معرفی یک مدولاتور نوری قابل برنامه ریزی با استفاده از تداخل سنج ماخ زنر و کنترل توسط جریانهای چند فازی

مرتضی منصوری [۱]، مجید ابن علی حیدری [2] ، علی اکبر ابن علی حیدری [3]

۱ دانشکده مهندسی، گروه برق، واحد دورود، دانشگاه آزاد اسلامی

۲ دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهر کرد

۳ گروه فیزیک، دانشگاه فرهنگیان

چکیده - در این مقاله روشی برای تولید مدلاسیون پهنای سیگنال نوری (*Optical Pulse Width Modulation*)، با استفاده از جریانهای چند فازی که بر اساس مکانیسم تداخل سنج ماخ-زنر در فیبر نوری عمل می‌کند ارایه شده است. مهمترین پارامتر در تولید *OPWM* قابلیت کنترل فرکانس و سرعت سوئیچینگ توسط تغییر سرعت سیال های ورودی است. مزیت استفاده از این طرح قابلیت تغییر سیال و نیز کنترل ساده‌ٔ پارمترهای سوئیچینگ است. علاوه بر قابلیت‌های ذکر شده، این طرح قابلیت اتصال با فیبر نوری را داراست، که این مزیت به نوبه خود می‌توانند کمک زیادی در تزویجگرهای فیبر نوری و مجتمع سازی باشد. برای صحت پارامترهای مطرح شده از روش شبیه سازی *FVM*برای بخش سیالی، و نیز روش *FDTD* برای شبیه سازی بخش اپتیکی استفاده شده است.

کلید واژه- سوئیچ ماخ-زنر، بلورهای فوتونی، ریز سیال نوری، میکرو کانال، اپتوفلوئید .

A Proposal for Compact and Reconfigurable Optical PWM Generation Based on Mach-Zehnder Interferometer Using Multiphase Microscale Flow

M. Mansouri[۱], M.Ebnali-Heidari[۲], A. Ebnali-Heidarri[۳]

[۱] Department of Electrical Engineering, Doroud Branch, Islamic Azad University, Doroud, Iran

[۲] Faculty of Engineering, University of Shahrekord, Shahrekord 8818634141, Iran

[3] Faculty of Physics, University of Farhangian, Iran

Abstract- The authors propose a novel method for generation of optical Pulse Width Modulation (PWM) based on microfluidic droplet creation through the Mach–Zehnder interferometer (MZI) waveguide. The main parameters for the generation of this PWM such as frequency and speed of switching can be controlled by the mass flow rates of input fluids, and the shape of plug or droplet. The advantages of this design are the reconfigurability in the design, easy control of the fluid behavior, and hence the switching parameters. The validation of the proposed design is carried out by employing the Finite Volume Method" (FVM) for the mechanical simulation and the finite-difference time domain (FDTD) for the optical simulation.

Keywords: micro channel, micro fluid, photonic crystal, Optofluidic, Mach–Zehnder

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]

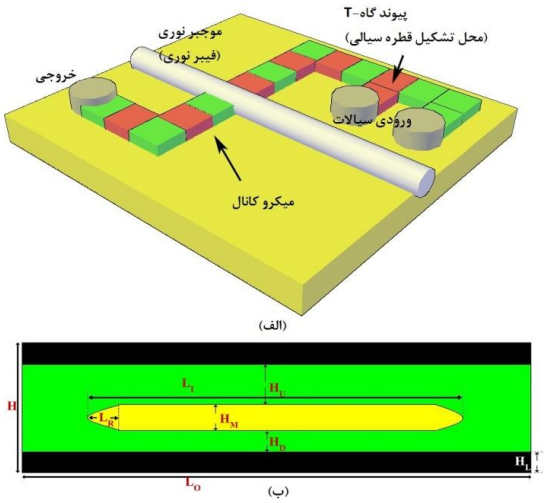
۱- مقدمه

سوئیچ‌ها و مدولاتورهای نوری یکی از اجزای اساسی فناوری مدرن امروزی را تشکیل می‌دهند. استفاده از پالس نوری باعث بالا رفتن سرعت و کاهش توان مصرفی می‌شود، از این رو طراحی سیستم‌های تمام نوری رو به توسعه قرار گرفتند[۱]. مزیت استفاده از این سیستم‌ها توجه محققان برای ساخت افزاره‌های تمام نوری را به خود جلب کرد. یکی از این ساختارها بلورهای فوتونی می‌باشد که اخیراً رشد فراوانی داشته است[۲]. استفاده از این تکنولوژی جهت بالا بردن انتقال اطلاعات و پردازش آنها بسیار مورد توجه قرار گرفته است. برای بالا بردن پهنای باند و عملکرد مطلوب از تکنولوژی ریز سیال نوری در کریستال‌های بلور فوتونی استفاده شد. ریز سیال نوری شاخه‌ای است، که از ترکیب میکرو سیال و اپتیک به وجود آمده است[۳]. استفاده از ریز سیالات در بلورهای فوتونی باعث ساخت ادوات نوری زیادی شده است [۴].

