

# Training in Microsystems: Towards Sustainable Knowledge Alliance in Project MECA

**Vladimir STAVROV\*, Galina STAVREVA\* and Emil TOMEROV\***

\*AMG Technology Ltd., Microelectronica Industrial Zone, 2140 Botevgrad, Bulgaria  
E-mail: vs.@amg-t.com

---

***Abstract:** Training course on practical aspects in design, technology and prototype fabrication of microsystems, exploiting the shared infrastructure is presented. The course content is considered in the scope of building a sustainable Knowledge Alliance between the partners in Erasmus+ Project# 562206-EPP-1-2015-1-BG-EPPKA2-KA - MECA.*

***Абстракт:** Представен е курс за обучение посветен на практическите аспекти на проектирането и технологиите при производство на микросистеми, използващи споделени ресурси. Съдържанието на курса е създадено с цел изграждането на устойчив алианс на знанието между партньорите в проект № 562206-EPP-1-2015-1-BG-EPPKA2-KA – MECA по програма Erasmus+.*

---

## **Общо описание на проекта MECA**

Целта на проекта MECA [1] е създаването на облачно-базирана Европейска инфраструктура с цел организация на обучението по микро- и нано-електроника. За постигането на тази цел партньорите в проекта предоставят и използват споделено разнообразни ресурси, вкл. дистанционен достъп до специализиран софтуер за проектиране и симулации. По-конкретно, в проекта вниманието е фокусирано върху анализа на нуждата от споделена инфраструктура за ИКТ, осъвременено учебно съдържание и осигуряване на всички средства за ефективно обучение.

Специфичният подход на курсовете в проекта е базиран на предизвикателствата свързани с мулти-дисциплинарната природа на съдържанието на микро-/нано-електрониката и необходимостта от използване на мощни CAD системи, сървъри, специализирано оборудване и лаборатории. Никой от партньорите в проекта не е в състояние да си позволи самостоятелното окомплектоване и поддържане на всички необходими средства - това е силен мотив за участие в проекта.

Чрез партньорството между ВУЗ и МСП се споделят идеи, методологии и опит с цел осъвременяване на програмите за обучение, така че те да съответстват на предизвикателствата, поставени от навлизането на новите технологии.

Партньори в проекта са осем ВУЗ и осем МСП с експертиза в сектора на микроелектрониката и ИКТ. Почти 30% от общия брой курсове (5 от 17) се отнасят до обучение в различни аспекти на микросистемите [2].

В частност, в тази работа е направен преглед на съдържанието на специализиран курс, озаглавен: „Проектиране, прототипно производство и авангардни приложения на силициеви микросистеми с пиезорезистивна обратна връзка”, накратко „Пиезорезистивни микросистеми”.

## **Общо описание на курса „Пиезорезистивни микросистеми”**

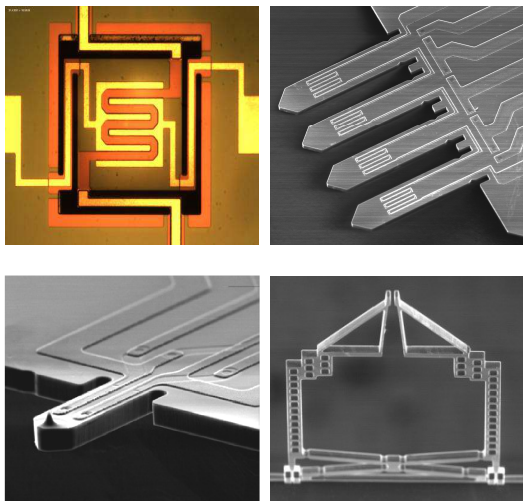
Курсът се състои от пет отделни части: уводна, технологии за производство на пиезорезистивни микросистеми, проектиране на микросистеми с еластични елементи, авангардни приложения на пиезорезистивни микросистеми и оценка на знанията на обучаемите. В тях се разглеждат основните групи проблеми, имащи отношение към разработката и реализацията на функционално разнообразни микросистеми. Накрая се оценяват придобитите знания и умения.

