



گاف نواری بلورهای فوتونی یک بعدی ساخته شده از لایه‌های متناوب

PMMA /MoS₂ و SiO₂/ MoS₂ تحت تابش باریکه گاوسی

دیزجقربانی اقدم، حسین؛ اشرفی؛ سید محمود، ملک‌فر، رسول
 گروه فیزیک اتمی و مولکولی، بخش فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

چکیده - در این مقاله، امکان به دست آوردن بلورهای فوتونی یک بعدی که شامل مواد کم هزینه و همیشه در دسترس دی اکسید سیلیکون (SiO₂) یا پلی متیل متاکریلات (PMMA) و تک لایه‌های دی سولفید مولیبیدیم (MoS₂) است ارائه شده است. با اعمال ماتریس انتقال تحت تابش باریکه گاوسی به بلورهای فوتونی با لایه های SiO₂/ MoS₂ و PMMA /MoS₂ و بکارگیری ضرایب شکست وابسته به طول موج این لایه ها، طیف تراگیسیل و ویژگی‌های گاف نواری فوتونی آنها مورد بررسی قرار گرفته است. با افزایش مختصه شعاعی I در باریکه گاوسی، مکان گاف نواری فوتونی به سمت فرکانس‌های پایین تر جابجا شدند. با افزایش ضخامت لایه‌های MoS₂ در هر یک از این بلورهای فوتونی، پهنای گاف نواری بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافت و یک جابجایی به سمت فرکانس های پایین تر را نشان داد.

کلید واژه- باریکه گاوسی، بلورهای فوتونی SiO₂/ MoS₂ و PMMA /MoS₂، گاف نواری، طیف تراگیسیلی

One-dimensional photonic crystals band gap made by alternating SiO₂ or PMMA with MoS₂ monolayers under irradiation of Gaussian wave

Dizajghorbani Aghdam, Hossein; Ashrafi, Seyyed Mahmood; Malekfar, Rasoul

Atomic and Molecular Group, Department of Physics, Tarbiat Modares University, Tehran, I.R Iran.

Abstract

In this article, the possibility to synthesize one dimensional photonic crystals consisting of low-cost and easily available materials, as silicon dioxide (SiO₂) or poly methyl methacrylate (PMMA), and MoS₂ monolayers has been presented. By applying of transfer matrix to a periodic photonic crystal structure MoS₂/SiO₂ and MoS₂/PMMA and employing the wavelength dependent refractive indexes of this layers, their transmission spectra and photonic band gaps properties were studied. By increasing of r (r is the radial coordinate) the photonic band gap is shifted toward the lower frequencies. By increasing the thickness of the MoS₂ layers in each of this photonic crystals, the width of band gap substantially increased and a shift toward lower frequencies revealed.

Keywords: Gaussian beam, MoS₂/SiO₂, MoS₂/PMMA, Photonic crystals, band gap, Transmission spectrum.

مقدمه

نواری فوتونی را به منظور تنظیم آن می توان کوک کرده و لومینسانس تک لایه های MoS₂ را افزایش داد [۲]. بلورهای فوتونی آرایه‌هایی از مواد دی‌الکتریک هستند که ضریب شکست به صورت متناوب در یک، دو و یا سه بعد تکرار شده است. مشخصه‌ی اصلی یک بلور فوتونی گاف نواری است که هنگام عبور یک موج الکترومغناطیسی با دامنه و فرکانس معین از ساختار بلور فوتونی ظاهر می‌شود [۸، ۹]. روش ماتریس انتقال یکی از روش‌های متداول برای بررسی ویژگی‌های طیف تراگیسیلی از یک بلور فوتونی یک بعدی می‌باشد [۱۰]. در این روش از یک موج تخت با توزیع شدت عرضی ثابت تحت تابش های عمودی و یا مایل با قطبش های مختلف استفاده

