

میکروفن خازنی با اندازه کوچک و حساسیت بالا با به کار گیری دیافراگم دایروی با مرکز ثابت

نسترن نادمی^(۱) - جواد کرمدل^(۲)

(۱) کارشناس ارشد - دانشکده مهندسی برق - واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

(۲) دانشیار - دانشکده مهندسی برق - واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۹/۲۸

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۲/۱۵

خلاصه: در این مقاله، یک میکروفن خازنی MEMS جدید تک تراشه بر روی ویفر سیلیکونی با کمینه کردن اندازه و کاهش استحکام مکانیکی با استفاده از دیافراگم دایروی با مرکز ثابت پیشنهاد شده است. در میکروفن پیشنهادی دیافراگم شامل تعدادی حفره می باشد که موجب عبور هوا در شکاف مابین صفحه پشتی و دیافراگم می شود و به این ترتیب میرایی مربوط به صدا را در میکروفن کاهش می دهد. تازگی این روش، ایجاد میکروفن دایروی با مرکز ثابت می باشد که قطر دیافراگم کمتر از میکروفن خازنی مرسوم به دست می آید. ابتدا تحلیل مکانیکی روی دیافراگم میکروفن انجام می گیرد تا ولتاژ کششی به دست آید. ولتاژ کششی میکروفن دایروی پیشنهادی ۱۴ ولت می باشد. با توجه به ولتاژ کششی بدست آمده، ولتاژ بایاس به میکروفن اعمال شده و پارامترهای مختلف مانند ظرفیت خازنی و حساسیت اندازه گیری شد. با توجه به نتایج شبیه سازی کامسول (COMSOL)، میکروفن پیشنهادی با دیافراگم به قطر ۴۰۰ میکرومتر و ضخامت ۱/۵ میکرومتر، حساسیت ۲۳- دسی بل را نشان داد. در مقایسه با کارهای قبلی، میکروفن پیشنهادی با ولتاژ تغذیه کمتر عملکرد فرکانسی بهتر و حساسیت بیشتری را برای سنس نمودن صدا عرضه می کند.

کلمات کلیدی: میکروفن خازنی، ولتاژ کششی، مبدل های صوتی، الکترواستاتیکی، سیستم های میکروالکترومکانیکی (MEMS).

Condenser Microphone with Small Size and High Sensitivity Using a Circular Diaphragm with Fixed Center

Nastaran Nademi⁽¹⁾ - Javad Karamdel⁽²⁾

(1) MSc. - Department of Electrical Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

nastaran.nademi@gmail.com

(2) Associate Professor - Department of Electrical Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

J-karamdel@azad.ac.ir

In this paper, a new single-chip MEMS capacitor microphone on a silicon wafer by minimizing the size and the reduction of mechanical strength using a circular diaphragm with a fixed center is proposed. In the proposed microphone, the diaphragm includes a number of holes to pass the air through the gap between the back plate and diaphragm, and thus reduces the damping of the sound from the microphone. Novelty of this method, creating a circular microphone with fixed center, which the diameter of diaphragm is less than the conventional condenser microphone. At first, the mechanical analysis was conducted on microphone diaphragm in order to achieve the pull-in voltage. The pull-in voltage of the proposed circular microphone is 14 volts. According to the obtained pull-in voltage, the bias voltage were applied to the microphone, and various parameters such as capacitance and sensitivity were measured. Based on the simulation results of COMSOL, the proposed microphone with diaphragm diameter of 400 μm and a thickness of 1.5 μm , the sensitivity of -23 dB is shown. In comparison with previous works, the proposed microphone with lower supply voltage is provided the better frequency performance, and higher sensitivity, in order to sense the sound.

Index Terms: Condenser microphone, pull-in voltage, audio converter, electrostatic, diameter, micro-electromechanical systems (MEMS).

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، تکنولوژی MEMS (سیستم‌های میکرو الکترومکانیکی) به طور وسیع به طراحی میکروفن‌های MEMS اعمال شده‌اند [۱]. در سال ۲۰۰۸، میکروفنی جدید با کاهش دادن مقاومت آکوستیکی با دیافراگم آلومینیومی سوراخ‌دار را ایجاد کردند تا حساسیت میکروفن را اصلاح کنند [۲]. ولتاژ بایاس اعمالی به این میکروفن در حدود ۱۰۵ ولت بود و در همین ولتاژ بایاس، میکروفن بیشترین حساسیت را از خود نشان می‌داد که برابر ۱/۲ میلی ولت بر پاسکال (mV/Pa) بود. در سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰ این ساختار را بهبود دادند که در این ساختار علاوه بر حفره‌هایی که بر روی دیافراگم برای کاهش میرایی هوا ایجاد شده‌اند، تعدادی چاک نیز به منظور کاهش اثر تنش پس‌ماند و استحکام دیافراگم برای افزایش حساسیت میکروفن ایجاد شد. ولتاژ کششی میکروفن چاک‌دار در حدود ۲۵ ولت بوده و ظرفیت خازنی بایاس صفر آن ۱۷/۵ پیکوفاراد می‌باشد [۳، ۴].

