

مدلسازی تولید فراصوت توسط لیزر و بررسی اثر پراش اکوستیکی بر شکل موج فراصوت

زهرة دهقانی بیدگلی^۱، محمد حسین میران بیگی^{۲*}، محمد جواد ابوالحسنی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی پزشکی، دانشکده فنی دانشگاه تربیت مدرس تهران، ایران

۲- استادیار مهندسی پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس تهران، ایران

۳- دانشیار گروه فیزیک و مهندسی پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی تهران، ایران

تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۸۵/۷/۵ تاریخ پذیرش مقاله: ۸۵/۸/۲۲

چکیده

مقدمه: فوتواکوستیک که اپتواکوستیک یا لیزر- فراصوت نیز نامیده می شود، روشی است که در آن از انرژی نوری برای تولید امواج فراصوت در مواد مختلف استفاده می شود. شکل موج فراصوت تولید شده حاوی اطلاعات مفیدی درباره ویژگیهای نوری محیط جاذب و متاثر از مشخصات پالس لیزر می باشد. سیگنال فشار بدست آمده در اثر انتشار در محیط تا رسیدن به مبدل دستخوش تغییراتی می شود. در این پژوهش اثر پارامترهای لیزر و ویژگیهای محیط جاذب بر موج فراصوت تولیدی و نیز اثر پراش اکوستیک بر شکل موج فراصوت در حین انتشار در محیط، شبیه سازی گردیده است.

مواد و روشها: در این پژوهش برای تولید فشار اکوستیکی در نتیجه دریافت انرژی لیزر پالسی در دو حالت رو به جلو و رو به پشت تابع تبدیلی در حوزه فرکانس معرفی شده است. سپس با استفاده از مدل ارائه شده، اثر تغییر عرض، شکل پالس و طول موج لیزر و نیز ضریب جذب نمونه بر ویژگیهای فراصوت تولیدی مورد بررسی قرار گرفته است. سپس تابع تبدیلی برای پراش اکوستیکی، معرفی شده و با استفاده از آن اثر پراش بر شکل موج فراصوت، شبیه سازی گردیده است. اثر فاصله طولی و شعاعی مبدل فراصوت از سطح تحت تابش و نیز اندازه منبع فراصوت اولیه که تحت تاثیر قطر پرتو لیزر می باشد، بر شکل موج فراصوت، بررسی شده است. کلیه شبیه سازیها در محیط نرم افزاری MATLAB7 انجام شده است.

نتایج: با افزایش عرض پالس لیزر، دامنه فراصوت تولیدی افزایش اما محتوای فرکانسی آن کاهش می یابد. با افزایش ضریب جذب نمونه، دامنه فراصوت افزایش می یابد. موج اپتواکوستیک تولیدی در پاسخ به لیزرهای با نمایه گوسی و گوسی نامتقارن (حالت واقعی) تفاوت چشمگیری نداشته و می توان با تقریب خوبی در مدلسازی از پالس گوسی استفاده نمود. در اثر پراش اکوستیک در حین انتشار در محیط موج تک قطبی حالت رو به پشت به یک موج دو قطبی تبدیل می شود. در اثر افزایش ابعاد منبع فراصوت اولیه (قطر پرتو لیزر) دامنه اپتواکوستیک افزایش و عرض آن بیشتر می شود.

بحث و نتیجه گیری: برای طراحی یک سیستم لیزر- فراصوت با حداکثر کارایی بایستی طول موج لیزر در ناحیه ای انتخاب شود که بافت تحت مطالعه ضریب جذب بالایی را در آن طول موج داشته باشد. عرض پالس و قطر پرتو لیزر نیز بایستی با توجه به ویژگیهای مبدل فراصوت بطور مناسبی انتخاب شود. (مجله فیزیک پزشکی ایران، دوره ۲، شماره ۹، زمستان ۸۴: ۴۳-۵۴)

واژگان کلیدی: لیزر فراصوت، اپتواکوستیک، پراش اکوستیکی، مدلسازی، شکل موج

* نویسنده مسئول: محمدحسین میران بیگی

آدرس: گروه مهندسی پزشکی، بخش برق، دانشگاه تربیت مدرس تهران.

Mh_miranbaygi@yahoo.com

تلفن: ۰۲۱-۸۸۰۱۱۰۰۱-۹۸

۱- مقدمه

هندسه موج صفحه ای دو موج اولتراسونیک تولید می شود که در دو جهت مختلف- رو به جلو به داخل حجم ماده تحت تابش و رو به عقب به داخل محیط شفاف- منتشر می شوند. نمایه زمانی اپتوآکوستیک به مکان ترانسدایوسر نسبت به بافت تحت تابش و نیز به نسبت امپدانسهای آکوستیکی محیط جاذب و شفاف بستگی دارد. در حالت تشخیص رو به جلو، سیگنال اپتوآکوستیک که به سمت جلو در طول محور لیزر به داخل محیط جاذب منتشر می شود در رویه پشتی محیط جاذب تشخیص داده می شود. در حالت رو به پشت موج اپتوآکوستیک به سمت عقب در جهت مخالف پرتو لیزر تابشی منتشر می شود و در همان سوی لیزر تابشی قابل تشخیص است. این دو حالت تشخیصی، اندازه گیری جذب و پراکندگی نوری در رنج وسیعی از ویژگیهای نوری بافت و جذب و پراکندگی فراصوت در رنج وسیع فرکانسی را ممکن می سازد [۱۴]. سیگنال فشار بدست آمده در هر دو حالت در اثر انتشار در محیط تا رسیدن به مبدل دستخوش تغییراتی می شود.

تا کنون برخی از پژوهشگران به مدلسازی شکل سیگنال تولیدی پرداخته اند [۱۷-۱۵]، اما از آنجا که پارامترهای موثر در سیگنال تولیدی در این زمینه بسیار متنوع هستند و بررسی تجربی اثر تمام این پارامترها بسیار مشکل و هزینه بر است، در این تحقیق ضمن مروری بر مبانی تئوری این روش، مدلی برای فشار تولید شده در ماده در نتیجه دریافت انرژی لیزر پالسی ارائه شده و در محیط نرم افزاری MATLAB شبیه سازی گردیده است. سپس با استفاده از این مدل اثر پارامترهایی از لیزر مانند عرض و شکل پالس و طول موج لیزر در کارایی تولید فراصوت، مورد بررسی قرار گرفته است. در پایان نیز اثر پراش^۷ آکوستیک در هنگام انتشار در محیط، شبیه سازی گردیده است.

