

## طراحی و شبیه‌سازی افزاره‌های امواج صوتی سطحی (SAW) بر بستر $\text{LiNbO}_3$ با برش $YX$ - $128^\circ$

محمد مهدی مهرنگار<sup>۱</sup>، محمد کاظم مروج فرشی<sup>۲</sup>، سارا درباری<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> استادیار دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه ملایر، [mzamani@malayeru.ac.ir](mailto:mzamani@malayeru.ac.ir)

<sup>۲</sup> استاد، دانشگاه تربیت مدرس

<sup>۳</sup> استادیار، دانشگاه تربیت مدرس، [s.darbari@modares.ac.ir](mailto:s.darbari@modares.ac.ir)

### چکیده

در این مقاله، اصول طراحی افزاره‌های امواج صوتی سطحی (SAW) بر بستر  $\text{LiNbO}_3$  با برش  $YX$ - $128^\circ$  ارائه می‌شود. این نوع افزاره‌ها کاربردهای زیادی در زمینه حسگرهای گازی، دما، رطوبت، فشار، گشتاور و همچنین فیلترهای مخابراتی دارند. در این مقاله، شبیه‌سازی‌ها به صورت سه‌بعدی و به روش المان متناهی انجام می‌شود. در این شبیه‌سازی‌ها، تاثیر پارامترهای گوناگون ساختار، مانند فاصله و تعداد الکترودها، دامنه و فرکانس سیگنال الکتریکی، میزان تلفات و همچنین ضخامت بستر بر موج SAW منتشر شده، بررسی می‌شود. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که فاصله الکترودها با عکس فرکانس و دامنه جابجایی اتم‌های سطحی با دامنه سیگنال اعمالی متناسب است. براساس نتایج حاصله، تعداد بهینه جفت الکترودها برای ولتاژ الکتریکی ۵۰ ولت و تلفات بستر ۰.۰۱ dB به ازای یک دوره تناوب، برابر با ۳۴ جفت است. از طرف دیگر، برای اینکه موج ریلی با طول موج متناسب با دوره تناوب الکترودهای طراحی شده انتشار یابد، ضخامت بستر نباید از نصف دوره تناوب کمتر باشد.

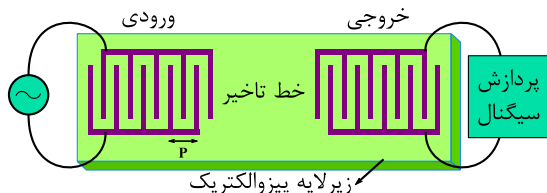
### کلیدواژه

امواج صوتی سطحی، پیزوالکتریک، امواج ریلی،  $\text{LiNbO}_3$

### مقدمه

امواج می‌توان در طراحی و ساخت حسگرهای دما [۳]، رطوبت [۴]، گاز، تابش فرا بنفش [۵] و همچنین حسگرهای فشار، گشتاور و جرم استفاده کرد [۶].

شمای ساختار یک حسگر SAW بر بستر پیزوالکتریک در شکل ۱ نشان داده شده است. همانگونه که در شکل دیده می‌شود، دو دسته الکترودهای روی بستر پیزوالکتریک قرار داده شده است که به مبدل‌های شانه‌ای (IDTs) نیز معروفند. همچنین، فاصله میان این دو دسته الکترودها به خط تاخیر معروف است.



شکل ۱. ساختار کلی یک حسگر SAW

امواج صوتی سطحی (SAW)، امواج مکانیکی هستند که در سطح مواد پیزوالکتریک منتشر می‌شوند. این امواج گونه‌های مختلفی مانند ریلی<sup>۱</sup>، لائو<sup>۲</sup> و لمب<sup>۳</sup> دارند، و تولید و انتشار هر کدام به محیط و شرایط ویژه‌ای نیاز دارد [۱]. دانستن این شرایط، محدودیت‌ها و ویژگی‌های امواج صوتی سطحی برای استفاده از آنها در طراحی و ساخت افزاره‌های مختلف ضروری است. سهولت امکان ساخت افزاره‌های امواج ریلی، این امواج را به یکی از پر کاربردترین امواج صوتی سطحی تبدیل کرده است. تولید موج ریلی تنها بر بستر پیزوالکتریک<sup>۴</sup> با جهت بلوری خاص، که امکان انتشار آن را فراهم می‌کند، و با الکترودهای فلزی میسر می‌شود.

