



بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شیراز،
شیراز، ایران.
۹-۱۱ بهمن ۱۳۹۷



بررسی تاثیر دما بر مقاومت الکتریکی مواد هسته و پوشش مدولاتورهای الکترو-اپتیک پلیمری

سمانه حامدی

دانشکده مهندسی برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

Hamedi@sutech.ac.ir

چکیده - در این مقاله تاثیر دما بر مقاومت لایه‌های هسته و پوشش در مدولاتورهای الکترو-اپتیک پلیمری بررسی شده است. در فرایند قطبی کردن هسته، دمای ماده تا دمای شیشه افزایش می‌یابد و منجر به کاهش مقاومت الکتریکی آن خواهد شد. ماده پوشش طوری انتخاب شده که مقدار مقاومت ویژه آن در دمای قطبی حداقل ۱۰۰ برابر کمتر از لایه هسته باشد. تحت این شرایط، اکثر میدان الکتریکی دو سر هسته قرار گرفته که منجر به افزایش بازدهی قطبی شده و بیشینه ولتاژ مدولاسیون دو سر هسته قرار می‌گیرد. با اضافه کردن ۱۵٪ وزنی ماده هادی PEDOT:PSS به لایه پوشش PVA مقاومت آن ۱۰۰ برابر کاهش یافته و وابستگی آن به حرارت نیز از بین می‌رود.

کلید واژه - الکترو-اپتیک، پلیمر، قطبی کردن، مدولاتور، مقاومت ویژه

Effect of Heat Treatment on Resistivity of Core and Clad layers of Polymer Electro-Optic Modulators

Samaneh Hamedi (hamedi@sutech.ac.ir)

Electrical and Electronic Department of Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran

Abstract- In this paper, the effect of temperature on the resistivity of the core and coating layers in the polymer electro-optic modulators has been investigated. In the polling process, the temperature of the material increases to glass temperature, which will reduce its electrical resistance. The clad material is selected so that the resistivity is at least 100 times lower than the core layer. Under these conditions, most of the electric field is on the core layer, which leads to an increase in the polling efficiency and the maximum modulation voltage is on the core layer. By adding 15% EDOT:PSS to the PVA, its resistivity is reduced by a hundred times and its dependence on the heat is also decrease.

Keywords: electro-optic, polymer, polling, modulator, resistivity

مقدمه

مدلاتور الکترو- اپتیک به عنوان عنصر اصلی در یک فرستنده نوری قابلیت انتقال داده از طریق شبکه‌های مخابرات نوری سریع را دارد [۱-۳]. برای طراحی و ساخت یک مدولاتور الکترو- اپتیک بر پایه موجبرهای نوری و با استفاده از مواد پلیمری، دو دسته پلیمر مورد نیاز است: (۱) پلیمر فعال برای لایه هسته و (۲) پلیمرهای غیرفعال برای لایه پوشش. خواص غیرخطی در لایه هسته با اعمال میدان الکتریکی و هم‌رستا سازی دوقطبی‌های کروموفور (فرایند قطبی کردن) poling، انجام می‌شود [۴]. به‌طور ایده‌آل هنگام قطبی کردن یک کروموفور غیرخطی، ضریب الکترو- اپتیک با بیشینه کردن میدان الکتریکی دوسر آن بدون شکست دی‌الکتریک می‌تواند افزایش یابد. با انتخاب مواد لایه پوشش با مقاومت الکتریکی کمتر از لایه هسته در دمای قطبی کردن اغلب میدان الکتریکی می‌تواند دو سر هسته قرار گیرد. در بسیاری از پلیمرهای عایق، هدایت بر واحد حجم (یا مقاومت ویژه) به دلیل غلظت حامل‌های بار نسبتاً کم حدود $10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ یا بیشتر است [۵، ۶]. مقاومت ویژه پلیمرها معمولاً با افزایش دما کاهش می‌یابد زیرا با افزایش دما حامل‌های بار بیشتری در هدایت شرکت می‌کنند. مشاهده شده اگر با افزایش دما تزریق بار کاهش یابد و شکست دی‌الکتریک دیرتر اتفاق بیفتد؛ به ازای میدان الکتریکی بیشتر بازدهی قطبی کردن افزایش یافته و ضریب الکترو- اپتیک به‌دست‌آمده بیشتر می‌شود [۷-۹].

