لیزر در پزشکی؛ ۱۳۹۵، دورهٔ ۱۳، شمارهٔ ۴، صفحات: ۲۸-۲۴ .

مقاله پژوهشی

ناحیهٔ خطر (NHZ) در کار با لیزر

فاطمه ویسی [۱]
شهریار ابوالحسینی [۲]

خلاصه

مقدمه: امروزه به‌کارگیری لیزر درجراحی و درمان، گسترهٔ وسیعی از پژوهش‌های محققان و دانشمندان را به‌خود اختصاص داده است. یکی از مهم‌ترین خصوصیات رفتاری لیزر به‌هنگام برخورد با بافت، اثرات گرمایی و حرارتی آن می‌باشد.

روش بررسی: سازوکارهای آسیب زیست‌شناختی ناشی از نور لیزر هم شامل اثرات گرمایی حاصل از انرژی جذب‌شده و همچنین واکنش‌های فوتوشیمیایی است. به‌علت توان بالای برخی از آن‌ها پرتوگیری بسیار کوتاه‌مدت لیزر نیز اثرات جبران‌ناپذیری به‌همراه خواهد داشت. اکثر جراحات و سوانح در مراکز کار با لیزر به‌واسطهٔ بازتاب‌های غیرمنتظره می‌باشد و پیش از آن‌که کاربر متوجه شود، حادثه رخ‌داده است. لیزرهای کلاس ۳B و ۴ قادرند ازطریق اثرات گرمایی به پوست آسیب برسانند، لیکن خطر اصلی متوجه چشم می‌باشد و وخامت آسیب چشمی به انرژی، توان و زاویهٔ تابش باریکه بستگی دارد که عمده‌ترین تغییرات وابسته به طول‌موج است[۲و۳]. در کار با پرتو، فاصله از عوامل حائز اهمیت است. با افزایش فاصله از منبع مولد پرتوی لیزر و افزایش اندازهٔ باریکهٔ لیزر، چگالی شدت پرتو کاهش می‌یابد ازاین‌رو با مشخص نمودن فاصله‌ای که در آن شدت پرتو کمتر از حد مجاز تابش است، می‌توان کنترل مناسب‌تری بر وضعیت کار پرتوی داشت و با ارزیابی فاصله‌های مختلف، فراخور هر حالت موارد ایمنی مشخصی را به‌کار برد[۴].

روش بررسی: هنگامی که بیشینهٔ حد مجاز تابش[۱]، برای لیزر مشخص شد[۳]، ناحیهٔ خطر را می‌توان مشخص نمود. ناحیهٔ خطر، فضای پیرامون لیزر است که مقدار پرتوی لیزر موجود در آن بیش‌ازحد مجاز تابش است، البته سهم پرتوهای بازتابی و پراکندهٔ لیزر را نیز باید درنظر گرفت. به‌واسطهٔ وجود واگرایی، چنانچه فاصله از باریکهٔ لیزر (و بازتاب‌های آن) افزایش یابد، چگالی شدت پرتو کاهش خواهد یافت[۵] و مکان‌هایی که دارای شدت کمتر از حد مجاز تابش هستند، مرز ناحیهٔ خطر خواهد بود. لذا با تعیین ناحیهٔ خطر برای لیزرهای مختلف می‌توان مقایسه‌ای بین لیزرهای مختلف انجام داد[۶].

یافته‌ها: لیزر فارغ از اندازه و توان، دارای خطرات بالقوه می‌باشد و ابزاری برای تفریح و سرگرمی نیست. به‌هنگام استفاده از باریکه‌های لیزر بایستی فاصلهٔ خطر را تعیین نمود. در لیزرهای پزشکی که تنوع طول‌موج و توان وجود دارد نیز درنظرگرفتن ناحیهٔ خطر از اهمیت به‌سزایی برخوردار است.

نتیجه‌گیری: کنترل اجرایی از روش‌های کنترل خطرات لیزر است. ازاین‌رو با تعیین نواحی مختلف در مراکز کار با لیزر می‌توان فراخور هر ناحیه دستورالعمل‌های خاص آن ناحیه را تدوین و اجرا نمود[۲].

