

## Магистърски курс "Анени за безжични комуникации"

### **Съвременни микровълнови подложки – свойства и метализация. Избор на най-подходяща подложка за планарни излъчватели.**

Един от основните технологични въпроси при създаване на планарни антени и антенни решетки е изборът на подложката: по нейните електрични и механични параметри (главно по нейната диелектрична проницаемост, диелектрични загуби, но и по параметри като разтегливост, влагоустойчивост, термично разширение в различните посоки, анизотропия и пр.), както и по нейната дебелина и параметри на метализацията. Цената също не е маловажна.

**Съвременни микровълнови подложки.** Названието "подложка" идва от основното ѝ предназначение – да поддържа компонентите и металните "пътечки" на платката. Това нейно "пасивно" свойство е валидно до около 50 MHz, когато дължината на вълната е много по-голяма от размера на платката. В този случай на преден план са нейните характеристики като механична стабилност и здравина, ефективна дисипация на топлината, коефициент на температурно разширение, адхезия, способност да се обработва механично (рязане, пробиване на отвори), способност да се обработва химически (почистване, ецване, покриване със защитни слоеве) и галванично (помедняване, посребряване, позлатяване), влагоустойчивост, запалимост и др. При честоти над 50 MHz и особено в микровълновия обхват (над 300 MHz) все по-определящо влияние имат диелектричните свойства на подложката – диелектрична проницаемост  $\epsilon_r$  (или  $Dk$ ) и тангенс на диелектричните загуби  $\tan \delta_\epsilon$  (или дисипативен фактор,  $Df$ ). Това е така, защото някои важни параметри на предавателните линии – дължина на вълната, импеданс, затихване, фазово закъснение и др. – зависят от  $\epsilon_r$  и  $\tan \delta_\epsilon$  [1]. В този случай важно значение има и дебелината на подложката  $h$ . В Приложение 1 са дадени данни за част от параметрите на най-използваните комерсиални подложки с диелектрична проницаемост от 2 до 10, които се представят в каталозите на водещите фирми-производители.



Фиг. Д1.1 Диелектрична подложка с двустранна метализация

На Фиг. Д1.1 е показано напречното сечение на двустранно метализирана диелектрична подложка с дебелина  $h$  и дебелина на метализацията  $t$  (важно е да се отбележи, че в каталозите на фирмите под дебелина на подложката се разбира именно параметъра  $h$ , а не  $h + 2t$ , както често се греша). Какво представляват съвременните микровълнови подложки? В по-голямата си част те са подсилени (ламинирани) и се

състоят от два типа материали – подсилваща плетена тъкан от тънки нишки и пълнител [2-5]. В зависимост от тези материали са разпространени следните подложки (ламинати):

◦ Подложки с PTFE пълнител. Тефлонът като пълнител ( $\epsilon_r = 2.1$ ), подсилен с фибро-влакна ( $\epsilon_r \sim 3.8$ ) създава определена резултантна диелектрична проницаемост на подложката между 2.1 и 3.5. Има два начина за вграждане на фибро-стъклото: като регулярна изплетена тъкан (woven glass) или като случайно разпръснати влакна без сплитане (unwoven glass). В Табл. Д1.1а, б са дадени примери за някои комерсиални подложки от двата типа. Регулярната структура на първия тип се предпочита, но подложките имат по-изразена диелектрична анизотропия – различни диелектрични параметри в зависимост от посоката. Вторият тип подложки са по-изотропни и температурно по-устойчиви. И в двата случая, като се променя съотношението между ламиниращите фибро-влакна и пълнителя се променя диелектричната проницаемост от 2.17 до 3.0. Когато се изработват ламинати с по-голяма диелектрична проницаемост – от 3 до 10, допълнително се използват керамични пълнители –

вж. някои примери в Табл. Д1.1в. Тези меки подложки са много ценни, защото могат да заменят твърдите керамични подложки.

◦ Подложки с не-тефлонови пълнители. Вместо тефлон като пълнители могат да се използват успешно и други материали, например хидрокарбонати заедно с керамични пълнители – примери в Табл. Д1.2а. Едно от основните предимства на тези подложки е високата температурна стабилност на диелектричните параметри, която е по-добра от тефлоновите ламинати. Освен това, тези материали имат практически същият температурен коефициент, както медта, което определя и добрата им механична стабилност в широк температурен интервал.