روش انجام آزمایش

ماده استفاده شده در هسته، پلیمرهای غیرخطی پلیمر-PI amine-diazo-dinitro و PI-hydroxy-azo-sulfone هستند که کروموفور آزو به‌صورت شیمیایی به زنجیره اصلی پلیمر متصل شده است [۱۰]. برای لایه پوشش از Poly (pyromellitic و Polyvinyl Alcohol (PVA dianhydride-co-4, 4'-oxydianiline), amic acid solution (PAM) استفاده شده است. وابستگی دمایی

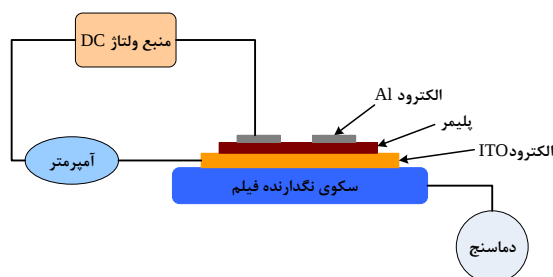
مقاومت الکتریکی ویژه پلیمرها با رابطه (۱) بیان می‌شود [۵].

$$\rho = \rho_0 \exp(U_A / KT) \quad (1)$$

که در این رابطه ρ_0 یک ثابت، U_A انرژی فعال‌سازی موبیلیتی بار، K ثابت بولتزمن و T دما است. مقاومت ویژه یک ماده پلیمری برحسب مقاومت اندازه‌گیری شده ($R=V/I$) با رابطه زیر استخراج می‌شود:

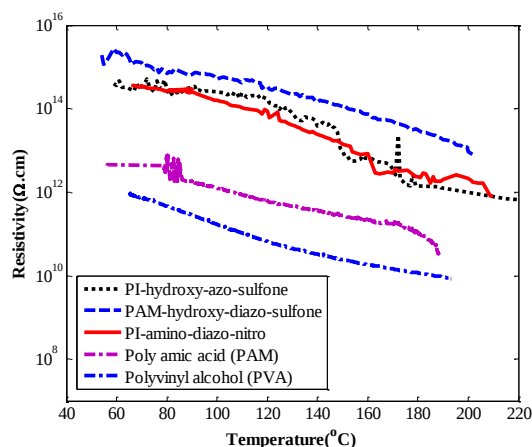
$$\rho = \frac{V}{I} \frac{A}{h} \quad (2)$$

که V ولتاژ اعمال شده به دو الکترو، I جریان اندازه‌گیری شده، A سطح مقطع الکترو و h ضخامت فیلم نازک پلیمری است. اندازه‌گیری‌ها برای پلیمرهای لایه‌نشانی شده بر روی زیرپایه شیشه که با ITO (به‌عنوان الکترو) پوشانده شده انجام می‌شود. الکترو دوم آلومینیوم است که بر روی سطح پلیمر پوشانده می‌شود. نمونه‌ها بر روی یک سکوی فلزی قرار داده می‌شوند و دما توسط دماسنجی که بر روی سطح تعبیه شده است کنترل می‌شود. چیدمان اندازه‌گیری مقاومت در شکل (۱) نشان داده شده است. همزمان با اعمال ولتاژ و افزایش دما کمیت‌های دما، ولتاژ و جریان عبوری از پلیمر اندازه‌گیری می‌شود. برای بررسی تغییر مقاومت ویژه پلیمر یک ولتاژ ثابت حدود ($E_p=100 \text{ V}/\mu\text{m}$) به نمونه‌ها اعمال شده و دما نیز از دمای اتاق تا دمای شیشه پلیمر ($T_p=200^\circ\text{C}$) افزایش یافته است. در این کار برای اندازه‌گیری و بررسی مقاومت ویژه از فیلم‌های تک‌لایه استفاده شده است.