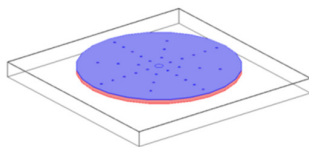
در سال ۲۰۱۰، یک میکروفن خازنی معرفی شد. در این نوع میکروفن، دیافراگم بوسیله یک ستون نگهداری شده و جنسش از پلی‌سیلیکون می‌باشد. ولتاژ بایاس اعمالی بدین میکروفن ۱۲ ولت بوده و ماکزیمم جابجایی دیافراگم با ضخامت ۱/۵ میکرومتر و قطر ۴۵۰ میکرومتر برابر ۰/۶۰۶ میکرومتر می‌باشد. در این نوع میکروفن با تغییر قطر دیافراگم از ۳۰۰ تا ۴۵۰ میکرومتر، حساسیت نیز از ۵۳/۹- تا ۳۶/۸- دسی‌بل افزایش می‌یابد [۵]. همچنین در سال ۲۰۱۳ یک میکروفن خازنی سیلیکونی طراحی و ساخته شد. این میکروفن از یک غشای نازک پلی‌سیلیکونی به مساحت ۲×۲ میلی‌متر مربع و یک صفحه پشتی ضخیم تشکیل یافته است. برای این میکروفن (در فرکانس ۱۰۰ هرتز تا ۱۰ کیلوهرتز) حساسیت اندازه‌گیری شده به ترتیب ۰/۷۸ میلی ولت بر پاسکال (mV/Pa) و ۱/۷ میلی ولت بر پاسکال (mV/Pa) تحت ولتاژهای بایاس ۲ و ۴/۵ ولت می‌باشد [۶].

میکروفن مبدلی است که فشار ورودی متغیر را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. میکروفن‌های ساخته شده توسط پروسه MEMS محتمل‌ترین نامزدها برای ساخت نسل بعدی میکروفن‌های کوچک با هزینه کم می‌باشند. تراشه‌ی یک میکروفن MEMS شامل یک دیافراگم و یک صفحه پشتی می‌باشد [۷-۱۰]. امروزه میکروفن به طور وسیع در تجهیزات ارتباطات صوتی، وسائل شنوایی، اهداف حفاظتی و نظامی، تشخیص صوت و فراصوت در زیر آب، و کنترل ارتعاش و نویز استفاده می‌شود [۱۱، ۱۲].

پارامترهای الکترواستاتیکی میکروفن، از قبیل ولتاژ کششی غشا، ظرفیت خازنی ساختار، انحنای غشا با تغییرات ولتاژ، پاسخ فرکانسی و حساسیت آن، به اعتبارسازی طراحی میکروفن کمک می‌کند. ظرفیت خازنی و حساسیت سنسور وابسته به ضخامت دیافراگم، فاصله هوایی، تنش پس‌ماند و شعاع دیافراگم می‌باشد [۱۳].

انواع مختلفی از طراحی‌های دیافراگم با لبه کلمپ شده مانند دیافراگم پلی‌سیلیکونی موج‌دار و با تنش کم مورد تحقیق و بررسی قرار گرفتند

تا با کاهش دادن تنش و استحکام دیافراگم، حساسیت مکانیکی‌اش را افزایش دهند [۱۷-۱۴]. چندین میکروفن با حساسیت بالا با یک میکروفن متحرک ارائه شده‌اند [۲۰-۱۸]. این میکروفن‌ها دیافراگم هایشان در چندین مکانیسم فیزیکی حول لبه‌اش معلق شده‌اند تا تنش دیافراگم را بیشتر کاهش دهند که بتدریج حساسیت مکانیکی‌اش را افزایش خواهد داد. اولین مرحله در شبیه‌سازی یک فرایند، ایجاد مدل هندسی اجزای مختلف مساله می‌باشد. در شبیه‌سازی روش المان محدود سعی بر آن است تا با تقریبات هندسی مقدور در رفتار مساله، اندازه مدل را محدود نمود تا مدت زمان لازم برای انجام تحلیل کاهش یابد. ساختار میکروفن پیشنهادی همانطور که در شکل (۱) نمایش داده شده است از دو صفحه دیافراگم و صفحه پشتی تشکیل شده است، جنس هر دو صفحه نیز از آلومینیوم انتخاب شده است. ضخامت دیافراگم و صفحه پشتی به ترتیب ۱/۵ و ۰/۵ میکرومتر و فاصله هوایی ۲/۳ میکرومتر است. جنس بستر و زیر لایه به ترتیب از سیلیکون و دی اکسیدسیلیکون انتخاب شده است. دیافراگم شامل تعدادی سوراخ می‌باشد تا اجازه دهد هوا در فاصله مابین دو الکتروود فرار کند.



