

Гъвкава електроника – проблеми, решения и нерешени предизвикателства

Доц. д-р Мария Александрова

- Значение на думата „гъвкав“ в електрониката или твърди срещу гъвкави електронни устройства – предимства на гъвкавата електроника.
- Комерсиални гъвкави устройства налични на пазара към днешна дата. Индустриален и изследователски фокус.
- Материали и технологии за тънкослойни гъвкави електронни устройства.
- Стандарти за гъвкави печатни платки.

- **Значение на “гъвкав”. Твърди срещу гъвкави електронни устройства**

Гъвкавата електроника е технология за асемблиране (сглобяване) на електронни устройства чрез формиране на тънки функционални слоеве или монтиране на дискретни електронни компоненти върху пластични основи от полимерни фолиа като полиетилен терефталат (PET), полиимид, полиестер и др. Устройствата могат да бъдат огънати, усукани или подложени на опън, циклична компресия, вибрационно въздействие.



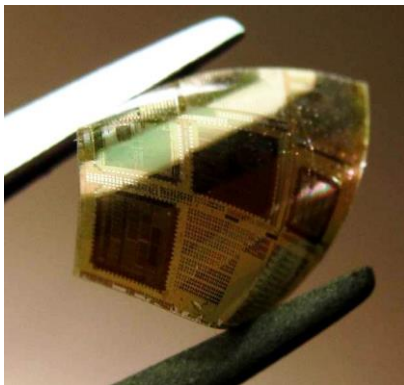
Твърдотелна интегрална схема



Твърдотелна печатна платка



Твърдотелно дисплейно устройство



Гъвкава интегрална схема



Гъвкава печатна платка



Гъвкаво дисплейно устройство

Предимства на гъвкавите електронни системи

- Леки
- Малки размери - компактни и спестяват място
- Свобода за проектиране в 3 измерения
- Следват формата на обектите - формата е гъвкава по време на употреба
- Повишена плътност на интеграция на единица площ
- Обработка на големи площи по време на производството
- Носима технология, позволяваща на устройствата да се прикрепят към човешкото тяло или да са втъкани с дрехите
- Нечупливост

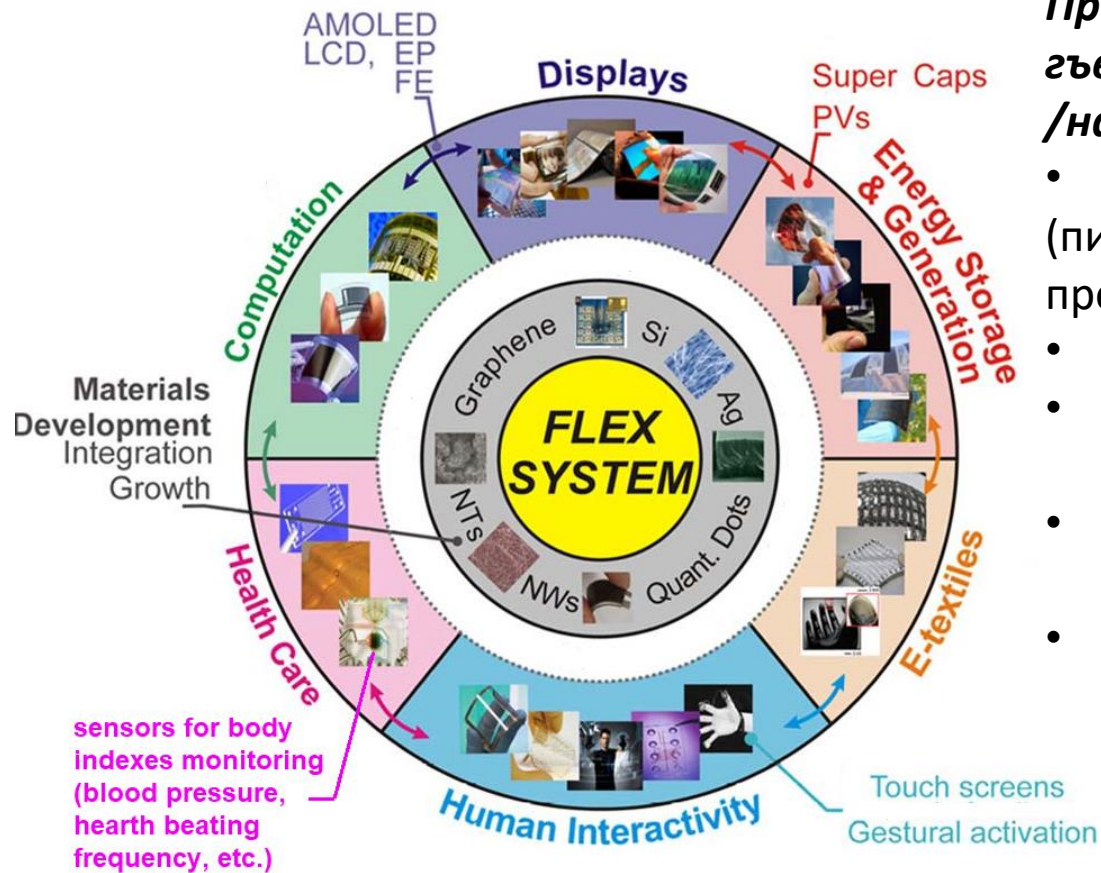
Предизвикателства

- Постигане на по-голяма устойчивост на слоевете към механично напрежение поради многократни цикли на огъване.
- Постигане на по-слаба чувствителност към топлинно линейно разширение на участващите материали.
- Постигане на бездефектни слоеве като микроструктура, въпреки че се използват процеси на производство без наличие на вакуумна среда.
- Безбатерийно хранване (за сега е необходима батерия, с изключение на устройствата за събиране на енергия, тип харвестър).



<http://www.flexenable.com/>

Съвременно състояние: комерсиални гъвкави електронни устройства, ключови индустрии и изследователски интерес.



Adapted from A. Nathan et al., Proceedings of the IEEE, 2016

Ново поколение гъвкави електронни системи, съответните сектори, заедно с включените материали.

Приложения (сектори на пазара) на гъвкавите електронни микро-/наноструктури:

- Събиране и съхранение на енергия (пиезо-, фото- и термоелектрични преобразуватели; суперкондензатори)
- Дисплеи (OLED, LCD, електрохромни)
- Човешка интерактивност (жестова активация)
- Грижа за здравето (сензори на човешките показатели)
- Носими устройства („електронен“ текстил, „електронна“ кожа)

Използвани нови материали:

- Графен
- Въглеродни нанотръбички
- Наножици
- Квантови точки
- Изтънен силиций

Частично решени проблеми на гъвкавата електроника

- Подобряване на механичната якост на нанопокритията при множество огъвания;
- Намаляване на температурната чувствителност и линейните разширения на гъвкавото фолио;
- Преодоляване на температурните ограничения, възникващи поради някои високотемпературни процеси на производство (като например вакуумно разпрашаване);
- Повишаване на надеждността на управляващите вериги, интегрирани с гъвкавата основа.