روش اپتوآکوستیک^۱ یا لیزر- فراصوت امروزه یکی از زمینه های پژوهشی جالب در تست غیر مخرب مواد^۲ (NDT) و یا ارزیابی غیر تهاجمی بافت زنده می باشد [۵-۱]. گرچه اولین نشانه ها از این حقیقت که بافت زنده در نتیجه دریافت انرژی لیزر پالسی می تواند بصورت منبع فراصوت عمل کند در اوایل دهه ۱۹۹۰ پدیدار شد، ابزارهای مینیاتوری مرتبط با آن که برای یک کاربرد انحصاری بودند، در ۱۹۸۷ ساخته شدند. این ابزار شامل یک ترانسدایوسر فراصوت یا کریستال پیزوالکتریک و یک فیبر نوری که از مرکز آن عبور می کرد، بود [۶]. تا به امروز پژوهشهای متنوعی در مورد کاربردهای این روش در پزشکی شامل، تصویربرداری داخل رگی^۳، پایش سطح گلوکز، پایش سطح اکسیژن خون مغزی^۴، پایش لایه های مختلف چشم و سیستم تشخیصی برای سرطان سینه، صورت گرفته است [۱۴-۶].

در این روش موج فراصوت در اثر انبساط دمایی حجم ماده تحت تابش لیزر تولید می شود. شکل موج فراصوت تولید شده حاوی اطلاعات مفیدی درباره ویژگیهای نوری محیط جاذب می باشد که می تواند در تشخیص سطح اکسیژن و یا ساختار بافت مورد استفاده قرار گیرد. ویژگیهای نوری محیط جاذب می تواند از آنالیز سیگنال فشار بدست آمده در دو حالت تشخیصی رو به جلو^۵ (FW) و یا رو به پشت^۶ (BW) بدست آید. این دو حالت تشخیصی اپتوآکوستیک در شکل ۱ نشان داده شده است که به عنوان حالت های اپتوآکوستیک روبه جلو و رو به پشت شناخته می شوند. با گرم شدن بافت جاذب تحت تابش لیزر پالسی در

- 1- Optoacoustic
- 2- Non-destructive testing
- 3- Intra-arterial
- 4- Monitoring of cerebral blood oxygenation
- 5- Forward
- 6- Backward

7- Diffraction

مدلسازی تولید فراصوت توسط لیزر

فوتواکوستیک، $P_s(\omega)$ ، در محل منبع فوتواکوستیک در حوزه فرکانس بصورت زیر نوشته می شود [17].

$$P_s(\omega) = H_{PA}(\omega) I_0 F_L(\omega) \quad (2)$$

در معادله (۲)، $H_{PA}(\omega)$ تابع انتقال تبدیل فوتواکوستیک در شرایط مرزی متفاوت، $F_L(\omega)$ تبدیل فوریه نمایه زمانی پرتو لیزر فرودی و I_0 شدت پرتو لیزر می باشد.

در این بررسی سیستمی شامل دو محیط با یک مرز امیدانسی در $z=0$ مورد استفاده قرار گرفته است (شکل ۱). مبدل فراصوت بصورت یک آشکار ساز ایده آل که در محیط شفاف (رو به پشت) و یا در محیط جاذب (رو به جلو) قرار گرفته است در نظر گرفته شده است. تابع انتقال تبدیل فوتواکوستیک در حالت رو به پشت می تواند بصورت زیر نوشته شود [۱۷].

$$H_{PAb}(\omega) = (\rho_{tr} c_{tr}) \left(\frac{\beta^*}{\rho_0 c_p} \right) \left(\frac{N_{ac}}{1 + N_{ac}} \right) \left(\frac{1 + i\omega/\omega_a}{1 + (\omega/\omega_a)^2} \right) \quad (3)$$

در معادله (۳) ρ_0, ρ_{tr} چگالی نمونه جاذب و محیط و c_0, c_{tr} سرعت صوت در نمونه جاذب و محیط می باشد. $\omega_a = \alpha c_0$ فرکانس مشخصه موج فوتواکوستیک و $N_{ac} = \rho_0 c_0 / \rho_{tr} c_{tr}$ نسبت امیدانس صوتی نمونه جاذب و محیط می باشد.

تابع انتقال متناظر در حالت رو به جلو بصورت زیر می باشد [۱۷].

$$H_{PAF}(\omega) = \left(\frac{\beta^* c_0}{c_p} \right) \left(\frac{N_{ac}}{1 + N_{ac}} \right) \left(\frac{(1/N_{ac}) - i\omega/\omega_a}{1 + (\omega/\omega_a)^2} \right) \quad (4)$$

معادله فوق در شرایطی که $N_{ac} \gg 1$ و $\omega/\omega_a \gg 1/N_{ac}$ می تواند بصورت زیر تقریب زده شود [۱۷].

$$H_{PAF}(\omega) = \left(\frac{\beta^* c_0}{c_p} \right) \left(\frac{-i\omega/\omega_a}{1 + (\omega/\omega_a)^2} \right) \quad (5)$$

$$= \left(\frac{\beta^* c_0}{c_p} \right) \frac{(-i\alpha\omega/c_0)}{\alpha^2 + \omega^2/c_0^2}$$

هدف از بررسی اثر پارامترهای فوق بدست آوردن رابطه میان این پارامترها و ویژگیهای سیگنال فراصوت تولیدی می باشد که کاربران این روش بتوانند با استفاده از این نتایج، سیستم مطلوب را با توجه به کاربرد مورد نظرشان انتخاب نمایند.

۲- پیش بینی نظری سیگنال فوتواکوستیک

هنگامیکه نور لیزر پالسی (با عرض پالس چند نانوثانیه) به یک ماده برخورد می کند، در لایه ای از ماده که در نزدیک سطح قرار دارد جذب می شود، که این امر منجر به گرم شدن، انبساط گرمایی و در نهایت تولید امواج فراصوت می شود.

معادله حاکم برفشار اکوستیک ایجاد شده در نتیجه دریافت

انرژی لیزر پالسی بصورت زیر می باشد [۱۵].

