

## Investigating the optical modes of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ alloy and $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}/\text{GaN}$ MQW in far-infrared reflectivity spectra

G.Mirjalili, R.Amraei

*University of Yazd, Department of Physics*

*E-mail: Gmirjalili@yazduni.ac.ir*

(Received:12/6/2005, received in revised form:17/12/2005)

**Abstract:** Optical properties of  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  alloy and  $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}/\text{GaN}$  multi quantum wells have been investigated in the region of far infrared. Far-IR reflectivity spectra of  $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}/\text{GaN}$  multi quantum wells on GaAs substrate have been obtained by oblique incidence p- and s-polarization light using effective medium approximation. The spectra and the dielectric functions response give a good information about the phonon and plasmon contribution in doped MQW as well as the mole fraction of compounds in the alloys. The changes in position of optical modes are good tools for measurement of the amount of free carrier and the amount of mole fraction in the samples. During study of  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  reflectivity spectra, two distinct reststrahl bands with frequency near those of pure InN and GaN were observed over entire composition range. Each band shifts to lower frequencies and decreases in amplitude as the concentration of corresponding compound in alloy decreased. Analysis of dielectric function gives the TO-like and LO-like mode frequencies. The changes in LO mode frequencies, due to coupling of phonon-plasmon, have been observed.

**Keyword:**  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ , MQW, Reflectivity Spectra, Far-Infrared, Optical Mode, Plasmon, Phonon, LO, TO.





## بررسی مدهای اپتیکی آلیاژ $In_xGa_{1-x}N$ و چاه کوانتومی چندتایی $In_{0.5}Ga_{0.5}N/GaN$ در ناحیه فرسرخ دور

غضنفر میرجلیلی، رضا امرائی

یزد، دانشگاه یزد، دانشکده فیزیک

پست الکترونیکی: [Gmirjalili@yazduni.ac.ir](mailto:Gmirjalili@yazduni.ac.ir)

(دریافت مقاله ۱۳۸۴/۳/۲۲، دریافت نسخه نهایی ۱۳۸۴/۹/۲۶)

چکیده: خواص اپتیکی چاه‌های کوانتومی چندتایی  $In_{0.5}Ga_{0.5}N/GaN$  و آلیاژ  $In_xGa_{1-x}N$  در ناحیه فرسرخ دور (Far-IR) مورد بررسی قرار گرفته‌اند. طیف بازتابی چاه کوانتومی چندتایی  $In_{0.5}Ga_{0.5}N/GaN$  با زیرلایه  $GaAs$  در ناحیه فرسرخ دور، با استفاده از تقریب محیط مؤثر، و پاسخ آن به نور قطبیده‌ی مایل s و p بررسی شده است. طیف حاصله و پاسخ تابع دی‌الکتریک اطلاعات مفیدی از سهم فونونی و پلاسمونی در چاه کوانتومی را ارائه می‌نماید. همچنین کسر مولی ترکیبات در آلیاژ و تغییرات محل مدهای اپتیکی وسیله‌ی مناسبی جهت اندازه‌گیری میزان حامل‌های آزاد و میزان کسر مولی در نمونه‌هاست. در بررسی طیف بازتابی  $In_xGa_{1-x}N$ ، دو ناحیه Reststrahlen جدا از هم با بسامدهایی نزدیک  $GaN$  و  $InN$  خالص به ازاء مقادیر مختلف ترکیب مشاهده شده‌اند. با کاهش غلظت هر ترکیب در آلیاژ، هر ناحیه به سمت بسامدهای پائین‌تر با دامنه‌ی کمتر جابه‌جا می‌شوند. آنالیز تابع دی‌الکتریک، تغییرات بسامد مدهای اپتیکی طولی LO و عرضی TO آلیاژ را با تغییر x نشان می‌هد. در حالت آلائیده تغییر بسامدهای مد LO به علت جفت‌شدگی مد فونون و پلاسمون مشاهده می‌شود.

واژه‌های کلیدی:  $In_xGa_{1-x}N/GaN$  چاه‌های کوانتومی چندتایی، طیف بازتابی، فرسرخ دور، پلاسمون، فونون، مد اپتیکی، مد طولی، مد عرضی.

## مقدمه

نیمرساناهای با پهنای گاف انرژی زیاد برای ساخت دیودها و لیزرهای با نوردهی در ناحیه بنفش، آبی، و سبز نیز کارائی آنها در الکترونیک دمای بالا، همواره مورد توجه پژوهشگران بوده است. در این میان نیمرساناهای گروه III-V برای توسعه قطعات اپتوالکترونیکی آبی / فرا بنفش توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند که این مهم به دلیل موفقیت‌های ناکامورا<sup>۱</sup> و همکارانش در ساخت چشمه‌های لیزر نیمرسانای آبی است.

رشد آلیاژهای سه‌تایی از جمله  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  برای ساخت قطعات بازتابنده نور از ناحیه مرئی تا ناحیه فرا بنفش مورد توجه است. ناکامورا لیزرهای دیود با گسیل طول موج در حدود ۴۰۵ نانومتر را با استفاده از یک ساختار چاه کوانتومی چندگانه  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$  برای محیط فعال ساخته است.