Материали за тънкослойни гъвкави електронни устройства

- **материали за подложки:** пластмасови фолиа и метални фолиа - независимо от приложението, критериите за избор са свързани с огъващата способност и еластичност, топлинните характеристики (разширение, топлопроводимост) и устойчивостта на разтворителите, използвани в микроелектронното производство, което е важно за технологичните процеси.

Основни свойства на предлаганите на пазара гъвкави подложки с дебелина 100 μm за гъвкави електронни устройства. Сравнение със силиция

Свойства	PET	PEN	PI	PC	Si
Гъвкавост (Издръжливост на опън, МПа)	230	200	150	75	165
Еластичност (Модул на Юнг, GPa)	2.8-3	3-5	2-3	2.4	140
Топлопроводност, W/m.K	0.20	0.15	0.25	0.22	84
Коефициент на топлинно разширение, $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$	33	20	30	66	7
Температура на фазов преход, $^\circ\text{C}$	90-100	120	270	145	1300
Прозрачност за видимата светлина, % (важно за оптоелектрониката)	>90	88	65-70	90	0
Влагоабсорбируемост, %	0.6	0.4	2.9	0.3	0.01
Устойчивост на разтворители	Средна към добро	Средна към добро	Средна към добра	Лоша	Добра

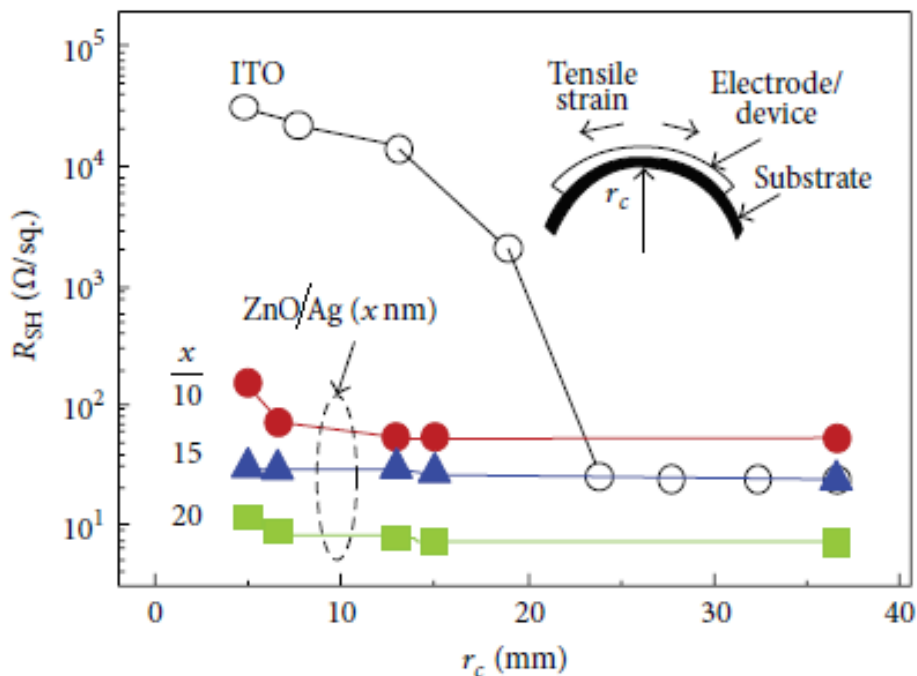
PET полиетилентерефталат

PEN полиетиленнафталат

PC поликарбонат

PI полиимид

- **материали за електроди** – едни от най-проблемните електроди по отношение на механична стабилност са прозрачните електроди.



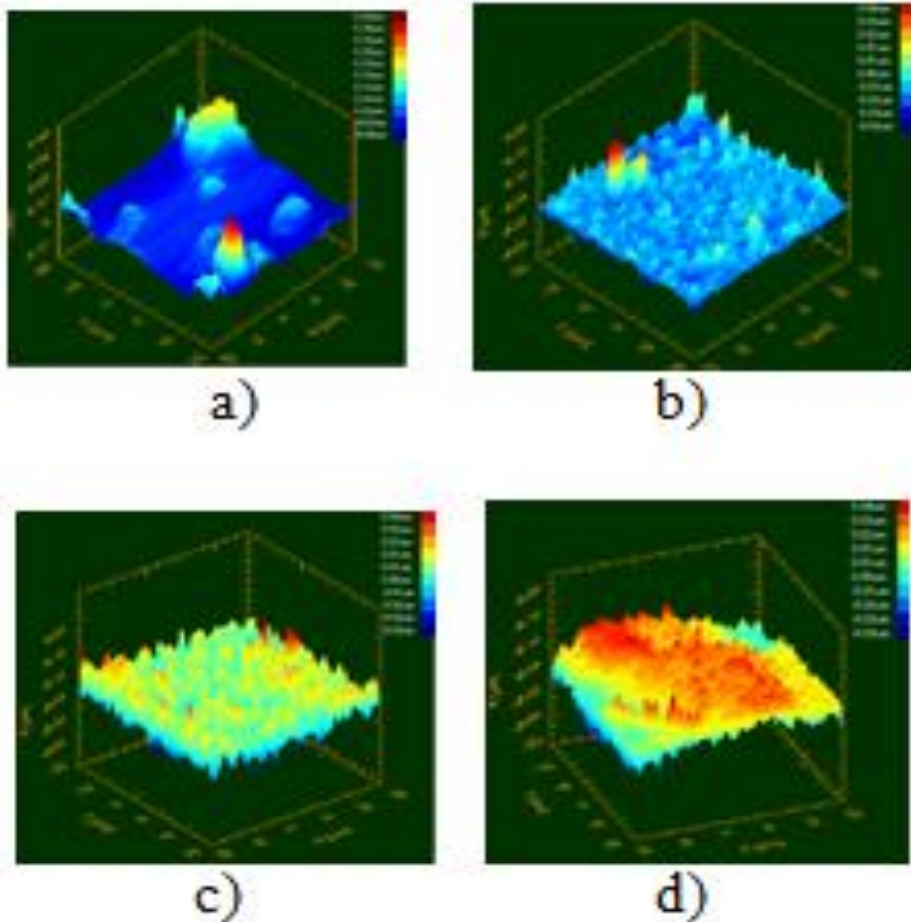
Organic Electronics, vol. 10, no. 6, pp. 1163–1169, 2009.

Листово съпротивление (R_{SH}) на ZnO/Ag електродни слоеве върху PET, като функция от радиуса на кривината (r_c). Представени са и изменения на листовото съпротивление на индиево-калаено оксиден слой (ITO е типичен прозрачен електрод за оптоелектронни устройства).