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - v_s^2 \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{v_s^2 \beta}{C_p} \frac{\partial H}{\partial t} \quad (1)$$

در معادله (۱) v_s سرعت صوت، C_p گرمای ویژه، β ضریب انبساط حجمی نمونه جاذب می باشد. H تابع گرمایش محلی می باشد که بصورت انرژی جذب شده در واحد زمان و واحد حجم تعریف می شود. تابع H می تواند بصورت $H(z, t) = \varphi(z)\eta(t)$ بیان شود که $\varphi(z)$ جذب نوری بافت در فاصله Z و $\eta(t)$ شکل پالس برخوردی را نشان می دهد [۱۶].

تا کنون راه حل‌های متفاوتی برای معادله فوق در حوزه زمان و فرکانس مورد بررسی قرار گرفته است [۱۵-۱۷]. در این مطالعه، ما به بررسی معادله فوق بصورت یک مسئله یک بعدی در حوزه فرکانس پرداخته ایم. مولفه های shear موج فشار در این بررسی ناچیز فرض شده است.

پاسخ فرکانسی سیگنال فوتواکوستیک ایجاد شده حاصلضرب طیف پالس لیزر در تابع تبدیل فرایند تولید فوتواکوستیک می باشد. این تابع تبدیل با توجه به شرایط مرزی حاکم بر معادله متفاوت خواهد بود. با در نظر گرفتن شرایط مرز آزاد وسخت در حالت رو به جلو و رو به پشت، طیف فشار

گرفتن اعوجاجات شکل موج در اثر انتشار در محیط انجام شد. در این شبیه سازی که در محیط MATLAB صورت گرفت ابتدا در حالت رو به پشت طیف فشار فوتوآکوستیک $P_s(\omega)$ ، با جایگزینی $H_{PAAb}(\omega)$ رابطه (۳) در رابطه (۲) بدست آمده و سپس با اعمال عکس تبدیل فوریه بر آن، شکل زمانی سیگنال فشار حاصل شده است. در حالت رو به جلو نیز به همین صورت اما با استفاده از $H_{PAF}(\omega)$ از رابطه (۴)، شکل سیگنال فشار حاصل شده است. در این شبیه سازی نمایه زمانی پالس لیزر بصورت گوسی با عرض پالس 40ns فرض شده و تبدیل فوریه آن $F_L(\omega)$ ، در رابطه (۲) مورد استفاده قرار گرفته است.

در شبیه سازیهای انجام شده و استخراج نتایج از جعبه ابزارهای پردازش سیگنال^۱ و پیش بینی نمودار^۲ در محیط MATLAB استفاده شده است.

طول موج و انرژی لیزر در شبیه سازی اولیه برترتیب ۵۳۲ نانومتر و ۵ میلی ژول با قطر پرتو ۶/۵ میلیتر در نظر گرفته شده است.

در ابتدا شبیه سازی با در نظر گرفتن فیلتر با چگالی خنثی به عنوان نمونه جاذب در داخل محیط غیر جاذب آب، انجام شد. پارامترهای مورد استفاده برای آب و فیلتر بصورت زیر می باشد [۱۶].

$$\rho_s = 2430 \text{ kg.m}^{-3}, \rho_{tr} = 998.2 \text{ kg.m}^{-3},$$

$$c_s = 5436 \text{ m.s}^{-1}, c_{tr} = 1482.34 \text{ m.s}^{-1},$$

$$C_p = 700 \text{ J.kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}, \beta = 2.16 \times 10^{-8} \text{ K}^{-1},$$

$$\alpha = 1204 \text{ m}^{-1}$$

در کلیه نتایج بدست آمده از شبیه سازی هایی که در بخش نتایج بحث خواهد گردید، پارامترها مطابق با آنچه در این بخش ذکر شده مورد استفاده قرار گرفته است مگر در مواردی که خلاف آن ذکر شده است.

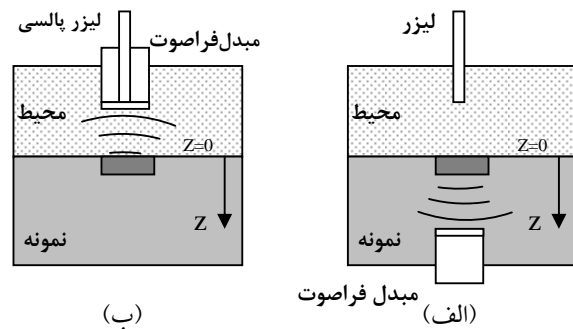
با استفاده از روابط و پارامترهای ذکر شده و شرایطی مطابق شکل ۱، شبیه سازی های زیادی به منظور بررسی اثر

در معادلات فوق از β^* در مورد جامدات ایزوتروپیک، که از رابطه $\beta^* = \beta(1 - 4c_s^2 / 3c_0^2)$ پیروی می کند استفاده شده است. c_s سرعت امواج shear می باشد.

موج فوتوآکوستیک ایجاد شده با انتشار در داخل محیط شفاف (حالت رو به پشت) و یا نمونه جاذب (حالت رو به جلو) تغییر شکل می دهد. پدیده اصلی که موجب اعوجاج نمایه اپتوآکوستیک اولیه می شود، پراش آکوستیک، تضعیف آکوستیکی و پاسخ آشکار ساز به فرکانس فراصوت در سیگنال آشکار شده می باشد. اعوجاجات اضافی نیز می تواند بدلیل سختی بافت تحت تابش و برخورد کور موج آکوستیک به روزنه ترنسدیوسر نیز رخ دهد. تغییر شکل در اثر پراش آکوستیک با تابع تبدیل زیر مدل می شود [۱۴].

$$H_d(\omega) = \exp\left[-\frac{r_{\perp}^2}{a_0^2} - \frac{\omega}{\omega + i\frac{2c_0z}{a_0^2}}\right] (\omega + i\frac{2c_0z}{a_0^2})^{-1} \omega \quad (6)$$

در معادله (۶) a_0 شعاع سطح مقطع موج فراصوت اولیه و r_{\perp} فاصله شعاعی ترنسدیوسر از مرکز پرتو لیزر و Z فاصله طولی در راستای محور از سطح تولید کننده می باشد.

