

مطالعه نوارهای انرژی GaAs نوع n و InP نوع p با روشهای طیفنمایی تراگسیلی و نورالیانی

ناصر بنائی، گروه فیزیک حالت جامد، مرکز تحقیقات لیزر، سازمان انرژی اتمی ایران
محمد خان زاده، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده علوم پایه

چکیده

نوارهای طیفی بلورهای دوتایی GaAs نوع n و InP نوع p از ترکیبات III-V به وسیله طیفنمایی تراگسیلی^۱ و نورالیانی^۲ مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. تفاوت انرژی بین دو نوار مجاز (گاف نوار انرژی)^۳ برای GaAs نوع n و InP نوع p، به ترتیب برابر $1/4\text{ eV}$ و $1/34\text{ eV}$ به وسیله طیف تراگسیلی، در دمای اتاق بدست آمد. طیفهای PL این نمونه‌ها در دمای ۷۷ K، با شدت برانگیختگی 20 W/cm^2 اندازه گیری شد. برای نمونه InP نوع p، طیف گذار (B-B) در $1/405\text{ eV}$ و طیف گذار (B-A) در $1/382\text{ eV}$ مشاهده شد. در مورد نمونه GaAs نوع n، سه طیف PL مشاهده شد که مربوط به گذار (B-B) در $1/482\text{ eV}$ ، گذار (B-A) در $1/461\text{ eV}$ و طیف نسبتاً عریضی در طول موجهای بالاتر از لبه جذب نوری مربوط به ناخالصیهای عمیق^۴ در $1/36\text{ eV}$ می‌باشند.

۱- مقدمه

ساخت وسایل نوری روندی پیچیده و پر هزینه دارد، بنابراین آگاهی از مشخصات ساختاری و فیزیکی موادی که در ساخت این گونه وسایل مورد استفاده قرار می‌گیرند قبل از انجام فرآیند ساخت و در خلال آن ضروری است. برخی از ترکیبات نیمرسانای III-V که دارای گاف نواری مستقیم هستند سهم بیشتری در ساخت وسایل اپتیک-الکترونیکی، مانند لیزرهای نیمه هادی، دیودهای گسیل دهنده نور، آشکارسازهای نوری دیودی، فتوکاتودها و ... دارند. این مواد باید دارای شرایط و خواص فیزیکی و ساختاری ویژه‌ای باشند که از جمله می‌توان درصد پایین نقصهای بلوری و درجه خلوص بالا را نام برد. نقصهای الکتریکی فعال و ناخالصی‌ها، حتی با غلظت یک در هزار میلیارد، بر کارایی قطعات اثر می‌گذارند. بررسی این ویژگیها با روشهای متداول طیفنمایی جرمی و پراش پرتوهای ایکس برای مشخص کردن درصد ناخالصی در زیر لایه و لایه‌های

رونشستی چندان رضایت‌بخش نیست؛ اما استفاده از طیفنمایی نوری برای تبیین ویژگیهای نیمرساناها مناسب‌تر است [۱، ۲، ۳]. علاوه بر این، تماس نداشتن نمونه با عوامل مخرب از ویژگیهای دیگر این روشها می‌باشد.

استفاده از روشهای طیفنمایی جذبی و نورالیانی (فوتولومینسانس) در دماهای مختلف همزمان با استفاده روز افزون از فنون رشد لایه نازک، مانند MBE، CBE، MOVPE، MOCVD، LPE* و غیره برای رشد لایه‌های نازک رونشستی و اندازه‌گیری

۱ - Transmission

۲ - Photoluminescence

۳ - Band gap energy

۴ - Deep level impurities

* - MBE: Molecular Beam Epitaxy

CBE: Chemical Beam Epitaxy

MOVPE: Metal-Organic Physical Vapour Epitaxy

MOCVD: Metal-Organic Chemical Vapour Deposition

LPE: Liquid Phase Epitaxy

دستگاه عبارتند از:

چشمه نور (لیزر He-Ne با توان ۴۰ mW و با طول موج ۶۳۲ nm و شدت برانگیختگی حدود 20 W/cm^2) که به کمک عدسی در سطح نمونه متمرکز می‌شود، برشگر، عدسیها برای متمرکز کردن نور لیزر و لیانی نمونه، نگهدارنده نمونه، دستگاه سردکننده مدار بسته^۷ برای سردکردن نمونه همراه با کنترل‌کننده دما (ساخت کمپانی Air Product)، پمپ خلاء، ترموکوپل و ترمومتر دیجیتال برای اندازه‌گیری دمای نمونه، تک رنگساز با توان تفکیک فضایی 1 \AA (ساخت کمپانی Jobin Yvon)، توری 1200 خط در میلی‌متر، لامپ تکثیرکننده فوتون^۸ و وسایل الکترونیکی از جمله تقویت‌کننده قابل تنظیم^۹، دستگاه کاهنده نوفه^{۱۰} و اسیلوسکوپ. نمونه‌های مورد آزمایش عبارتند از InP نوع p با ناخالصی ویژه Fe و GaAs نوع n با ناخالصی ویژه Si. این زیرلایه‌ها ابتدا به روشهای مکانیکی، روسابی و صیقلی شده‌اند و پس از صیقل شدن شیمیائی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در آزمایش طیفنمایی تراگیلی هر دو طرف نمونه باید صیقلی باشد ولی در آزمایش طیفنمایی انعکاسی PL یک طرف آن کافی است. آزمایش PL، در خلاء 10^{-4} میلی‌مترجیوه و در دمای ۷۷ K انجام یافته است.

۳- یافته‌ها و بحث درباره آنها

الف - طیفهای تراگیلی InP نوع p با ناخالصی ویژه Fe ($n_{Fe} = 5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) و GaAs نوع n با ناخالصی ویژه

مشخصه‌های مختلف زیر لایه و لایه‌های رونشستی از نیمرساناها در حال حاضر بسیار مورد استفاده است.

نمونه‌های بلوری که در این پژوهش بکار رفته‌اند عبارتند از InP نوع p و GaAs نوع n. بلورها به صورت حجمی به روش بریجمن افقی [۴] در انستیتوی نیمرسانای پکن رشد داده شده‌اند و این نمونه‌ها از ویفرهایی که در جهت «۱۰۰» با دقت 10^{-6} و به ضخامت تقریبی ۶۰۰ میکرون از بلورهای حجمی بریده شده‌اند برگزیده شده است.

لازم به ذکر است که از این نمونه‌ها برای تهیه زیر لایه جهت رشد لایه‌های نازک به روش LPE، به منظور ساخت دیودهای نوری، لیزرهای دیودی نیمرسانا و آشکارسازهای نوری استفاده می‌شود. لذا بررسی خواص مختلف آنها قبل از فرآیند رشد لایه‌های نازک ضروری است.

در این مرحله تحقیق با استفاده از دو روش طیفنمایی جذبی و نورالیانی در دمای پائین، نوارهای انرژی نمونه‌های GaAs، InP مورد بررسی قرار گرفته‌اند و طیف PL این نمونه‌ها در دماهای پائین با ناخالصی‌های مختلف اندازه‌گیری شده است [۸ و ۹].

۲- روشهای تجربی

مطالعه نوارهای انرژی نمونه‌ها با استفاده از طیف‌سنج Cary 17DX و دستگاه نورالیانی (PL) مدولار^۵ انجام گرفت: با طیف‌سنج، طیف تراگیلی نمونه‌های InP نوع p و GaAs نوع n در دمای ۳۰۰ K گرفته شد و با دستگاه PL لیانی (لومینسانس) حاصل از باز ترکیب حاملهای نمونه‌ها در دمای ۷۷ K اندازه‌گیری شد.

آرایش تجربی طیفنمایی PL از لحاظ اجزاء تشکیل دهنده، نسبت به روشهای اپتیکی دیگر، مانند طیفنمایی رامان و جذب، ساده‌تر است. اجزاء تشکیل دهنده این

۵- Modular

۶- Chopper

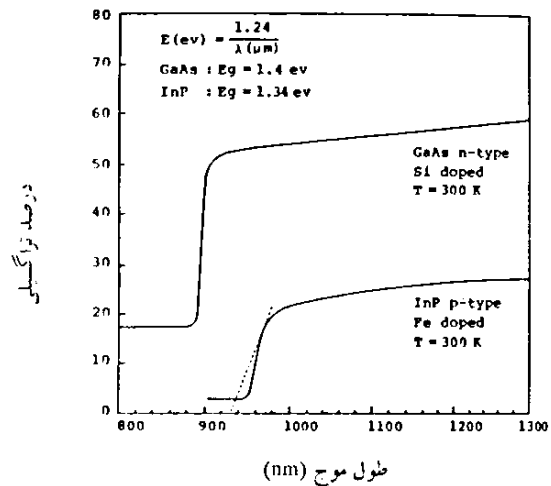
۷- Closed Cycle Refrigerator

۸- Photomultiplier

۹- Tuned amplifier

۱۰- lock In amplifier

Si ($n_{Si} = (1-3) \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) در دمای اتاق گرفته شدند
 شکل (۱).



