

Characterization and Fabrication of Multilayers of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ by Epitaxy

OSKOIE, M.

*Sharif University of Technology,
Water and Energy Research Center*

Amini, A. - Tarkashvand, M.

Atomic Energy Organization. Laser Research Center

Anvari, F.

Research Institute of Petroleum Industry - Tehran

Key Words : *Liquid Phase Epitaxy, supercooled Liquid, substrate*

Abstract: Five layers of $\text{GaAs:Te}(n=2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3})$, $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As:Sn}(n=5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3})$, GaAs , $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As:Ge}(p=3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3})$, $\text{GaAs:Ge}(p=1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3})$ were grown by supercooled Liquid Phase Epitaxy on $\text{n-GaAs}(100)$ substrate. The cooling rate of the furnace was set up with $0.1^\circ\text{C}/\text{min}$ at $T=860^\circ\text{C}$. The first layer was grown at $T=840^\circ\text{C}$ and the last one at $T=827^\circ\text{C}$. The thickness were varied between 0.1 to $8 \mu\text{m}$ by controlling the supercooling temperature and growth time. Quality and quantity of epitaxial layers were examined by TEM, SEM, PIXE and x-ray.

پژوهشی

رشد برآراستی لایه‌های $\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ و بررسی مشخصات آنها

مهدی اسکوئی

مرکز تحقیقات آب و انرژی دانشگاه صنعتی شریف - تهران

علیرضا امینی - مصطفی ترکاشوند

سازمان انرژی اتمی - مرکز تحقیقات لیزر - امیرآباد شمالی - تهران

سید فیض‌الله انواری

مرکز پژوهشگاه صنعت نفت - تهران - شرکت نفت - ری تهران

محل انجام آزمایشات: سازمان انرژی اتمی و مرکز تحقیقات آب و انرژی دانشگاه صنعتی شریف و مرکز پژوهشهای صنعت نفت و انستیتو نیرسانای پکن

چکیده: رشد برآراستی^۱ پنج لایه^۲ $\text{GaAs:Te}(n=2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3})$ ، $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As:Ge}(P=3 \times 10^{17} \text{cm}^{-3})$ - $\text{GaAs} - \text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As:Sn}(n=5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3})$ ، $\text{GaAs:Ge}(P=1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3})$ روی سطح (۱۰۰) n-GaAs با فرایند فاز مایع ابر سرد^۳ از دمای 840°C آغاز و در $T = 828^\circ\text{C}$ پایان یافت. ضخامت لایه‌ها ۸ تا ۱۰ میکرون بود و تغییرات ضخامت به انتخاب دمای رشد و طول زمان تماس فاز مایع با زیرلایه، و نیز به آهنگ تغییر دمای واکنشگر بستگی داشت. درصد وزنی مواد در فاز مایع و نیز ناخالصی‌های نوع Sn، Te، و Ge از منحنی فاز آنها محاسبه شدند و با استفاده از روش‌های SEM، TEM، PIXE^۳ و پرتو X مشخصات لایه‌ها مورد بررسی قرار گرفتند.