یکی از کاربردهای گوناگون امواج صوتی سطحی در طراحی و ساخت فیلترهای مخابراتی با نویز کم است [۲]. همچنین از این

<sup>۱</sup> Interdigitated Transducers  
<sup>۲</sup> Delay Line

<sup>۱</sup> Surface Acoustic Waves  
<sup>۲</sup> Rayleigh  
<sup>۳</sup> Love  
<sup>۴</sup> Lamb  
<sup>۵</sup> Piezoelectric

$\lambda$  دوره تناوب موج ریلی و  $\gamma$  فاصله از سطح بستر در جهت عمق است [7].

موج ریلی در حین انتشار سطح بستر را به شکل سینوسی در می‌آورد. مشخصات این موج سینوسی را میتوان با دستکاری پارامترهای مختلف کنترل کرد.

افزاره‌های موج صوتی سطحی گونه‌ای از افزاره‌های تشدیدی اند. به عبارت دیگر، برای انتشار بهینه موج صوتی باید شرایط تشدید در این افزاره‌ها فراهم شود. فرکانس سیگنال الکتریکی مناسب برای شرایط تشدید جهت اعمال به الکترودها از رابطه ۲ به دست می‌آید.

$$f_0 = \frac{v}{P} \quad (2)$$

که در آن  $f_0$  فرکانس مرکزی سیگنال الکتریکی اعمالی به الکترودها،  $v$  سرعت صوت در بستر (جدول ۱) و  $P$  فاصله میان دو شاخه متوالی در هریک از شانه‌ها (شکل ۱) است. بنابراین برای تولید شکل موج با دوره تناوب  $\lambda = 250 \text{ nm}$  به آرایه‌ای از زوج الکترودهایی با دوره تناوب  $P = \lambda$  و سیگنال الکتریکی با فرکانس 16 GHz نیاز است.

### معادله‌های حاکم بر انتشار امواج سطحی

تولید و انتشار موج‌های سطحی بر بستر پیزوالکتریک، توسط روابط ماتریسی الکترومکانیکی جفت شده در رابطه‌های ۳ و ۴ توصیف می‌شوند [۸]. برای حل عددی این معادله‌ها در این پژوهش از روش المان متناهی [۸] استفاده شده است.

$$\mathbf{T} = \mathbf{c}_E \cdot \mathbf{S} - \mathbf{e}' \cdot \mathbf{E} \quad (3)$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{e} \cdot \mathbf{S} + \boldsymbol{\varepsilon}^s \cdot \mathbf{E} \quad (4)$$

که در آن  $\mathbf{T}$  بردار استرس،  $\mathbf{S}$  بردار کرنش،  $\mathbf{E}$  بردار شدت میدان الکتریکی و  $\mathbf{D}$  بردار جابجایی الکتریکی است. همچنین  $\mathbf{c}_E$  و  $\mathbf{e}$  به ترتیب ماتریس‌های ثابت‌های الاستیک برای میدان الکتریکی ثابت، گذردهی برای کرنش ثابت و ضریب پیزوالکتریک بستر اند. بالانویس  $t$  نشانگر ترانهاده ماتریس است [9].

### نتایج شبیه‌سازی

همانطور که پیشتر گفته شد، تنها در صورت فراهم شدن شرایط تشدید، انتشار موج ریلی در افزاره‌های SAW میسر می‌شود. برای مشاهده رفتار این افزاره‌ها در فرکانس‌های مختلف، برای الکترودهایی با دوره تناوب  $P = 250 \text{ nm}$  جابه‌جایی اتم‌های

اعمال سیگنال الکتریکی به الکترودها توسط مبدل ورودی به موج صوتی سطحی تبدیل شده و منتشر می‌شود. موج منتشر شده پس از عبور از خط تاخیر توسط مبدل خروجی دوباره به سیگنال الکتریکی تبدیل می‌شود.

