

GaAs/Al_xGa_{1-x}As یک ابرشبهه مبتنی بر

جمشیدی ، رضا ؛ شکری ، علی اصغر

گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه پیام نور، ص. ب. ۱۹۳۹۵-۳۶۹۷، تهران، ایران

چکیده

در این پژوهش بر روی یک ابرشبهه فوتونی یک بعدی که شامل زیر لایه‌هایی با درجه ترکیبات مختلف از Al_xGa_{1-x}As می‌باشد مطالعه می‌کنیم. با استفاده از روش ماتریس انتقال، ساختار نواری نوری آن در دو نوع قطبش TE و TM مورد بررسی قرار می‌گیرد و ساختار از نظر عبور امواج در قطبش‌های مختلف نسبت به پارامترهای مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است.

Photonic band structure of a superlattice based on GaAs/Al_xGa_{1-x}As

Jamshidi, Reza; Shokri, Aliasghar

Department of Physics, Payame Noor University (PNU), P.O. Box 19395-3697, Tehran, Iran

Abstract

Here we have studied a one-dimensional photonic superlattice that includes substrates with different compositions' degree of Al_xGa_{1-x}As. Use has been made of transmission matrices procedure to study its band structure in TE and TM polarization and wave transmission in different polarization is considered with respect to various parameters in this structure.

PACS No. 78

مقدمه

از آنجایی که کار اولیه یابلونویچ [۱] و جان [۲] بر روی بلورهای فوتونی توجه زیادی را به خود جلب کرده، کارهای قابل توجه بسیار زیادی بر روی طیف گسترده کاربردهای این بلورها انجام شده است. کاربردهایی مانند فیلترها [۳]، موجبر [۴]، سوئیچ‌ها [۵]، فیبرهای بلور فوتونی [۶] و غیره. باند شکاف فوتونی مطلق توسط فیبرهای بلور فوتونی سه بعدی آشکار شد که در این باند انتشار نور برای تمام زاوای تابش ورودی و تمام قطبش‌ها ممنوع است. بدین معنی که صرف نظر از زاویه تابش و قطبش، نور با فرکانسی که در ناحیه داخل شکاف بلور فوتونی باشد بطور کامل منعکس خواهد شد. در

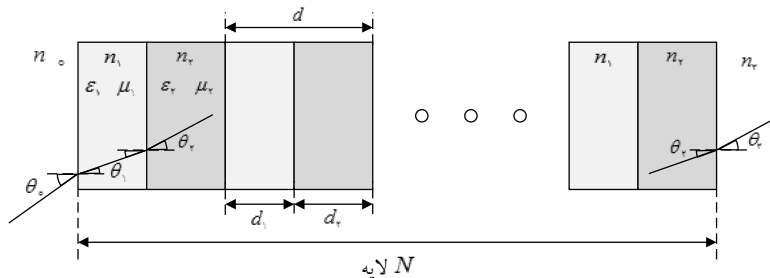
نتیجه این بلورها به عنوان بازتابنده‌های چندوجهی رفتار می‌کنند. بتازگی مشاهده شده است که علاوه بر بلورهای دو بعدی و سه بعدی فوتونی بلورهای یک بعدی فوتونیک هم می‌توانند ویژگی‌های بازتابنده چند جهته را از خود بروز دهند. پس از کشف ساختار شبه بلوری در سال ۱۹۸۴ توجه زیادی را به خود جلب کرده است.

در کار قبلی مان تغییرات خواص الکتریکی در ابرشبهه با غلظت‌های مختلف بررسی شد و در آن توانستیم رفتار گذار فاز از حالت فلزی به نیمرسانا را توجیه نماییم [۷].

مدل‌بندی مساله

ساختاری یک بعدی مطابق شکل ۱ که شامل N ساختار دولایه‌ای متناوب که از مواد همگن غیرپاشنده تشکیل شده است را در نظر می‌گیریم. هر لایه به ضخامت d است که ضخامت هر ورقه از آن d_1 و d_2 است به طوریکه $d = d_1 + d_2$. ضریب شکست‌های هر لایه n_1 و n_2 است. پارامترهای فیزیکی هر لایه $\epsilon_1, \mu_1, \epsilon_2, \mu_2$ است. این ساختار در محیطی قرار دارد که ضریب شکست سمت چپ n_0 و ضریب شکست سمت راست آن n_3 است. راستای تناوب ساختار لایه‌بندی را در جهت محور z ها در نظر می‌گیریم که