شکل ۱- طیف تراگسلی GaAs نوع n و InP نوع p

[Varshni]، که وابستگی گاف نواری به دما را بیان می‌کند (رابطه ۲)، مقدار حدی گاف نواری در مناسبترین دما برحسب کلونین را بدست می‌آوریم که در آن A و B مقادیر ثابت برای نمونه‌های GaAs و InP هستند و مقدار آنها به ترتیب: $5/405 \times 10^{-4} \text{ eV/K}^2$ و $4/906 \times 10^{-4} \text{ eV/K}^2$ است [۷ و ۸].

$$E_g(T) = E_g(0K) - AT^2/(B+T) \quad (2)$$

بنابراین، گاف نواری در صفر مطلق (0K) برای GaAs نوع n و InP نوع p به ترتیب ۱/۴۹۶ eV و ۱/۴۱ eV بدست می‌آید.

ب- طیف لیانی InP نوع p

طیف PL نمونه InP نوع p با ناخالصی Fe و با چگالی برانگیختگی 20 W/cm^2 در دمای ۷۷ K گرفته شده است (شکل ۲). در این طیف، شدت نورالیانی (با واحد اختیاری) نسبت به طول موج ترسیم شده است. بطوری که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، یک طیف در طول موج 8668 \AA و دو طیف دیگر در طول موجهای 8820 \AA و 8971 \AA با یک برآمدگی در طرف چپ نمودار، ظاهر شده‌اند. انرژی فوتون‌های مربوط به دو طول موج اخیر به ترتیب برابر $1/405 \text{ eV}$ و $1/382 \text{ eV}$ می‌باشند. طیف (b) را می‌توان معرف انرژی نزدیک گاف نواری در ۷۷ K دانست، زیرا با توجه به رابطه (۱) و طیف تراگسلی و معلوم بودن گاف نواری در (0K)، انرژی فوتون در ۷۷ K برابر $1/403 \text{ eV}$ بدست می‌آید که بطور قابل توجهی نزدیک به انرژی طیف b (PL) است. طیف سوم (c) را می‌توان مربوط به گذار باز ترکیب (B-A) دانست. بطوری که مشاهده می‌شود شدت

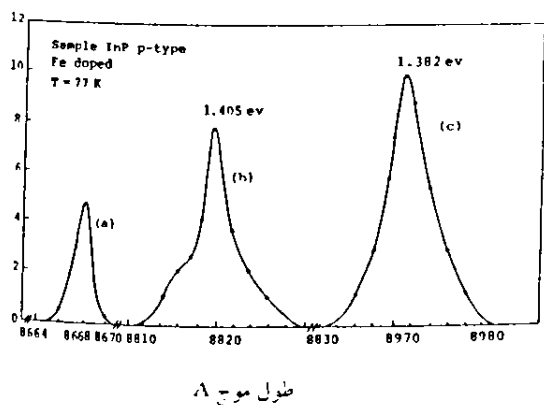
در این شکل، نمودار درصد تراگسلی (T) برحسب طول موج ترسیم شده است. مشاهده می‌شود که تراگسلی برای GaAs با ضخامت لایه $d_1 = 410 \mu\text{m}$ حدود ۴۰٪ و برای InP با ضخامت لایه $d_2 = 583 \mu\text{m}$ حدود ۲۰٪ می‌باشد. طول موج مربوط به گاف نواری نمونه GaAs، در ناحیه طول موجهای ۸۸۰-۸۹۰ nm و برای نمونه InP، در محدوده ۹۴۰-۹۲۰ nm می‌باشد که با استفاده از رابطه ۱، گاف نواری برای GaAs نوع n حدود $1/4 \text{ eV}$ و برای InP نوع p $1/34 \text{ eV}$ بدست می‌آید. این انرژی، بستگی زیادی به میزان ناخالصی اضافه شده به نمونه دارد؛ هرچه ناخالصی بیشتر باشد گاف نواری کمتر خواهد بود.

$$E_g(\text{eV}) = \frac{hc}{\lambda(\mu\text{m})} = \frac{1/241(\text{eV})}{\lambda(\mu\text{m})} \quad (1)$$

