

## Metoda optodinamske karakterizacije ablacije z erbijevim laserjem na osnovi piezoelektrične detekcije

Georgije Bosiger<sup>1,\*</sup> – Tadej Perhavec<sup>1</sup> – Janez Diaci<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Fotona, Slovenia

<sup>2</sup> Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Slovenia

Laser Er:YAG z valovno dolžino 2,94  $\mu\text{m}$  je uveljavljeno orodje v medicini in kirurgiji. Njegova infrardeča svetloba se močno absorbira v vodi in hidroksiapatitu, kar omogoča učinkovito lasersko ablacijo mehkih in trdih bioloških tkiv. Prednosti laserske interakcije (brezdotičnost, manjši toplotni vnos in odsotnost mehanskih vibracij) bi koristile številnim novim medicinskim posegom, a je pri tem potrebno rešiti enega izmed večjih tehničnih in znanstvenih izzivov, t.j. razvoj zanesljivega sistema za sprotni nadzor ključnih parametrov, kot sta npr. globina reza, vrsta odstranjenega tkiva ipd. Sprotno spremljanje procesa laserske ablacije bi bilo v praksi izvedljivo z uporabo piezoelektričnih akustičnih senzorjev tako, da bi zaznavali udarne valove, ki se iz mesta ablacije širijo po zraku nad biološkim tkivom in so značilni za tovrstno interakcijo. Obstoječe metode karakterizacije laserske ablacije z akustično detekcijo običajno temeljijo na empirično določenih karakteristikah akustičnih signalov. To pa jih omejuje na skrbno nadzorovane pogoje, ki jih je v praksi težko zagotoviti.

V tem prispevku predstavljamo drugačen pristop, ki odpira pot k realizaciji sprotnega spremljanja laserskih medicinskih posegov. Razvijemo nov teoretični model piezoelektričnega akustičnega senzorja, ki upošteva njegov relativni položaj ter usmerjenost, kakor tudi mehanske in električne lastnosti. Širjenje udarnega vala v polprostoru opišemo s Sedov-Taylorjevimi modelom točkaste eksplozije. Za potrebe validacije modela in metode realiziramo eksperiment, ki omogoča primerjavo izmerjenih signalov, detektiranih na različnih oddaljenostih in usmerjenostih senzorja glede na točko ablacije, s teoretičnimi, ki jih dobimo iz numeričnih rešitev modela točkaste eksplozije in razvitega modela senzorja. Teoretični model nato uporabimo za določitev matematične funkcije, ki podaja sproščeno energijo udarnega vala pri poljubni postavitvi piezoelektričnega senzorja na osnovi karakteristike zajetega optodinamskega signala – časa trajanja kompresijske faze.

Metodo optodinamske karakterizacije eksperimentalno preverimo tako, da ocenimo sproščeno energijo na osnovi izmerjenih kompresijskih faz pri različnih relativnih položajih in orientacijah senzorja. Ocenjene sproščene energije udarnih valov kažejo bistveno manjšo sistematično odvisnost od pogojev merjenja v primerjavi z ostalimi karakteristikami, ki se običajno uporabljajo pri optodinamski karakterizaciji laserske ablacije (čas preleta, amplituda signala, ipd.). To opažanje ter dobro ujemanje teoretičnih časovnih potekov z izmerjenimi potrjujeta primernost razvitega teoretičnega modela senzorja, kot tudi predlagane metode optodinamske karakterizacije. Pridobljene ocene uporabimo za določitev izkoristka energijske pretvorbe, ki podaja delež pretvorbe energije laserskega bliska v energijo udarnega vala. Pokažemo, da lahko predstavljena metoda služi tudi za ocenjevanje maksimalnih tlakov udarnih valov ter za kalibracijo senzorja.

Predstavljena spoznanja prispevka pripomorejo k uresničitvi sistemov za sprotni nadzor laserskih medicinskih in kirurških posegov. S teoretičnega vidika so optodinamski signali in s tem povezane karakteristike piezoelektričnih akustičnih senzorjev prvič obravnavane na tem področju optodinamske detekcije. Razviti teoretični model senzorja ter predstavljena metoda optodinamske karakterizacije omogočata ocenjevanje energije udarnih valov, ki je bila do sedaj mogoča le z implementacijo drugih tehnik optodinamske detekcije, npr. z uporabo laserske odklonske sonde in pri detekciji s prostorsko ločljivostjo, ki pa niso primerne za uporabo v realnih medicinskih laserskih sistemih.

**Ključne besede:** erbijev laser, laserska ablacija, udarni val, piezoelektrična detekcija, točkasta eksplozija