

## نقش نیتروژن در کاهش گاف نواری نانو ساختار InGaNAs

غلامی، مریم<sup>۱</sup>؛ هراتی زاده، حمید<sup>۱،۲</sup>؛ هولتز، پر اولاف<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>گروه فیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود، بلوار دانشگاه، شاهرود

<sup>۲</sup>انستیتیوی فیزیک و تکنولوژی سنچس دانشگاه لینشوپینگ، لینشوپینگ، سوئد

### چکیده

بررسی نقش نیتروژن در آلیاژهای InGaNAs نشان می دهد که با حضور نیتروژن تراز جایگزیده ای در نوار رسانش این نیمه رسانا ایجاد می شود که با آن وارد برهمکنش شده و در اثر دافعه نواری بین آنها، گاف انرژی کاهش می یابد.

بررسی نیتروژن به عنوان یک عامل اختلال در سیستم، با استفاده از محاسباتی بر پایه هامیلتونی  $k.p$ ، حضور دو زیر تراز انرژی شامل  $E_+$  و  $E_-$  در نوار رسانش را نشان می دهد که با افزایش غلظت نیتروژن این زیر ترازها از یکدیگر دور می شوند.

همچنین در این گزارش اثرات فوق به طور تجربی واز طریق مطالعات طیف نمایی فتولومینسانس مورد بررسی قرار گرفته است و به نقش جایگزیدگی در اثر حضور نیتروژن نیز اشاره شده است که عدم تقارن طیفهای فتولومینسانس مخصوصا در دماهای پایین نشانه آشکاری از این اثر می باشد. علاوه بر این، اثر دما نیز در کاهش گاف نواری مورد بررسی قرار گرفته است.

## Effect of nitrogen on the bandgap reduction of InGaNAs nano-structure

Gholami. Maryam<sup>1</sup>, Haratizadeh. Hamid<sup>1,2</sup>, Holtz. P.O<sup>2</sup>

Physics Department, Shahrood University of Technology, 3619995161, P.O. Box 316, Shahrood, Iran

<sup>2</sup>Department of Physics and Measurements Technology, Linkoping University, 581 83 Linkoping, Sweden

### Abstract

We have investigated the role of nitrogen on InGaNAs alloys with photoluminescence spectroscopy measurements. Incorporation of nitrogen in host atoms (InGaAs) creates a localized level inside the conduction band which interacts with it. so this interaction leads to a splitting of the conduction band into two subband and a reduction of the fundamental bandgap because of bandanticrossing between them. We confirm these subbands by the  $k.p$  calculations.

Increasing of the temperature decreases bandgap that we see these properties in PL spectra with the comparison between different temperatures. Also existence of localization is seen in the asymmetry PL spectra especially at low temperatures whereas in more nitrogen compositions, localized excitons are increased which are seen with expansion of FWHM of PL spectra in more nitrogen concentrations.

PACS No. 78,73

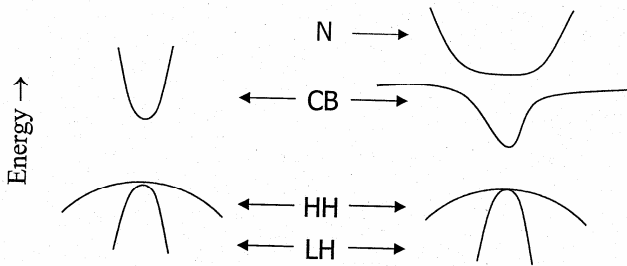
طریق فیبرهای نوری است که پراکندگی این طول موجها را برای فیبرهای نوری به حداقل می رساند. از طرفی امکان رشد InGaNAs به روی زیر لایه GaAs به دلیل هماهنگی در ثابت شبکه آنها، شرایط ساخت لیزرهای با کاواک عمودی ( VCSEL ) را فراهم می کند. به علت الکترون گاتیوی بالا و شعاع کوچک اتم نیتروژن، حضور آن در InGaAs باعث تغییر خصوصیات آلیاژ می گردد که از آن جمله رفتار گاف نواری در اثر حضور درصد کمی

### مقدمه

نیمه رسانای  $In_xGa_{1-x}N_yAs_{1-y}$  و ساختارهای نانوی این نیمه رسانا به ویژه ساختارهای چاه کوانتومی آن، در زمینه ساخت دیودهای نوری فعال در ناحیه IR بخصوص در طول موج ۱،۳۳-۱،۵۵ میکرون به عنوان کاندیدای مهمی مورد توجه می باشد. کاربرد اصلی این دیودهای نوری در انتقال اطلاعات مخابراتی از

### بحث و نتایج:

محاسبات بر پایه هامیلتونی اصلاح شده  $k.p$  نشان می دهد که مشارکت نیتروژن در آلیاژ میزبان (InGaAs) تراز جایگزیده ای در نوار رسانش ایجاد می کند که این تراز نوار رسانش را از خود دفع می نماید که نتیجه آن کاهش گاف نواری مطابق شکل ۱ می باشد.