واژه‌های کلیدی: رشد برآراستی، فاز مایع ابر سرد، منحنی فاز، زیر لایه

1- Epitaxy

2- Supercooled Liquid Phase

3- Proton induced X- ray Emission

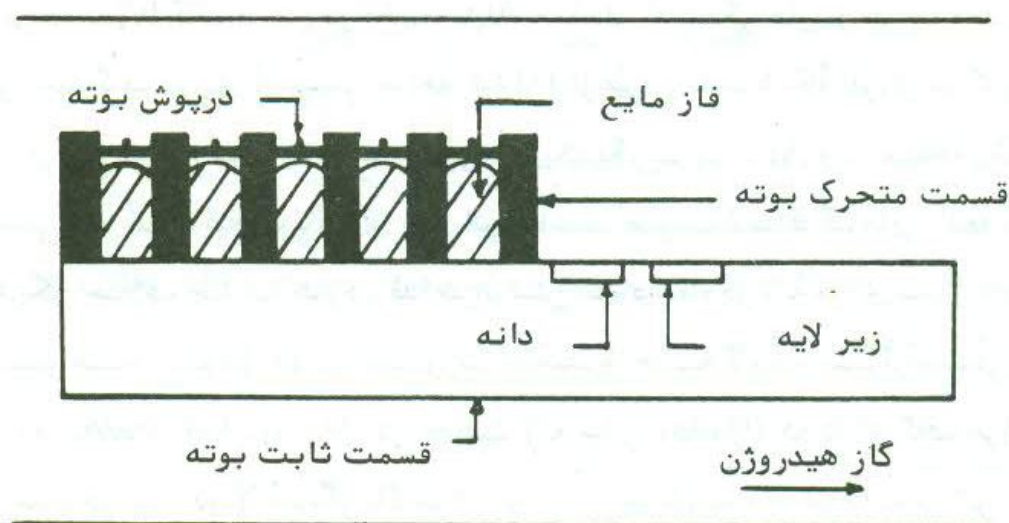
مقدمه

ساختار اصلی قطعات الکترونیکی از لایه های متعدد نیم رسانای نوع n و p تشکیل یافته اند [۱]. به این دلیل انتخاب روش لایه گذاری از اهمیت به سزایی برخوردار است. رشد برآراستی از فاز مایع، یکی از روشهایی است که امروزه به دلیل هزینه ساخت کمتر و نیز کارایی بالاتر آن نسبت به سایر فرایندها از اهمیت چشمگیری برخوردار است. اساس کار برای محور استوار است که نخست مواد مورد نظر در بوته گرافیتی ذوب شده و سپس در دمای مناسب با زیر لایه تماس داده می شود. با کنترل آهنگ کاهش دمای فاز مایع و انتخاب زیر لایه مناسب می توان ساختار بلوری لایه برآراسته را با ساختار بلوری زیر لایه کاملاً یکسان کرد [۲] که در اینصورت به آن "رشد برآراستی" می گویند. لایه گذاری از فاز مایع معمولاً برای ضخامت های بالاتر از یک دهم میکرون مورد استفاده قرار می گیرد [۳] و در صورتیکه به ضخامت های کمتری نیاز باشد از سایر روشها استفاده می شود [۴]. در چند سال اخیر گزارشات متعددی منتشر شده است [۵] که نشان می دهد با استفاده از فاز مایع می توان به ضخامت های کمتر از دویست انگسترم نیز رسید.

نیم رسانای گالیوم آرسناید (GaAs) و ترکیبات آن مانند آلومینیوم گالیوم آرسناید ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$) در ساخت انواع قطعات الکترونیکی [۶] مانند لیزرهای نیم رسانا کاربرد فراوانی دارند [۷]. گاف انرژی در $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ به مقدار x بستگی دارد و هر چه مقدار x بیشتر باشد گاف انرژی آن بیشتر خواهد شد [۸]. از طرفی ثابت شبکه بلوری در گالیوم آرسناید و آلومینیوم گالیوم آرسناید تقریباً بایکدیگر برابرند [۹] و در نتیجه رشد برآراستی در آنها با کیفیت بالاتری قابل انجام است. ضریب انبساط گرمایی آنها نیز بایکدیگر اختلاف چندانی ندارد و لذا میزان تنش ایجاد شده در لایه مرزی بسیار ناچیز خواهد بود [۱۰]. در صورت تشکیل سه لایه برآراستی از $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ در حقیقت لایه میانی (GaAs) که دارای گاف انرژی کمتر است در میان دو لایه دیگر با گاف انرژی بیشتر ساندویچ می شود. بدین ترتیب می توان چگالی ناخالصی در لایه میانی را به میزان مورد نظر افزایش داد، و با توجه به سد پتانسیل در دو طرف لایه GaAs بار الکتریکی در آن کاملاً محصور می شود [۱۱].

