

Abstrakt:

Předkládaná práce obsahuje přehled materiálů pro konstrukci a pouzdření solárních článků a jejich dielektrické vlastnosti. Dále metody testování a měření jejich vlastností. Hlavní námět práce jsou degradační testy těchto materiálů vlivem tepla a UV záření a sledování změn jejich vlastností. Zkoumané vzorky byly připraveny ve spolupráci s firmou Solartec s.r.o.

Abstract:

This document includes summary of materials to construct and encasement solar cells and their dielectric properties. Thereinafter includes methods of testing and measuring their properties. The purpose of document is degradation tests of these materials by heat, UV radiation and monitor changes of material properties. Tested samples were prepared in cooperation with Solartec s.r.o.

Klíčová slova:

Solární článek, degradace dielektrik, pouzdricí materiál, zrychlené stárnutí, tepelné stárnutí, stárnutí UV zářením.

Keywords:

Solar cell, degradation of dielectric, covering material, accelerated aging, thermal aging, aging of UV radiation.

Bibliografická citace díla:

ČADA, M. *Degradační testy polymerních materiálů vystavených elektrickému poli*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 50 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D..

Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 20. 5. 2011

.....

Poděkování:

Na tomto místě bych chtěl poděkovat doc. Ing. Jiřímu Vaňkovi, Ph.D. za cenné připomínky a odborné rady, kterými přispěl k vypracování této bakalářské práce.

Obsah

ÚVOD	10
1 TEORETICKÁ ČÁST	11
1.1 FOTOVOLTAIKA	11
Fotovoltaické články	11
Fotoelektrický jev	11
1.2 MATERIÁLY PRO VÝROBU FOTOVOLTAICKÉHO ČLÁNKŮ	12
1.2.1 Objemové krystalické materiály	12
1.2.2 Tenkovrstvé materiály	13
1.2.3 Články z organických polymerů	14
1.3 POUZDŘENÍ FOTOVOLTAICKÉHO MODULU	14
1.3.1 Pouzdřicí materiály	16
Epoxidová pryskyřice	18
1.4 STÁRNUTÍ IZOLANTŮ	19
1.4.1 Vliv teploty vzduchu	20
1.4.2 Vliv elektrického pole	21
1.4.3 Vliv mechanického namáhání	22
1.4.4 Vliv kyslíku, záření a vody	22
1.4.5 Vliv chemických látek	22
1.5 DIELEKTRICKÉ VLASTNOSTI MATERIÁLŮ	23
1.5.1 Dielektrická polarizace	23
1.5.2 Relativní permitivita	27
1.5.3 Ztrátový činitel	27
1.5.4 Elektrická pevnost	29
1.6 NORMA ČSN EN 61215	29
1.6.1 Zkoušení a kritéria přijetí	30
1.6.2 Zkušební postupy	31
2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	33
2.1 VZORKY	33
2.2 STÁRNUTÍ VLIVEM TEPLA	34
2.3 STÁRNUTÍ VLIVEM UV ZÁŘENÍ	35
2.4 MĚŘENÍ VLASTNOSTÍ	37
2.5 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	38
2.6 NAMĚŘENÉ HODNOTY	39
2.6.1 Stárnutí teplem	39
2.6.2 Stárnutí UV zářením	42
2.7 VLIV TEPLA NA STÁRNUTÍ MATERIÁLŮ	45
2.8 VLIV UV ZÁŘENÍ NA STÁRNUTÍ MATERIÁLŮ	45
3 ZÁVĚR	46
4 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	47

Seznam obrázků

OBR. 1: PRINCIP FOTOELEKTRICKÉHO JEVU	12
OBR. 2: PRŮŘEZ TANDEMOVOU STRUKTUROU SOLÁRNÍHO ČLÁNKU Z ORGANICKÝCH POLYMERŮ.....	14
OBR. 3: SOLÁRNÍ MODUL A JEHO SCHÉMA S UKÁZKOU JEDNOTLIVÝCH VRSTEV	15
OBR. 4: OBOUSTRANNÉ ZASKLENÍ	15
OBR. 5: IZOLAČNÍ DVOJSKLO.....	15
OBR. 6: ZALITÍ DO PRŮHLEDNÉ HMOTY NEBO NELAMINOVANÁ FÓLIE.....	15
OBR. 7: ZADNÍ STRANA Z NETRANSARENTNÍHO MATERIÁLU.....	16
OBR. 8: POLARIZACE POLÁRNÍHO DIELEKTRIKA	24
OBR. 9: MOLEKULA NEPOLÁRNÍHO DIELEKTRIKA BEZ EL. POLE A JEJÍ POLARIZACE	24
OBR. 10: PARALELNÍ /A/ A SÉRIOVÝ /B/ NÁHRADNÍ OBVOD KONDENZÁTORU SE ZTRÁTOVÝM DIELEKTRIKEM.....	29
OBR. 11: PŘEDNÍ STRANA ELEKTROD	33
OBR. 12: ZADNÍ STRANA ELEKTROD	34
OBR. 13: PEC CHIRANA STE31.....	35
OBR. 14: LAMPA LABINO DUO-UV PS 135.....	36
OBR. 15: PRŮBĚH INTENZITY ZÁŘENÍ LAMPY LABINO DUO-UV PS 135 V ZÁVISLOSTI NA VZDÁLENOSTI OD OHNISKA.....	36
OBR. 16: PRACOVNÍ MĚŘENÍ VZORKŮ S PŘÍSTROJEM HP AGILENT 4284A.....	37
OBR. 17: TŘÍELEKTRODOVÝ ROVINNÝ SYSTÉM	38
OBR. 18: ZÁVISLOST RELATIVNÍ PERMITIVITY NA DOBĚ ZRYCHLENÉHO STÁRNUTÍ TEPLEM MATERIÁLU EVA	39
OBR. 19: ZÁVISLOST ZTRÁTOVÉHO Činitele NA DOBĚ ZRYCHLENÉHO STÁRNUTÍ TEPLEM MATERIÁLU EVA	40
OBR. 20: ZÁVISLOST RELATIVNÍ PERMITIVITY NA DOBĚ ZRYCHLENÉHO STÁRNUTÍ TEPLEM MATERIÁLU PVB	40
OBR. 21: ZÁVISLOST ZTRÁTOVÉHO Činitele NA DOBĚ ZRYCHLENÉHO STÁRNUTÍ TEPLEM MATERIÁLU PVB	41
OBR. 22: ZÁVISLOST RELATIVNÍ PERMITIVITY NA DOBĚ ZRYCHLENÉHO STÁRNUTÍ TEPLEM MATERIÁLU TPU.....	41
OBR. 23: ZÁVISLOST ZTRÁTOVÉHO Činitele NA DOBĚ ZRYCHLENÉHO STÁRNUTÍ TEPLEM MATERIÁLU TPU.....	42
OBR. 24: ZÁVISLOST RELATIVNÍ PERMITIVITY NA DOBĚ ZRYCHLENÉHO STÁRNUTÍ UV ZÁŘENÍM MATERIÁLU EVA	42
OBR. 25: ZÁVISLOST ZTRÁTOVÉHO Činitele NA DOBĚ ZRYCHLENÉHO STÁRNUTÍ UV ZÁŘENÍM MATERIÁLU EVA	43

OBR. 26: ZÁVISLOST RELATIVNÍ PERMITIVITY NA DOBĚ ZRYCHLENÉHO STÁRNUTÍ UV ZÁŘENÍM MATERIÁLU PVB.....	43
OBR. 27: ZÁVISLOST ZTRÁTOVÉHO Činitele NA DOBĚ ZRYCHLENÉHO STÁRNUTÍ UV ZÁŘENÍM MATERIÁLU PVB.....	44
OBR. 28: ZÁVISLOST RELATIVNÍ PERMITIVITY NA DOBĚ ZRYCHLENÉHO STÁRNUTÍ UV ZÁŘENÍM MATERIÁLU TPU.....	44
OBR. 29: ZÁVISLOST ZTRÁTOVÉHO Činitele NA DOBĚ ZRYCHLENÉHO STÁRNUTÍ UV ZÁŘENÍM MATERIÁLU TPU.....	45

Seznam tabulek

TAB. 1: ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI LAMINAČNÍCH FÓLIÍ	18
---	----

Úvod

Fotovoltaické články slouží k přeměně sluneční energie na elektrickou energii. Samotné články jsou velice křehké a nedokážou odolávat atmosférickým podmínkám prostředí. Proto je nutné fotovoltaické panely pouzdit do panelů. Tím se zvýší jejich odolnost a samozřejmě také životnost. K pouzdření se používají různé materiály a každý má jinou ochranou funkci. Jejich vhodnou kombinací docílíme požadované odolnosti panelu.

Téma předkládané práce jsou materiály pro pouzdření panelů. Na tyto materiály působí procesy stárnutí vlivem různých činitelů. Hlavním námětem práce je zkoumání a měření vlastností předložených vzorků při průběhu zrychleného stárnutí vlivem teploty a UV záření.

V experimentální části je popsána výroba vzorků. Výběr materiálu a laminaci vzorků provedla firma Solartec s.r.o. v Rožnově pod Radhoštěm. Dále práce obsahuje popis přístrojů pro stárnutí. Vyhodnocení vlastností materiálů probíhalo měřením relativní permitivity a ztrátového činitele mezi cykly stárnutí.

1 Teoretická část

1.1 Fotovoltaika

Je to technický obor, který se zabývá přeměnou energie slunečního záření na elektrickou energii. Název je odvozen od slova foto (světlo) a volt (jednotka elektrického napětí). V dnešní době se stále více rozvíjí a má do budoucnosti velký potenciál ve výrobě elektrické energie. Neustále se zdokonaluje provedení a testují se nové materiály pro výrobu solárních článků. Díky tomu se zvyšuje účinnost, snižují pořizovací náklady a tím se zkracuje doba návratnosti investic. Nezanedbatelnou předností je možnost realizace zařízení s výkonem megawatt, ale na druhou stranu také výkon setiny wattu. [11] [23]

1.1.1 Fotovoltaické články

Slouží k získávání elektrické energie z energie slunečního svitu. Princip solárního článku je založen na fotoelektrickém jevu v polovodičovém materiálu.

1.1.2 Fotoelektrický jev

Fotoelektrický jev je fyzikální jev, při kterém jsou elektrony emitovány z látky v důsledku absorpce energie elektromagnetického záření.

Fotoelektrický jev vzniká, když foton interaguje s elektronem, předá elektronu veškerou energii a to elektronu umožní opustit atom. Vzniká tedy volný elektron a díra. Tyto emitované elektrony jsou označovány jako fotoelektrony a jejich uvolňování se označuje jako fotoemise.

Tento jev popisuje rovnice fotoelektrického jevu:

$$h \cdot f = W + E_{\max} \quad (1)$$

h Planckova konstanta

f frekvence elektromagnetického záření

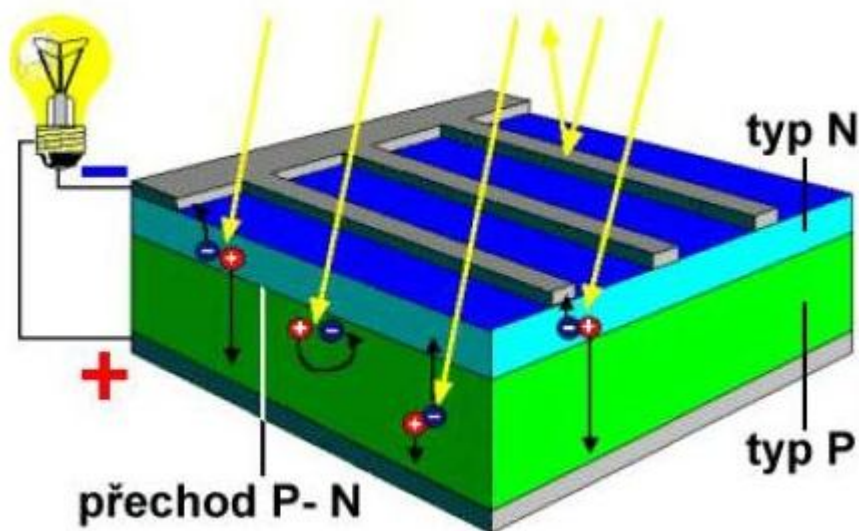
W (vazební energie) elektronu (tedy výstupní práce)

$E_{\max}$ maximální možná kinetická energie uvolněného elektronu.

Pokud jev probíhá na povrchu látky, hovoří se o vnějším fotoelektrickém jevu. Jestliže uvolněné elektrony látku neopouští, ale zůstávají v ní jako vodivostní elektrony, hovoří se o

vnitřním fotoelektrickém jevu. A pokud na látku dopadají elektrony, které způsobují vyzařování fotonů, mluví se o inverzním fotoelektrickém jevu.