شکل (۱): ساختار میکروفن از دو صفحه دیافراگم و صفحه پشتی

Fig. (1): Diaphragm microphone structure of the diagram page and the back page

در این مقاله یک میکروفن جدید با طراحی دیافراگم با مرکز ثابت ارائه شده است تا استحکام مکانیکی دیافراگم را کاهش دهد. این نوع میکروفن از میکروفن‌های قدیمی با دیافراگم ثابت متمایز می‌شود.

۲- انحنای دیافراگم بر حسب تغییرات ولتاژ

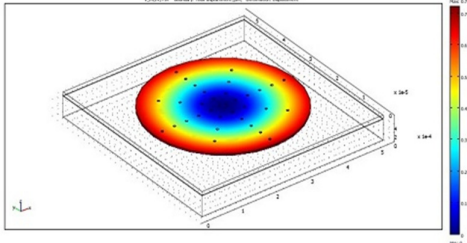
میکروفن خازنی MEMS مبدلی الکترواستاتیکی است که بسته به انرژی الکتریکی بر حسب ولتاژ ثابت (ولتاژ راه‌اندازی) یا ذخیره بار ثابت (جریان راه‌اندازی) به مانیتورینگ تغییر خازن به دلیل یک ورودی مکانیکی خارجی کمک می‌کند [۱۲]. اما، مادامی که ولتاژ تغذیه توانایی خواندن تغییر در ظرفیت خازنی را به دلیل انحنای دیافراگم فراهم می‌کند، نیروی جاذبه الکترواستاتیکی الکترودهای خازن را به سمت یکدیگر خواهد کشید و بنابراین باعث می‌شود تا دیافراگم حتی در غیاب فشار مکانیکی خارجی خم شود. این نیروی جاذبه الکترواستاتیکی غیرخطی بوده و با کاهش عرض فاصله مابین الکترودها برای یک ولتاژ ثابت افزایش می‌یابد، این پدیده‌ای به نام کشش^۱ را موجب می‌شود که محدوده دینامیکی جابجایی دیافراگم را به یک سوم فاصله هوایی تقلیل می‌دهد [۲۲]. در طی عملکرد، ساختار خازن در معرض چهار نوع از نیروها قرار می‌گیرد:

(۱) ورودی مکانیکی

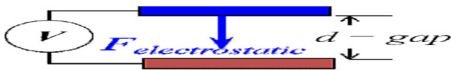
(۲) نیروی ارتجاعی^۲ تولید شده در دیافراگم مرتعش در پاسخ به تغییر

شکل

میکرومتر نزدیک است $\frac{2}{3}$ میکرومتر) که هیچ ولتاژ بایاسی اعمال نمی‌شود و ممکن است باعث شکست شود. میانگین انحنای در سراسر صفحه نشان می‌دهد که انحنای میانگین صفحه برابر یک سوم اوج انحنای است [۲۵].



شکل (۳): توزیع جابجایی روی میکروفن در ولتاژ ۱۴ ولت
Fig. (3): Distribution of displacement on microphone at 14 volt



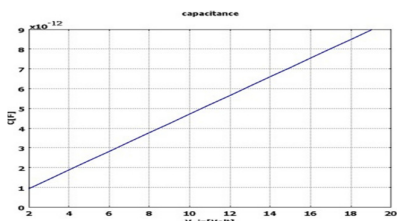
شکل (۴): نیروی الکترواستاتیکی مابین صفحه‌های موازی به دلیل ولتاژ اعمالی
Fig. (4): Electrostatic force between parallel plates due to the applied voltage

۳- ظرفیت خازن

آنالیز عملکرد میکروفن با بررسی رفتار دیافراگم شروع می‌شود. همان طور که از شکل (۴) پیداست، وقتی که ولتاژ بین دیافراگم میکروفن و صفحه پشتی آن برقرار گردد به دیافراگم میکروفن، نیروی الکترواستاتیکی اعمال و دیافراگم انحراف می‌یابد. برای تقریب این نیرو، دیافراگم میکروفن و صفحه پشتی آن با یک خازن با صفحات موازی مدل می‌شود [۱۲]. در این حالت ظرفیت خازنی به وسیله درست کردن یک مساحت بی‌نهایت کوچک دیافراگم خم شده با فرض تقریب صفحه موازی محاسبه می‌گردد ظرفیت خازنی C از طریق رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d} \quad (4)$$

در رابطه (۴)، A مساحت همپوشانی صفحه‌های موازی، d شکاف مابین صفحه‌ها و $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m نفوذپذیری فضای آزاد می‌باشد. منحنی ولتاژ بایاس- ظرفیت خازنی (C-V) میکروفن پیشنهادی در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل (۵): نمودار تغییرات ظرفیت بر اساس تغییرات ولتاژ
Fig. (5): The graph of capacity variance due to changes of voltage