از آنجا که دی سولفید مولیبیدیم کاربردهای مختلفی در اپتیک و الکترونیک دارد در سالهای اخیر، تحقیق روی دی سولفید مولیبیدیم نازک مورد توجه تعداد زیادی از محققان واقع شده است [۳-۱]. گزارش های مختلفی در مورد ویژگی‌های اپتیکی، تولید نور تفکیک شده زمانی و لومینسانس چند لایه‌های MoS₂ [۴] و تک لایه MoS₂ [۵-۷] وجود دارد. امروزه بلورهای فوتونی کاربردهای فراوانی در فوتونیک و نانو فوتونیک یافته اند. این بلور ها می توانند طول موج‌های خاص را مسدود کرده و طول موج‌های دیگر را از خود عبور دهند و نور را به شکلی دقیق دستکاری کنند. برای مثال، گاف

توزیع میدان الکتریکی موج گاوسی با رابطه زیر داده می‌شود [۱۱]:

$$E(r, z) = E_0 \frac{W_0}{W(z)} e^{-\frac{r^2}{W^2(z)}} e^{-ikz} e^{i\eta(z)} e^{\frac{-ikr^2}{2R(z)}} \quad (1)$$

که در آن $W(z)$ پهنای باریکه، $R(z)$ شعاع انحناء و $\eta(z)$ فاز در فاصله Z هستند و به صورت زیر تعریف می‌شوند [۱۱]:

$$R(z) = z + \left(\frac{z_0^2}{z}\right) \quad W(z) = W_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_0}\right)^2} \quad \eta(z) = \arctan\left(\frac{z}{z_0}\right)$$

در روابط فوق، W_0 کمر باریکه و Z_0 طول رایلی است. در رابطه (۱) جمله آخر، جمله نمایی فازی است که به مختصات شعاعی r (عمود بر راستای انتشار) بستگی دارد. با فرض $d \gg Z_0$ (طول رایلی بزرگتر از ضخامت تیغه) با اعمال شرایط مرزی، پیوستگی مولفه‌های مماسی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در دو صفحه جلویی و عقبی تیغه، که در مرجع [۲۱] برای موج تخت استفاده شده است، ماتریس انتقال از تیغه را به صورت زیر به دست می‌آوریم.

$$M(r, \lambda) = \begin{bmatrix} \cos[q(r, \lambda) \frac{\omega d}{c}] & \frac{1}{q(r)} \sin[q(r, \lambda) \frac{\omega d}{c}] \\ -q(r, \lambda) \sin[q(r, \lambda) \frac{\omega d}{c}] & \cos[q(r, \lambda) \frac{\omega d}{c}] \end{bmatrix} \quad (2)$$

که در آن به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$q(r, \lambda) = (1 + \frac{r^2}{2Z_0^2}) n(\lambda) \quad (3)$$

برای یک بلور فوتونی یک بعدی متناوب با N لایه، ماتریس انتقال نهایی از حاصل ضرب ماتریس انتقال تک تک لایه‌ها بدست آمده و با رابطه زیر داده می‌شود:

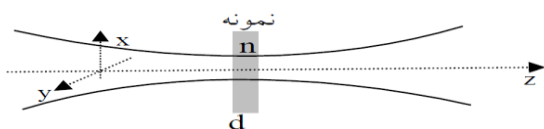
$$M = (M_A M_B)^N = \begin{pmatrix} m_{11}(r, \lambda) & m_{12}(r, \lambda) \\ m_{21}(r, \lambda) & m_{22}(r, \lambda) \end{pmatrix} \quad (4)$$

همان‌طوری که مشاهده می‌شود، عناصر ماتریسی به مختصه شعاعی r و طول موج λ بستگی دارند. در صورتی که طول رایلی به سمت بی‌نهایت میل کند، باریکه گوسی به موج تخت تبدیل شده و رابطه (۲) به ماتریس انتقال رایج موج تخت تبدیل می‌شود. هم‌چنین مشاهده می‌شود که ماتریس انتقال موج تخت با صفر قرار دادن r نیز در رابطه فوق به دست می‌آید. از روی این ماتریس، ضریب تراگسیل دامنه میدان با رابطه زیر داده می‌شود:

می‌شود. ولی باریکه خروجی از اکثر منابع لیزری به صورت گاوسی است که دامنه و فاز آن در راستای عرضی ثابت نمی‌باشد [۱۱]. ساختارهای چند لایه، مورد خاصی از بلورهای فوتونی یک بعدی هستند که به راحتی از روش‌های مختلفی ساخته می‌شوند [۱۲-۱۴] و می‌توانند کاربردهای مختلفی را در حسگرها [۱۵]، سویچ‌های الکترو اپتیکی [۱۶] و لیزرها [۱۷] داشته باشند.