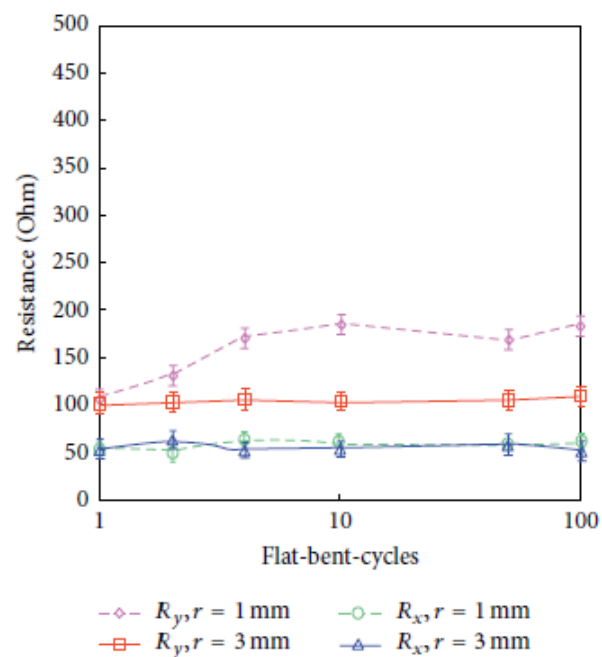
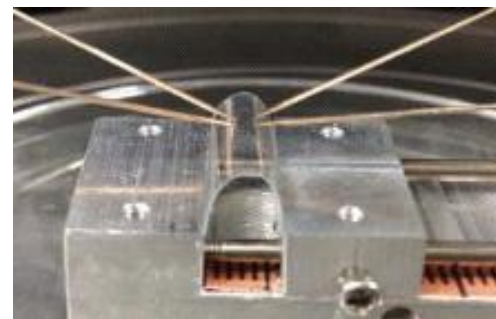
Критериите за оценка на гъвкавостта на проводящите слоеве, широко приети в практиката, са степента на промяна на листовото съпротивление и броят на микрупукнатините на единица площ при статичен или динамичен режим на огъване.



Микроскопско изображение на напукан слой от индиево-калаен оксид (ITO) след сравнително малък брой огъвания.



Атомно силова микроскопия (AFM) - 3D изображения на повърхността на двата типа електроди при огъване а) 10 пъти; б) 100 пъти, в) 1 000 пъти за ZnO/Ag и г) 1000 пъти за ITO.

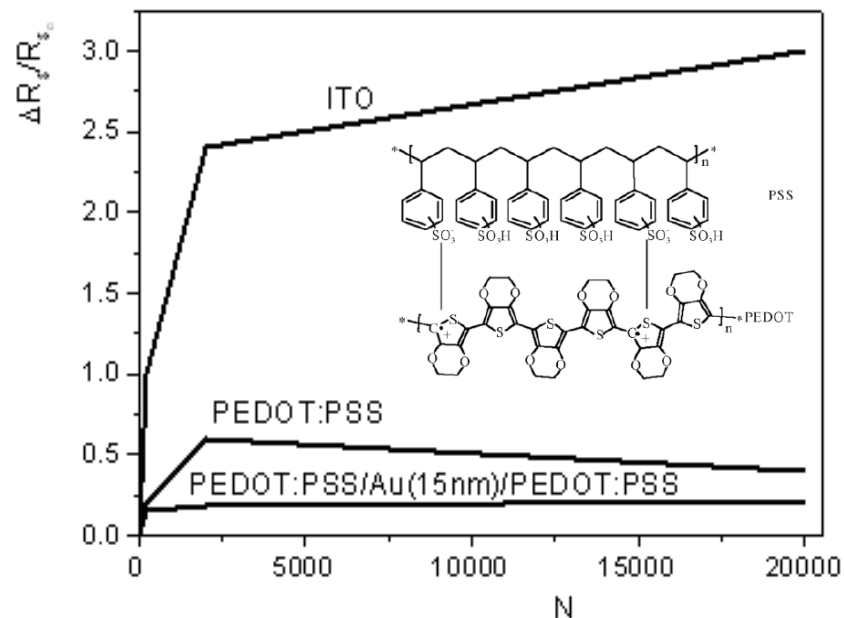


Тестова постановка за циклично огъване (горе) и устойчивост на графенови/PMMA слоеве при различни радиуси на огъване (долу).

Подходяща алтернатива на електродите за нуждите на гъвкавите устройства

- Електропроводящи полимери (например PEDOT:PSS)

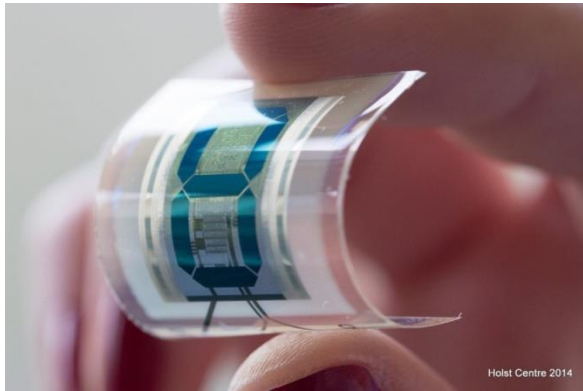
Съпротивлението на PEDOT:PSS слоевете се запазва стабилно дори след 20000 огъвания без възникване на дефекти, заради високата еластичност на полимера и близките механични характеристики до тези на гъвкавите подложки. Поради по-слабата си проводимост спрямо металите, е препоръчително вграждане на свръхтънък слой от злато или сребро, структуриран като мрежа и вмъкнат между два PEDOT:PSS слоя.



Предимства на полимерните електроди

- Подобрена механична стабилност на слоя и интерфейса му с други слоеве, което осигурява стабилност на зарядния пренос;
- По-ниската му температура на нанасяне води до липса на термострес в гъвкавата подложка;
- По-бърз, прост и евтин процес на нанасяне спрямо вакуумните технологии (пулверизиране или центрофугиране).

- **Функционални материали** - например клас електролуминесцентни или електрохромни, но винаги се предпочита да са от представителите на органичните материали, заради сходството в характеристиките им с тези на подложките.

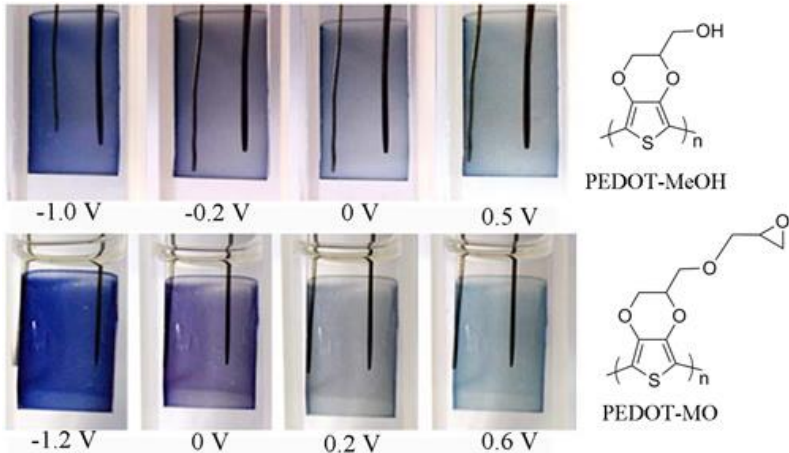


Holst Centre 2014

<http://electroi.com/> - accessed June 2018



Тенденция в развитието на органичните материали по отношение на синтеза на молекулите и ефективността на преобразуване на електрическа в оптична мощност (PCE) и обратното в органичните оптоелектронни устройства.