مدلاسیون پهنای باند پالس PWM نقش مهمی در تکنولوژی امروزی دارد. ادوات سوئیچینگ بر این اساس پیشرفت زیادی در سال های گذشته داشته اند[۵]. در این مقاله به معرفی PWM نوری توسط تکنولوژی اپتوفلوئید می‌پردازیم، که اساس عملکرد آن شبیه سوئیچ ماخ زنر است. عملکرد با سرعت بالا، ساخت در مقیاس کوچک و قابلیت تغییر عملکرد با تغییر سیال از پارامترهای مد نظر ما در طراحی این مدل پیشنهادی می‌باشد. با نتایج شبیه سازی نشان خواهیم داد که چگونه تغییر سیال عملکرد طرح را کنترل می‌کند. مکانیسم هدایت نور در هندسه سوئیچ نیز به صورت بازتابش کلی داخلی[۱] TIR می‌باشد. لازم به ذکر است که روش شبیه سازی استفاده شده دراین مقاله برای بخش سیالی، روش FVM و نیز استفاده از روشهای شبیه سازی FDTD برای بخش اپتیکی می باشد.

۲- ساختار پیشنهادی طرح

در شکل ۱- الف شمای سه بعدی از ساختار طرح نشان داده شده است. این شکل از دو بخش ساختارسیالی و ساختار اپتیکی تشکیل شده است. ساختار اپتیکی شامل یک منبع نور لیزر، فیبرنوری، و تداخل سنج ماخ زنر که توسط شکاف که بین فیبر نوری است، ایجاد می شود. شکل ۱- ب شمای دو بعدی از طرح است که نشان دهنده اساس کار سوئیچ ماخ زنر در فیبر نوری می‌باشد. به این صورت که با ایجاد اختلاف فاز که توسط اختلاف راه نوری ایجاد می‌شود، تداخل سنج مدی شکل می‌گیرد. در شکل رنگ زرد شکافی برای عبور سیال و نیز پوشش فیبر نوری در شکل به رنگ سیاه نشان داده شده است. طول و عرض نشان داده شده در این شکل به ترتیب ۱۵ و ۳ میکروکتر می‌باشد. کنترل تداخل سنج ماخ زنر توسط ناحیه شکاف صورت می‌گیرد، با کوپل شدن نور در فیبر نوری بسته به این که در شکاف فیبر چه سیالی وجود دارد باعث ایجاد تداخل ماخ زنر می‌شود.



شکل -۱. الف. شمای سه بعدی از طرح را نشان می‌دهد و ب. ساختار دو بعدی از داخل فیبر نوری با شکاف ایجاد شده جهت استفاده از مکانیسم تداخل ماخ زنر را نشان می‌دهد(مقدار پارامترهای نشان داده شده L_O=14µm, L_I=10µm, L_R=1µm, H=3µm, H_M=0.5µm, H_U=1µm, H_D=0.5µm, H_L=0.5µm می باشد).

بنابراین عملکرد تداخل به این ناحیه وابسته است. با تغییر سرعت شبکه سیالی که به شکاف فیبر نوری وارد می‌شود، می‌توان عملکرد سوئیچ نوری را تنظیم کرد. این شبکه سیالی باعث تولید یک شبکه با ضریب شکست متفاوت که به صورت متناوب تکرار می‌شود. تغییر تناوبی ضریب شکست باعث، کنترل فرکانس و پهنای پالس می‌شود. در بخش بعد تئوری حاکم بر طرح شرح داده می‌شود.