هدف این مقاله پیش بینی ساخت آزمایشی نوع جدیدی از بلورهای فوتونی با مواد کم هزینه با پردازش آسان برای برنامه‌های کاربردی انتشار فوتونی و نور بوده و مطالعه و بررسی وابستگی گاف نواری بلورهای فوتونی یک بعدی $\text{SiO}_2/\text{MoS}_2$ و PMMA/MoS_2 به ضریب شکست وابسته به طول موج لایه‌ها، خواص فیزیکی لایه‌ها، تعداد لایه‌ها و مختصات باریکه گاوسی می‌باشد. تا به حال، مطالعه دقیقی روی خواص تراگسیلی بلورهای فوتونی چندلایه یک بعدی که لایه‌های نازکی از دی کالکوزن‌های فلزات واسطه نیمه هادی مختلف بکار گرفته شده در ساختارهای تناوبی صورت نگرفته است. در این مقاله، ابتدا بلورهای فوتونی یک بعدی که معمولاً در ساخت این نوع بلورها از مواد دی اکسید سیلیکون (SiO_2) و پلی متیل متاکریلات (PMMA) استفاده می‌شود، به همراه دی کالکوزن فلز واسطه MoS_2 در نظر گرفته شد. با استفاده از روش ماتریس انتقال و اعمال ضریب شکست وابسته به طول موج مواد، طیف تراگسیلی این بلور فوتونی یک بعدی با ساختار متناوب تحت باریکه گاوسی شبیه سازی شده و گاف نواری فوتونی برای حالت‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت.

ماتریس انتقال از یک تیغه تحت تابش باریکه گاوسی مطابق شکل-۱، تیغه‌ای به ضخامت d و ضریب شکست n را در نظر می‌گیریم که باریکه گاوسی با قطبش میدان الکتریکی TE به طور عمودی به آن می‌تابد. محور Z را راستای انتشار در نظر می‌گیریم (عمود بر صفحه تیغه) در این صورت سطح تیغه در صفحه $X-Y$ قرار خواهد داشت.



شکل-۱. طرحواره تابش باریکه گاوسی به یک تیغه به ضخامت d و ضریب شکست n ، برای محاسبه ماتریس انتقال دامنه میدانها از آن

و هر کدام از این بلورهای فوتونی دارای مشخصات زیر می باشند. در بلور فوتونی SiO_2 / MoS_2 لایه های SiO_2 و MoS_2

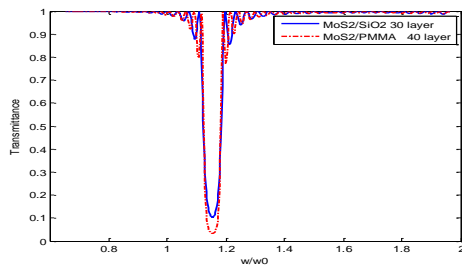
به ترتیب، دارای ضریب شکست های $n_{mos_2}(\lambda)$

و $n_{sio_2}(\lambda)$ وضخامت های $d_{mos_2} = 0.65nm$ و $d_{sio_2} = 250nm$ بوده و تعداد تناوب لایه ها، $N = 30$ (۶۰ لایه)، می باشد و در

بلور فوتونی $PMMA / MoS_2$ لایه های $PMMA$ و MoS_2 به ترتیب،

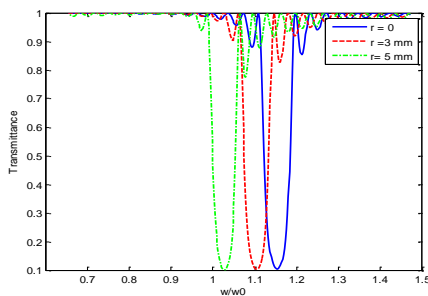
دارای ضرایب شکست $n_{pmma}(\lambda)$ و $n_{mos_2}(\lambda)$

ضخامت های $d_{sio_2} = 250nm$ و $d_{mos_2} = 0.65nm$ بوده و تعداد تناوب لایه ها، $N = 40$ (۸۰ لایه) می باشد.