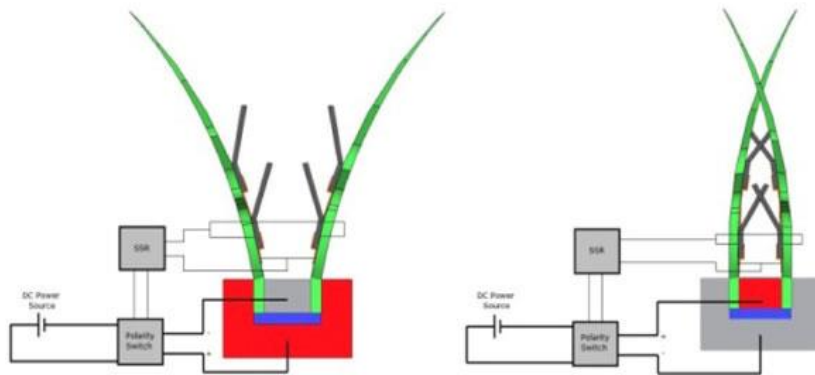


Електрохромно поведение на PEDOT, наричан електронно мастило.

- Функционални материали – класове сензорни и актуаторни

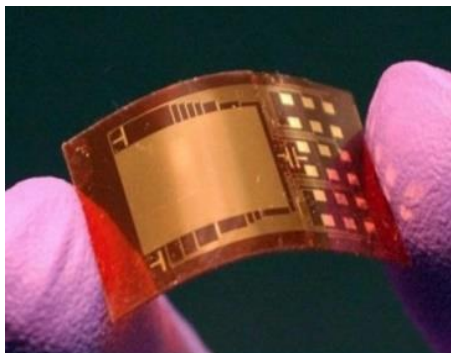


Органичен сензор върху гъвкава подложка, залепен върху кожата, сърцето или мозъчната тъкан за наблюдение например на кръвно налягане или движения на тялото. В резултат на това органичните електронни устройства вече са използвани за реализиране на изкуствена електронна кожа или носими сензори.



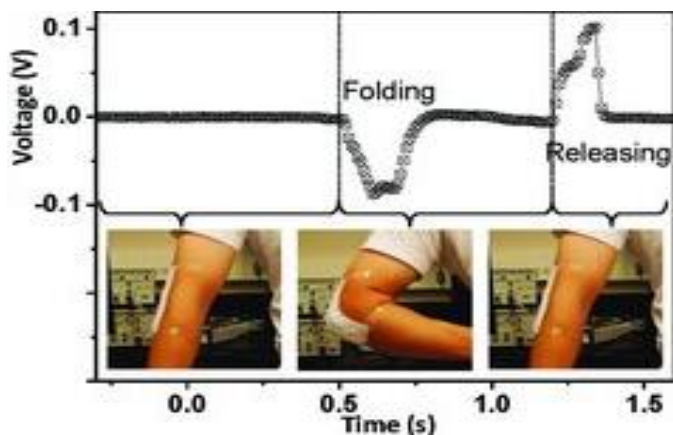
Роботизирани пръсти реализирани чрез тънки пиезоактуатори с нанесен електроактивен полимер.

- Функционални материали – класове алтернативни източници на енергия

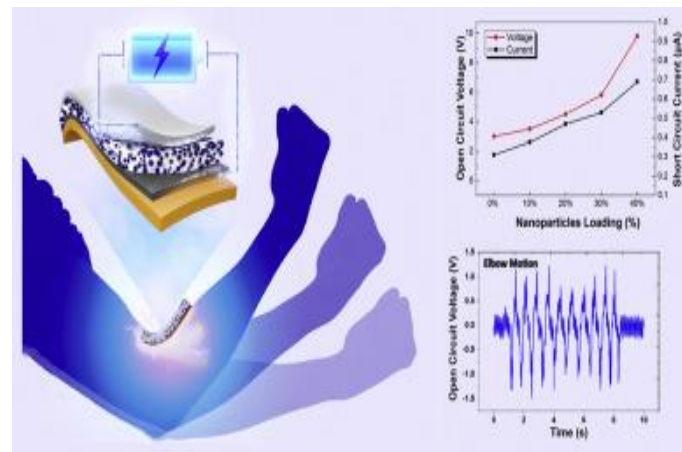


Nano Energy, vo. 14, 2015, Pages 177-185,

Пример за сгъваемо и носимо захранване от следващо поколение - пиезоелектричните слоеве са с дебелина 200nm-2µm и генерират 100nW-150µW при слабо масо-натоварване (няколко грама).

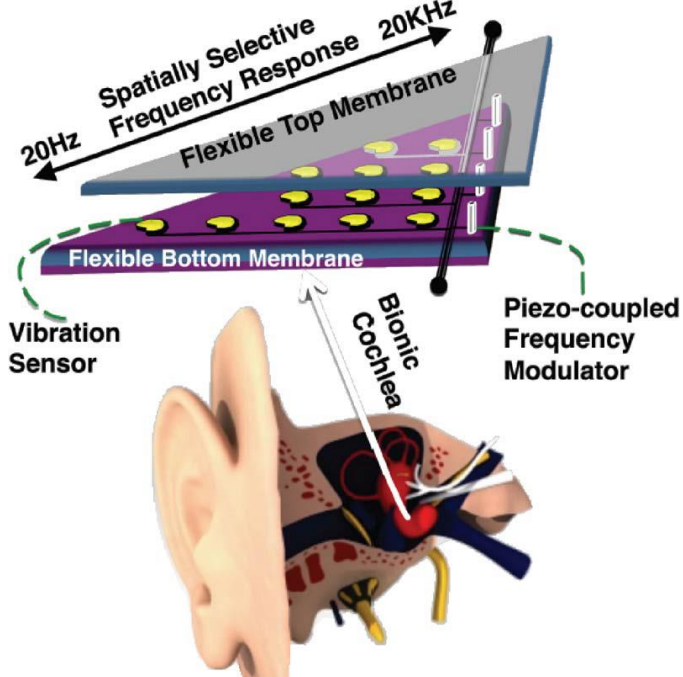


Вибрации от ежедневната активност на човека. <http://www.nanoscience.gatech.edu>



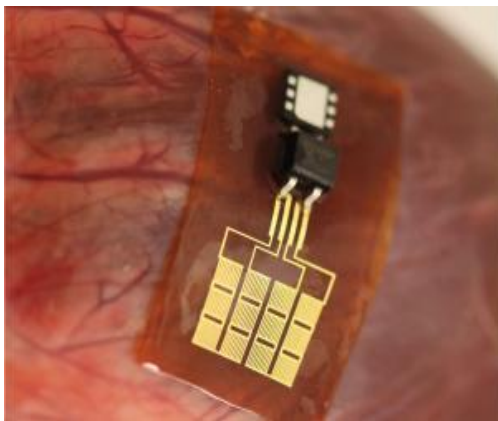
Демонстрация на функционалността на тънкослоен пиезогенератор, базиран на PVDF полимер с добра огъваща способност.