نیترایدهای گروه III با ساختار روی سولفید ششگوشی (wurtzite) یا با ساختار روی سولفید مکعبی (zincblend) متبلور می‌شوند. به عنوان مثال GaN را در نظر می‌گیریم. در ساختار ششگوشی، یاخته اولیه آن شامل دو زوج اتم Ga-N است، در حالیکه ساختار مکعبی فقط یک زوج اتم Ga-N را شامل می‌شود. در هر دو مورد یک اتم Ga، به صورت چهاروجهی به وسیله اتمهای N فرا گرفته شده‌اند. ساختارهای ششگوشی و مکعبی تنها در ترتیب چیده شدن دو لایه‌ای‌های GaN در جهت [۰۰۱] مکعبی که مطابق با جهت [۰۰۰۱] ششگوشی است فرق می‌کنند. لذا ترتیب چیده شدن در ساختار مکعبی به صورت ABCABC... است، در حالیکه در ساختار ششگوشی ABAB... است. ساختارهای چاه کوانتومی چندگانه  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  یک محیط فعال برای لیزرهای آبی فراهم می‌کند [۱]. در این مقاله خواص الکترونی و اپتیکی آلیاژ  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  و چاههای کوانتومی  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  ( $x=0.5$ ) متشکل از ترکیبات متفاوت GaN و InN را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

## روش بررسی

پاسخ تابع دی‌الکتریک به نور فرسرخ دور برای یک نیمرسانای با ساختار مکعبی، با فرض ارتعاش شبکه بلور به صورت نوسانگر کلاسیکی میرا، با در نظر گرفتن جمله درود<sup>۳</sup> برای پاسخ پلاسمونی به شکل زیر بیان می‌شود.

$$\varepsilon = \varepsilon_{\infty} + \sum_j \frac{\rho_j \omega_{TOj}^2}{\omega_{TOj}^2 - \omega^2 - i\gamma_j \omega} - \frac{\varepsilon_{\infty} \omega_p^2}{\omega^2 + i\omega\Gamma}$$

1- Nakamura

2- Multi Quantum Well

3- Drude term

$\varepsilon_{\infty}$  ثابت دی‌الکتریک در بسامد بالا،  $\rho$  قدرت نوسانگر و  $\omega_{TOj}$  و  $\gamma_j$  به ترتیب مد اپتیکی عرضی و ضریب میرائی فونونی است و  $\omega_p$  و  $\Gamma$  به ترتیب بسامد پلاسما و میرائی پلاسماست. به دلیل عدم رشد نمونه مناسبی از این آلیاژ و عدم وجود داده‌های تجربی در مورد رفتار تابع دی‌الکتریک آن، با چشم‌پوشی از پاسخ پلاسمونی، تابع دی‌الکتریک آلیاژ  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  را به صورت ترکیب خطی تابع دی‌الکتریک نیم‌رساناها در آلیاژ در نظر می‌گیریم.

$$\varepsilon_{\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}} = x \times \varepsilon_{\text{InN}} + (1-x) \times \varepsilon_{\text{GaN}}$$

این شکل تابع دی‌الکتریک برای  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  نیز مشاهده شده است [۲]. به علاوه فرض می‌کنیم که کریستالها به خوبی با هم آمیخته<sup>۴</sup> باشند و از اثر عدم انطباق پارامترهای شبکه<sup>۵</sup> چشم‌پوشی شده است.

برای مدهای عرضی آلیاژ  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  داده‌های تجربی در دسترس نیست. از آنجا که  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  نیز از آلیاژهای مبتنی بر GaN است، لذا برای ارائه مدلی که بتوان با کمک آن طیف‌های فونونی آلیاژ  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  را مورد بررسی قرار داد، با در نظر گرفتن بالاترین و پایین‌ترین مقادیر تجربی بسامد عرضی AlGaN، روابط زیر را برای بسامدهای عرضی GaN و InN در آلیاژ تعریف می‌کنیم.

$$\omega_{\text{TO}(\text{GaN})} = \omega_{\text{TO}(\text{GaN}_{\text{bulk}})} \quad x \times 11$$

$$\omega_{\text{TO}(\text{InN})} = \omega_{\text{TO}(\text{InN}_{\text{bulk}})} \quad (1-x) \times 11$$

برای بررسی طیف بازتابی MQW در جزئیات بیشتر، مفید است که تانسور دی‌الکتریک آن را طبق تقریب محیط مؤثر<sup>۶</sup> به عنوان یک بلور تک محوری با تانسور دی‌الکتریک به فرم زیر در نظر گرفت

$$\varepsilon(\omega) = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}(\omega) & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{yy}(\omega) & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{zz}(\omega) \end{bmatrix}$$

که  $\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy}$  است. تک محور c عمود بر لایه‌ها و در راستای محور z است و برای یک تناوب دوره‌ای a+b که در آن a ضخامت چاه و b ضخامت سد است:

$$\Lambda = a + b \ll \lambda$$

به علاوه از مفهوم تیغه کپه‌ای برای به دست آوردن مؤلفه‌های  $\varepsilon(\omega)$  استفاده می‌کنیم [۳].

$$\varepsilon_{xx}(\omega) = \varepsilon_{yy}(\omega) = \frac{\varepsilon_1(\omega)a + \varepsilon_2(\omega)b}{a + b}$$

- 
- 4- well mixed  
5- lattice miss mach  
6- effective medium

$$\varepsilon_{zz}^1 = \frac{\varepsilon_1^{-1}(\omega)a + \varepsilon_2^{-1}(\omega)b}{a+b}$$

در اینجا  $\varepsilon_1(\omega)$  و  $a$  به ترتیب تابع دی‌الکتریک و ضخامت لایه ۱ چاه کوانتومی چندتایی، و  $\varepsilon_2(\omega)$  و  $b$  کمیت‌هایی مشابه با لایه ۲ هستند.