شکل ۱: کاهش گاف نواری در اثر حضور نیتروژن در ساختار InGaAs

به علت اینکه نیتروژن به عنوان یک عامل اختلال وارد سیستم می شود، با استفاده از تئوری اختلال مساله ویژه مقدراری زیر را حل می کنیم.

$$\begin{vmatrix} E - E_M & V_{MN} \\ V_{MN} & E - E_N \end{vmatrix} = 0 \quad (\text{الف})$$

که در آن  $E_N$  انرژی تراز جایگزیده ایجاد شده با نیتروژن و  $E_M$  انرژی نوار رسانش است.

حل این مساله شامل دو پاسخ به صورت زیر است:

(ب)

$$E_{\pm} = \frac{E_N + E_M}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{E_N - E_M}{2}\right)^2 + V_{MN}^2}$$

این امر بیان کننده این است که حضور نیتروژن باعث ایجاد دو زیر تراز  $E_+$  و  $E_-$  در نوار رسانش می گردد، به طوریکه با افزایش نیتروژن برهمکنش بین تراز  $E_N$  و نوار رسانش  $E_M$  یعنی  $V_{MN}$  افزایش می یابد. بنابراین طبق رابطه (ب) با افزایش  $V_{MN}$  مقدار  $E_+$  افزایش یافته اما  $E_-$  کاهش پیدا می کند و این دو زیر تراز از

از نیتروژن می باشد که بر خلاف انتظار به جای افزایش از خود کاهش نشان می دهد و می توان با اضافه نمودن مقدار کمی نیتروژن، انرژی گسیلی از نمونه را کاهش و طول موج گسیلی را به ناحیه موردنظر یعنی 1.33-1.55 میکرون انتقال داد [1,2]. در این مقاله سعی می شود که ضمن مطالعه اپتیکی InGaAs بصورت تجربی و بر پایه سنجشهای فتولومینسانس، تاثیر حضور نیتروژن به روی ساختار نواری این آلیاژ مورد بررسی قرار گیرد.

### نمونه ها و روش آزمایش:

نمونه ها شامل چاه کوانتومی یگانه  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}_y\text{As}_{1-y}/\text{GaAs}$  با درصدهای مختلف نیتروژن می باشد که بر روی زیر لایه GaAs بدون آلیش، در جهت (001) رشد داده شده اند. بر روی زیر لایه، یک لایه میانی GaAs بدون ناخالصی، به ضخامتی در حدود 300 نانومتر و به دنبال آن ناحیه فعال شامل چاه کوانتومی یگانه ای رشد داده شده است. در نمونه های مختلف ضخامت چاه کوانتومی و درصد نیتروژن و ایندیوم مطابق جدول ۱ می باشد.

جدول ۱:

مقدار نیتروژن و ایندیوم و ضخامت چاه کوانتومی در نمونه های مختلف

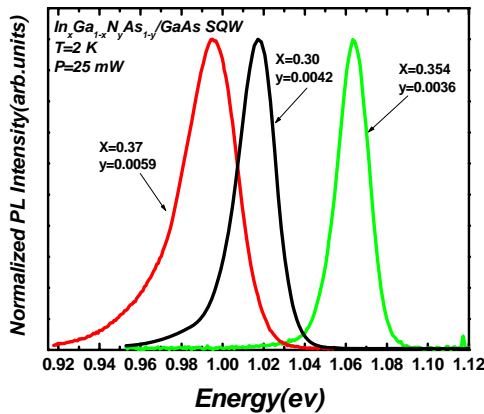
نمونه مورد نظر	ضخامت چاه کوانتومی (nm)	مقدار ایندیوم (x)	مقدار نیتروژن (y)
1	7	0.354	0.0036
2	6.9	0.30	0.0042
3	7.2	0.37	0.0059

در تمام نمونه ها یک لایه پوششی GaAs با ضخامت 100 نانومتر ناحیه فعال را محافظت می کند و آنها در دمای حدود  $T=495\text{ K}$  رشد یافته اند. برای مطالعه اپتیکی نمونه ها، تکنیک فتولومینسانس در دو دمای  $T=2\text{ K}$  و  $T=150\text{ K}$  به کار گرفته شده و برای تحریک نمونه ها از طول موج  $5145\text{ \AA}$  استفاده گردیده و شدت نور لیزر تحریکی نیز  $P=25\text{ mW}$  می باشد.