واژه‌های کلیدی: ایمنی لیزر، حد مجاز تابش، ناحیهٔ خطر

۱. کارشناس آزمایشگاه، پژوهشکدهٔ فوتونیک و فن‌آوری‌های کوانتومی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران

۲. مسئول فیزیک بهداشت، پژوهشکدهٔ فوتونیک و فن‌آوری‌های کوانتومی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران

نویسندهٔ مسئول: شهریار ابوالحسینی، تلفن: ۰۹۱۰۶۹۶۴۳۷۷
پست الکترونیک: sabolhosseini@aeoi.org.ir

۱. MPE (maximum Permissible Emission)

[Downloaded from icml.ir on 2025-07-05]

مقدمه

پرتوهای فرابنفش از ۱۰۰ تا ۴۰۰ نانومتر، پتانسیل آسیب فوتوشیمیایی به چشم و پوست را دارند[۲]. بدین معنی که به-هنگام استفاده از آن در درازمدت، احتمال بروز سرطان پوست و آب‌مروارید افزایش می‌یابد. بیشتر انرژی پرتوی فرابنفش به عدسی آسیب می‌رساند و باعث کدر شدن و ایجاد آب‌مروارید می‌گردد[۱و۱۰].

نور مرئی از ۴۰۰ تا ۷۸۰ نانومتر توسط چشم دیده می‌شود. همین عامل می‌تواند چشم را در برابر خطرات محافظت نماید. هرچندکه در شدت‌های بالا، نور مرئی اثرات مخربی برروی شبکیه خواهد داشت[۱و۱۰].

پرتوهای مادون‌قرمز نزدیک ۷۸۰ تا ۱۴۰۰ نانومتر، توسط چشم دیده نمی‌شوند، ولی از بخش‌های چشم عبور می‌کنند و بر-روی شبکیه متمرکز می‌شوند. این پرتوها برای شبکیه خطر دارند و منجر به آسیب می‌شوند. بیشتر ملاحظات ایمنی در استفاده از لیزر به این ناحیه مربوط می‌شوند. پرتوهای مادون‌قرمز دور از ۱۴۰۰ تا ۱۰۶۰۰ نانومتر، توسط آب موجود در قرنیه جذب می‌شوند و به شبکیه نمی‌رسند. طول‌موج‌های مادون‌قرمز دور می‌توانند به سایر بخش‌های چشم آسیب برسانند و جذب در ناحیهٔ بزرگ‌تری پخش می‌شود. علاوه بر آن بافت‌های سلولی سریعاً جایگزین می‌شوند. این اثرات تحت عنوان اثرات آنی معرفی می‌شوند. شدت آسیب‌های شبکیه به نوع بافت آسیب‌دیده نیز بستگی دارد. بافت‌های مخروطی که برای دیدن رنگ استفاده می‌شوند، درصورت آسیب به‌آرامی ترمیم می‌شوند ولی به حالت اول خود برنمی‌گردند. بافت‌های استوانه‌ای که برای دید با نور کم استفاده می‌شود، درصورت آسیب، اندکی ترمیم می‌شوند. ایجاد زخم برروی شبکیه، اغلب به‌طور آنی اتفاق می‌افتد و باعث مشاهدهٔ یک نقطهٔ تاریک برروی تصویر می‌شود و این‌زمانی است که کاربر یا پزشک متوجه آسیب خواهد شد[۱و۱۰].

باتوجه به انواع خطرات در نواحی مختلف طیف الکترومغناطیسی خصوصاً در محدوده‌های فوق بایستی جهت حفاظت در برابر خطرات بالقوهٔ آن تمهیداتی اندیشید. ساده‌ترین روش، رعایت فاصله است که می‌تواند مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد.

روش بررسی

ارزیابی خطر

مبنای اصلی در ارزیابی خطر، تعیین مقدار بیشینهٔ تابش مجاز پرتوی لیزر است. یکی از پارامترهای مهم جهت تعیین آن، مدت‌زمان پرتوگیری است[۸].

برای لیزرهای پیوسته می‌توانیم از جدول۱ جهت تعیین زمان پرتوگیری استفاده نماییم. روش محاسبه برای لیزرهای پالسی پیچیده‌تر است. علاوه بر طول‌موج، مقدار طول پالس در نیم پهنهٔ بیشینهٔ قدرت لیزر را نیز باید بدانیم.

ازاین‌رو برای لیزرهای پالسی از قواعد زیر استفاده می‌کنیم[۳].