شکل-۳. طیف های تراگسیل شدت برای بلورهای فوتونی SiO_2 / MoS_2 متشکل از ۳۰ لایه متناوب و $PMMA / MoS_2$ متشکل از ۴۰ لایه متناوب تحت تابش موج تخت

شکل-۴ نمودار ضریب تراگسیل شدت از بلورهای فوتونی با ساختار متناوب متشکل از لایه های SiO_2 / MoS_2 را نشان می دهد، که تحت تابش باریکه گاوسی با طول راییلی $Z_0 = 10mm$ و بر حسب فرکانس موج تابشی و مختصه شعاعی شعاعی r قرار گرفته شده است. در اینجا طول فرودی $\lambda_0 = 589nm$ در نظر گرفته شده است. با افزایش مختصه شعاعی باریکه گاوسی از $r = 0mm$ (که معادل با موج تخت می باشد) تا شعاع های بزرگتر ($r = 0mm, 3mm, 5mm$) مشاهده می شود که گاف نواری به سمت فرکانس های کوچکتر جابجا شده است.



شکل-۴. نمودار طیف تراگسیل شدت برای بلور فوتونی SiO_2 / MoS_2 متشکل از ۳۰ لایه متناوب تحت تابش باریکه گاوسی برای r های مختلف

$$t(r, \lambda) = \frac{2}{[m_{22}(r, \lambda) + m_{11}(r, \lambda)] - i[m_{12}(r, \lambda) - m_{21}(r, \lambda)]}$$

(۵)

ضریب تراگسیل شدت با رابطه ی $T(r, \lambda) = |t(r, \lambda)|^2$ داده می شود.

ضریب شکست وابسته به طول موج در مواد SiO_2 ، $PMMA$ و MoS_2

بلورهای فوتونی یک بعدی متناوب تشکیل شده از مواد $PMMA / MoS_2$ و SiO_2 / MoS_2 در نظر گرفته شد. ضریب شکست وابسته به طول موج SiO_2 به صورت زیر است [۱۸].

(۶)

$$n_{sio_2}(\lambda) = \left(1 + \frac{0.6962\lambda^2}{\lambda^2 - 0.0684^2} + \frac{0.4080\lambda^2}{\lambda^2 - 0.1162^2} + \frac{0.8975\lambda^2}{\lambda^2 - 9.8962^2}\right)^{1/2}$$

و همچنین ضریب شکست وابسته به طول موج $PMMA$ به صورت زیر است [۱۹].

(۷)

$$n_{pmma}(\lambda) = \left(1 + \frac{0.99654\lambda^2}{\lambda^2 - 0.00787} + \frac{0.18964\lambda^2}{\lambda^2 - 0.02191} + \frac{0.00411\lambda^2}{\lambda^2 - 3.85727}\right)^{1/2}$$

با در نظر گرفتن این نکته که ضریب شکست MoS_2 بصورت زیر به دست می آید.

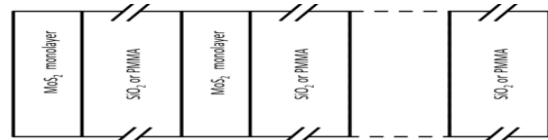
$$n_{mos_2} = \sqrt{\epsilon_{mos_2}}$$

(۸)

که در این رابطه، تابع دی الکتریک وابسته به طول موج MoS_2 (قسمت های موهومی و حقیقی) را می توان به دست آورد. [۲۰]

نتایج تحلیل عددی

طیف تراگسیلی بلورهای فوتونی متناوب که دارای لایه های SiO_2 و یا $PMMA$ که با تک لایه های MoS_2 جایگزین شده است، شبیه سازی شد. در شکل-۲ طرحی از این بلور فوتونی یک بعدی نشان داده شده است.