روش رشد برآراستی از فاز مایع

زیر لایه‌ای از تک بلور n-GaAs که سطح (۱۰۰) آن کاملاً صیقل داده شده است، در ابعاد $۲۰ \times ۱۰ \times ۰.۴$ میلیمتر آماده می‌شود. مواد مورد نیاز مطابق جدول شماره ۱ توزین شده، پس از فرایند سونش شیمیایی روی هریک از آنها در زمان مناسبی در بوتۀ گرافیتی ریخته می‌شوند. از گالیوم که در دمای اطاق به صورت مایع است، به عنوان حلال استفاده می‌شود و از این رو با توجه به حجم خانه‌های بوتۀ فقط به ۱۷ گرم گالیوم نیاز داریم. بوتۀ همراه با گالیوم به درون واکنشگر منتقل شده مطابق شکل ۱ در مجاورت گاز هیدروژن با خلوص ۹۹.۹۹۹% گرما داده می‌شود تا ناخالصی‌های احتمالی از محیط خارج شود. افزایش زمان گرما دهی به مدت طولانی نه تنها کمک موثری در کاهش ناخالصی نخواهد کرد بلکه باعث افزایش آن می‌شود [۱۲]. سپس بوتۀ به داخل اطاقک متصل به واکنشگر که با گاز آرگون محافظت می‌شود هدایت شده تا مواد مورد نظر مطابق جدول شماره ۱ به آن اضافه شود. بوتۀ برای بار دوم به داخل واکنشگر منتقل می‌شود تا در شرایط ۹۰۰°C و عبور مداوم گاز هیدروژن به مدت یکساعت به آن گرما داده شود. دما به ۸۶۰°C کاهش می‌یابد و پس از ۴۵ دقیقه قسمت متحرک بوتۀ گرافیتی حرکت داده



شکل ۱ مشخصات بوتۀ گرافیتی همراه با زیر لایه و دانه که داخل واکنشگر قرار گرفته است.

می شود تا فاز مایع خانه شماره ۱ بوتله به روی دانه^۱ برسد. دانه که از گالیوم آرسناید بدون ناخالصی است به این منظور در نظر گرفته شده است تا با ذوب برگشتی از دانه به داخل فاز مایع، مقدار ارسنیک از دست رفته در طول زمان گرما دهی جبران شود [۱۳]. دمای واکنشگر با کنترل کننده ای با شیب 1°C در دقیقه کاهش می یابد و در دمای 840°C اولین فاز مایع مربوط به خانه شماره ۱ بوتله روی زیر لایه می رسد. بنابراین دمای رشد لایه اول از GaAs:Te روی زیر لایه در $T=840^\circ\text{C}$ انجام می شود. با حرکت دادن قسمت متحرک بوتله به ترتیب خانه های شماره ۱ الی ۵ در دماهای معینی روی زیر لایه خواهند رسید و پنج لایه برآراسته بوجود می آید. داشتن اطلاعات دقیق از منحنی فاز دوتائی گالیوم آرسناید و فاز سه تائی آلومینیوم گالیوم آرسناید و کنترل آهنگ کاهش دمای واکنشگر از شرایط اساسی برای لایه گذاری برآراستی و نیز یکنواختی ضخامت لایه هاست.