- در هر تک پالس از قطار پالس، پرتوگیری از مقدار حد نباید تجاوز نماید.

- در قطار پالس در مدت‌زمان T نباید از مقدار حد در مدت‌زمان T تجاوز نماید.

- برای آسیب حرارتی، پرتوگیری هر تک‌پالس در داخل قطار پالس‌ها نباید از مقدار حد برای تک پالس بیشتر شود.

جدول۱: زمان پرتوگیری در بازه‌های طول‌موجی[۳]

ناحیه طیفی	طول‌موج (نانومتر)	زمان پرتوگیری
فرابنفش	۱۸۰ – ۴۰۰	مدت‌زمان وجود باریکه تا ۸ ساعت
نور مرئی	۴۰۰ – ۷۸۰	۰,۲۵ ثانیه
فروسرخ	۷۸۰ – $۱۰^{۶}$	۱۰ ثانیه

تعیین ناحیهٔ خطر

هنگامی‌که حد مجاز تابش برای لیزر مشخص شد، ناحیهٔ خطر را می‌توان مشخص نمود. ناحیهٔ خطر، فضای پیرامون لیزر است که چگالی شدت باریکه‌های مستقیم، بازتابی و پراکندهٔ لیزر از حد بیشتر است. به‌واسطهٔ وجود واگرایی، چنانچه فاصله از منبع لیزر (بازتاب‌های آن) افزایش یابد، شدت پرتو کاهش خواهد یافت و مکانی که مقدار شدت از حد کمتر شده باشد، به‌عنوان مرز ناحیهٔ خطر درنظر گرفته خواهد شد(جدول۱).[۱،۳و۴]

فاصلهٔ ناحیهٔ خطر از رابطهٔ کلی زیر به‌دست می‌آید:

$$r_{NHZ} = \frac{1}{\varphi}\left[\left(\frac{4\times P}{\pi\times MPE}\right)-a^2\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (۱)$$

که در آن φ واگرایی برحسب رادیان، P شدت توان متوسط برحسب وات بر مترمربع (برای لیزرهای پیوسته) یا چگالی انرژی برحسب ژول بر مترمربع (برای لیزرهای پالسی) و a قطر باریکهٔ خروجی لیزر برحسب سانتی‌متر است. با مطالعه و مقایسهٔ داده‌های جدول۱ مشاهده می‌شود که با توجه به توان لیزر، فاصلهٔ ناحیهٔ خطر تغییر می‌نماید.

[Downloaded from icml.ir on 2025-07-05]

جدول۱: زمان پرتوگیری در بازه‌های طول‌موجی[۳]

λ(nm)	P(W)	MPE(W/cm^2)	NHZ(m)
۳۸۰	۹۰	۰٫۰۰۱	۱
	۳٫۵		۰٫۲۰
	۰٫۳		۰٫۰۶
۲۵۵	۰٫۲۵	۳٫۰×۱۰$^{-۶}$	۱
	۰٫۰۱۰		۰٫۲۰
	۰٫۰۰۱		۰٫۰۶

بـا توجه به آنکه در هنگام کاربـر لیزر را در جهات مختلف قرار می‌دهد (همانند لیزر دندانپزشـکی) ناحیهٔ خطر از روابـط تغییریافتهٔ دیگری نیز قابل‌دسترس است. در شکل‌های ۱ تا ۴ حالات مختلف نشان داده‌شده‌اند.

اگر در برابر باریکهٔ لیزر یک عدسی با فاصلهٔ کانونی b قرار داشته باشد، رابطهٔ۱ به‌صورت زیر تغییر خواهد نمود:

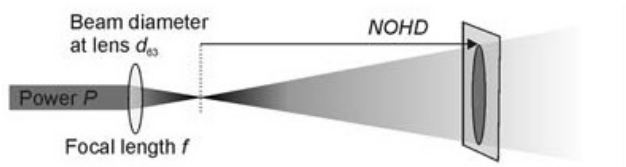
$$r_{NHZ} = \frac{b}{a}\left[\frac{4\,P}{\pi\,MPE}\right]^{\frac{1}{2}} \quad (۲)$$

در موارد کاربردی مانند استفاده از لیزر دندانپزشکی و یا پوست می‌توان با محاسبهٔ فاصلهٔ اسمی خطر (NOHD) برآوردی از فاصلهٔ امن به‌دست آورد.