V solárních panelech se využívá vnitřní fotoelektrický jev. Velikost proudu, který pak panelem protéká, je závislý na ozáření článku. [19]



Obr. 1: Princip fotoelektrického jevu

1.2 Materiály pro výrobu fotovoltaického článku

Od výroby prvního fotovoltaického článku uplynulo už více než 50 let. Za tuto dobu již byla vyzkoušena celá řada různých technologií i materiálů. Ale pouze některé jsou použitelné u sériové výroby. Jako hlavní parametr pro výběr materiálu je cena, která se zde udává na výkon 1W. Kromě ceny je rozhodující účinnost a stabilita elektrických parametrů. [9]

1.2.1 Objemové krystalické materiály

Krystalický křemík

V dnešní době je to nejvíce používaný materiál, který je snadno dostupný, protože zemská kůra obsahuje 30% oxidu křemičitého. Technologie zpracování křemíku je v průmyslu dobře zvládnutá. V praxi se pro výrobu solárních článků využívá odpadový křemík z polovodičového průmyslu. Nevýhodou je vysoká cena přípravy, která ovlivňuje výsledný panel. [9]

Monokrystalický křemík

Připravuje se tažením z monokrystalu z taveniny. Křemíkové destičky s tloušťkou 200 – 360 μm se řezou speciální drátovou pilou z křemíkového ingotu. Při tomto postupu vznikají velké ztráty materiálu. V laboratorních pokusech bylo dosaženo účinnosti 24%. V praxi ovšem fotovoltaické články z monokrystalického křemíku dosahují účinnosti max 15%. [9]

Polykrystalický křemík

Tento materiál se stále více využívá díky své nízké výrobní ceně, protože zde odpadá proces tažení monokrystalu. Destičky polykrystalického křemíku jsou řezány z odlévaného ingotu. Při tuhnutí taveniny vznikají různé velké různě orientované krystaly – polykrystalická struktura. Účinnost v laboratorním prostředí dosahuje 18%, při sériové výrobě do 14%. [9]

1.2.2 Tenkovrstvé materiály

Galium Arsenid (GaAs)

GaAs je slitinový polovodičový materiál, ze kterého se vyrábějí fotovoltaické články s vysokou účinností a kvalitou, které se používají především pro kosmické aplikace. Jejich hlavní nevýhodou a důvodem proč se nepoužívají pro komerční účely je mnohonásobně vyšší cena. Účinnost článků je vyšší než 25%. Pro zvýšení na 30% účinnosti jsou vytvářeny složité struktury s několika polovodičovými přechody založené na GaAs a příbuzných materiálech. [9]

Amorfní křemík (a-Si:H)

Tento materiál se nejvíce uplatňuje v aplikacích spotřební elektroniky a v systémech zabudovaných do budov. Nevyrábí se jednotlivé články ale celé moduly najednou. Nevýhoda je malá účinnost, která je pro malé experimentální moduly 10%, ale při sériové výrobě mezi 5 až 7%. [9]

Kadmium Telurid (CdTe)

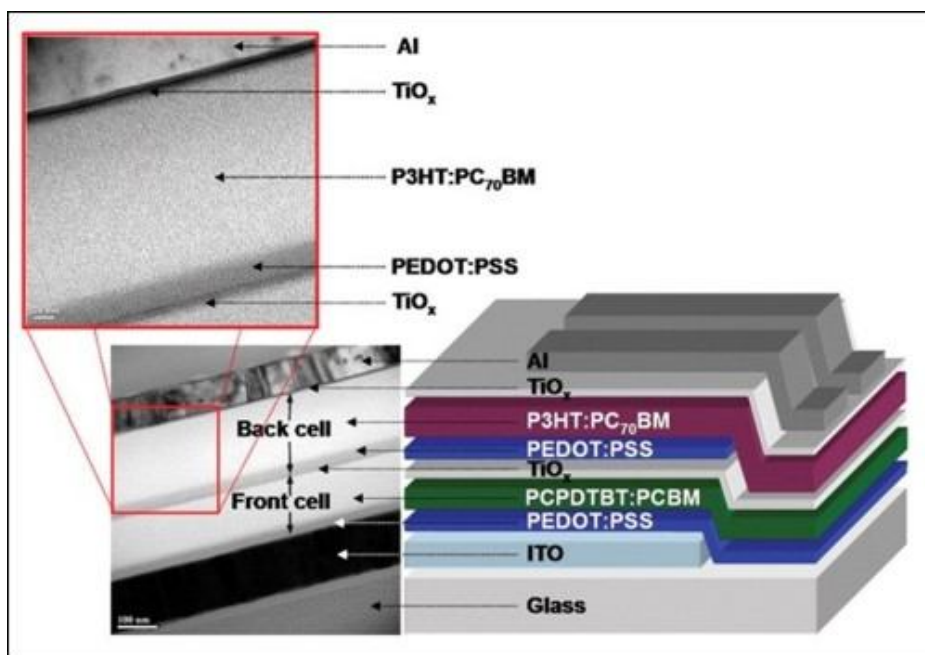
Používá se ve formě tenkovrstvého filmu, který se nanáší elektrodepozicí, sprejováním a vysokorychlostním napařováním. Tato technologie je levná, což je hlavní výhoda. Co se týká účinnosti, tak laboratorní vzorky dosahují 16% a sériově vyráběné kolem 8%. [9]

Copper Indium Diselenide (CuInSe₂, nebo CIS)

Tenkovrstvý film polykrystalického materiálu, na kterém je v podmínkách výzkumu dosahováno účinnosti 17%. [9]

1.2.3 Články z organických polymerů

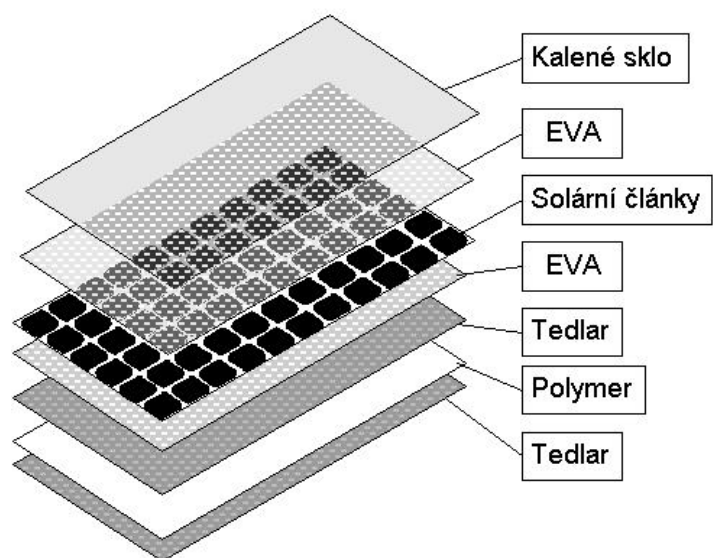
Hlavní výhodou použití organických polymerů ve fotovoltaických článcích je nízká výrobní cena a lepší mechanické vlastnosti oproti křemíkovým článkům. Nevýhoda a důvod, proč se v dnešní době nepoužívají ve větším měřítku, je velmi malá účinnost i životnost. Nejvyšší účinnost organických solárních článků dosahovala 6,5 %. [14] [17]



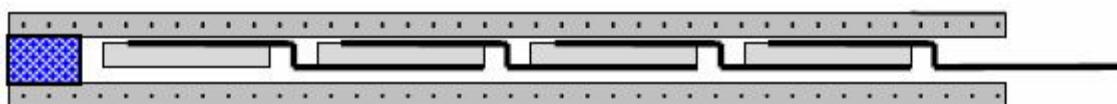
Obr. 2: Průřez tandemovou strukturou solárního článku z organických polymerů.

1.3 Pouzdření fotovoltaického modulu

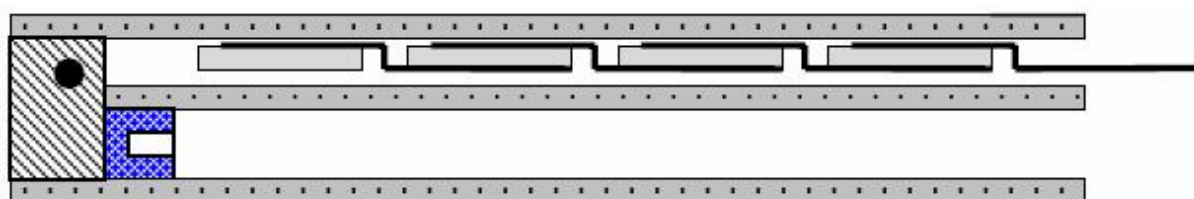
Aby vznikl systém s požadovaným výkonem, vzniká fotovoltaický modul spojením fotovoltaických článků sériovým, paralelním nebo sérioparalelním spojením. Solární články jsou velmi křehké a lámavé. Z tohoto důvodu se provádí pouzdření modulu, které také modul chrání proti vlivům počasí a vlhkosti. V zimních měsících dochází k rychlým a značným teplotním změnám, které zvyšují riziko narušení vodivých spojů na článcích. Pro zpevnění se tedy používají kovové nebo plastové rámy. Jako přední krycí materiál se používá kalené sklo.



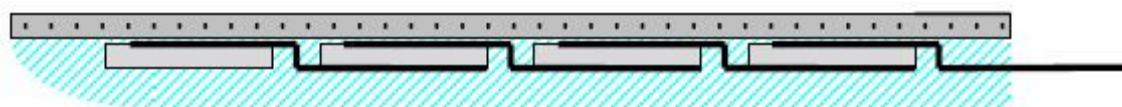
Obr. 3: Solární modul a jeho schéma s ukázkou jednotlivých vrstev [11]



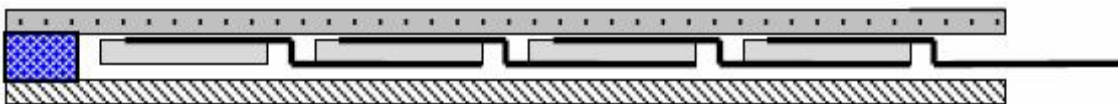
Obr. 4: Oboustranné zasklení [11]



Obr. 5: Izolační dvojsklo[11]



Obr. 6: Zalití do průhledné hmoty nebo nelaminovaná fólie[11]



Obr. 7: Zadní strana z netransparentního materiálu[11]

1.3.1 Pouzdřící materiály

Kalené sklo

Kalené nebo také tvrzené sklo je tepelně zpracované sklo, které po procesu kalení získává nové rozložení vnitřního napětí. Vyrábí se zahřátím v kalící peci na teplotu kolem 600°C a následným rychlým ochlazením proudem vzduchu. Tímto procesem získává sklo jedinečné vlastnosti.

Sklo je tak trojnásobně odolnější na náraz plochy, má pětinasobně větší mechanickou pevnost a odolnost vůči prudkým změnám teploty. Pevnost v ohybu je okolo 120 MPa a více, oproti cca 45 MPa u skla nekaleného. Při rozbití se kalené sklo rozpadne na malé části, které nejsou ostré a tak zabraňuje zranění při rozbití.

EVA fólie (etylenvinylacetát)

Tento materiál je často používaný na pouzdření přední strany panelu. Je to plast, který se vyznačuje vysokou odolností proti vlivu tepla a proti stárnutí. Chrání křemíkovou desku proti navlhání a slouží k elektrické izolaci. Plní funkci konstrukční podpory, protože díky své elasticitě chrání článek proti mechanickým otřesům.

Nejdříve se používal pouze při pouzdření krystalického křemíku. V dnešní době má své uplatnění i u amorfního křemíku a dalších materiálů, které se využívají pro konstrukci solárních článků.

Hlavní nevýhodou EVA je nedostatečná UV stabilita. Pokud je vystavena dlouhodobějšímu slunečnímu záření, snižuje se propustnost a tím také účinnost celého článku. Další nevýhoda je menší přilnavost na křemík a schopnost absorbovat vlhkost, která mění vlastnosti materiálu. Někdy může dojít i k vytvoření vzduchových bublin, které mohou následně zničit celý článek.

EVA se nanáší jako fólie. Zapouzdření se provádí vakuovou laminací. Při laminaci dojde k zesíťování struktur a k vytvrzení.[4] [12]

PVB (Polyvinylbutyral)

PVB se vyrábí z polyvinylalkoholu a butylaldehydu. Je to bezbarvý, průhledný polymer s vysokou stálostí vůči atmosférickým vlivům, působení slunečního záření, kyslíku a ozónu. Je rozpustný v alkoholech, dioxanu, esterech, ketonech a chlórovaných uhlovodících. Tento materiál se již dlouho používá jako bezpečnostní sklo u předních skel automobilů.

Nevýhodou PVB je citlivost na vodu, kdy se voda dostává pod materiál. Tento jev ale v dnešní době ve fotovoltaických panelech nehrozí, protože jsou důkladně utěsněny.

Naopak výhody tohoto materiálu jsou vysoká odolnost vůči stárnutí, stabilita proti UV záření a větší adhesivní síla na sklo. [21]

TPU (Termoplastický polyuretan)

Patří do skupiny elastomerů. Liší se od ostatních elastomerů výrazným množstvím kombinací fyzikálních vlastností, což z něj dělá extrémně flexibilní materiál s širokou škálou použití. Při pouzdření panelu nahrazuje EVA. Požívá se také jako fólie, která se laminuje. Má lepší přilnavost ke křemíku i ke konstrukci. Další výhodou je jeho dlouhodobá průhlednost a také, že při ochlazení na velmi nízkou teplotu nekřehne a nepraská.

Výsledný panel má pevnější zapouzdření, tím se prodlužuje životnost a zvyšuje spolehlivost. Laminace TPU je snadnější než EVA. Nedochází k zesíťování struktur, a proto je možné ohřátím materiálu TPU upravit, případně odstranit. To s sebou nese nemalé úspory při výrobě, proto je TPU ekonomičtější než EVA. [4] [7]

Pertex

Folie složená ze dvou materiálů – ethylenvinylacetátu, polyesteru. Příměs polyesteru zvyšuje odolnost proti navlhání a prachu. Použití a další vlastnosti jsou jako u EVA.

