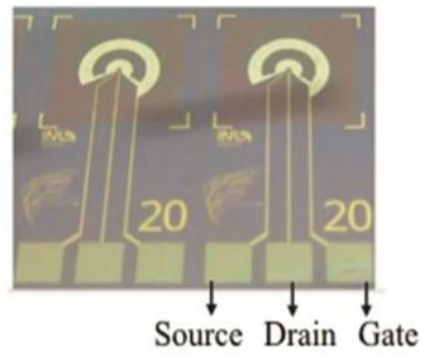
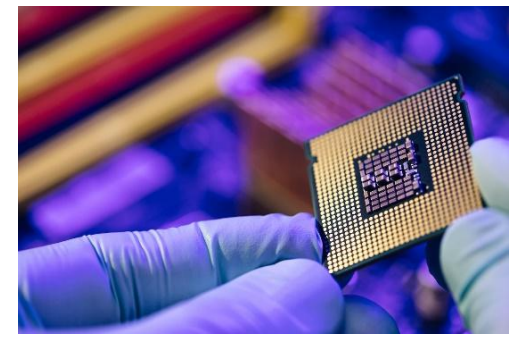
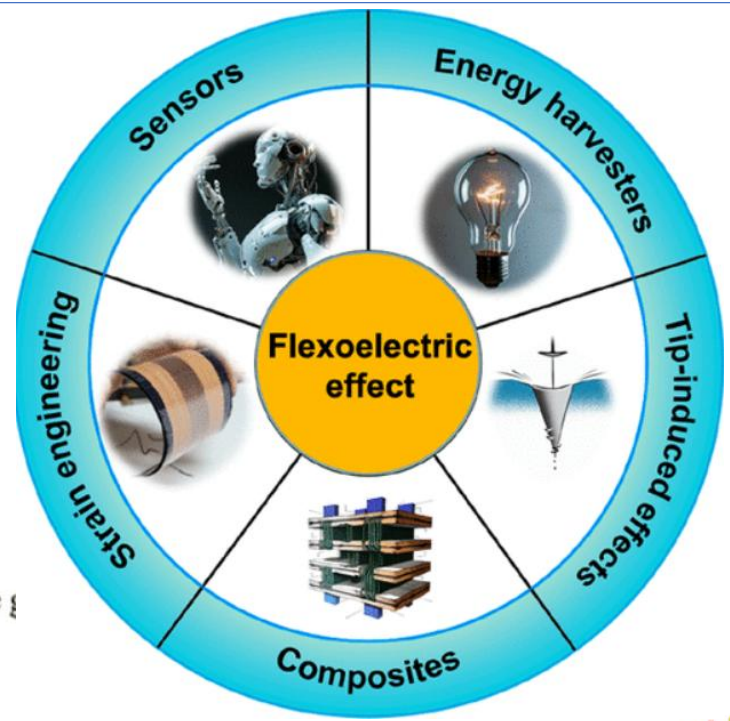
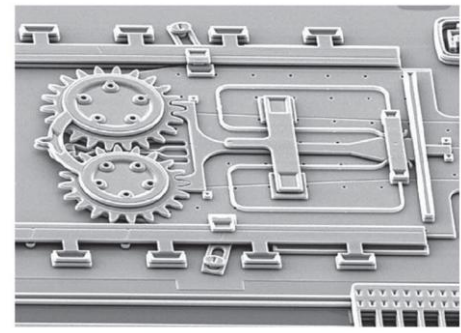
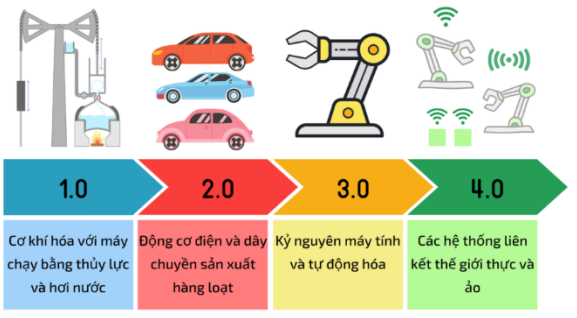
| Vật liệu | f_{1111} (nC/m) | | f_{1122} (nC/m) | | f_{1212} (nC/m) | |
|--|---------------------|-----------|---------------------|-----------|-------------------|-----------|
| | Thực nghiệm | Lý thuyết | Thực nghiệm | Lý thuyết | Thực nghiệm | Lý thuyết |
| GaAs | – | +0.51 | – | +0.85 | – | –0.84 |
| GaP | – | +0.47 | – | +0.31 | – | –0.34 |
| ZnS | – | –0.31 | – | –1.5 | – | –0.61 |
| KCl | – | +0.40 | – | –0.12 | – | –0.23 |
| NaCl | – | +0.41 | – | –0.12 | – | –0.21 |
| TiO ₂ | – | – | 2 | – | – | – |
| SrTiO ₃ | 0.2 | –0.89 | 7 | +2.3 | 5.8 | –6.6 |
| PbZrO ₃ | – | – | 2.5 | – | – | – |
| Hydroxyapatite | – | – | 1.2 | – | – | – |
| (KNaLi)(NbSb)O ₃ | – | – | 2×10^3 | – | – | – |
| BT–BZT | – | – | 2.5×10^4 | – | – | – |
| Pb _{0.3} Sr _{0.7} TiO ₃ | – | – | 2×10^4 | – | – | – |
| PMN–PT | – | – | $(2-5) \times 10^4$ | – | – | – |
| PbMg _{1/3} Nb _{2/3} O ₃ | $(3-4) \times 10^3$ | – | – | – | – | – |
| BaTiO ₃ | 5×10^4 | –0.36 | 5×10^4 | +1.6 | – | –1.5 |
| (Ba _{1-x} Sr _x)TiO ₃ | 1.15×10^5 | 10–20 | 1×10^5 | 6–10 | – | – |
| Ba(Ti _{1-x} Sn _x)O ₃ | – | – | 4.5×10^4 | – | – | – |