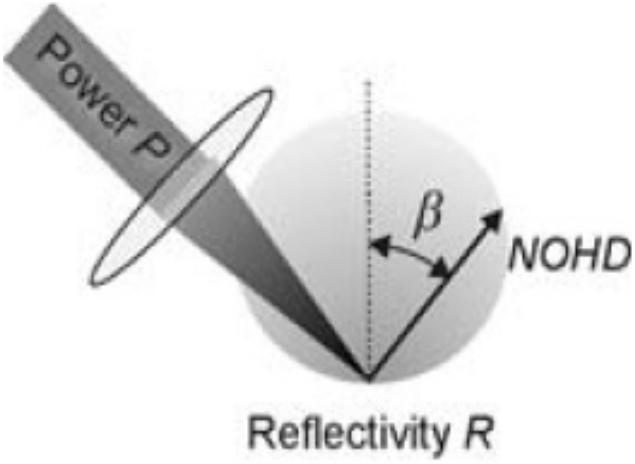
در این حالت ناحیهٔ خطر از رابطهٔ:

$$NOHD = \frac{2\,f}{d_{63}}\sqrt{\frac{P}{\pi\,MPE}} \quad (۳)$$

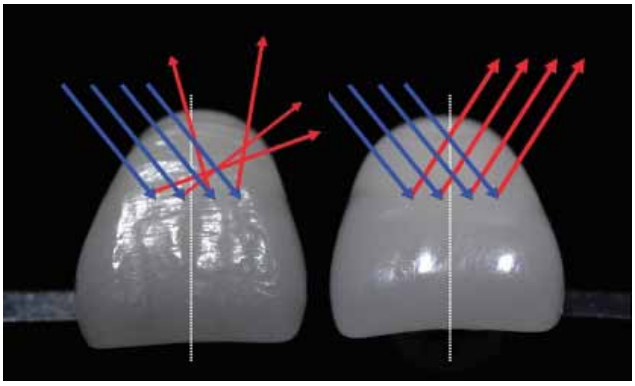
حالت نشان داده‌شـده در شکل۱ به‌هنگام کار با لیزرهای پوست بیشتر مشـهود است. در شکل۲ همانند تابش لیزر به دندان است، در این حالت احتمـال بازتاب نور لیزر از ابزارآلات و یا نواحی پرشـدهٔ دندان نیز وجود دارد. در شـکل۳، شـکل شبیه‌سازی‌شـدهٔ بازتاب از سـطح دندان نشان داده‌شده است.



شکل۱: ناحیهٔ خطر نور لیزر پس از عبور از عدسی



شکل۲: بازتاب نور لیزر با تابش غیر عمود



شکل۳: شبیه‌سازی بازتاب از سطح دندان

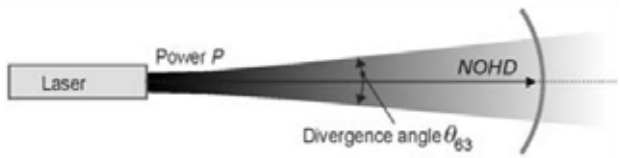
در این حالت ناحیهٔ خطر از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید:

$$NOHD = \sqrt{\frac{R\,P\,\cos\theta}{\pi\,MPE}} \quad (۴)$$

در شـکل۴ همانـند تابـش لیـزر از یک سـطح منحنی همانـند آینهٔ دندانپزشکی است.

در این حالت ناحیهٔ خطر از رابطهٔ زیر به‌دست خواهدآمد:

$$NOHD = \frac{2}{d_{63}}\sqrt{\frac{P}{\pi\,MPE}} \quad (۵)$$



شکل۴: بازتاب نور لیزر از سطح منحنی

[Downloaded from icml.ir on 2025-07-05]

در برخی از دستگاه‌های لیزر پزشکی باریکهٔ لیزر به‌وسیلهٔ فیبر نوری هدایت می‌شود، رابطهٔ۱ به‌صورت زیر خواهد بود:

۶) حالت چندمد

$$NOHD = \frac{1.7}{NA}\sqrt{\frac{P}{\pi\ MPE}}$$

حالت تک‌مد

$$r_{NHZ} = \frac{\omega}{\lambda}\sqrt{\frac{\pi P}{2\ MPE}}$$

که در آن NA، عدد روزنهٔ فیبر نوری و ω قطر میدان مد درحالت تک مد فیبر نوری برحسب μm می‌باشند. باتوجه به واگرایی لیزر در فواصل مختلف می‌توان انتظار اثرات متفاوتی را داشت. ازاین‌رو انواع فاصله را جهت اعمال مقررات ایمنی می‌توان تعیین نمود.