## **Преглед на приложимите микротехнологии**

В тази част се прави общ преглед на съвременните технологии, като специално внимание се

отделя на развитието на електронните елементи от първите вакуумни електронни лампи до днешните прибори с размери на структурите от порядъка на 10нм. Акцентира се върху динамиката на развитието на технологиите и причините за това развитие. Този преглед е насочен към мотивиран отговор на въпроса: Защо пиезорезистивните микросистеми са важни за успешната реализация в бъдеще? За целта се припомнят основните категории и се конкретизират работните дефиниции приложими в курса. Разкриват се основните недостатъци и предимства на микросистемите с пиезорезистивна обратна връзка, както и се дискутират свързаните с тях възможности за реализиране на нови детектиращи и измервателни устройства и системи. Особено внимание се отделя на връзката между симетриите на свойствата на изходния материал силиций и анизотропията на свойствата на микросистемите.

Във втората част на увода се разглеждат принципите на работа на различни силициеви микросистеми, основащи се на количествено определяне на огъването на еластични елементи с вградени пиезорезистори. Примери за такива прибори са показани на Фиг. 1.



Фиг. 1. Примери за микромеханични прибори, които се разглеждат в курса „Пиезорезистивни микросистеми”

Накрая на тази уводна част се обяснява метода за контрол и оценка на знанията в рамките на курса. Обяснява се тежестта на отделните елементи в общата оценка и се дават препоръки за постигане на максимален ефект от обучението.

### Технологии за производство на микросистеми с пиезорезистивна обратна връзка

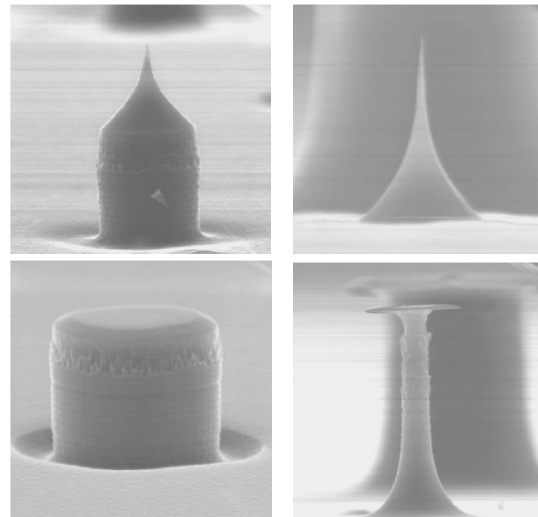
Съдържанието на тази част на курса обхваща

следните важни теми, свързани с реализацията на съвременните силициеви микросистеми:

- Преглед на основните свойства на материала силиций – обосновават се причините, поради които този материал доминира до момента при производството на електронни елементи и е основен при създаването на микросистемите. Разглеждат се различните допълнителни материали, които са необходими за производството на силициеви микросистеми – фоторезисти, течни и газообразни химикали, процесна и транспортна тара и т.н.

- Общ преглед на необходимите условия и съоръжения при производството на микросистеми: чисти помещения, дефиниция и роля на отделните параметри, инсталации за чисти флуиди, рискове и мерки за безопасна работа и т.н.

- Общ преглед на приложимите процеси за получаване на слоеве и тяхното структуриране; специално внимание се отделя на процесите, които са характерни за микросистемите – двустранна фотолитография и различни методи за анизотропно ецване. Обясняват се последиците, свързани с наличието или липсата на определени процеси в конкретна производствена линия и се илюстрират с примери.



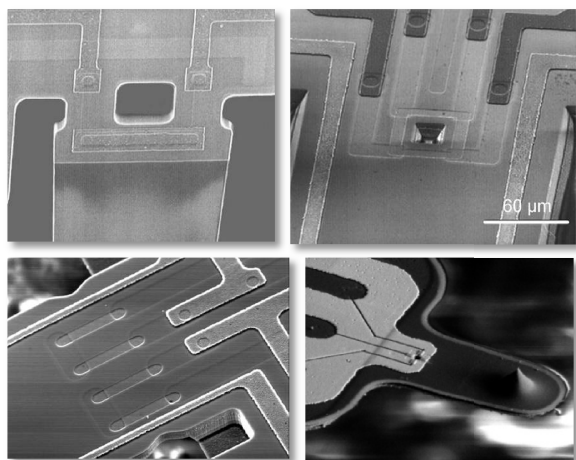
Фиг. 2. Примери за различни 3D структури, получени от една и съща маска за фотолитография с кръгла форма чрез процеси на сухо ецване с различна анизотропност и селективност към маската

- Интегриране на процесите в технологии от гледна точка на желания резултат: съвместимост на процеси/материали, селективност, анизотропия - примери са показани на

Фиг.2. В рамките на целия курс се разглеждат примери, които вече са реализирани в конкретна линия за разработка и производство на прототипи, в която може да бъде проведено пълно обучение, вкл. реализиране на прототипи на разработени в курса нови прибори.