При тънкослойните структури пиезореакцията не е точно фиксирана и може да се донастройва чрез микроструктурата на слоя на молекулно ниво. Тя пък се контролира чрез условията на израстване на слоя. Като цяло, неорганичните пиезоелектрици имат по-силен пиезоотговор, но слаба огъваща способност, а при пиезополимерите е точно обратното. Затова добър подход е да се приготвят композитни (смесени) материали от двата класа, за да се комбинират положителните им свойства.



Бионично ухо

Proceedings of the IEEE | Vol. 100, May 13th, 2012



Приложение в медицината – вибрации от движещи се органи

www.medgadget.com; D. Purves, Neuroscience. Sunderland, MA: Sinauer, 2008.

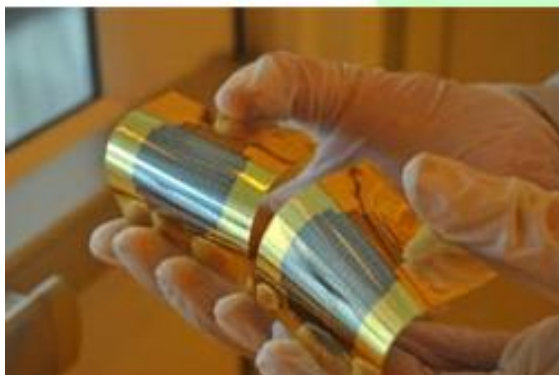
Сензорът за налягане в микроматричен вид може да се активира за всяка конкретна точка, излъчвайки сигнал с известна височина на тона и сила на звука, имитирайки звук. Малки пиезоелектрични структури (с дебелина 2–5 μm) също могат да бъдат интегрирани, като по този начин образуват вградена верига за обратна връзка. Такива механизми за обратна връзка могат да разтрептят мембраната, така че тя да вибрира все по-често с определена честота, която може да усилва целевия сигнал, като изрязва други шумови сигнали с близка честота. Този механизъм позволява да се усети много по-широка честотна лента и ниво на звука, подобно на истинско ухо.



Комбиниране на пиезоелектричеството от колоездене и OLED принципа за безопасно шофиране в тъмнина.

Области на приложения на гъвкавата (и органична) електроника:

- Фотоволтаични клетки (сектор енергийни преобразуватели)



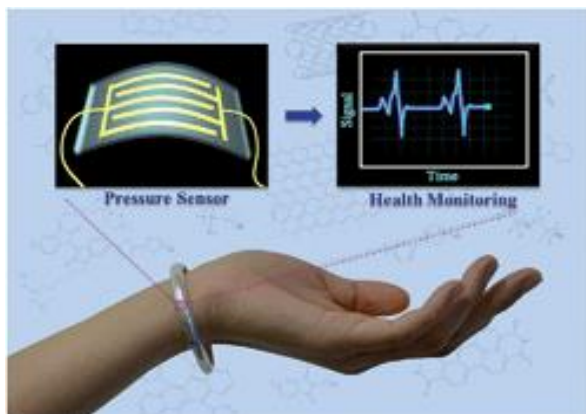
EECS @ UMich - University of Michigan

- Дисплеи (потребителска електроника)



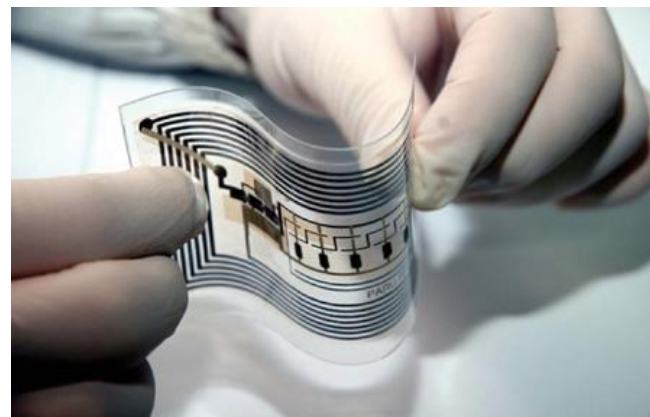
<http://www.techradar.com>

- Сензори (измервателни устройства)



Zang et al, Materials Horizons, Issue 2, 2015

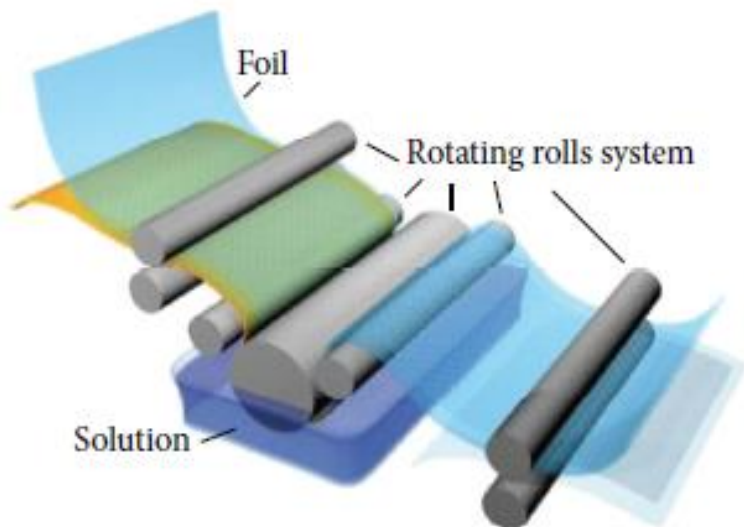
- Радиочестотни идентификатори – RFID



Pharmaceutical Processing

- Системи за мониторинг на здравето (медицина)

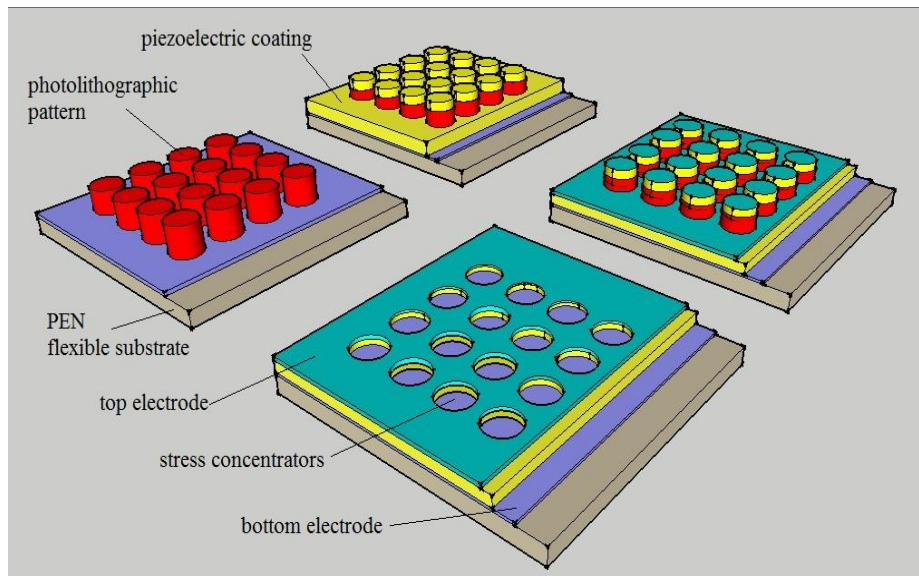
Нанасяне на слоеве и други технологични обработки за гъвкави електронни устройства.