◦ Подложки с полимерни пълнители. Втвърдяващите се полимерни пълнители, смесени допълнително с керамични прахове, позволяват относително лесно да се получават стабилни подложки без подсилващи тъкани с висока диелектрична проникваемост – вж. някои примери в Табл. Д1.2б. Към този тип се числят и подложките с пълнители от епоксидни смоли, които са най-евтините, но са приложими за по-ниски честоти. Сред тях е и най-разпространеният стъкло-текстолит FR-4 ( $\epsilon_r \sim 4.3 / \tan \delta_e \sim 0.02$ ). По данни на производителите 80% от платките в света годишно се произвеждат от този материал. Ценните му характеристики (освен ниска цена) са висока температурна стабилност, топлопроводност, устойчивост на ултравиолетова светлина, облекчена механична и химическа обработка, но има големи диелектрични загуби. Този материал е най-известният продукт е на IsolaAG. Същата компания днес предлага и по-нови сравнително евтини материали с приложения за по-високи честоти – вж. Приложение 2.

Табл. Д1.1а. PTFE/ фибростъкло (woven PTFE/fiberglass)

Подложка	$\epsilon_r / \tan \delta_e$
DiClad880	2.17/0.0009
DiClad870	2.33/0.0013
DiClad527	2.40/0.0022
DiClad522	2.65/0.0022

WEB: [www.arlonmed.com](http://www.arlonmed.com)

Табл. Д1.1б. PTFE/ микро- фибростъкло (unwoven PTFE)

Подложка	$\epsilon_r / \tan \delta_e$
RT/duroid 5880	2.20/0.0009
RT/duroid 5870	2.35/0.0012
RT/duroid 6002	2.94/0.0012

WEB: [www.rogers-corp.com](http://www.rogers-corp.com)

Табл. Д1.1в. Керамика + PTFE/фибростъкло (ceramic-filled PTFE/fiberglass)

Подложка	$\epsilon_r / \tan \delta_e$
RO3003	3.0/0.0013
RO3006	6.0/0.0025
RO3010	10.2/0.0035

WEB: [www.rogers-corp.com](http://www.rogers-corp.com)

Табл. Д1.2а. Не-тефлонови подложки (non-PTFE/fiberglass)

Подложка	$\epsilon_r / \tan \delta_e$
RO4003	3.38/0.0027
RO4350B	3.48/0.0035

WEB: [www.rogers-corp.com](http://www.rogers-corp.com)

Табл. Д1.2б. Подложки с полимерни пълнители (Temoset Polymer Composites)

Подложка	$\epsilon_r / \tan \delta_e$
TMM3	3.27/0.0016
TMM4	4.50/0.0017
TMM6	6.00/0.0018
TMM10	9.20/0.0017
TMM10i	9.80/0.0015

WEB: [www.rogers-corp.com](http://www.rogers-corp.com)

Табл. Д1.2в. Подложки с близки параметри от различни производители

Подложка	$\epsilon_r / \tan \delta_e$
Rogers RO4003	3.38/0.0027
Arlon 25N	3.38/0.0027
Neltec NH9338	3.38/0.0025
Taconic RF-35	3.50/0.0033
GE Getec R54	3.90/0.0046

◦ Подложки с полиестерни материали. Тези пластмасови материали на пръв поглед не са особено подходящи за микровълнови подложки, но когато са изработени от сплетени тънки нишки, изтеглени от самия материал, механичната и температурната им стабилност нарастват, а цената им остава сравнително ниска. Диелектричните им параметри са  $\epsilon_r \sim 3.2$ ,  $\tan \delta_e \sim 0.0025$ .

◦ Многослойни и 3D подложки. Повечето от съвременните ламинирани подложки имат едно ценно свойство – могат да се залепват една към друга с помощта на бондиращи (prepreg) филми под натиск. Така се образуват многослойни платки, като върху всеки слой (подложка) е изработено отделно изображение, а връзката между тях става чрез допълнително изработени метални отвори. Многослойните платки днес са много

популярни, понеже значително увеличават плътността на електронните компоненти върху платката за получаване на компактни устройства (напр., клетъчни телефони). Друг вид многослойни (или 3D платки) са ниско-температурните керамики – LTCC (Low Temperature Cofired Ceramics). Макар че цената им е все още много висока, тези подложки вече имат много приложения в съвременните безжични комуникации и радарни системи, особено в mm обхват, поради възможността да се получават изключително компактни устройства, антени и модули. LTCC керамики имат две структурни фази: мека "зелена" фаза и твърда керамична фаза. Материалът се оформя във вид на тънки "зелени" слоеве с дебелина от 50 до 250  $\mu\text{m}$ . В това състояние се извършва лесна механична обработка на всеки слой – пробиване на отвори, метализация, оформяне на планарно изображение, ламиниране на отделните слоеве под налягане и др., като има възможност да се включват и пасивни елементи – резистори, кондензатори и др. След тази предварителна подготовка се пристъпва към изпичане на подложката (бавно повишаване на температурата 2-5°C/min до ~450°C за 2 часа и накрая до ~850-875°C за 10-15 минути). След този процес формираната подложка е твърда като познатите керамики, но диелектричните ѝ параметри ( $\epsilon_r \sim 7.4$ ,  $\tan \delta_\epsilon \sim 0.002$ ) са по-различни от тези на Alumina.