(۳) نیروی میران^۳ تولید شده به وسیله فاصله هوایی [۲۳]

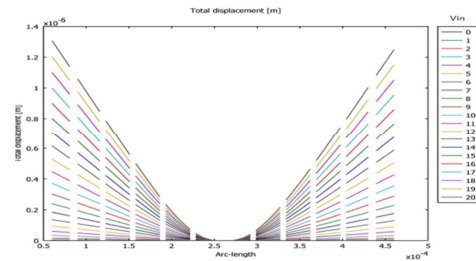
(۴) نیروی الکترواستاتیکی^۴ به دلیل ولتاژ تغذیه

در حالت تعادل، نیروی میران می‌تواند اغماض شود. بنابراین، نیروی برآیند کنشی در دیافراگم مجموع فشار الکترواستاتیکی و فشار مکانیکی خارجی می‌باشد.

هنگامی که حساسیت، پاسخ فرکانسی و ویژگی‌های نویز و سایر موارد یک میکروفن به طور بحرانی به ولتاژ بایاس وابسته است، ضروری است تا ولتاژ بایاس را بهینه نمائیم. در این تحقیق، برای شبیه سازی ابتدا به میکروفن ولتاژهای مختلف اعمال شد تا ولتاژ کششی میکروفن به دست آید. به همین خاطر به دیافراگم ولتاژ اعمال شد و صفحه پشتی نیز به صورت زمین تعریف شد. نمودار تغییرات جابجایی در دیافراگم میکروفن پیشنهادی بر اساس تغییرات ولتاژ در شکل (۲) آمده است.

با افزایش ولتاژ اعمالی، نیروی الکترواستاتیکی اعمال شده به دیافراگم میکروفن نیز افزایش می‌یابد. زمانی که نیروی الکترواستاتیکی بیشتر از نیروی بازدارنده می‌شود، دیافراگم میکروفن دچار تزلزل شده و به یکباره فرو می‌ریزد. این اتفاق زمانی می‌افتد که دیافراگم میکروفن و صفحه پشتی به اندازه دو سوم فاصله هوایی جابجا شود. ولتاژ کششی، ولتاژی است که دیافراگم میکروفن را به صفحه پشتی می‌کشد [۲۴].

$$V_p = \sqrt{\frac{8kd^3}{27\epsilon_0 A e l}} \quad (1)$$



شکل (۲): نمودار تغییرات جابجایی بر اساس تغییرات ولتاژ
Fig. (2): The graph of changes of displacement based on changes of voltage

فاصله‌ای که کشش رخ می‌دهد به صورت زیر است:

$$x_{pi} = \frac{d_0}{3} \quad (2)$$

همچنین شکاف کشش به صورت زیر می‌باشد:

$$d_{pi} = \frac{2d_0}{3} \quad (3)$$

با توجه به نمودار شکل (۲) ولتاژ کششی برابر ۱۹ ولت است، پس برای بایاس میکروفن باید از ولتاژ ۱۹ ولت کمتر دهیم تا دیافراگم میکروفن به صفحه پشتی نچسبد. به همین خاطر ولتاژ ۱۴ ولت را به عنوان ولتاژ بایاس انتخاب کردیم تا تغییرات میکروفن را مشاهده کنیم. فاصله مابین دو الکتروود و ضخامت غشا دو فاکتور عمده در طراحی میکروفن هستند. به طوری که در شکل (۳) نشان داده شده، ولتاژ بایاس ۱۴ ولت اعمال شده و ماکزیمم جابجایی غشا با ضخامت ۱/۵ میکرومتر و قطر ۴۰۰ میکرومتر برابر ۰/۷۲ میکرومتر است. این داده به ۰/۷۶

مخصوصاً در محدوده‌های فرکانسی بالاتر، و حساسیت کاهش می‌یابد. برای مسجل نمودن چگونگی طراحی حفره‌های صوتی که بر روی پاسخ فرکانسی تاثیر می‌گذارند، توصیف سیستم مکانیکی- صوتی توسط یک مدار الکتریکی آنالوگ، به صورتی که در شکل (۷) نشان داده شده، انجام می‌گیرد [۲۶]. مدار معادل می‌تواند به روشی مشابه با مدار الکتریکی حل شود. جریان مشابه سرعت جابجایی دیافراگم v برحسب متر بر ثانیه (m/s) و ولتاژ مشابه نیروی کنشی F برحسب نیوتن (N) به دیافراگم می‌باشد. المانهای مانند جرم، مطلوبیت (عکس صلبیت) است که رابطه صلبیت k از طریق رابطه (۹) محاسبه می‌شود [۲۳]. و مقاومت به ترتیب با اندوکتانس، ظرفیت الکتریکی و مقاومت نمایش داده می‌شوند.

$$K = 8\pi \cdot \sigma \cdot h \quad (9)$$

در رابطه فوق، σ تنش کششی دیافراگم بوده و واحدش پاسکال می‌باشد. h نیز ضخامت دیافراگم برحسب متر می‌باشد.