- Икономически аспекти на технологиите за производство, като напр. клас на чистота, индивидуална или групова обработка, обработка с течни или плазмени (сухи) реагенти и т.н. Разкриват се особеностите на технологиите при разработка на прототипи и серийно производство.

- Пример 1: Интегриране на процеси в технология. Технологии за производство на интегрирани микроконзолни сензори с вградени планарни пиезорезистори за детекция на химически вещества и атомно-силова микроскопия (АСМ). Прибори получени по такава технология са показани на Фиг. 3

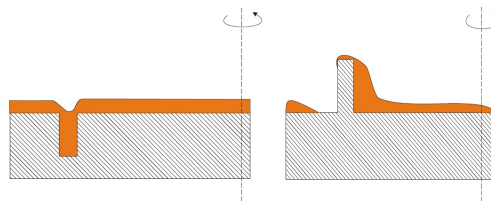


Фиг.3. Варианти за реализиране на планарни пиезоустойчиви резистори

Освен класическите пиезорезистори, в тази част на курса се разглеждат ограниченията на технологията: сложни многостъпкови обработки с висок температурен бюджет и дълго време за изпълнение, проблеми със съвместимостта и селективността на материалите и използваните химикали и т.н. Разглеждат се проблемите при реализирането на елементи с малка коравина, както и известните към момента алтернативи – тензорезистори, тунелна проводимост, материали с прекъсната структура и т.н.

- Пример 2: Интегриране на процеси в технология. Микросистеми с пиезорезистори,

вградени в страничните стени на еластични елементи.



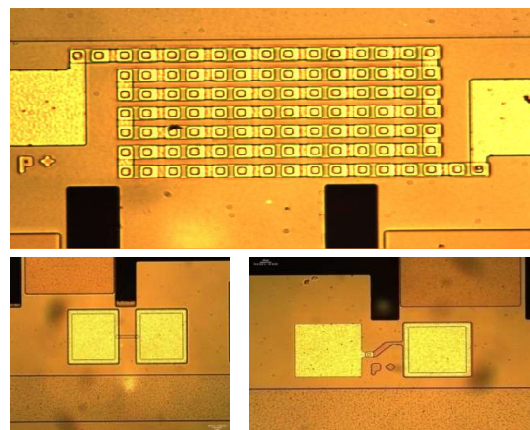
Фиг.4. Илюстрация на проблемите при нанасяне на фоторезист с центробежно разстилане на вдлъбнати и изпъкнали структури при производството на 3D микросистеми

В курса се разглеждат и обясняват множество примери на специфично поведение на обработваните структури при прилагане на стандартни обработки на подложки, както пример е показан на Фиг. 4. Подчертава се важноста на избора на последователност на обработките, съвместимост на материалите и обработките и свързаните с тях икономически аспекти.

### Проектиране на микросистеми

В тази част от курса са разгледани основно следните теми:

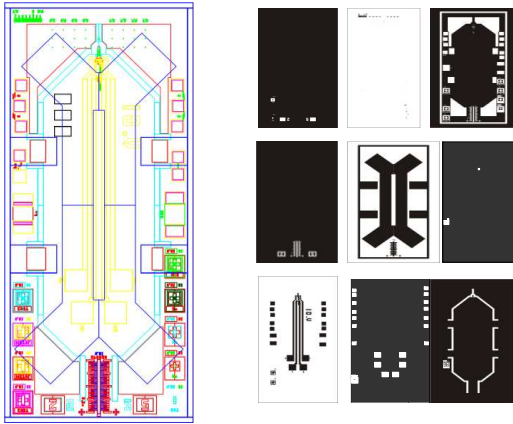
- Тестови процедури за разработка и производство на микросистеми. Пример за тестови структури за контрол на електрическите параметри на елементи на микросистеми е илюстриран на Фиг. 5.



Фиг.5. Примери за тестови структури за контрол на електрическите параметри на структури на микросистемите

Дават се примери за in-line контрол на процеси, измерване на геометрични, електрически и функционални величини.