SentryGlas

Je trojná bariérová folie z Polyvinylbutyral PVB a polyesteru PET, používaná pro přední stranu. Je to velmi tvrdý materiál s malou ohebností. Díky iontovým vazbám má vysokou přilnavost ke sklu a je 100x pevnější než PVB. Vyznačuje se velkou odolností vůči atmosférickým vlivům. [4] [7]

Tedlar

Používá se pro pouzdření zadní strany solárního panelu, hlavně díky své výborné odolnosti vůči atmosférickým vlivům. Vyniká také odolností proti mechanickému namáhání a vůči chemickým rozpouštědlům. Má také výbornou teplotní stálost. Nanáší se laminací, před kterou se pokrývá vrstvou tepelně aktivovaného lepidla. [4] [7]

PMMA (Polymethylmetakrylát)

Nahrazuje Sentryglas jako nejvrchnější vrstva. Používá se pro svoji velmi malou hmotnost a pružnost. Je lehký, netříštivý, stálý, propouští 90% světla, dá se svařovat, tvarovat, lepit, třískovitě obrábět i barvit.

Mezi výhody PMMA patří vynikající stabilita vůči atmosférickým podmínkám a stabilita i za vysokých teplot (200°C). Naopak nevýhodou je nízká povrchová tvrdost a zvýšená povrchová absorpce prachu. [21]

Epoxidová pryskyřice

Jsou to makromolekulární látky obsahující více než jednu epoxidovou skupinu v molekule. Elektrická pevnost pryskyřic je 20 – 30 kV.mm-2, permitivita 3 – 4, ztrátový činitel cca 0,001 – 0,03.

Solární panel se pryskyřicí zalije a následně vytvrdí. Takto vzniklý materiál má vynikající mechanické a elektroizolační vlastnosti. Je odolný vůči vysokým teplotám (rozklad cca 340°C), nerozpustný, netavitelný, má vynikající přilnavost ke sklu, chemicky odolný, průhledný a odolný vůči navlhání a plísním. Pro vyšší odolnost proti UV záření se do pryskyřic přidávají látky se schopností absorbovat záření. Tím nedojde k fotochemické degradaci – pórování a změně barvy, čímž se snižuje světelná propustnost.

Technické údaje k některým z popisovaných materiálů

Tab. 1: Základní vlastnosti laminačních fólií [7]

Laminační materiál	Etylenvinylacetát	Polyvinylbutyral	SentryGlas	Pertex
Zkratka	EVA	PVB	SG	Pertex
Materiál vzorku	Ethylenvinylacetát kopolymer	Polyvinylbutyral termoplast	PVB a polyester (PES)	Polyethylen (PET) a EVA
Tloušťka fólie [mm]	0,5	0,36	1,52	0,08
Laminační teplota [°C]	80	145-160	145-160	145-160
Hustota [g.cm ⁻³]	0,96	1,105	0,95	-
Spektrální propustnost [%]	91-93	88	89	91-92

1.4 Stárnutí izolačních materiálů

Stárnutí je definováno jako nevratné změny vlastností v důsledku působení jednoho nebo více ovlivňujících faktorů. Namáhání způsobující stárnutí může vyvolávat buď vnitřní, nebo vnější stárnutí. Vnitřním stárnutím se rozumí nevratné změny základních vlastností výrobku vyvolané působením faktorů stárnutí, vnějším stárnutím vliv nevratných změn vlastností vytvořených působením faktorů stárnutí na neúmyslně zavedené vady ve výrobku.

Podle důsledku znehodnocení rozdělujeme stárnutí:

- trvalé (permanentní)
- přechodné (tranzitní)
- vratné (reverzibilní)

Trvalá znehodnocení materiálů nezmizí ani po ukončení nebo po klesnutí pod kritickou velikost působení činitelů stárnutí, které tento proces vyvolal. Toto znehodnocení je následkem fyzikálně chemických pochodů, při nichž dochází k strukturálním změnám, které provází trvalé zhoršení mechanických, elektrických a dalších vlastností.

Přechodná znehodnocení materiálů zčásti nebo zcela zmizí, když velikost činitele prostředí klesne v určitém časovém období pod kritickou velikost. Zmizí buď samovolně, nebo působením jiných činitelů (například vysušení vlhkého materiálu).

Materiály nikdy při svém praktickém použití nejsou vystaveny vlivu izolovaného faktoru, ale vždy jejich kombinaci. Některé z těchto faktorů mohou materiál poškozovat jak chemicky, tak fyzikálně, či fyzikálně-chemicky. Některé faktory působí na materiál protichůdně a při jejich spojení je výsledné poškození polymeru menší, než když tyto faktory působí odděleně. Většinou se však jejich součinností poškození materiálu zvětšuje (např. Světlo a kyslík). [6]

Působením faktorů dochází k:

- zhoršení elektrických vlastností
- snížení mechanické pevnosti
- změně struktury materiálu, jeho zkřehnutí a praskání
- navlhnutí související se vznikem spár
- usazování prachu a sazí na povrchu izolace související se zdrsňením povrchu

Hlavní faktory ovlivňující stárnutí materiálů

- teplota
- elektrické pole
- mechanické namáhání

Ostatní faktory ovlivňující stárnutí materiálů

- světelné záření
- kyslík
- voda
- chemické vlivy
- ultrafialové záření
- biologičtí činitelé

1.4.1 Vliv teploty vzduchu

Teplota vzduchu je jeden z hlavních činitelů stárnutí materiálů. Při tepelném namáhání dochází v materiálech k různým chemickým reakcím:

- Zesíťování makromolekul – probíhá procesem polymerace nebo polykondenzace
- Zesíťování materiálu - způsob tvrdnutí a křehnutí
- Výrazně zhoršují jeho elektrické vlastnosti

Depolymerace – dochází při ní k rozpadu řetězců makromolekul. Depolymerace probíhá i za běžných teplot, ale výrazně pomaleji. Při velkých teplotách se rychlost mnohonásobně zvýší.

Oxidace – děj vyvolaný vlivem vzdušného kyslíku. Její rychlost se také zvyšuje s vzrůstající teplotou. Dochází k strukturálním změnám a ke vzniku polárních zplodin, které mají za následek zvýšení vodivosti a ztrátového činitele. Dochází také k trhání makromolekul, tím klesá pevnost látky a zhoršují se elektrické vlastnosti. [6]

Vliv teploty můžeme rozdělit:

- vliv vysoké teploty
- vliv nízké teploty
- vliv rychlých změn teploty

Vliv vysoké teploty vzduchu

Vysoká teplota způsobuje mechanickou deformaci materiálů vznikající v důsledku nestejně lineární roztažnosti materiálů, ze kterých se materiál skládá. K Deformaci může také dojít i u stejnorodého materiálu, při nestejném zahřívání.

Dále dochází k měknutí a tavení u termoplastů a poklesu elektrického odporu izolantů. Pokles povrchového i vnitřního odporu je nelineární a rozdílný pro různé materiály. Se vzrůstající teplotou klesá elektrická pevnost izolantů. Také permitivita je funkcí teploty a směr a velikost změn jsou různé pro různé materiály. K největším změnám dochází u keramických materiálů. Ztrátový činitel při růstu teploty rychle roste, stejně tak jako elektrický odpor. [6]

Vliv nízké teploty vzduchu

Pokud je materiál vystaven přímému působení nízké teploty, dochází k rozměrovým změnám materiálů, ke změnám mechanických a elektrických vlastností. Může ale také dojít k nevratným změnám, mezi které patří vznik trhlin a krystalizace.

K nepřímým působením nízké teploty vzduchu řadíme kondenzaci vodní páry na chladných částech zařízení, a to při náhlém oteplení, námraze a podchlazení, kdy dochází ke kondenzaci vlhkosti. [6]

Vliv rychlých změn teploty vzduchu

Změny teploty způsobují pnutí v materiálu. Dochází k rozvrstvování laminátů a ke ztrátě hermetizace zapouzdřených materiálů.

1.4.2 Vliv elektrického pole

Rozlišujeme vliv stejnosměrného a střídavého elektrického pole. Vysoké hodnoty stejnosměrného elektrického pole mohou vést k předprůrazovým stavům. Při působení střídavých elektrických polí dochází k narušování materiálu výboji, které vznikají v dutinkách uvnitř materiálu nebo na rozhraní dielektrik různé permitivity. Výboje v dutinkách způsobují v materiálech chemické a fyzikální změny, které jsou většinou nevratné a způsobují zhoršování elektrických vlastností. Při působení výbojů dochází k bombardování povrchu dutin elektrony nebo ionty, k chemickému působení zplodin a k tepelným účinkům.

Elektrony a ionty, které dopadají na organický izolant, způsobí erozi. Úbytek materiálu v místě eroze je způsoben chemickou přeměnou makromolekulární látky na nízkomolekulární plynné nebo kapalné produkty. Záření vznikající při výbojích obsahuje ultrafialovou složku, která má vysokou energii. V izolantu se absorbují ta záření, jejichž frekvence je shodná s kmity chemických skupin, nacházejících se ve struktuře izolantu. Tato pohlcená energie vyvolává fotochemické reakce, které mohou aktivovat stárnutí. V místě výboje vzniká vysoká teplota, která může při vysokém počtu opakovaných výbojů způsobit zuhelnatění materiálu. Může docházet také k elektrickému průrazu. Důsledkem jsou stromečkové kanály, které postupně pronikají izolací. Všechny tyto děje způsobují změny materiálu, které mají za následek snižování elektrické pevnosti v závislosti na době působení elektrického pole. [6]

1.4.3 Vliv mechanického namáhání

Mechanické stárnutí zahrnuje

- únavovou poruchu komponent izolace způsobenou velkým počtem cyklů namáhání o nízké úrovni
- termomechanické vlivy způsobené tepelnou dilatací anebo smrštěním
- zlomení izolace v důsledku vysokých úrovní mechanického namáhání, které může být způsobeno vnějšími silami nebo pracovními podmínkami zařízení
- abrazivní opotřebení způsobené relativním pohybem mezi součástmi zařízení
- tečení izolace v důsledku elektrického, tepelného nebo mechanického namáhání.

1.4.4 Vliv kyslíku, záření a vody

Polymerní materiály se účinkem kyslíku oxidují. Rychlost jejich oxidace závisí na jejich struktuře a působení dalších faktorů.

Současné působení kyslíku a UV záření vyvolává větší poškození než působení samotného kyslíku a samotného UV záření.

Pokud je materiál při fotooxidaci současně zahříván, zvýší se rychlost sekundárních reakcí, které vznikly přímým ozářením UV zářením v primárních reakcích. Ty mohou probíhat i v temnu za nepřístupu světla. To se projeví výrazně větším poškozením materiálu, než by odpovídalo součtu těchto oddělených vlivů (kyslíku, UV záření a teploty). Primární fotochemické reakce jsou na teplotě nezávislé.

U materiálu, který je vystaven působení kyslíku a vlhkosti, je rychlost oxidace větší. Příčinou je difúze vody do materiálu. Voda zvětšuje vzdálenost mezi makromolekulami, tím usnadní difúzi kyslíku do materiálu i odvádění reakčních produktů.

Při současném působení kyslíku, vlhkosti a UV záření, se stárnutí materiálu výrazně urychlí. Kombinace účinku kyslíku, případně ozónu, a mechanického namáhání, oxidaci urychluje. V důsledku mechanického namáhání může dojít i k roztržení chemické vazby mezi atomy řetězce. Mimo to mechanické namáhání také usnadňuje reakci s prostředím. Aktivační vliv mechanického namáhání se projevuje až při jeho intenzivním namáhání. Proto k oxidaci materiálů, které jsou mechanicky namáhány, postačuje menší aktivační energie, než jaké je třeba pro oxidaci bez napětí. [20]

1.4.5 Vliv chemických látek

Pronikání nízkomolekulárních chemických látek do polymeru probíhá mechanismem difúze, který je podmíněn tepelným pohybem segmentů makromolekuly a přítomností

volných objemů (děr) v polymeru, které vznikají a zanikají následkem tepelného pohybu těchto segmentů.

Působení chemikálií a plynů, na polymery, lze rozdělit na tyto části:

- sorpce na povrchu polymeru
- difúze do polymeru
- interakce s polymerem fyzikální nebo chemická
- difúze reakčních produktů na povrch polymeru,
- transport reakčních produktů z povrchu polymeru do okolí

Chemikálie mohou působit na polymery fyzikálně nebo chemicky, pak se zpravidla označují jako fyzikálně nebo chemicky aktivní prostředí. O odolnosti polymeru chemikáliím, rozhoduje chemické složení a struktura, nečistoty, složení prostředí a podmínky jeho působení.

Fyzikálně aktivní prostředí může způsobovat nabobtnávání polymeru a jeho přísad, případně jejich vymývání. Difunduje-li rozpouštědlo do polymeru a nezpůsobuje-li jeho nabobtnání, fyzikální vlastnosti polymeru se příliš nemění. Pokud médium polymer nabobtnává, dochází ke zvětšování objemu polymeru a ke změně jeho fyzikálních vlastností. Bobtnání polymeru v rozpouštědlech ovlivňuje i jeho nadmolekulová struktura, stupeň jeho zesíťování, přítomnost a typ plniv a hlavně teplota. Polymer s vyšším stupněm krystalinity je odolnější vůči působení rozpouštědel než polymer méně krystalický.