MỘT SỐ KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VỀ ỨNG XỬ CỦA KẾT CẤU FLEXOELECTRIC

Phùng Văn Minh, Giảng viên Bộ môn Cơ học vật rắn

1. Giới thiệu về hiệu ứng Flexoelectric

CÁCH MẠNG CÔNG NGHIỆP



Hình 2. Những ứng dụng nổi bật của hiệu ứng flexoelectric trong các thiết bị điện tử

MỘT SỐ KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VỀ ỨNG XỬ CỦA KẾT CẤU FLEXOELECTRIC
Phùng Văn Minh, Giảng viên Bộ môn Cơ học vật rắn

1. Giới thiệu về hiệu ứng Flexoelectric



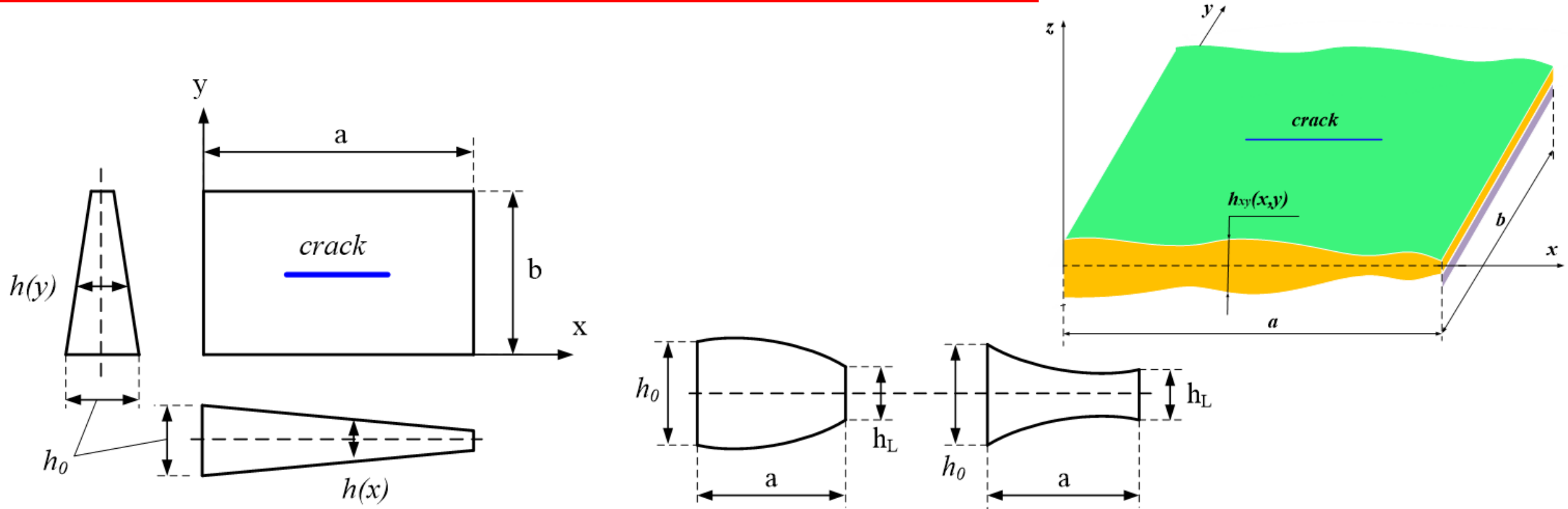
Cơ học tính toán chính là cầu nối giữa **nghiên cứu cơ bản** về hiệu ứng **flexoelectric** và ứng dụng thực tiễn, đảm bảo quá trình phát triển vật liệu, kết cấu và thiết bị diễn ra nhanh hơn, tối ưu hơn và hiệu quả hơn.