در چاه‌های کوانتومی چندتایی ناآلاییده، قطبهای  $\varepsilon_{xx}$  بسامدهای اپتیکی عرضی و صفرهای  $\varepsilon_{zz}$  بسامدهای اپتیکی طولی را در بر می‌گیرند. با این وجود صفرها در  $\varepsilon_{xx}$  و قطبها در  $\varepsilon_{zz}$  از مکان حالت کپه‌ای خود به میزانی که به نسبت ضخامت  $a/b$  بستگی دارد جابه‌جا می‌شوند.

با استفاده از طیف نمایی فروسرخ دور قطبیده و پاسخ تابع دی‌الکتریک، طیف بازتابی آلیاژ  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) و چاه کوانتومی  $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}/\text{GaN}$  را با استفاده از نظریه چند لایه‌ایها [۴] به دست می‌آوریم. در حقیقت، در اینجا مدلی را ارائه کرده‌ایم که می‌توان طیف بازتابی چاه‌های کوانتومی در ناحیه فروسرخ دور را به دست آورد و در صورت در اختیار داشتن طیف تجربی می‌توان پارامترهای اپتیکی واقعی نمونه‌ها را اندازه‌گیری کرد.

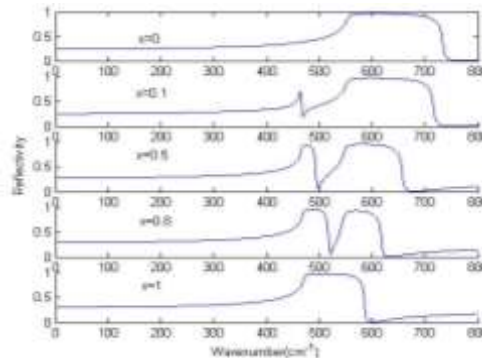
#### بررسی طیف فونونی آلیاژ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ در ناحیه فروسرخ دور

ترکیبات آلیاژ  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  هم با ساختار روی سولفید ششگوشی و هم با ساختار روی سولفید مکعبی قابل رشد است که ما آنها را با ساختار اخیر مورد بررسی قرار داده‌ایم.  $\text{GaN}$  دارای پهنای گاف انرژی  $3.4\text{eV}$  و پهنای گاف انرژی  $\text{InN}$  برابر است با  $1.9\text{eV}$ . هرچند رشد این آلیاژ به دلیل متفاوت بودن پارامترهای شبکه  $\text{InN}$  و  $\text{GaN}$  مشکل است و هنوز نمونه رضایت بخشی از آن رشد داده نشده است [۵]، ولی این ساختار از دیدگاههای مختلف نظری مورد مطالعه است که نتایج حاصله می‌تواند برای پژوهشگرانی که در زمینه رشد این گروه از نیم‌رساناهای فعالیت دارند، مفید باشد.

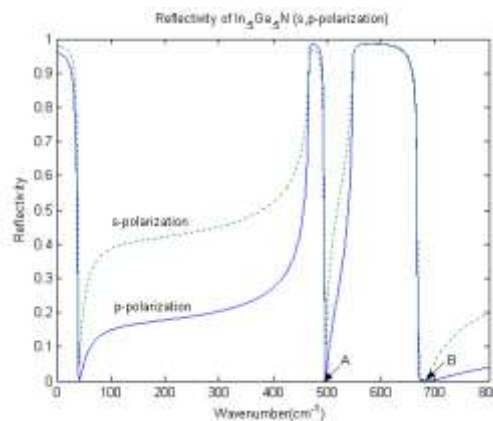
شکل ۱ طیف بازتابی آلیاژ  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  ناآلاییده کپه‌ای را به ازای مقادیر مختلف  $x$  با فرض ثابت بودن دیگر پارامترهای اپتیکی نشان می‌دهد. در حالت  $x=0$  و  $x=1$  به ترتیب ناحیه  $\text{Reststrahlen}$  مربوط به  $\text{GaN}$  و  $\text{InN}$  مشهود است. با افزایش  $x$  طیف دو ناحیه مشخص ظاهر می‌شود که یکی در بسامدهای نزدیک به مدهای فونونی خالص  $\text{InN}$  و دیگری در حوالی مدهای فونونی  $\text{GaN}$  خالص است. با افزایش سهم  $\text{In}$ ، نواحی  $\text{InN}$ -گونه به سمت بسامدهای بالاتر با دامنه بیشتر جابه‌جا می‌شوند. محل قله‌ها و دامنه آنها ابزار مناسبی برای اندازه‌گیری مقدار  $\text{In}$  و  $\text{Ga}$  در آلیاژ خواهد بود. میرائی مؤلفه‌های آلیاژ به صورت  $\gamma_{\text{GaN}} = 5\text{cm}^{-1}$  و  $\gamma_{\text{InN}} = 3\text{cm}^{-1}$  در نظر گرفته شده است. پارامترهای مورد نیاز بنابر جدول ۱ در مدل مورد استفاده قرار گرفته است که برخی پارامترها از منابع داده شده استخراج شده است.

