

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۱۹

پژوهشنامه علوم دفاعی، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱/۲۴

ص ص ۷۳ تا ۸۳

سنتز نانوساختار GaN بروی زیرلایه Si به روش نیمه صنعتی PACVD

مهدی عربعلی^۱، مهدی غلامپور^{۲*}

چکیده

نیتريد گاليم (GaN) از مواد اپتوالكترونيكي است كه كاربردهاي فراواني در عرصه الكترونيك دارد. در اين تحقيق روش ساخت نانوساختار GaN روي زيرلايه Si به روش رسوب بخار شيميايي به كمك پلاسما (PACVD) بررسي شده و خواص اين نانوساختار مورد ارزيابي قرار گرفته است. پيش ماده مورد استفاده تركيب GaCl_3 و گاز H_2 ، N_2 و Ar بود. از پلاسما براي بهينه سازي لايه نشاني در موارد مختلف استفاده شد. سازوكار رشد خصوصيات مورفولوژيكي و ساختار نانوساختار GaN رشد يافته روي زيرلايه Si با استفاده از دستگاه تصويربرداي FE-SEM و GIXRD بررسي و ساختاري بلوري از تركيب GaN در دماي 520°C مشاهده شده است.

واژگان کلیدی: GaN، نانوساختار، PACVD، پلاسما، رسوب بخار شيميايي از فاز بخار.

۱. دانشجوي مقطع كارشناسي، دانشگاه افسري امام علي (ع)، تهران، ايران.

۲. استاديوار و عضو هيات علمي گروه فيزيك، دانشكده علوم پايه، دانشگاه افسري امام علي (ع)، تهران، ايران.

ايميل (*نويسنده مسئول): Mahdi.gholampour@modares.ac.ir

مقدمه

با توجه به پیشرفت زندگی‌های امروزی و اهمیت وسایل و افزاره‌های اپتوالکترونیکی در جامع بشری نیمه‌هادی به دلیل داشتن خواص بسیار در دنیای الکترونیک نقش اساسی دارند (rakawa (2002)، (Di Carlo, A. (2001)). خانواده‌های نیتریدی گروه III دارای ویژگی‌های ممتاز از جمله سرعت، چگالی الکترونی و ولتاژ شکست بالا در قطعات و تجهیزات در قدرت و دمای بالا کار می‌کند. این خواص باعث کاربردهای الکترواپتیکی و اپتوالکترونیکی گروه نیمه‌هادی III-V شده است ((Pankove, J. I.(1998)). نیمه‌هادی‌های مبتنی بر III-nitride از پتانسیل بالایی برخوردار هستند که می‌تواند به عنوان ماده‌ای بخش برای تولید دستگاه‌های جدید نوری با طول موج کوتاه مانند دیودهای ساطع کننده نور (LED)، دیودهای لیزری (LED)، لیزرهای آبی و همچنین دستگاه‌های با عملکرد در دمای بالا مورد استفاده قرار گیرد. به دلیل ویژگی‌های الکترواپتیکی با کیفیت بالا با سرعت و تحرک حامل بالاتر نسبت به سایر نیمه‌هادی‌ها برای برنامه‌های متفاوت در زمینه‌های مختلف، به عنوان مثال، ساخت سلول‌های خورشیدی با راندمان بالا (Stampfl, C. (1999), (Valdueza-Felip, S. (2014), (Maruska, H. P.(1973)).

نانوساختارهای نیتريدگالیم دارای خواص نوری و الکتريکی مانند شکاف باند وسیع و مستقیم با اندازه ۳/۳۹eV است. این ساختار نیمه‌هادی GaN دارای رسانایی الکتريکی و حرارتی به‌طور نسبی بالا و مناسب مطابق با لبه طیف ماوراء بنفش است. بنابراین می‌تواند برای کل طیف مرئی قابل اجرا باشد ((Pankove, J. (1970), Avit, G (2014), Yu, Z (2005)). GaN به عنوان مواد حسگر نیز شناخته شده است که می‌تواند نقش اساسی را در تشخیص و معرفی مواد شیمیایی و بیولوژیکی در بر گیرد ((Pearnton, (2004), GaN می‌تواند به عنوان تقویت کننده مایکروویو برای سیستم‌های ارتباطی بی‌سیم باشد. نیمه‌هادی‌های گروه III-V پایداری به نسبت بالایی در برابر اشعه داشته و با بازدهی بالایی در مازول‌های فوتوولتاییک (PV) مسطح برای فضا استفاده می‌شوند ((D.J. Friedman,(2007) Sunkara,).