محاسبه مقادیر وزنی عناصر با استفاده از منحنی فاز

چنانکه گفته شد، گالیوم به عنوان حلال مورد استفاده قرار گرفت، و عناصر دیگر براساس مقدار یک گرم از گالیوم محاسبه شد. در صورتیکه ابعاد بوتله گرافیتی تغییر کند می توان از مقادیر بیشتر و یا کمتر گالیوم استفاده کرد. لذا نخست محاسبات براساس یک گرم گالیوم انجام شد، و سپس برای تهیه جدول شماره ۱ در ضریب ۱۷ ضرب شدند. در صورتیکه جرم مولی عناصر را با M_i و جرم مورد نیاز برای فاز مایع را با W_i نشان

دهیم نسبت مولی عناصر N_i برابر خواهد بود با:

$$N_i = \frac{W_i}{M_i} \quad (1)$$

چنانچه فاز مایع شامل n عنصر مختلف باشد، درصد وزنی هر کدام از عناصر (X_i) برابر است با:

$$X_i = \frac{N_i}{N_1 + \dots + N_n} \quad (2)$$

باتوجه به مطالب بالا مقدار وزنی برای عناصر موجود در فاز مایع خانه اول بوتله را می توان به شرح زیر محاسبه کرد:

$$N_{Ga}(\text{حلال}) = \frac{W_{Ga}}{M_{Ga}}$$

$$N_{Ga}(\text{حلال}) = \frac{1}{69.72} = 1.43 \times 10^{-2} \text{ مول}$$

$$X_{As} = \frac{N_{As}}{N_{Ga}(\text{حلال}) + N_{Ga} + N_{As}} \quad (3)$$

می دانیم که:

$$N_{GaAs} = N_{As} = N_{Ga}$$

لذا معادله (۳) به صورت زیر نوشته می شود:

$$N_{As} = \left(\frac{1 - 2X_{As}}{X_{As}} \right) N_{Ga}(\text{حلال}) \quad (4)$$

مقدار X_{As} از منحنی فاز گالیوم - آرسنیک که برحسب دماهای مختلف مدرج شده است اندازه گیری می شود [۱۴]. در دمای $T = 840^\circ\text{C}$ مقدار آن برابر است با:

$$X_{As} = 3.2 \times 10^{-2}$$

بنابراین مقدار معادله ۴ به صورت زیر در می آید:

$$\begin{aligned} N_{As} &= \left(\frac{3.2 \times 10^{-2}}{1 - 2 \times 3.2 \times 10^{-2}} \right) 1.434 \times 10^{-2} \\ &= 4.903 \times 10^{-4} \text{ مول} \end{aligned}$$

مقدار گالیوم آرسناید جامد که شامل این مقدار آرسنیک باشد برابر است با:

$$W_{GaAs} = N_{As} M_{GaAs}$$

$$= 4903 \times 10^{-4} \times 14464$$

$$= 709 \text{ میلی گرم}$$

برای تعیین مقدار Te از منحنی فاز درصد وزنی تلور در فاز مایع گالیوم آرسناید که برحسب چگالی ناخالصی و دما مشخص شده بود استفاده شد [۱۵].

برای چگالی ناخالصی $n = 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ و دمای 840°C مقدار درصد وزنی Te برابر است با:

$$X_{\text{Te}} = 2 \times 10^{-5}$$

$$N_{\text{Te}} = X_{\text{Te}} (N_{\text{Ga}}(\text{حلال}) + 2N_{\text{As}})$$

$$= 2 \times 10^{-5} (1.434 \times 10^{22} + 2 \times 4903 \times 10^{-4})$$

$$= 3.064 \times 10^{-7} \text{ مول}$$

لذا مقدار Te لازم برابر خواهد بود با:

$$W_{\text{Te}} = N_{\text{Te}} M_{\text{Te}}$$

$$= 3.064 \times 10^{-7} \times 127.6$$

$$= 0.04 \text{ میلی گرم}$$

خانه دوم بوتله گرافیتی شامل مواد $\text{Ga}(\text{حلال}) + \text{GaAs}(\text{s}) + \text{Al}(\text{s}) + \text{Sn}(\text{s})$ بود که مقدار Sn در آن به صورت زیر محاسبه شد:

$$X_{\text{Sn}} = \frac{N_{\text{Sn}}}{N_{\text{Ga}}(\text{حلال}) + 2N_{\text{As}} + N_{\text{Sn}} + N_{\text{Al}}} \quad (5)$$