مقاومت R_r با واحد کیلوگرم بر ثانیه (kg/s)، اندوکتانس M_r با واحد کیلوگرم (kg) و اندوکتانس M_d با واحد کیلوگرم (kg) به ترتیب مقاومت تشعشعی دیافراگم، جرم اضافی هوا در نزدیک دیافراگم و جرم دیافراگم را نشان می‌دهند که به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$R_r = \frac{\pi \cdot \rho_0 \cdot a^4 \cdot v^2}{2c} \quad (10)$$

$$M_r = \frac{8}{3} \rho_0 \cdot a^3 \quad (11)$$

$$M_d = \rho \cdot h \cdot S_d \quad (12)$$

در رابطه فوق، ρ_0 چگالی هوا برحسب کیلوگرم بر متر مکعب (kg/m^3)، α شعاع معادل دیافراگم برحسب متر (m)، v سرعت صوت برحسب متر بر ثانیه (m/s)، ρ چگالی سیلیکون برحسب کیلوگرم بر متر مکعب (kg/m^3)، S_d مساحت دیافراگم برحسب متر مربع (m^2) و ω فرکانس برحسب رادیان بر ثانیه (rad/s) می‌باشد. شعاع معادل به صورت شعاع یک دایره با مساحت یکسان با دیافراگم محاسبه می‌شود ($\pi a^2 = S_d$).

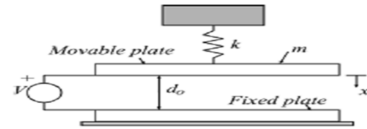
مطلوبیت دیافراگم، C_d (برحسب m/N)، عکس صلبیت k می‌باشد، به طوری که در رابطه (۹) توضیح داده شد. مقاومت‌های چسبناکی شکاف هوایی [۲۷]، R_g برحسب (kg/s)، و حفره‌های صوتی [۲۸]، R_h برحسب کیلوگرم بر ثانیه (kg/s)، به ترتیب با روابط (۱۳) و (۱۴) نمایش داده می‌شوند.

$$R_g = \frac{12 \cdot \eta \cdot S_b^2}{\pi \cdot N \cdot d^3} \left[\frac{A}{2} - \frac{A^2}{8} - \frac{\ln A}{4} - \frac{3}{8} \right] \quad (13)$$

$$R_h = \frac{8 \cdot \eta \cdot t \cdot S_b^2}{\pi \cdot N \cdot r^4} \quad (14)$$

در رابطه فوق، η چسبناکی (گرانروی) هوا برحسب پاسکال در ثانیه (PA.s)، S_b مساحت صفحه پشتی برحسب متر مربع (m^2)، تعداد حفره‌های صوتی، t ضخامت صفحه پشتی برحسب متر (m)، شعاع معادل حفره صوتی برحسب متر (شعاع یک دایره با مساحت یکسان با حفره صوتی)، و A مساحت حفره‌های صوتی برحسب متر مربع (m^2) می‌باشد. به دلیل اینکه عبارت داخل قلاب در رابطه (۱۳) تابع نزولی

رابطه مابین ولتاژ و خازن، اطلاعات مهمی در مورد عملکرد دستگاه می‌دهد. از این رو دلیل اصلی برای انجام آزمون CV بر روی میکروفن، تعیین انحراف دیافراگم و با افزایش تحریک ولتاژ و همچنین تغییر در ظرفیت خازنی می‌باشد. در این آنالیز، هر ظرفیت خازنی حاشیه مربوط با الکترودهای خازن اغماض شده و فرض شده که الکترودها و کنتاکتهای خازن بی عیب و نقص هستند. همچنین فرض شده که ساختار خازن در یک محیط خلاء واقع شده تا بارگذاری خارجی مکانیکی برابر صفر برای الکترودها بالایی تضمین گردد در شکل (۶) شماتیک این مدل آمده است.



شکل (۶): مدل خمیدگی دیافراگم

Fig. (6): The curvature of the diaphragm

با فرض اینکه ساختار در خلاء قرار گرفته باشد، معادله حرکت صفحه متحرک به دلیل نیروی جاذبه الکترواستاتیکی F ، که به وسیله ولتاژ تغذیه ثابت V ایجاد می‌شود، می‌تواند به صورت زیر بیان گردد:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + kx = F_m \quad (5)$$

در رابطه فوق، x بیانگر جابجایی و m جرم ماده غشا می‌باشد. نیروی ارتجاعی مکانیکی F_m به صورت زیر می‌تواند بیان گردد:

$$F_m = kx \quad (6)$$

در رابطه فوق، k ثابت فنریت غشا بوده و فرض می‌شود که k خطی است [۱۲].