Hình 3. Vai trò của ngành Cơ học tính toán

MỘT SỐ KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VỀ ỨNG XỬ CỦA KẾT CẤU FLEXOELECTRIC

Phùng Văn Minh, Giảng viên Bộ môn Cơ học vật rắn

2. Quan hệ ứng xử cơ học của các kết cấu có kể đến hiệu ứng flexoelectric và sự khác biệt của kết cấu khi có kể đến hiệu ứng flexoelectric so với kết cấu thông thường



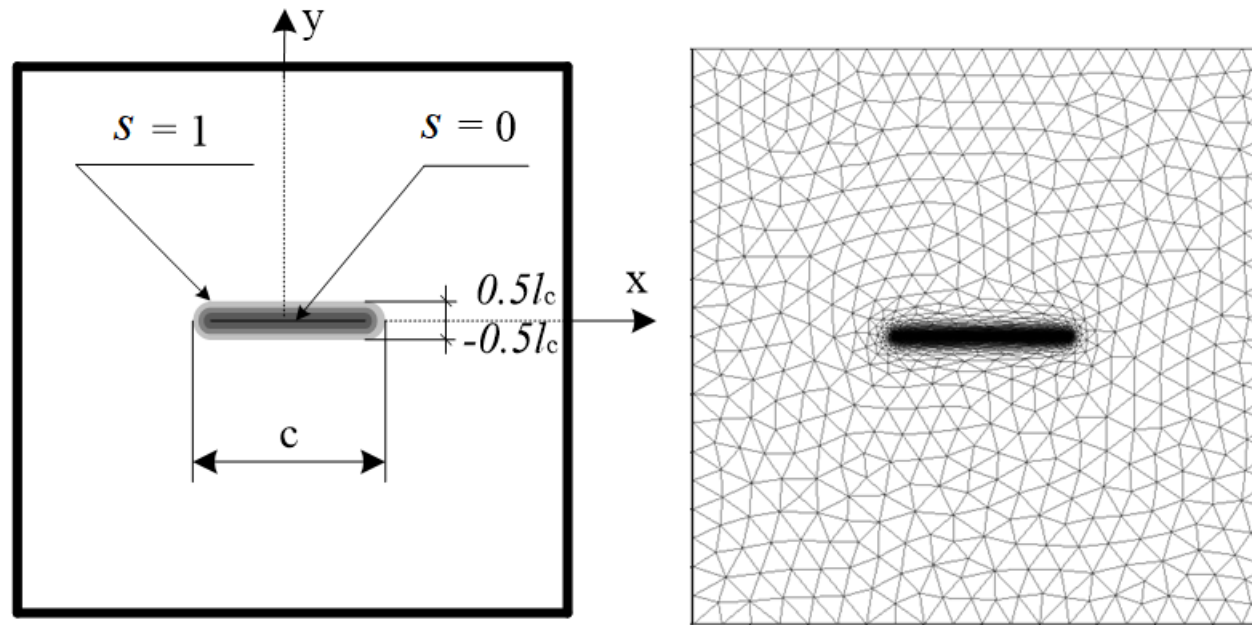
a. Chiều dày biến đổi tuyến tính b. Chiều dày biến đổi phi tuyến

Hình 4. Tấm nano có chiều dày thay đổi có vết nứt

MỘT SỐ KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VỀ ỨNG XỬ CỦA KẾT CẤU FLEXOELECTRIC

Phùng Văn Minh, Giảng viên Bộ môn Cơ học vật rắn

2. Quan hệ ứng xử cơ học của các kết cấu có kể đến hiệu ứng flexoelectric và sự khác biệt của kết cấu khi có kể đến hiệu ứng flexoelectric so với kết cấu thông thường



Hình 5. Mô hình tấm micro/nano có vết nứt

MỘT SỐ KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VỀ ỨNG XỬ CỦA KẾT CẤU FLEXOELECTRIC

Phùng Văn Minh, Giảng viên Bộ môn Cơ học vật rắn



2. Quan hệ ứng xử cơ học của các kết cấu có kể đến hiệu ứng flexoelectric và sự khác biệt của kết cấu khi có kể đến hiệu ứng flexoelectric so với kết cấu thông thường