باتوجه به اینکه مقدار $N_{\text{Ga}}(\text{حلال})$ در معادله بالا در مقایسه با مقادیر دیگر مخرج کسر بسیار بزرگ است با تقریب نسبتاً خوبی می توان نوشت:

$$N_{\text{Sn}} = X_{\text{Sn}} N_{\text{Ga}}(\text{حلال}) \quad (6)$$

مقدار X_{Sn} از منحنی فاز [۱۶] درصد وزنی قلع در فاز سه تایی آلومینیوم گالیوم آرسناید که برحسب دما و چگالی ناخالصی مدرج شده است برای $n = 3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ و دمای

۸۳۴°C برابر است با:

$$X_{Sn} = 0.2$$

بنابراین از معادله ۶ داریم:

$$\begin{aligned} N_{Sn} &= 0.2 \times 1.434 \times 10^{-2} \\ &= 2.868 \times 10^{-3} \text{ مول} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W_{Sn} &= N_{Sn} M_{Sn} \\ &= 2.868 \times 118.69 \\ &= 340 \text{ میلی گرم} \end{aligned}$$

مقدار آرسنیک مورد نیاز خانه دوم بوته با استفاده از گالیوم آرسناید جامد بدست می آید:

$$X_{As} = \frac{N_{As}}{N_{Ga}(\text{حلال}) + 2N_{As} + N_{Sn}}$$

$$N_{As} = \frac{X_{As} (N_{Ga}(\text{حلال}) + N_{Sn})}{1 - 2X_{As}}$$

$$= 3.585 \times 10^{-4} \text{ مول}$$

$$\begin{aligned} W_{GaAs} &= N_{As} M_{GaAs} \\ &= 3.585 \times 10^{-4} \\ &= 52 \text{ میلی گرم} \end{aligned}$$

درصد وزنی آلومینیوم (X_{Al}) برای تشکیل لایه $Al_{0.4}Ga_{0.6}As$ در دمای رشد این لایه ($T=834^\circ C$) از منحنی فاز سه تایی آلومینیوم گالیوم آرسناید [۱۷] برابر 3.2×10^{-3} استخراج شده است. بنابراین جرم آلومینیوم برابر خواهد بود با:

$$\begin{aligned} N_{Al} &= X_{Al} (N_{Ga}(\text{حلال}) + 2N_{As} + N_{Sn}) \\ &= 3.2 \times 10^{-3} (1.434 \times 10^{-2} + 2 \times 3.585 \times 10^{-4} + 2.868 \times 10^{-3}) \\ &= 5.6 \times 10^{-5} \text{ مول} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W_{Al} &= N_{Al} M_{Al} \\ &= 5.6 \times 10^{-5} \times 26.98 \\ &= 15 \text{ میلی گرم} \end{aligned}$$

جدول ۱ جرم عناصر و مواد در هر یک از پنج خانه بوتۀ گرافیتی.

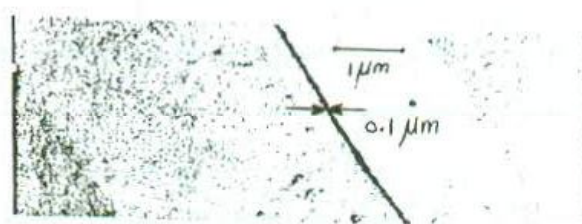
شماره	Ga	GaAs	Al	Te	Sn	Ge	si
	g	mg	mg	mg	mg	mg	mg
۱	۱٫۷	۱۲۰		۰٫۰۶			
۲	۱٫۷	۸۸٫۴	۲٫۵۵		۵۷۸		
۳	۱٫۷	۱۱۲٫۵					
۴	۱٫۷	۷۳	۲٫۲			۱۷	
۵	۱٫۷	۱۰۰				۴٫۴	