نیروی جاذبه الکترواستاتیکی F_E مابین صفحه‌ها به دلیل بارها در صفحه‌ها می‌تواند به وسیله مشتق گرفتن از انرژی پتانسیل ذخیره شده در خازن به نسبت موقعیت صفحه متحرک پیدا شود و به صورت زیر می‌تواند بیان گردد:

$$F = -\frac{d}{dx} \left(\frac{1}{2} CV^2 \right) = \frac{\epsilon_0 AV^2}{2(d_0 - x)^2} \quad (7)$$

در رابطه فوق، V ولتاژ اعمالی بوده، A مساحت غشا و d فاصله مابین صفحه‌ها می‌باشد. این معادله بالایی، به طور معقولانه، نیروی الکترواستاتیکی مابین غشا و صفحه پشتی را که هر دو موازی با هم هستند را تخمین می‌زند.

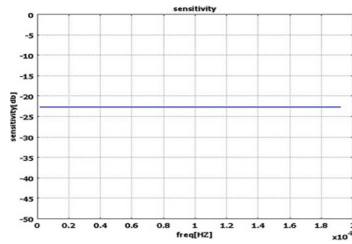
نظر به اینکه در تعادل، نیروی الکترواستاتیکی مابین صفحه‌ها برابر با نیروی بازگرداننده فنریت غشا است، یعنی در تعادل، داریم:

$$kx = \frac{\epsilon_0 AV^2}{2(d_0 - x)^2} \quad (8)$$

این معادله می‌تواند بصورت یک عبارت مرتبه سه مرتب‌سازی شود. مقادیر به دست آمده بعد از حل معادله برای x (جابجایی غشا) برای ولتاژهای بایاس DC مختلف در شکل (۲) آورده شده‌اند.

۴- مدل مداری ساختار میکروفن

حفره‌های صوتی دیافراگم دمپینگ هوا را کنترل می‌نمایند. اگر دمپینگ به قدر کافی کاهش نیابد، مانع جابجایی دیافراگم خواهد شد،



شکل (۸): نمودار محدوده عملکرد فرکانسی ساختار

Fig. (8): The graph of frequency range structure

نتایج شبیه‌سازی مدل بهینه شده میکروفون در جدول (۱) آمده است.

Table (1): Simulation results of the optimized microphone

جدول (۱): نتایج شبیه‌سازی میکروفون بهینه شده

۴۰۰ میکرومتر	قطر دیافراگم
۱/۵ میکرومتر	ضخامت دیافراگم
۲/۳ میکرومتر	فاصله هوایی
۱۴ ولت	ولتاژ بایاس
۰/۷۲ میکرومتر	جابجایی دیافراگم
۲۳- دسی بل	حساسیت در فشار ۱ پاسکال

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک میکروفون خازنی جدید با حساسیت بالا و اندازه کوچک براساس تکنولوژی میکروماشین‌کاری شده معرفی شد. برای شبیه‌سازی، طرح‌های مختلف را بررسی کردیم و پس از بررسی‌های مختلف بدین نتیجه رسیدیم که میکروفون با دیافراگم دایروی و مرکز ثابت بهترین گزینه برای طراحی است. در این میکروفون پیشنهادی از آنجایی که آلومینیوم از نظر الکتریکی رسانا است در دیافراگم و صفحه پشتی آلومینیومی به هیچ‌گونه الکترود اضافی نیاز نیست. در مقایسه با کارهای قبلی، نتایج شبیه‌سازی کامسول بهبود چشمگیری در اندازه و حساسیت میکروفون با مرکز ثابت نشان داد. قطر میکروفون، ولتاژ بایاس، فشار صوت و فاصله مابین دو الکترود فاکتورهای عمده برای حساسیت میکروفون هستند. با توجه به طراحی انجام گرفته حساسیت یک میکروفون دایروی با مرکز ثابت با ضخامت غشای ۱/۵ میکرومتر و فاصله هوایی ۲/۳ میکرومتر در معرض فشار ۱ پاسکال بر روی سطح غشا قرار گرفته است تا زمانی که هیچ ولتاژ شکستی رخ نمی‌دهد، افزایش قطر غشا می‌تواند بسیار زیاد حساسیت میکروفون را افزایش دهد. در مورد ساختار طراحی شده هر چقدر قطر دیافراگم بیشتر و ضخامت آن کمتر باشد حساسیت بالا می‌رود به همین خاطر باید از لحاظ عملی بررسی شود که چنین چیزی قابل اجراست یا نه، که این موضوع در کارهای آتی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

پی‌نوشت:

1. Pull-in
2. Elastic force
3. Damping force
4. Electrostatic force

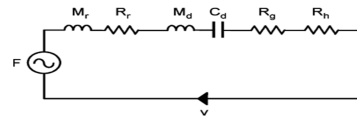
References

- [1] R.P. Scheeper, A.G.H. Van der Donk, W. Olthuis, P. Bergveld, "Fabrication of silicon condenser microphone using single wafer technology", Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 1, No. 3, pp. 147-154, Sep. 1992.