مشخصات موج منتشر شده به سرعت انتشار صوت در ماده خط تاخیر بستگی دارد، که سرعت انتشار مطابق با رابطه ۱ به مدول یانگ  $(E)$  و چگالی ماده  $(\rho)$  وابسته است.

$$v \propto \sqrt{E/\rho} \quad (1)$$

مدول یانگ و چگالی با اعمال فشار بر خط تاخیر یا تماس سطح آن با مواد شیمیایی مختلف به صورت موضعی تغییر می‌کند، و منجر به تغییر سرعت انتشار صوت و در نتیجه تغییر دامنه، فرکانس و فاز آن موج می‌شود. مشاهده این تغییرات با مقایسه سیگنال‌های خروجی و ورودی میسر می‌شود.

### ساختار افزاره‌های SAW

همانطور که گفته شد افزاره‌های SAW از یک بستر پیزوالکتریک که الکترودهای فلزی روی آن قرار می‌گیرند، تشکیل می‌شود. مشخصات برخی از مواد پیزوالکتریک به عنوان بستر مناسب برای انتشار امواج صوتی سطحی در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات مواد پیزوالکتریک [۶]

ضریب جفت شدگی الکترومکانیکی (%)	سرعت صوت (m/s)	جهت برش بلوری	بستر پیزوالکتریک
۰	۳۱۵۹	Y, X	Quartz
۰/۱۶	۳۱۵۹	Y ST, X	Quartz
۰/۷۶	۳۲۳۰	Y, Z	LiTaO <sub>3</sub>
نامشخص	۳۳۹۴	۱۶۷° Y, X	LiTaO <sub>3</sub>
۴/۶	۳۴۸۸	Y, Z	LiNbO <sub>3</sub>
۵/۶	۳۹۹۲	۱۲۸° Y, X	LiNbO <sub>3</sub>

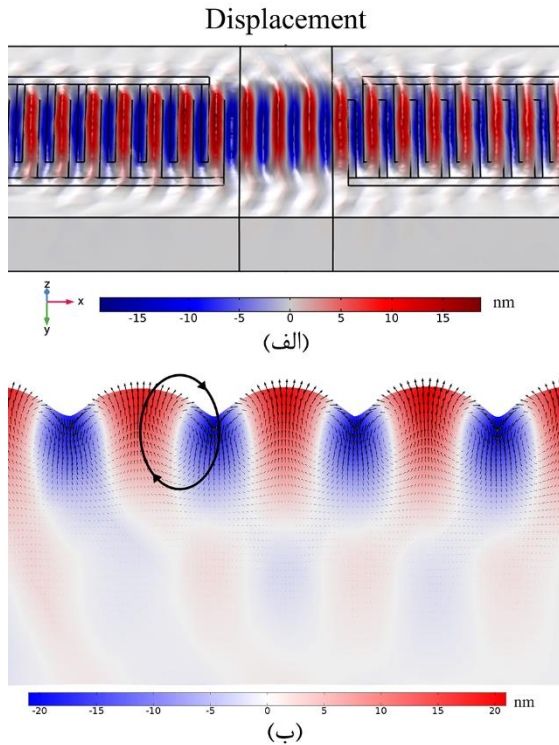
در این پژوهش،  $\text{LiNbO}_3$  با برش  $YX$ -۱۲۸° به عنوان بستر پیزوالکتریک که دارای ضریب جفت شدگی الکترومکانیکی بزرگی است در نظر گرفته شده است.

با اعمال ولتاژ متناوب به الکترودها، موج ریلی روی سطح تولید شده و شروع به انتشار می‌کند. موج ریلی نوع خاصی از امواج سطحی است که در آن اتم‌ها هم به صورت طولی و هم عرضی<sup>۱۰</sup> جابجا می‌شوند. مؤلفه عرضی جابجایی اتم‌ها با فاصله گرفتن از سطح به صورت  $e^{-2\pi y/\lambda}$  به طور نمایی کاهش می‌یابد که در آن

<sup>۱۰</sup> Transverse Finite element method

<sup>۱۱</sup> Young's modulus Longitudinal

اعمال سیگنال الکتریکی به الکترودهای روی بستر به صورت سطحی منتشر می‌شود.