لایه‌نشانی نانوساختار GaN به روش رسوب بخار فیزیکی رشد همبافته ملکولی^۱ (MBE) از سال ۱۹۶۰ برای رشد با کیفیت بالا برای اتصال‌های چندگانه قابل کنترل است اما عیب‌های بزرگ در این روش شامل هزینه زیاد تولید آن بالا، نرخ لایه‌نشانی کم، زیرلایه و سنتز دمای بالا می‌باشد ((K.A. ، Dinescu, M. (1998)، Dubrovskii VG(2004), Grant VA(2007)). امروزه نانوساختار GaN به روش تبخیر حرارتی^۲ نیز سنتز شده است. ایجاد حرارت به جهت تبخیر ماده‌ی هدف با باریکه‌ی الکترون، فیلامنت، مقاومت الکتریکی و کوره انجام می‌گیرد. دمای بالا در این روش باعث افزایش ناخالصی و نابجایی‌های ناخواسته در محصول می‌شود. در صورتی که این معایب برای مواد نیمه‌هادی باعث کاهش کیفیت عملکرد خواهد شد ((Shekari L(2012), Shekari L(2012)). در روش سنتز به وسیله لیزر پالسی PLD، با پیش‌ماده Ga و N₂ لایه‌نشانی لایه نازک GaN انجام می‌شود ((Matsuki (2005)).

در سال ۱۹۹۹ ماروسکا^۳ و همکارانش رشد GaN روی یاقوت^۴ را گزارش دادند. در دهه‌ی ۱۹۹۰ به روش GaN.HVPE بصورت لایه‌ای سنتز شد ((Maruska P(1996)). پیش‌ماده‌ی بخار هالید شامل GaCl₃ و NH₃ است. البته باید از پیش‌ماده‌هایی با درجه خلوص بالا استفاده کرد که در آنها کربن وجود نداشته باشد. بنابراین روش رشد HVPE برای تولید فیلم نازک روش خوبی است. نتایج در این روش به مقدار فشار بخار و طلای مصرفی بستگی دارد. در این روش گزارشی از رشد نانوسیم GaN بدون کاتالیست، مشاهده نشده است (Hsieh C(2008)).

نانوساختار GaN پیش‌ماده GaCl₃ به روش رسوب گذاری از فاز بخار شیمیایی به کمک پلاسما (PACVD)^۵ در دمای ۵۲۰°C روی زیرلایه Si سنتز شد. از برتری‌های این روش این است که وجود پلاسما در این روش از درهم آمیختگی جلوگیری می‌کند و دمای واکنش را به دمایی پایین نسب به سایر روش‌ها می‌رساند. از میدان‌های الکتریکی شدید برای تولید مولکول‌ها

1. Molecular Beam Epitaxy
2. Thermal Evaporation
3. Maruska
4. Sapphire
5. Plasma Assisted Chemical Vapor Deposition

یونیزه شده در اطراف سطح استفاده می‌شود تا نیتروژن در اطراف قطعه کار بخش شود و سبب واکنش بهتر بین گالیم و نیتروژن می‌شود ((M. Shimada(2010). (Spies, HJ (1999).