۳- تئوری طرح

۳-۱- تئوری اپتیکی

اساس عملکرد سوئیچ ماخ-زنر در این طرح، تقسیم کردن نور به دو پرتو و هدایت در دو بازوی مختلف می‌باشد. با ایجاد اختلاف فاز در یکی از پرتوها و کوپل شدن دو پرتو در خروجی می‌توانیم تداخل سازنده یا ویرانگر را داشته باشیم. سازوکار عملکرد سوئیچ ماخ زنر را می‌توان به صورت زیر ارائه کرد[۶] :

[۱] Total Internal Reflection

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} n_{cl}^{eff} (L_1 - L_2) \quad (۱)$$

n_{cl}^{eff} ضریب شکست موثر بازوهای موجبر (L_1, L_2) برای دو مسیر و λ که طول موج نور فرود کوپل شده به فیبر نوری است. در این هندسه، همانطور که در فرمول-۱ نیز داریم اختلاف فاز وابسته به ضریب شکست موثر مسیر و طول راه نوری (ΔL) می¬باشد. شدت نور خروجی از رابطه-۲ بدست می¬آید:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\cos(\Delta\varphi) \quad (۱-۲)$$

$$V = \frac{(I_{max} - I_{min})}{(I_{max} + I_{min})} = 2\sqrt{k}/(1+k) \quad (۲-۲)$$

$$V = \frac{I_1}{I_2} \quad (۳-۲)$$

مقدار k ضریب وضوح تداخلات خروجی، I شدت نور خروجی، I1 و I2 به ترتیب شدت پرتو خروجی برای مسیر ۱و ۲ و برای وضوح تداخلات پرتو، پارامتر V تعریف شده است. بسته به اینکه این دو پرتو چه اختلاف فازی پیدا می¬کنند در خروجی شدت نور بیشینه (تداخل سازنده) یا کمینه (تداخل ویرانگر) را خواهیم داشت. بعلاوه این معادلات نشان می¬دهندکه تداخل پرتو تابعی متناوب از اختلاف فاز و ضریب شکست موثر است. پس می¬توان گفت با ایجاد دوره تناوب از سیالات قابل تغییر، به دوره تناوبی از ضریب شکست دست می¬یابیم، در نتیجه این تغییر سیال به تغییر شدت نور خروجی منجر می¬شود. در ادامه به بخش مربوط به سیالات و معادلات حاکم در این ضمینه می¬پردازیم.

۳-۲- تئوری سیالی

در این بخش معادلات جریان های چند فازی سیال در مقیاس میکرومتر که شامل دو سیال غیر قابل نفوذ است، مورد بررسی قرار می گیرد. در این مقیاس تنش سطحی و ویسکوزیته نقش مهمی در دینامیک طرح دارد. برای حل معادلات سیال، روش های متعددی برای حل جریان های چند فازی وجود دارد[۷]. در این مقاله از روش تعیین سطح به علت داشتن دقت مناسب و نشان دادن سطح سیالات استفاده می کنیم (جهت مطالعه بیشتر مزیت های استفاده از این روش به منبع[8] مراجعه نمائید). معادلات دینامیک سیالی که در این طرح استفاده شده است شامل معادلات ناویراستوکس هستند[۹]:

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (۳a)$$

$$\rho\left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u}\cdot\nabla\vec{u}\right) - \nabla\cdot\left[\eta\left(\nabla\vec{u} + \nabla\vec{u}^T\right)\right] + \nabla p = F_{st} \quad (۳b)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \vec{u}\cdot\nabla\phi = \gamma\nabla\cdot\left(-\phi(1-\phi)\frac{\nabla\phi}{|\nabla\phi|} + \varepsilon\nabla\phi\right) \quad (۳c)$$

ρ, u, t, η, p و F_{st} در این روابط به ترتیب چگالی برحسب (kg/m3) بردار سرعت (m/s) زمان (s) ویسکوسیته دینامیکی (Pa.s) فشار(Pa) و تنش سطحی (N/m). در اینجا تابع تعیین سطح γ و ε ضرایب تئوری پایداری هستند.

۴- نتایج شبیه سازی

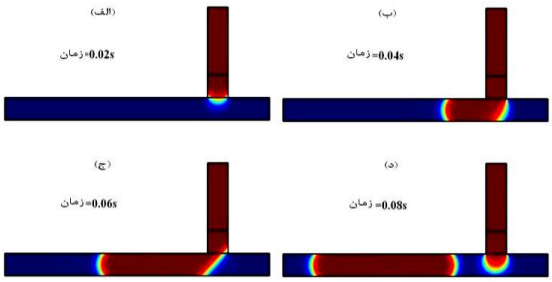
۴-۱- شبیه سازی دینامیک سیالات

در این بخش شبیه سازی رفتاری سیال های درون میکرو کانال بر اساس روابط ۳ به روش FVM می‌پردازیم. همان طور که در شکل ۲ نیز مشخص است دهانه افقی کانال برای ورود هوا، و از دهانه عمودی کانال برای ورود سیالات مختلف استفاده شده است. خواص دینامیکی سیالات مورد استفاده در جدول-۱ نشان داده شده است. این جدول شامل چگالی و ویسکوزیته برای سیالات مختلف است.