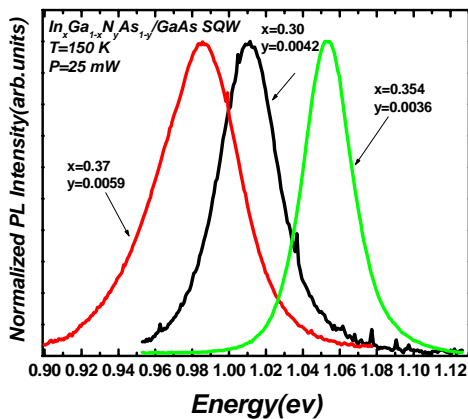
$$E(g) = E(0) - \frac{\alpha T^2}{\beta + T}$$

دما نیز مطابق با رابطه تجربی ورشنی  $E(g)$  کاف انرژی را کاهش می دهد. در این معادله  $\alpha$  و  $\beta$  مقادیر ثابتی هستند و  $E(0)$  نیز گاف نواری را در دمای صفر کلون بیان می کند [6].

الف:



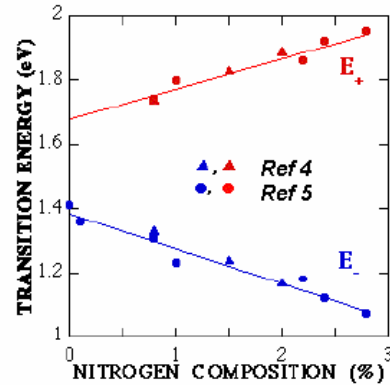
ب:



شکل 3: طیف فتولومینسانس 3 نمونه با درصدهای مختلف نیتروژن در دو دمای متفاوت. الف: T=2 K و ب: T=150 K

از طرفی لازم به ذکر است که با مقایسه قله ها در شکل 3 بین دو دمای T=2 K و T=150 K مشاهده می کنیم که طیفها در دمای بالاتر T=150 K از تقارن بیشتری برخوردار می باشند اما در T=2 K طیفها نامتقارن ترند. وجود عدم تقارن در طیف فتولومینسانس به صورت دنباله ای در قسمت انرژیهای پایین طیف

یکدیگر دور می گردند. بطوریکه این نتایج با مقادیر تجربی مطابق شکل ۲ نیز تایید می گردد [3,4].



شکل ۲: وابستگی ترازهای انرژی E+ و E- به درصد نیتروژن [4,5]

بنابراین علت اصلی کاهش گاف نواری نیمه رسانای فوق و تغییرات خصوصیات آلیاژ InGaNaS، دافعه نواری ایجاد شده در اثر حضور نیتروژن می باشد.

در نمونه های ما مقدار نیتروژن کمتر از 1 درصد است. اما قابل ذکر است که با وجود مقادیر ناچیز نیتروژن، کاهش قابل ملاحظه ای در حدود 60 meV به ازای افزودن 0.25 درصد نیتروژن در گاف نواری حاصل می گردد. این اثر در انتقال قله های طیف فتولومینسانس به سمت انرژیهای پایینتر (شیفت قرمز) در سه نمونه با درصدهای مختلف نیتروژن و در دو دمای متفاوت T=2 K در شکل 3 الف) و T=150 K در شکل 3 ب) نشان داده شده است. همچنین در مقایسه طیفها در شکل 3 بین دو قسمت الف و ب، مشاهده می کنیم قله های مربوط به هر نمونه در ب در محدوده انرژی پایینی نسبت به طیفهای قسمت الف قرار گرفته اند. دلیل این امر نیز کاهش گاف نواری در اثر افزایش دما می باشد بطوریکه در دمای T=150 K گاف نواری کمتر از T=2 K است.

بنابراین با توجه به شکل در دمای 2K با افزایش مقدار نیتروژن از 0.0036 تا 0.0059 قله های طیفها شیفتی از 1.064 به 0.995 الکترون ولت دارند اما در دمای T=150 K این شیفت از 1.053 به 0.985 الکترون ولت می باشد که بیانگر کاهش گاف نواری با افزایش دما است. چون علاوه بر افزایش نیتروژن افزایش

گردد. بنابراین این اثر، یعنی افزایش باز ترکیب حاملهای جایگزیده، در افزایش مقدار پهنای طیفها (FWHM) مشاهده می شود.

### نتیجه گیری:

مشارکت نیتروژن در آلیاژ InGaAs ایجاد تراز جایگزیده ای در نوار رسانش می کند که با آن وارد برهمکنش شده و در اثر دافعه نواری که بین آنها ایجاد می گردد، گاف نواری نیز کاهش می یابد. این اثر را در طیف نمایی فتولومینسانس برای سه نمونه با درصدهای مختلف نیتروژن و در دو دمای متفاوت نیز مشاهده می کنیم و انتقال قله های طیف فتولومینسانس به سمت انرژیهای پایتتر، نمایانگر این موضوع است. همچنین با در نظر گرفتن حضور نیتروژن به عنوان عامل اختلال در سیستم و حل مساله ویژه مقداری با استفاده از تئوری k.p می توانیم به حضور دو زیر تراز  $E_-$  و  $E_+$  در نوار رسانش پی ببریم.