Chemicky aktivní prostředí vyvolává chemické reakce, které vedou k odbourávání polymerů v důsledku přetržení řetězce, síťování, změn v chemické struktuře i postranních skupin polymeru a kombinací těchto reakcí. Již malé poškození polymeru způsobuje velké změny jeho vlastností, které se projeví např. tvrdnutím nebo naopak změknutím až lepivostí. Rychlost těchto reakcí roste s teplotou. Na odolnost polymerů vůči odbourávání chemikálií, má vliv chemické složení, přísady, teplota a mechanické namáhání. [20]

1.5 Dielektrické vlastnosti materiálů

1.5.1 Dielektrická polarizace

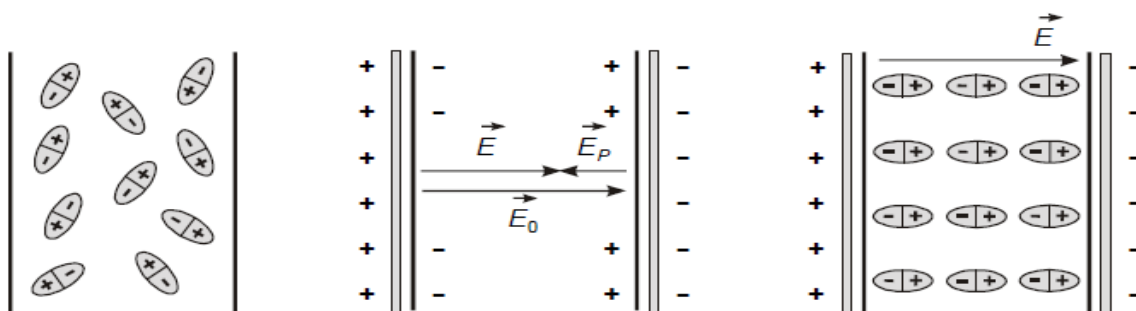
Polarizace dielektrika je děj, který nastává, vložíme-li dielektrikum do elektrostatického pole.

Rozlišují se dva druhy dielektrik

- polární dielektrika
- nepolární dielektrika

Polární dielektrika

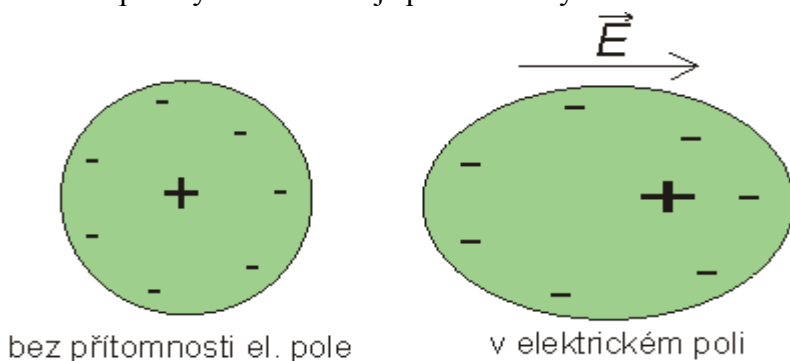
Polární dielektrika mají molekuly náboje rozloženy tak, že jako celek vykazují vlastnosti elektrického dipólu a mají vlastní elektrický dipólový moment. Není-li polární dielektrikum v elektrostatickém poli, jsou vektory těchto dipólových momentů nahodile orientovány. Po vložení polárního dielektrika do vnějšího elektrostatického pole se jeho molekuly budou stáčet vlivem rotačního účinku sil pole tak, aby se směr vektorů jejich dipólového momentu shodoval se směrem intenzity vnějšího elektrostatického pole. [18]



Obr. 8: Polarizace polárního dielektrika [21]

Nepolární dielektrika

U nepolárních dielektrik nemají atomy nebo molekuly vlastní elektrické dipólové momenty. Po vložení nepolárních dielektrik do vnějšího elektrostatického pole probíhá jejich polarizace odlišným mechanismem. Síly vnějšího pole způsobí prostorové přerozdělení kladného a záporného náboje tak, že atomy nebo molekuly ve vnějším poli získají elektrický dipólový moment. Vznik dipólu je vlastně posunutí těžiště kladného náboje ve směru a těžiště záporného náboje proti směru vektoru intenzity vnějšího elektrostatického pole. Směr těchto dipólových momentů je proto shodný se směrem vektoru intenzity tohoto pole. [18]



Obr. 9: Molekula nepolárního dielektrika bez el. pole a její polarizace [22]

Polarizační mechanismy

V dielektrických látkách se často vyskytuje současně několik druhů polarizací. Celkový průběh polarizace je dán součtem jednotlivých jevů.

Klasifikace polarizačních mechanismů

A. Polarizace rychlé (pružné)

- 1 Polarizace elektronová
- 2 Polarizace iontová (pružná)

B. Polarizace pomalé (relaxační)

- 1 Polarizace dipólová
- 2 Polarizace iontová-relaxační

C. Polarizace zvláštní

- 1 Polarizace mezivrstvová (migrační)
- 2 Polarizace samovolná (spontánní) polarizace pomalé
- 3 Polarizace trvalá (permanentní)
- 4 Polarizace rezonanční polarizace rychlá [2]

Elektronová polarizace

Pokud na atom nepůsobí elektrické pole, je těžiště kladného i záporného náboje v jednom místě. Když ale vložíme dielektrikum do elektrického pole, budou na kladný a záporný náboj působit síly opačného směru. Díky volnosti elektronů dojde k posunutí vůči jádru – posune se těžiště záporného náboje. Díky tomuto posunutí vzniká indukovaný dipólový moment. Protože tento polarizační děj probíhá v atomu, je elektronová polarizace tepelně nezávislá – nedochází ke ztrátě energie. K elektronové polarizaci dochází vždy, u všech látek a ve všech skupenstvích. [5]

Iontová polarizace

U struktur dielektrika, které jsou tvořeny iontovými krystaly, se vyskytují permanentní dipólové momenty. Na rozdíl od elektronové polarizace existují dipólové momenty i bez přítomnosti vnějšího elektrického pole.

Po přiložení vnějšího elektrického pole dojde k pružnému posunutí iontů. Iontová polarizace se nevyskytuje pouze u látek s čistě iontovou vazbou, ale i u látek s přechodnou

vazbou mezi vazbami iontovou a kovalentní – atomová polarizace. Stejně tak jako elektronová je iontová bezetrátová. [5]

Dipólová relaxační polarizace

Tento druh polarizace se vyskytuje v polárních látkách, jejichž dipólové momenty jsou vázány tak slabě, že se vlivem elektrického pole mohou snadno natáčet do směru odpovídajícího směru elektrického pole. Někdy se označuje jako tepelná orientační polarizace nebo Debeyova polarizace. Tato polarizace je silně teplotně závislá a ztrátová, protože proti natáčení působí tepelný pohyb částic. [5]

Iontová relaxační polarizace

Vyskytuje se v látkách složených z iontů nebo u látek obsahujících takové skupiny molekul nebo atomů, které jsou slabě vázány k sousedním stavebním látkám – amorfnní látky (například anorganická skla). Podstatnou vlastností je zde netěsnost vazeb. Iontová relaxační polarizace je frekvenčně závislá a také velmi silně závislá na teplotě. Polarizace s rostoucí teplotou klesá. [5]

Migrační polarizace

Když se polarizačních jevů zúčastňují nejen vázané nosiče náboje, ale i volné nosiče elektrického náboje, jedná se o migrační polarizaci, nebo o polarizaci vznikající prostorovým nábojem. Aby k migrační polarizaci mohlo dojít, musí v látce existovat makroskopické nehomogenity a volné nosiče náboje. Na nich dochází k zachycování migrujících volných nosičů. Přeskupením tedy vzniká jiná prostorová hustota elektrického náboje, která se navenek jeví jako polarizace. V porovnání s jinými druhy jsou migrační polarizace nejpomalejší a dochází při nich ke ztrátám energie. [5]

Spontánním polarizace

Vyskytuje se u látek s doménovou strukturou. Domény jsou oblasti, které jsou polarizovány bez působení vnějšího elektrického pole. V klidu se náboje domén vzájemně kompenzují a látka se jeví jako nepolarizovaná. Při působení vnějšího pole se domény uspořádají tak, že látka je polarizovaná. Látky u nichž se vyskytuje spontánní polarizace se nazývají pyroelektrika, z nichž nejvýznamější jsou feroelektrika. Jejich spontánní polarizace závisí na jejich teplotě a intenzitě pole. Závislost polarizace na intenzitě pole probíhá po hysterezní smyčce. Je to polarizace ztrátová. [5]

1.5.2 Relativní permitivita

Permitivita dielektrika charakterizuje vliv elektrického pole na elektrický stav dielektrika. Vztah pro absolutní relativitu je:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \quad (2)$$

ε_0 permitivita vakua $8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$
 ε_r relativní permitivita

Poměrná permitivita ε_r charakterizuje vlastnosti izolantu a je měřítkem jeho polarizace. Velikost poměrné permitivity závisí na druhu polarizace, na vnitřní stavbě dielektrika a na polarizovatelnosti atomů a molekul. Může se měnit v závislosti na teplotě, kmitočtu a na intenzitě elektrického pole. [10]

Ze vztahu pro kapacitu kondenzátoru je poměrná permitivita izolantu stanovena:

$$\varepsilon_r = \frac{C}{C_0} \quad (3)$$

C kapacita kondenzátoru s dielektrikem s permitivitou ε_r
 C_0 kapacita kondenzátoru s vakuem

Mimo zmíněných tří druhů permitivity se vyskytuje také statická, komplexní a optická. Velkou relativní permitivitu mají feroelektrické látky – titaničitan barnatý. Permitivita těchto látek závisí na teplotě a na intenzitě elektrického pole. Nejvyšší hodnoty relativní permitivity mají polovodivé keramické látky zpracované zvláštní technologií. [10]

1.5.3 Ztrátový činitel

Na rozdíl od ideálního dielektrika vykazuje reálné nenulovou elektrickou vodivost, obsahuje nečistoty, příměsi a vlhkost. Po přiložení elektrického pole pak vznikají nestacionární pochody uvnitř dielektrika, které vedou ke ztrátám energie. Ztráty představují celkovou energii, která se v dielektriku rozptýlí při vložení do elektrického pole, za časovou jednotku.

Ztráty se vyskytují při působení stejnosměrného i střídavého pole, jsou provázeny ohřevem dielektrika a jsou příčinou změny fázového úhlu mezi napětím a proudem. [10]

Z hlediska fyzikální podstaty se rozlišují:

- vodivostní ztráty

- polarizační ztráty
- ionizační ztráty

Celkové ztráty dielektrik jsou součtem všech druhů ztrát.

Vodivostní ztráty

Vyskytují se u všech druhů dielektrik. Příčinou je vnitřní a povrchová vodivost dielektrika – srážky volných nosičů nábojů s kmitajícími částicemi, které tvoří strukturu látky. Vznikají při stejnosměrném i střídavém napětí a jejich důsledkem je přeměna energie elektrického pole v Joulovo teplo. [5]

Polarizační ztráty

Jsou podmíněny polarizačními pochody v dielektriku. Velikost těchto ztrát a jejich teplotní a kmitočtové závislosti vycházejí z druhu vyskytujících se polarizací. U elektronové a iontové polarizace jsou ztráty zanedbatelné. Naopak velkými ztrátami, značně závislými na teplotě a na kmitočtu, je provázena polarizace dipólová a iontová relaxační. Zvláštní druh ztrát (značných) představují ztráty feroelektrik, charakterizovaných vnitřní doménovou strukturou. Ke ztrátám polarizací patří také rezonanční ztráty, které se v dielektriku vyskytují až při kmitočtech odpovídajících kmitočtu světelného spektra. [5]

Ionizační ztráty

Vyskytují se u plynů, a dále u tuhých i kapalných dielektrik, které obsahují plynové vměstky. Podmínkou vzniku ztrát je překročení prahu ionizace daného plynu.

Veličiny vyjadřující velikost dielektrických ztrát:

- ztrátový úhel (δ)
- ztrátový činitel ($\tan \delta$)
- ztrátové číslo ($\epsilon'' = \epsilon' \cdot \tan \delta$)
- měrné dielektrické ztráty (ztrátový výkon P /jednotkový objem látky)

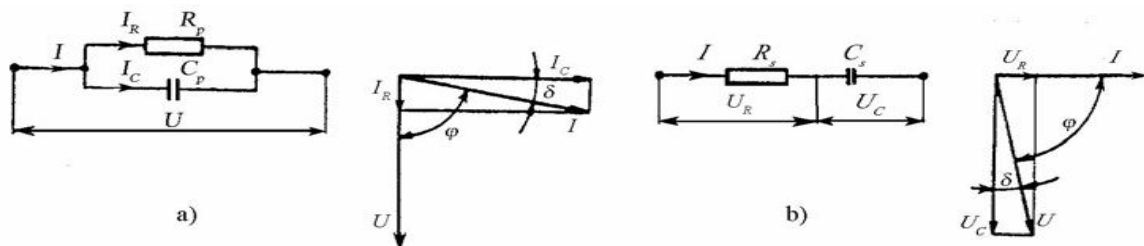
Ztrátový činitel

Činitele ovlivňující velikost ztrátového činitele

- teplota – u všech dielektrik
- kmitočet elektrického pole – u všech dielektrik
- intenzita elektrického pole – u feroelektrik a v případě ionizačních ztrát

Ztrátové dielektrikum nahrazujeme při výpočtu ztrátového výkonu P_z nebo $\tan \delta$ zapojením bezztrátových prvků a prvků charakterizujících ztráty. Na volbě náhrady nezáleží,

pouze je nutné, aby činný výkon a fázový úhel ztrátové soustavy byl ekvivalentní ztrátovému výkonu a fázovému úhlu ztrátového dielektrika.