جدول-۱. خواص فیزیکی سیالات در فشار ۱ atm و دمای ۲۰° C

Fluid	ρ (kg/m^2)	μ(N·s/m^2)
Air	1.20	1.80×10^{-5}
Benzene	881	6.51×10^{-4}
Carbon tetrachloride	1590	9.67×10^{-4}
Ethanol	789	1.20×10^{-3}

در شکل-۲ توزیع سیال از دو کانال ورودی نشان داده شده است. برای مثال هوا و اتانول برای اعمال به ورودی‌های کانال انتخاب شده اند. ضریب تنش سطحی برای این دو سیال $\mathbf{F}_{st}$=0.0221 N/m و زاویه بین دیواره و سیال 3π/4 انتخاب شده‌اند. برای شبیه سازی در این قسمت اتانول با سرعت 16 mm/s و هوا با سرعت 8 mm/s به ورودی های کانال اعمال می‌شود.



شکل-۲. توزیع فاز هوا و اتانول درون میکرو کانال است. رنگ آبی نشان دهنده هوا که با سرعت ۸ mm/s به کانال افقی و رنگ قرمز حرکت اتانول را در داخل کانال با سرعت ۱۶ mm/s را نشان میدهد.

همان طور که در شکل-۲ نیز نشان داده شده است در ابتدا با گذشت زمان اتانول (که در دهانه عمودی اعمال شده است) شروع به حرکت کرده و به کانال افقی که هوا به آن اعمال شده است، می‌شود و به طور دوره ای تکرار می‌شود و باعث تشکیل شبکه یا قطره‌های متناوب سیال می‌شود. محدودیت سرعت سیالات به آهنک و سرعت شارش قطره ها در شکاف مربوط می شود که می‌تواند از چند ثانیه تا رسیدن به محدوده سرعت صوت حدود

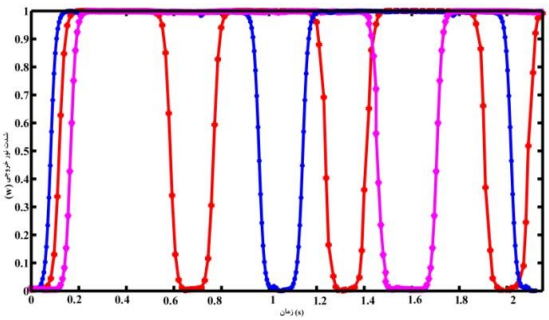
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]

عملکرد سوئیچ را مشخص کند. با بالا بردن سرعت می‌توان پهنای قطره (شبکه) ایجاد شده را تغییر داد. بنابراین می توان گفت که ما به شبکه ای متناوب با قابل تغییر ضریب شکست درون فیبر ایجاد کرده ایم. این تابع بدست آمده از ضریب شکست نسبت به زمان در بخش بعد مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۴-۲- شبیه سازی اپتیکی

در این بخش از نتایج بخش قبل، برای شبیه سازی سامانه اپتیکی استفاده می‌کنیم. با توجه به این که درشکاف میان فیبر نوری چه سیالی وارد شود، خروجی نوری می‌تواند صفر یا یک باشد. برای این منظور ما از هوا و یکی از سیالات مندرج در جدول-۱ بهره می‌بریم. ابتدا فرض می‌کنیم که در شکاف میان فیبر، هوا قرار دارد. پرتو نوری را با طول موج 1.5 μm به ورودی فیبر کوپل می‌کنیم. مکانیسم انتشار نور درون فیبر بر اساس بازتاب کلی TIR است. با توجه به این که مسیر عبور نور در بازوی بالایی بیشتر از مسیر دیگری می‌باشد اختلاف فازی که برای پرتو ایجاد شده ۱۸۰ درجه است، و در کوپل نور در قسمت انتهایی با توجه به تداخل ویرانگر موج از بین می‌رود این عملکرد به مکانیسم سوئیچ ماخ زنر شبیه است. حال به جای هوا در داخل فیبر از سیال با ضریب شکست نزدیک به ضریب شکست فیبر استفاده می کنیم برای این منظور از اتانول استفاده می‌کنیم. با ورود اتانول به میان فیبر و اعمال کردن پرتو نور به ورودی آن، به علت نزدیک بودن ضریب شکست به ضریب شکست فیبر، نور انحرافی نداشته و به صورت مستقیم حرکت می کند. در نتیجه در خروجی پرتو نوری خواهیم داشت.