طیف بازتابی آلیاژ  $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}$  آلائیده برای قطبش s و p و زاویه تابش  $45^\circ$  در شکل ۲ نشان داده شده است. این طیف در حضور پلاسمون،  $\omega_p = 250\text{cm}^{-1}$ ، با میرایی پلاسمونی  $\gamma_p = 2\text{cm}^{-1}$  رسم شده است. در این طیف میرایی فونونی GaN و InN به ترتیب  $1\text{cm}^{-1}$  و  $2\text{cm}^{-1}$  در نظر گرفته شده است. عامل به وجود آمدن مد تیز در طیف تابش با قطبش p در حدود  $495\text{cm}^{-1}$  به واسطه حضور مد بروستر است.

مد بروستر (شرط حذف تابش) وقتی مشاهده می‌شود که مخرج ضریب بازتابش فرنل در فصل مشترک دو محیط برابر صفر شود. منحنی پاشیدگی مدهای بروستر در فصل مشترک خلأ  $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}$  مؤید مطلب بالاست. با این وجود صفر شدن طیف بازتابی به واسطه حضور مد



شکل ۱ طیف بازتابی  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  با قطبیدگی p و زاویه تابش  $45^\circ$ ،  $0 \leq x \leq 1$ .



شکل ۲ طیف بازتابی آلیاژ  $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}$  با قطبش s و p.

جدول ۱ پارامترهای اپتیکی InN و GaN

	$\omega_{\text{TO}}$	$\omega_{\text{LO}}$	$\rho$	$\epsilon_\infty$
InN	۴۷۲[۶]	۵۸۶[۶]	۴,۵۴۷۶	۸,۴[۱]
GaN[۷]	۵۵۳	۷۳۳	۴,۰۵	۵,۳۵

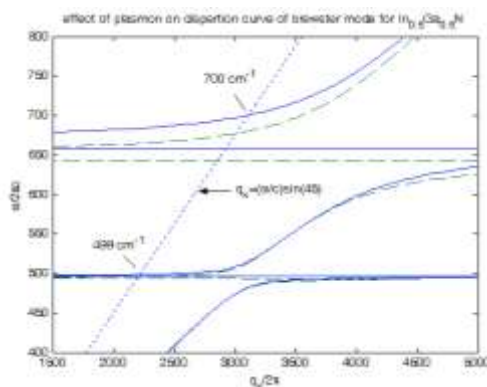
بروستر در قطبش s مشاهده نمی شود. رابطه پاشیدگی به صورت زیر بیان می شود:

$$q_x^2 = \frac{\omega^2}{c^2} \frac{(\epsilon_{xx} - \epsilon_1)}{(\epsilon_{xx}/\epsilon_1 - \epsilon_1/\epsilon_{zz})}$$

به طور کلی مدهای بروستر در ناحیه  $(\frac{\omega}{c}) < |q_x| < \epsilon_1^{1/2}(\frac{\omega}{c})$  قرار می گیرند [۸].  $\epsilon_{xx}$  و

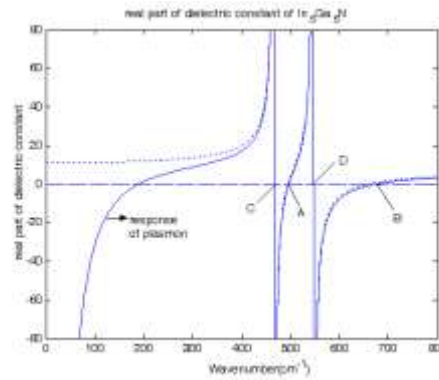
$\epsilon_{zz}$  مؤلفه های تانسور دی الکتریک آلیاژ  $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}$  و  $\epsilon_1$  ثابت دی الکتریک خلأ است.

در شکل ۳ منحنی پاشیدگی مدهای بروستر آلیاژ آلانئیده (منحنی توپر) و ناآلانئیده (منحنی خط چین) را نشان داده ایم که از برخورد خط نور  $(q_x = \epsilon_1^{1/2} \frac{\omega}{c} \sin 45^\circ)$  و منحنی پاشیدگی رخ می دهد. ماهیت بسامد پلاسما طولی است. جفت شدگی بسامد پلاسما ناشی از آلانئیدگی، با مدهای طولی و جابه جایی آنها ابزار مناسبی برای اندازه گیری مقدار بار آزاد در آلیاژ است. پلاسمون باعث جابه جایی مدهای بروستر نیز می شود. شکل ۳ منحنی توپر اثر پلاسمون با  $\omega_p = 250$ ، در منحنی پاشیدگی مدهای بروستر را نشان می دهد که در آن جابه جایی مدهای بروستر از  $495 \text{ cm}^{-1}$  به  $499 \text{ cm}^{-1}$  و از  $678 \text{ cm}^{-1}$  به  $700 \text{ cm}^{-1}$  کاملاً مشهود است. در یک ماده کپه ای ناآلانئیده بسامدهای ناشی از صفر در تابع دی الکتریک، چشم پوشی از میرائی، منطبق بر بسامدهای طولی فونون اپتیکی در مرکز ناحیه بریلوئن هستند. تکینگی و نقاط صفر در تابع دی الکتریک به ترتیب مقادیر TO-گونه و LO-گونه مربوط به GaN و InN را مشخص می کند. در شکل ۴ نقاط C و D به ترتیب محل مدهای عرضی گونه GaN و InN و نقاط A و B نیز به ترتیب مدهای طولی مربوطه هستند که این نقاط با تغییر x (کسر مولی InN در آلیاژ) جابه جا می شوند.



شکل ۳ منحنی پاشیدگی مد بروستر آلیاژ  $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}$  آلانئیده (منحنی توپر) و ناآلانئیده (منحنی خط چین).