**Метализация на съвременните микровълнови подложки.** Проводимостта (или повърхнинното съпротивление) и още няколко други параметъра на метализацията са много важни за качеството на цялата подложка. Известно е, че медта осигурява най-висока проводимост на най-ниска цена, затова е най-използваният метал в подложките. Златото, среброто и никелът се използват по-често като защитни слоеве, но могат да заместват медта в някои специални приложения. Като защитни слоеве могат да се използват и тънки органични покрития, които слабо влияят на параметрите на предавателните линии и антенните елементи на високи честоти.

Дебелината на метализацията трябва да е поне десет пъти по-голяма от дебелината на skin слоя за съответната честота. В съвременните подложки се използват медни слоеве със стандартна дебелина от 10 до 100  $\mu\text{m}$ , по-рядко 5  $\mu\text{m}$  или по-големи от 100  $\mu\text{m}$ . В индустрията на печатни платки се прави връзка между дебелината и теглото на метализацията, изразено в извън-системната единица Oz/ft<sup>2</sup> – вж. данните в Табл. Д1.3. Как се получават слоеве с подобна дебелина? При керамични, феритни и други твърди подложки най-често се използва термично вакуумно изпарение. При полутвърдите и меките подложки се прилагат други методи. Понеже медта е ковка, тя може успешно да се пресова от дебели плочи (25 до 50 mm) до тънки слоеве 0.1 mm, но получаване на слоеве под 0.05 mm чрез пресоване е трудно. За получаване на по-тънки слоеве се прилага метода на електро-химично (галванично) отлагане. Например, не много дебели медни слоеве могат да се отлагат върху въртящ се барабан, потопен в електролит. Получените чрез пресоване медни слоеве са по-плътни от електролитните. Но електролитните слоеве имат друго предимство – тяхната структура е пореста напречно на слоя, което облекчава получаването на по-релефно изображение на металните пътечки след ецването. Друго предимство е възможността да се контролира грапавостта на медната повърхност, което е важно за постигане на по-добра адхезия на метализацията към повърхността на подложката. Процедурата е следната: ако се получава 35  $\mu\text{m}$  слой, първите 30  $\mu\text{m}$  се отлагат "меко", докато последните 5  $\mu\text{m}$  – неравно чрез увеличаване на тока през електролита и параметрите на разтвора. Така се получава характерна грапава повърхност – "коралова" мед, която след това се оксидира до кафява или черна повърхност. Това допълнително увеличава адхезията.

Табл. Д1.3 Връзка "тегло-дебелина" на медната метализация в подложките

Тегло, Oz/ft <sup>2</sup> *)	Дебелина, $\mu\text{m}$
1	35
1/2	17.5
1/4	10
1/8	5
2	70
3	100

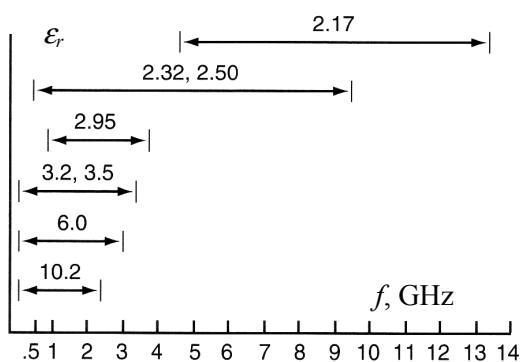
\*) Oz (Ounce) = 28.83 g  
1 ft = 30.38 cm

Метализация се налага и в други случаи на изработване на планарни антени и антенни решетки – когато се използват отвори в едно- и многослойни платки. Най-разпространената технология е следната. Първоначално на определените места се пробиват съответните отвори. Това става чрез пробиване с помощта на различни свредла с прецизна механична фреза, перфорация чрез замба или поасон или термично пробиване с помощта на лазерен лъч. Най-често гъста мрежа от метализирани отвори се използват за заземяване на контактни площадки от лицевата страна към гърба на микровълновите платки, но се срещат и единични отвори в самите линии са прехвърляне на сигнал към различни слоеве в многослойните платки. И в двата случая отворите трябва да са надеждно опроводени отвътре и свързани към съответните контактни площадки. Това зависи от типа на подложката, но повечето съвременни ламинирани подложки позволяват този процес. Помедняването се осъществява на два етапа: химично помедняване, което дава относително тънки слоеве (~1  $\mu\text{m}$ ), необходими само да създаде началното метално покритие за прилагане на следващо електрохимично отлагане на мед в електролитна вана (до 30-50  $\mu\text{m}$ ). Електролитното (галванично) помедняване (позлатяване, посребряване, никелиране и пр.) е относително евтин и ефективен метод за удебеляване на вече съществуваща метализация.