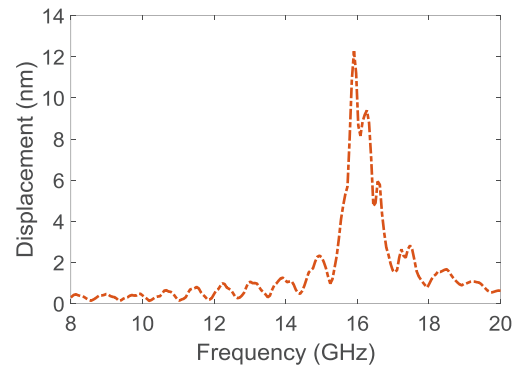


شکل ۳. (الف) نمای سه‌بعدی و (ب) برش جانبی انتشار موج صوتی سطحی با دوره تناوب ۲۵۰ nm. بردارها در برش جانبی جهت جابجایی اتم‌های سطحی و میله‌های رنگی زیر شکل‌ها مقدار جابجایی مولفه عمودی (عرضی) را نشان می‌دهند.

### تاثیر دامنه ولتاژ اعمالی، تعداد جفت الکترودها و میزان تلفات بر دامنه موج سطحی

اندازه دامنه ولتاژ اعمال شده به الکترودها با دامنه جابجایی اتم‌های سطحی در ماده پیزوالکتریک ارتباط دارد (طبق معادلات ۳ و ۴). هرچه دامنه ولتاژ بیشتر باشد، میزان کرنش نتیجه شده و دامنه جابجایی‌ها هم بیشتر می‌شود. همچنین به دلیل محدودیت ضریب جفت شدگی الکترومکانیکی، با یک جفت الکترودها جابجایی اتم‌های سطحی ناچیز خواهد بود. البته همانطور که در بخش‌های قبل نمایش داده شد، با داشتن آرایه‌ای تناوبی از جفت الکترودهای شانه‌ای با دوره تناوب معین، می‌توان دامنه جابجایی اتم‌های سطحی را به اندازه محسوسی افزایش داد. شکل ۴ تاثیر همزمان دو پارامتر ولتاژ الکتریکی و تعداد جفت الکترودها بر میزان مولفه عمودی جابجایی اتم‌های سطحی را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل دیده می‌شود، رابطه مولفه عمودی دامنه جابجایی اتم‌های سطحی با دامنه ولتاژ اعمالی به الکترودها خطی است. البته باید توجه داشت که برای

سطحی برحسب فرکانس محاسبه و نتایج حاصل در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. دامنه جابجایی اتم‌های سطحی در راستای عمود بر سطح بستر (عرضی) برای فرکانس‌های مختلف.

همانطور که در این شکل دیده می‌شود، بیشینه دامنه جابجایی اتم‌های سطحی در حوالی فرکانس ۱۶ GHz رخ می‌دهد. این فرکانس مطابق رابطه ۲ متناظر با دوره تناوب ۲۵۰ نانومتری الکترودهاست.

در ادامه شبیه‌سازی را با پارامترها و مقادیر داده شده در جدول ۲ انجام می‌دهیم، تا نحوه انتشار موج ریلی را مشاهده کنیم.

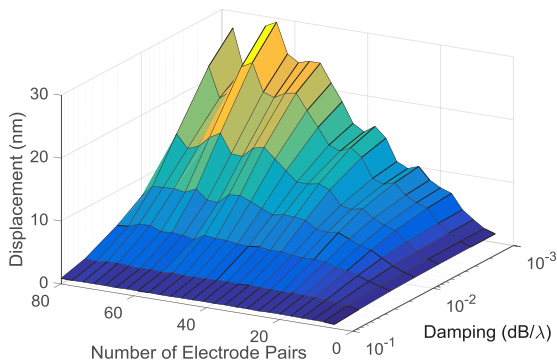
جدول ۲. پارامترهای شبیه‌سازی

پارامتر	مقدار
سرعت صوت در بستر	۳۹۹۲ m/s
فرکانس اعمالی	۱۶ GHz
فاصله الکترودها (P)	۲۵۰ nm
دامنه ولتاژ	۵۰ V
تعداد جفت الکترودها	۳۴

نمای سه‌بعدی موج سطحی منتشر شده که باعث تغییر شکل سطح بستر شده در ۳. (الف) و برش جانبی آن در شکل ۳ (ب) نمایش داده شده است.