استفاده از نانوساختارهای سیلیکون در ¹TFTها، ادغام سه بعدی این دستگاه‌ها با ساختارهای ²CMOS در سیستم‌های ترکیبی ((K.K. Likharev(2003). استفاده از زیرلایه Si شرایطی را ایجاد می‌کند تا عمل رسوب گذاری یکسان و یکنواخت ایجاد شود (Z. Yu(2005). محدودیت‌های مهم زیرلایه‌های دیگر مانند ³SiC یا ویفر یاقوت گران قیمت بودن و اندازه محدود آنها است که حتی از کاربرد گسترده تر GaN در LEDها جلوگیری می‌کند و نسبت به Si دارای رسانایی کمتر بوده و یاقوت کبود عایق الکتریکی است((Y. Sun(2016), W.S. Wong (1999)، (H.K. Cho(2008). زیرلایه Si مورد استفاده برای ترانزیستورهای پر قدرت هستند ((Kane(2014). از مشکلات دیگر می‌توان به هدایت حرارتی پایین یاقوت کمبود اشاره کرد. Si دارای سه برابر هدایت حرارتی نسبت به یاقوت کبود است بنابراین می‌تواند برای روشنایی بالا مفید باشد که طول عمر LEDهای GaN را هنگام کار در سطح بالا افزایش دهد ((Kane (2014).

روش تحقیق

ترکیب $GaCl_3$ با خلوص ۹۹/۹۹٪ به عنوان ماده اولیه برای تولید GaN فراهم گشت در این پژوهش از زیر لایه‌های Si با نوع n و p استفاده شد. زیر لایه‌های Si با قطر ۴ اینچ ساخت کشور چین با جهت (۱۰۰) تهیه گردید. از دلایل انتخاب این زیرلایه‌ها بجای زیرلایه‌های (مانند آلومینا) کاربرد الکترونیکی و قیمت پایین آن بود. نوع و جهت زیر لایه Si تأثیر چندانی در لایه‌نشانی ندارد. زیرا در هنگامی که در معرض پلاسما قرار می‌گیرند به دلیل نیروژندهی حالت تک بلوری خود را از دست می‌دهند و ساختار بی‌شکل به خود می‌گیرند. قوطی شیشه‌ای، پنس، قوطی پلاستیکی جهت نگهداری نمونه تهیه گردیدند.

1. Thin Film Transistor
2. Complementary Metal-Oxide Semiconductor
3. Silicon Carbide

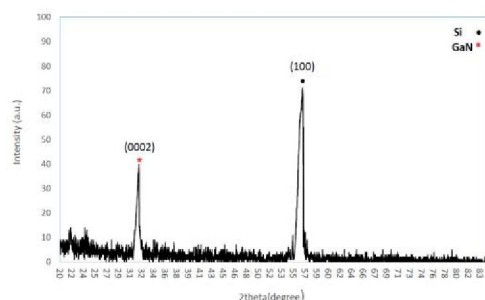
آزمون مشخصه‌یابی نانومواد و نانوساختار تا حد زیادی بر تکنیک‌های آنالیز سطحی و روش‌های مشخصه‌یابی سنتی توسعه یافته برای مواد توده‌ای مبتنی بوده است. در این تحقیق، برای بررسی و ارزیابی نانوساختار GaN سنتز شده به روش PACVD می‌توان از آزمون‌های مشخصه‌یابی مختلفی استفاده کرد که می‌توانیم به دستگاه^۱ FESEM که مجهز به سیستم آنالیز خطی EDS، سیستم آنالیز MAP و آزمون پراش پرتوی ایکس مخصوص لایه‌های نازک^۲ اشاره کنیم. نمونه‌ها توسط دستگاه PACVD ساخت شرکت پلاسما فناوری امین ایران پوشش داده شد. این دستگاه دارای ورودی و خروجی گاز و سیستم تخلیه هوا منبع تغذیه DC پالسی و جریان ۰ تا ۲A و ولتاژ ۰ تا ۸۰۰V بود. گازهای یونیزه شده آرگون، هیدروژن و نیتروژن در پلاسما استفاده شدند. پلاسما بین آند و کاتد تشکیل می‌شود. دمای کوره تا ۵۲۰ °C قابل تنظیم است و پس از ۲ ساعت عمل لایه‌نشانی نمونه‌ها از دستگاه جهت خنک شدن خارج شدند. دستگاه مورد استفاده برای بررسی نمونه‌های لایه‌نشانی شده دستگاه با مارک SIGMA/VP ساخت کشور آلمان و دستگاه X-maxoxford ساخت کشور انگلیس بود.