با توجه به مقدار گاف نواری برای هر یک از نمونه‌ها در دمای اتاق و با استفاده از رابطه تجربی

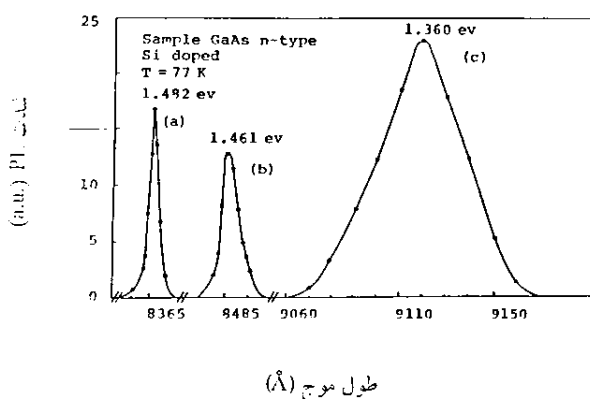
از فرمول تجربی "Varshni" گاف نوار انرژی در (oK) برای GaAs برابر $E_g(oK) = 1/496 \text{ eV}$ بدست می آید. حال اگر گاف نوار انرژی در 77 K را با در نظر گرفتن مقدار آن در (oK) حساب کنیم، برابر $E_g(77K) = 1/484 \text{ eV}$ بدست می آید. بنابراین، انرژی مربوط به طیف اول (a) را می توان همان گاف نوار انرژی (B-B) در دمای 77 K دانست. بطوری که در شکل ۳ مشاهده می شود، این طیف خیلی باریک است و این از ویژگیهای نوار (B-B) در دماهای پایین می باشد. یعنی هرچه از دمای اتاق پایین تر رویم، پهنای طیف (B-B) کمتر می شود. طیف دوم (b) را بدلیل نزدیکی به نوار (B-B) در دمای مورد آزمایش، می توان مربوط به نوار (B-A) دانست. این طیف نیز نسبتاً باریک است؛ در این صورت می توان باریک بودن نوارها را به دما و شدت برانگیختگی حاملها نسبت داد، زیرا هر چه شدت کمتر باشد، تعداد حاملهایی که در فرایند باز ترکیب شرکت می کنند نیز کمتر است. در نتیجه، پهنای نوار کمتر شده و طیف باریک تر دیده می شود.

اما طیف (c) نسبتاً پهن است: انرژی فوتونی آن حدود $1/36 \text{ eV}$ و پهنای طیفی آن حدود 6 meV می باشد. با توجه به فاصله طیفی که با نوار (a) دارد، این گذارها به عنوان



شکل ۳- طیف های PL مربوط به GaAs نوع n

PL گذارهای ناخالصی (B-A) از گذارهای نوار (B-B) بیشتر است. در دماها و شدتهای برانگیختگی پایین، گذارهای (B-A) بهتر از گذارهای (B-B) ظاهر می شوند. در اینجا لازم است متذکر شویم که طیف اول (a)، ظاهر شده در طول موج 8668 \AA ، مربوط به پدیده لیانی نمی باشد.



شکل ۲- طیف (PL) نمونه InP نوع p

ج - طیف لیانی GaAs نوع n

طیف PL نمونه GaAs نوع n، با ناخالصی ویژه Si و با غلظت $n_{Si} = (1-3) \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ، در دمای 77 K بدست آمده است. این آزمایش در خلاء 10^{-4} میلی متر جیوه، پس از اینکه نمونه حدود نیم ساعت در دمای 77 K نگهداشته شد انجام گرفت. سه طیف a و b و c مربوط به این نمونه در شکل ۳ مشاهده می شود. این طیفها به ترتیب در طول موجهای 8485 \AA و 8366 \AA و در طول موج 9115 \AA که در ناحیه ای بالاتر از دو طول موج اولیه است مشاهده شده اند. انرژی فوتونی مربوط به این طول موجها به ترتیب $1/482 \text{ eV}$ ، $1/461 \text{ eV}$ و $1/360 \text{ eV}$ است. در آزمایش طیف تراکسیلی شکل ۱، گاف نوار انرژی این نمونه در دمای اتاق حدود $1/4 \text{ eV}$ بدست آمده است. با استفاده

گذارهای عمیق ناخالصی خوانده می‌شوند. معمولاً گذارهای عمیق در نمونه GaAs نوع n یا p که به روشهای بریجمن و ذوب ناحیه ای رشد داده می‌شوند و غلظت ناخالصی ویژه آنها بالاتر از ($1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) است، بوجود می‌آیند و در آزمایشهای PL مشاهده می‌شوند [۴]. طیف (c) نشان می‌دهد که نمونه GaAs نوع n با ناخالصی Si در این طول موج بهتر می‌تواند عمل کند و دارای حساسیت بالایی است.