Obr. 10: a) Paralelní, b) Sériový náhradní obvod kondenzátoru se ztrátovým dielektrikem [3]

1.5.4 Elektrická pevnost

Elektrická pevnost je charakteristickým parametrem elektroizolačních materiálů. Elektrická pevnost je definována jako průrazné napětí U_p vztažené na tloušťku izolantu d . Jedná se o intenzitu elektrického pole. Místo základní jednotky $V \cdot m^{-1}$ se častěji používají $kV \cdot mm^{-1}$, protože základní jednotka je příliš malá a hodnoty elektrické pevnosti by byly velmi velká čísla.

$$E_p = \frac{U_p}{d} \quad (11)$$

U_p Průrazné napětí
 d Tloušťka izolantu

Elektrický průraz vzniká nárazovou ionizací atomů izolantů. Tepelný průraz může nastat u pevných izolantů s velkým činitelem ztrát. Takový izolant se v elektrickém poli nadměrně zahřívá, neboť vzniklé teplo nestačí odvádět svým povrchem do okolí. Tepelný průraz, na rozdíl od průrazu elektrického, probíhá pomalu. [10]

1.6 Norma ČSN EN 61215

Fotovoltaické moduly z krystalického křemíku pro pozemní použití – posouzení způsobilosti konstrukce a schválení typu

Tato norma posuzuje požadavky způsobilosti konstrukce pozemních fotovoltaických modulů vhodných pro dlouhodobý provoz v mírných klimatických podmínkách a pouze pro moduly vyrobené na bázi krystalického křemíku. Neplatí pro moduly používané s koncentrátory.

Zkouškou se zjišťují elektrické, tepelné a mechanické vlastnosti modulu a schopnost modulu vydržet prodlouženou expozici v mírném klimatu.

Výběr a značení

Pro testování se vybere náhodně osm modulů z každé výrobní dávky. Moduly musí být podrobeny obvyklé výstupní výrobní kontrole.

Každý modul musí být označen takto:

- Název, zkratku nebo znak výrobce
- Číslo typu nebo modulu
- Sériové číslo
- Maximální napětí systému
- Polaritu vývodů
- Místo a datum výroby

1.6.1 Zkoušení a kritéria přijetí

Modul je vyhovující a získá typové schválení IEC, pokud všechny zkušební vzorky splní tato kritéria:

- Pokles maximálního výstupního výkonu při normalizovaných podmínkách nepřekročil předepsanou mez, tj. 8 % po každém sledu zkoušek
- Žádný ze vzorku nevykázal poruchu obvodu nebo uzemnění
- Není viditelná žádná pozorovatelná vada
- Jsou splněny požadavky izolace
- splnění individuálních specifických požadavků

Konstrukce se pokládá za nevyhovující, když dva nebo více z modulů nevyhoví těmto kritériím.

Po dokončení všech zkoušek se musí vyhotovit protokol o zkouškách. Protokol musí obsahovat naměřené provozní charakteristiky a podrobnosti o všech poruchách a opakovaných zkouškách. [13]

1.6.2 Zkušební postupy

1. Vizuální kontrola

Provádí se za účelem odhalení viditelných závad. Provádí se při osvětlení 1000 lux. Sleduje se výskyt defektů (praskliny, vadná spojení, vadné vývody).

2. Maximální výkon při normalizovaných zkušebních podmínkách

Měří se voltampérová charakteristika při okolní teplotě $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ a při intenzitě záření $1000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Pro osvětlení se používá přirozeného slunečního světla nebo simulátor třídy A.

3. Zkouška izolace

Provádí se při běžné teplotě okolní a při relativní vlhkosti vzduchu do 75 %. Výstupní svorky se zkratují a připojí se na kladný vývod stejnosměrného zdroje a neizolované kovové části modulu se připojí k zápornému pólu. Zkouška se provádí stejnosměrným napětím 1000V po dobu 1 minuty. Nesmí dojít k dielektrickému průrazu. Poté se připojí napětí 500V a měří izolační odpor.

4. Měření teplotních součinitelů

Testovaný modul se umístí do teplotní komory. Na modul dopadá záření z impulsního slunečního simulátoru. Komora se ohřeje na 85°C a nechá se chladnout. Změří se proud nakrátko I_{sc} a napětí naprázdno U_{oc} . Hodnoty I_{sc} a U_{oc} se vynesou do grafu jako závislost na teplotě. Z těchto závislostí se určí teplotní součinitel proudu (α) a teplotní součinitel napětí (β).

5. Měření jmenovité provozní teploty článku

Jmenovitá provozní teplota je definována jako střední teplota PN přechodu solárního článku v modulu upevněném na otevřené konstrukci v normalizovaném prostředí. Jmenovitá provozní teplota článku určuje, při jaké teplotě bude pracovat modul v terénu. Pro měření se používají dvě metody: primární metoda a metoda referenční desky.

6. Výkon při jmenovité provozní teplotě článku

Určuje se jmenovitý výkon modulu při provozní teplotě a s přirozeným slunečním světlem nebo slunečním simulátorem.

7. Výkon při nízké intenzitě ozařování

Měří se voltampérová charakteristika modulu při teplotě 25°C a intenzitě ozařování $200\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

8. Zkouška vystavení vnějším vlivům

Zkouška simuluje dlouhodobé vystavení modulu slunečnímu světlu a povětrnostním vlivům. Vzhledem ke krátkosti zkoušky, jsou výsledky považovány pouze za orientační. Slouží také jako identifikace možných vzniklých problémů.

9. Zkouška odolnosti proti místnímu přehřátí

Testuje schopnost modulu odolávat vlivům lokálního přehřátí, které vzniká prasklými, zastíněnými, znečištěnými nebo nesprávně zapojenými články v modulu.

10. Zkoušky tepelnými cykly

Moduly jsou umístěny do klimatické komory. Rozsah teplot je -40°C až $+85^{\circ}\text{C}$ a vzduch v komoře cirkuluje rychlostí nejméně 2m.s^{-1} . Změny teplot nesmí překročit $100^{\circ}\text{C.h}^{-1}$. Každá z mezních hodnot působí minimálně 10 minut. Celý cyklus nesmí trvat déle než 6 hodin. Tato zkouška určí schopnost modulu odolávat vlivům tepelné nerovnováhy, únavy a jiných druhů namáhání zapříčiněných opakovanými změnami teploty.

11. Zkouška mrznoucí vlhkostí

Testuje se schopnost modulu odolat působení teploty v kombinaci s vlhkostí. Provádí se 10 testovacích cyklů. Jeden cyklus trvá 24 hodin. Proveďte se 20 hodinový testů s teplotou 85°C a půlhodinový interval s teplotou -40°C .

12. Zkoušky vlhkým teplem

Testuje se schopnost modulu odolávat vlivům dlouhodobého pronikání vlhkosti. Zkouška je podobná jako mrznoucí vlhkostí. Zde se ale teplota ani vlhkost nemění. Probíhá při teplotě 85°C a vlhkosti 85 %. Po dobu minimálně 200 hodin.

13. Zkouška pevnosti vývodů

Testují se schopnosti všech vývodů odolat běžným namáháním, k jakému dochází při montáži a manipulaci.

14. Zkouška mechanickým zatížením

Zkouška simuluje statické zatížení sněhem, ledem a odolnost modulu proti nárazovému větru. Modul se připevní na nosnou konstrukci pouze v rozích tak, aby vzdálenost mezi body připevnění byla co největší. Zatěžování se provádí tlakem nebo přiložením vodou naplněného vaku pokrývajícího celý povrch po dobu 1 hodiny. Tlak je 2400 Pa což odpovídá rychlosti větru 130 km.h^{-1} nebo tlaku až 5400 Pa .

15. Zkouška krupobitím

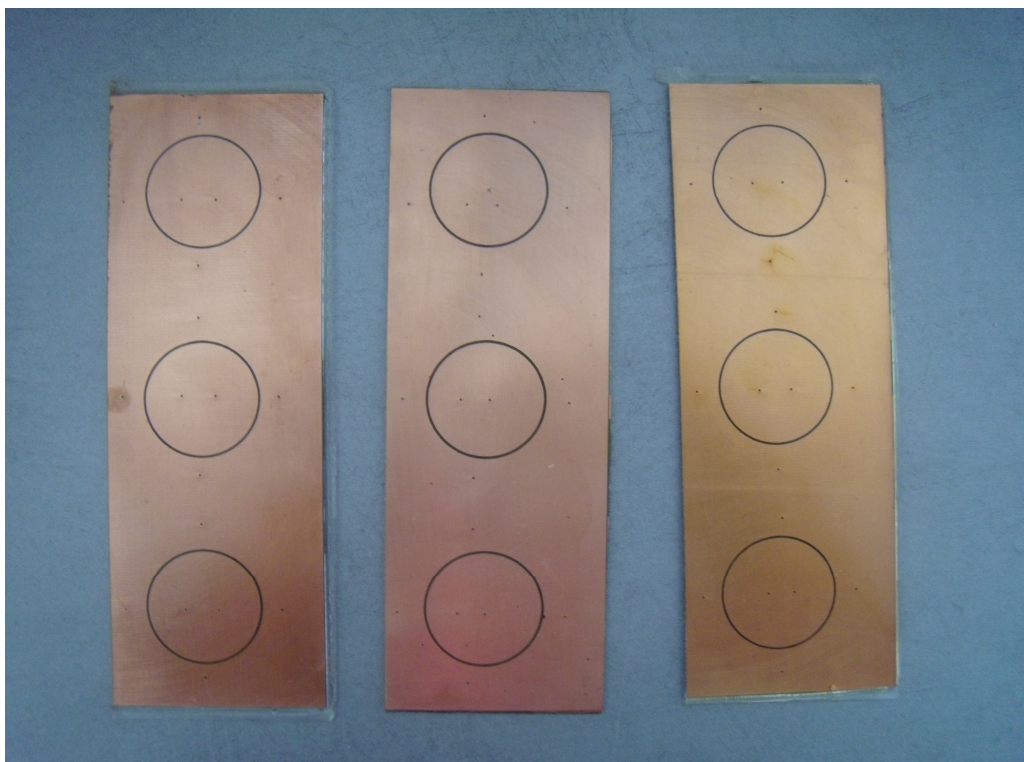
Používají se ledové koule o průměru $12,5\text{mm}$ až 75mm , které jsou vrhány proti fotovoltaickému panelu, rychlostmi od 16m.s^{-1} do 40 m.s^{-1} . Koule jsou vrhány na přesně určená místa na panelu a po každém dopadu se dané místo podrobí vizuální kontrole. [13]

2 Experimentální část

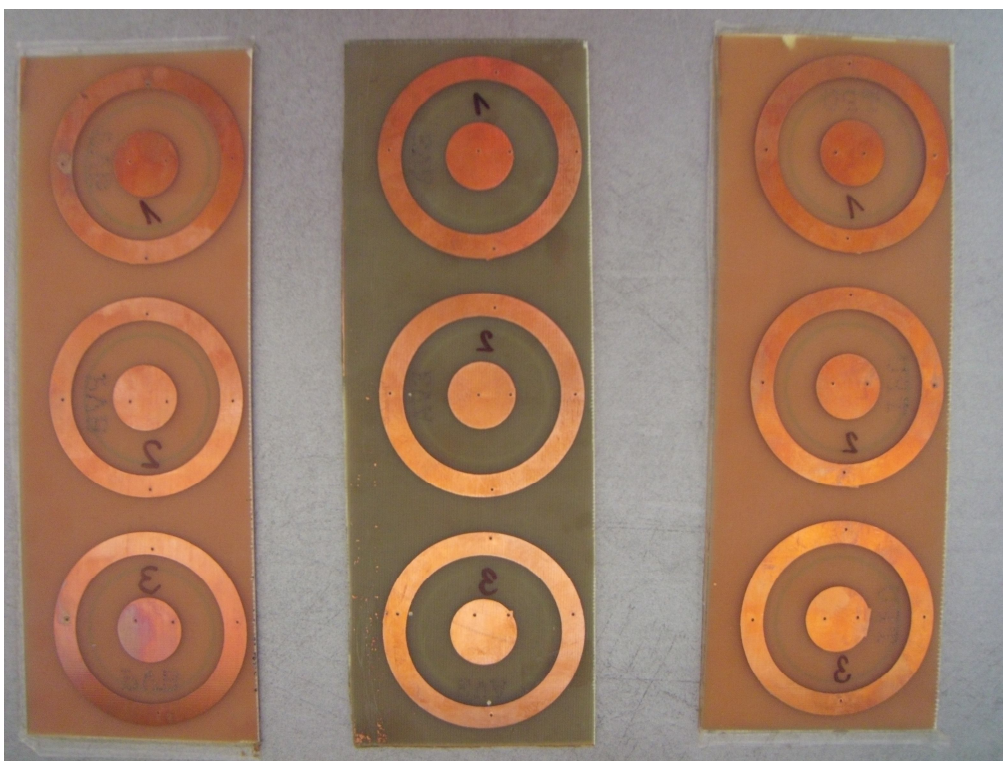
Experimentální část mé bakalářské práce popisuje výrobu vzorků, popis zařízení pro zrychlené stárnutí a naměřené hodnoty. Stárnutí materiálu probíhalo vlivem tepla a UV zářením.