- Trường chuyển vị: $u_x = u_0 + z\beta_x; u_y = v_0 + z\beta_y; u_z = w_0$ (1)
- Trường biến dạng:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \partial u_0 / \partial x + z\partial\beta_x / \partial x \\ \partial v_0 / \partial y + z\partial\beta_y / \partial y \\ \partial u_0 / \partial y + \partial v_0 / \partial x + z(\partial\beta_x / \partial y + \partial\beta_y / \partial x) \end{Bmatrix}; \boldsymbol{\gamma} = \begin{Bmatrix} \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \beta_x + \frac{\partial w_0}{\partial x} \\ \beta_y + \frac{\partial w_0}{\partial y} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

- Biến thiên biến dạng:

$$\boldsymbol{\eta} = \begin{Bmatrix} \eta_{xxz} = \frac{\partial \varepsilon_x}{\partial z} = \frac{\partial \beta_x}{\partial x} \\ \eta_{yyz} = \frac{\partial \varepsilon_y}{\partial z} = \frac{\partial \beta_y}{\partial y} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

MỘT SỐ KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VỀ ỨNG XỬ CỦA KẾT CẤU FLEXOELECTRIC

Phùng Văn Minh, Giảng viên Bộ môn Cơ học vật rắn



2. Quan hệ ứng xử cơ học của các kết cấu có kể đến hiệu ứng flexoelectric và sự khác biệt của kết cấu khi có kể đến hiệu ứng flexoelectric so với kết cấu thông thường

- Ứng suất và các thành phần chuyển vị điện tích

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl} \varepsilon_{kl} - e_{kij} E_k; \chi_{ijm} = -f_{kijm} E_k; P_i = e_{ijk} \varepsilon_{jk} + \kappa_{ij} E_k + f_{ijkl} \eta_{jkl} \quad (4)$$

- Trong điều kiện mạch hở, biểu thức điện trường được biểu diễn:

$$E_z = -\frac{e_{31}}{\kappa_{33}} \left\{ (\varepsilon_{0x} + \varepsilon_{0y}) + z (\varepsilon_{1x} + \varepsilon_{1y}) \right\} - \frac{f_{14}}{\kappa_{33}} (\eta_{xxz} + \eta_{yyz}) \quad (5)$$

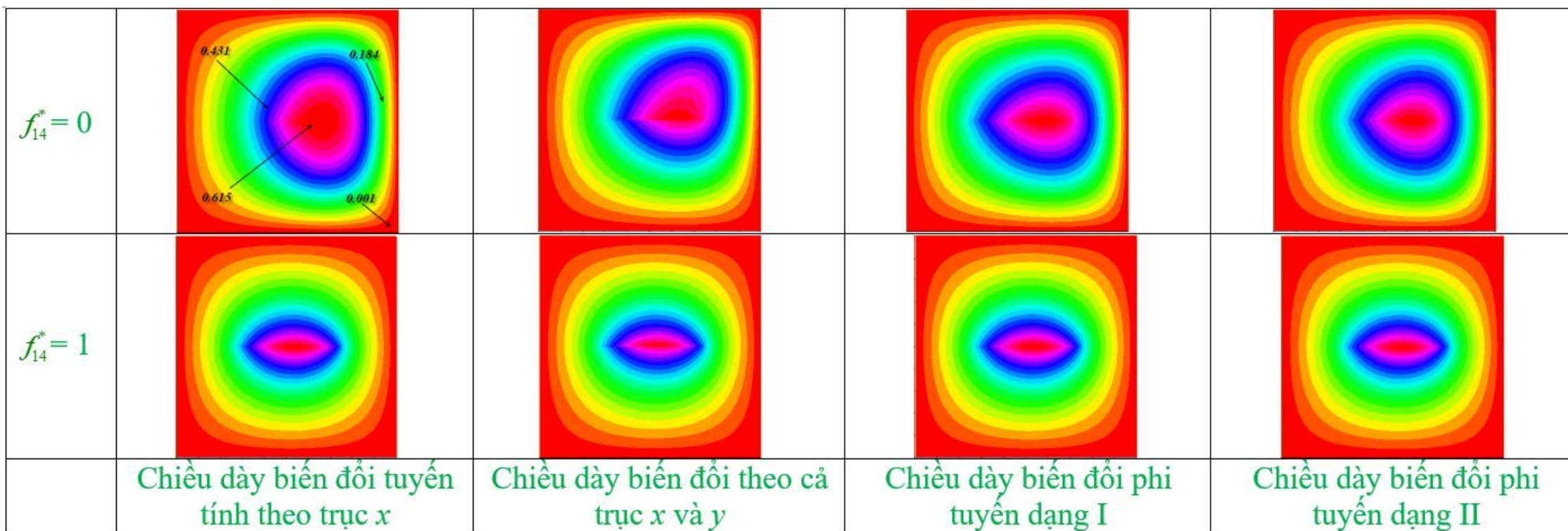
- Năng lượng của tấm nano có xét đến ảnh hưởng của hiệu ứng flexo và chịu nén trong mặt phẳng trung bình của tấm có dạng như sau:

$$\Pi_e = \frac{1}{2} \int_{V_e} s^2 \left(\varepsilon^T \sigma + \gamma^T \tau + \eta^T \chi + \nabla^T w \hat{\sigma}_0 \nabla w + \nabla^T \beta \hat{\sigma}_0 \nabla \beta z^2 \right) dV \quad (6)$$

MỘT SỐ KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VỀ ỨNG XỬ CỦA KẾT CẤU FLEXOELECTRIC

Phùng Văn Minh, Giảng viên Bộ môn Cơ học vật rắn

* Một số kết quả phân tích ứng xử cơ học của kết cấu nano có vết nứt kể đến hiệu ứng flexoelectric:

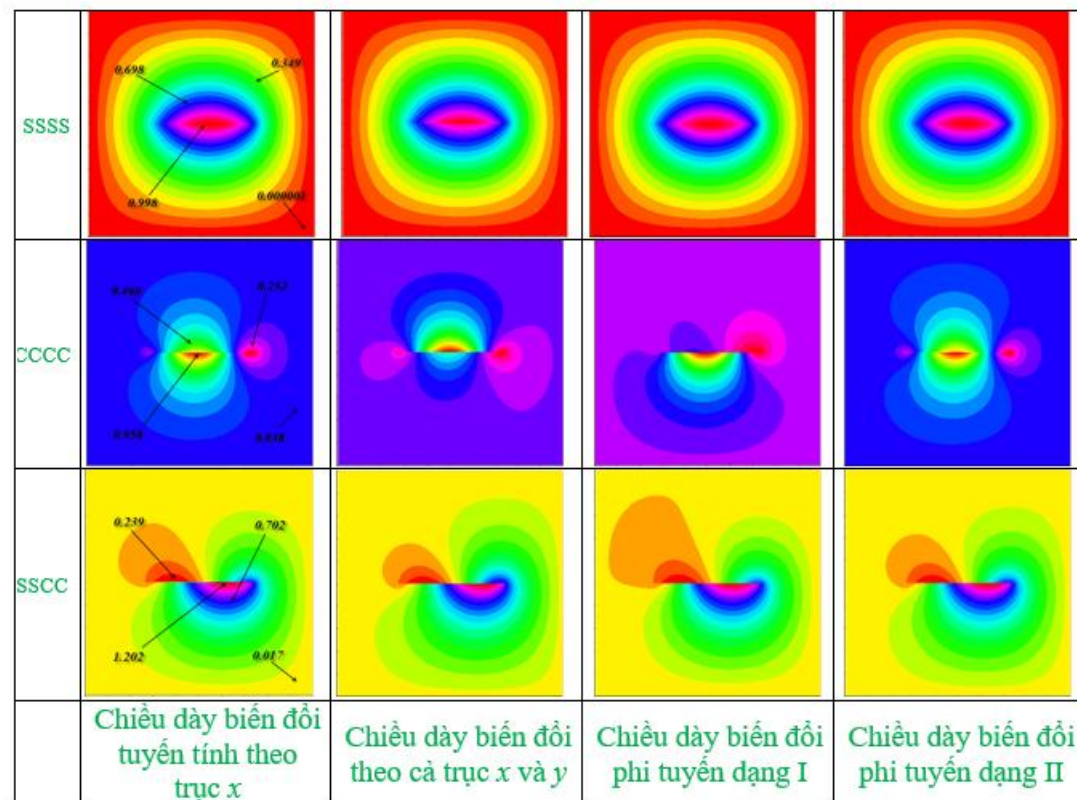


Hình 6. Các dạng mất ổn định của tấm nano có vết nứt phụ thuộc vào hệ số flexoelectric f_{14}^* , $\beta = 0.5, c/a = 0.5$

MỘT SỐ KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VỀ ỨNG XỬ CỦA KẾT CẤU FLEXOELECTRIC

Phùng Văn Minh, Giảng viên Bộ môn Cơ học vật rắn

* Một số kết quả phân tích ứng xử cơ học của kết cấu nano có vết nứt kể đến hiệu ứng flexoelectric:

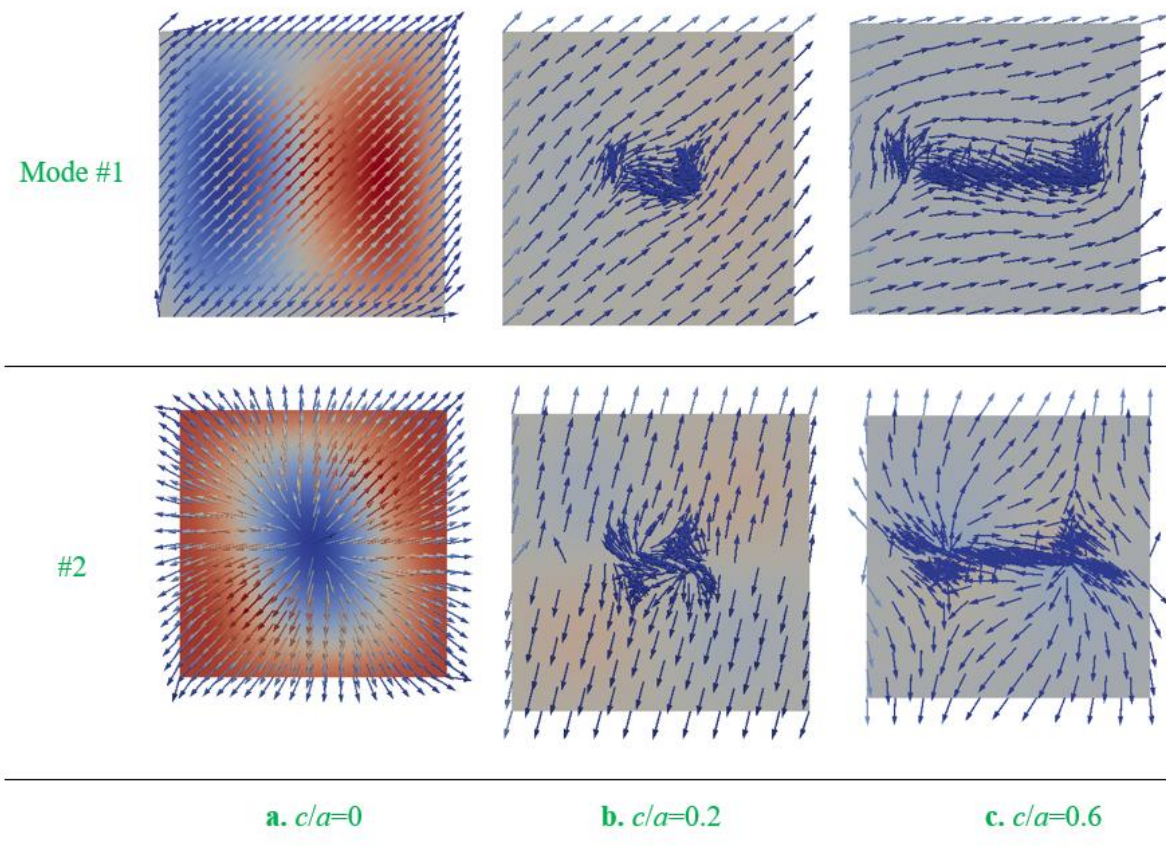


Hình 7. Các dạng mất ổn định phụ thuộc vào điều kiện biên

MỘT SỐ KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VỀ ỨNG XỬ CỦA KẾT CẤU FLEXOELECTRIC

Phùng Văn Minh, Giảng viên Bộ môn Cơ học vật rắn

* Một số kết quả phân tích ứng xử cơ học của kết cấu nano có vết nứt kể đến hiệu ứng flexoelectric:

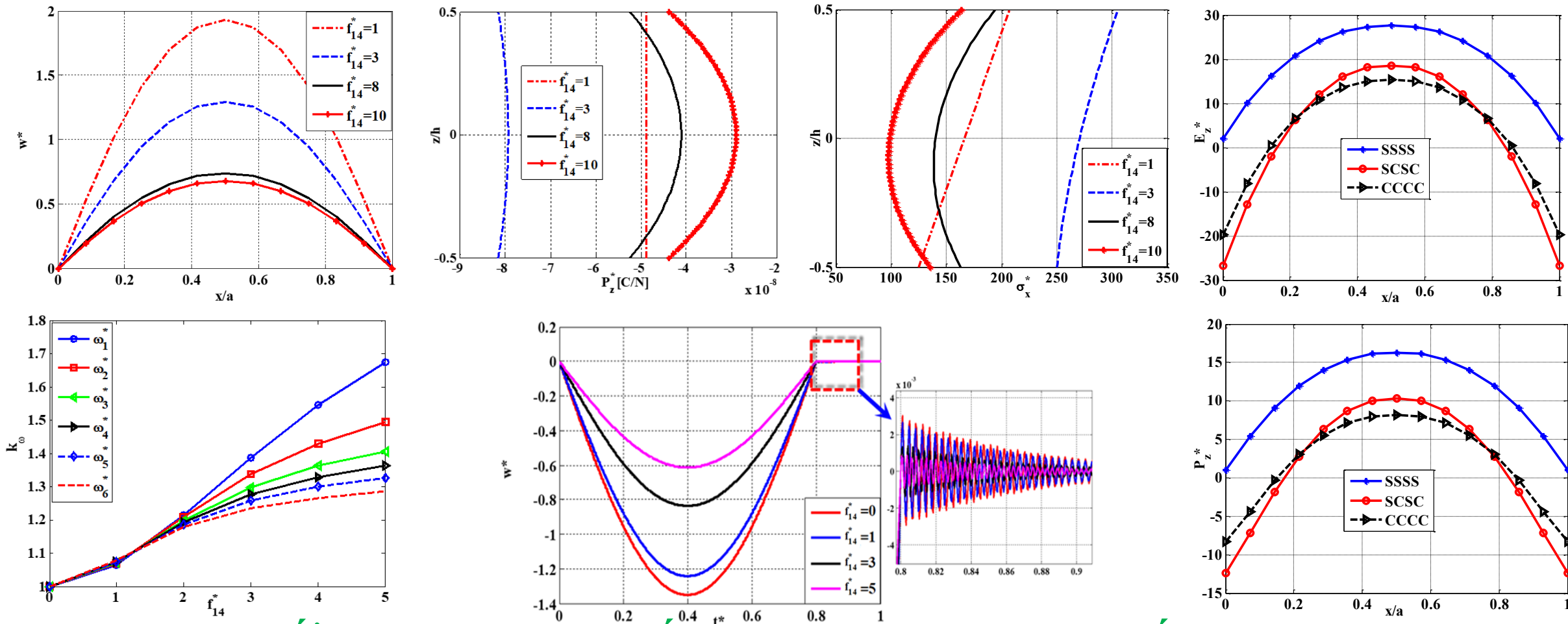


Hình 8. Phân cực điện tích của tấm nano có vết nứt phụ thuộc vào c/a ($a=b$, $h=a/50$, SSSS)

MỘT SỐ KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VỀ ỨNG XỬ CỦA KẾT CẤU FLEXOELECTRIC

Phùng Văn Minh, Giảng viên Bộ môn Cơ học vật rắn

* Một số kết quả phân tích ứng xử cơ học của kết cấu nano có kể đến hiệu ứng flexoelectric:



Hình 9. Ứng xử cơ-điện của tấm nano phụ thuộc vào hệ số flexoelectric

MỘT SỐ KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VỀ ỨNG XỬ CỦA KẾT CẤU FLEXOELECTRIC

Phùng Văn Minh, Giảng viên Bộ môn Cơ học vật rắn



* Một số kết quả phân tích ứng xử cơ học của kết cấu nano có vết nứt kể đến hiệu ứng flexoelectric:

SPRINGER NATURE Link

Find a journal Publish with us Track your research Search

Home > International Journal of Mechanics and Materials in Design > Article

An overview of the flexoelectric phenomenon, potential applications, and proposals for further research directions

Published: 18 September 2023
Volume 19, pages 903–925, (2023) [Cite this article](#)

Phung Van Minh, Le Minh Thai, Nguyen Thai Dung, Abdelouahed Tounsi, Nguyen Thi Cam Nhung & Do Van Thom

1435 Accesses 28 Citations [Explore all metrics](#)

ELSEVIER European Journal of Mechanics - A/Solids
Volume 106, July–August 2024, 105309

Full Length Article
Mechanical responses of nanoplates resting on viscoelastic foundations in multi-physical environments

Do Van Thom, Van Minh Chinh, Phung Van Minh, Nguyen Dinh Anh Vu

Show more

Add to Mendeley Share Cite

<https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2024.105309>

[Get rights and content](#)

SPRINGER NATURE Link

Find a journal Publish with us Track your research Search

Home > Arabian Journal for Science and Engineering > Article

A Comprehensive Study on Mechanical Responses of Non-uniform Thickness Piezoelectric Nanoplates Taking into Account the Flexoelectric Effect

Research Article–Mechanical Engineering | Published: 29 November 2022
Volume 48, pages 11457–11482, (2023) [Cite this article](#)