- Ролково отлагане на органични слоеве върху гъвкави подложки - увеличава производителността на производствения процес.

- Принтиране на органични слоеве – независимо дали е контактно (ситопечат) или безконтактно (мастилено-струйно), има възможност за директно структуриране на слоя с нанасянето му. Така се съхранява подложката като се спестява обработката ѝ с типичните за фотолитографията разтворители.

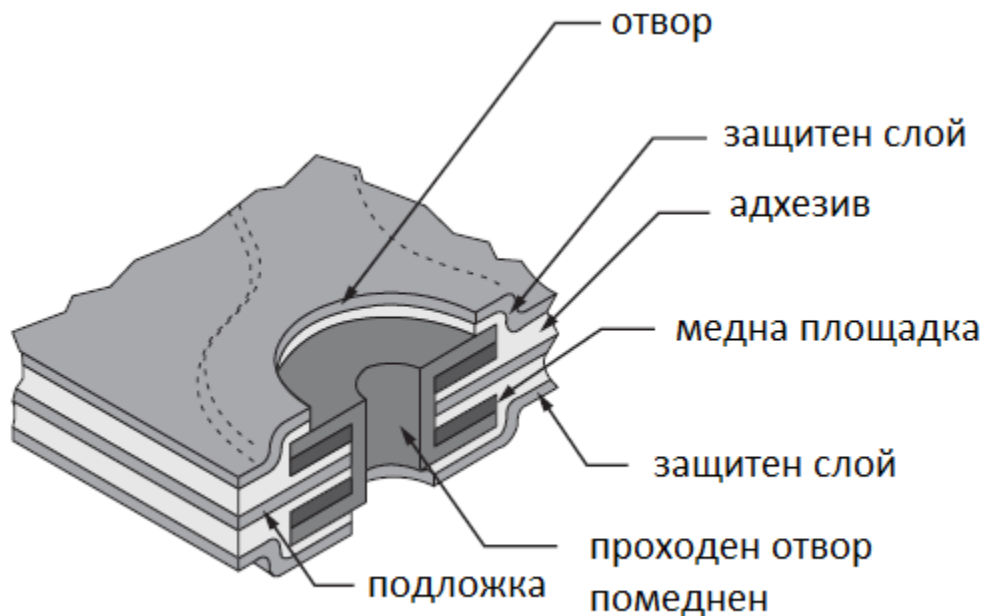
- Обратна фотолитография (свличане) за структуриране на покрития върху гъвкава подложка – заменя класическата фотолитография.



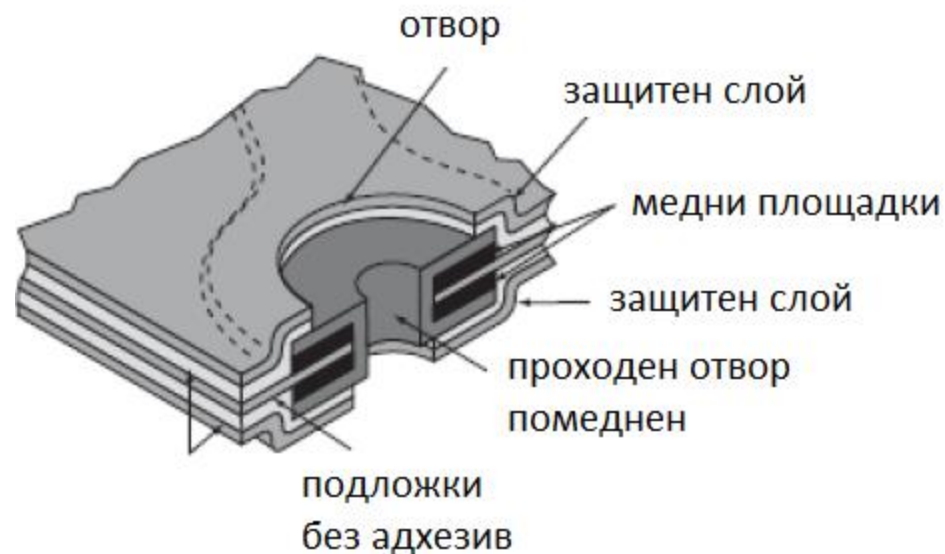
Формиране на концентратори на механично напрежение при пиезоелектричните преобразуватели

Стандарт за гъвкави печатни платки - IPC-2223 (за двуслойна PCB)