پس از محاسبهٔ فاصلهٔ خطر، باتوجه به حساسیت سیستم بینایی به نور شدید می‌توان برآوردی از فاصله‌هایی که حساسیت خاصی برروی چشم دارند نیز به‌دست آورد. این موارد معمولاً به‌هنگام استفاده از لیزر در فضای آزاد کاربرد دارد. لیزرهایی که جهت نمایش و یا تبلیغات استفاده می‌شوند از این دسته‌اند.

ناحیهٔ اسمی خطر چشمی(NOHD)

در این ناحیه باریکهٔ لیزر توانایی ایجاد آسیب جدی برروی چشم را دارد و میزان شدت نور لیزر نباید از مقدار حد تجاوز نماید.

$$r_{NOHD} = \frac{1}{\varphi}\sqrt{0.5\times P} \qquad (۷$$

که در آن φ واگرایی برحسب میلی‌رادیان P توان متوسط برحسب میلی وات است.

ناحیهٔ حساس(SZED)

در این ناحیه باریکه دارای درخشندگی کافی می‌باشد و توانایی ایجاد اختلال موقت در بینایی را دارد.

$$r_{SZED} = \frac{1}{\varphi}\sqrt{12.7\times P\times CF} \qquad (۸$$

که در آن φ واگرایی برحسب میلی‌رادیان P توان متوسط برحسب میلی وات است. CF ضریب تصحیح است. (جدول ۲)

ناحیهٔ بحرانی (CZED)

در این ناحیه روشنایی پرتو به‌حدی است که درصورت عدم توجه و حواس‌پرتی در عملکرد بینایی ایجاد اخلال می‌نماید.

$$r_{CZED} = r_{SZED}\times 4.47 \qquad (۹$$

جدول۲: ضریب تصحیح برای طول‌موج‌های سبز، قرمز و آبی

رنگ	طول‌موج (nm)	ضریب CF
Green	555	۱/۰
Red	۶۷۰	۰/۰۳۲۱
Blue	۴۷۳	۰/۱۰۵۳۶
Cyan	۴۸۸	۰/۱۹۴۱۴
Violet	۴۰۵	۰/۰۰۰۸

ناحیهٔ آزاد (LFZED)

در این ناحیه شدت پرتو به‌اندازهٔ کافی کاهش می‌یابد و ایمن است.

$$r_{LFZED} = r_{CZED}\times 10 \qquad (۱۰$$

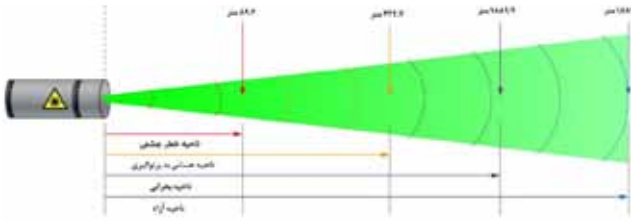
محاسبات

در شکل۱ نشانگر لیزری که امروزه در دسترس همگان قرار دارد، نشان داده‌شده است. از این وسیله به‌عنوان نشانگر و یا وسیلهٔ تفریحی استفاده می‌شود. این لیزر از نوع دیود می‌باشد و دارای توان حدود ۱۰۰۰ میلی وات، واگرایی ۲/۵ میلی‌رادیان و قطر باریکهٔ ۲ میلی‌متر است. با قراردادن روزنهٔ لیزر برروی پوست درمدت چند ثانیه احساس سوزش خواهیم داشت. براساس روابطی که در بالا ذکر شد، فواصل خطر را برای این لیزر به‌ظاهر ساده محاسبه می‌نماییم، مشاهده خواهد شد که این لیزر به چه میزان خطرناک است. محاسبهٔ فواصل در جدول۳ آمده و به‌طور طرح‌وار در شکل۲ نشان داده‌شده‌اند.