نتایج و یافته‌ها

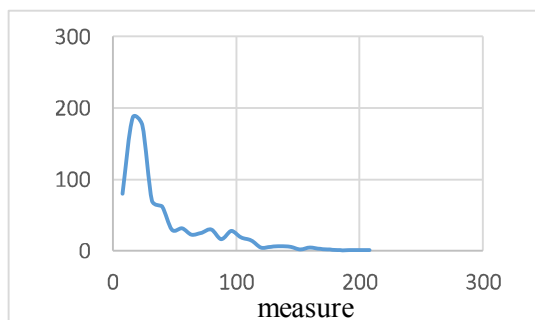
در این بخش از پژوهش نتایج اثر زیرلایه و بررسی مورفولوژی نانوساختار GaN مورد بررسی قرار می‌گیرد. به منظور بررسی ساختار بلوری پوشش GaN ایجاد شده، نمونه‌ها تحت آزمون GIXRD قرار گرفتند که نتایج آن در شکل ۱ نشان داده شده است. با در نظر گرفتن این شکل می‌توان مشاهده کرد که دو پیک مربوط به صفحات بلوری (۰۰۰۲) از فاز GaN و (۱۰۰) از فاز Si به ترتیب در زوایای ۳۱ و ۵۷ درجه قابل تشخیص هستند. حضور پیک مربوط به صفحه‌ی (۱۰۰) از فاز Si به دلیل ایجاد پوشش GaN روی بستر سیلیکونی است. وجود پیک مربوط به تصاویر میکروسکوپی از لایه‌نشانی صفحه‌ی (۰۰۰۲) از فاز GaN حاکی از تشکیل پوشش GaN روی بستر سیلیکونی است. همچنین عدم وجود پیک‌های پراش مربوط به صفحات بلوری دیگر این فاز می‌تواند نشان‌دهنده‌ی خاصیت جهت‌گیری ترجیحی بلورهای GaN در راستای صفحه‌ی (۰۰۰۲) باشد.

1. Field Emission Scanning Electron Microscopy

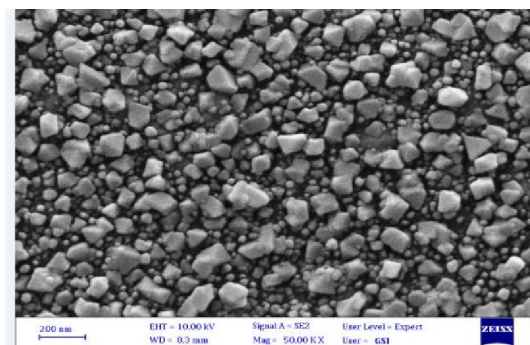
2. Grazing Incidence X-ray Diffraction



شکل ۱: آزمون پراش پرتو ایکس از نانوساختار GaN



شکل ۲: نانوساختار GaN لایه‌نشانی روی زیرلایه سیلیکون.



شکل ۳: فراوانی نانوساختار GaN روی زیرلایه سیلیکون.

شکل ۲ تصویر نانوساختار GaN تشکیل شده با اندازه ذرات متفاوت آورده شده است. که فراوانی این ذرات در شکل ۳ نمایش داده شده است.