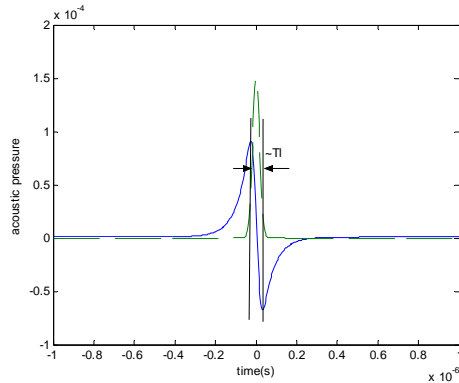


شکل ۱- ثبت سیگنال فوتوآکوستیک (الف) در حالت رو به جلو و (ب) در حالت رو به پشت

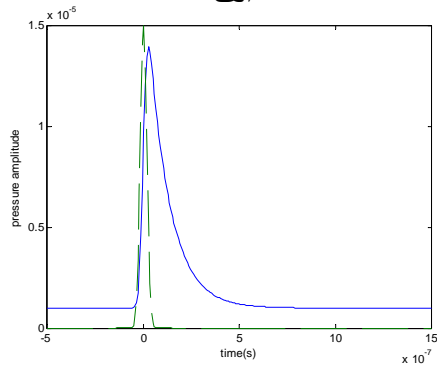
۳- شبیه سازی

با استفاده از معادلات (۲) تا (۵) شبیه سازی نرم افزاری به منظور پیش بینی شکل موج فراصوت تولیدی بدون در نظر

1 - Signal processing
2 - curve fitting



الف



ب

شکل ۲- سیگنال فوتواکوستیک اولیه در فیلتر با چگالی خنثی در حالت (الف) رو به جلو و (ب) رو به پشت، در مقایسه با پالس لیزر

۴-۱- اثر عرض پالس لیزر بر ویژگیهای فراصوت تولیدی

به منظور بررسی اثر عرض پالس بر شکل موج فراصوت تولیدی اثر عرض پالس لیزر بر دامنه و نیز محتوای فرکانسی شکل موج فراصوت مورد بررسی قرار گرفت.

در شکل ۳ (الف) طیف فوریه دو سیگنال فوتواکوستیک در حالت رو به جلو متناظر با کاربرد لیزرهایی با عرض ۱۰ نانو ثانیه و ۴۰ نانو ثانیه نشان داده شده است. در شکل ۳ (ب) نیز سیگنالهای متناظر در حالت رو به پشت نشان داده شده است. در این شکلها محور افقی محور فرکانس بر حسب هرتز و محور عمودی دامنه می باشد. همانگونه که در این دو شکل مشاهده می شود با افزایش عرض پالس لیزر در هر دو

پارامترهای مختلف صورت گرفت که نتایج آن در بخش بعدی آمده است.

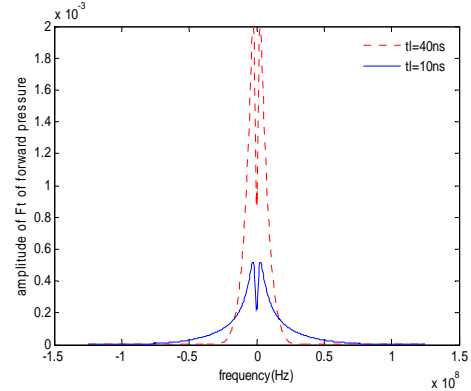
۴- نتایج شبیه سازی

با توجه به آنکه در روش لیزر- فراصوت ویژگیهای هدف تحت تابش و مشخصات لیزر تابشی تاثیر فراوانی در ویژگیهای فراصوت تولیدی دارد، میزان و چگونگی این تاثیر با استفاده از مدل ذکر شده ، شبیه سازی گردیده است و نتایج آن در ادامه آورده شده است.

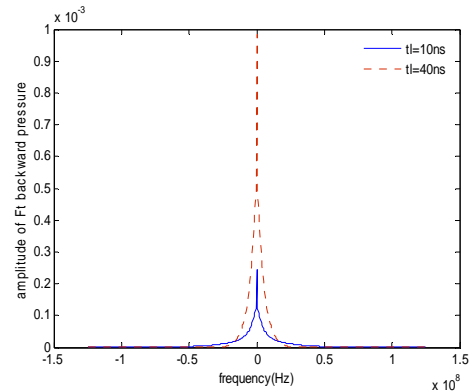
در شکل ۲ (الف) سیگنال فشار فوتواکوستیک تولید شده در حالت رو به جلو که در سطح نمونه (فیلتر شیشه ای) تولید شده و به داخل آن انتشار می یابد، نشان داده شده است. در این شکل محور افقی محور زمان و محور عمودی فشار اکوستیک می باشد. همان گونه که در شکل مشاهده می شود این سیگنال در حالتی که نمونه جاذب دارای امپدانس اکوستیکی بسیار بالاتر از محیط می باشد، یک سیگنال دو قطبی است و زمان نزول آن نیز در ناحیه انتقال همانگونه که در مقایسه با پالس لیزر در شکل نشان داده شده است، تقریباً برابر با عرض پالس لیزر می باشد.

در شکل ۲ (ب) سیگنال فوتواکوستیک اولیه در حالت رو به پشت نشان داده شده است در این حالت فرض شده است که مبدل فراصوت در داخل محیط شفاف (آب) قرار گرفته است. در این شکل نیز محور افقی محور زمان می باشد که صفر آن در مرکز پالس لیزر قرار گرفته و محور عمودی نشان دهنده فشار اکوستیک است. در این شکل نیز مشاهده می شود که زمان صعود پالس برابر با عرض پالس لیزر است.

حالت دامنه سیگنال افزایش اما محتوای فرکانسی آن کاهش می یابد.