همانطور که در شکل ۳ (ب) به وضوح مشاهده می‌شود، سطح بستر در اثر انتشار موج سطحی تغییر شکل پیدا کرده است. جهت بردارهای نشان داده شده در این شکل جهت جابجایی اتم‌های سطحی را نشان می‌دهند و اندازه آن‌ها متناسب با مقدار جابجایی است. مولفه‌های طولی و عرضی این بردارها نمایشگر حرکت بیضی‌وار اتم‌هاست و با ویژگی‌های امواج ریلی همخوانی دارد. همچنین، رنگ بندی شکل و اندازه بردارهای جابجایی به وضوح نشان می‌دهد، با فاصله گرفتن از سطح به طرف داخل بستر از اندازه جابجایی اتم‌ها کاسته می‌شود؛ به طوری که در عمق ماده به صفر می‌رسد. به عبارت دیگر موج ایجاد شده در اثر

می‌رسد زیرا موج ریلی تولیدی توسط الکترودهای دورتر، در مسیر رسیدن به الکترودهای نزدیک‌تر میرا شده و نمی‌تواند با امواج تولید شده توسط آن‌ها تداخل سازنده ایجاد کنند.



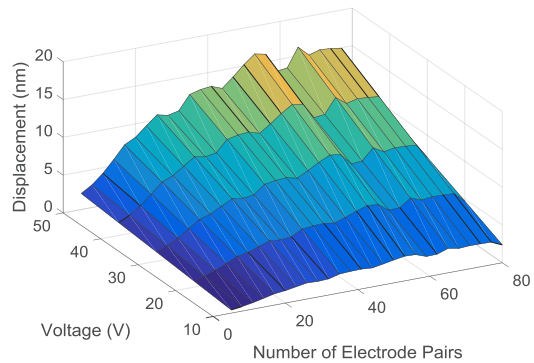
شکل ۵- وابستگی دامنه مولفه عمودی جابجایی اتم‌های سطحی به تعداد جفت الکترودها و میزان تلفات. دامنه ولتاژ الکتریکی اعمالی ۵۰ ولت در نظر گرفته شده است.

### تأثیر ضخامت بستر بر انتشار موج سطحی

با این‌که امواج ریلی در سطح بستر منتشر می‌شوند، اگر بستر از حد معینی نازکتر شود، اندازه ضخامت آن می‌تواند انتشار این امواج را تحت تأثیر قرار دهد. برای یافتن حداقل ضخامت لازم برای اینکه روی انتشار اثر نگذارد انتشار موج‌های سطحی بر روی بستری به ضخامت‌های ۱۰۰ نانومتر تا ۷ میکرومتر، و ۳۴ زوج الکترودها با دوره تناوب ۹/۲۲ میکرومتر با تلفات ۰.۰۱ dB/λ شبیه‌سازی شده است. نمای سه‌بعدی انتشار امواج سطحی برای ضخامت‌های ۰/۵، ۱، ۲، ۵ و میکرومتر به ترتیب در شکل‌های ۶ (الف) تا ۶ (د) نمایش داده شده است. میله رنگی در سمت راست شکل‌ها نمایشگر اندازه دامنه جابجایی اتم‌های سطحی است. همانگونه که از مقایسه این چهار شکل ملاحظه می‌شود، وقتی ضخامت بستر از پنج میکرومتر کمتر باشد دوره تناوب انتشار موج در راستای طولی ( $x$ ) کمتر از مقدار به دست آمده از رابطه ۲ می‌شود. برای بهتر دیده شدن این پدیده، نقشه رنگی تغییرات دامنه جابجایی اتم‌ها را برحسب ضخامت (محور عمودی) و مکان  $x$  (محور افقی) در شکل ۶ (ه) نمایش داده‌ایم. علت این پدیده حرکت بیضی شکل اتم‌ها در موج ریلی و وجود مؤلفه عرضی آن است. طبق رابطه  $e^{-2\pi y/\lambda}$ ، وقتی که عمق بیشتر از  $\frac{\lambda}{2}$  (در اینجا حدود ۵ میکرومتر) شود مقدار جابجایی اتم‌ها در عمق به کمتر از ۵٪ می‌رسد و عملاً اتم‌ها در عمق از جای خود حرکت نمی‌کنند. بنابراین اگر ضخامت لایه کمتر از  $\frac{\lambda}{2}$  شود موج انتشاری تحت تأثیر قرار می‌گیرد و شعاع بیضی‌ای که اتم‌ها حول آن حرکت می‌کنند کمتر شده و در نتیجه دوره تناوب کاهش می‌یابد.