**Избор на подходяща подложка – основни принципи.** Преди двадесетина години, когато на пазара за електронни платки са били предлагани не повече от 2-3 вида подложки, проектантите на планарни антени са си задавали предимно един въпрос: ”Дали дадената подложка X ще е подходяща за моята антена?”. Днес, когато имат възможност да избират измежду поне стотина различни видове подложки, те си задават съвсем друг въпрос: “Кой от всичките материали ще е най-подходящ за моята антена?”. За да си отговори на този въпрос, проектантът трябва да сравни параметрите на много различни ламинати. В каталозите се включват данни за следните характеристики:

- **Електрически характеристики:** диелектрична константа, тангенс на диелектричните загуби, анизотропия, обемно и повърхностно съпротивление, пробивно напрежение и др.;
- **Физични характеристики:** дебелина на подложката, адхезия в  $\text{N/mm}^2$  (или здравина на отлепване), степен на огъване и усукване, механична разтегливост, възможни дефекти и др.
- **Химически характеристики:** податливост на ецване, на запояване и лепене, влагоустойчивост, запалимост и др.
- **Термични характеристики:** коефициенти на термично разширение в трите посоки, температура на трансформация на стъкло-тъканта (или температура на омекване на подложката) и др.

Как се избира най-подходящата подложка за даден антенен елемент и за захранващите линии? Най-напред се прави избор в термини на “честота – диелектрична константа”, като се държи сметка и за дебелината на подложката. Това е така, понеже дължината на вълната в предавателните линии зависи от  $1/\sqrt{\epsilon_r}$  (по-точно от  $1/\sqrt{\epsilon_{eff}}$ ;  $\epsilon_{eff}$  – ефективна диелектрична константа). Следователно, разумни дължини на линиите при ниски честоти се получават за



Фиг. Д1.2 Карта на необходимата диелектричната константа от честотата

големи стойности на  $\epsilon_r$ , а при високи – точно обратното, за малки стойности на  $\epsilon_r$ . На Фиг. Д1.2 е дадена примерна карта на подходящите стойности на  $\epsilon_r$  в зависимост от работната честота на устройството. Диелектричната константа има значение и за ширината на линиите в зависимост от техния импеданс. При фиксирана дебелина те са по-тънки при големи стойности на  $\epsilon_r$ , но по-широки – за малки стойности на  $\epsilon_r$ . Тогава, за да не се получат прекалено тънки или прекалено широки линии се подбира и подходящата дебелина на подложката (при еднакви стойности на  $\epsilon_r$  по-тънки линии се

постигат при по-тънки подложки и обратно). Следващият избор е свързан с тангенса на диелектричните загуби  $\tan\delta_e$ . Ако линиите са дебели (т. е. загубите в проводниците са относително малки), се търси подложка с малък  $\tan\delta_e$ , а при тънки линии  $\tan\delta_e$  няма особено значение. Подложки с малки загуби се избират за филтри, фидерни линии за антенни елементи, ниско-шумящи усилватели, за много високочестотни устройства по принцип и пр. Подложките с ниски диелектрични загуби са особено важни при високи честоти (напр. в mm обхват). Обратно, при ниски честоти (напр. под 1000 MHz) тези загуби нямат особено голямо значение и могат да се използват евтини стъкло-текстолитни подложки (напр. FR4), които по правило са с големи стойности на  $\tan\delta_e$ . За структури, чувствителни към размерите (каквито са планарните антенни излъчватели), важен е и температурният коефициент на разширение, както и някои физични параметри. От технологична гледна точка има значение адхезията на метализацията, както и всички химични параметри. Във всички случаи изборът на най-подходяща подложка за дадена планарна антена при определена честота трябва да се прави много внимателно. Към това се включва и оптимизация на вложените разходи.

Как да се избере подложка за антенни елементи за безжичните обхвати 2-6 GHz? За фидерни линии в тези обхвати са подходящи подложки с диелектрична проницаемост 3-4.5 при дебелини 0.5-1.5 mm. Тези параметри, обаче, не са подходящи за ефективни излъчватели. Затова може да се използва система тип "сандвич": много тънка подложка (напр. FR-4 или подобна) с дебелина 0.1 mm (само за поддържане на излъчвателите и фидерните линии) и пълнител (напр. пенообразен материал с диелектрична проницаемост под 1.1 или въздух), с което общата еквивалентна диелектрична проницаемост пада до около 1.3-1.5.