2.1 Vzorky

Jako nosná konstrukce materiálů pro měření byly vyrobeny měřicí elektrody. Byly vytvořeny 3 moduly, které obsahovaly 6 elektrod. Na každý modul byl nalaminován jiný materiál. Jako laminát byl použit termoplastický polyuretan (TPU), polyvinylbutyral (PVB) a etylenvinylacetát (EVA). Laminace vzorků byla provedena ve firmě Solartec s.r.o. v Rožnově pod Radhoštěm. Tyto moduly byly ještě rozřezány na dva vzorky po 3 elektrodách (Obr. 11, Obr. 12), aby bylo možné všechny materiály vystavit stárnutí vlivem tepla a UV záření.



Obr. 11: Přední strana elektrod



Obr. 12: Zadní strana elektrod

2.2 Stárnutí vlivem tepla

Stárnutí první poloviny vzorků probíhalo v peci značky Chirana STE31 (Obr. 13). Jedná se o velmi starý typ pece, proto bylo nutné ověřit stupnici pece, protože regulace pece je připevněna pouze jedním šroubem a byla pootočená vůči stupnici. Jako degradační činitel byla zvolena teplota 80 °C. Tato pec má ale značnou hysterezi. Teplota se tedy pohybovala od 70 do 85 °C. Vkládání vzorků probíhalo nejdříve 30 minut po zapnutí, protože ihned po zapnutí byla hystereze ještě větší (teplota se dostávala až na 95 °C).

Cykly stárnutí byly zvoleny jako části či násobky dne. Vzorky postupně podstoupily tyto teplotní cykly: 8, 16, 24, 24, 48, 96 a 96 h. Celková délka cyklu byla 312 hodin. Měření vzorku bylo možno provádět až po pozvolném vychladnutí a ustálení vlhkosti vzorků (cca po 8 hodinách).



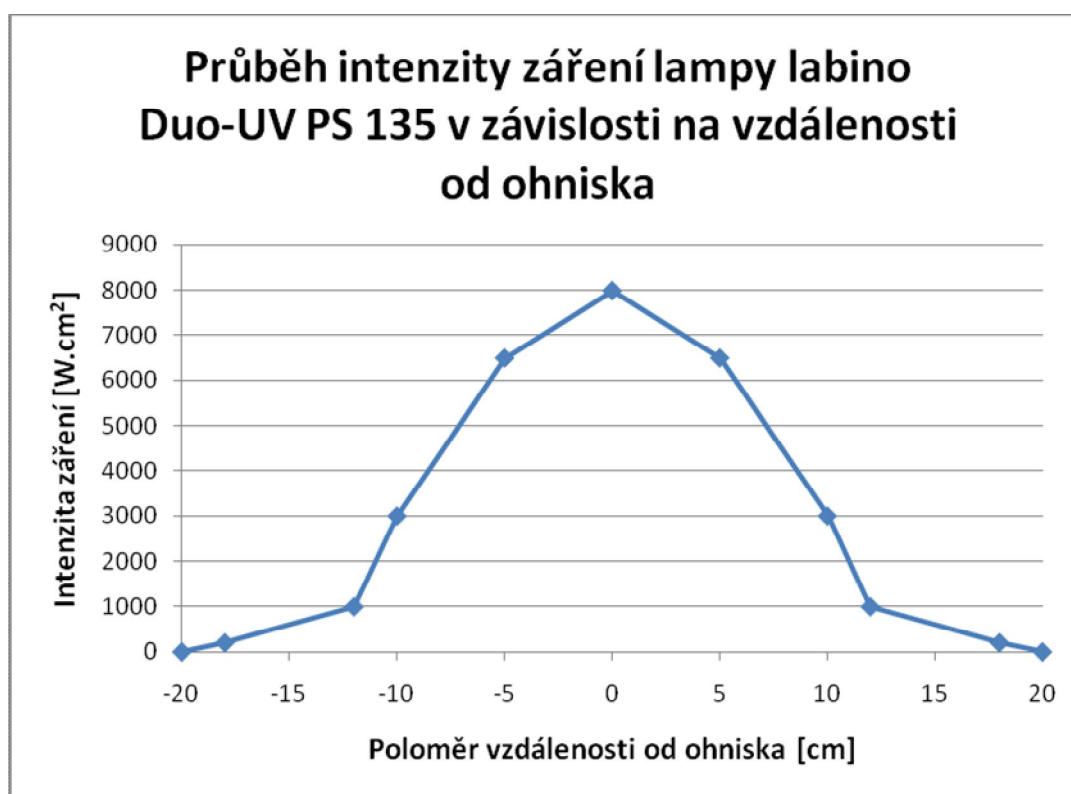
Obr. 13: Pec Chirana STE31

2.3 Stárnutí vlivem UV záření

Druhým činitelem stárnutí bylo zvoleno UV záření, které podstoupila druhá polovina vzorků. Zdrojem UV záření byla lampa od firmy Labino Duo-UV PS 135 (Obr. 14). Je to dvoudílný lampa skládající se ze samotné lampy a předřadníku, který složí jako elektrický zdroj. Do lampy je možno použít různé paraboly, které se liší velikostí ozařované plochy a intenzitou záření. (floodlight, midlight a spotlight). Pro můj experiment byla použita parabola midlight. Průběh intenzity na vyzařované ploše je uveden na obrázku (Obr. 15). Lampa se rozsvítí na plnou intenzitu nejdéle po 15 sekundách. Vzorky tedy mohly být ozařovány ihned po zapnutí. Délky cyklů stárnutí byly stejné jako u tepla, aby bylo možno porovnat vliv obou činitelů.



Obr. 14: Lampa Labino Duo-UV PS 135



Obr. 15: Průběh intenzity záření lampy Labino Duo-UV PS 135 v závislosti na vzdálenosti od ohniska

Zdroj: <http://www.labino.com/products-uv.html>

2.4 Měření vlastností

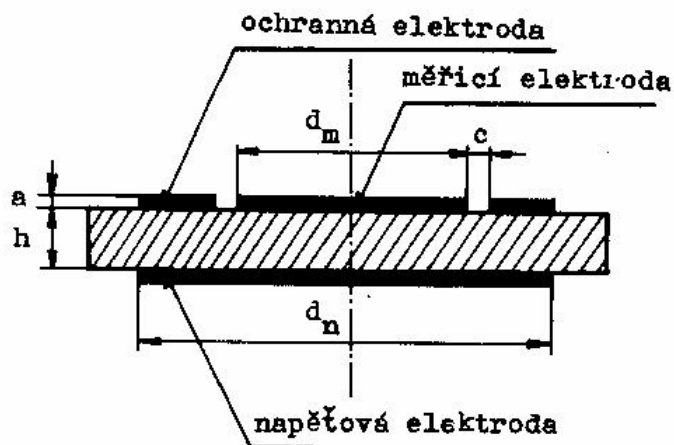
Vyhodnocování změn v průběhu stárnutí bylo prováděno pomocí měření relativní permitivity a ztrátového činitele. Měření probíhalo na přístroji **LCR metr HP Agilent 4284A** (Obr. 16). [15]

Tento přístroj měří frekvenční závislosti v rozsahu 20 Hz až 1 MHz. Data jsou přenášeny do PC prostřednictvím USB portu a obslužného software a jsou zaznamenány do přímo do tabulek v Microsoft Excel.



Obr. 16: Pracoviště měření vzorků s přístrojem HP Agilent 4284A

Vzorky byly měřeny připojením na tříelektrodový systém. Skládá se z dolní elektroda, která je napěťová, horní střední elektroda, která slouží jako měřicí a horní prstenec tvoří ochrannou elektrodu. Ta slouží k zamezení vnějších vlivů a parazitních kapacit (Obr. 17).



Obr. 17: Tříelektrodový rovinný systém [11]

2.5 Vyhodnocení výsledků

Přístroj změřil frekvenční závislost kapacity vzorku C_x a ztrátového činitele $\text{tg}\delta$. Každý vzorek byl pro větší přesnost měřen 5 krát a hodnoty byly zprůměrovány. Z hodnoty kapacity vzorku a z rozměrů vzorku byla vypočítána relativní permitivita:

$$\varepsilon_r = \frac{C_x}{C_0} \quad (5)$$

C_x naměřená hodnota kapacity

C_0 geometrická kapacita

$$C_0 = \varepsilon_0 \cdot \frac{S_{ef}}{h} \quad (6)$$

ε_0 $8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$, permitivita vakua

h tloušťka vzorku

S_{ef} efektivní plocha měřicí elektrody

$$S_{ef} = \pi \cdot \frac{(d_m + c)^2}{4} \quad (7)$$

d_m průměr měřicí elektrody

c šířka mezery mezi měřicí a ochrannou elektrodou

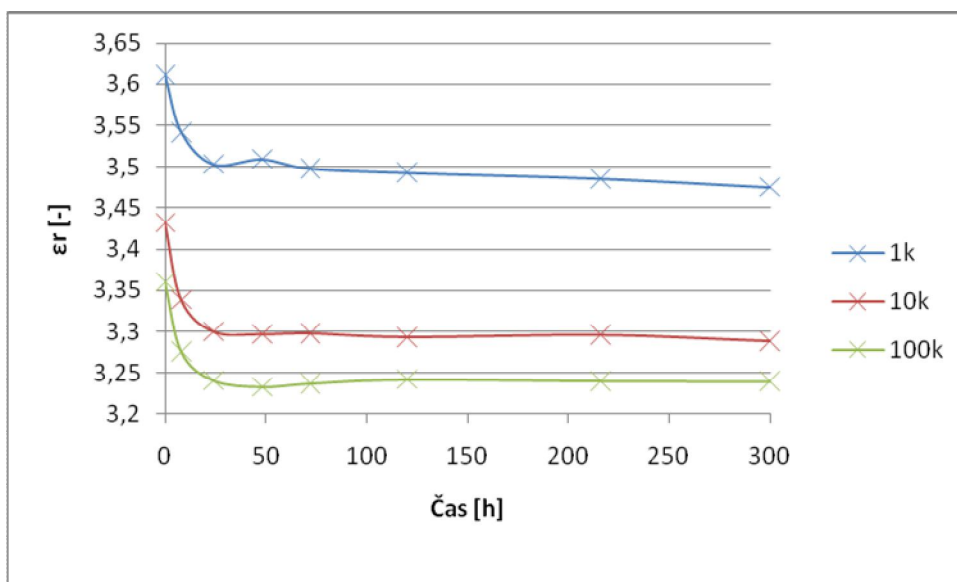
Z vypočtených hodnot relativní permitivity a z naměřených hodnot ztrátového činitele $\tan\delta$ byly vybrány hodnoty pro frekvenci 1k, 10 k a 100 kHz a z nich vytvořeny grafické závislosti těchto hodnot na čase stárnutí.

2.6 Naměřené hodnoty

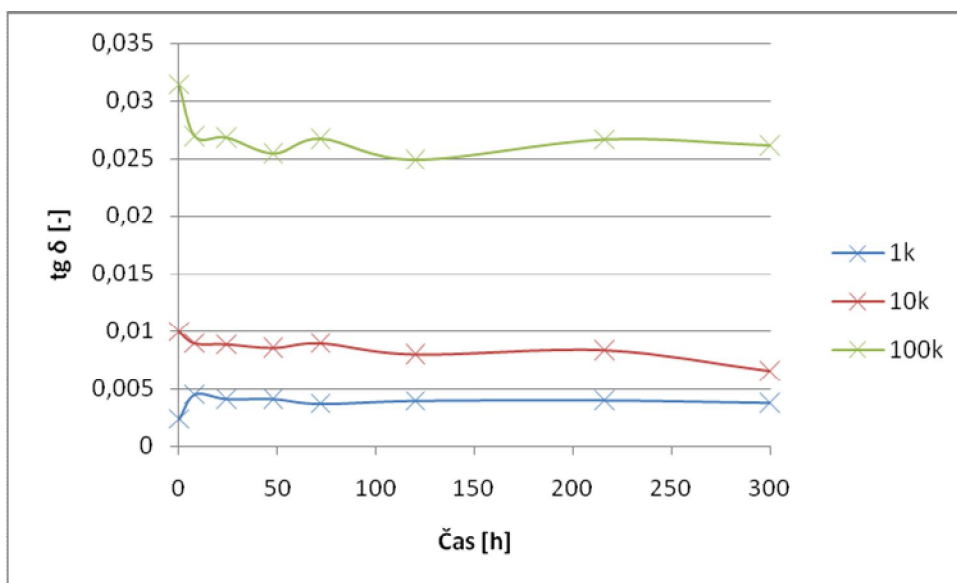
Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulkách v příloze A (teplo) a v příloze B (UV). Z těchto hodnot jsou vytvořeny grafické závislosti.