هر لایه در صفحه xy همگن است. موج الکترومغناطیس با زاویه θ_0 نسبت به محور z ها با ساختار برخورد می‌کند و به ترتیب با زاویه‌های θ_1 و θ_2 که طبق رابطه اسنل به دست می‌آیند وارد محیط‌های با ضریب شکست‌های n_1 و n_2 می‌شود. در نهایت با زاویه θ_3 از ساختار خارج می‌شود. دو مد الکترومغناطیس مستقل وجود دارد که به ترتیب مدهای TE و TM نامیده می‌شوند. بردار \vec{E} در موج TE و بردار \vec{H} در موج TM در جهت محور y ها در نظر گرفته می‌شود که عمود بر صفحه xz است.



شکل ۱: نمایی از ساختار چند لایه غیر پاشنده

است که در آن X فرکانس بهنجار شده، c سرعت نور در خلاء، ω بسامد زاویه‌ای است. با استفاده از رابطه (۱) ماتریس مشخصه انتقال هر لایه به صورت زیر به دست می‌آید

$$\mathbf{M}(d) = \mathbf{M}(d_1) \cdot \mathbf{M}(d_2) \quad (2)$$

برای ساختاری که دارای N لایه است ماتریس انتقال به صورت زیر به دست می‌آید

$$\mathbf{M}(Nd) = \underbrace{\mathbf{M}(d) \cdot \mathbf{M}(d) \dots \mathbf{M}(d)}_{N \text{ times}} = [\mathbf{M}(d)]^N = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \quad (3)$$

ضرایب بازتاب و عبور r و t طبق روابط زیر به دست می‌آیند

$$r = \frac{(M_{11} + M_{12} p_r) p_0 - (M_{21} + M_{22} p_r)}{(M_{11} + M_{12} p_r) p_0 + (M_{21} + M_{22} p_r)}$$

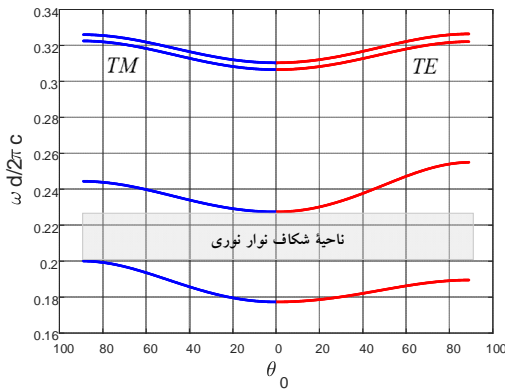
برای محاسبه بازتابندگی و تراگسیلندگی از روش ماتریس انتقال استفاده می‌کنیم. ماتریس مشخصه انتقال هر لایه طبق رابطه زیر به دست می‌آید [۹، ۸].

$$\mathbf{M}(d_j) = \begin{bmatrix} \cos \beta_j & -\frac{i}{p_j} \sin \beta_j \\ -ip_j \sin \beta_j & \cos \beta_j \end{bmatrix}, \quad j = 1, 2 \quad (1)$$

که پارامتر p_j وابسته به قطبش است که برای موج TE، $p_j = n_j \cos \theta_j$ و برای موج TM، $p_j = \cos \theta_j / n_j$ است و مقدار β_j مطابق رابطه

$$\beta_j = \sqrt{\pi a_j n_j X \cos \theta_j}, \quad d_j = a_j d, \quad a_1 + a_2 = 1, \quad X = \frac{\omega d}{\sqrt{2} \pi c}$$

$\theta(\lambda)$ (وابسته به طول موج) می‌شود که از رابطه اسنل
 $\sin \theta(\lambda) / \sin \theta_0 = n_0 / n(\lambda)$ به دست می‌آید.



شکل ۲: تغییرات تابع پاشندگی نوری برحسب فرکانس بهنجار شده به صورت
 تابعی از زاویه تابش فرودی. در اینجا غلظت آلومینیوم در زیرلایه‌های زوج ۰/۵
 انتخاب شده است.