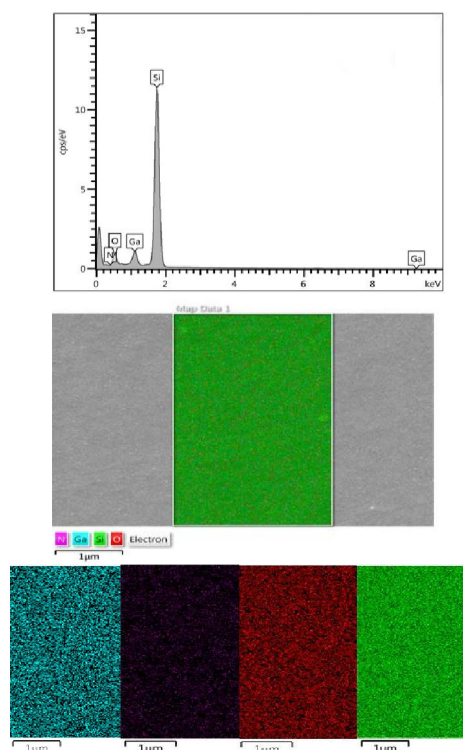
اثر گاز هیدروژن بر زیرلایه

از هیدروژن بعنوان گاز کاهنده برای جلوگیری از اکسیداسیون گالیم از سطح الکترودها استفاده شد اما نقش مهمتر هیدروژن تغییر کسری در داخل گازهای (H_2 و Ar ، N_2) را به عنوان ابزار شکل

دهنده نانوساختارهای رشد یافته معرفی کرده و در نرخ رشد GaN تغییر داده است. اتم‌های هیدروژن به راحتی به سطح نیمه‌هادی Si متصل می‌شوند. سپس جذب Si و نیتروژن می‌شوند و با تشکیل پیوند H-N به عنوان سایت‌هایی هسته‌ای برای رشد GaN عمل می‌کنند (Myers(1998)، Zhonghai(1996)، Shimomura(1992)).

بررسی اثر پلاسما و گاز نیتروژن بر زیرلایه

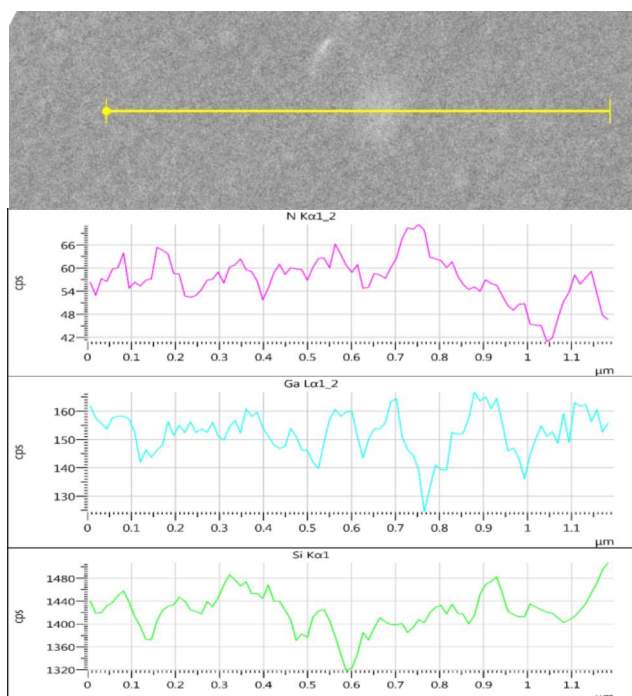
وجود پلاسما بر چرخه کاری تأثیر می‌گذارد و با ورود نیتروژن سطح زیرلایه بی‌شکل می‌شود. نیتروژن در سطح زیرلایه نفوذ می‌کند کشش و فشارهایی ایجاد می‌کند. در نتیجه سایت‌های جوانی زنی در سطح زیرلایه به وجود می‌آید. در شکل ۴ آنالیز Map لایه‌نشانی روی زیرلایه سیلیکون را نشان داده شده است. این طیف اطلاعاتی را از توزیع عناصر در قسمتی از تصویر تهیه شده را نشان می‌دهد.



شکل ۴ طیف Map از نانوساختار GaN روی زیرلایه سیلیکون.

آنالیز خطی EDS

با حذف زیر لایه این مقدار نشان داده شده مبنی بر افزایش نیتروژن و گالیم بدیهی نیست. هماهنگی و سازگاری مقدار Ga و N₂ در نمودار تاییدی بر سنتز GaN است. در شکل ۵ آنالیز خطی EDS از نانوساختار تهیه شده است. مقدار نیتروژن و گالیم با افزایش عمق افزایش می‌یابد. چون تصویر به صورت عمودی از بالا تهیه می‌شود در نتیجه با افزایش نیتروژن مقدار Ga کاهش چشم‌گیری داشته است.