2.6.1 Stárnutí teplem

EVA

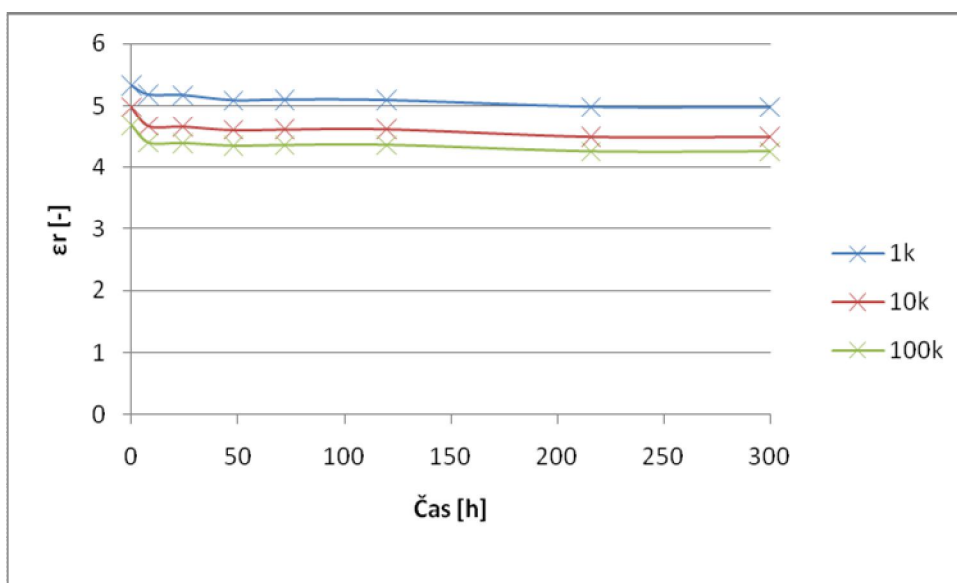


Obr. 18: Závislost relativní permitivity na době zrychleného stárnutí teplem materiálu EVA

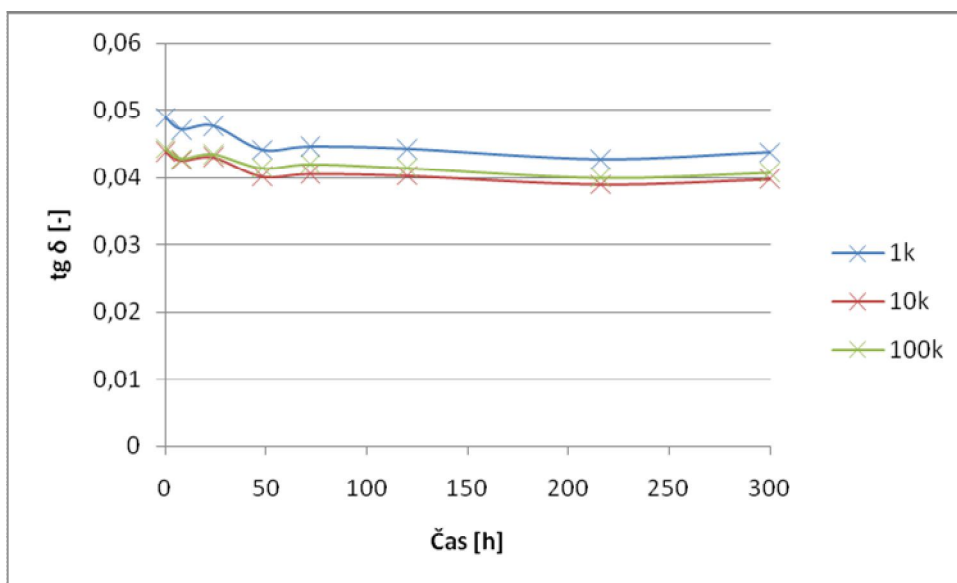


Obr. 19: Závislost ztrátového činitele na době zrychleného stárnutí teplem materiálu EVA

PVB

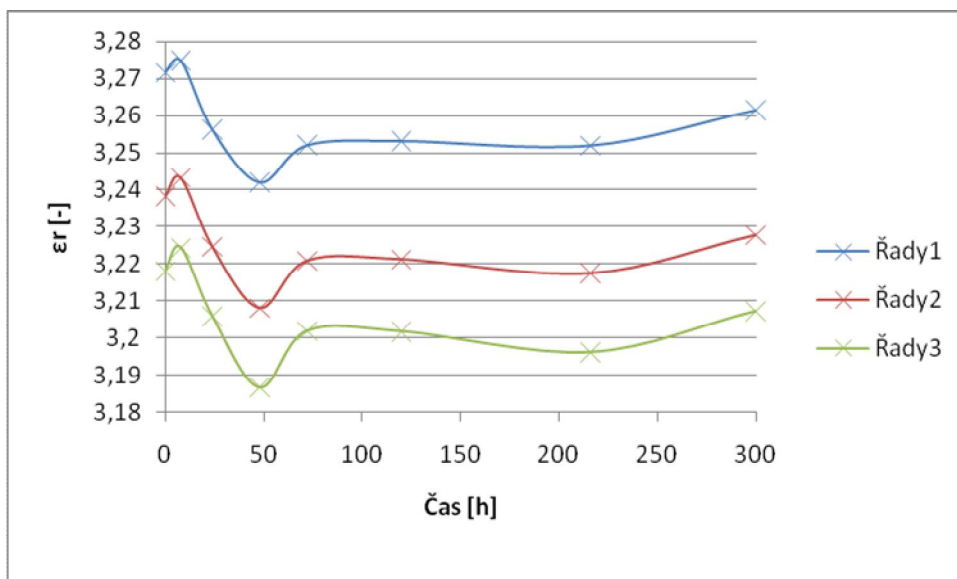


Obr. 20: Závislost relativní permitivity na době zrychleného stárnutí teplem materiálu PVB

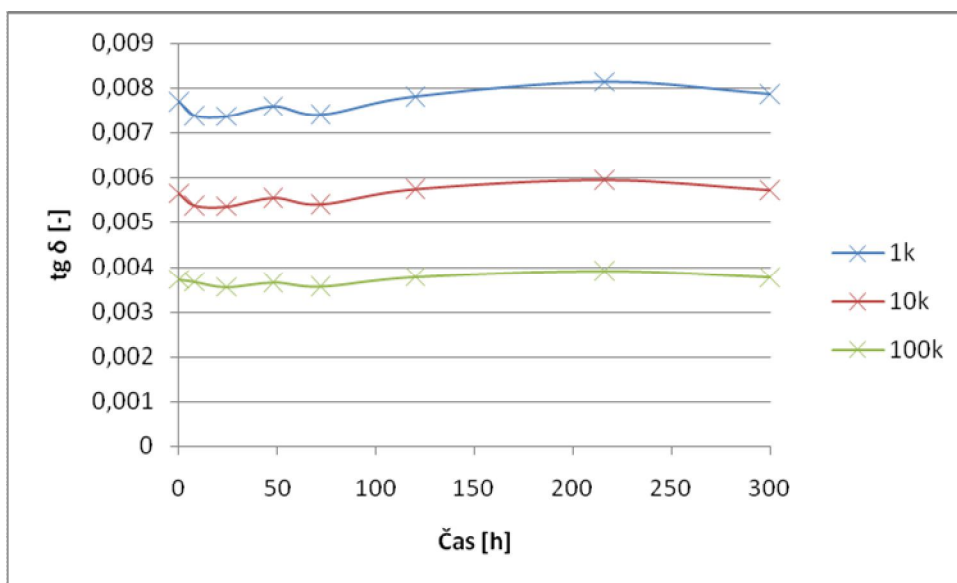


Obr. 21: Závislost ztrátového činitele na době zrychleného stárnutí teplem materiálu PVB

TPU



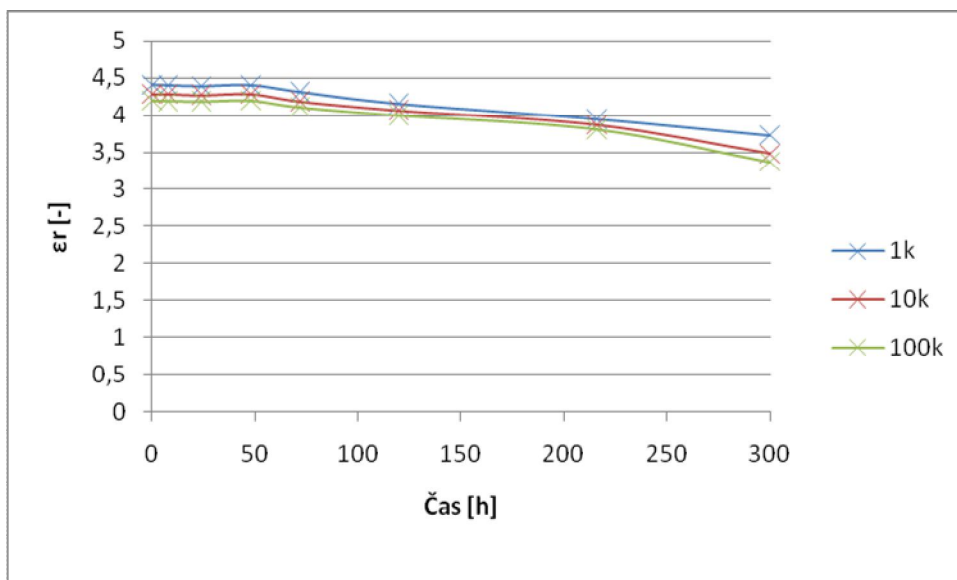
Obr. 22: Závislost relativní permitivity na době zrychleného stárnutí teplem materiálu TPU



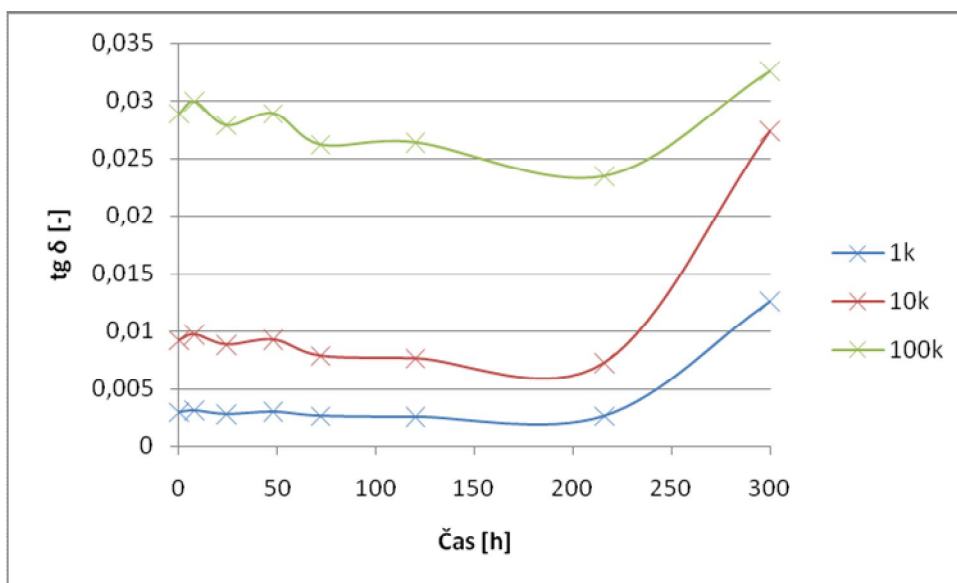
Obr. 23: Závislost ztrátového činitele na době zrychleného stárnutí teplem materiálu TPU

2.6.2 Stárnutí UV zářením

EVA

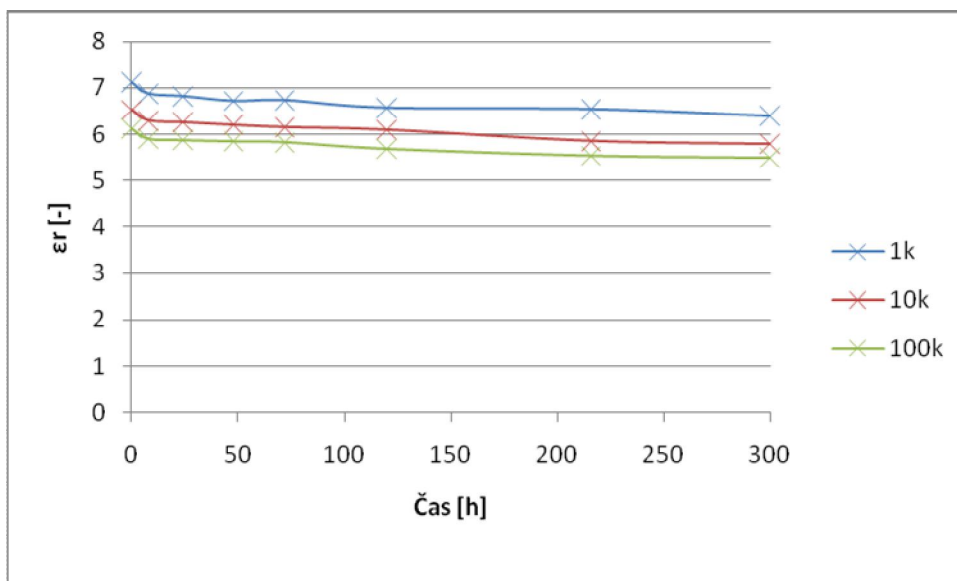


Obr. 24: Závislost relativní permitivity na době zrychleného stárnutí UV zářením materiálu EVA