شکل-۳. نمودار بهنجار شده شدت نور خروجی برحسب زمان که برای سرعت های متفاوت رسم شده است(در نمودار قرمز رنگ سرعت هوا و اتانول یکسان برابر ۸ mm/s است، در نمودار آبی رنگ سرعت هوا mm/s ۸ و سرعت اتانول ۱۶ mm/s می باشد، در نمودار صورتی که در آن سرعت هوا همان ۸ mm/s ولی سرعت اتانول به ۳۲ mm/s افزایش یافته است).

تغییر ضریب شکست سیال به صورت تابعی از زمان قابل حصول است. ضریب شکست ۱ و ۱,۳۶۱ بترتیب برای هوا و اتانول مد نظر گرفته شده است. علاوه بر کنترل زمان خاموش و روشن بودن پرتو نور خروجی، می توان پهنای پالس را نیز کنترل کرد. این پهنای پالس نوری که به PWM معروف است کاربرد فراوانی در تقویت کننده های نوری چیپ های فوتونیکی می‌تواند داشته باشد. بنابراین افزایش دوره تناوب سیال نیز باعث افزایش تابع ضریب شکست نسبت به زمان می‌شود، که این نیز پهنای پالس خروجی را کنترل می‌کند. این رفتار در شکل-۳ نشان داده شده است. لازم به ذکر است، در شبیه سازی‌ها اثرات دمایی در نظر گرفته نشده است زیرا حساسیت دمایی به ضریب انبساط دمایی و ضریب ترمو-اپتیکی مربوط می‌شود، که دراین ساختار با فرض خالص بودن سیلیکا (جنس فیبر نوری) این ضرایب ناچیز است بنابراین در دماهای معمول، کارکرد تداخل سنج به دما حساسیت چندانی ندارد.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله یک مدولاتور پهنای پالس نوری و قا بلیت کنترل با سیال معرفی شده است. مهم ترین مزیت این PWM سرعت سوئیچینگ و فرکانس است که قابلیت کنترل پذیری توسط سرعت سیال یا پهنای قطره را دارد. با توجه به نتایج این مقاله، مدت زمان روشن و خاموش بودن سوئیچ وابسته به پهنای قطره سیال است، که این نیز به سرعت سیال وابسته است.. این مقاله نشان می دهد که با استفاده از جریان‌های چند فازی، می‌توان افزاره های های تمام نوری مبتنی بر میکروه شاره زیادی را طراحی کرد که از ویژگی کنترل پذیری سیال استفاده کرد. این طرح دیدی وسیع برای استفاده در سیستم های با قابلیت برنامه پذیری و گیت‌های منطقی را پیش روی ما می‌نهد.

مراجع

[1] [1] R. Katouf, *et al.*, "Ultra-fast optical switches using 1D polymeric photonic crystals," *Photonics and nanostructures-Fundamentals and applications*, vol. 3, pp. 116-119, 2005.

[2] [2] G. Ma, *et al.*, "Ultrafast all-optical switching in one-dimensional photonic crystal with two defects," *Optics Express*, vol. 14, pp. 858-865, 2006.

[3] [3] D. Psaltis, *et al.*, "Developing optofluidic technology through the fusion of microfluidics and optics," *Nature*, vol. 442, pp. 381-386, 2006.

[4] [4] K. Yoshino, *et al.*, "Temperature tuning of the stop band in transmission spectra of liquid-crystal infiltrated synthetic opal as tunable photonic crystal," *Applied Physics Letters*, vol. 75, pp. 932-934, 1999.

[5] [5] M. Haruna and J. Koyama, "Thermooptic deflection and switching in glass," *Applied Optics*, vol. 21, pp. 3461-3465, 1982.

[6] [6] B. Sepulveda, *et al.*, "Optical biosensor microsystems based on the integration of highly sensitive Mach–Zehnder interferometer devices," *Pure Appl. Opt*, vol. 8, pp. 561-566, 2006.

[7] [7] G. Tryggvason, *et al.*, "A front-tracking method for the computations of multiphase flow," *Journal of Computational Physics*, vol. 169, pp. 708-759, 2001.

[8] [8] S. Osher and R. P. Fedkiw, "Level set methods: an overview and some recent results," *Journal of Computational Physics*, vol. 169, pp. 463-502, 2001.

[9] [9] R. W. Fox, *et al.*, *Introduction to fluid mechanics* vol. 7: John Wiley & Sons New York, 1985.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]