به همین ترتیب می توان مقدار وزنی مورد نیاز در فاز مایع را برای سه خانه دیگر از بوتۀ محاسبه کرد که در جدول شماره ۱ دیده می شود

تعیین مشخصات کمی و کیفی لایه ها

پس از خارج کردن زیر لایه از واکنشگر، ضخامت لایه ها با میکروسکوپ نوری اندازه گیری می شود. بجز لایۀ سوم که به علت نازک بودن آن (حدود ۰٫۱ میکرون) دیده نمی شد، بقیۀ لایه ها کاملاً قابل رویت بودند. از میکروسکوپ الکترونی برای بررسی یکنواختی و اندازه گیری ضخامت لایه ها نیز استفاده شد که نشان داد لایه گذاری با کیفیت خوبی در قسمتهای مختلف زیر لایه به وجود آمده ولی ضخامت لایۀ میانی هنوز قابل رویت نبود (شکل ۲).

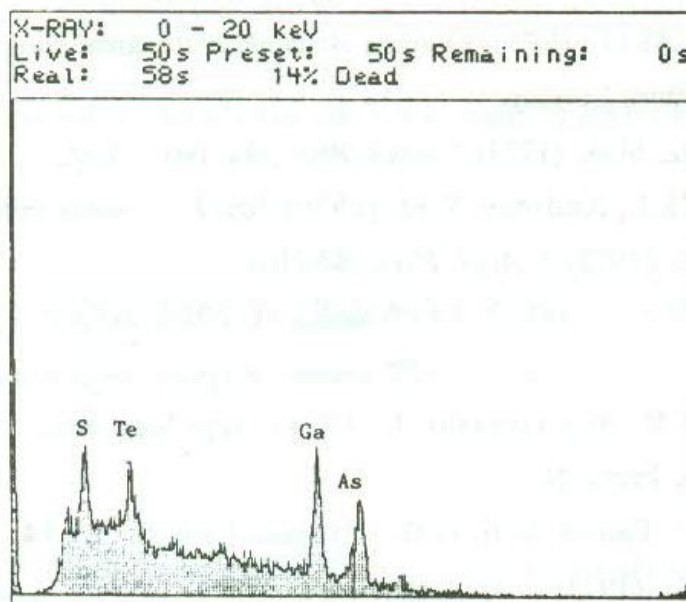
شکل ۳ عناصر تشکیل دهنده در لایه اول را نشان می دهد که با پرتو X حاصل از پراش پرتو الکترونی به دست آمده است. آزمایشات حاصل از PIXE اطلاعات دریافت شده با میکروسکوپ الکترونی را تأیید می کند. آزمایش TEM برای بررسی لایۀ میانی GaAs با ضخامت ۰٫۲ میکرون و میزان Al در فاز سه تایی آلومینیوم گالیوم آرسناید همراه با عدم جفت و جوری شبکه^۱ از سوی انستیتو نیمرسانای پکن انجام گرفت.



شکل ۲ (الف) ضخامت لایه پنجم و چهارم با استفاده از میکروسکوپ الکترونی ۱۷ و ۱۸ میکرون و (ب) ضخامت لایه سوم (GaAs) برابر ۰.۲ میکرون که با TEM اندازه گیری شده است.