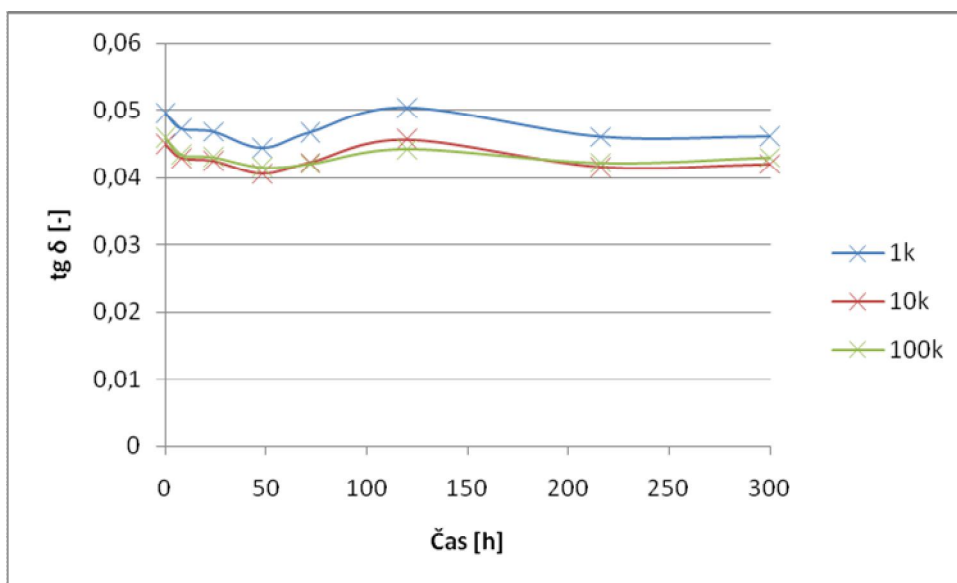


Obr. 25: Závislost ztrátového činitele na době zrychleného stárnutí UV zářením materiálu EVA

PVB

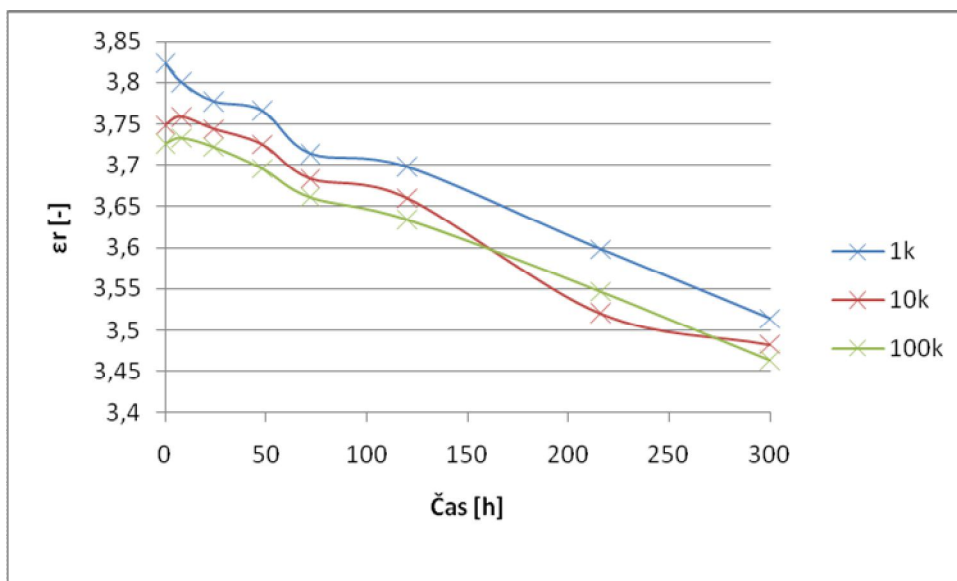


Obr. 26: Závislost relativní permitivity na době zrychleného stárnutí UV zářením materiálu PVB

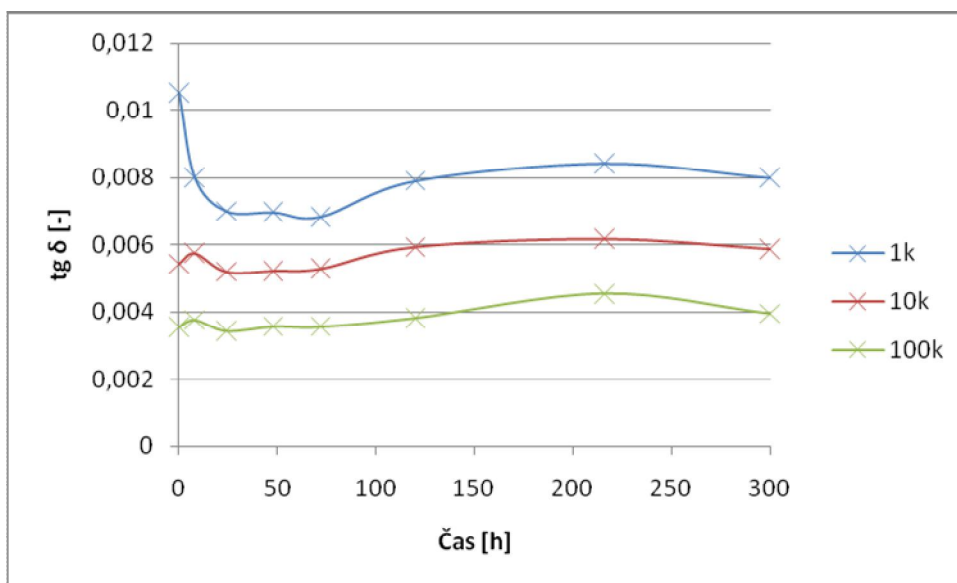


Obr. 27: Závislost ztrátového činitele na době zrychleného stárnutí UV zářením materiálu PVB

TPU



Obr. 28: Závislost relativní permitivity na době zrychleného stárnutí UV zářením materiálu TPU



Obr. 29: Závislost ztrátového činitele na době zrychleného stárnutí UV zářením materiálu TPU

2.7 Vliv tepla na stárnutí materiálů

Materiály byly vystaveny cyklům zrychleného stárnutí vlivem tepla. Celková doba stárnutí byla 312 hodin. Za tento čas nedošlo ani u jednoho materiálu k výraznějším změnám vlastností. U všech materiálů došlo k poklesu relativní permitivity po prvních 24 hodinách. Tento pokles nebyla ale nějak výrazný. Řádově se jedná o desetiny. U TPU dokonce došlo ke konci stárnutí k opětovnému zvýšení. Tento jev lze vysvětlit zráním materiálu, který je způsoben dotvrzením laminátu vlivem tepla. U ztrátového činitele nedošlo ani u jednoho materiálu k výraznější změně.

2.8 Vliv UV záření na stárnutí materiálů

Stejně jako u stárnutí teplem byly vzorky vystaveny stejným cyklům zrychleného stárnutí a celková doba byla 312 hodin. Nejmenší změny vlastností nastaly u materiálu PVB, kde byl pokles srovnatelný jako u stárnutí teplem. Zbylé materiály EVA a TPU se chovaly zprvu stejně, ale po 200 hodinách došlo k výraznějšímu poklesu relativní permitivity. Ztrátový činitel se zvýšil nejvíce u materiálu EVA, jak je vidět na grafických závislostech.

3 Závěr

Teoretická část předkládané práce obsahuje obecně princip fotovoltaiických článků, popis a vlastnosti používaných materiálů jak pro konstrukci, tak pro pouzdření fotovoltaiických modulů. Dále jsou zde popsány základní vlastnosti dielektrických materiálů. Poslední část teoretické části práce se zabývá normou ČSN EN 61215, která popisuje testování a posuzování způsobilosti křemíkových solárních panelů.

Experimentální část popisuje výrobu vzorků. Výběr materiálu a jejich laminaci na vyrobené vzorky provedla firma Solartec s.r.o. v Rožnově pod Radhoštěm. Zrychlené stárnutí probíhalo v jednotlivých cyklech vlivem tepla a UV zářením a podstoupili ho materiály EVA, TPU a PVB. Vyhodnocení změn bylo prováděno pomocí měření relativní permitivity a ztrátového činitele pomocí přístroje HP Agilent 4284A. Měření se vždy pro každý vzorek provedlo 5krát a pro větší přesnost se hodnoty zprůměrovaly.

Z naměřených hodnot vyplývá, že zrychlené stárnutí teplem nemá na testované materiály tak významný vliv, jako UV záření. U žádného materiálu nedošlo k větším změnám sledovaných vlastností. TPU dokonce ke konci stárnutí vykazoval větší hodnoty relativní permitivity, což může být způsobeno zráním materiálu, které bylo zapříčiněno dotvrzením laminátu vlivem tepla. U zrychleného stárnutí UV zářením je možné pozorovat podstatně větší změny především u materiálů EVA a TPU po 200 hodinách. Jejich permitivita klesla a ztrátový činitel měl stoupající tendenci. PVB nevykazoval ani v tomto případě významnější změny.

Na základně naměřených výsledků se jeví PVB jako nejvhodnější materiál pro pouzdření solárních článků. Avšak je nutné dodat, že ani u dvou ostatních testovaných materiálů jsme nezjistili žádné radikální změny. Dále na základě naměřených hodnot můžeme říci, že UV záření má na stárnutí materiálu větší vliv než teplo.

4 Seznam použitých zdrojů

Literatura

- [1] JIRÁK, J., AUTRATA, R., LIEDERMANN, K., a kolektiv, *Materiály a technická dokumentace.*, Brno: Vysoké učení technické v Brně
- [2] JIRÁK, J. A kolektiv, *Materiály a technická dokumentace – část: Materiály v elektrotechnice*, Brno: Vysoké učení technické, 2003
- [3] KAZELLE, J., *Elektrotechnické materiály a výrobní procesy*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, s 273.
- [4] MARTYNEK, A. *Degradační testy polymerních materiálů vystavených elektrickému poli.* Brno, 2008. 50 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Vaněk, Ph.D. FEKT VUT v Brně
- [5] MENTLÍK, V., *Dielektrické prvky a systémy.*, BEN, 2006
- [6] POLSTEROVÁ H., *Spolehlivost v elektrotechnice*, Brno: Vysoké učení technické, 2003
- [7] ROHEL, T. *Vliv tepelného namáhání na vnitřní a povrchový odpor polymerních materiálů.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 71 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.
- [8] ROZSÍVALOVÁ, Z., KŘIVÁK, P., VANĚK, J. *Materiály a technická dokumentace Laboratorní cvičení.*
- [9] ŘEHÁK, J, BÁRTEK, J, BAŘINKA, R. *Fotovoltaika a fotovoltaické systémy v podmínkách ČR a jejich navrhování.*
- [10] ŠAVELJ., *Elektrotechnologie.* 2.rozšířené. Praha: BEN, 2003.264 s.
- [11] VANĚK, J., KŘIVÁK, P., NOVÁK, J. *Alternativní zdroje energie.*, Brno: Vysoké učení technické v Brně
- [12] ZEMAN, L. *Vstřikování plastů.* 1. České. Praha : BEN, 2009. 248 s.
- [13] Česká státní norma ČSN EN 61215 *Posouzení způsobilosti konstrukce a schválení typu Fotovoltaické moduly z krystalického křemíku*,1997.

Internetové zdroje

- [14] ABUŠINOV, A., *Plasty se podílejí na solárním boomu.*, 2010, Dostupný z WWW:
<<http://www.mmspektrum.com/clanek/plasty-se-podileji-na-solarnim-boomu>>
- [15] AGILENT 4284A, Data sheet, Dostupný z WWW:
<http://www.valuetronics.com/vt/assets/pdfs/HP_4284A.PDF>.
- [16] ALDEBARAN GROUP FOR ASTROPHYSICS., *Organické polymery jako zdroj energie.*, 2007, Dostupný z WWW:
<http://www.aldebaran.cz/bulletin/2007_30_org.php>
- [17] HAVRÁNEK, M., *Organické polymery jako zdroj energie.*, 2007, Dostupný z WWW:
http://aldebaran.cz/bulletin/2007_30_org.php
- [18] HOFMAN, J., *Polarizace dielektrika.*, 2005, Dostupný z WWW:
< http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_ekniha-001/pdf/227.pdf>
- [19] HOJCSKOVÁ, P., *Fotoelektrický jev.*, 2009, Dostupný z WWW:
<<http://pet-spect.fbmi.cvut.cz/spect/index.php/fyzikalni-zakony/interakce-fotonu-s-hmotou/fotoelektricky-jev>>
- [20] KUČEROVÁ, J., *Faktory způsobující degradaci polymerů.*, 2007, Dostupný z WWW:
<http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/predmety/koroze_materialu_pro_restauratory/kadm/pdf/3_2.pdf>
- [21] MORAVEC, Z., *Polymery.*, 2007, Dostupný z WWW:
http://www.vyuka.z-moravec.net/download/_chemie/1-04polymery4.pdf
- [22] *Elektrostatika.*, 2007, Dostupný z WWW:
< http://www.vossost.cz/svab/elektross/el_pole/elstat.html>
- [23] *Princip fotovoltaiky.*, 2009, Dostupný z WWW:
<<http://www.energyservis.cz/cs/fotovoltaika/fotovoltaika-princip/>>

Seznam použitých zkratek a symbolů

Zkratka/ Symbol	Jednotka	Popis
EVA	-	Etylenvinylacetát
PVB	-	Polyvinylbutyral
TPU	-	Termoplastický polyuretan
PMMA	-	Polymethylmetakrylát
GaAs	-	Galium Arsenid
CdTe	-	Kadmium Telurid
CIS	-	Copper Indium Diselenide
ϵ_0	Fm ⁻¹	Permitivita vakua
ϵ_r	-	Relativní permitivita
tg δ	-	Ztrátový činitel
E_p	kV.mm-1	Elektrická pevnost
U_p	kV	Průrazné napětí
C_x	F	Naměřená hodnota kapacity
C_0	F	Geometrická kapacita
h	m	Tloušťka vzorku
S_{ef}	m ²	Efektivní plocha měřící elektrody
d_m	m	Průměr měřící elektrody
c	m	Šířka mezery mezi měřící a ochranou elektrodou

Seznam příloh

Příloha A – Zrychlené stárnutí teplem

Příloha B – Zrychlené stárnutí UV zářením