مطالعه اپتیکی نشان می دهد که حضور نیتروژن عامل اصلی جایگزیدگی اکسیتونها در سیستم بوده و همچنین باعث پهن شدگی طیفهای اپتیکی می گردد. نامتقارن بودن طیفها در دماهای پایین نیز نشانگر وجود مراکز جایگزیدگی به علت حضور نیتروژن می باشد.

### سپاسگزاری

مولفان از آقایان دکتر هام مار و دکتر کارل اسپلاند از دپارتمان میکروالکترونیک و IT انستیتوی سلطنتی استکهلم و شرکت زارلیک سوئد به دلیل کمک در تهیه نمونه ها سپاسگزاری می نمایند.

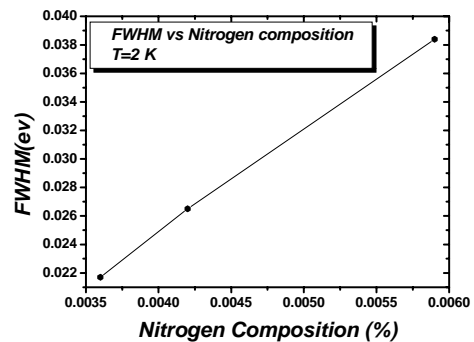
### مرجع ها

- [1] A. Polimeni, M. Capizzi, M. Geddo, M. Ficsher, M. Reinhardt, A. Forchel, Phys. Rev. Lett. 63, 195320 (2001).
- [2] I. A. Buyanova, W.M. Chen, B. Monemar, MRS Internet J. Nitride Semiconductor. Research. 6, 2 (2001).
- [3] S. Tomic, E.P. Oreilly, ODM Optoelectronic Devices and Materials Research Group (2001)
- [4] W. Shan, W. Walukiewicz, J. W. Ager, E. E. Haller, J.F. Geisz, D. J. Friedman, J. M. Olson, S. R. Kurtz, J. Appl. Phys. 86, 2349 (1999).
- [5] J. D. Perkins, A. Mascarenhas, Y. Zhang, J. F. Geisz, D. J. Friedman, J. M. Olson, S. R. Kurtz, Phys. Rev. Lett. 82, 3312 (1999).
- [6] L. Grenouillet, C. Bru-Chevallier, G. Guillot, P. Gilet, P. Duvaut, C. Vannuffel, A. Million, A. Chenevas-Paule, Appl. Phys. Lett. 76, 2241 (2000)

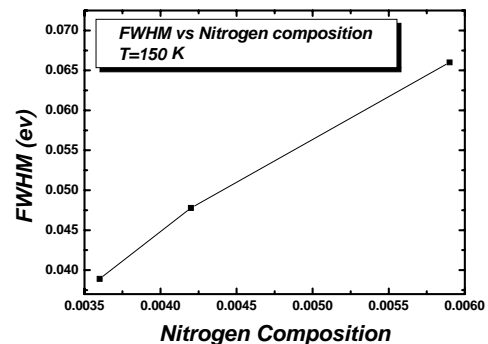
مشاهده می گردد و این امر نیز حاکی از حضور جایگزیدگی اکسیتونها می باشد که در دمای پایین تعداد آنها بیشتر است ولی با افزایش دما اکسیتونها به دلیل کسب انرژی گرمایی از مینیمم های پتانسیل خارج می گردند و جایگزیدگی کاهش می یابد که در نتیجه طیفهای مربوط به دمای  $T=150\text{ K}$  متقارن تر از طیفهای مربوط به دمای  $T=2\text{ K}$  می باشند.

تغییرات پهنای طیفهای شکل 3 نیز بر حسب درصد نیتروژن در دو دمای متفاوت در شکل 4 (الف) و (ب) ترسیم گردیده است بطوریکه با افزایش غلظت نیتروژن مقادیر آن افزایش می یابد.

الف:



ب:



شکل ۴: تغییرات پهنای طیفهای فتولومینسانس بر حسب درصد نیتروژن در دو دمای متفاوت الف:  $T=2\text{ K}$  و ب:  $T=150\text{ K}$

دلیل این امر نیز، افزایش مراکز جایگزیدگی در اثر حضور نیتروژن است، بطوریکه با افزایش غلظت نیتروژن، به تعداد آنها افزوده می