یکنواخت از A می‌باشد، R_g زمانی که A افزایش می‌یابد کاهش خواهد یافت.

امپدانس کل مدار شکل ۷، Z برحسب کیلوگرم بر ثانیه (kg/s)، به صورت زیر بیان می‌شود:

$$Z = R_r + R_g + R_h + jw(M_r + M_d) + \frac{1}{jwC_d} \quad (15)$$



شکل (۷): مدار الکتریکی مشابه با ساختار میکروفون

Fig. (7): The Electric circuit similar to the microphone

۵- حساسیت و پاسخ فرکانسی

در سال‌های اخیر میکروفون‌های خازنی MEMS پیشرفت قابل توجهی داشته و تحقیقات زیادی بر روی حساسیت این میکروفون‌ها انجام گرفته است. به طور کلی میکروفون‌های خازنی MEMS طراحی شده در کارهای قبلی را می‌توان به دو دسته میکروفون‌های با دیافراگم ثابت و مرکز ثابت تقسیم‌بندی نمود. یک میکروفون خازنی غالباً طراحی می‌شود تا در یک محدوده فرکانسی کاری مطلوب کار کند. پاسخ فرکانسی میکروفون باید در حدود محدوده مطلوب صاف و مسطح باشد تا یک صدای با کیفیت خوب را باز تولید کند. در این مقاله، از آنجایی که فرکانس در حدود ۲۰ کیلوهرتز برای میکروفون نیاز است میکروفونی طراحی شد که در یک پهنای باند کاری شنوایی در حدود ۲۰ کیلوهرتز کار می‌کند. میکروفون‌هایی که به حساسیت در فرکانس‌های بالا اهمیت می‌دهند، مانند این میکروفون، مخصوصاً برای گرفتن صدای انسان، می‌توانند به طور بهتر به کار گرفته شوند، زیرا چنین میکروفون‌هایی قابلیت فهم را افزایش می‌دهند [۲۹]. بنابراین حساسیت فرکانسی و پاسخ فرکانسی میکروفون بر حسب ولت بر پاسکال (Volt/Pascal) می‌تواند به صورت زیر محاسبه گردد [۳۰]:

$$S(w) = \frac{V_o(w)}{P} \quad (16)$$

براساس شبیه‌سازی‌ها، در همین ولتاژ بایاس میکروفون بیشترین حساسیت را از خود نشان داد که برابر ۲۳- دسی بل می‌باشد. در شکل (۸) نمودار حساسیت طرح پیشنهادی بر اساس فرکانس نشان داده شده است. حساسیت را در محدوده شنوایی انسان مورد اندازه‌گیری قرار می‌دهیم. همان طور که از نمودار پیداست پاسخ فرکانسی در محدوده شنوایی انسان (۲۰ هرتز تا ۲۰ کیلوهرتز) صاف می‌باشد.