الف

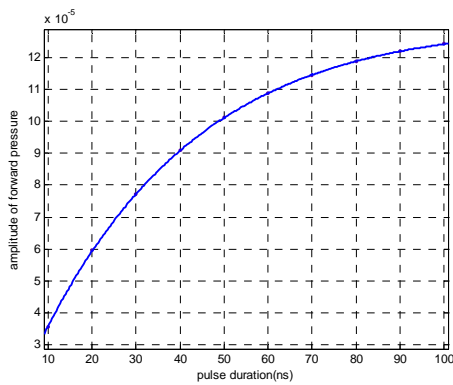


ب

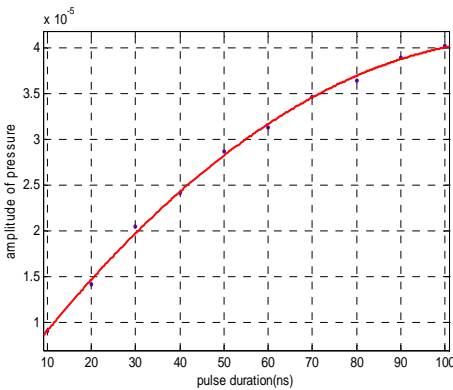
شکل ۳- طیف فوریه سیگنالهای فوتواکوستیک تولید شده در اثر استفاده از دو لیزر با طول موجهای متفاوت در حالت الف) رو به جلو و ب) رو به پشت

با در نظر گرفتن چندین عرض پالس متفاوت برای لیزر شکل موجهای فراصوت تولیدی شبیه سازی و دامنه ماکزیمم آنها استخراج شد و سپس نمودار دامنه بر حسب عرض پالس لیزر در هر دو حالت رو به جلو و رو به پشت رسم گردید که به ترتیب در شکلهای ۴(الف و ب) نشان داده شده است. در این نمودارها محور افقی محور عرض پالس لیزر بر حسب نانوثانیه و محور عمودی دامنه فراصوت می باشد. همانگونه

که از این نمودارها نیز مشاهده می شود با افزایش عرض پالس لیزر دامنه فراصوت افزایش می یابد اما توجه به این نکته حائز اهمیت است که در این روش نمی توان عرض برهمکنش میان لیزر و ماده دیگر از نوع فوتواکوستیک نخواهد بود و روابط استفاده شده در آنجا معتبر نیستند. در واقع به منظور تولید امواج فراصوت در نتیجه دریافت انرژی لیزر پالسی، لیزر باید عرض پالسی معادل چند ده نانوثانیه و یا کمتر داشته باشد.



الف



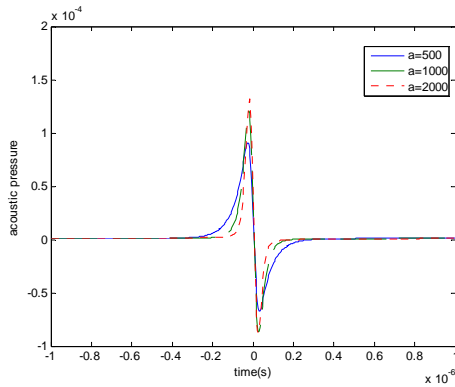
ب

شکل ۴- دامنه سیگنال فراصوت بر حسب عرض پالس لیزر در حالت الف) رو به جلو و ب) رو به پشت

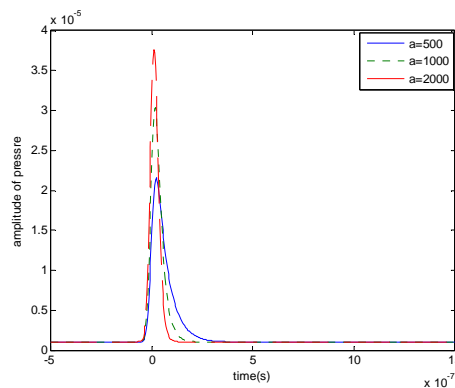
مدلسازی تولید فراصوت توسط لیزر

گذارد. لذا در اینجا به بررسی اثر ضریب جذب نمونه بر ویژگیهای فراصوت تولیدی پرداخته ایم، این تاثیر از طریق طیف جذبی هر ماده به طول موج لیزر مربوط می شود.

در شکل ۶ (الف) سیگنال فراصوت تولیدی در فیلتر ND با ویژگیهای ذکر شده در قبل اما در سه ضریب جذب متفاوت در حالت رو به جلو نشان داده شده است. در شکل ۶ (ب) همین مورد در حالت رو به پشت نشان داده شده است. همانگونه که در این شکلها مشاهده می شود با افزایش ضریب جذب دامنه فراصوت تولیدی افزایش میابد اما زمانهای صعود در حالت رو به جلو و زمان نزول در حالت رو به پشت کاهش میابد. در واقع در هر دو حالت این زمانها متناسب با $(\alpha c_0)^{-1}$ می باشند.



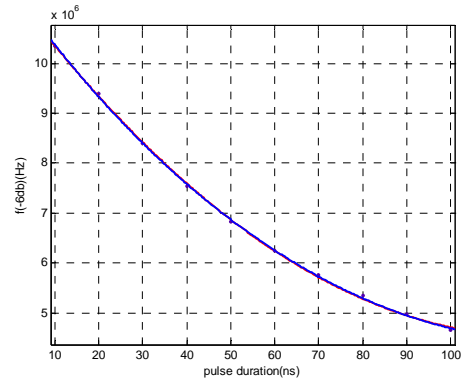
الف



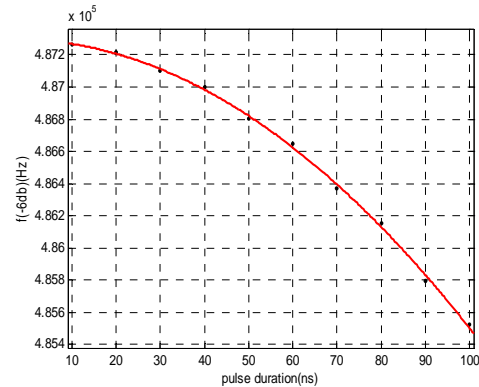
ب

شکل ۶- سیگنال فراصوت تولیدی در فیلتر ND با ضریب جذبهای متفاوت در حالت (الف) رو به جلو و (ب) رو به پشت

در ادامه این بررسی فرکانس -6db از طیف فوریه سیگنالهای فوتوآکوستیک متناظر با پالسهای لیزر با عرض های متفاوت استخراج و نمودار آن برحسب عرض پالسهای لیزر بکار رفته رسم شد. نمودارهای بدست آمده در حالت رو به جلو و رو به پشت بترتیب در شکلهای ۵ (الف) و (ب) نشان داده شده است. همانگونه که در این شکلها نیز مشاهده می شود، در هر دو حالت، با افزایش عرض پالس لیزر فرکانس سیگنال کاهش می یابد.