اندازه دامنه ولتاژ، حد بالایی وجود دارد که بر اساس ولتاژ شکست الکتریکی ماده بستر تعیین می‌شود. لازم به ذکر است بیشینه میدان الکتریکی حاصل از سیگنال الکتریکی با حداکثر دامنه ۵۰ ولت اعمال شده به الکترودی با دوره تناوب ۲۵۰ نانومتر، از میدان آستانه شکست بستر کوچکتر است [۱۰]. همچنین رابطه خطی مولفه عمودی جابجایی اتم‌های سطحی با ولتاژ به ازای هر تعداد جفت الکترودها برقرار است.

از طرف دیگر، همانطور که در شکل دیده می‌شود، با افزایش تعداد جفت الکترودها، در ابتدا دامنه جابجایی اتم‌های سطحی به شکل خطی افزایش می‌یابد، و سپس به تدریج از شیب خط کاسته شده و روند افزایشی به اشباع می‌رسد. رفتار افزایشی مشاهده شده ناشی از تداخل سازنده موج ایجاد شده توسط هر جفت الکترودها با موج‌های تولید شده توسط سایر جفت الکترودها است. اما مشاهده رفتار اشباع در روند افزایشی به دلیل تلفات موج ریلی در حین انتشار است، به نحوی که موج‌های تولید شده توسط الکترودهای دورتر تا زمان رسیدن به اولین الکترودها تلف شده و از بین می‌روند و نمی‌توانند تداخل سازنده‌ای داشته باشند. به عنوان مثال، همانطور که در شکل ۴ دیده می‌شود، برای ولتاژ ۵۰ ولت با حدود ۳۴ جفت الکترودها، اندازه دامنه مولفه عمودی جابجایی به اشباع می‌رسد. لازم بذکر است میزان تلفات در  $\text{LiNbO}_3$  معمولاً در گستره ۰.۰۰۱ dB تا ۰.۰۱ dB به ازای هر دوره تناوب است [۱۱]، [۱۲]. در این شبیه‌سازی مقدار تلفات ۰.۰۱ dB/λ در نظر گرفته شده است.

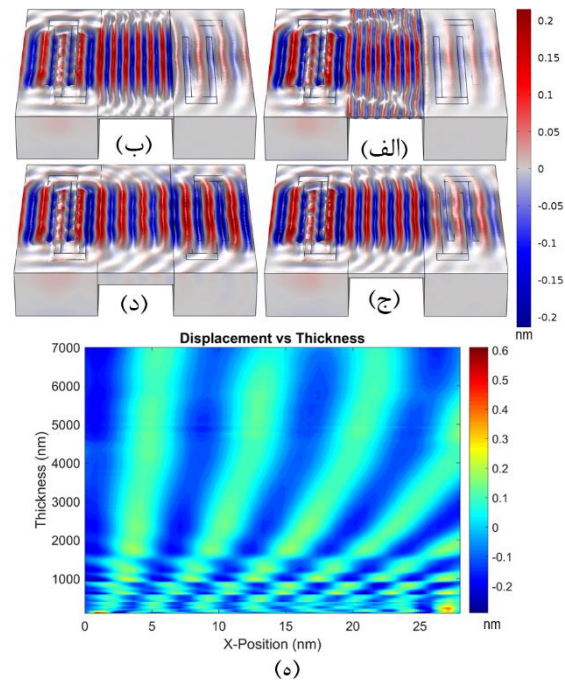


شکل ۴- وابستگی دامنه مولفه عمودی جابجایی اتم‌های سطحی به تعداد جفت الکترودها و ولتاژ الکتریکی. میزان تلفات ۰.۰۱ dB/λ در نظر گرفته شده است.

در ادامه کار، اثر همزمان تغییر میزان تلفات بستر و تعداد جفت الکترودها بر مولفه عمودی جابجایی، به ازای ولتاژ الکتریکی ۵۰ ولت، در شکل نمایش داده شده است. همانطور که انتظار می‌رود و در شکل هم مشخص است، هرچه میزان تلفات کمتر باشد دامنه جابجایی بیشتر است. همچنین هرچه تلفات بیشتر باشد دامنه جابجایی با تعداد جفت الکترودهای کمتری به اشباع