نتیجه

با اینکه رشد برآراستی از فاز مایع یکی از ساده ترین فرایندهای موجود برای لایه گذاری برآراستی در نیم رساناهاست، ولی عدم شناخت خواص مواد موجود در فاز مایع با تغییرات دما امکان استفاده از آنرا نخواهد داد. انتخاب آهنگ کاهش دما به میزان یک دهم درجه سانتیگراد در دقیقه در زمان لایه گذاری GaAs و $Al_xGa_{1-x}As$ باعث می شود تا لایه ها با یک نواختی بسیار خوبی به وجود آیند. از طرفی کنترل ضخامت لایه ها به دمای تماس و طول زمان قرارگیری فاز مایع روی زیر لایه و نیز به میزان غلظت ترکیبات موجود در فاز مایع بستگی دارد [۱۸]. کنترل میزان چگالی ناخالصی Ge, Sn, Te با آگاهی از مقدار ضریب توزیع آنها انجام شده است [۱۹]. قلع که به عنوان ناخالصی نوع n مورد استفاده قرار گرفت و با داشتن ضریب توزیع کم آن ($k \approx 10^{-4}$)، ناخالصی در لایه برآراسته را می توان حد اکثر تا 10^{-18} cm^{-3} رساند. به عبارت دیگر با افزایش درصد



شکل ۳ عناصر موجود در لایه شماره ۱ که با پرتو X از میکروسکوپ الکترونی تعیین شده است.

وزنی بیشتر از این عنصر، چگالی ناخالصی نوع n افزایش نخواهد یافت [۲۰]. برای افزایش ناخالصی نوع n در گالیوم آرسناید از Te که دارای ضریب توزیع بیشتری است ($k \approx 1$) استفاده می شود و حداکثر ناخالصی تا 10^{19}cm^{-3} قابل حصول خواهد بود [۲۱]. آزمایشهای گوناگونی که روی نمونه ها انجام گرفت نشان داد که این لایه گذاری برآراستی با کیفیت خوبی انجام شده است.

مراجع

- 1 - Sze, S.M. (1988) "Phys of Semiconducto Devices" John Wiley, New York.
- 2 - Matthews, J.W. (1975) "Epitaxial Growth" Academic Press, New York.
- 3 - Moon, R.L. (1974) *J. Cryst Growth*, **27**, 62.
- 4 - Howes, M.J. (1986) "Gallium Arsenide" John Wiley, New York.
- 5 - Rezek, E.A. (1977) *Appl. Phys. Lett.*, **31**, 534.
- 6 - Shur, M. (1987) "GaAs Devices and Circuits", Plenum Press, Mew York.
- 7 - Nakano, Y. (1988) *IEEE J. Quantum Electronic*, **24**, 10.

- 8 - Sell, D., and Casey, H.C. (1974) *J. Appl. Phys.*, **45**, 2650.
- 9 - Driscoll, C.M.H.(1975) "*Gallium Arsenide and related compounds*", P.275
Inst. of Phys. London, .
- 10 - Afromowitz, M.A. (1973) *J. Appl. Phys.*, **44**, No 3 1292.
- 11 - Alferov, Zh.I., Andreev. V.M. (1970) *Sov. Phys. Semiconductors*, **4** No.3,
Pinkas, E. (1972) *J. Appl. Phys.*, **43** No.6.
- ۱۲- مراجعه شود به مرجع شماره ۱۷ صفحه ۱۲۴
- ۱۳- مراجعه شود به مرجع شماره ۱۷ صفحه ۱۲۳
- 14 - Panish, M.B., and Hayashi, I. (1974) "*Appl Solid State Science*", **4**, 235
Academic Press. New York.
- 15 - Casey, H.C., Panish, M.B. (1972) *J.Crystal Growth.*, **13-14**, 818.
- 16 - Panish, M.B. (1973) *J. Appl. Phys.*, **44**, 2659.
- 17 - Casey, H.C., and Panish, M.B. (1978) "*Heterostruture Lasers*" Part B. Page
91 Academic Press, New York.
- 18 - Hsieh, J.J. (1974) *J. Cryst. Growth.*, **27**, 49.
- 19 - Panjish, M.B.,(1973) *J. Appl. Phys.*, **44**, 2667.
- 20 - Panish, M. (1973) *J. Appl. Phys.*, **44**, 2659.
- 21 - Casey, H.C., and Panish, M.B. (1971) *J. Phys. Chem. Solids*, **32**, 571.