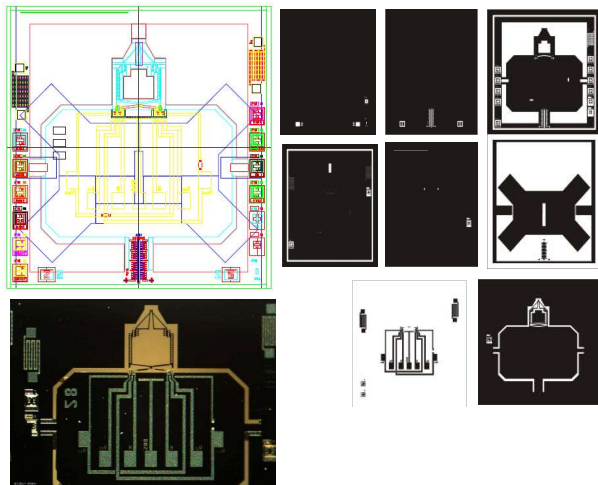
- Проектиране на микроприбори с пиезорезистивна обратна връзка: примери за микросистеми с планарни пиезорезистори.



Фиг. 6. Пример за топология на микроконзолен сензор с планарни пиезорезистори и съответните маски за фотолитографско структуриране

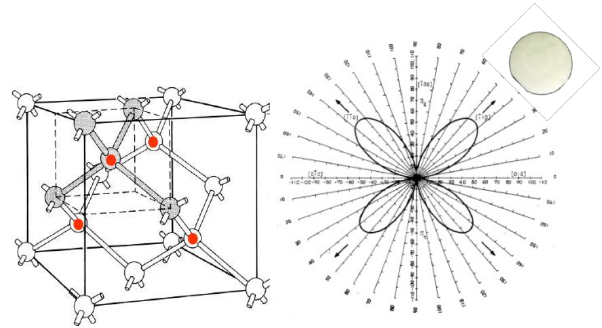
Обичаен топологичен проект на микроконзолен прибор с пиезорезистивна детекция е показан на Фиг. 6. (ляво). В дясната част са показани умалени изображения на съответните маски за фотолитография, които са необходими за производството на подобни микросистеми.

- Проектиране на микросистеми с пиезорезистори в страничните стени. Вариант на проект на микрохващач с вграден мономорфен актюатор и сензори за обратна връзка са показани на фиг. 7.



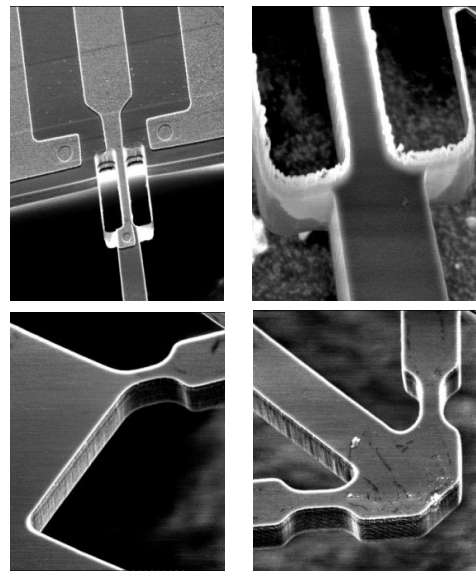
Фиг. 7. Пример за топология на микроприбор - микрохващач с пиезорезистори в страничните стени

В тази част на курса се дават множество примери, демонстриращи синергията на свойствата на материалите (Фиг. 8), обработките и конструкцията на елементите на микросистемите.



Фиг.8. Връзка между симетрията на кристалната решетка (ляво) и анизотропията на пиезорезистивния коефициент на P-тип монокристален силиций

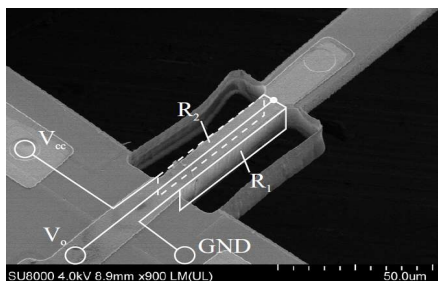
Поради особено голямата важност, се дават примери за реализация на еластични елементи във варианти със и без вградени пиезорезистори в страничните стени. Такива са показани на Фиг. 9.



Фиг.9. Изображения със сканиращ електронен микроскоп на еластични елементи с вградени (горе) и без (долу) пиезорезистори в страничните стени

Специално внимание се отделя на основния елемент на микросистемите показан заедно с еквивалентната електрическа схема на Фиг. 10. Обясняват се основните предимства на такава структура: повишена чувствителност, еднаквост на параметрите на резисторите във всеки напрежителен делител, диференциален сигнал, температурна компенсация и т.н. След това се прави преглед на вече демонстрирани в курса прибори с такива резистори, като се акцентира на възможностите за постигане на различни функционалности на микросистеми с идентични механични конструкции и алтернативно свързване в пълен мост.