## نتیجه گیری

در این مقاله به شبیه‌سازی و طراحی پارامترهای ساختاری در افزاره‌های امواج صوتی سطحی پرداخته، نحوه تولید و انتشار این امواج مطالعه و تاثیر پارامترهایی همچون جنس و جهت بلوری بستر بر عملکرد افزاره بررسی شد. برای این هدف و طراحی بهینه افزاره‌های SAW به بررسی اثر پارامترهای مختلف از جمله دامنه و فرکانس سیگنال الکتریکی اعمالی، تعداد الکترودها، تلفات و ضخامت بستر بر مشخصات موج انتشاری پرداخته شد. با توجه به نتایج شبیه‌سازی‌ها تعداد جفت الکترودها به ازای تلفات بستر  $0.01 \text{ dB}/\lambda$  و ولتاژ الکتریکی  $50 \text{ V}$ ، در حدود  $34$  جفت الکترودها کفایت و بیشتر کردن تعداد آن‌ها تاثیری بر افزایش جابجایی‌ها ندارد. همچنین دامنه ولتاژ سیگنال الکتریکی باید تا حد امکان افزایش یابد و در عین حال از ولتاژ شکست بستر تجاوز نکند. ضخامت بستر نیز نباید از نصف دوره تناوب کمتر باشد تا موج بتواند به شکل یکنواخت منتشر شود.



شکل ۶- تاثیر بستر با ضخامت‌های (الف) ۵ میکرومتر، (ب) ۲ میکرومتر، (ج) ۱ میکرومتر و (د) ۵۰۰ نانومتر بر موج انتشاری. (ه) روند کلی تغییرات میزان جابجایی با تغییر ضخامت از ۱۰۰ نانومتر تا ۷ میکرومتر. محور افقی مکان در راستای محور X و محور عمودی ضخامت بستر است.

## مراجع

- Microelectromechanical Syst.*, pp. 1–11, 2010.
- [7] G. W. Farnell and H. Matthews, "Elastic surface waves," in *Surface Wave Filters*, New York: John Wiley and Sons, 1977, pp. 1–55.
- [8] R. Lerch, "Simulation of piezoelectric devices by two- and three-dimensional finite elements," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 37, no. 3, pp. 233–247, May 1990.
- [9] H. Ogi, Y. Kawasaki, M. Hirao, and H. Ledbetter, "Acoustic spectroscopy of lithium niobate: Elastic and piezoelectric coefficients," *J. Appl. Phys.*, vol. 92, no. 5, pp. 2451–2456, 2002.
- [10] F. S. Hickernell, P. L. Clar, and I. R. Cook, "Pulsed DC Voltage Breakdown Between Interdigital Electrodes," *1972 Ultrason. Symp.*, pp. 388–391, 1972.
- [11] F. S. Hickernell, H. D. Knuth, R. C. Dablemont, and T. S. Hickemell, "The Surface Acoustic Wave Propagation Characteristics of 41° Lithium Niobate with Thin-Film SiO<sub>2</sub>," *Proc. IEEE*, 1996.
- [1] A. J. Slobodnik, "Surface Acoustic Waves and SAW Materials," *Proc. IEEE*, vol. 64, no. 5, pp. 581–595, 1976.
- [2] C. Ruppel, "Acoustic Wave Filter Technology - A Review," *IEEE Trans UFFC*, vol. 3010, no. c, pp. 1–1, 2017.
- [3] G. M. Ma *et al.*, "A Wireless and Passive Online Temperature Monitoring System for GIS Based on Surface-Acoustic-Wave Sensor," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 31, no. 3, pp. 1270–1280, 2016.
- [4] Y. Tang *et al.*, "Highly sensitive surface acoustic wave (SAW) humidity sensors based on sol-gel SiO<sub>2</sub> films: Investigations on the sensing property and mechanism," *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 215, pp. 283–291, 2015.
- [5] C. Fu, K. J. Lee, K. Lee, and S. S. Yang, "Low-intensity ultraviolet detection using a surface acoustic-wave sensor with a Ag-doped ZnO nanoparticle film," *Smart Mater. Struct.*, vol. 24, no. 1, p. 015010, 2015.
- [6] J. Kirschner, "Surface Acoustic Wave Sensors (SAWS): Design for Application,"

- [12] F. S. Hickernell and H. D. Knuth, "The SAW propagation properties of apiezon wax on  $128^\circ$  Y-X lithium niobate," *Ultrason. Symp. 1999. Proceedings. 1999 IEEE*, vol. 1, no. c, pp. 329–332 vol.1, 1999.