شکل ۱: چیدمان اندازه‌گیری مقاومت ویژه پلیمرها در شرایط دمایی و ولتاژ قطبی کردن.

به هم و در محدوده $10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$ است و با افزایش دما تا دمای شیشه مقاومت آن‌ها صد برابر کاهش می‌یابد. در مقایسه با مقاومت پلیمرهای هسته نشان داده شده است که مقاومت دو پلیمر پوشش (PAM و PVA) در تمام رنج‌های دمایی، کمتر از پلیمرهای هسته است.



شکل ۲: محنی وابستگی مقاومت ویژه پلیمرها با دما

در دمای قطبی ($T_p = 180^\circ\text{C}$)، مقاومت ویژه PI-hydroxy-azo-sulfone ($\rho = 1.55 \times 10^{12}$) است که نسبت به دمای اتاق 10^2 برابر کاهش یافته و مقاومت PVA ($\rho = 1.15 \times 10^{10}$) است که نسبت به مقاومت ماده هسته کمتر کاهش یافته است. در دمای قطبی مقاومت هسته 10^2 برابر بیشتر از پوشش است. البته ضریب شکست آن‌ها نیز مهم است که با توجه به ضریب شکست کمتر و مقاومت کمتر PVA به‌عنوان لایه پوشش برای پلیمر هسته مناسب‌تر است. میدان الکتریکی در لایه هسته (E_1) برای ساختار پلیمری دولایه از رابطه (۳) تبعیت می‌کند:

$$E_1 = \frac{V_{app}}{h_1 + \frac{\rho_2}{\rho_1} h_2} \quad (3)$$

که h_1 و ρ_1 ضخامت و مقاومت ویژه لایه هسته، h_2 و ρ_2 ضخامت و مقاومت ویژه لایه پوشش زیرین، و V_{app} ولتاژ اعمال شده به ساختار دولایه است. توجه به رابطه (۳) اگر ρ_1 صد برابر یا بیشتر از ρ_2 بزرگتر باشد میدان الکتریکی لایه هسته برابر میدان الکتریکی تک لایه است ($E_p = V_{app}/h_1$). البته مقاومت پلیمر PI-hydroxy-azo-sulfone ($\rho = 3.92 \times 10^{14}$) در دمای اتاق 10^3 برابر بیشتر

در هنگام قطبی کردن افت ولتاژ دو سر پلیمر فعال هسته در دمای قطبی کردن برای بازدهی مهم است؛ زیرا در صورتی میدان الکتریکی دو سر پلیمر منجر به قطبی کردن می‌شود که جریان الکتریکی از پلیمر عبور نکند و پلیمر در دمای بالا هادی نشود. در ضمن مقاومت لایه هسته نیز باید بیشتر از لایه پوشش باشد که اکثر میدان الکتریکی قطبی در دو سر لایه هسته قرار گیرد. در ساختار مدولاتور، موجبری در لایه هسته اتفاق می‌افتد. بنابراین لازم است که دولایه پوشش یکی بر روی ITO و دیگری روی پلیمر هسته نشانداده شود که دارای ضریب شکست کمتر و مقاومت کمتر از پلیمر هسته باشند. برای کاهش ولتاژ مدولاسیون و بیشینه کردن پاسخ غیرخطی در قطعات ساخته شده، افت ولتاژ دوسر لایه هسته درحالی‌که پلیمر تک لایه است با هنگامی که لایه پوشش اضافه شده باید تقریباً یکسان باشد.

