

# Obsah

|          |                                                                         |           |
|----------|-------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Chronologický pohľad na vláknovú optiku</b>                          | <b>1</b>  |
| 1.1      | Chronológia udalostí . . . . .                                          | 2         |
| 1.2      | Optické komunikácie z dnešného pohľadu . . . . .                        | 4         |
| <b>2</b> | <b>Materiálové vlastnosti optických skiel</b>                           | <b>6</b>  |
| 2.1      | Charakteristiky optických skiel . . . . .                               | 6         |
| 2.2      | Index lomu . . . . .                                                    | 6         |
| 2.2.1    | Materiálové vlastnosti skla pre výrobu optických vlákien . . . . .      | 7         |
| 2.2.2    | Disperzné rovnice . . . . .                                             | 8         |
| 2.2.3    | Vplyv dopantov na optické vlastnosti . . . . .                          | 10        |
| 2.2.4    | Konštanta tlmenia . . . . .                                             | 10        |
| 2.2.5    | Charakteristická hĺbka vniku a absorbančia . . . . .                    | 12        |
| 2.2.6    | Index lomu závislý od intenzity . . . . .                               | 13        |
| 2.2.7    | Termálne nelineárne efekty . . . . .                                    | 16        |
| 2.2.8    | Teplotná závislosť indexu lomu kremenného skla . . . . .                | 17        |
| 2.3      | Teplotná rozťažnosť kremenného skla . . . . .                           | 18        |
| <b>3</b> | <b>Optické vlákno ako vlnovod</b>                                       | <b>19</b> |
| 3.1      | Šírenie svetla z pohľadu geometrickej optiky . . . . .                  | 19        |
| 3.1.1    | Fotoelektrický jav . . . . .                                            | 19        |
| 3.1.2    | Totálny vnútorný odraz . . . . .                                        | 20        |
| 3.1.3    | Akceptačný uhol . . . . .                                               | 22        |
| 3.1.4    | Numerická apertúra . . . . .                                            | 23        |
| 3.1.5    | Šikmé lúče . . . . .                                                    | 24        |
| 3.1.6    | Módová väzba . . . . .                                                  | 26        |
| 3.2      | Teória módov v optickom vlákne . . . . .                                | 27        |
| 3.2.1    | Módy v planárnom vlnovode . . . . .                                     | 28        |
| 3.2.2    | Fázová a skupinová rýchlosť . . . . .                                   | 31        |
| 3.2.3    | Fázový posun s totálnym vnútorným odrazom a evanescentná vlna . . . . . | 32        |
| 3.2.4    | Goos–Hänchenovej posun . . . . .                                        | 36        |
| 3.2.5    | Módy v optickom vlákne . . . . .                                        | 36        |
| 3.3      | Typy optických vlákien . . . . .                                        | 42        |
| 3.3.1    | Optické vlákna so skokovou zmenou indexu lomu . . . . .                 | 42        |
| 3.3.2    | Optické vlákna s gradientným profilom indexu lomu . . . . .             | 44        |
| 3.3.3    | Jednomódové optické vlákna . . . . .                                    | 46        |
| 3.3.4    | Hraničná vlnová dĺžka optického vlákna . . . . .                        | 49        |

|          |                                                               |           |
|----------|---------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.3.5    | Priemer módobého poľa a veľkosť bodu . . . . .                | 49        |
| 3.3.6    | Efektívny index lomu . . . . .                                | 50        |
| 3.3.7    | Skupinové oneskorenie a faktor módobého oneskorenia . . . . . | 51        |
| <b>4</b> | <b>Prenosové charakteristiky optických vlákien</b>            | <b>54</b> |
| 4.1      | Tlmenie . . . . .                                             | 54        |
| 4.2      | Materiálové straty v kremenných vláknach . . . . .            | 55        |
| 4.2.1    | Absorpcia . . . . .                                           | 56        |
| 4.2.2    | Lambertov-Beerov zákon . . . . .                              | 57        |
| 4.3      | Vlastné a nevlastné absorpčné mechanizmy . . . . .            | 57        |
| 4.3.1    | Vlastné absorpčné mechanizmy . . . . .                        | 58        |
| 4.3.2    | Nevlastné absorpčné mechanizmy . . . . .                      | 59        |
| 4.4      | Lineárny a nelineárny rozptyl . . . . .                       | 61        |
| 4.4.1    | Lineárny rozptyl . . . . .                                    | 62        |
|          | Rayleighov rozptyl . . . . .                                  | 63        |
|          | Mieov rozptyl . . . . .                                       | 64        |
|          | Tyndallov rozptyl . . . . .                                   | 65        |
| 4.4.2    | Nelineárny rozptyl . . . . .                                  | 65        |
|          | Brillouinov rozptyl . . . . .                                 | 65        |
|          | Ramanov rozptyl . . . . .                                     | 66        |
| 4.5      | Ohyb vlákna . . . . .                                         | 67        |
| 4.5.1    | Straty mikroohybmi . . . . .                                  | 69        |
| 4.5.2    | Straty makroohybmi . . . . .                                  | 69        |
| 4.5.3    | Straty na makroskopických neregularitách . . . . .            | 69        |
| 4.6      | Disperzia v optických vláknach . . . . .                      | 69        |
| 4.7      | Chromatická disperzia . . . . .                               | 72        |
| 4.7.1    | Materiálová disperzia . . . . .                               | 74        |
| 4.7.2    | Vlnovodová a profilová disperzia . . . . .                    | 75        |
| 4.7.3    | Disperzne modifikované jednomódové vlákna . . . . .           | 76        |
| 4.8      | Disperzne posunuté vlákna . . . . .                           | 78        |
| 4.9      | Disperzný manažment . . . . .                                 | 81        |
| 4.10     | Módová disperzia . . . . .                                    | 85        |
| 4.10.1   | Modálny šum . . . . .                                         | 86        |
| 4.11     | Nelineárne javy v optických vláknach . . . . .                | 87        |
| 4.11.1   | Stimulovaný nelineárny rozptyl . . . . .                      | 87        |
|          | Stimulovaný Brillouinov rozptyl (SBS) . . . . .               | 88        |
|          | Stimulovaný Ramanov rozptyl (SRS) . . . . .                   | 89        |
| 4.11.2   | Kerrove nelineárne javy . . . . .                             | 90        |
|          | Vlastná fázová modulácia (SPM) . . . . .                      | 91        |
|          | Křížová fázová modulácia (XPM) . . . . .                      | 93        |
|          | Zmiešavanie štyroch vĺn (FWM) . . . . .                       | 95        |
| 4.12     | Polarizácia optického žiarenia . . . . .                      | 97        |
| 4.12.1   | Polarizácia elektromagnetickej vlny . . . . .                 | 98        |
| 4.12.2   | Klasický opis polarizácie . . . . .                           | 99        |
|          | Stokesove parametre . . . . .                                 | 101       |
| 4.13     | Jonesov formalizmus . . . . .                                 | 103       |
|          | Praktické príklady Jonesových vektorov . . . . .              | 104       |