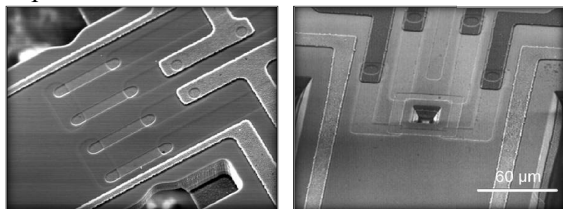


Фиг.10. Изображения със сканиращ електронен микроскоп на основния еластичен елемент с вградени в страничните стени два пиезорезистора, свързани в напрежителен делител

### Авангардни приложения на микросистеми с пиезорезистивна обратна връзка

В тази част на курса се разглеждат темите:

- Микроконзолни сензори с планарни пиезорезистори за авангардни приложения. Различни варианти на такива сензори са показани на Фиг. 11. Обсъждат се различни конструкции и възможности за свързване на пиезорезисторите в мостови схеми. Подчертава се значението на температурното поведение и източниците на дрейф на съпротивлението и сензорното напрежение.

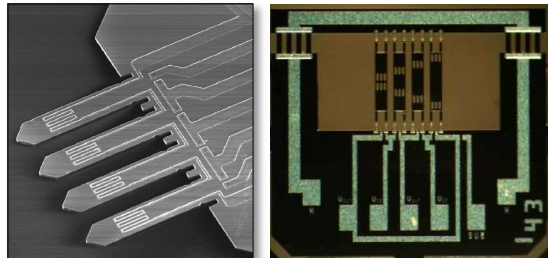


Фиг.11. Варианти на реализиране на планарни пиезорезистори, свързани в различни конфигурации

- Приложение на интегрирани микроконзолни сензори за атомно-силова микроскопия (АСМ). Исторически, АСМ е сред първите приложения на микроприбори с еластични елементи. Обяснява се принципа на работа на такъв микроскоп и се извеждат параметрите, които са съществени за неговата работа. Дават се примери на различни микроконзолни сензори и специфичните им предимства. Обясняват се разликите в методите за детекция с лазерен сноп и вградени пиезорезистори. Обсъждат се предимствата и недостатъците, вкл. тези свързани с начина на реализиране на относителното преместване на сондата спрямо образеца.

- Приложение на микросистеми с вградени пиезорезистори за химически сензори. Два примера за такива микросистеми са показани на

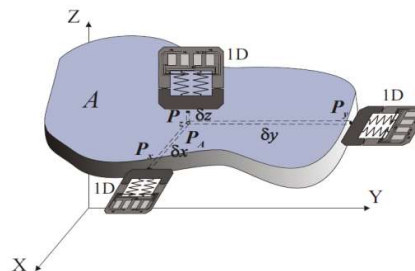
Фиг. 12: ляво – с планарни и дясно – с вградени в страничните стени.



Фиг.12. Микросензори с планарни резистори (ляво) и такива в страничните стени (дясно)

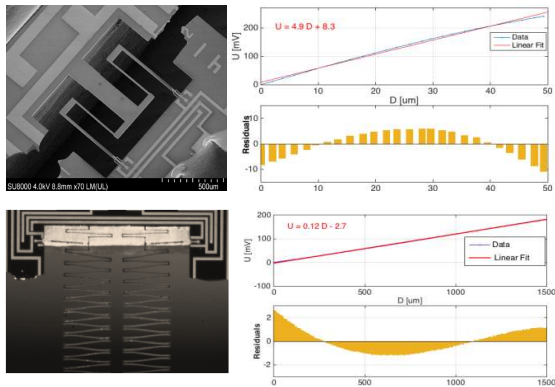
Обясняват се източниците на грешки при измерване с алтернативни сензори, както и спецификите при работа във вакуум, въздух и течности. Разкриват се различни възможни методи за измерване, вкл. оригинални идеи.

- Сензори за позиция с пиезорезистори в страничните стени: 1D и 2D случаи. Концепцията за измерване на позиция на обект с контактни сензори е илюстрирана на Фиг. 13. Тя осигурява постоянни точки на измерване и е възможно едновременното определяне на всички степени на свобода на тялото А. Обсъждат се предимствата и недостатъците при използване на един или множество сензори, както и свързаните с тях неопределености на измерената позиция.