برابر $1/4 \text{ eV}$ ، $1/34 \text{ eV}$ در دمای اتاق است. طیف‌های PL این نمونه‌ها در دمای ۷۷ K برای نمونه InP نوع p شامل طیف گذار B-B برابر $1/405 \text{ eV}$ و طیف گذار (B-A) برابر $1/382 \text{ eV}$ است و برای نمونه GaAs نوع n سه طیف PL مربوط به گذار (B-B) برابر $1/482 \text{ eV}$ و گذار (B-A) برابر $1/46 \text{ eV}$ و طیفی مربوط به ناخالصی‌های عمیق در $1/36 \text{ eV}$ می‌باشد.

تشکر و قدردانی

از آقای مهندس علی مسعودی که در راه‌اندازی دستگاه طیفنمایی نورالیانی بیشترین همکاری را داشتند و همچنین از سرکار خانم درریز که در انجام آزمایشهای طیفنمایی همکاری نمودند و از سرکار خانم اردستانی جهت تایپ مقاله، کمال تشکر و قدردانی را دارد.

نتیجه‌گیری

با استفاده از روش طیفنمایی جذبی و نورالیانی، زیرلایه‌های تک بلور GaAs نوع n و InP نوع p مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. آزمایشها نشان داد که گاف نوار ممنوع برای زیر لایه GaAs نوع n و InP نوع p به ترتیب

References

1. G.E. Stillman, S.S Bose and A.P. Corties. American Vacuum society. series 10, pp 34-37 (1991).
2. Sindeny Perkowitz, "Optical characterization of semiconductors" Academic press Limited (1993).
3. P.J. Dean, Progress in crystal Growth and Characterization Vol. 5, pp 89-174 (1982).
4. J.C. Brice, "Grystal Growth processes" John vily and Sons (1986).
5. H. Temkin and W.A. Bonner. J. Appl. Phys., 52, No. 1, 397 (1981).
6. J.E. Fouquet, R.R. Saxena and G.A. Patterson, IEEE J. Quantum Eletron., Vol. 25, No. 5, pt. 1, pp. 1025 - 34 (1989).
7. R. E. Nahory M.A. Pollak, J.C. Bewinter and K.M. Williams, Vol. 48, No. 4, pp. 1607 - 1614 (1977).
8. P. Bhattacharya "semiconductor Optoelectronic Devices", Prentice Hall International Editions pp. 65 - 68 (1994).
9. N. Holonyak, Jr. and M.H. Lee in " Semiconductor and Semimetals" (R.K. Willardson and A.C. Beer, eds.), Vol. 14, pp. 6 - 10, Academic Press, New York, (1979).

**Study of the Energy Band in n-type GaAs and p-type InP by
Transmission and Photoluminescence Spectroscopy**

*N. Banai, Solid State Physics Division, Laser Research Center, AEOI,
P.O. Box 14155-1339, Tehran, Iran*

*M. Khanzadeh, Faculty of Basic Science, Tarbiat Moddaress University
P.O. Box 14155-4838, Tehran, Iran*

Abstract

Optical Characterization of the n-type InP grown by Horizontal Biridman method was carried out using Modular Photoluminescence and Optical Transmission Spectroscopy. The measured Transmission Spectra at room temperature using Cary 17 DX Spectrophotometer reveals the bandgap energies of 1.4 and 1.34 eV for p-type InP and the n-type GaAs, respectively. Photoluminescence Spectra of the above samples was measured at 77 K with the excitation intensity of (20 W/Cm²). The Photoluminescence spectra for the p-type InP reveal the (B-B) and (B-A) transition. The (B-B) and (B-A) transitions occur at 1.405 eV and at 1.382 eV respectively. Three spectra were observed for the n-type GaAs sample, namely (B-B), (B-A) and another relatively wide spectra at wavelengths above the absorption edge caused by the deep level impurities. The peak position of these spectra are 1.482, 1.4 and 1.36eV respectively.