Ламинат с адхезивно покритие

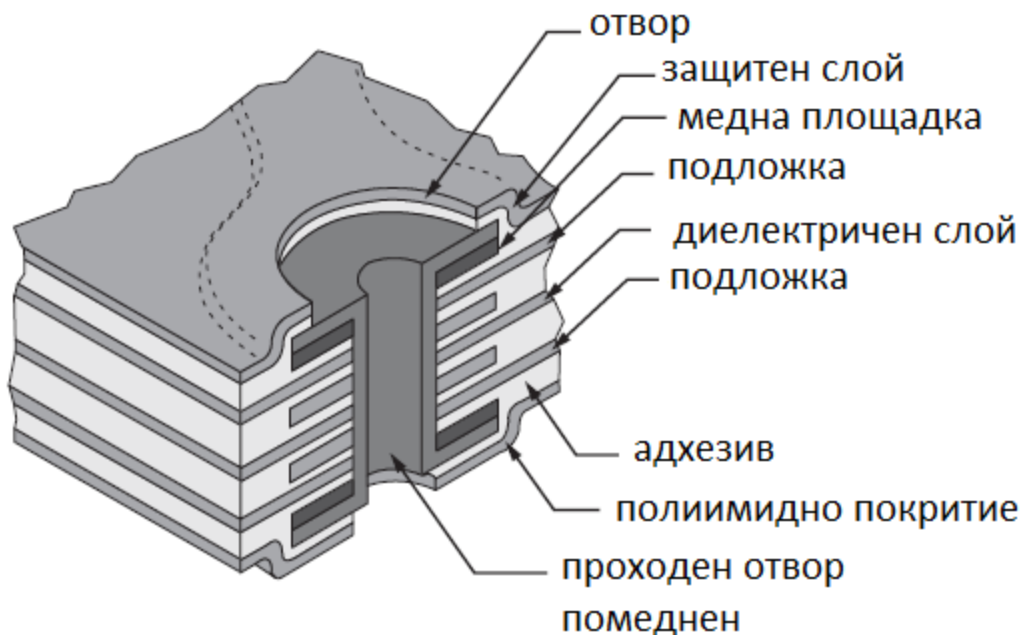


Безадхезивна технология

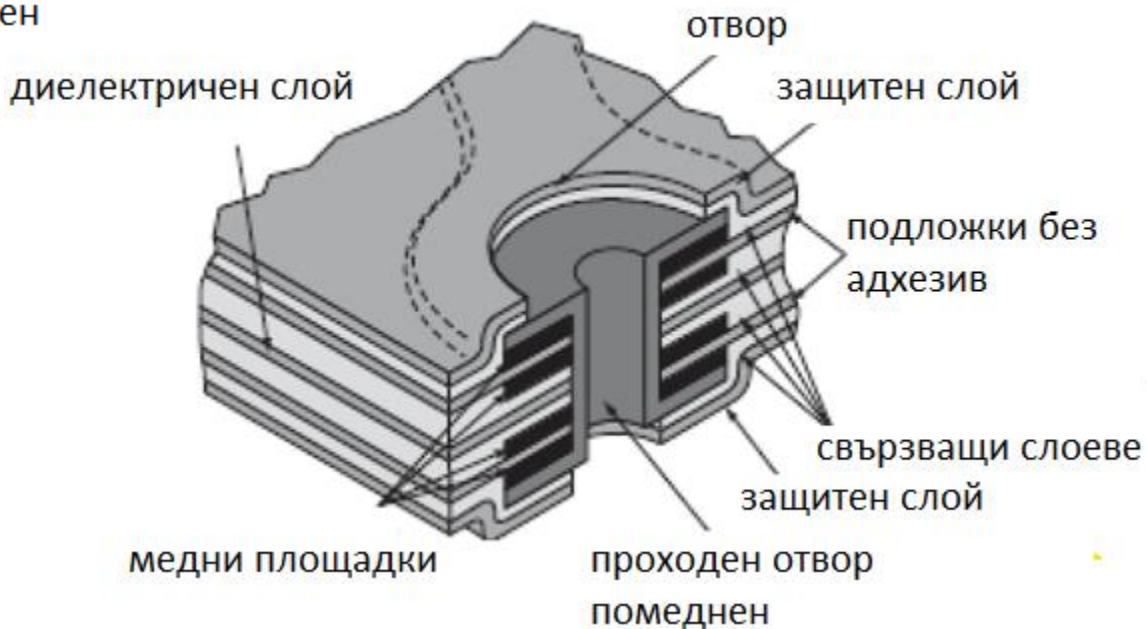


Стандарт за гъвкави печатни платки - IPC-2223 (за многослойни PCB с повече от 2 слоя)

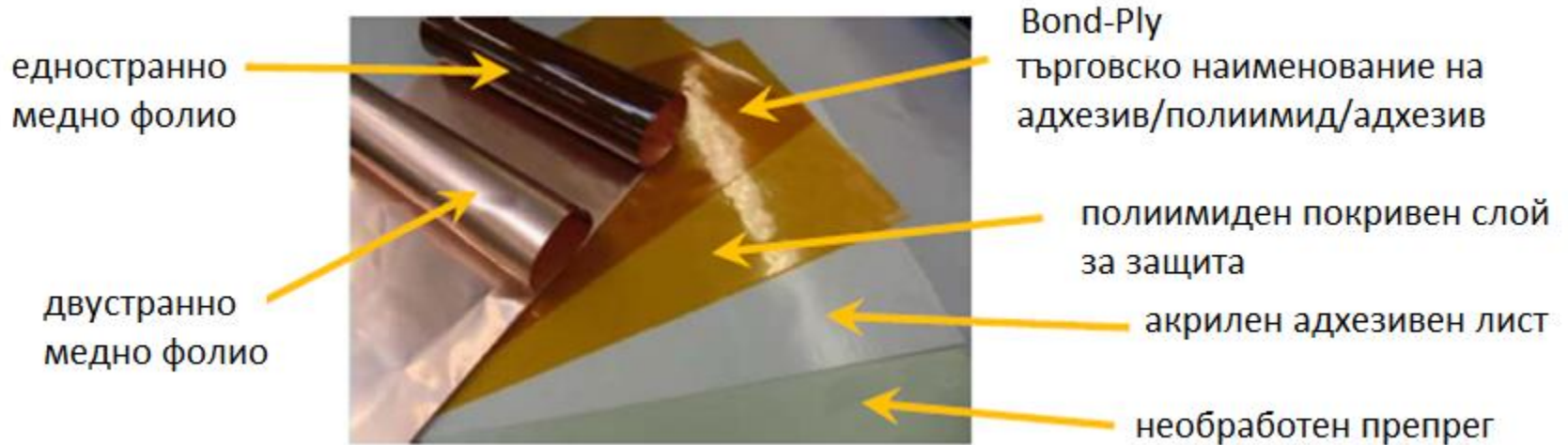
Ламинат с адхезивно покритие



Безадхезивна технология



Основни материали за гъвкави РСВ






Покривният слой е форма на защитно покритие върху металното фолио в гъвкава форма. Той предлага по-добра защита срещу износване и надраскване в сравнение със солдер маската в класическите РСВ, а също така помага на металното фолио да залепне към основния материал, осигурявайки подобрена адхезия.

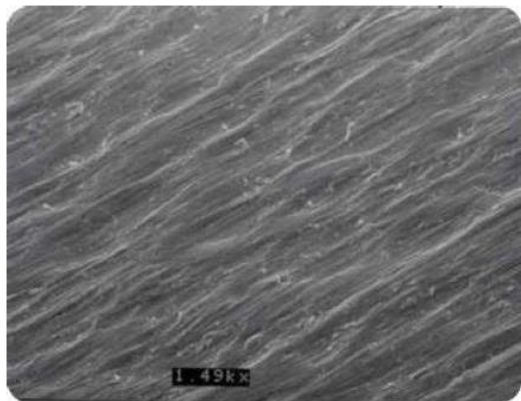
Основна информация за гъвкавите ламинати – дебелина на слоевете, вид на медното покритие и адхезива:

- Дебелина на медта: 9, 18, 35 или 70 μm , получена по химичен или електрохимичен път
- Дебелина на адхезива: 25-35 μm , на акрилна или епоксидна основа
- Дебелина на полиимида: 25, 50, 75, 100, 125 μm

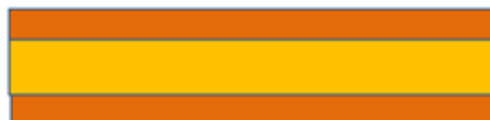
адхезивна технология
с двустранно помеднен
ламинат