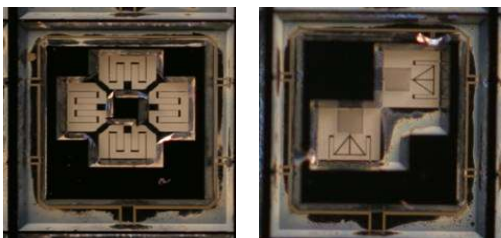


Фиг.13. Варианти на реализиране на измерване на позиция на обект

За реализирането на сензори с подобни функции е необходимо те да притежават специфична конструкция от две части, свързани монолитно с еластичен механизъм. Дават се примери за различни реализации на прибори и се разглеждат възможностите за реализиране на сензори за позиция с различен ход. Обсъждат се основните известни варианти на сензори с работен ход до 200 micrometers и до 2mm. Обсъжда се възможността да се измерват точно векторни величини. Примери за 1D сензори са показани на Фиг. 14, а на Фиг. 15 - примери за 2D сензори за позиция.



Фиг. 14. Варианти на реализиране на 1D сензори за преместване с ход 50 μm (горе) и 1.5mm (долу)



Фиг. 15. Варианти на реализиране на контактни 2D сензори за позиция

- Примери за използване на контактни 1D и 2D сензори за позиция. Целта на лекцията е да се покажат предимствата на използването на сензори за позиция в сканиращи маси за АСМ. Обяснява се защо разглежданите прибори не притежават хистерезис и какви са предимствата на предавателни механизми с малка пружинна константа. Демонстрират се получени резултати.

- Измерване на сили с микросензори. Разглеждат се различни по амплитуда сили и се дефинират границите на приложимост на сензори за директно измерване и измерване с преобразуватели сила-преместване. Дават се примери за реализация на силомери с различен обхват, като се подчертават предимствата в сравнение с широко използваните тензо-сензори.

- Проследимост на обекти при мониторинг на процеси за М2М и IoT приложения. Разкриват се възможностите за приложение на сензори с много голям динамичен диапазон (>100 000 измерителни интервала) за идентифициране на обекти и определяне на местоположението им посредством измерване на теглото. Обяснява се значението на специфичните параметри, необходими за работата на такива системи: еднаквост на използваните силомери, линейност, прецизност, дрейф и т.н. Обсъждат се основните алгоритми и формули за пресмятане на теглото и

позицията на множество последователно поставени обекти.

### Контрол и оценка на получените знания в областта на микросистемите

В заключителната част на курса обучаемите се разделят на групи и се поставя обща групова задача за разработка на сензорна система за конкретно приложение: микросензор с предавателен механизъм за измерване на зададена величина. Обучаемите самостоятелно избират конструкцията и технологията. След това в групата се обсъждат предложените САД проекти и се избира общ вариант. Всеки обучаем разработва топологии на поне две маски за фотолитография, като едната е на еластични елементи за реализиране конкретна стойност на специфичен параметър. Обучаемите се насочват да комуникират свободно и сами да достигнат до идея за реализиране на многофункционални микросистеми по унифицирана технология, каквато възможност предоставят микросистемите с пиезорезистори вградени в страничните стени.

Индивидуалното оценяване се извършва от правоспособни преподаватели в ТУ София – координатор на проекта МЕСА, като тежестта на компонентите е: 40% от резултатите на писмени задачи по време на курса и 60% от защитата на проекта за поне две маски за фотолитография.

### Заключение

В проект МЕСА е създаден курс за обучение в практическите аспекти на разработката и производството на силициеви микросистеми с пиезорезистивна обратна връзка. Курсът е подходящ за обучение на широк кръг специалисти, насочва обучаемите към прилагане на авангардни технологии в областта на микросистемите и е добра база за създаване на устойчив алианс.

### Благодарности

Авторите са благодарни за частичното финансиране на разработката на настоящия курс за обучение в рамките на проект Erasmus+: #562206-EPP-1-2015-1-BG-EPPKA2-KA – МЕСА.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Tzanova, S., D. Demarchi, Knowledge Alliance in Microelectronics, 9th annual ICERI, 14-16 November, 2016, Seville, Spain
- [2] Illyefalvi-Vitez, Z., O. Krammer, S. Tzanova, MicroElectronics Cloud Alliance(MECA)-Presentation of a New Erasmus+ Project, ISSE2016, Pilsen, Czech Republic