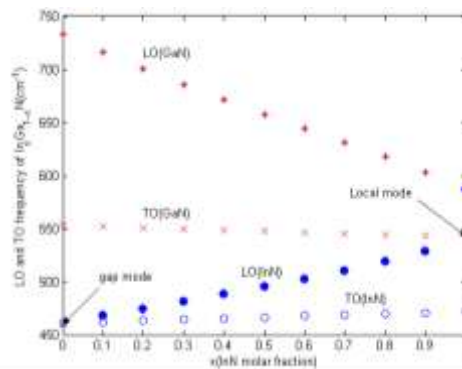


شکل ۴ منحنی توپر اثر پلاسمون در تابع دی الکتریک  $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}$  و منحنی نقطه چین تابع دی الکتریک بدون حضور پلاسمون را نشان می‌دهد.

اثر آلاییدگی با بسامد پلاسمون  $\omega_p = 250$  را بر تابع دی الکتریک آلیاژ  $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}$  را نیز در شکل ۴ نشان داده‌ایم (منحنی توپر). به طور کلی صفر شدن تابع دی الکتریک در بسامد طولی LO یا در بسامد پلاسما و یا در موردی که هم جمله فونونی و هم جمله پلاسمونی وجود داشته باشد رخ می‌دهد. همچنین جابه‌جائی مدهای A و B در اثر جفت‌شدگی مد طولی با بسامد پلاسمون در طیف بازتابی آلیاژ آلاییده در تابع دی الکتریک نیز مشاهده می‌شود. که جابه‌جائی مد بروستر B در اثر بار آزاد بیشتر از A است.

محل مد طولی LO-گونه مربوط به InN، نقطه A، با مد بروستر در نقطه  $495 \text{ cm}^{-1}$  برای آلیاژ ناآلاییده یکسان است. همچنین مد طولی LO-گونه مربوط به InN در آلیاژ آلاییده با مد بروستر  $499 \text{ cm}^{-1}$  در شکل ۳ یکسان است.

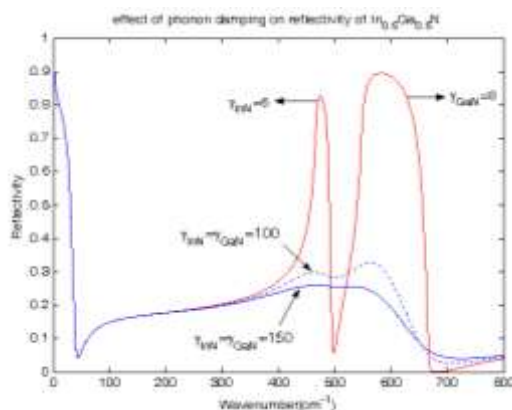
توابع دی الکتریک آلیاژ  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  ناآلاییده به ازای مقادیر مختلف x را بررسی و بسامدهای طولی این آلیاژ را محاسبه نموده‌ایم. شکل ۵ بسامدهای طولی و عرضی GaN به ترتیب (\* و \*\*) و بسامدهای طولی و عرضی InN به ترتیب (● و ○) به ازای سهم این مؤلفه‌ها در آلیاژ را نشان می‌دهد.



شکل ۵ بسامدهای طولی و عرضی آلیاژ  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  به ازای مقادیر مختلف x.

چنانکه در شکل ۵ مشاهده می‌شود بلور  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  در ردهٔ مواد دو مدی قرار دارد. برای یک مقدار میانی از  $x$  ( $0 < x < 1$ ) دو رشته از بسامدها در طیف مشاهده می‌شود. یک رشته از بسامدها به مدهای TO و LO مؤلفه سبکتر، GaN، و رشتهٔ دیگر به مدهای TO و LO مؤلفه سنگین‌تر، InN، مربوط می‌شوند. مدها در  $x \sim 0$  و  $x \sim 1$  تبهگن هستند. مد تبهگن در  $x \sim 1$  یک مد موضعی ریشه در غلظت باقیمانده مؤلفهٔ Ga در InN دارد. از طرف دیگر مد تبهگن در  $x \sim 0$ ، در ناحیه‌ای که تقریباً GaN خالص است، رخ می‌دهد که به مد گاف موسوم است و از باقیمانده ناخالصی In در مؤلفهٔ GaN به وجود می‌آید. بلورهای ترکیبی به شکل  $\text{AB}_{1-x}\text{C}_x$  به دو رده اصلی مطابق با رفتار فونونهای اپتیکی در  $k \sim 0$  تقسیم می‌شوند. به طور کلی اگر بسامدهای مؤلفه‌های AB و AC خیلی با هم تفاوت داشته باشند، یک رفتار دو مدی قابل انتظار است و چنانچه بسامدهای هر دو مؤلفهٔ AB و AC یکسان باشند، رفتار یک مدی حاصل خواهد شد [۲].

شکل ۶ اثر میرایی فونونی را با فرض ثابت بودن زاویهٔ تابش و دیگر پارامترهای اپتیکی نشان می‌دهد. بسامد پلاسما،  $\omega_p = 50 \text{cm}^{-1}$ ، میرایی پلاسما،  $\gamma_p = 10 \text{cm}^{-1}$  و زاویهٔ تابش  $45^\circ$  در نظر گرفته شده است. می‌بینیم که بلندی قله‌های ناحیهٔ Reststrahlen مربوط به InN و GaN با افزایش میرایی فونونی کاهش می‌یابند. عدم انطباق پارامترهای شبکه و نقایص بلوری باعث میرایی فونونی می‌شود. در نمونه‌هایی که خوب رشد داده نمی‌شوند و به عبارتی میرایی فونونی در آنها زیاد است، برخی از قله‌های منحنی تجربی حذف و یا به خوبی دیده نمی‌شوند [۵]. اطلاعات حاصله از مطالعهٔ آلیاژ  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  در بررسی طیف بازتابی MQW استفاده شده است.