نتایج آزمایش

مقاومت‌های اندازه‌گیری شده پلیمرهای هسته و پوشش در دماهای ۶۰، ۱۰۰، و 180°C در جدول (۱) خلاصه شده است.

جدول ۱: مقاومت ویژه پلیمرهای استفاده شده در دمای ۶۰، ۱۰۰ و 180°C .

مواد	$\rho (\Omega \cdot \text{cm})$		
	($T=180^\circ\text{C}$)	($T=100^\circ\text{C}$)	($T=60^\circ\text{C}$)
PI-amino-diazo-dinitro	$3/66 \times 10^{14}$	$1/58 \times 10^{14}$	$2/3 \times 10^{12}$
PI-hydroxy-azo-sulfone	$3/92 \times 10^{14}$	$2/67 \times 10^{14}$	$1/55 \times 10^{12}$
PVA	$8/54 \times 10^{11}$	$1/68 \times 10^{11}$	$1/15 \times 10^{10}$
PAM	$4/47 \times 10^{12}$	$1/27 \times 10^{12}$	$1/12 \times 10^{11}$

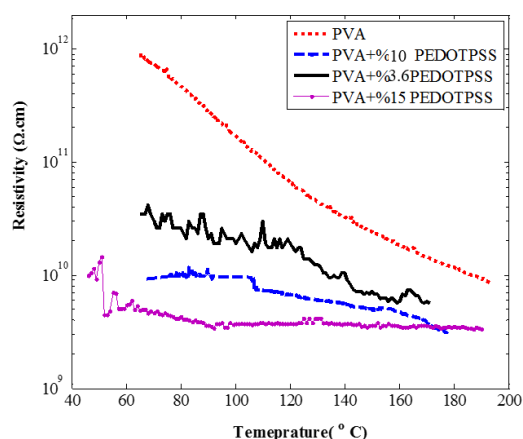
مقاومت ویژه پلیمرها برحسب افزایش دما تا دمای شیشه در شکل (۲) رسم شده است. با توجه به نمودارهای رسم شده مقاومت پلیمرهای هسته در دمای اتاق تقریباً نزدیک

بازدهی قطبی را کاهش می‌دهد. پلیمر PVA چون مقاومت کمتری نسبت به PAM دارد به عنوان لایه مناسب برای پوشش انتخاب شد. با اضافه کردن درصد وزنی مناسب ماده PEDOT:PSS به پلیمر PVA، وابستگی هدایت الکتریکی آن به دما نسبت به حالت خالص بسیار کاهش یافت.