شکل ۵ آنالیز خطی EDS از سطح نانوساختار GaN

بحث و نتیجه‌گیری

نانوساختار GaN از ترکیب‌های پیش‌ماده‌های فلز Ga و گاز Cl_۲ به روش PACVD روی زیرلایه Si در دمای 520°C را نشان دادیم. از زیرلایه Si به عنوان زیرلایه‌ی مناسب نسبت به سایر زیرلایه‌ها در رشد نانوساختار استفاده شد. نانوساختارهای بدست آمده دارای مورفولوژی مناسب بودند. این نانوساختار به دلیل داشتن خواص بسیار می‌تواند در شناسایی مواد شیمیایی و بیولوژیکی به کار گرفته شود و کاربردهای فراوانی را در ابزار و وسایل الکترواپتیکی و اپتوالکترونیک در بر گیرد. عدم

وجود امکانات کافی برای لایه‌نشانی نانوساختار در دستگاه پیشرفته‌تر از مشکلات مطالعاتی این تحقیق بود.

فهرست منابع

- rakawa, Y. (2002). "Progress in GaN-based quantum dots for optoelectronics applications". IEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 8 (4):823–832.
- Di Carlo, A. (2001). "Tuning Optical Properties of GaN-Based Nanostructures by Charge Screening". Physica Status Solidi A. 183 (1): 81–85.
- Pankove, J. I (1998)..<, & Moustakas, T. D. (Eds.). Gallium Nitride (GaN).
- Stampfl, C. (1999), & Van de Walle, C. G.. Density-functional calculations for III-V nitrides using the local-density approximation and the generalized gradient approximation. Physical Review B.
- Valdueza-Felip, S (2014)..<, Mukhtarova, A., Grenet, L., Bougerol, C., Durand, C., Eymery, J., & Monroy, E. Improved conversion efficiency of as-grown InGaN/GaN quantum-well solar cells for hybrid integration. Applied Physics Express.
- Maruska, H. P(1973)..<, Stevenson, D. A., & Pankove, J. I.. Violet luminescence of Mg-doped GaN. Applied Physics Letters.
- Pankove, J. (1970), Berkeyheiser, J. E., Maruska, H. P., & Wittke, J. Luminescent properties of GaN. Solid State Communications.
- Avit, G (2014). , Lekhal, K., André, Y., Bougerol, C., Réveret, F., Leymarie, J.,... & Trassoudaine, A.. Ultralong and defect-free GaN nanowires grown by the HVPE process. Nano letters, 14(2), 559-562.
- Yu, Z (2005), Yang, Z., Wang, S., Jin, Y., Liu, J. G., Gong, M., & Sun, X.. Growth of GaN Nanorods via Au Catalyst-Assisted CVD. Chemical Vapor Deposition, 11(10), 433-436.
- Pearson, S(2004). J., Kang, B. S., Kim, S., Ren, F., Gila, B. P., Abernathy, C. R.,... & Chu, S. N. G.. GaN-based diodes and transistors for chemical, gas, biological and pressure sensing. Journal of Physics: Condensed Matter, 16(29), R.۹۶۱
- Sunkara, (2007) M. K., Chandrasekaran, H., & Li, H.. U.S. Patent No. 7,238,232. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- D.J. Friedman(1998), J.F. Geisz, S.R. Kurtz and J.M. Olson In : Proc. 2nd World Conf. on Photovoltaic Energy Conversion (IEEE, 1998), p.3.

Grant VA(2007), Campion RP, Foxon CT, Lu W. Chao S. Larkins EC. Optimization of RF plasma sources for the MBE growth of nitride and dilute nitride semiconductor material. *Semicond Sci Technol* 2007;22:15-9.