حال با انجام مقایسهٔ ساده‌ای با انواع لیزرهای پزشکی و صنعتی می‌توان برآوردی از میزان خطر آن‌ها داشت. باریکهٔ بازتابی لیزر نیز توانایی بروز حادثه را دارد، لذا درصورتی‌که بازتاب آینه‌ای و یا پراکنده داشته باشیم،

شکل۵: نمونهٔ لیزر تحت آزمون

[Downloaded from icml.ir on 2025-07-05]



شکل۶: طرح‌وارهٔ فاصله‌های خطر

جدول۳: اندازهٔ فاصله‌ها برای لیزر دیود قلمی

ناحیه	فاصله (متر)
NOHZ	۸۹.۴
SZED	۴۲۲.۷۹
CZED	۱۸۸۹.۹
LF	۱۸۸۹۹

از رابطهٔ زیر می‌توان استفاده نمود:

$$R_{NHZ} = \left[\frac{\rho\ P\ \cos\theta}{\pi\ MPE}\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (۱۱)$$

کـه ρ معرف ضریب بازتـاب و θ زاویهٔ بازتاب نسـبت به خط عمود بر سـطح اسـت[۶و۷]. در جدول۴ محاسـبات نوعی برای لیزرهای پزشکی سری Alex انجام‌شده است.

با مقایسـهٔ لیزرهای مختلف ذکرشـده در جدول۴ مشاهده می‌شود که ناحیهٔ خطر برای لیزرهای مختلف تفاوت دارد و ضروری است که برای هر دستگاه ارزیابی جداگانه صورت پذیرد. محاسبات و مدل‌سازی روابط فوق در نرم‌افزار متلب انجام‌شده است.

جدول۳: اندازهٔ فاصله‌ها برای لیزر دیود قلمی

ناحیهٔ خطر (متر)	حد مجاز تابش (ژول بر مترمربع)	اندازهٔ لکه (میلی‌متر)	انرژی (ژول)	طول‌موج (نانومتر)
۰.۲۵	۴۵۷۲.۱۰۴	0.5	2	۲۹۳۶
۲	۰.۲۰۵۱۵۶	4	7	۱۰۷۹
۰.۵	۰.۳۳۸۴۵۴	1	2	۵۴۰
۱.۵	۰.۱۷۰۲۳۳	3	2	۶۹۴
۱.۵	۰.۱۷۰۲۳۳	3	2	۷۵۵

نتیجه‌گیری

لیـزر فارغ از اندازه و توان دارای خطرات بالقوه می‌باشـد و ابزاری برای تفریح و سـرگرمی نیست و هنگام استفاده از باریکه‌های لیزر بایستی مرز ناحیهٔ خطر را تعیین نمود. با توجه به کاربرد گسـتردهٔ لیزرهای پزشـکی خصوصاً جهت پاک‌سـازی پوسـت و مو، ازآنجاکه عموماً دارای هندپیس با درجهٔ آزادی حرکت و قابلیت حرکت به تمام جهات و زوایا می‌باشـند، ضروری اسـت که ناحیهٔ اطراف لیزر مـورد توجه خاص قرار گیرد. کنترل اجرایی از روش‌های کنترل خطرهای لیزر اسـت. ازاین‌رو با تعیین نواحی مختلف در مراکز کار با لیزر می‌توان به فراخور هر ناحیه دستورالعمل‌های خاص آن ناحیه را تدوین و اجرا نمود.

References:

1. Cember H. Introduction to Health Physics, 5th, Pergamon press. 1998: 554-63.

2. ISIRI 8567, Non-Ionization Exposure limits

3. ISIRI 20610, Limits of Exposure to Laser radiation of wavelengths between 180 nm and 1 micrometer, 2015: 15-28.

4. ISIRI 3501,

5. Svelto O., Principal of Laser, Springer, 4th Edition, 1998: 26-37.

6. ICNRIP Guideline, Health Physics 2013; 105(3): 271-95.

7. Ken Barat, Laser safety tools and training.

8. Henderson Roy, Laser Safety, IOP Publishing 2004:101-5& 334-41.

9. Markolf H. Niemz, Laser-Tissue Interactions,

[Downloaded from icml.ir on 2025-07-05]