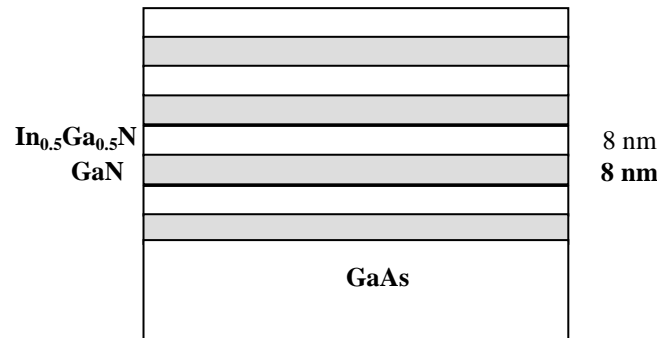


شکل ۶ اثر میرایی فونونی در طیف بازتابی آلیاژ  $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}$  با قطبش p.

### طیف بازتابی چاه‌های کوانتومی $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}/\text{GaN}$

ساختار  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  که در ساخت چشمه‌های لیزر نیم‌رسانای آبی اهمیت بسزایی دارد در سالهای اخیر توجه زیادی در صنعت اپتوالکترونیک را به خود جلب کرده است. در این بررسی فرض شده است که چاه‌های کوانتومی چندتایی روی یک زیر لایه‌ای از GaAs رشد داده شده است. در این نمونه  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  به عنوان چاه و GaN به عنوان سد در نظر گرفته می‌شود. شکل ۷ نمایی از MQW را روی زیرلایه GaAs نشان می‌دهد. MQW را به صورت تناوب چند صدتایی از  $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}/\text{GaN}$  در نظر می‌گیریم. در بررسی چاه‌های کوانتومی ضخامت سد و چاه برابر ۸ نانومتر در نظر گرفته شده است.

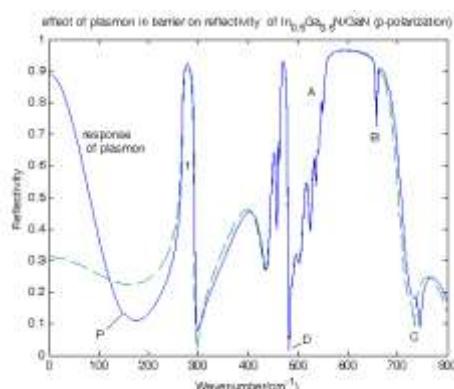
شکل ۸ طیف بازتابی چاه کوانتومی  $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}/\text{GaN}$  آلائیده (منحنی توپر) و ناآلائیده (منحنی خط چین) با قطبش P و زاویه تابش  $12^\circ$  را نشان می‌دهد که در آن به ازای  $x=0.5$  از پارامترهای جدول ۲ استفاده کرده‌ایم به علاوه آلائیدگی درسد،  $\omega_p = 200\text{cm}^{-1}$ ، و میرایی پلاسمون  $\gamma_p = 10\text{cm}^{-1}$  است. میرایی GaN در سد  $5\text{cm}^{-1}$  و در چاه  $3.5\text{cm}^{-1}$ ، و میرایی InN در چاه  $1.5\text{cm}^{-1}$  در نظر گرفته شده است. سایر پارامترها از منابع ذکر شده استخراج شده است.



شکل ۷ نمایی از MQW روی زیر لایه GaAs.

جدول ۲ پارامترهای اپتیکی مورد استفاده در چاه‌های کوانتومی

		$\omega_{\text{TO}} (\text{cm}^{-1})$	$\gamma (\text{cm}^{-1})$	$\rho$	$\epsilon_\infty$	ضخامت
Bulk	هوا	.	.	.	۱	....
	InN	۴۶۶.۵	۱.۵	۴.۵۴۷۶		
Alloy					۶.۸۷۵	۸nm
	GaN	۵۴۷.۵	۳	۴.۰۵[۷]		
Bulk	GaN	۵۵۳[۷]	۵	۴.۰۵[۷]	۵.۳۵[۷]	۸nm
Bulk	GaAs	۲۶۹.۲	۲.۵	۲.۰۳	۱۰.۹	



شکل ۸ طیف بازتابی چاه کوانتومی  $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}/\text{GaN}$  ناآلئیده با قطبش P و زاویه تابش  $12^\circ$ .

برای بررسی مدهای اپتیکی، مؤلفه  $\epsilon_{xx}$  تابع دی‌الکتریک در شکل ۹ رسم شده است. مدهای ۱ و ۲ به ترتیب بسامد عرضی  $\text{InN}$ -گونه،  $\omega_{TO-like}(\text{InN})$ ، و بسامد عرضی  $\text{GaN}$ -گونه،  $\omega_{TO-like}(\text{GaN})$ ، در چاه هستند و مد ۳ بسامد عرضی  $\text{GaN}$ ،  $\omega_{TO}(\text{GaN})$ ، در سد است (که بسامدهای TO و LO مربوط به طیف بازتابی شکل ۸ را مشخص می‌کنند). بسامد عرضی  $\text{GaN}$ -گونه (مد ۲) و بسامد عرضی  $\text{GaN}$  (مد ۳) بسیار به هم نزدیک هستند. بسامد عرضی  $\text{GaN}$ -گونه در طیف انعکاسی برآمدگی تیز در نقطه A است.