|          |                                                                           |            |
|----------|---------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.13.1   | Jonesova matica . . . . .                                                 | 104        |
|          | Praktické príklady Jonesových matíc . . . . .                             | 105        |
|          | Poincarého guľa . . . . .                                                 | 107        |
| 4.14     | Polarizačná módobá disperzia . . . . .                                    | 107        |
| 4.14.1   | Optický dvojlom . . . . .                                                 | 108        |
|          | Tenzor permitivity a index lomu anizotropného prostredia . . . . .        | 108        |
| 4.15     | Polarizačná módobá disperzia v jednomódových optických vláknach . . . . . | 109        |
| 4.15.1   | Principiálny stav polarizácie . . . . .                                   | 111        |
| 4.15.2   | Diferenciálne skupinové oneskorenie . . . . .                             | 111        |
| 4.15.3   | Popis PMD z pohľadu PSP . . . . .                                         | 113        |
| 4.15.4   | Vplyv PMD na optický signál a jej kompenzácia . . . . .                   | 113        |
|          | Kompenzácia PMD využitím robustných modulačných formátov . . . . .        | 114        |
|          | Aktívna kompenzácia PMD . . . . .                                         | 115        |
|          | Predchádzanie (mitigácia) vplyvu PMD . . . . .                            | 115        |
| 4.16     | Meranie polarizačnej móbovej disperzie . . . . .                          | 115        |
| 4.16.1   | Interferometrické metódy merania PMD . . . . .                            | 116        |
| 4.16.2   | Zmeny PMD z praktického pohľadu . . . . .                                 | 116        |
| <b>5</b> | <b>Numerické modelovanie prenosu optického žiarenia optickým vláknom</b>  | <b>117</b> |
| 5.1      | Numerické metódy pre modelovanie optického vlákna . . . . .               | 117        |
| 5.1.1    | Nelineárna Schrödingerova rovnica . . . . .                               | 119        |
| 5.1.2    | Komplexná reprezentácia elektrického poľa . . . . .                       | 121        |
| 5.1.3    | Krokovno delená Fourierova metóda (SSFM) . . . . .                        | 125        |
| 5.2      | Disperzné vlastnosti optického vlákna . . . . .                           | 128        |
| 5.2.1    | Časové rozšírenie impulzu vyvolané disperziou . . . . .                   | 130        |
| 5.3      | Polarizačné vlastnosti optického vlákna . . . . .                         | 131        |
| 5.3.1    | Dvojlom a dĺžka taktu . . . . .                                           | 131        |
| 5.3.2    | Polarizačná módobá väzba . . . . .                                        | 133        |
| 5.4      | Zviazané móbové rovnice . . . . .                                         | 135        |
| 5.5      | Nelineárny dvojlom . . . . .                                              | 135        |
| 5.6      | Nedisperzná krížová fázová modulácia . . . . .                            | 136        |
| 5.7      | Numerický model optického vlákna . . . . .                                | 137        |
| <b>6</b> | <b>Výroba optických vlákien</b>                                           | <b>140</b> |
| 6.1      | Výroba prostredníctvom tekutej fázy . . . . .                             | 141        |
| 6.2      | Výroba založená na depozícii v plynnej fáze . . . . .                     | 142        |
| 6.3      | Depozícia axiálnym naparovaním . . . . .                                  | 144        |
| 6.4      | Modifikovaná depozícia chemickým naparovaním . . . . .                    | 144        |
| 6.5      | Depozícia chemickým naparovaním pomocou plazmy . . . . .                  | 146        |
| 6.6      | Depozícia vonkajším naparovaním . . . . .                                 | 147        |
| 6.7      | Zhrnutie techník depozície v plynnej fáze . . . . .                       | 148        |
|          | <b>Zoznam použitých skratiek</b>                                          | <b>149</b> |
|          | <b>Literatúra</b>                                                         | <b>151</b> |