Phung Van Minh & Tran Van Ke

550 Accesses 41 Citations [Explore all metrics](#)

ELSEVIER Computers & Structures
Volume 312, May 2025, 107737

Static and dynamic analysis of doubly-curved functionally graded porous nanoshells integrated with piezoelectric surface layers and flexoelectric effect

Tran Van Ke, Phung Van Minh, Do Van Thom, Nguyen Dinh Duc

Show more

Add to Mendeley Share Cite

<https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2025.107737>

[Get rights and content](#)

SPRINGER NATURE Link

Find a journal Publish with us Track your research Search

Home > Archive of Applied Mechanics > Article

Finite element modeling of mechanical behaviors of piezoelectric nanoplates with flexoelectric effects

Original | Published: 17 November 2021
Volume 92, pages 163–182, (2022) [Cite this article](#)

Le Minh Thai, Doan Trac Luat, Van Binh Phung, Phung Van Minh & Do Van Thom

798 Accesses 68 Citations [Explore all metrics](#)

Taylor & Francis Online Journals Search Publish Login

Home > All Journals > Engineering & Technology > Mechanics Based Design of Structures and Machines > List of Issues > Volume 51, Issue 12 > Vibration and static buckling behavior o ...

Enter keywords, authors, DOI, etc

Mechanics Based Design of Structures and Machines
An International Journal
Volume 51, 2023 - Issue 12

Submit an article Journal homepage

594 Views
48 CrossRef citations to date
0 Altmetric

Articles
Vibration and static buckling behavior of variable thickness flexoelectric nanoplates
Doan Hong Duc, Do Van Thom, Pham Hong Cong, Phung Van Minh & Nguyen Xuan Nguyen
Pages 7102-7130 | Received 18 Apr 2022, Accepted 05 Jun 2022, Published online: 28 Jul 2022
[Cite this article](#) <https://doi.org/10.1080/15397734.2022.2088558> [Check for updates](#)

Full Article Figures & data References Citations Metrics Reprints & Permissions [Read this article](#)

MỘT SỐ KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VỀ ỨNG XỬ CỦA KẾT CẤU FLEXOELECTRIC

Phùng Văn Minh, Giảng viên Bộ môn Cơ học vật rắn



3. Các hướng nghiên cứu tiếp theo

Mô hình lý thuyết

- Phát triển các lý thuyết biến dạng bậc cao (HSDT, RBT, MCST, strain-gradient theory) để mô tả chính xác hơn ảnh hưởng flexoelectric.
- Kết hợp mô hình đa trường cơ – điện – nhiệt để khảo sát ứng xử tổng thể.
- Phát triển mô hình cho các kết cấu nano/micro như dầm, tấm, vỏ, thanh CNTs, graphene.

Phân tích tĩnh và động

- Nghiên cứu uốn tĩnh, ổn định, dao động tự do và dao động cưỡng bức của kết cấu flexoelectric.
- Phân tích sóng đàn hồi và sóng điện để hiểu rõ cơ chế truyền năng lượng.
- Khảo sát hiệu ứng kích thước, vi cấu trúc và gradient ứng suất lên cơ tính.

Phương pháp số và giải tích

- Áp dụng các kỹ thuật FEM, IGA, meshfree, multiscale modeling để mô phỏng chính xác.
- So sánh, kiểm chứng với lời giải giải tích (Galerkin, Ritz, phương pháp biến phân).
- Phát triển giải thuật tính toán nhanh phục vụ thiết kế vật liệu/thiết bị.

Định hướng ứng dụng

- Phân tích độ bền và tuổi thọ của cảm biến, cơ cấu chấp hành dựa trên flexoelectric.
- Thiết kế tối ưu vật liệu/kết cấu nhằm đạt được độ nhạy cao và khả năng thu năng lượng tối ưu.
- Ứng xử cơ học của vật liệu flexoelectric trong môi trường khắc nghiệt (nhiệt, va chạm, bức xạ) phục vụ quốc phòng.

MỘT SỐ KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VỀ ỨNG XỬ CỦA KẾT CẤU FLEXOELECTRIC

Phùng Văn Minh, Giảng viên Bộ môn Cơ học vật rắn



HỌC VIỆN KỸ THUẬT QUÂN SỰ
KHOA CƠ KHÍ



HỘI NGHỊ KHOA HỌC CÁC NHÀ NGHIÊN CỨU TRẺ
LẦN THỨ XXI - NĂM 2026

XIN TRÂN TRỌNG CẢM ƠN!

MỘT SỐ KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VỀ ỨNG XỬ CỦA KẾT CẤU FLEXOELECTRIC

Phùng Văn Minh, Giảng viên Bộ môn Cơ học vật rắn