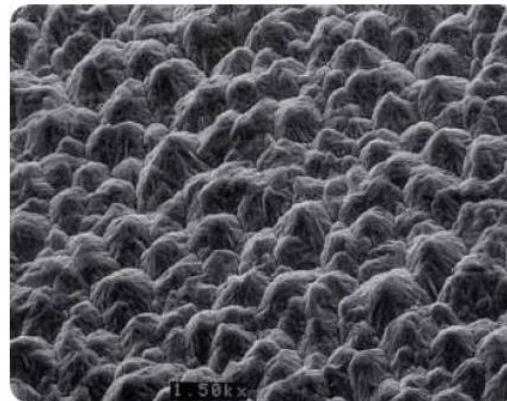
 мед  адхезив  полиимид



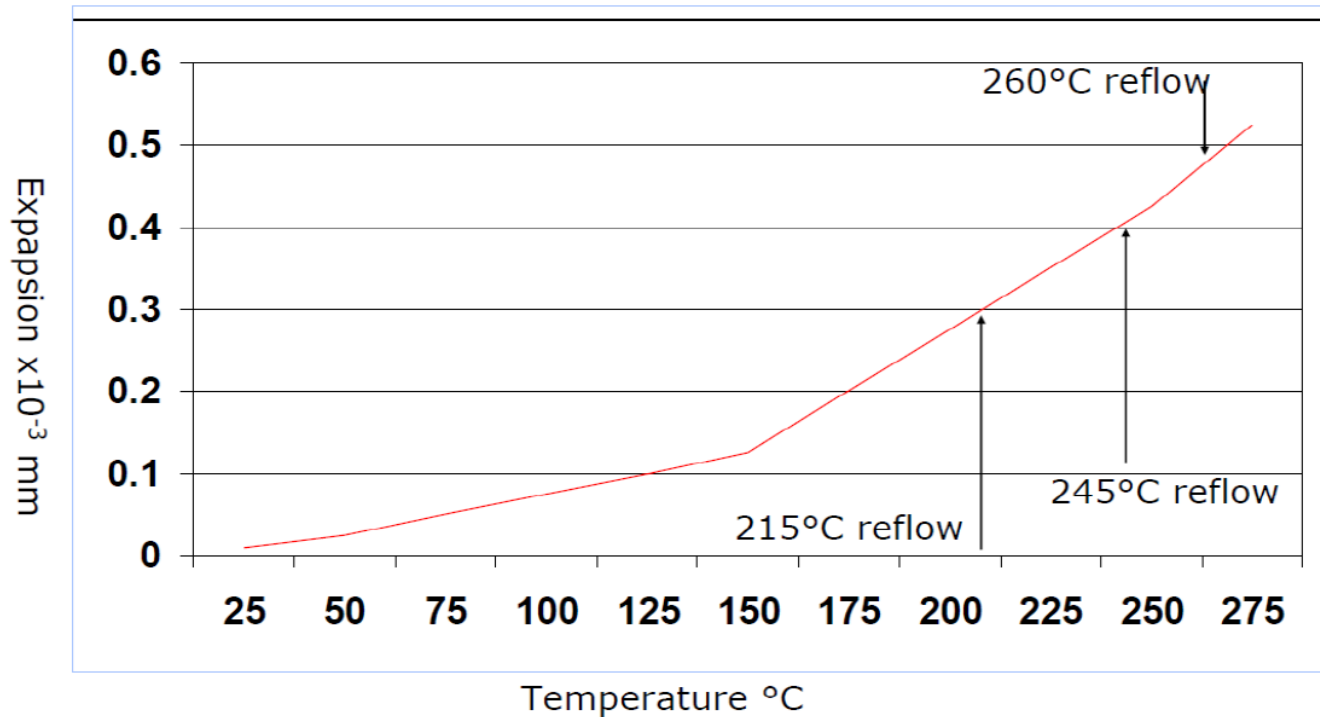
безадхезивна технология
с двустранно помеднен
ламинат



 мед  полиимид



Всеки адхезивен материал увеличава риска от повреда поради термично разширение - температурата на разтопяване и разтичане (reflow) трябва да се поддържа възможно най-ниска и да се използват специални нискотемпературни припойни пасти, когато се монтират компоненти.



Source: FINELINE

Правила за проектиране на гъвкави печатни проводници



предпочитано



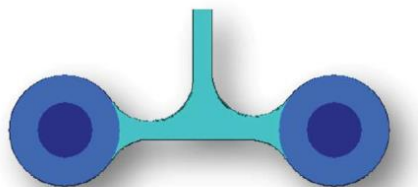
приемливо



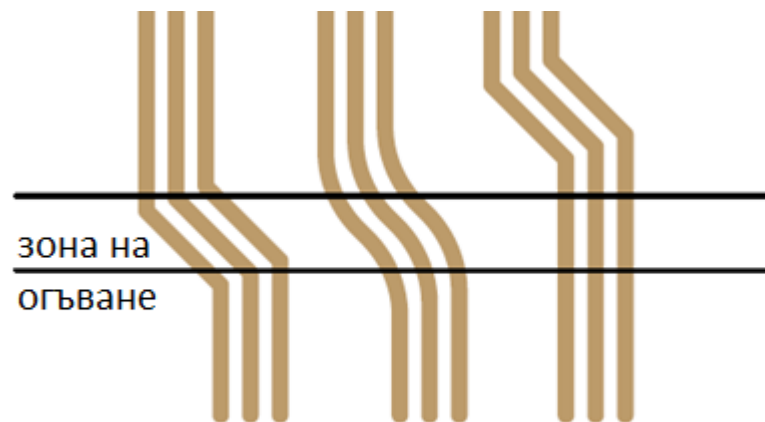
непозволено

Предпочитаният дизайн намалява или изцяло премахва концентрирането на механични напрежения и подобрява надеждността.

Когато е възможно, проводниците трябва да се трасират през зоните на огъване или сгъване бидейки перпендикулярни на зоната. Това ще намали до минимум напрежението върху тях по време на огъване и ще увеличи времето на живота на устройството.



Винаги, когато има остра форма или ъгъл, огъването може да причини прекомерно напрежение и да доведе до пукнатини в медното фолио в гъвкавата част на дизайна, така че ги избягвайте и заменете с кръгли и заоблени форми.



непозволено приемливо предпочитано

Не се стековат проводници един над друг



неправилен подход



правилен подход



непредпочитано

предпочитано

Подреждането на проводници един над друг значително ще увеличи общата дебелина на платката, като по този начин ще намали гъвкавостта и способността ѝ да се огъва надеждно.

Когато има проводящи писти, завършващи с контактни площадки и особено, когато са подредени една до друга, както е показано на гъвкавия извод, това оформление, наречено неpreferred ще доведе до пораждаване на слаби точки, в които с течение на времето се натрупват механични напрежения и умора в медното покритие, което ще доведе до прекъсване.

БЛАГОДАРЯ ВИ ЗА ВНИМАНИЕТО!