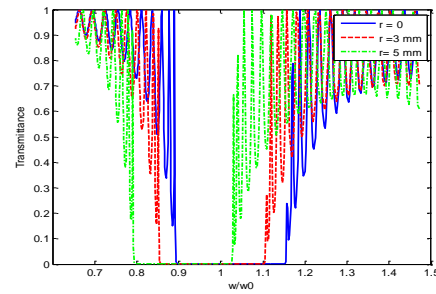
شکل-۲. طرحی از بلورهای فوتونی ساخته شده از لایه های متناوب

$$PMMA / MoS_2 \text{ و } SiO_2 / MoS_2$$

شکل-۳ نمودار ضریب تراگسیل شدت از بلورهای فوتونی با ساختار متناوب متشکل از لایه های SiO_2 / MoS_2 و $PMMA / MoS_2$ را نشان می دهد، که تحت تابش موج تخت قرار گرفته

مراجع

- [۱] Q.H. Wang, K. Kalantar-Zadeh, A. Kis, J.N. Coleman, M.S. Strano, *Electronics and optoelectronics of two-dimensional transition metal dichalcogenides*, *Nat. Nanotechnol.* 7 (2012) 699–712. doi:10.1038/nano.2012.193.
- [۲] R. Lv, J.A. Robinson, R.E. Schaak, D. Sun, Y. Sun, T.E. Mallouk, et al., *Transition Metal Dichalcogenides and Beyond: Synthesis, Properties, and Applications of Single- and Few-Layer Nanosheets*, *Acc. Chem. Res.* 48 (2015) 56–64. doi:10.1021/ar5002846.
- [۳] F. Xia, H. Wang, D. Xiao, M. Dubey, A. Ramasubramaniam, *Two-dimensional material nanophotonics*, *Nat. Photonics.* 8 (2014) 899–907. doi:10.1038/nphoton.2014.271.
- [۴] T. Borzda, C. Gadermaier, N. Vujicic, P. Topolovsek, M. Borovsak, T. Mertelj, et al., *Charge Photogeneration in Few-Layer MoS₂*, *Adv. Funct. Mater.* 25 (2015) 3351–3358. doi:10.1002/adfm.201500709.
- [۵] A.K.M. Newaz, D. Prasai, J.I. Ziegler, D. Caudel, S. Robinson, R.F. Haglund Jr., et al., *Electrical control of optical properties of monolayer MoS₂*, *Solid State Commun.* 155 (2011) 49–52. doi:10.1016/j.ssc.2012.11.010.
- [۶] K.F. Mak, C. Lee, J. Hone, J. Shan, T.F. Heinz, *Atomically Thin MoS₂: A New Direct-G Semiconductor*, *Phys. Rev. Lett.* 105 (2010).
- [۷] A. Splendiani, L. Sun, Y. Zhang, T. Li, J. Kim, C.-Y. Chim, et al., *Emerging Photoluminescence in Monolayer MoS₂*, *Nano Lett.* 10 (2010) 1271–1275. doi:10.1021/nl903868w.
- [۸] C.M. Soukoulis, *“Photonic Band Gaps and Localization”*; Plenum, New York, 1993.
- [۹] J. D. Joannopoulos, *“Photonic Crystals, Molding the Flow of Light”*; 2nd Ed., Princeton University Press (2008).
- [۱۰] Nian-hua Liu, Shi-Yao Zhu, Hong Chen, and Xiang Wu; *“Superluminal pulse propagation through one-dimensional photonic crystals with a dispersive defect”*; *Physical Review E*, 65, 046607 (2002).
- [۱۱] A. Yariv; *“Quantum Electronics”*; 3rd Ed., John Wiley & Sons (1989).
- [۱۲] L.D. Bonifacio, B.V. Lotsch, D.P. Puzzo, F. Scotognella, G.A. Ozin, *Stacking the Nanochemistry Deck: Structural and Compositional Diversity in One-Dimensional Photonic Crystals*, *Adv. Mater.* 21 (2009) 1641–1646. doi:10.1002/adma.200802348.
- [۱۳] S. Valligatla, A. Chiasera, S. Varas, N. Bazzanella, D.N. Rao, G.C. Righini, et al., *High quality factor 1-D Er³⁺-activated dielectric microcavity fabricated by RF-sputtering*, *Opt. Express* 20 (2012) 21214–21222. doi:10.1364/OE.20.021214.
- [۱۴] K.D. Singer, T. Kazmierczak, J. Lott, H. Song, Y. Wu, J. Andrew polymer distributed Bragg reflector laser, *Opt. Express*. 16 (2008) doi:10.1364/OE.16.010358.
- [۱۵] I. Pavlichenko, A.T. Exner, M. Guehl, P. Lugli, G. Scarpa, B.V. Lotsch, *Humidity-Enhanced Thermally Tunable TiO₂/SiO₂ Bragg Stacks*, *J. Phys. Chem. C.* 116 (2011) 298–305. doi:10.1021/jp208733t.
- [۱۶] L. Criante, F. Scotognella, *Low-Voltage Tuning in a Nanoparticle/Liquid Crystal Photonic Structure*, *J. Phys. Chem. C.* 116 (2012) 21572–21576. doi:10.1021/jp309061r.
- [۱۷] T. Komikado, S. Yoshida, S. Umegaki, *Surface-emitting distributed-feedback dye laser of a polymeric multilayer fabricated by spin coating*, *Appl. Phys. Lett.* 89 (2006) 061123. doi:10.1063/1.2336740.
- [۱۸] I.H. Malitson, *Interspecimen Comparison of the Refractive Index of Fused Silica*, *J. Opt. Soc. Am.* 55 (1965) 1205–1208. doi:10.1364/JOSA.55.001205.
- [۱۹] M. N. Polyanskiy. *Refractive index database*. Available at <http://refractiveindex.info>.
- [۲۰] B. Mukherjee, F. Tseng, D. Gunlycke, K.K. Amara, G. Eda, E. Simsek, *Complex electrical permittivity of the monolayer molybdenum disulfide (MoS₂) in near UV and visible*, *Opt. Mater. Express*. 5 (2015) 447. doi:10.1364/OME.5.000447.
- [۲۱] Nian-hua Liu, Shi-Yao Zhu, Hong Chen, and Xiang Wu; *“Superluminal pulse propagation through one-dimensional photonic crystals with a dispersive defect”*; *Physical Review E*, 65, 046607 (2002).