الف



ب

شکل ۵- فرکانس -6db سیگنال فراصوت بر حسب عرض پالس لیزر در حالت (الف) رو به جلو و (ب) رو به پشت

۴-۲ اثر طول موج لیزر بر ویژگیهای فراصوت تولیدی

از آنجا که مواد در طول موجهای مختلف ضریب جذب متفاوت دارند، طول موج لیزر بر ویژگیهای فراصوت تولیدی تاثیر می

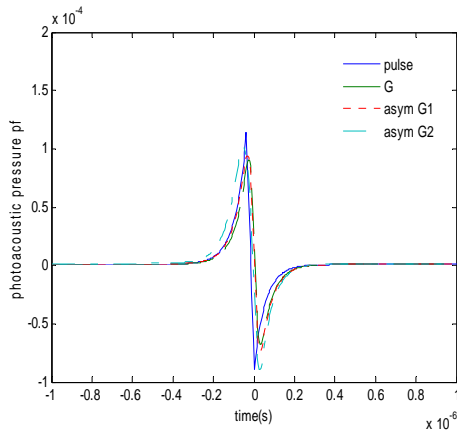
۳-۴ بررسی شکل پالس فوتواکوستیک در پاسخ به

لیزرهایی با نمایه های زمانی متفاوت

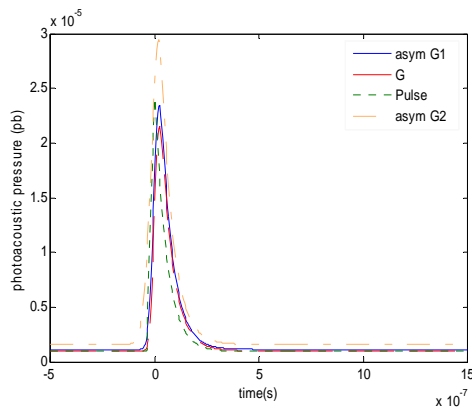
در این بررسی با استفاده از مدل، شکل سیگنال فوتواکوستیک تولیدی در پاسخ به سه لیزر با نمایه های پالس مربعی، گوسی و گوسی نامتقارن شبیه سازی گردید. از آنجا که در عمل نمایه زمانی پالسهای لیزر Q سوئیچ بصورت گوسی نامتقارن می باشد این بررسی به منظور مطالعه میزان تفاوت میان شکل سیگنالهای مدل شده با لیزرهای پالسی و گوسی متقارن با حالت واقعی انجام شده است.

در شکل ۷ چهار شکل پالس استفاده شده در این شبیه سازی شامل پالس مربعی، گوسی و دو نمونه گوسی نامتقارن نشان داده شده است.

پاسخ مدل به این چهار نوع پالس لیزر نیز در حالت های رو به جلو و رو به پشت بترتیب در شکل های ۸ (الف) و (ب) نشان داده شده است.



الف



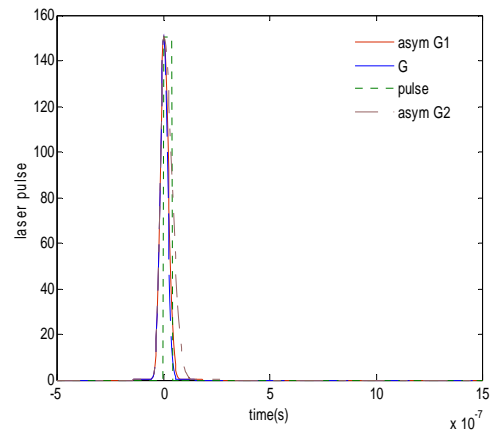
ب

شکل ۸- سیگنالهای فوتواکوستیک تولید شده در پاسخ به لیزرهای با نمایه زمانی متفاوت در حالت الف) رو به جلو و ب) رو به پشت

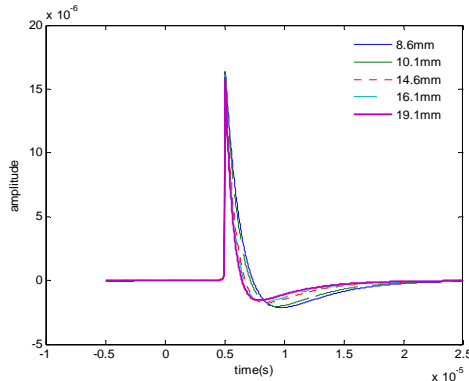
همانگونه که در این شکلها مشاهده می شود تفاوت چشمگیری بین سیگنالهای حاصل از پالسهای متفاوت لیزر بخصوص میان حالت گوسی و گوسی نامتقارن وجود ندارد و در بسیاری از موارد می توان با تقریب خوبی از این شکل پالسها در مدلسازی استفاده نمود.

۴-۴ بررسی اثر پراش اکوستیک در هنگام انتشار در محیط

با استفاده از رابطه ۶، پراش موج اکوستیک مدل شده است. بر این اساس از سیگنال اپتواکوستیک اولیه که در سطح ماده تولید می شود و در بخشهای قبل شبیه سازی گردید تبدیل



شکل ۷- چهار پالس لیزر با نمایه های زمانی متفاوت



ب

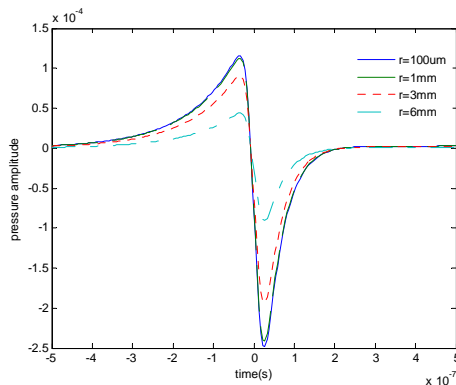
شکل ۹- شکل سیگنال فوتواکوستیک در فواصل مختلف از سطح نمونه در حالت الف) رو به جلو و ب) رو به پشت

همانگونه که در شکل ۹ (ب) مشاهده می شود در اثر انتشار در محیط، موج تک قطبی اولیه در حالت رو به پشت به یک موج دو قطبی تبدیل می شود.

در منطقه دور ($z \rightarrow \infty$) اثر پراش اکوستیک، مشتق گیری از نمایه اپتواکوستیک اولیه است. این اثر در ناحیه دور با رابطه زیر نشان داده می شود [۱۴].

$$p'(z, \tau, r_{\perp} = 0) = \frac{a_0^2}{2c_0 z} \frac{dp_0}{d\tau} \quad (۸)$$

در ادامه این تحقیق شکل موج اکوستیک در فاصله طولی برابر اما در فواصل شعاعی متفاوت از محور لیزر شبیه سازی گردید. نتایج این شبیه سازی در حالت های رو به جلو و رو به پشت بترتیب در شکل های ۱۰ (الف و ب) نشان داده شده است.