فرورفتگی تیز در C مربوط به مد طولی  $\text{GaN}$  است، و نقطه B مد طولی  $\text{GaN}$ -گونه و نقطه D مد طولی  $\text{InN}$ -گونه در طیف بازتابی چاه کوانتومی هستند. به علاوه ناحیه ۱، Reststrahlen مربوط به زیر لایه  $\text{GaAs}$  است. علاوه بر مدهای ذکر شده مدهای دیگری نیز در طیف انعکاسی مشاهده می‌شود که به صورت تناوبی ظاهر شده‌اند و ناشی از تداخل سازنده پرتوهای بازتابشی از سطح چاه کوانتومی و سطح زیر لایه است. از این خاصیت تداخلی برای اندازه‌گیری ضخامت لایه‌ها استفاده می‌شود.

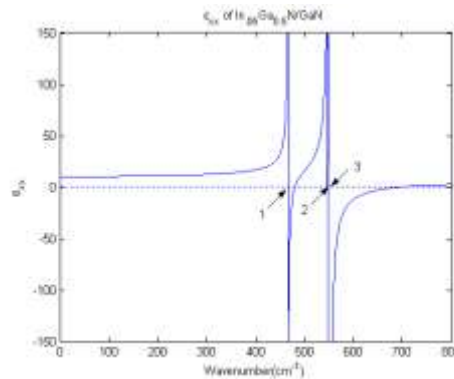
اثر آلئیدگی در سد با جابه‌جایی بسامد طولی در نقطه C نشان داده شده است. این جابه‌جایی در اثر جفتیدگی بسامد پلاسمون با مد طولی  $\text{GaN}$  حاصل شده است. آلئیدگی در محل نقاط B و D (بسامدهای طولی  $\text{GaN}$ -گونه و  $\text{InN}$ -گونه در چاه) هیچ تأثیری ندارد. همچنین آلئیدگی در سد بر نقطه A که مد عرضی  $\text{GaN}$ -گونه است، بی‌اثر است. محل C شاخص خوبی برای بررسی میزان آلئیدگی در سد پتانسیل به شمار می‌رود. فرورفتگی P پاسخ پلاسمون یا در واقع صفر مؤلفه Z تانسور دی‌الکتریک در نمونه آلئیده است.

منحنی مؤلفه Z تانسور دی‌الکتریک را برای چاه کوانتومی  $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}/\text{GaN}$  با آلئیدگی در سد، بدون در نظر گرفتن میرایی، در شکل ۱۰ رسم شده است. منحنی نقطه چین در شکل ۱۰، مؤلفه  $\epsilon_{zz}$  تابع دی‌الکتریک، مدهای ۱ و ۲ به ترتیب بسامد طولی  $\text{InN}$ -گونه، و بسامد طولی  $\text{GaN}$ -گونه، در چاه و مد ۳ بسامد طولی  $\text{GaN}$ ،  $\omega_{LO}(\text{GaN})$ ، در سد است. این نمودار

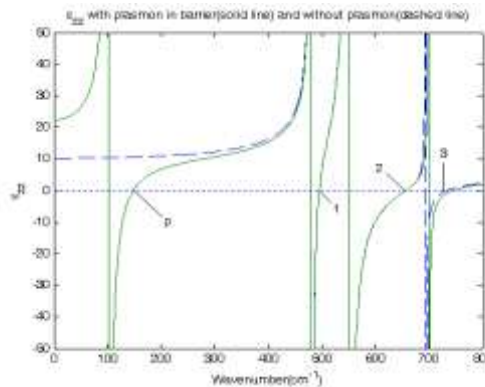
وابستگی مد طولی نقطه ۳ را به سد پتانسیل نشان می‌دهد. جابه‌جایی  $\epsilon_{zz}$  در مد طولی GaN ( $733 \text{ cm}^{-1}$ ) در اثر آلاییدگی است. در صورتیکه در منحنی  $\epsilon_{zz}$  تغییری در بسامد مدهای ۱ و ۲ به وجود نمی‌آید.

شکل ۱۱ طیف بازتابی آلیاژ  $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}/\text{GaN}$  با زاویه تابش  $12^\circ$  در قطبش s را نشان می‌دهد (منحنی نقطه چین). وقتی  $\epsilon_{xx}$  منفی است، بازتاب هم برای قطبش s و هم برای قطبش p زیاد است. بازتاب سطح زمینه قطبش s و p با هم متفاوتند ( $R_s > R_p$ )، که این موضوع به دلیل وابستگی زاویه‌ای انعکاسی برای تابشهای قطبیده است.