- [2] B.A. Ganji, B.Y. Majlis, "Design and fabrication of a new MEMS capacitive microphone using a perforated aluminum diaphragm", *Sensors and Actuators A*, Vol. 149, pp. 29-37, 2008.
- [3] B.A. Ganji, B.Y. Majlis, "High sensitivity and small size MEMS capacitive microphone using a novel slotted diaphragm", *Microsystem Technologies*, Vol. 15, No. 9, pp. 1401-1406, Sep. 2009.
- [4] B.A. Ganji, B.Y. Majlis, "Slotted capacitive microphone with sputtered aluminum diaphragm and photoresist sacrificial layer", *Proceeding of the IEEE/ICSE*, pp.267,271, June 2010.
- [5] Cheng-Ta Yang, "The sensitivity analysis of a MEMS microphone with different membrane dimeters", *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 18, No. 6, pp. 790-796, 2010.
- [6] P.C.P. Chao, et.al, "A new hybrid fabrication process for a high sensitivity MEMS microphone", *Microsystem Technologies*, Vol. 19, No. 9-10, pp. 1425-1431, Sep. 2013.
- [7] P.R. Scheeper, B.Nordstrand, J.O.Gullfv, B.Liu, T.Clausen, L.Midjord, T. torgaard-Larsen, "A new measurement microphone based on MEMS technology", *Jou. of Microelectromech Sys.*, Vol. 12, No.6, pp. 880-890, Dec. 2003.
- [8] P. Rombach, M. Mullenborn, U. Klein, K. Rasmussen, "The first low voltage, low noise differential silicon microphone, technology development and measurement results", *Proceeding of the IEEE/MEMSYS*, pp.42,45, Interlaken, Switzerland, Jan. 2001.
- [9] X. Li, R. Lin, H. Kek, J. Miao, Q. Zou, "Sensitivity-improved silicon condenser microphone with a novel single deeply corrugated diaphragm", *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 92, No. 1-3, pp. 257-262, Aug. 2001.
- [10] A. Torkkeli, O. Rusanen, J. Saarihahti, H. Seppä, H. Sipola, J. Hietanen, "Capacitive microphone with low-stress polysilicon membrane and high-stress polysilicon backplate", *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 85, No. 1-3, pp. 116-123, Aug. 2000.
- [11] T. Ma, T.Y. Man, Y.C. Chan, Y. Zohar, M. Wong, "Design and fabrication of an integrated programmable floating-gate microphone", *Proceeding of the IEEE/MEMSYS*, pp.288,291, Las Vegas, NV, USA, Jan. 2002.
- [12] P. Singh, "Modeling and characterization of microelectromechanical systems condenser microphone", PhD Thesis, Texas Tech University, 2011.
- [13] B. Azizollah Ganji, M. Taybi, "Accurate model of capacitance for MEMS sensors using corrugated diaphragm with residual stress", *IJE Trans. A: Basics* Vol. 27, No. 1, Jan. 2014.
- [14] Q. Zou, Z. Li, L. Liu, "Design and fabrication of silicon condenser microphone using corrugated diaphragm technique", *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 5, No. 2, pp. 197-204, Sep. 1996.
- [15] A. Torkkeli, O. Rusanen, J. Saarihahti, H. Seppä, H. Sipola, J. Hietanen, "Capacitive microphone with low-stress polysilicon membrane and high-stress polysilicon backplate", *Sensors and Actuators, A: Physical*, Vol. 85, No. 1-3, pp. 116-123, Aug. 2000.
- [16] J. Chen, L. Liu, Z. Li, Z. Tan, Y. Xu, J. Ma, "Single-chip condenser miniature microphone with a high sensitive circular corrugated diaphragm", *Proceedings of the IEEE/MEMS*, pp. 284- 287, Las Vegas, NV, 2002.
- [17] X. Li, R. Lin, H. Kek, J. Miao, Q. Zou, "Sensitivity-improved silicon condenser microphone with a novel single deeply corrugated diaphragm", *Sensors and Actuators, A: Physical*, Vol. 92, No. 1-3, pp. 257-262, Aug. 2001.
- [18] H.J. Kim, S.Q. Lee, K.H. Park, "A novel capacitive type miniature microphone with a flexure hinge diaphragm", *Proceedings of SPIE- The International Society for Optical Engineering*, Boston, MA. 2006.
- [19] J.W. Weigold, T.J. Brosnihan, J. Bergeron, X. Zhang, "A MEMS condenser microphone for consumer applications", *Proceedings of the IEEE/MEMS*, pp. 86-89, Istanbul, 2006.
- [20] N. Mohamad, P. Iovenitti, T. Vinay, "High sensitivity capacitive MEMS microphone with spring supported diaphragm", *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2008.
- [21] S.D. Senturia, "Microsystems design", Kluwer Academic Publishers, pp. 12-56, 2000.
- [22] P.R. Scheeper, A.G.H. Van der Donk, W. Olthuis, P. Bergveld, "Fabrication of silicon condenser microphone using single wafer technology", *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 1, No. 3, pp. 147-154, 1992.
- [23] A. Torkkeli, O. Rusanen, J. Saarihahti, H. Seppä, H. Sipola, J. Hietanen, "Capacitive microphone with low-stress polysilicon membrane and high-stress polysilicon backplate", *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 85, No. 1-3, pp. 116-123, Aug. 2000.
- [24] L. Picolli, M. rassi, L. Rosson, P. Malcovati, A. Fornasari, "A 1.0 mW, 71 dB SNDR, -1.8 dBFS input swing, fourth-order $\Sigma\Delta$ interface circuit for MEMS microphones", *Proceeding of the IEEE/ESSCIRC*, pp. 324-327, Athens, Sep. 2009.
- [25] D.T. Blackstock, "Fundamentals of physical acoustics", California: John Wiley & Sons, Inc, Ch. 4, 14, 2000.
- [26] P.R. Scheeper, A.G.H. Van der Donk, W. Olthuis, P. Bergveld, "A review of silicon microphones", *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 44, pp. 1-11, 1994.
- [27] Z. Skvor, "On the acoustical resistance due to viscous losses in the air gap of electrostatic transducers," *Acustica*, Vol. 19, pp. 295-299, 1967.
- [28] J. Bergqvist, F. Rudolf, "A Silicon condenser microphone using bond and etch-back technology", *Sens. Actuators A*, Vol. 45, pp. 115-124, 1994.
- [29] M. Iwaki, "High-quality sound pickup method at the viewpoint of the program production", Presented at the Kansai-Section Joint Convention of Institutes of Electrical Engineering Japan, S11-5, 2005.
- [30] J. Bergqvist, "Finite-element modelling and characterization of a silicon condenser microphone with a highly perforated backplate", *Sensors and Actuators, A: Physical*, Vol. 39, No. 3, pp. 191-200, 1993.