الف

فوریه گرفته و در تابع انتقال رابطه ۶ ضرب کرده ایم در نهایت با اعمال عکس تبدیل فوریه شکل زمانی سیگنال حاصل شده است.

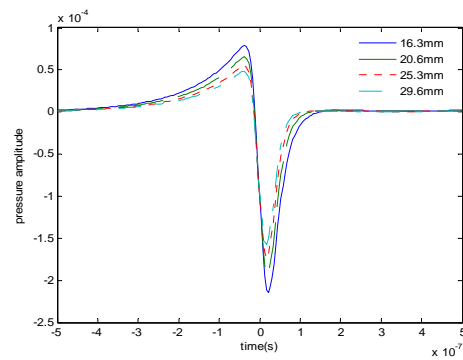
پارامترهای متغیر در این تابع شامل Z ، فاصله مبدل از سطح نمونه در راستای محور عبوری از مرکز فیبر لیزر، r_{\perp} ، فاصله شعاعی مبدل از محور مرکز فیبر و a_0 شعاع منبع فراصوت اولیه می باشد در ادامه این بررسی به مطالعه اثر هر یک از این پارامترها بر شکل موج فراصوت پرداخته ایم.

در بررسی اثر فاصله از سطح نمونه، شکل موج فراصوت در چندین فاصله متفاوت شبیه سازی گردیده است که نتایج آن در حالت رو به جلو و رو به پشت بترتیب در شکل های ۹ (الف و ب) نشان داده شده است.

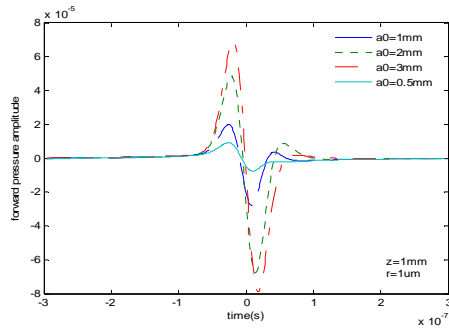
سطح مقطع پرتو اکوستیک، πa_0^2 ، در انتشار در فاصله ای معادل با طول موثر پراش، L_D ، دو برابر می شود [14].

$$L_D = \pi a_0^2 / \lambda_{ac} = a_0^2 \omega_{ac} / c_0 \quad (۷)$$

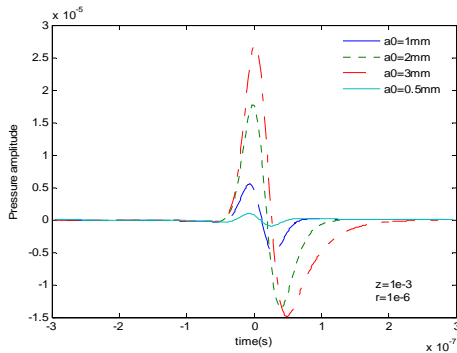
همانطور که در رابطه ۷ مشاهده می شود طول پراش به λ_{ac} که طول موج اکوستیک با فرکانس اولتراسونیک ω_{ac} می باشد، بستگی دارد. بنابراین اجزاء طیفی متفاوت نمایه اپتواکوستیک تحت درجات متفاوتی از پراش اکوستیک قرار می گیرند. فرکانسهای کمتر اولتراسونیک بیشترین تغییر را در نمایه اپتواکوستیک ایجاد می کنند. فرکانسهای بالاتر تحت کمترین پراش اکوستیک قرار می گیرند و عموماً در طول محور عمود بر جبهه اکوستیک منتشر می شوند.



الف



الف



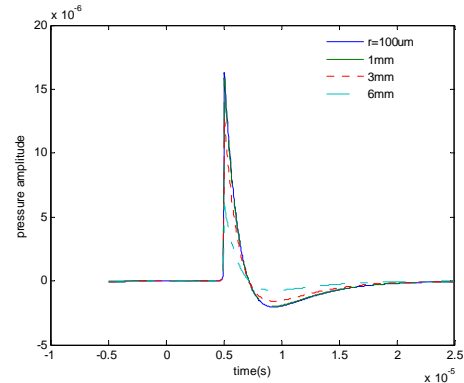
ب

شکل ۱۱- شکل سیگنال فوتواکوستیک در نتیجه استفاده از لیزر با قطر پرتو متفاوت در حالت الف) رو به جلو و ب) رو به پشت

مشاهده می شود که با افزایش شعاع پرتو لیزر بر سطح نمونه دامنه سیگنال و عرض آن افزایش می یابد. نتایج شبیه سازیهای انجام شده، با آنچه در منابع معتبر بصورت تئوریک و یا کیفی، بیان یا پیش بینی شده است، همخوانی مناسبی دارد [۱، ۱۴، ۱۷].

۵- بحث

با توجه به این که کاربردهای روش لیزر- فراصوت گستره بسیار وسیعی را شامل می شود که هر کاربرد از یک و یا چند ویژگی خاص امواج تولید شده استفاده می کند، انتخاب سیستم مناسب و با کارایی مطلوب که از نظریه سازی سخت افزاری نیز با مشکل مواجه نشود نیازمند انجام آزمایشهای زیاد و در بسیاری از



ب

شکل ۱۰- شکل سیگنال فوتواکوستیک در فواصل شعاعی مختلف از محور پرتو لیزر در حالت الف) رو به جلو و ب) رو به پشت

با توجه به شکلهای فوق مشاهده می کنیم که با افزایش فاصله شعاعی از محور اپتواکوستیک، اعوجاج سیگنال بیشتر می باشد با توجه به این نکته و از آنجا که فرکانسهای بالای فراصوت در نزدیک محور اپتواکوستیک متمرکز هستند، بیشترین رزولوشن می تواند با آشکارسازی نمایه اپتواکوستیک که در طول محور پرتو لیزر منتشر می شود، بدست آید.