شکل-۵. نمودار طیف تراگیسیل شدت از بلور فوتونی SiO_2/MoS_2 با ۳۰ لایه متناوب و ۸ برابر کردن ضخامت لایه های MoS_2 تحت تابش باریکه گاوسی برای r های مختلف

با افزایش ضخامت لایه های MoS_2 در بلور فوتونی SiO_2/MoS_2 علاوه بر اینکه گاف نواری به سمت فرکانس های کوچکتر جابجا می شود پهنای گاف نواری نیز افزایش پیدا می کند. شکل-۵ نحوه افزایش پهنای و جابجایی فرکانسی گاف نواری را با ۸ برابر کردن ضخامت لایه های MoS_2 (قرار دادن ۸ لایه روی هم و جایگزین کردن این لایه ضخیم در بین لایه های SiO_2) در بلور فوتونی SiO_2/MoS_2 را نشان می دهد.

نتیجه گیری

بلورهای فوتونی با لایه های متناوب SiO_2/MoS_2 و MoS_2 | $PMMA$ تحت تابش باریکه گاوسی شبیه سازی شدند و طیف تراگیسیل آن به کمک ماتریس انتقالی که مقدار آن به ضریب شکست وابسته به طول موج لایه ها و مختصه شعاعی r باریکه گاوسی بستگی داشت، به دست آمد. با افزایش مختصه شعاعی r باریکه گاوسی گاف نواری به سمت فرکانس های کوچکتر جابجا شد. پهنای کم گاف نواری مشاهده شده که به علت کوچک بودن ضخامت لایه های MoS_2 ($d_{mos_2} = 0.65nm$) بود با افزایش ضخامت لایه های MoS_2 ، افزایش یافت و همچنین یک جابجایی به سمت فرکانس های کوچکتر نیز دیده شد. گاف نواری بلورهای فوتونی SiO_2/MoS_2 و MoS_2 | $PMMA$ به فاصله شعاعی از محور انتشار r و ضریب شکست وابسته به طول موج لایه های (SiO_2 , MoS_2 و $PMMA$) بلور فوتونی، بستگی داشت. این بستگی از وجود جمله نمایی وابسته r در میدان موج گاوسی و ضریب شکست وابسته به طول موج لایه های فوتونی حاصل می شود. انتشار مورب اشعه های بیرونی نسبت به اشعه مرکزی در باریکه گاوسی و وابستگی ضریب شکست لایه های فوتونی به طول موج توجیه کننده این تغییرات در گاف نواری بلورهای فوتونی SiO_2/MoS_2 و MoS_2 | $PMMA$ می باشد.