در شکل ۲، تغییرات تابع پاشندگی به صورت تابعی از زاویه فرودی
 را نشان می‌دهد. همان طوری که مشاهده می‌شود مقادیر مینیمم در
 زاویه تابش فرودی صفر اتفاق می‌افتد. مقدار شکاف نواری نوری
 حدود ۰.۰۲۳ می‌باشد که این مقدار به غلظت ناخالصی بستگی دارد.
 همچنین در مقایسه با ساختار نواری الکترونی دیده می‌شود که گذار
 نوری بین شکافتگی نوارها غیرمستقیم است. نمودارهای سمت
 راست و چپ به ترتیب بیانگر قطبش TE و TM است.

رابطه (۴) بر اساس مدلی است که در مرجع [۱۰] با برازش داده‌های
 تجربی ماده مورد نظر به دست آمده است. با توجه به تابع پاشندگی
 نوری در شکل ۳ مشاهده می‌شود که برای غلظت‌های مختلف
 حداکثر $\omega d / 2\pi c$ تا عدد خاصی که در اینجا $x = 0.5$ تا حدود
 ۰/۴۲ تغییرات نشان می‌دهد. این محدودیت به واسطه انتخاب مقدار
 حقیقی ضریب شکست است که در مدل ذکر شده با داده‌های تجربی
 برازش نموده شده [۱۰]. شکل ۳، ضریب شکست تا مقدار حقیقی

$$t = \frac{2p_0}{(M_{11} + M_{12}p_r)p_0 + (M_{21} + M_{22}p_r)}$$

و بازتابندگی از رابطه $R = |r|^2$ و تراگسیلندگی از رابطه
 $T = p_r |r|^2 / p_0$ به دست می‌آیند. در ساختاری با تعداد تناوب
 محدود طبق قضیه بلوخ رابطه پاشندگی در هر زاویه تابش بصورت
 زیر به دست می‌آید

$$\cos(kd) = \frac{1}{2} \text{Tr}(\mathbf{M})$$

$$\cos(kd) = \cos \beta_l \cos \beta_r - \frac{1}{2} \left(\frac{p_r}{p_l} + \frac{p_l}{p_r} \right) \sin \beta_l \sin \beta_r \quad (3)$$

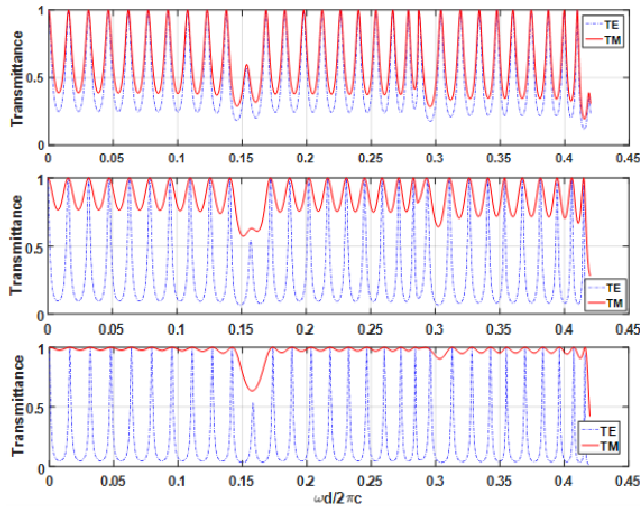
نتایج و بحث

در محاسبات عددی از ماده $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ با درجه غلظت x در هر
 ورقه از هر لایه استفاده می‌شود. مقدار غلظت برای زیرلایه‌های فرد
 x_1 و برای زیرلایه‌های زوج x_2 است. مقدار ضریب شکست
 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ طبق رابطه زیر به دست می‌آید [۱۰].

$$n(\lambda) = \sqrt{A_0 \left[f(\chi) + \frac{f(\chi_{so})}{2} \left(\frac{E_0}{E_0 + \Delta_0} \right)^2 \right] + B_0} \quad (4)$$

که در آن $\chi_{so} = \frac{hc}{\lambda(E_0 + \Delta_0)}$ و $f(\chi) = \frac{hc}{\lambda E_0} = \frac{2 - \sqrt{1 + \chi} - \sqrt{1 - \chi}}{\chi^2}$ است.
 همچنین ضریب شکست، λ طول موج، c سرعت نور در خلأ،
 h ثابت پلانک، $A_0 = 6.73 + 19.0x$ و $B_0 = 9.4 - 10.2x$ ثابت‌هایی
 هستند که به وسیله برازش با مقادیر تجربی به دست می‌آیند. پارامتر
 x کسری از Al است که در $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ وجود دارد،
 $E_0 = 1.425 + 1.155x + 0.37x^2$ شکاف نوار اصلی در نقطه Γ می‌باشد.
 از این‌رو، با در نظر گرفتن Δ_0 انرژی شکافتگی اسپین-مدار، به
 دست می‌آید. در اینجا، لایه‌ها غیرمغناطیسی در نظر گرفته شده‌اند.