در بررسی دیگری به مطالعه اثر شعاع منبع فراصوت اولیه که تحت تاثیر قطر پرتو لیزر در سطح نمونه می باشد، پرداختیم. قطر پرتو لیزر در سطح نمونه علاوه بر قطر اولیه پرتو لیزر به فاصله فیبر از سطح جاذب نیز بستگی دارد لذا از نتایج بدست آمده می توان اثر فاصله فیبر را نیز مشاهده نمود اما اثر کاهش شدت پرتو لیزر با افزایش فاصله باید حالت نظر قرار گیرد.

سیگنال فوتواکوستیک حاصله در Z و r₁ برابر اما شعاعهای منبع متفاوت در حالتی رو به جلو و رو به پشت شبیه سازی گردید که نتایج آن در شکلهای ۱۱) الف و ب) نشان داده شده است.

تولید فراصوت، مورد بررسی قرار گرفت. مشاهده شد که با افزایش عرض پالس لیزر دامنه فشار اپتواکوستیک افزایش و محتوای فرکانسی آن کاهش می یابد. بررسی اثر شکل پالس لیزر نیز نشان داد که تفاوت چندانی میان امواج اپتواکوستیک القایی توسط لیزر با پالس گوسی متقارن و گوسی نامتقارن (پالس واقعی) وجود ندارد و در بسیاری از موارد می توان با تقریب خوبی از این شکل پالسها در مدلسازی استفاده نمود. در مورد طول موج نیز مشاهده شد که در طول موجهایی که جذب ماده در آن طول موج بیشتر است، کارایی تولید امواج اپتواکوستیک بیشتر است. سپس اثر پراش اکوستیکی در هنگام انتشار موج در محیط تا رسیدن به مبدل مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از این مدل و نتایج شبیه سازیهای انجام شده، می توان در هر مورد با تست پارامترهای مختلف سیستمهای لیزری موجود، سیستم بهینه را از نظر حداکثر کارایی انتخاب نمود. همچنین از این مدل به منظور کالیبراسیون و پیش گویی نتایج آزمایشها می توان بهره جست.

موارد پرهزینه می باشد. گریز از خطاهای انسانی و ابزاری نیز در این آزمایشها همچون هر آزمایش دیگری میسر نخواهد بود. در گذشته پاره ای از پژوهشگران به مدلسازی این روش و انجام آزمایشات تحت شرایط خاص پرداخته اند، اما همچنان نبود وجود برنامه یا نموداری راهنما که بتواند به سادگی کاربر و یا طراح سیستم را به نقطه مطلوب هدایت کند، احساس می شد. شبیه سازی انجام شده در این تحقیق و نتایج بدست آمده با بررسی اثر هر پارامتر و ارائه نمودار چگونگی این تاثیر می تواند کاربر و یا طراح یک سیستم را با توجه به نوع کاربرد و محدودیتهایی که در عمل با آن مواجه است، تا حدود زیادی به نقطه کار مطلوب هدایت نماید.

۶- نتیجه گیری

در این پژوهش مدلی برای فشار ایجاد شده در ماده در نتیجه دریافت انرژی لیزر پالسی در یک رژیم ترموالاستیک ارائه گردید. سپس با استفاده از این مدل اثر عرض، شکل پالس و طول موج لیزر و نیز ضریب جذب هدف جاذب درکارایی

منابع

1. Scruby C. B., Drain L. E., Laser Ultrasonics: techniques and applications. Hilger, New York, 1990.
2. Zhang X R, Shen Z H, Zhang F F, Zhang G., Laser ultrasound characterization of Nanophase TiOceramic films sputtered on Si substrate. Analytical sciences 2001; 17: 131-142.
3. Corbani F., Delv"o P, Fiorina L, Mariottini, C, Rizzi M L., Speckle interferometry, fiber optic sensors and laser induced ultrasounds as solutions to industrial demands. Optics and Lasers in Engineering 2002; 37: 369-383.
4. Goldman L., The biomedical laser: Technology and clinical applications. Springer-verlag 1996.
5. Verga Scheggi A. M., Martellucci S., Chester A. N., Pratesi R., biomedical optical instrumentation and laser assisted biotechnology. Kluwer Academic Publisher 1999.
6. Roome K. A., Payne P. A., Dewhurst R. J., Towards a sideways looking intravascular laser-ultrasound probe. Sensors and Actuators 1999; 76:197-202.

7. Wang X, Ku G, Wegiel M A, Bornhop D J, Stoica G, Wang L H, Non-invasive photoacoustic angiography of animal brains in vivo with NIR light and an optical contrast agent. *Optics Letters* 2004; 29 (7): 730–732.
8. Wang X., Pang Y., Ku G., Stoica G., Wang L. H., Three-dimensional laser-induced photoacoustic tomography of mouse brain with the skin and skull intact. *Optics Letters* 2003; 28 (19): 1739-1741.
9. Xu Y., Wang L. H., Effects of acoustic heterogeneity on thermoacoustic tomography in the breast. *IEEE Transactions on Ultrasonic Ferroelectrics and Frequency Control* 2003; 50 (9): 1134-1146.
10. Wang X, Pang Y, Ku G, Xie X, Stoica G, Wang L H., Non-invasive laser-induced photoacoustic tomography for structural and functional imaging of the brain in vivo. *Nature Biotechnology* 2003; 21(7): 803-806.
11. Wang X., Xu Y., Xu M., Yokoo S., Fry E. S., Wang L. H., Photoacoustic tomography of biological tissues with high cross-section resolution: Reconstruction and experiment. *Medical Physics* 2002; 29 (12): 2799–2805.
12. Wang L. V., ultrasound-mediated biophotonic imaging: A review of acousto-optical tomography and photo-acoustic tomography. *Disease Markers* 2003; 19: 123-138.
13. Sadr A, Hasani F., Photoacoustic measurement for characterization of the eye, In Proc 13th ICCE2005.
14. Vo-Dinh T., *Biomedical photonics handbook*. CRC - TAYLOR & FRANCIS 2003.
15. Wang L.V., Photoacoustic tomography of biological tissues with high cross-section resolution: Reconstruction and experiment, *Med. Phys* 2002; 29 (12): 141-157.
16. Shan Q., Dewhurst R J, Kuhn A, Pang K F, Payne P A., Modeling of a photoacoustic probe designed for medical applications. *Ultrasonics* 1996; 34: 575-577.
17. Boonsang S., Dewhurst R. J., Pulsed photoacoustic signal Characterization incorporating near- and far-field diffraction effects. *Measurement Science and Technology* 2005; 16: 885–899.