Dubrovskii VG(2004). *Nucleation theory and growth of nanostructures*. Springer Berlin Heidelberg;

Dinescu, M. (1998), et al. "GaN thin films deposition by laser ablation of liquid Ga target in nitrogen reactive atmosphere." *Applied surface science* 127: 559-563

K.A. Bertness(2011), N.A. Sanford, A.V. Davydov, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 17 (2011) 847–858

Shekari L(2012), Ramizy A, Omar K, Hassan HA, Hassan Z. High-quality GaN nanowires grown on Si and porous silicon by thermal evaporation. *Appl Surf Sci* 2012;263:50-3.

Matsuki (2005), Kim T-W, Ohta J, Fujioka H. Heteroepitaxial growth of gallium com le plates by pulsed laser deposition. *Solid State Commun* 2005;126:338-41.

mica Ng(2006), D. K. T., L. S. Tan, and M. H. Hong. "Synthesis of GaN nanowires on gold-coated substrates by pulsed laser ablation." *Current Applied Physics* 6.3 (2006): 403-406.

M. Shimada(2010) et al., Synthesis of Gallium Nitride Nanoparticles by Microwave Plasma-Enhanced CVD, *Chem. Vap. Deposition* 16 (2010) 151-156.

Spies, HJ (1999). Larisch, B; Brusky, U; "Plasma nitriding of stainless steels at low temperatures". *Surface and Coatings Technology*. 116: 205–211. [doi:10.1016/S0257-8972\(99\)00084-5](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(99)00084-5).

Maruska P(1996). A brief history of GaN blue light emitting diodes. *Adv Mater Res* 1996:1-7.

Hsieh C(2008), Chang M, Chien Y. Chou Chen L, Chen C. Coaxial metal oxide semiconductor (MOS) Au/Garor/GaN Nanowires. *Mater Sci* 2008;1008-12.

K.K. Likharev(2003), Neuromorphic CMOL circuits, 2003 third IEEE conference on nanotechnology, 2003, IEEE-NANO 2003 (2) (2003) 339–342 <https://doi.org/10.1109/NANO.2003.1231787>.

Z. Yu(2005), Z. Yang, S. Wang, Y. Jin, J.G. Liu, M. Gong, X. Sun, Growth of GaN nanorodsvia Au catalyst-assisted CVD, *Chem. Vap. Deposition* 11 433–436.

Y. Sun(2016), K. Zhou, Q. Sun, J. Liu, M. Feng, Z. Li, Y. Zhou, L. Zhang, D. Li, S. Zhang,M. Ikeda, S. Liu, H. Yang, Room-temperature continuous-wave electrically injected InGaNbased laser directly grown on Si, *Nat Photonics*, 10595.

W.S. Wong (1999), T. Sands, N.W. Cheung, M. Kneissl, D.P. Bour, P. Mei, L.T. Romano, N.M. Johnson, Applied Physics Letters 75 1360–1362.

H.K. Cho(2008), S.-K. Kim, D.K. Bae, B.-C. Kang, J.S. Lee, Y.-H. Lee, IEEE Photonics Technology Letters 20 2096–2098.

Kane(2014), Matthew H., and Nazmul Arefin. "Gallium nitride (GaN) on silicon substrates for LEDs." Nitride Semiconductor Light-Emitting Diodes (LEDs). Woodhead Publishing, 2014. 99-143.

Shimomura (1992), Hirofumi, Yoshitaka Okada, and Mitsuo Kawabe. "Low dislocation density GaAs on vicinal Si (100) grown by molecular beam epitaxy with atomic hydrogen irradiation." Japanese journal of applied physics 31.5B: L628.

Yu, Zhonghai(1996), et al. "The effect of atomic hydrogen on the growth of gallium nitride by molecular beam epitaxy." Applied physics letters 69.18 :2731-2733.

Myers(1998), T. H., et al. "Influence of growth conditions, inversion domains, and atomic hydrogen on growth of (0001_) GaN by molecular beam epitaxy." Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena 16.4 : 2261-2266.