موج نوری که از طرف چپ با ضریب شکست n_0 تحت زاویه θ_0
 به ابرشبهکتابه تابیده می‌شود چون تکفام نیست بنابراین با ورود به اولین
 لایه ابرشبهکتابه تجزیه شده و برای هر طول موج λ ، زاویه شکست



شکل ۴: تغییرات تراگسیلندگی برحسب زاویه تابش فرودی به ترتیب از بالا به پایین ۳۰، ۶۰ و ۷۰ درجه است. در اینجا غلظت آلومینیوم در زیرلایه‌های زوج ۰/۵ انتخاب شده است. نتایج مربوط به قطبش TE و TM به ترتیب با خط توپر و خطچین نمایش داده شده است.

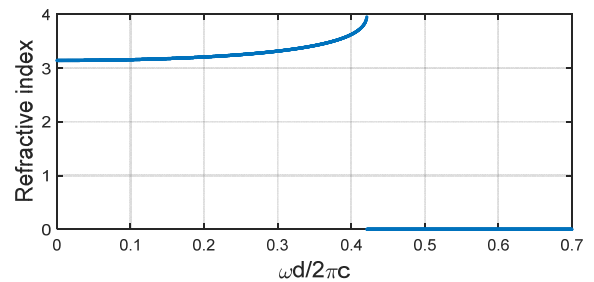
نتیجه گیری

با توجه به نتایج به دست آمده از ساختار لایه‌بندی شده $Al_xGa_{1-x}As$ می‌توان به عنوان بلور فوتونی برای جداسازی امواج TE و TM در فرکانس‌های مختلف استفاده کرد و در طول موج‌های پایین می‌توان با انتخاب مناسب از درجه کسر ترکیبی مختلف، شکاف باندهای مختلفی با دامنه فرکانسی متفاوت به دست آورد.

مرجع‌ها

- [1] E. Yablonovitch, *Phys. Rev. Lett.* **58**, 2059 (1987).
- [2] S. John, *Phys. Rev. Lett.* **58**, 2486 (1987).
- [3] S. P. Ojha, P. K. Choudhary, P. Khastagir, O. N. Singh, *Jpn. J. Appl. Phys.* **31**, 281 (1992).
- [4] H. Taniyama, *J. Appl. Phys.* **91**, 3511 (2002).
- [5] P. R. Villenruve, D. A. Abraham, S. Fan, J. D. Joannopoulos, *Opt. Lett.* **21**, 2017 (1996).
- [6] P. St. J. Russell, " *Science*, **299**, 358 (2003).
- [7] A. A. Shokri, *Physica B*, **438** (2014) 13 – 16.
- [8] P. Yeh, *Optical Waves in layered media*, Wiley, New York, (1988).
- [9] M. Born, E. Wolf, *Principles of Optics*, 7th ed., Cambridge University Press, New York (1999).
- [10] S. Adachi, *J. Appl. Phys.* **58**, No.3, (1985).

آمده است و تا این ناحیه مدل ما صادق می‌باشد. برای راحتی جایی که ضریب شکست موهومی می‌شود عمدا مقدار صفر برای ضریب شکست انتخاب شده است.



شکل ۳: نمودار ضریب شکست بر حسب فرکانس بهنجار شده در حالت $x = 0/5$. همانگونه که مشاهده می‌شود از فرکانس ۰/۴۲ به بعد ضریب شکست موهومی می‌شود.

در شکل ۴، تغییرات تراگسیلندگی برحسب زاویه تابش فرودی رسم شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود هرچه زاویه تابش افزایش می‌یابد عبور موج TM افزایش و عبور موج TE کاهش می‌یابد. علت آن می‌تواند به نزدیک شدن مولفه میدان الکتریکی نسبت به راستای فصل مشترک زیر لایه‌ها باشد که مشابه خواص الکتریکی در حالت عمود بر فصل مشترک مقاومت بیشتری در مقایسه با حالت موازی با فصل مشترک احساس می‌کند. در شکل ۴ حداکثر فرکانس بهنجار شده مقدار ۰/۴۲ انتخاب شده که تا این محدوده ضریب شکست حقیقی است.