مرجع‌ها

- [1] C. Hössbacher, A. Josten, B. Bäuerle, Y. Fedoryshyn, H. Hettrich, Y. Salamin, W. Heni, C. Haffner, C. Kaiser, and R. Schmid, "Plasmonic modulator with > 170 GHz bandwidth demonstrated at 100 GBd NRZ," *Optics Express*, vol. 25, no. 3, pp. 1762-1768, 2017.
- [2] C.-T. Zheng, L.-J. Zhang, L.-C. Qv, L. Liang, C.-S. Ma, D.-M. Zhang, and Z.-C. Cui, "Nanosecond polymer Mach-Zehnder interferometer electro-optic modulator using optimized micro-strip line electrode," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 45, no. 3, pp. 279-293, 2013.
- [3] Z. Pan, X. Xu, C.-J. Chung, H. Dalir, H. Yan, K. Chen, Y. Wang, and R. Chen, "High Speed Modulator Based on Electro-optic Polymer Infiltrated Subwavelength Grating Waveguide Ring Resonator," p. M2I. 2, 2018.
- [4] J. Luo, D. H. Park, R. Himmelhuber, Z.-L. Zhu, M. Li, R. A. Norwood, and A. K. Jen, "Efficient wafer-scale poling of electro-optic polymer thin films on soda-lime glass substrates: large second-order nonlinear coefficients and exceptional homogeneity of optical birefringence," *Optical Materials Express*, vol. 7, no. 6, pp. 1909-1916, 2017.
- [5] T. Miyamoto, and K. Shibayama, "Free-volume model for ionic conductivity in polymers," *Journal of Applied Physics*, vol. 44, no. 12, pp. 5372-5376, 1973.
- [6] M. Ieda, "Electrical conduction and carrier traps in polymeric materials," *Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, no. 3, pp. 162-178, 1984.
- [7] C. T. DeRose, Y. Enami, C. Loychik, R. Norwood, D. Mathine, M. Fallahi, N. Peyghambarian, J. Luo, A.-Y. Jen, and M. Kathaperumal, "Pockel's coefficient enhancement of poled electro-optic polymers with a hybrid organic-inorganic sol-gel cladding layer," *Applied physics letters*, vol. 89, no. 13, pp. 131102, 2006.
- [8] S. Huang, T.-D. Kim, J. Luo, S. K. Hau, Z. Shi, X.-H. Zhou, H.-L. Yip, and A. K.-Y. Jen, "Highly efficient electro-optic polymers through improved poling using a thin TiO₂-modified transparent electrode," *Applied Physics Letters*, vol. 96, no. 24, pp. 243311, 2010.
- [9] S. Michel, J. Zyss, I. Ledoux-Rak, and C. T. Nguyen, "High-performance electro-optic modulators realized with a commercial side-chain DR1-PMMA electro-optic copolymer," pp. 75990I-75990I-14, 2010.
- [10] H. Saadeh, A. Gharavi, D. Yu, and L. Yu, "Polyimides with a diazo chromophore exhibiting high thermal stability and large electrooptic coefficients," *Macromolecules*, vol. 30, no. 18, pp. 5403-5407, 1997.

از مقاومت PVA ($\rho=8.5 \times 10^{11}$) و 10^2 برابر بیشتر از مقاومت PAM ($\rho=4.5 \times 10^{12}$) است که برای افزایش بازدهی قطبی و ولتاژ مدولاسیون هردو به عنوان لایه پوشش مناسب هستند. مقاومت الکتریکی مواد عایق معمولاً با افزایش دما کاهش می‌یابد زیرا با افزایش دما حامل‌های بار بیشتری در هدایت شرکت می‌کنند. برای کاهش وابستگی مقاومت پلیمر PVA به دما، مقاومت ویژه آن به ازای اضافه کردن درصدهای وزنی متفاوت PEDOT:PSS بررسی شده است. با توجه به شکل (۳) با اضافه کردن پلیمر هادی PEDOT:PSS به پلیمر PVA مقاومت آن کاهش می‌یابد. همان‌طور که در نمودارها دیده می‌شود با افزایش درصد PEDOT:PSS وابستگی مقاومت PVA به دما کمتر و نسبتاً ثابت می‌شود. اما افزایش جذب نور در طول موج مادون قرمز و کیفیت بد لایه‌های نشاندۀ شده مطلوب نیست. با اضافه کردن درصد بالاتر از ۱۵٪، لایه‌های نشاندۀ شده یکنواخت نیست و پس از حرارت ذرات PEDOT:PSS در فیلم لایه‌نشانی شده به صورت پراکنده دیده می‌شود و فیلم در دمای 100°C تغییر رنگ و حالت سوخته پیدا می‌کند.



شکل ۳: منحنی وابستگی مقاومت ویژه PVA با دما و با اضافه کردن پلیمر هادی PEDOT:PSS به میزان ۳/۶، ۱۰ و ۱۵٪ وزنی.

نتیجه‌گیری

در این مقاله مقاومت ویژه پلیمرهای استفاده شده در لایه‌های هسته و پوشش مدولاتورهای الکترو-اپتیک پلیمری تحت افزایش دما تا دمای قطبی‌کردن بررسی شد. نتایج آزمایش نشان داد که با افزایش دما هدایت الکتریکی پلیمرها افزایش می‌یابد که منجر به تزریق بار شده و