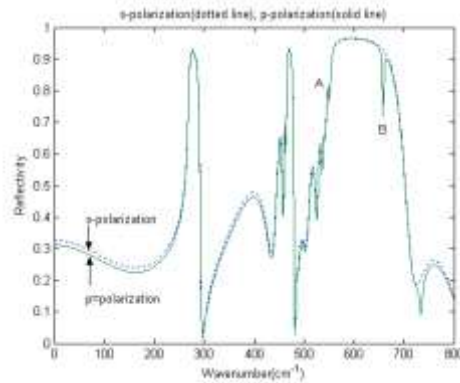
در طیف انعکاسی با قطبش s فقط مؤلفه تانسور دی‌الکتریک  $\epsilon_{xx}$  معرفی می‌شود ولی در قطبش p هم  $\epsilon_{xx}$  و هم  $\epsilon_{zz}$  بررسی می‌شوند. به عبارتی قطبها در  $\epsilon_{xx}$  یعنی در هر بسامد مد TO، برای هر دو قطبش s و p رخ می‌دهند. چنانکه دیده می‌شود مد عرضی InN-گونه در نقطه A در قطبش s نیز به خوبی ظاهر شده است. ولی مد LO-گونه GaN در B دیده نمی‌شود. فرورفتگیها در قطبش p، در صفرهای  $\epsilon_{zz}$  (یعنی در  $495 \text{ cm}^{-1}$ ،  $658 \text{ cm}^{-1}$  و  $733 \text{ cm}^{-1}$ ) رخ می‌دهد.



شکل ۹ مؤلفه  $\epsilon_{xx}$  تابع دی‌الکتریک چاه کوانتومی  $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}/\text{GaN}$ ، صرفنظر از میرائی.



شکل ۱۰ مؤلفه  $\epsilon_{zz}$  تابع دی‌الکتریک چاه کوانتومی  $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}/\text{GaN}$  آلاییده (منحنی توپر) و ناآلاییده (منحنی خط چین)، صرفنظر از میرائی.



شکل ۱۱ طیف بازتابی قطبش s (منحنی نقطه چین) و p (منحنی توپر) برای چاه کوانتومی.

### برداشت

طیف بازتابی آلیاژ  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  به ازای سهم‌های مختلف مولی ترکیبات آن در نور قطبیده مایل بررسی شد. با رسم تابع دی‌الکتریک آلیاژ و منحنی پاشیدگی مدهای بروستر محل دقیق مدهای طولی LO و مدهای عرضی TO آلیاژ مشخص شد و با انطباق طیف تجربی نمونه‌ها که با روش تبدیل فوریه حاصل می‌شود با طیف حاصله از این مدل، می‌توان میزان اثر هر یک از عناصر In و Ga را با دقت خوبی در آلیاژ اندازه‌گیری کرد. جابه‌جائی مدهای طولی و پاسخ پلاسما در بسامدهای خارج از ناحیه Reststrahlen ابزار خوبی برای اندازه‌گیری مقدار بار آزاد در نمونه خواهد بود.

در چاه‌های کوانتومی چندتایی (فراشبه با تناوب بلند)  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  با توجه به تقریب محیط مؤثر بر روی معادله پاشیدگی و با فرض تک محوری بودن بلور، با استفاده از مدل تیغه کپه‌ای و نظریه چندلایه‌ایها طیف بازتابی با نور قطبیده را بررسی کرده و محل دقیق مدهای طولی و عرضی در چاه و سد پتانسیل را به دست آورده‌ایم. حضور بار آزاد و جفتیدگی مد پلاسما با مد طولی در طیف بازتابی و تانسور دی‌الکتریک، جابه‌جائی مد طولی (LO) GaN در اثر افزایش بار، ابزار مناسبی برای بررسی ساختار MQW، مدهای اپتیکی، و میزان بار آزاد در نمونه است.

### مراجع

- [1] Herima H., "Properties of GaN and related compounds studied by means of Raman scattering", J. Phys. Condens. Matter, Vol. 14 (2002) PP. 967.
- [2] Bergman L., Nemanich R.J., "Raman spectroscopy for characterization of hard wide band gap emiconductors diamond, GaN, GaAlN, AlN, BN", Annu. Rev. Matter. Sci., Vol. 26 (1996) PP. 551.
- [3] Farjami Shayesteh S., Dumelow T., Parker T.J., Mirjalili G., Vorobjev L.E., Donetsky D.V., Kastalsky A., "Far-infrared spectra of reflectivity,

*transmission and hot-hole emission in p-doped GaAs/Al<sub>0.5</sub>Ga<sub>0.5</sub>As multi quantum well*", *Semicond. Sci. Technol.*, Vol. 11 (1996) PP. 323.

[4] Dumelow T., Parker T.J., Smith S.R.P., Tilley D.R., "*Surface Science Reports*", North-Holland (1993).

[5] Yang T.R., Dvoynenko M.M., Cheng Y.F., "*Far-IR investigation of thin InGaN layers*", *Physica. B*, Vol. 324 (2002) PP. 268.

[6] Kaczmarczyk G., Kaschner A., Reich S., Hoffmann A., Thomsen C., "*Lattice dynamics of hexagonal and cubic InN: Raman-scattering experiments and calculations*", *Appl Phys. Lett.*, Vol. 76 (2000) PP. 2122.

[7] Mirjalili G., Dumelow T., Parker T.J., Farjami Shayesteh S., Cheng T.S., Foxon C.T., Jenkins L.C., Lacklinson D.E., "*Far infrared spectroscopy of thin epitaxial layers of GaN deposited by molecular beam epitaxy on GaP substrate*" *Infrared Physics & Technology*, Vol. 37 (1996) PP. 389.

[8] Dumelow T., Tilley D.R., "*Optical properties of semiconductor and superlattices in the far infrared*", *Opt. Soc. Am. A*, Vol. 10, No. 4 (1993) PP. 633.